

TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE
DES
MACHINES
DYNAMO-ÉLECTRIQUES

TRAITÉ THÉORIQUE ET PRATIQUE
DES
MACHINES
DYNAMO-ÉLECTRIQUES

PAR

SILVANUS P. THOMPSON

Directeur du Collège technique de Finsbury, à Londres

TRADUIT ET ADAPTÉ DE L'ANGLAIS SUR LA QUATRIÈME ÉDITION

PAR

E. BOISTEL

Electricien

Expert près le Tribunal de la Seine

DEUXIÈME ÉDITION FRANÇAISE

PARIS

LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET C^{ie}, ÉDITEURS
43, RUE DES SAINTS-PÈRES, 43
MÊME MAISON A LIÈGE, RUE DES DOMINICAINS, 7

1894

Tous droits réservés.

PRÉFACE

La première édition française, de cet ouvrage est depuis longtemps épuisée. Si nous avons néanmoins retardé la publication de celle-ci jusqu'à l'apparition de la quatrième édition anglaise, c'est que, malgré une coordination très soignée des éléments successivement ajoutés, les éditions intermédiaires n'étaient qu'un acheminement vers un remaniement général qui s'imposait à bref délai. Nous en étions avisé, et, pour l'excellence même du livre, nous ne voulions le présenter que parfaitement homogène.

L'œuvre primitive est en effet profondément modifiée.

« La conception du circuit magnétique qui, dans ces dernières années, a révolutionné l'étude et la construction des machines dynamo-électriques devient la base de tout l'édifice » ; son introduction dans la théorie est la grande ligne de démarcation entre cette édition et la précédente.

Le développement pris depuis quelque temps par les courants alternatifs, l'intérêt qu'ils présentent et l'avenir qui leur est réservé grâce aux transformateurs et aux moteurs à courants

polyphasés exigeaient d'autre part une notable extension de cette partie du sujet. Il y est largement pourvu.

Il est enfin un point de vue spécial auquel s'est placé l'Auteur et qui caractérise cette nouvelle édition ; c'est le côté mécanique de la question. On le retrouve à chaque pas, si bien que nous avons longtemps hésité entre le respect du titre primitif et une traduction plus littérale du titre anglais « *Dynamo-Electric Machinery* », *Machinerie* ou *Mécanique dynamo-électrique*.

Un des objectifs de l'ouvrage est en effet de combler une lacune depuis longtemps sentie, sinon nettement formulée, par les observateurs attentifs du mouvement électrique : — à de rares exceptions près, les électriciens ne sont pas assez mécaniciens, et les mécaniciens ne sont pas suffisamment électriciens pour pouvoir, non seulement résoudre indépendamment les uns des autres et d'une façon complètement satisfaisante les multiples problèmes que soulèvent les applications électriques, mais même collaborer aussi utilement que possible à leur solution.

L'étroite connexité qui relie ces deux branches parallèles de l'industrie moderne s'impose d'autant plus aujourd'hui, que l'électricité a quitté le domaine des applications isolées et relativement restreintes pour prendre rang dans la grande industrie, sous forme de stations centrales ou de distribution de l'énergie, mettant en œuvre toutes les ressources de l'art de l'ingénieur. Une dynamo n'est plus un simple outil supplémentaire ajouté à une installation déjà existante ; elle devient, par sa destination et ses dimensions, l'objet immédiat d'une installation mécanique et sollicite directement l'expérience des mécaniciens. Aussi assistons-nous à une évolution très accentuée au moins en France, où la construction des machines dynamos passe insensiblement des mains de constructeurs spéciaux dans

celles des grands établissements de mécanique générale qui y trouvent, dans un ensemble de travaux dignes d'eux, l'utilisation de leur puissant outillage.

Dans ces conditions, mécaniciens et électriciens sont plus que jamais obligés de confondre leurs études. — Ils puiseront, les uns et les autres, dans cet ouvrage le complément nécessaire de leur instruction, et de cette communauté de vues sortira probablement, l'expérience aidant, un choix judicieux, suivant les circonstances, entre les trois systèmes d'exploitation de stations centrales qui paraissent s'être jusqu'ici respectivement localisés en Angleterre, en Allemagne et en Amérique. « Les ingénieurs anglais se sont en effet appliqués à développer des types spéciaux de moteurs mécaniques à grande vitesse, directement accouplés avec les dynamos. En Allemagne, l'industrie a suivi une marche inverse en construisant des dynamos à très faible vitesse angulaire directement attelées sur des types existants de machines à vapeur à allure lente, tandis que l'Amérique, malgré son esprit d'innovation et son entreprenante hardiesse, en est restée jusqu'à ces derniers temps aux moteurs à basse vitesse angulaire, actionnant, par l'entremise de renvois et de poulies, des dynamos à grande vitesse. »

Si, de ces données générales, on passe aux remaniements et additions de détail, on verra que les méthodes algébrique et graphique, applicables au traitement des divers problèmes concernant les dynamos et précédemment séparées, ont été confondues dans cette nouvelle édition. — Un grand développement a été donné à l'étude des puissantes machines employées dans les stations centrales. — Des renseignements relatifs à l'électro-métallurgie ont été ajoutés. — La description des machines à courants alternatifs a été complètement distraite de celle des machines à courant continu, et une large place a

été attribuée aux transformateurs de toute nature, ainsi qu'aux moteurs à courants alternatifs et au transport de l'énergie. — L'ouvrage s'est complété par des Notes historiques très consciencieusement étayées sur de nombreuses références bibliographiques ; — des indications sur la conduite des dynamos et les accidents susceptibles de se produire y ont été incorporées ; — et un court appendice a été consacré à la définition des principales unités. — Enfin rien n'a été négligé en ce qui concerne les données de construction des induits, arbres, carcasses, collecteurs, les bobinages et autres détails exigeant des connaissances tant mécaniques qu'électriques.

Dans un ordre scientifique plus élevé, ce qui se dégage de plus saillant de la lecture de cet ouvrage, c'est le principe de la conservation de l'énergie, qui domine l'étude de toutes les sciences physiques, mais semble en quelque sorte s'idéaliser sous la forme immatérielle des phénomènes électro-magnétiques.

« Il est en effet difficile, dit l'Auteur, de trouver un sujet
 « scientifique qui illustre plus complètement le principe de
 « l'action et de la réaction que la machine dynamo-électrique.
 « Quelle que soit la question considérée, le point essentiel à
 « comprendre est l'existence d'une réaction d'un ordre quel-
 « conque :

« Dans l'induit mobile de la dynamo, la production même
 « du courant développe un effort opposé, et le travail de géné-
 « ration du courant est effectué par l'entraînement de la ma-
 « chine contre cette réaction mécanique.

« Dans le moteur, la production même du mouvement déve-
 « loppe une force contre-électromotrice qui tend à empêcher
 « l'alimentation de ce moteur.

« Dans le transformateur, le courant développé par les
 « variations magnétiques dans le noyau tend à s'opposer à
 « ces variations.

« Dans la bobine de self-induction, les changements d'aimantation résultant des ondes de courant développées tendent à détruire ces ondes.

« Dans le moteur à courants alternatifs, la partie mobile tend à se mouvoir de manière à annuler les changements de polarité magnétique qui la sollicitent.

« La loi classique formulée par Lenz sur les phénomènes magnéto-électriques établit qu'un courant induit est toujours tel que, en vertu de son action électro-magnétique, il tend à arrêter le mouvement qui lui donne naissance. A cette loi l'Auteur en a ajouté une autre (p. 576), inverse et aussi générale, qui s'applique au moteur électrique et peut s'énoncer en ces termes : — le mouvement produit est toujours tel que, en raison même des inductions électro-magnétiques qu'il développe, il tend à arrêter le courant. Ce ne sont là d'ailleurs que deux formes d'une loi encore plus générale, applicable à tout système électro-magnétique et qui peut se formuler ainsi : — A toute action sur un système électro-magnétique, qui, en produisant un changement dans sa configuration ou son état, implique une transformation d'énergie, s'opposent des réactions tendant à maintenir sans changement la configuration ou l'état de ce système. »

Tel est l'enseignement fécond au point de vue de la dynamique générale qu'il faut retenir de cette étude.

En donnant tous nos soins à la traduction, et en l'adaptant, aussi bien comme conceptions que comme notations, symboles, unités et terminologie, à un besoin de précision scientifique plus grand chez nous que chez nos voisins, nous n'avons pas voulu cependant pousser trop loin le rigorisme et en faire une œuvre française. Aussi avons-nous laissé subsister en maint endroit un peu de ce *jargon* scientifique si

familier aux Anglais et qui, en cherchant la brièveté, a le défaut d'être trop concret. L'élégance et la clarté n'y gagnent rien, et la netteté scientifique y perd; mais les puristes nous pardonneront ce sacrifice à la couleur locale, et la valeur intrinsèque de l'œuvre originale fera passer par-dessus ces incorrections.

E. B.

1^{er} septembre 1893.

NOTA. — Nous renvoyons immédiatement le lecteur aux Errata (page xxiii) où il trouvera deux rectifications importantes de traduction qui nous ont échappé en quelques endroits dans la correction : — l'une porte sur le mot anglais « *effective* » qu'une nouvelle attribution donnée au mot français « efficace » oblige à traduire différemment; — l'autre sur le mot « *alternation* » par lequel les Anglais entendent la « *période* » entière et non l'alternativité.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages.
PRÉFACE	v
TABLE DES MATIÈRES	xi
ERRATA	xxx

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION	1
------------------------	---

CHAPITRE II

NOTES HISTORIQUES	6
-----------------------------	---

CHAPITRE III

THÉORIE PHYSIQUE DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES	21
Organes des Machines dynamo-électriques	30
Éléments essentiels d'une dynamo	33
Machines à courant continu	34
Induits ou Armatures	34
Noyaux des induits	43
Points fondamentaux dans un projet d'étude de machine.	43
Inducteurs : Modes d'excitation du champ magnétique.	46
Dynamo Magnéto-électrique ou Magnéto-dynamo	46
Dynamo à Excitation indépendante.	47
Dynamo en Série ou Series-dynamo.	49
Dynamo en Dérivation ou Shunt-dynamo	50
Dynamo Auto-excitatrice à circuit séparé	51
Modes de Combinaisons.	53
Combinaisons pour Différence de potentiel constante.	55
Excitation en Série et par Circuit indépendant.	55
Excitation en Série avec adjonction de Machine magnéto-électrique	56

	Pages.
Excitation en Série et en Dérivation	56
Excitation en Série et en Longue dérivation	57
Excitation en Série et par Bobine séparée	59
 CHAPITRE IV 	
ACTIONS ET RÉACTIONS ÉLECTRIQUES DANS L'INDUIT	60
Induction dans un champ magnétique horizontal uniforme	63
Mesure de la Force électromotrice	66
Méthodes de S. P. Thompson	66
Méthode de Mordey	67
Méthode de Swinburne	70
Méthode de Joubert	70
Méthode statique de Mordey	71
Réactions dues au Courant dans l'induit	71
Tendance du courant d'induit à l'Aimantation transversale	72
Points neutres	79
Causes d'Étincelles	80
Action démagnétisante de l'induit	85
Résistance apparente	90
Courants parasites	91
Division des masses métalliques	91
Courants parasites dans les Pièces polaires	93
Effets d'Induction mutuelle	96
Retard dû à la Self-induction	97
Moyen de remédier aux Troubles par induction	97
 CHAPITRE V 	
ACTIONS ET RÉACTIONS MÉCANIQUES DANS L'INDUIT	99
Couple mécanique et Vitesse	102
Puissance des dynamos et des moteurs	104
Relation entre le Couple mécanique et le Courant	105
Effort sur les conducteurs de l'induit	106
Nécessité d'Entraînement mécanique de l'induit	108
Courbes du Couple mécanique	109
Puissance dissipée	111
Rendement des dynamos et des moteurs	112
Relation entre les Dimensions d'une machine, sa Puissance et son Rendement	112
 CHAPITRE VI 	
PRINCIPES MAGNÉTIQUES ET PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU FER	116
Définitions et Propriétés générales	117
Unité de Magnétisme	117

TABLE DES MATIÈRES

XIII.

	Pages.
Intensité de Champ magnétique	117
Lignes magnétiques	118
Flux de force	118
Polarité	119
Règles électromagnétiques	120
Force magnétomotrice	120
Intensité de la Force magnétique en un point quelconque dans une longue bobine magnétisante	121
Intensité de la Force magnétique au centre d'un anneau simple	122
Force exercée sur un conducteur dans un champ magnétique	123
Travail effectué par un conducteur en mouvement dans un champ magnétique	124
Induction magnétique	124
Perméabilité magnétique	125
Intensité d'aimantation et Susceptibilité magnétique	127
Courbes magnétiques	128
Mesure de la Perméabilité	129
Méthodes Magnétométriques	130
Méthodes de Balance	130
Méthodes d'Induction	130
Méthode de l'Anneau	130
Méthode du Barreau	131
Méthode du Barreau divisé	132
Méthodes d'Arrachement	133
Méthode de l'Anneau divisé	133
Méthode de la Baguette divisée	134
Méthode de la Balance de traction	135
Résultats d'expériences sur Divers échantillons de fer	136
Limites de l'Aimantation et de la Perméabilité	143
Effets des Actions externes sur l'Aimantation	146
Effet des Espaces d'air dans un circuit magnétique	146
Effet des Joints	148
Effet des Actions mécaniques	152
Effet des Vibrations	152
Effet de la Chaleur	152
Magnétisme résiduel ou rémanent	154
Hystérésis	155
Cycles d'aimantation	156
Aimantation progressive	160
Expression de la Loi de l'électro-aimant	160
Formule de Frölich	161
Théorie moléculaire du Magnétisme, d'Ewing	163
Réductivité magnétique	163

CHAPITRE VII

	Pages.
LE CIRCUIT MAGNÉTIQUE.	165
Dérivations magnétiques.	176
Calcul des Dérivations.	180
Exemple de calculs de dérivations magnétiques	182
Conductibilité au Flux utile	183
Conductibilité au Flux perdu.	185
Calcul final du Coefficient de dérivation.	188

CHAPITRE VIII

FORMES D'INDUCTEURS.	190
------------------------------	-----

CHAPITRE IX

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DE LA DYNAMO	201
Machines Magnéto et à Excitation indépendante. — Machines en Série. — Machines en Dérivation	201
Symboles et Notations.	202
Equation fondamentale de la dynamo	203
Ondulations de la Force électromotrice dans un induit à une seule spire	207
Ondulations dans un induit à circuit fermé divisé en sections.	208
Calcul des Ondulations de la Force électromotrice dans les induits à circuit fermé.	211
Mesure de l'Ondulation	213
Effet d'un Défaut de simultanéité dans la Commutation	215
Mesure de Φ	215
Machine Magnéto et machine à Excitation indépendante	217
Relation entre la Vitesse et la Force électromotrice. — Tours morts	218
Potentiel aux bornes d'une dynamo. — Volts perdus.	219
Relation entre la Force électromotrice totale et la Différence de potentiel aux bornes	220
Dynamo à Excitation indépendante.	222
Caractéristique de la machine Magnéto et de la dynamo à Excitation indépendante.	223
Rendement et Coefficient économique des machines dynamos.	224
Variation du Coefficient économique avec le Courant.	227
Dynamo en Série.	228
Coefficient économique de la dynamo en Série.	228
Dynamo en Dérivation.	229
Coefficient économique de la dynamo en dérivation	231
Règles pratiques pour un projet économique	234

TABLE DES MATIÈRES

xv

CHAPITRE X

	Pages.
COURBES CARACTÉRISTIQUES.	236
Caractéristiques de Puissance en chevaux-vapeur	240
Caractéristiques externes ou courbes de Potentiel aux bornes.	242
Caractéristiques de la dynamo en Série	244
Relation entre la Caractéristique et la Vitesse	247
De la Résistance dans la caractéristique.	248
Relation entre la Caractéristique et l'Enroulement des induc- teurs et de l'induit	249
Courant critique d'une dynamo en Série.	251
Caractéristique d'une dynamo en Dérivation.	252
Courbe du Courant total dans l'induit.	255
Caractéristique totale de la dynamo en Dérivation.	256
Caractéristique d'une dynamo en Dérivation avec Aimantation permanente.	256
Contraste entre la machine en Série et la machine en Dériva- tion	260
Applications diverses des Caractéristiques.	262
Détermination de la Vitesse la plus faible possible pour une Dynamo alimentant un foyer à arc.	262
Emploi de la Caractéristique pour expliquer l'Instabilité de la Lumière à arc	263
Relation entre la Caractéristique et les Dimensions d'une machine.	264
Application des Caractéristiques aux Dynamos employées à la Charge des accumulateurs.	265

CHAPITRE XI

DYNAMOS A DIFFÉRENCE DE POTENTIEL CONSTANTE.	267
Conditions de fonctionnement	267
Régulateur d'Edison.	269
Dynamos auto-régulatrices	270
Théorie de l'Auto-Régulation.	271
Cas I. Bobines régulatrices en série et Aimants permanents.	272
Cas II. Dynamo en série et Bobines d'excitation indépendante.	275
Démonstration géométrique des cas I et II.	276
Cas III. Dynamo en série et Force électromotrice indépen- dante agissant dans le circuit principal	277
Cas IV. Bobines régulatrices en série et Bobines excitatrices en dérivation : Enroulement compound	278
Montage des Bobines destinées au compoundage.	283
Réalisation pratique du Compoundage	284
Projet de machine à Potentiel constant	285

	Pages.
Délai nécessaire au Compoundage	285
Caractéristique de la dynamo Compound	285
Caractéristiques Externes des dynamos auto-régulatrices	288
Observations d'Esson	289

CHAPITRE XII

ENROULEMENT DES INDUITS. — THÉORIE DES CONNEXIONS.	291
Diagrammes d'Enroulements développés.	297
Formules de Bobinage pour induits à circuit fermé.	303
Groupement en parallèle.	304
Bobinage hélicoïdal ou imbriqué.	304
Bobinage ondulé	304
Groupement en série	305
Groupements mixtes.	305
Enroulements en tambour.	306
Tambours bipolaires	306
Tambours multipolaires	312
Enroulements en Anneaux multipolaires	320
Enroulements en Disques	324

CHAPITRE XIII

CONSTRUCTION PRATIQUE DES INDUITS	328
Noyaux	328
Noyaux dentés et lisses	331
Noyaux reperçés	332
Bras et Manchons d'entraînement.	333
Isolation des Noyaux de fer	338
Ventilation des Induits.	339
Equilibre des Induits	341
Conducteurs	341
Coins d'entraînement	341
Frettes.	342
Bobinage des Induits	343
Bobinage des Anneaux	345
Bobinage des Tambours.	348
Tambour Siemens.	348
Tambour Edison	351
Tambour Edison-Hopkinson	353
Tambours Crompton et Swinburne	354
Tambour Kapp	357
Tambour Eickemeyer	357
Tambour Alioth	358

TABLE DES MATIÈRES

XVII

CHAPITRE XIV

	Pages.
COLLECTEURS, BALAIS ET PORTE-BALAIS	359
Machines à courant continu	360
Collecteurs	360
Touches	360
Isolation	360
Construction	361
Balais	365
Porte-Balais et Colliers	368
Alternateurs : Collecteurs et Balais	373

CHAPITRE XV

ÉLÉMENTS MÉCANIQUES D'UN PROJET DE DYNAMO ET DE SA CONSTRUCTION	374
Pression sur les coussinets	374
Action gyrostatique de l'Induit	375
Collets, Portées, Tourillons	376
Arbres	378
Coussinets et Paliers	379
Coussinets cannelés	380
Coussinets convexes	380
Graisseurs	381
Clavettes, Rainures et Méplats	383
Poulies et Courroies	383
Plaques de fondation	383
Accouplement	384
Montage des induits	384

CHAPITRE XVI

ÉLÉMENTS PHYSIQUES D'UN PROJET DE DYNAMO. — CALCUL DU BOBINAGE.	385
Calculs électriques	391
Calcul des Volts perdus dans l'induit	391
Calcul du Courant passant par une dérivation	391
Calcul du Courant total circulant dans l'Induit	391
Calcul du Diamètre de fil nécessaire pour l'Induit	391
Calcul de la Force électromotrice totale engendrée dans l'induit d'une dynamo	391
Calcul du nombre de Conducteurs de l'Induit	392
Calcul de la Force électromotrice dans l'Induit	392
Calculs de Rendement	392
Calcul de la Puissance dissipée dans une dynamo	392
Watts dissipés dans la bobine d'induit	392
Watts dissipés dans une bobine en série	392

	Pages.
Watts dissipés dans une bobine en dérivation	392
Watts dissipés par courants parasites.	392
Watts dissipés par hystérésis magnétique.	392
Calcul du Rendement électrique	392
Calcul du Rendement commercial	393
Calculs magnétiques	393
Calcul du Flux magnétique à travers l'Induit	393
Calcul de l'Induction magnétique spécifique dans un noyau de fer.	393
Calcul de la Section droite de fer nécessaire pour laisser passer un flux de force donné.	393
Marge pour les Dérivations magnétiques	394
Calcul de la Perméabilité du fer à un degré quelconque d'aimantation	394
Calculs relatifs au Circuit magnétique.	395
Loi fondamentale du Circuit magnétique	395
Calcul de la Force électromotrice nécessaire pour faire passer un flux de force donné à travers une résistance magnétique déterminée.	395
Calcul de la Résistance magnétique d'un noyau de fer	395
Calcul de la Résistance magnétique totale du circuit magnétique d'une dynamo.	395
Calcul des Ampères-tours de force magnétisante nécessaires pour faire passer le flux magnétique voulu à travers la résistance du circuit magnétique	396
Estimation des Ampères-tours additionnels nécessaires pour compenser l'action démagnétisante du courant d'induit quand les balais sont décalés en avant	397
Exemples de Calculs appliqués à des Machines à courant continu. .	397
Dynamo Edison-Hopkinson	398
Induit	399
Inducteurs	399
Données pour le Calcul des résistances dans le circuit magnétique.	401
Noyau d'induit	401
Entrefer	401
Branches d'inducteurs.	401
Culasse.	401
Pièces polaires	401
Calculs relatifs à cette machine.	401
Dynamo « Phénix » (type supérieur)	403
Induit.	403
Inducteurs	403
Données pour le Calcul des résistances du circuit magnétique	404
Noyau d'induit	404
Entrefer	404
Branches d'Inducteurs.	404

TABLE DES MATIÈRES

xix

	Pages.
Culasse	404
Pièces polaires	405
Calculs relatifs à cette machine.	405
Dynamo à bobine inductrice unique	407
Induit	407
Inducteur	407
Points importants dans l'Étude d'un projet	407
Vitesses périphériques.	407
Disques de Noyaux d'induits.	408
Limite d'Aimantation	408
Diamètre du Fil pour bobinage d'Induits	408
Echauffement des bobines d'Inducteurs	410
Echauffement admissible et Surface de refroidissement.	413
Résistance à chaud	414
Courant maximum admissible	414
Longueur et Diamètre des Induits	416
Section des Inducteurs.	417
Symétrie des Inducteurs.	417
Résultat de l'Élargissement de l'entrefer.	419
Interférence du Champ d'induit	420
Limite de charge et Point sans étincelles	421
Procédés employés pour éviter les Etincelles.	426
Projets de Machines multipolaires	427
Meilleure Epaisseur de l'entrefer	430

CHAPITRE XVII

DYNAMOS A HAUT POTENTIEL POUR COURANT CONSTANT.	432
Machines à induit ouvert	434
Machine Brush	438
Machine Thomson-Houston.	448
Dispositif de Régulation	456
Avantages des Dynamos à induit ouvert.	458
Ondulations du Courant dans les Induits ouverts.	458
Autres Machines à haut Potentiel.	459
Machine Sperry.	459
Machine Wood	460
Machine Ball	460
Machine municipale d'Edison.	461
Machine à Arcs « Phénix »	462
Machine Statter.	462
Machine Schuyler.	463
Autres Machines à induit ouvert	463
Caractéristiques plongeantes.	463
Régulateurs de Courant constant	465

CHAPITRE XVIII

	Pages.
DYNAMOS COURANTES	466
Machines Gramme	466
Machines Crompton	470
Machines Kapp	472
Machine bipolaire.	472
Machine multipolaire à tambour.	473
Machines Brown	475
Dynamo pour Éclairage par incandescence	475
Dynamo pour Transport d'énergie	477
Dynamo pour Électrométallurgie	478
Machines Paterson et Cooper, ou « Phénix »	478
Machine « Manchester »	482
Machine « Victoria » (Compagnie Brush)	484
Machine de la Compagnie Gülcher	488
Machine Rankin Kennedy	492
Machines Siemens.	492
Machines Edison	499
Machines Schuckert.	508
Machines Goolden.	510
Machine Holmes.	511
Machine Laurence, Paris et Scott.	513
Machine « Tyne »	514
Machine Lahmeyer	514
Machine « Leeds »	515
Machines Elwell-Parker	517
Machine « Taunton »	517
Machines de la « General Electric Traction Company »	518
Machines diverses multipolaires	519
Machines de l'« Allgemeine Gesellschaft »	519
Machines Thomson-Houston	520
Machines Latimer Clark, Muirhead et C ^{ie}	520
Machines Alioth et C ^{ie}	520
Machines de la « Westinghouse Company »	520
Machine Thury.	520
Machine Wenström	520

CHAPITRE XIX

DYNAMOS DIVERSES	521
Machines à grand débit et faible voltage pour Galvanoplastie et Électrométallurgie	521
Machine Elwell-Parker	523
Machine Paterson et Cooper	523

TABLE DES MATIÈRES

xxi

	Pages.
Machine Hopkinson	522
Machine Stafford et Eaves	523
Machine Sayers.	524
Machines Crompton.	524
Machines Brown	524
Renseignements numériques relatifs à l'Electrométallurgie . . .	525
Tension aux bornes nécessaire pour différents genres de bains .	526
Densité de courant pour dépôts convenables.	527
Machines Unipolaires	527
Machines à Disque	530
Machines Fritsche.	531
Machine Polechko	532

CHAPITRE XX

MOTEURS ÉLECTRIQUES A COURANT CONTINU.	533
Considérations générales et historiques.	533
Traction déterminant le mouvement	539
Force contre-électromotrice	539
Théorie élémentaire de la Puissance fournie par un moteur électrique.	542
Théorie des Moteurs.	546
Représentation graphique des Lois des moteurs	552
Loi de Puissance maximum	554
Loi du Rendement maximum	555
Vitesse et Couple mécanique des moteurs	559
Expressions générales du Couple mécanique et de la Vitesse .	561
Moteur Magnéto-électrique et moteur à Excitation indépendante. .	563
Détermination pratique du Potentiel convenable pour un mo-	
teur donné.	564
Moteur en série.	565
Emploi de deux moteurs en série dans une Transmission. . . .	568
Moteur en Dérivation	569
Réaction entre l'Induit et les Inducteurs dans un moteur.	572
Renversement de marche des moteurs	577
Moyens de gouverner les moteurs.	580
Régulateur interrupteur	580
Régulateurs à force centrifuge	580
Régulateurs spasmodiques.	580
Régulateurs périodiques.	581
Régulateurs dynamométriques.	581
Régulateurs électriques	582
Théorie des Moteurs auto-régulateurs.	583
Moteur magnéto-électrique avec bobine régulatrice en Série.	584
Moteur en Dérivation avec bobine régulatrice en Série . . .	586
Détermination pratique des Bobinages en dérivation et en	
série.	589

	Pages.
Caractéristiques mécaniques des Moteurs à enroulement différentiel compound	589
Autres modes de Régulation des moteurs.	591

CHAPITRE XXI

TYPES RÉCENTS DE MOTEURS A COURANT CONTINU	593
Moteurs Ayrton et Perry.	594
Moteurs Reckenzaun.	594
Moteur Immisch	595
Moteur « Agir »	597
Moteurs Brown.	599
Moteurs Laurence, Paris et Scott	599
Moteurs Sprague	599
Moteur Goolden à l'usage des Mines	600
Moteurs pour Locomotives électriques.	601
Moteurs à Courant constant pour Circuits d'éclairage par arcs.	601
Moteurs de faible puissance	602
Moteurs oscillants.	602
Moteurs à Courants alternatifs.	602

CHAPITRE XXII

PRINCIPES DES COURANTS ALTERNATIFS.	603
Etude analytique	607
Etude géométrique	613
Force électromotrice « virtuelle » ou « efficace »	616
Puissance moyenne	617
Relation entre les Courants alternatifs et la Capacité.	621
Courant inactif	622
Courants alternatifs de haute fréquence.	623
Couple mécanique des Alternateurs.	623
Mesure de la Puissance dans les Cricuits à courants alternatifs.	624

CHAPITRE XXIII

ALTERNATEURS.	625
Classification et Généralités	625
Induits.	626
Induits en Anneau	626
Induits en Tambour.	629
Induits Polaires.	630
Induits en Disque	631
Bagues collectrices	634
Couplage des Bobines induites.	634

TABLE DES MATIÈRES

XXIII

	Pages.
Largeur des Faces polaires et Extension des Bobines induites.	633
Inducteurs et Modes d'Excitation.	637
Types d'Alternateurs	640
Alternateur Kapp.	640
Alternateur Westinghouse (Stanley)	643
Alternateur Elihu-Thomson	645
Alternateur Blakey-Emmott	647
Alternateur « Phénix »	648
Alternateur Hopkinson	649
Alternateurs Ganz-Zipernowsky	650
Alternateurs Siemens	651
Alternateur Gordon.	653
Alternateur Elwell-Parker.	654
Alternateurs Ferranti	655
Alternateur Parsons.	665
Alternateur Mordey	665
Alternateurs à Résistance magnétique variable ou à Fer tournant	671
Alternateurs Mordey.	672
Alternateur Kingdon.	673
Alternateur Elihu-Thomson	675
Alternateurs Kennedy.	675
Alternateurs à courant constant	675
Alternateurs polyphases.	676
Alternateur triphase de Brown.	677
Couplage des Alternateurs.	680

CHAPITRE XXIV

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS	691
Classe I. — Moteurs synchrones	691
Classe II. — Moteurs à inducteurs lamellés	693
Classe III. — Moteurs polyphases à Champ tournant.	694
Théorie du Champ tournant.	695
Illustration d'une Transmission à Champ tournant.	696
Courants tétraphasés	697
Courants triphasés	699
Moteur triphase de Brown.	703
Autres moteurs polyphases	705
Classe IV. — Moteurs à Champ tournant à Courants diphasés	705

CHAPITRE XXV

TRANSFORMATEURS	708
Généralités et Classification	708
Notes Historiques.	710
Transformateurs à courants alternatifs	712
Systèmes de Distribution	712

	Pages.
Principes généraux	713
Construction	724
Théorie	731
Progrès dans la construction des Transformateurs à courants alternatifs	736
Transformateurs pour Courant constant.	737
Emploi des transformateurs au Réglage des alternateurs.	737
Moteurs-Dynamos.	741
Transformateurs à courant continu.	741
Théorie des Transformateurs à courant continu	743
Transformateurs de Courants alternatifs en Courants continus, et réciproquement	744
CHAPITRE XXVI	
TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE	746
Principe	746
Rendement d'un Transport d'énergie	751
Application des Méthodes graphiques aux Problèmes relatifs aux Moteurs	753
Représentation graphique d'un Transport d'énergie.	756
Economie d'un Transport d'énergie.	757
Exemples de Transports d'énergie	758
Schaffouse.	758
Lauffen-Francfort.	759
CHAPITRE XXVII	
RÉGULATEURS POUR DYNAMOS	762
Régulateurs à main.	763
Régulateurs automatiques.	764
Régulateurs de Tension constante ou de Courant constant	764
Régulateur Gooldén.	764
Régulateur Maquaire	766
Régulateur Brush.	767
Régulateur Thomson-Houston	768
Régulateur Statter	768
Régulateur Waterhouse	768
Régulateur Wood	769
Régulateur Henrion.	770
Régulateur Ravenshaw et Trotter	771
Régulateur Sperry	772
Régulateurs électriques pour Machines à vapeur.	772
Régulateur Richardson	772
Régulateur Willans	774
Régulateur Jamieson	775
Réglage dynamométrique	776
Réglage par Pression de vapeur	777

TABLE DES MATIÈRES

xxv

CHAPITRE XXVIII

	Pages.
EPREUVES DES MACHINES GÉNÉRATRICES ET RÉCEPTRICES	779
Epreuves de Construction	779
Résistance électrique	779
Résistance magnétique	780
Résistance d'Isolément.	780
Epreuves de Fonctionnement et de Rendement	781
Mesure de la Puissance mécanique	781
Méthode graphique	782
Méthode du Frein	782
Méthode dynamométrique	783
Méthode d'Equilibre.	785
Méthodes électriques	786
Analyse des différentes pertes	788

CHAPITRE XXIX

CONDUITE DES DYNAMOS	792
Couplage de deux ou de plusieurs dynamos en un même circuit.	792
Couplage en Série.	792
Couplage en Dérivation	793
Couplage des machines compound en Circuit parallèle.	794
Instructions générales pour l'emploi des Dynamos.	798
Emplacement	798
Fondations	798
Glissières	799
Avant la Mise en marche	799
Mise en marche.	800
Surveillance journalière.	800
Accidents des Dynamos	801
Combustion des Induits	801
Rupture des Connecteurs	803
Disjonctions dans l'Induit	803
Faux-rond du Collecteur	804
Fautes dans les Bobines inductrices	805
Accidents des Alternateurs	805
Causes obscures d'accidents	806
Trépidation et Bruit.	806

APPENDICES

	Pages.
APPENDICE A	808
Unités électriques et magnétiques	808
APPENDICE B	816
Fils	816

SUPPLÉMENT

TYPES RÉCENTS DE DYNAMOS CONTINENTALES	822
Courant continu	822
Dynamos à haut potentiel	822
Machine de la Compagnie de « L'Industrie électrique » (de Genève)	822
Dynamos courantes	823
Machines Brown-Heilmann, multipolaires	823
— Cail-Helmer, bipolaires	825
— — multipolaires	827
— — -Reignier et Parrot	829
— Desrozières, à disque	829
— — — Types divers	835
— — — Type marine	835
— — — — Épreuves	836
Gramme, multipolaires pour stations centrales	837
de la Compagnie de « L'Industrie électrique », à basses vitesses	839
d'Oerlikon	840
Rechniewski, bipolaires et multipolaires	841
— — Épreuves	843
de la Société Alsacienne de Belfort, avec et sans collecteur	845
Dynamos diverses	848
Machines de la Compagnie de « L'Industrie électrique », multipolaires, pour Électrolyse	848
— de la Compagnie de L'Industrie électrique, unipolaires, pour Électrométallurgie	849
— d'Oerlikon, multipolaires, pour Électrométallurgie	851
Courants alternatifs	851
Alternateurs Cail-Helmer à flux renversé	851
— — Alternateur-Volant	855
— — à flux ondulé ou à résistance magnétique variable	856
— — de haute fréquence	857
Transformateurs Cail-Helmer, à résistance magnétique variable	857
Alternateurs Labour (Siemens) et Transformateurs	860
— à flux ondulé de la Compagnie de « L'Industrie électrique »	862

TABLE DES MATIÈRES

xxvii

	Pages.
Alternateurs et Transformateurs d'Oerlikon	863
— — — à courants triphasés.	865
Moteurs à courants triphasés d'Oerlikon.	866
— — alternatifs simples d'Oerlikon	868
Alternateurs Patin.	869
Moteurs Patin-Levasseur à courants alternatifs.	871
Alternateurs Zipernowsky-Creusot	871
Moteurs à courants alternatifs Zipernowsky-Creusot	872
ÉTUDE SUR LES QUALITÉS MAGNÉTIQUES DE L'ACIER DOUX	873
BIBLIOGRAPHIE	875
INDEX ALPHABÉTIQUE	881



ERRATA

PAGES	LIGNES		Au lieu de :	Lire :
	HAUT	BAS		
18		1	expérience	expériences
48		10	efficace	actif
49		2	—	—
87	14		—	—
89		12	—	active
98	11		—	actif
184		11	φ_u''	φ_u'
206		7	$\frac{2t}{n}$	$\frac{2}{\pi}$
213		18	$\frac{90^\circ}{\frac{1}{2}n}$	$\frac{90^\circ}{\frac{1}{2}n_c}$
261			<i>La figure 173 doit être tournée de 90° (OR horizontale).</i>	
343	18		9 millimètres	0,9 millimètre
344	11		dynamos à arcs	dynamos à haute tension
350	17		électro-métallurgie	galvanoplastie
407	2		champ magnétique unique	inducteur unique
422		2	efficaces	actifs
510		18	à bagues mobiles	à cannelures
526	2		gramme	grammes
—	5		—	—
577		11	supérieurs	supérieurs
595		7	au cinquième	au dixième
620	1		normale OF	normale à OF
642	16		efficace	utile
643	6		alternativités	périodes
645	6		—	—
683	2		alternativité	période
—	4		—	—
703	Fig. 484-485		rown	Moteur triphase de Brown
704	9		alternativités	périodes
714		2	compact	compacte
718	6		$\frac{mL}{L_1}$	$\frac{L_m}{L_1}$

xxx

ERRATA

PAGES	LIGNES DU		<i>Au lieu de :</i>	<i>Lire :</i>
	HAUT	BAS		
—	—	—		
729	6		ventilations ont	ventilation sont
784	10		poulie	poulie,
790		4	autre	l'autre
843	21			<i>Supprimer</i> comme unité
840		12	compact	compacte
842	7		suffit	suffisent

LES MACHINES

DYNAMO-ÉLECTRIQUES

CHAPITRE PREMIER

INTRODUCTION

Une machine dynamo-électrique est une machine destinée à convertir l'énergie sous forme de mouvement mécanique en énergie sous forme de courants électriques, ou vice versa, par suite de la rotation de conducteurs (ordinairement des bobines de fil de cuivre) dans un champ magnétique. Ainsi formulée, cette définition embrasse toutes les machines dont l'action repose sur le principe magnéto-électrique découvert par Faraday en 1831.

Toute machine dynamo-électrique peut cependant remplir deux fonctions distinctes, inverses l'une de l'autre. Quand on l'actionne mécaniquement par un engin extérieur tel qu'une machine à vapeur, elle fournit des courants électriques. Si, au contraire, on y lance des courants électriques issus d'une source extérieure, telle qu'une pile voltaïque, elle développe du travail mécanique. Dans le premier cas, la dynamo fonctionne comme *génératrice* ; dans le second, comme *moteur* ou *réceptrice*. Toutes les dynamos sont comprises d'ailleurs dans l'une des deux grandes catégories suivantes qui diffèrent entre elles par la nature des courants qu'elles sont appelées à fournir, courant *continu* (c'est-à-dire ayant toujours le même sens) ou courants *alternatifs* (c'est-à-dire changeant fréquemment et rapidement de sens). Nous aurons en conséquence à considérer quatre classes de machines : — (a) dynamos ou génératrices à courant continu ; (b) dynamos ou génératrices à courants

alternatifs, ou, plus brièvement, alternateurs; (c) moteurs à courant continu; (d) moteurs à courants alternatifs ¹.

En général, toute dynamo, qu'elle soit appelée à fonctionner comme génératrice ou comme moteur, comporte deux parties essentielles, un *système inducteur*, habituellement formé d'une carcasse en fer, massive et fixe, recouverte de spires de fil de cuivre isolé, et un *système induit*, ou, plus simplement, un *induit* ou *armature*, disposition spéciale de conducteurs en cuivre ordinairement roulés autour d'un anneau, d'un tambour ou d'un disque, fixé lui-même sur un axe qui permet de lui imprimer mécaniquement un mouvement de rotation. Elle comprend également des organes particuliers destinés à recueillir les courants électriques issus de l'induit et à les envoyer dans le circuit électrique, ou *vice versa*; ce sont les *collecteurs* ou *commutateurs*, solidaires de l'induit et participant à sa rotation, et les *balais* de prise de courant qui pressent sur la surface du collecteur ou du commutateur en mouvement et constituent une connexion permanente, à frottement, avec le circuit extérieur.

L'objet du système inducteur est de créer un *champ magnétique* suffisamment étendu et de grande intensité, c'est-à-dire de développer un nombre de lignes de force magnétique ou un *flux magnétique* considérable dans l'espace où doivent se mouvoir les fils constitutifs de l'induit. — Il doit, en conséquence, être formé d'un fort aimant ou électro-aimant bien étudié, et par suite puissant, dont les pôles soient conformés de manière à permettre dans l'espace où se meut l'induit une bonne utilisation du flux magnétique auquel ils donnent naissance. Nous étudierons dans le Chapitre VI les propriétés magnétiques du fer, et, dans les Chapitres VII, VIII et XVI, les principes fondamentaux du circuit magnétique, y compris les formes des inducteurs.

Quant au rôle de l'induit, il consiste à tourner dans le champ magnétique ainsi produit, tandis que ses spires de cuivre, ou conducteurs, sont parcourues par des courants électriques.

Il ne faut pas oublier qu'il existe une double action entre un fil conducteur (faisant partie d'un circuit) et un champ magnétique. *En premier lieu*, si l'on force le fil conducteur à se mouvoir dans le champ

¹ Dans le langage courant, le nom de « dynamo » proprement dite est généralement réservé à la machine fonctionnant comme génératrice. La machine actionnée par un courant est désignée sous le nom de « moteur » ou « réceptrice ».

magnétique (de manière à couper les lignes ou le flux de force), des courants électriques sont engendrés dans le conducteur, et un effort mécanique est nécessaire pour faire mouvoir ce conducteur. Cette action, découverte par Faraday, est connue sous le nom d'« induction magnéto-électrique ». Dans tous les cas, l'induction ou production de courants exige une application de puissance mécanique et une dépense d'énergie. C'est là le principe de la dynamo employée comme génératrice. *D'autre-part*, si le fil conducteur, tandis qu'il est situé dans le champ magnétique, conduit à ce moment même un courant électrique (issu d'une source quelconque), il subit l'action d'un couple latéral qui tend à l'entraîner parallèlement à lui-même en coupant les lignes ou le flux de force, et qui le rend apte à développer de la puissance et à produire du travail mécanique. Cette action, inverse de la précédente, est le principe de la dynamo utilisée comme moteur. Dans le premier cas, il faut développer du travail mécanique pour entraîner l'induit ; dans le second, l'induit, en tournant, devient une source de travail mécanique. Si l'on a le champ magnétique et qu'on fournisse du travail mécanique pour faire tourner l'induit, on obtient des courants électriques ; si l'on a le champ magnétique et qu'on fournisse à l'induit des courants électriques, il prend un mouvement de rotation et développe du travail mécanique. — Que la machine fonctionne comme génératrice ou comme moteur, la présence du champ magnétique est nécessaire : il en résulte que le point théorique le plus important est la théorie du champ magnétique. — Toute machine dynamo pouvant (au moins théoriquement) fonctionner à volonté soit comme générateur, soit comme moteur, il devrait être possible d'établir une théorie générale applicable à une machine quelconque remplissant ces deux rôles inverses. Pour plus de simplicité cependant, nous traiterons dans cet ouvrage ces deux fonctions séparément.

La théorie mathématique de la dynamo est en réalité complexe, et son expression affecte des formes différentes suivant les diverses classes de machines actuellement comprises sous le nom générique de « dynamos ». Les progrès récemment introduits dans la solution des problèmes magnétiques ont cependant simplifié la question au point qu'il est possible aujourd'hui de prévoir la puissance électrique d'une machine, dans des conditions données de vitesse et de charge, d'après sa construction et ses dimensions. La théorie des machines à courants alternatifs diffère en outre, en bien des points, de celle des machines destinées à produire des courants continus.

La théorie de la dynamo que nous développerons ici ne sera donc pas une théorie mathématique générale. Nous nous attacherons plutôt aux idées physiques et expérimentales qu'aux conceptions mathématiques, bien que nous ne puissions nous dispenser d'employer, comme dans tout ouvrage scientifique, des symboles mathématiques. Une théorie physique de la dynamo n'est pas d'ailleurs chose nouvelle, bien qu'il n'en ait pas encore été donné de bien complète¹ avant les conférences de l'Auteur à la *Society of Arts*, en 1882.

Il y a en réalité trois manières distinctes de traiter les principes de la dynamo : 1^o une méthode physique ayant pour point de départ les lignes de force ou le *flux* magnétique et les courants, et dans laquelle ces éléments, indépendamment du pourquoi et du comment, servent de base d'exposition ; 2^o une méthode algébrique basée sur les lois mathématiques de l'induction électrique et de la mécanique rationnelle ; 3^o une méthode graphique fondée sur la possibilité de représenter l'action d'une dynamo par une courbe dite « caractéristique », imaginée par le D^r Hopkinson, et employée ensuite par le D^r Frölich, M. Deprez, et autres.

Ces trois méthodes sont par le fait trois aspects différents de la même théorie. Le flux de force magnétique dont nous nous occupons dans les Chapitres VI et VII peut être représenté géométriquement par une certaine longueur de ligne ou algébriquement par le symbole Φ ou bien encore graphiquement par une simple figure. Ce que les uns représentent par Φ , d'autres l'indiquent par une certaine longueur dans une certaine direction. En somme, divers procédés, algèbre, géométrie et diagrammes magnétiques, conduisent vers la possession de la vérité, et chacun de ces procédés a sa valeur.

Notre objectif est de développer tout d'abord une théorie physique générale applicable à tous les types de machines dynamo-électriques.

Nous attaquerons ensuite immédiatement les parties vitales les plus essentielles du sujet : principe du circuit magnétique ; propriétés magnétiques du fer ; calcul des éléments magnétiques des dynamos ; et autres principes analogues. Puis viendront la théorie du bobinage de l'induit et ses modes de construction pratiques. Cet exposé sera suivi d'une des-

¹ Voir J. M. Gaugain, *Annales de Chimie et de Physique*, 1873 ; Antoine Breguet, *Annales de Chimie et de Physique*, 1879 ; du Moncel, *Exposé des Applications de l'Électricité*, t. II ; Niaudet, *Machines électriques* ; Dredge, *Electric Illumination* ; Schellen, *Die Magneto und Dynamo-elektrischen Maschinen* (3^e édition, 1883).

cription générale des divers types de machines, accompagnée de certaines questions théoriques intéressantes. Le moteur à courant continu sera étudié après le générateur à courant continu. Les principes de la machine à courants alternatifs, du transformateur à courants alternatifs, et du moteur à courants alternatifs, seront enfin plus complètement traités que dans aucune des éditions anglaises de cet ouvrage antérieures à celle-ci.

Cependant, avant d'aborder la théorie générale de la dynamo, il est bon de préluder par quelques notes historiques.

CHAPITRE II

NOTES HISTORIQUES

La découverte, par Faraday, de l'induction magnéto-électrique des courants remonte à l'automne de 1831. Elle fut communiquée le 24 novembre de la même année à la Société Royale de Londres par une note insérée dans les *Philosophical Transactions* et réimprimée au commencement du premier volume des *Experimental Researches in Electricity* de l'illustre physicien. Ses premières expériences sont relatives à la production de courants induits dans une bobine à l'aide de courants développés ou interrompus dans une bobine voisine. Il passa de là aux courants engendrés dans une bobine mise en mouvement en face des pôles d'un puissant aimant en acier. Ayant ainsi obtenu de l'électricité au moyen d'aimants, il essaya de construire « une nouvelle machine électrique ». Un disque de cuivre, de 30 centimètres de diamètre environ, et de

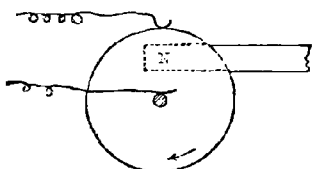


Fig. 1. — Dynamo à disque de Faraday.

5 millimètres d'épaisseur, fixé sur un axe en bronze (fig. 1) et monté sur un bâti, pouvait tourner sur cet axe. Un segment de ce disque était en même temps engagé entre les pôles magnétiques d'un grand aimant permanent à plusieurs lames, distants l'un de l'autre de 12 millimètres à peu près ¹. Le disque était soigneusement amalgamé sur champ, de manière à assurer un bon contact mobile; il en était de même de l'axe sur une certaine longueur. Des lames conductrices de cuivre et de plomb destinées à capter le courant électrique étaient disposées de façon à être mises en contact avec le champ du disque de cuivre; l'une de ces lames, maintenue avec la main, touchait le bord du disque entre les pôles de l'aimant. Des fils allant à un galvanomètre étaient reliés, l'un à la lame collectrice, l'autre à l'axe de bronze. Quand on faisait tourner le disque, on constatait au galvanomètre une déviation qui changeait de sens quand on renversait le sens de rotation. « Ainsi se trouvait, en conséquence, démontrée la production d'un courant permanent d'électricité à l'aide

¹ *Experimental Researches*, I. p. 25, art. 85. Cet appareil existe encore à la *Royal Institution*. L'Auteur de cet ouvrage l'a fait fonctionner lors d'une communication faite par lui devant cette assemblée, le 11 avril 1891.

d'aimants ordinaires. » Les mêmes résultats furent aussi obtenus avec des pôles d'électro-aimants et des solénoïdes de cuivre sans noyau de fer. Faraday essaya plusieurs autres formes de machines magnéto-électriques.

Dans l'une ¹, un anneau plat, de 30 centimètres de diamètre extérieur sur 2,3 cm de largeur, fut découpé dans une épaisse plaque de cuivre et monté de manière à tourner entre les pôles de l'aimant : deux conducteurs étaient appliqués de manière à frotter contre les bords intérieur et extérieur de l'anneau aux points engagés entre les pôles magnétiques. — Dans une autre ², un disque de cuivre, de 5 millimètres d'épaisseur et de 3,7 cm seulement de diamètre (fig. 2), était amalgamé sur son bord extérieur et monté sur un axe en cuivre. Dans une feuille métallique carrée, on avait découpé un trou circulaire dans lequel le disque entrait à frottement doux ; un peu de mercure complétait la communication entre le disque et la partie annulaire qui l'entourait. Cette dernière était reliée par un fil à un galvanomètre, dont l'autre borne était en connexion avec l'extrémité de l'axe. En faisant tourner le disque dans un plan horizontal on obtenait des courants, bien que la terre fût le seul aimant en jeu.

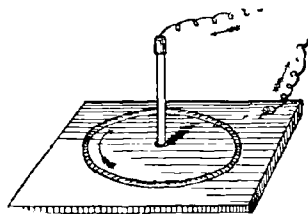


Fig. 2. — Appareil « Teetotum » de Faraday.

Faraday proposa également une machine multiple ³ formée de plusieurs disques reliés métalliquement par des contacts mercuriels allant alternativement du bord de l'un au centre de l'autre et qui devaient dès lors tourner en des sens différents de l'un à l'autre. — Dans un autre appareil ⁴, un cylindre de cuivre (fig. 3), fermé à l'une de ses extrémités, revêtait un aimant, dont il recouvrait la moitié comme un chapeau, et auquel il était fixé sans qu'il y eût cependant connexion métallique entre eux. On faisait flotter cet équipage verticalement dans une cuve à mercure étroite, de telle sorte que le bord inférieur du cuivre touchât le liquide. En faisant tourner l'aimant et le chapeau qui lui était fixé, on donnait naissance à un courant allant, par des fils, du mercure au sommet du chapeau de cuivre. — Dans un sixième appareil ⁵, conservé à l'Institut Royal, on faisait tourner un barreau cylindrique aimanté plongeant à demi dans du mercure ; il en résultait un courant, auquel le métal même de l'aimant servait de conducteur. — Dans une autre forme ⁶, l'aimant cylindrique tournait horizontalement

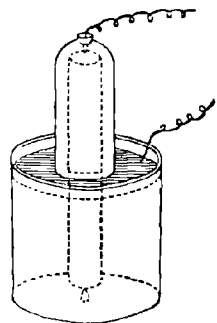


Fig. 3. — Cylindre de cuivre tournant de Faraday.

¹ *Experimental Researches*, I. art. 135.

² *Ibid.*, art. 155.

³ *Ibid.*, art. 158.

⁴ *Ibid.*, art. 219.

⁵ *Ibid.*, art. 220.

⁶ *Ibid.*, art. 222.

autour de son axe de figure et engendrait des courants allant du milieu aux extrémités, ou inversement, suivant le sens de rotation. — Dans une machine encore différente (fig. 4) construite par Faraday un peu plus tard ¹, un simple rectangle de fil de cuivre monté sur un bâti était mis en rotation autour d'un axe horizontal orienté est-ouest, et développait des courants alternatifs qu'on pouvait recueillir à l'aide d'un simple commutateur.

Dans l'espace de peu de mois, Dal Negro ² et Pixii ³ imaginèrent des machines basées sur le principe de l'induction magnétique. Dans l'appareil de ce dernier, un aimant d'acier en fer à cheval, avec ses pôles en haut, était mis en rotation autour d'un axe vertical et induisait des courants alternatifs dans une paire de bobines disposées en regard, au-dessus de l'aimant, et reliées par

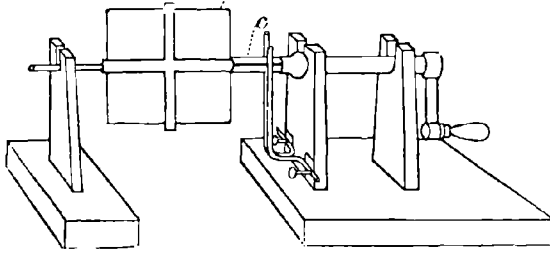


Fig. 4. — Rectangle tournant de Faraday.

une âme de fer doux en fer à cheval. — Plus tard, en 1832, Pixii construisit, à l'instigation d'Ampère ⁴, une seconde machine munie de commutateurs pour redresser les courants alternatifs. — D'autres perfectionnements furent apportés par Ritchie ⁵ et Watkins ⁶. — En 1833 apparut la machine de Saxton ⁷, et, deux ans après, celle de Clarke ⁸; elles avaient toutes deux comme partie fixe un aimant d'acier en fer à cheval, et pour armature mobile un électro-aimant formé d'une paire de bobines enroulées sur un simple barreau de fer recourbé en U. La machine de Clarke se distinguait par plusieurs détails originaux, dont une forme spéciale de commutateur donnant des courants violents, instantanés, destinés à produire des effets physiologiques. Dans cette machine, l'induit tournait, non pas en regard des extrémités de l'aimant, mais dans le voisinage immédiat de ses branches plates. Dans la machine Saxton, qui a été exhibée à Cambridge devant l'Association Britannique en 1833, l'armature tournait en regard des extrémités polaires et se composait de quatre bobines. — Von Ettings-

¹ *Experimental Researches*, I. art. 3192.

² *Phil. Mag.*, [3]. I. 45, juillet 1832 (Appareil oscillant).

³ *Ann. de Chim. et de Phys.*, L. 322, 1832.

⁴ *Ibid.*, LI. 76, 1832.

⁵ *Phil. Mag.*, [3]. VIII. 455; [3]. X. 280, 1837; et *Phil. Trans.*, II. 318, 1833.

⁶ *Phil. Mag.*, [3]. VII. 107, 1835.

⁷ *Ibid.*, [3]. IX. 360, 1836.

⁸ *Ibid.*, [3]. IX. 262, 1836; X. 365, 455, 1837; et *Annals of Electricity* de Sturgeon, I. 145.

hausen ¹, en 1837, construisit une machine à courants alternatifs tout à fait semblable, avec une disposition spéciale qui permettait de couper les courants alternatifs. — Poggendorff ², en 1838, imagina un commutateur spécial à mercure pour la machine Saxton, en vue de rendre les courants moins discontinus.

D'autres améliorations de détail furent apportées par Petrina ³, qui perfectionna le commutateur; par Jacobi ⁴, qui fit ressortir l'importance de l'emploi de noyaux courts pour les armatures; par Sturgeon ⁵, qui plaça une bobine en forme de navette longitudinalement entre les branches d'un aimant en fer à cheval, et inventa également le commutateur simple en deux parties ou « déchargeur dans un même sens », selon son expression; par Stohrer ⁶, qui indiqua le mode de construction d'une machine à six pôles avec induit à six bobines; par Ritchie ⁷, qui employa des noyaux tubulaires et un double enroulement; et par Pulvermacher ⁸, qui, en 1849, proposa l'emploi de feuilles de tôle pour la confection des noyaux. — Woolrich ⁹, en 1841, imagina pour la galvanoplastie une machine multipolaire dans laquelle le nombre des bobines rotatives était double de celui des pôles magnétiques. — Wheatstone ¹⁰ commença ses perfectionnements en 1841 avec une machine dans laquelle, pour la première fois, les bobines de l'induit étaient groupées de manière à donner un courant réellement continu (fig. 5). A cet effet, cinq armatures formées chacune d'une paire de courtes bobines cylindriques, parallèles, à noyaux de fer et munies chacune d'un commutateur simple à tube fendu, étaient montées en étoile sur un même arbre. Entre ces cinq jeux de bobines et aux deux extrémités étaient intercalés six aimants d'acier à plusieurs lames. Les cinq armatures étaient disposées de manière à venir successivement dans la position de plus grande activité, la commutation pour deux quelconques d'entre elles ne se faisant pas au même instant. Elles étaient connectées en série l'une sur l'autre à l'aide de fils qui reliaient le balai positif de l'une, formé d'un ressort de laiton, au balai négatif de sa voisine. — En 1845, Wheatstone ¹¹ et Cooke brevetèrent l'emploi d'électro-aimants au lieu d'aimants permanents en acier dans les machines de ce genre. — En 1848, Jacob Brett ¹² suggéra un important progrès qui consistait à faire passer le courant développé dans l'induit par le magnétisme permanent des électro-aimants à travers une bobine de fil enroulée sur ces derniers, de manière à en augmenter l'action. Cette idée, qui paraît être

¹ Gehler, *Physikalisches Wörterbuch*, IX. 122, 1838.

² *Pogg. Ann.*, XLV. 385, 1838.

³ *Ibid.*, LXIV. 58, 1845.

⁴ *Ibid.*, LXIX. 194, 1846.

⁵ *Annals of Electricity*, II. 1, 1838. Voir aussi les *Scientific Researches* de Sturgeon, p. 252; ainsi que *Phil. Mag.*, VII. 231, 1835.

⁶ *Pogg. Ann.*, LXI. 417, 1844; LXXVII. 467, 1849.

⁷ Brevet anglais, 14899 de 1849.

⁸ *Loc. cit.*

⁹ Brevet anglais, 9431 de 1842.

¹⁰ Brevet anglais, 9022 de 1841.

¹¹ Brevet anglais, 10655 de 1845.

¹² Brevet anglais, 12054 de 1848.

la première conception du principe de la dynamo auto-excitatrice, a été suggérée tout à fait indépendamment en 1851 par Sinsteden ¹ qui semble avoir eu pleine connaissance du fait constaté par Müller, que l'acier est susceptible de prendre momentanément une aimantation peu inférieure à celle du fer forgé et en tout cas bien supérieure à celle qu'il peut conserver d'une façon permanente. Ce savant a fait de nombreuses recherches sur la meilleure largeur de surface polaire à employer, sur l'action des pièces polaires et sur la division du fer dans les induits ; pour ce dernier objet il employa

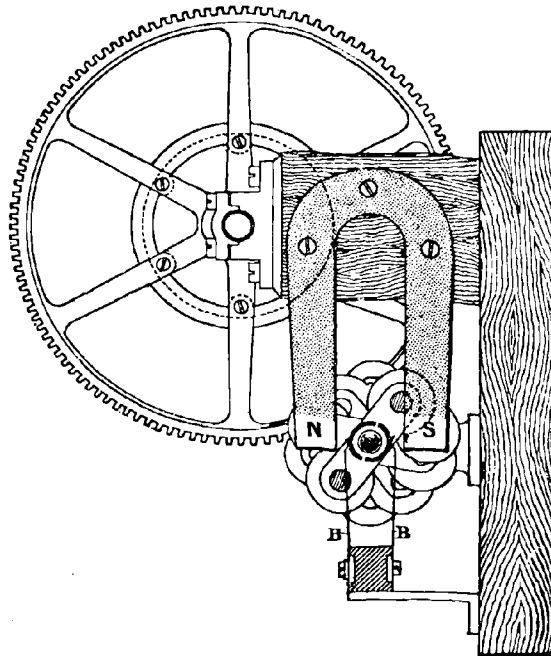


Fig. 5. — Machine de Wheatstone à courant continu.

en 1849 des paquets de fils de fer. — Un type de machine complètement différent fut imaginé, indépendamment les uns des autres, par Ritchie ², Page ³ et Dujardin ⁴. Dans ces machines les électro-aimants, aussi bien que l'induit, étaient immobiles. Les bobines dans lesquelles le courant devait être induit étaient enroulées sur des extensions polaires des électro-aimants, et

¹ *Pogg. Ann.*, LXXXIV. 186, 1851. Pour les autres recherches de Sinsteden, voir *Pogg. Ann.*, LXXVI. 29, 195 et 524, 1849; LXXXIV. 181, 1852; XCII. 1 et 220, 1854; XCVI. 353, 1855; CXXXVII. 290 et 483, 1869.

² *Phil. Mag.*, [3]. X. 280, 1837.

³ *Annals of Electricity*, 489, 1839.

⁴ *Comptes rendus*, XVIII. 837, 1844; XXI. 528, 892, 1881.

l'on produisait l'induction en faisant tourner en face de ces dernières des pièces de fer doux qui développaient de rapides variations périodiques dans le champ magnétique. — Holmes, Henley, Wheatstone, Wilde, Sawyer, l'Auteur de cet ouvrage, et Kingdon imaginèrent postérieurement des machines basées sur le même principe.

Nollet ¹, en 1849, inventa une machine à courants alternatifs, à la construction de laquelle collabora Van Malderen, et qui, après la mort de Nollet, devint, en se développant avec le concours de Holmes d'abord, puis de Masson et de du Moncel, la machine de « l'Alliance » ². Cette machine, à partir de 1863, rendit de grands services en France pour l'éclairage des phares. — Holmes continua à perfectionner son œuvre et produisit une belle machine ³ qui en 1857 fut honorée du haut patronage de Faraday. La grande machine de Holmes qui figura à l'Exposition Internationale de 1862 était une machine à courant continu, à grand commutateur et à galets roulants en guise de balais ; les bobines, au nombre de 160, étaient montées à la périphérie de deux volants de 2,75 m environ de diamètre. Soixante aimants en fer à cheval étaient disposés en trois cercles qui présentaient chacun radialement quarante pôles. En 1867, Holmes remania sa machine en donnant relativement plus de puissance à ses électro-aimants, et en abandonnant la commutation des courants induits ; et, en 1869, il y introduisit le principe consistant à distraire, à l'aide d'un commutateur, le courant provenant de quelques-unes des bobines induites pour exciter les électro-aimants. — Cette époque est marquée par une grande activité de production. — En 1855, Hjorth ⁴ breveta une remarquable machine, qui présentait comme système inducteur une disposition compound comprenant un aimant permanent destiné à développer des courants initiaux et de puissants électro-aimants excités par les courants issus de la machine elle-même.

C. W. Siemens ⁵ fit breveter par provision, en 1856, la fameuse armature en navette et à enroulement longitudinal, inventée par son frère le Dr Werner Siemens. En 1859 ⁶, il émit le principe que le noyau seul avait besoin de tourner, les bobines de l'induit pouvant être fixées dans des rainures pratiquées dans les pièces polaires des inducteurs. — Wilde ⁷, de Manchester, entreprit une remarquable série de recherches de 1861 à 1867. Après avoir commencé par de petits appareils télégraphiques, il fut amené en 1863 à combiner un système composé d'une armature Siemens en navette placée entre les pôles d'un puissant électro-aimant dont les bobines étaient parcourues par des cou-

¹ Brevet anglais, 13302 de 1850. Voir aussi Douglass dans les *Proc. Inst. Civil Engin.*, LVII, 1878-9.

² Voir du Moncel, *Exposé des Applications de l'Electricité*, I, 361. Voir aussi Le Roux, *Bulletin de la Société d'Encouragement*, 1868.

³ Voir Douglass, *loc. cit.* Voir aussi Brevets anglais 573 de 1856 ; 2060 de 1868 ; et 1774 de 1869.

⁴ Brevets anglais, 12295 de 1848 ; 2198 et 2199 de 1854 ; 806, 807 et 808 de 1855.

⁵ Brevet anglais, 2017 de 1856. Voir W. Siemens, *Pogg. Ann.*, CI, 271, 1857.

⁶ Brevet anglais, 512 de 1859.

⁷ Brevets anglais, 299, 858, 1994 et 2997 de 1861 ; 516 et 3006 de 1863 ; 1412 et 2753 de 1865 ; 3209 de 1866 ; et 824 de 1867.

rants issus d'une petite machine auxiliaire, — à armature en navette et aimants permanents —, montée au-dessus de la première. — En 1866 et 1867, Wilde imagina des machines à courants alternatifs, dont la dernière était formée d'un certain nombre de bobines montées à la périphérie d'un disque tournant entre deux couronnes opposées d'électro-aimants de polarités alternativement différentes. Ce type a survécu jusqu'à ce jour. Primitivement excitées par des courants provenant d'une petite machine magnéto indépendante, ces machines furent rendues auto-excitatrices en 1873 au moyen des courants empruntés, à l'aide d'un commutateur, à une ou plusieurs des bobines de l'induit.

Le principe consistant à employer tout ou partie des courants de la machine elle-même à la production du magnétisme nécessaire aux électro-aimants entra dans la pratique vers cette époque. Ainsi que nous l'avons dit précédemment, Brett, Sinstedden, et Hjorth l'avaient tous appliqué antérieurement. En 1858, Johnson ¹, agent de brevets pour un inventeur étranger, dit : « On se propose d'employer l'électro-aimant pour obtenir de l'électricité induite, qui fournit complètement ou partiellement l'électricité nécessaire à la polarisation des électro-aimants, sans qu'on soit obligé de l'emprunter à des piles ou autres sources connues. » En juillet 1866, Murray ² indique qu'il a relié en série avec l'armature quelques-unes des bobines roulées sur les électro-aimants de sa machine magnéto et préconise l'adoption de cette disposition. En octobre 1866, Moïse G. Farmer ³ écrivait à Wilde, à Manchester, pour lui faire part du succès qu'il avait obtenu en enroulant des spires du circuit principal sur les électro-aimants de sa machine, de manière à lui faire exciter ses propres électro-aimants. En novembre 1866, Baker ⁴ dit que les courants secondaires provenant des aimants mobiles pourraient être affectés à l'aimantation des aimants fixes. En décembre de la même année, C. et S. A. Varley ⁵ introduisirent à titre de provision une spécification relative à une machine uniquement composée d'électro-aimants, cet appareil exigeant cependant, avant d'entrer en action, la présence d'une petite quantité de magnétisme permanent, et, suivant les inventeurs, « les bobines s'aimantant légèrement en passant entre les pôles des aimants permanents ». Cette petite quantité de magnétisme était fournie, on doit le supposer, par le passage d'un courant électrique à travers les bobines des électro-aimants, conception qui réapparaît dans une autre machine brevetée par les mêmes inventeurs en juin 1867, et encore une fois dans un autre brevet pris en 1869 par O. et F.-H. Varley. Les électro-aimants de la machine de 1867 étaient roulés de deux circuits distincts, alternativement alimentés par des courants venant de deux commutateurs qui les recevaient de deux paires différentes de bobines.

M. S.-A. Varley continua, en 1868 et 1871, à breveter des générateurs magnéto-électriques. En 1876, il revint à la méthode d'auto-excitation en employant une

¹ Brevet anglais, 2670 de 1858.

² Voir *Engineer*, 20 juillet 1866, p. 42.

³ *Proc. Lit. and Phil. Soc. of Manchester*, VI. 107.

⁴ Brevet anglais, 3039 de 1866.

⁵ Brevet anglais, 3394 de 1866. Autres brevets de Varley : 1755 de 1867 ; 315 de 1868 ; 131 et 1150 de 1871 ; 4905 de 1876 ; 270 et 4435 de 1877 ; 4100 de 1878.

armature multiple dans laquelle était appliqué le principe consistant à mettre successivement hors circuit chaque bobine pendant la rotation. Cette machine comportait également des électro-aimants à deux enroulements, l'un de résistance supérieure à celle de l'autre ; ces deux circuits allaient à la lampe que la machine devait alimenter ; mais celui de haute résistance restait toujours fermé. Il n'apparaissait pas clairement, cependant, que ce mode de double enroulement fût ce que l'on entend aujourd'hui par « enroulement compound ¹ », jusqu'à ce qu'il en eût été décidé ainsi, quinze ans plus tard, par un juge écossais, avec l'autorité que lui confère la loi. — Revenant au principe de l'auto-excitation, nous trouvons que, le 17 janvier 1867, le D^r Werner Siemens ² décrivit devant l'Académie de Berlin une machine destinée à la production de courants électriques par application du travail mécanique, les courants étant induits dans les bobines d'une armature mobile sous l'action d'électro-aimants excités eux-mêmes par les courants ainsi engendrés. Dans cette machine il fallait également fournir un magnétisme permanent initial en envoyant dans les bobines un courant préalable fourni par une pile. Pour marquer l'importance de ce premier pas dans cette voie, le D^r Siemens baptisa cette nouveauté du nom de *machine dynamo-électrique*, qui, sous la forme abrégée de *dynamo*, est devenu l'appellation courante de toutes ces machines électriques actionnées mécaniquement, qu'elles soient ou non auto-excitatrices. Le jour même où cette découverte fut annoncée à la Société Royale de Londres, le 14 février 1867, Sir C. Wheatstone ³ faisait une communication dans laquelle il développait une idée presque identique ; mais avec cette différence que, au lieu de placer les inducteurs dans le circuit principal, comme l'indiquait Siemens, Wheatstone proposait de les relier en dérivation sur le circuit principal. Une machine auto-excitatrice sans aimants permanents a, par le fait, été construite pour Wheatstone par M. Stroh dans le courant de l'été de 1866. — En 1867, Ladd ⁴ exposa une machine auto-excitatrice comportant deux induits en navette, dont l'un, petit, excitait le champ magnétique commun, tandis que l'autre, de grandes dimensions, fournissait des courants pour éclairage électrique.

Dans l'intervalle, on avait cherché à produire des courants continus présentant moins de fluctuation dans leur intensité, et cette question avait reçu de Pacinotti ⁵ une solution qui, si oubliée qu'elle ait été pendant un temps, est aujourd'hui reconnue comme une œuvre de la plus haute valeur. Il imagina une machine, décrite pour la première fois en 1864, ayant comme armature un électro-aimant en forme d'anneau et dont le noyau consistait en une sorte de poulie dentée, entre les dents de laquelle des bobines élémentaires étaient roulées en seize sections séparées. Il donna à cette disposition le nom d' « électro-aimant transversal ». Les bobines élémentaires étant reliées les unes aux autres en un circuit fermé, si en un point quelconque on y faisait pénétrer un

¹ Voir *Phil. Mag.*, [4]. XLV. 439, 1873.

² *Berliner Berichte*, janvier 1867 ; *Proc. Roy. Soc.*, 14 février 1867 ; Brevet anglais, 261 de 1867 ; et *Pogg. Ann.*, CXXX. 332, 1867.

³ *Proc. Roy. Soc.*, 14 février 1867.

⁴ *Phil. Mag.*, [4]. XXXIII. 544, 1867.

⁵ *Nuovo Cimento*, XIX. 378, 1865.

courant, celui-ci trouvait à travers les bobines deux voies par lesquelles il se rendait à un autre point quelconque où il était repris par un fil de retour. Des connexions partant de seize points différents autour de l'anneau et aboutissant à seize touches métalliques isolées, disposées en commutateur, permettaient de faire apparaître des pôles magnétiques en tels points de l'anneau qu'on désirait. — Le principe de l'enroulement d'une bobine continue en sections séparées symétriques autour d'un anneau, ou de toute autre surface de révolution, a été de nouveau et tout à fait originalement retrouvé, en 1870, par

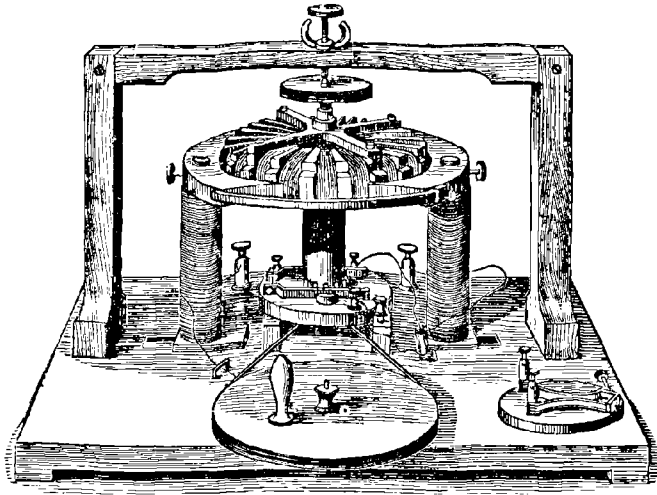


Fig. 6. — Machine de Pacinotti, à armature en anneau.

Gramme¹; son anneau dépourvu de dents était entièrement recouvert de fil. En roulant ainsi sur une armature un certain nombre de bobines symétriquement groupées et en les faisant passer successivement dans un champ magnétique, on obtient des courants dont l'allure est, pratiquement, rectiligne. L'apparition de l'armature Gramme a été immédiatement reconnue comme un progrès considérable et elle a été le point de départ d'une impulsion nouvelle dans l'application des machines dynamos. — En 1873, von Hefner-Alteneck² modifia l'armature longitudinale de Siemens en la recouvrant de bobines élémentaires symétriquement espacées suivant certains angles, de manière à assurer le même avantage de continuité, et Lontin³, en 1874, chercha à réaliser une transformation analogue sur une armature à pôles rayonnants. — Gramme et Siemens ont imaginé un grand nombre de formes particulières de machines,

¹ *Comptes rendus*, LXXIII. 175, 1871, et LXXV. 1497, 1872; et Brevet anglais, 1668 de 1870.

² Brevet anglais, 2006 de 1873. — Une idée semblable avait été émise l'année précédente par Worms de Romilly.

³ Brevets anglais, 473 de 1875; 386 et 3264 de 1876.

les unes à courants alternatifs¹, les autres à courants continus. — Bertin en 1875, Brush en 1879 et Siemens² en 1880 ont remis en vigueur le mode de montage des inducteurs en dérivation.

En 1878, Pacinotti³ produisit un genre d'armature qui affectait la forme d'un disque aplati ou d'un volant. — Brush⁴ inventa également sa fameuse dynamo reposant sur le principe du fonctionnement d'un induit à circuit ouvert. Il introduisit aussi l'emploi simultané d'un enroulement en dérivation et d'un enroulement en série dans le but de faire, à volonté, fournir par la ma-

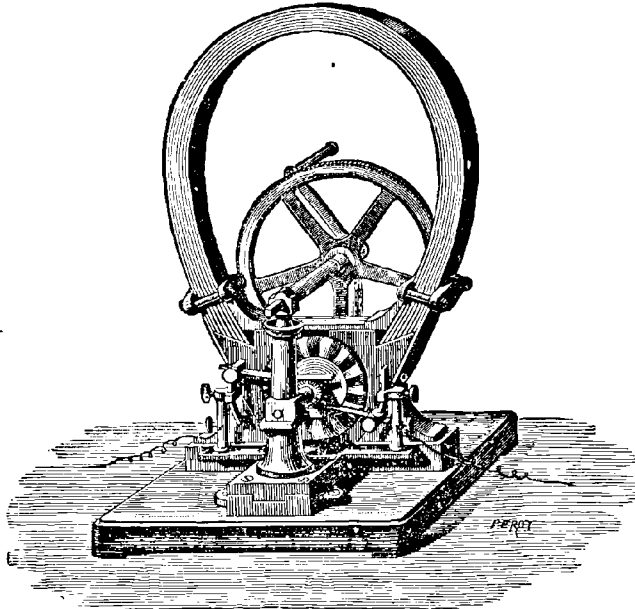


Fig. 7. — Machine Gramme, modèle de laboratoire.

chine une plus ou moins grande puissance. — Une autre machine avec induit à circuit ouvert fut mise au jour en 1880 par Elihu Thomson et E. J. Houston⁵, de Philadelphie. — Vers la même époque, Weston⁶ imagina plusieurs formes de dynamos et développa particulièrement les machines en dérivation. — Un grand nombre d'autres inventeurs américains produisirent des dynamos, entre autres Edison⁷ qui débuta en 1878 avec une machine dans laquelle le mouvement,

¹ Brevets anglais, Gramme, 953 de 1878 ; Siemens, 3134 de 1878.

² *Phil. Trans.*, mars 1880.

³ *Nuovo Cimento*, [3]. I. 1881.

⁴ Brevet anglais, 2003 de 1878.

⁵ Brevet anglais, 315 de 1880.

⁶ Brevets anglais, 4280 de 1876 ; 1614 et 2194 de 1882.

⁷ Brevets anglais, 4226 de 1878 ; 2402 de 1879 ; 1210 et 2954 de 1881 ; et 2052 de 1882.

au lieu d'être rotatif, était oscillatoire. Cette innovation avait déjà été tentée, puis abandonnée, par Dujardin¹ en 1856, Siemens² en 1859 et Wilde³ en 1861, Edison y renonça lui-même en 1879 pour adopter un type de machines dont l'induit était une modification de celui de von Hefner-Alteneck et dont les inducteurs, montés en dérivation, présentaient une forme allongée. En 1881, il produisit une machine à disque analogue, comme lignes générales, au disque de Pacinotti. — La même année amena une renaissance des machines à courants alternatifs sous la forme conçue par Sir W. Thomson⁴ (et simultanément par Ferranti) et par Gordon⁵.

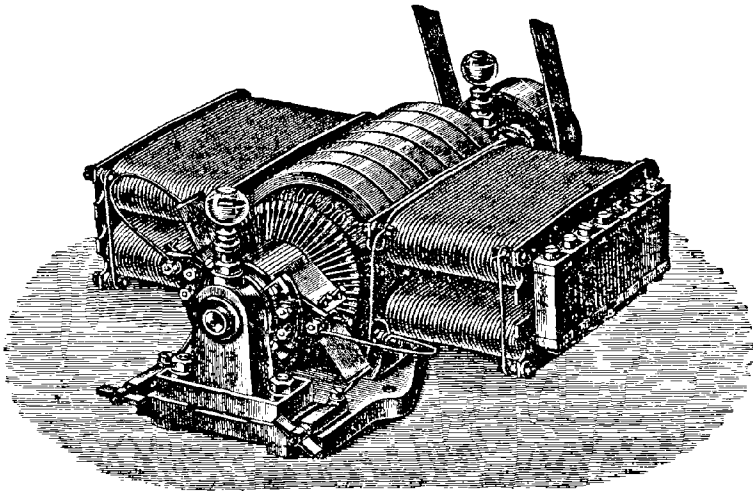


Fig. 8. — Machine Siemens à induit en tambour de von Hefner-Alteneck.

En même temps les machines multipolaires commencèrent à entrer en faveur, avec l'induit multipolaire en tambour imaginé par Lord Elphinstone⁶ et M. Vincent, et l'anneau multipolaire construit par Schuckert, Gramme, Gülcher et Mordey⁷, indépendamment les uns des autres. Lord Elphinstone en particulier appela l'attention sur l'importance que présentait le perfectionnement du circuit magnétique; cependant, pour des raisons d'ordre purement mécanique, sa machine fut promptement démodée. — Hopkinson⁸ montra combien on pouvait améliorer les qualités d'une dynamo par une meilleure étude

¹ Voir du Moncel, *Exposé des Applications*, I. 372.

² Brevet anglais, 512 de 1859.

³ Brevet anglais, 924 de 1861.

⁴ Brevet anglais, 5668 de 1881.

⁵ Brevets anglais, 5536 de 1881; et 2871 de 1882.

⁶ Brevets anglais, 332 de 1879; et 2893 de 1880.

⁷ Brevet anglais, 400 de 1883.

⁸ Brevet anglais, 973 de 1883.

et une plus grande homogénéité de son circuit magnétique. — Dans l'intervalle Crompton¹, par un certain nombre de modifications de détail, faisait ressortir l'avantage qu'il y a à augmenter la section transversale du fer dans le noyau de l'induit. — D'autre part, des considérations théoriques avaient conduit Marcel Deprez², en 1881, à cette conclusion qu'une dynamo marchant à une certaine vitesse critique devait être susceptible de distribuer des courants sous potentiel constant si ses inducteurs étaient munis d'un second enroulement destiné à fournir une excitation auxiliaire indépendante et constante, provenant d'une pile ou de toute autre source. — Cette conception fut presque immédiatement suivie de l'adoption générale de l'enroulement dit « compound », en vue d'obtenir d'une dynamo l'auto-régulation. La priorité de cette idée est revendiquée par un certain nombre de concurrents. — Depuis 1883, les principaux progrès ont consisté dans des détails d'exécution et de construction mécanique. — De grandes machines multipolaires à courant continu ont été créées par Siemens et Halske, par C. E. L. Brown, et autres, et fonctionnent actuellement avec un plein succès. — Des dynamos à disque ont également été produites par Desrozières et par Fritsche. — De grandes machines à courants alternatifs ont été construites par Ganz, Ferranti et Mordey. Cette dernière comporte une notable amélioration due à l'emploi d'un circuit magnétique unique et compact comme élément inducteur. — La création la plus récente est la machine à courants alternatifs polyphasés établie par Brown, et dont le spécimen le plus important est le type construit par les ateliers d'Oerlikon pour le transport électrique, à l'aide de courants triphasés, entre Lauffen et Francfort en 1891.

La seconde partie du sujet qui nous occupe, celle qui a trait au moteur électrique, remonte à la découverte de la rotation électro-magnétique faite par Faraday³ en 1831, et même à l'invention de la roue de Barlow⁴ en 1823. Les premiers électromoteurs dans lesquels ait été appliqué le principe de l'attraction par un électro-aimant ont été ceux de Henry⁵ en 1831, et de dal Negro⁶ en 1832, suivis des moteurs de Ritchie⁷ et de Jacobi⁸ en 1833 et 1834, puis par celui de Davenport⁹ en 1837. Un grand nombre d'autres inventeurs imaginèrent des machines de ce genre, dont les plus connues sont celle de Page¹⁰ aux Etats-Unis, de Davidson en Ecosse, de Wheatstone¹¹ en Angleterre, de Froment¹²

¹ Brevets anglais, 2618 et 4810 de 1882, et 4302 de 1884.

² *La Lumière électrique*, 3 décembre 1881 et 5 janvier 1884.

³ *Journal of Royal Institution*, septembre 1831.

⁴ Barlow, *On Magnetic Attraction* (1823), p. 279; et *Encyclopædia Metropolitana*, (1824), IV, art. *Electromagnetism*, p. 36.

⁵ *Silliman's Journal*, XX, 340, 1831. — Voir aussi Henry, *Scientific Writings*, I, 54, 1886.

⁶ *Annali delle Scienze Lombardo-Veneto*, mars 1834.

⁷ *Phil. Trans.*, [2], 318, 1833.

⁸ *L'Institut*, LXXXII, décembre 1834.

⁹ *Annals of Electricity*, II, 1838. — *Encyclopædia Britannica* (éd. VII), art. *Voltaic Electricity*, p. 687.

¹⁰ *Silliman's Journal*, XXXIII, 1838; et [2], X, 344 et 473, 1850.

¹¹ Brevet anglais, 9022 de 1841.

¹² *Cosmos*, X, 495, 1857. — *La Lumière électrique*, IX, 193, juin 1883.

en France, et de Pacinotti ¹ en Italie. — La découverte du fait que l'action d'une dynamo est simplement l'inverse de celle du moteur, et que la même machine peut remplir les deux rôles, paraît due à Jacobi ² en 1850, bien qu'elle ne soit réellement entrée qu'un peu plus tard dans le domaine des faits acquis. Elle était certainement connue en 1852, car, dans la quatrième édition du « *Magnetism* » de Davis, publiée à Boston, un appareil, décrit sous le nom « d'électro-aimant tournant », (légère modification du moteur Ritchie), est indiqué, à la page 212, comme moteur, et le même appareil figure de nouveau, page 268, comme générateur, avec cette remarque que « un instrument électro-magnétique quelconque dans lequel il y a production de mouvement par l'action mutuelle d'un courant galvanique et d'un aimant en acier peut être amené à fournir un courant magnéto-électrique si on le met mécaniquement en mouvement ». Walenn ³ établit explicitement le même point en 1860, ainsi que Pacinotti en 1864. — Le principe de la transmission de l'énergie d'une dynamo employée comme génératrice à une autre servant de moteur est revendiqué en faveur de Fontaine et Gramme, comme découvert en 1873, un montage de ce genre, fait par eux, figurant à l'Exposition de Vienne. La priorité en a été réclamée bruyamment, mais sans l'ombre de raison, au profit de Marcel Deprez ⁴, qui ne l'a toujours pas trouvé avant 1881. — En 1882, Ayrton et Perry firent l'importante découverte de la régulation automatique des moteurs en vue d'une vitesse de rotation constante, par des procédés analogues, bien qu'ils en soient l'inverse, à ceux employés pour rendre les dynamos auto-régulatrices. — Depuis lors, les perfectionnements apportés aux moteurs à courant continu, si grands qu'ils soient, ont été des améliorations mécaniques de construction et de détail. — La dynamo à courants alternatifs ne saurait faire un moteur convenable à courants alternatifs, si elle ne démarre pas seule. Une fois en marche, cependant, elle tourne en synchronisme absolu avec le générateur. Ferraris, en 1888, eut la remarquable idée d'actionner un moteur à l'aide de deux courants alternatifs indépendants, de même période, mais de phases différentes, produisant ainsi un champ magnétique tournant. Tout à fait indépendamment des travaux de Ferraris, Nikola Tesla réalisa la même conception et donna le premier à ces moteurs une forme pratique. Il a été imaginé depuis un grand nombre de variétés de moteurs « à champ tournant » ; l'un des plus remarquables entre tous est celui de Dolivo Dobrowolsky, appelé par les Allemands moteur « à courant tournant » (dreh-strom) et employé dans la démonstration de Lauffen-Francfort.

La théorie de la dynamo remonte aux recherches de Weber ⁵ et de Neumann ⁶ relatives aux lois générales de l'induction magnéto-électrique, suivies des calculs et des expériences de Jacobi ⁷ sur les qualités d'un moteur

¹ *Nuovo Cimento*, XIX. 378, 1865.

² *Mémoire sur la Théorie des machines électro-magnétiques*.

³ Brevet anglais, 2587 de 1860.

⁴ Brevet anglais, 2830 de 1882. — *Journ. Soc. Tel. Engineers*, XII. 301, 1883.

⁵ *Elektrodynamische Maasbestimmungen* (1846).

⁶ *Berliner Berichte*, 1, 1845; et 1, 1847.

⁷ *Pogg. Ann.*, LI. 370, 1840; LXIX. 181, 1846; et *Krönig's Journal*, III. 377, 1851. — Voir également *Ann. Chim. Phys.* [3]. XXXIV. 451, 1852.

électrique, de l'étude théorique de la machine magnéto-électrique de Saxton par Poggendorff ¹ et Koosen ², et des travaux de Lenz ³, Joule ⁴, Le Roux ⁵, et Sinstedden ⁶. — A ces investigations succédèrent, à long intervalle, celles de Favre ⁷, après lesquelles un silence de vingt ans ne fut rompu que par un petit travail très fécond, mais presque complètement oublié, dans lequel Clerk Maxwell ⁸ exposa une théorie des machines auto-excitatrices. — Lors de la renaissance de l'éclairage électrique, la théorie de la dynamo redevint l'objet de nombreuses études auxquelles contribuèrent puissamment Mascart ⁹, Hagenbach ¹⁰, von Waltenhoffen ¹¹, Hopkinson ¹², Herwig ¹³, Meyer et Auerbach ¹⁴, et Joubert ¹⁵. Ce dernier savant est l'auteur de la théorie moderne des machines à courants alternatifs. — Hopkinson ¹⁶ imagina le mode de représentation graphique de la relation existant entre le courant et la force électromotrice de fonctionnement de la machine; ses courbes ont ultérieurement, sous le nom de « caractéristiques », servi de base aux recherches théoriques de Marcel Deprez ¹⁷. — En 1880, Frölich ¹⁸ commença une série d'études tant expérimentales que théoriques qui le conduisirent à des relations d'une remarquable simplicité, sinon d'une valeur autre que celle de simples approximations; et en 1883, Clausius ¹⁹, prenant pour point de départ l'expression fondamentale de Frölich pour la loi de l'électro-aimant, développa, au prix d'un travail énorme, une théorie dans laquelle il a tenu compte de tous les effets secondaires qui se produisent dans les génératrices. Cette théorie a été plus tard étendue par lui au cas des moteurs. — En 1886, John et Edward

¹ *Pogg. Ann.*, XLV. 390, 1838.

² *Pogg. Ann.*, LXXXV. 226; et LXXXVII. 386, 1852.

³ *Pogg. Ann.*, XXXI. 483, 1834; XXXIV. 385, 1835; et XCII. 128, 1854.

⁴ *Annals of Electricity*, IV. V. 1839-40. — *Phil. Mag.*, [3]. XXIII. 263, 347 et 435, 1843.

⁵ *Ann. Chim. Phys.*, [3]. L. 463, 1857.

⁶ *Pogg. Ann.*, LXXXIV. 181, 1851.

⁷ *Comptes rendus*, XXXIV. 342, 1853; XXXIX. 1212, 1854; XLVI. 337, 658, 1858.

⁸ *Proc. Roy. Soc.*, 14 mars 1867. — *Phil. Mag.*, [4]. XXXIII. 471, 1867.

⁹ *Journal de Physique*, VI. 204, 297, 1877; et VII. 89, 1878.

¹⁰ *Archives des Sciences Physiques*, LV. 255, mars 1876. — *Pogg. Ann.*, CLVIII. 599, 1876.

¹¹ *Wiener Berichte*, LXXX. 601, 1879.

¹² *Proc. Inst. Mech. Engineers*, 238, 1879; et 266, 1880.

¹³ *Wied. Ann.*, VII. 493, 1879.

¹⁴ *Wied. Ann.*, VIII. 494, 1879.

¹⁵ *Ann. de l'École Normale*, X. 131, 1881. — *Journal de Physique*, [2]. II. 293, 1883.

¹⁶ *Proc. Inst. Mech. Engineers*, 238, 1879.

¹⁷ *Comptes rendus*, XCII. 1152, 1881. — *La Lumière électrique*, XV. 4, 1885.

¹⁸ *Berliner Berichte*, 962, 1880. — *Elektrotechnische Zeitschrift*, II. 134, 170, 1881; VI. 128, etc., 1885; et IX. novembre 1888.

¹⁹ *Wied. Ann.*, XX. 353, 1883; XXI. 385, 1884. — *Phil. Mag.*, [3]. XVII. 49 et 119, 1884.

Hopkinson ¹, en s'appuyant sur des considérations théoriques relatives à l'induction du magnétisme dans un circuit magnétique de forme et de substance données, développèrent dans un remarquable travail une théorie de la dynamo, dont la perfection ressort de ce fait que son application, aujourd'hui étendue par divers électriciens, permet de prévoir les qualités d'une machine avec une extraordinaire précision, d'après sa conception telle qu'elle résulte des dessins d'exécution.— D'autres savants ont contribué à la théorie de la machine dynamo, comme Sir W. Thomson ² (enroulement donnant le meilleur rendement), Kapp ³ (prédétermination de la caractéristique), Rücker ⁴ (limites de l'auto-régulation), Esson ⁵ (avant-projets de machines multipolaires), et autres. Hering ⁶, Fritsche ⁷, et Arnold ⁸ ont publié des études sur le mode d'enroulement des induits ; et ce dernier a donné à cet égard une formule applicable à tous les genres de machines à courant continu possédant des induits à circuit fermé. Des méthodes d'analyse pour les différentes pertes d'énergie par frottements, hystérésis et courants parasites, ont été publiées par Mordey ⁹, puis par Kapp ¹⁰, et Housman ¹¹ indépendamment les uns des autres.

¹ *Phil. Trans.*, I. 331, 1886.

² *Journal de Physique*, [2]. II. 240, 1887. — *Comptes rendus*, XCIII. 474, 1881.

³ *Journ. Soc. Telegr. Engineers*, XV. 518, 1887.

⁴ *Phil. Mag.*, [5]. XIX. 462, juin 1885.

⁵ *Journal. Inst. Electrical Engineers*, XX. 1891.

⁶ Hering, *Principles of Dynamo-electric Machines*, New-York, 1889.

⁷ Fritsche, *Die Gleichstrom-Dynamomaschine*, Berlin, 1889.

⁸ Arnold, *Die Ankerwicklung der Gleichstrom-Dynamomaschinen*, Berlin, 1891.

⁹ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XVIII. 620, 1889.

¹⁰ *Electrician*, XXVI. 700, 1891.

¹¹ *Ibid.* — Voir aussi *Journal Inst. Electrical Engineers*, XX. 303, 1891.

CHAPITRE III

THÉORIE PHYSIQUE DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

Toutes les dynamos reposent sur la découverte faite par Faraday en 1831 que des courants électriques prennent naissance dans des conducteurs en mouvement dans un champ magnétique. Le principe de Faraday peut s'énoncer de la manière suivante : — Quand un conducteur est mis en mouvement, dans un champ magnétique, d'une manière quelconque, mais de façon à couper les lignes de force ou à embrasser dans son circuit un flux de force variable, il se développe dans ce conducteur une force électromotrice dans une direction perpendiculaire au sens du mouvement ainsi qu'à la direction des lignes de force, et vers la droite de ces dernières vues du point d'où part le mouvement ¹.

Le Dr Fleming a donné une règle mnémonique des plus utiles pour fixer dans l'esprit cette relation entre le mouvement, le magnétisme et le courant induit : — on place le pouce, l'index et le médium de la main droite autant que possible à angles droits les uns par rapport aux autres, comme l'indique la figure 9, de manière à représenter trois axes rectangulaires dans l'espace ; le pouce étant dirigé dans le sens du mouvement et l'index suivant le sens des lignes de force, le médium se trouvera dirigé dans le sens de la force électromotrice induite.

Comme l'a montré Faraday, cette force électromotrice induite est proportionnelle au quotient du nombre des lignes de force ² coupées par

¹ L'adaptation suivante de la règle bien connue d'Ampère au cas qui nous occupe fixe mieux dans la mémoire le sens des courants induits : — Supposons un nageur placé dans un conducteur et tourné de manière à regarder dans la direction positive des lignes de force ; — si le conducteur et lui se meuvent vers sa droite, il nagera dans le sens du courant induit par ce mouvement.

² Pour la signification numérique à attacher au terme « nombre de lignes de force », employé en Angleterre, voir p. 118. — [Nous préférons, avec M. Hospitalier, l'expression « flux de force » usitée en France, parce que, outre sa plus grande simplicité, elle implique une idée de continuité plus conforme à la réalité.] (N. d. T.)

le temps mis à les couper, ou à la variation du flux à travers le circuit, et, par suite, à l'intensité du « champ » magnétique, ainsi qu'à la longueur et à la vitesse de déplacement du conducteur en mouvement. Pour des courants constants, le courant électrique dans le conducteur

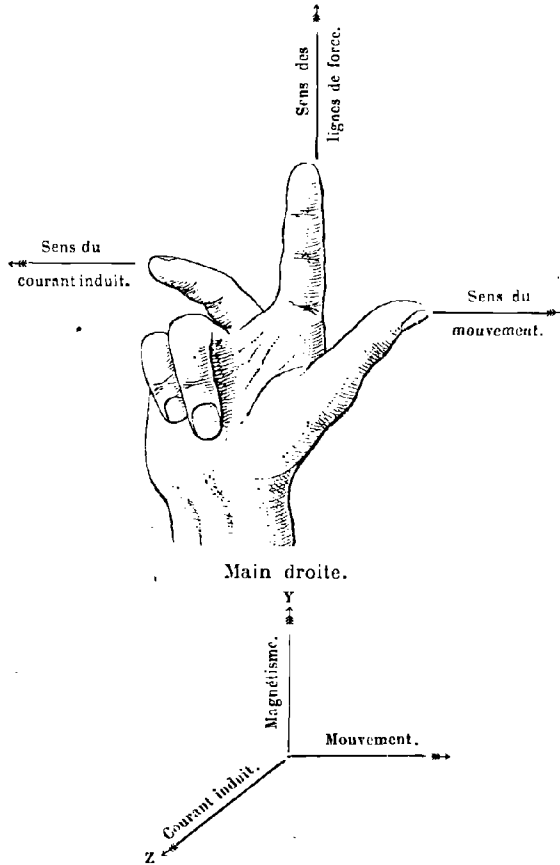


Fig. 9. — Illustration de la règle de Fleming. Cas d'une génératrice.

est, d'après la loi bien connue d'Ohm, directement proportionnel à cette force électromotrice, et inversement proportionnel à la résistance du conducteur. Ceci cesse d'être vrai pour des courants instantanés ou pour des courants dont l'intensité varie rapidement; et c'est là un des points les plus importants, bien que trop souvent négligé, dans la construction des machines dynamo-électriques, que la « résistance » d'une bobine de fil ou d'un circuit est loin d'être le seul obstacle qui s'oppose

à la production d'un courant momentané dans cette bobine ou ce circuit ; la « self-induction » exercée par une partie d'une bobine ou d'un circuit sur une ou plusieurs autres parties de ce même conducteur joue au contraire, dans bien des cas, un rôle aussi important, et, souvent même, un rôle plus considérable que la résistance.

Pour bien comprendre le principe de Faraday, c'est-à-dire comment le fait de mouvoir un fil de manière à lui faire couper des lignes de force magnétique ou à faire varier le flux de force embrassé par son circuit peut donner naissance à un courant électrique dans ce fil, il faut voir tout d'abord ce qu'est un courant électrique.

Un fil parcouru par un courant électrique ne diffère pas en apparence

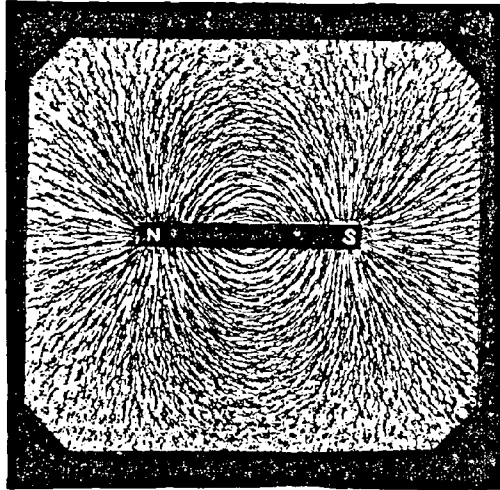


Fig. 10. — Champ magnétique d'un barreau aimanté.

de tout autre fil. Personne n'a encore vu l'électricité suivre un fil ou ne sait exactement ce qui se passe dans ce cas. A vrai dire, c'est encore un point controversé que de savoir comment s'écoule l'électricité, ou s'il y a ou non deux courants marchant simultanément en sens contraires. Un fait est certain, c'est que l'énergie ne se transmet nullement le long de la substance même du fil, mais bien transversalement, à travers le milieu ambiant. Tant qu'on ne saura pas, d'une façon absolument certaine, ce qu'est l'électricité, on ne peut espérer savoir d'une manière précise ce qu'est un courant électrique. Mais il est un point capital qui ne fait doute pour aucun electricien, c'est que, lorsqu'un soi-disant courant électrique s'écoule dans un fil, les forces magnétiques dont la manifes-

tation apparaît dans le fil pendant ce temps, résident non pas dans le fil lui-même, mais bien dans l'espace qui l'environne. Chacun sait que l'espace ou « champ » environnant un aimant et soumis à son action est rempli de « lignes de force » magnétiques, et que ces lignes s'y dirigent sous forme de houppes, du pôle N au pôle S de l'aimant¹, invisibles tant qu'on ne les révèle pas en saupoudrant le champ de limaille de fer qui accuse alors leur présence, bien qu'en réalité elles y existent toujours (fig. 10). Vu de bout, le champ magnétique au pôle d'un barreau

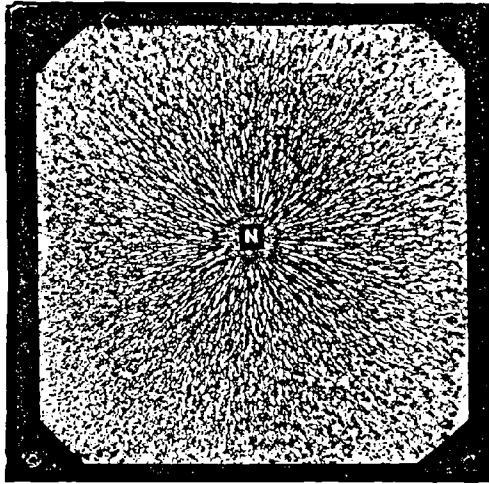


Fig. 11. — Champ magnétique autour d'un pôle vu de bout.

aimanté ne présenterait, naturellement, que des lignes rayonnantes, comme dans la figure 11.

Maintenant, tout courant électrique (pour employer le terme adopté) est environné d'un champ magnétique, dont les lignes de force peuvent être révélées de la même manière. Pour les observer, il suffit de percer dans une carte ou dans un morceau de verre un trou à travers lequel on fait passer le fil qui conduit le courant. Si alors on saupoudre le champ de limaille de fer, cette limaille se dispose en cercles concentriques (fig. 12) qui prouvent que les lignes de force entourent complètement le fil, au lieu de former des houppes extérieures. En réalité, tout fil conducteur en action est entouré d'une sorte de tourbillon magnétique,

¹ Ici, comme dans tout le cours de cet ouvrage, nous désignons par pôle N et pôle S les pôles qui se dirigent respectivement vers le pôle N et le pôle S de la terre.

analogue à ce qu'indique la figure 13. Une grande partie de l'énergie de ce que l'on est convenu d'appeler courant électrique dans le fil consiste dans ces tourbillons magnétiques extérieurs. Leur développement exige une dépense d'énergie et leur maintien demande également une dépense constante d'énergie. Ce sont ces tourbillons magnétiques qui agissent sur les aimants et tendent à les mettre, comme les aiguilles des galvanomètres, à angles droits avec le fil conducteur.

Dès lors, le principe de Faraday revient simplement à ceci, que le

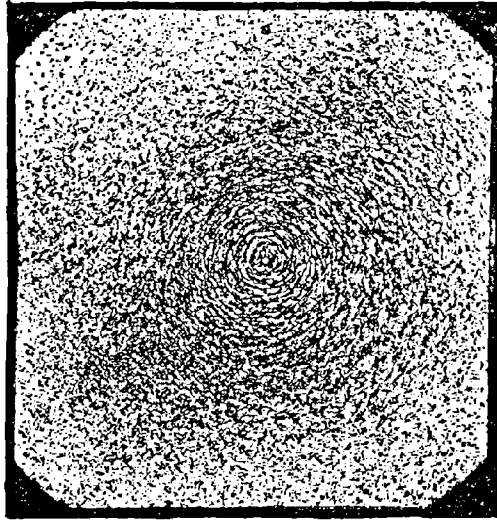


Fig. 12. — Champ magnétique entourant un courant. Le fil conducteur est vu de bout.

mouvement d'un fil dans le voisinage d'un aimant, à travers un espace rempli de lignes magnétiques, et à la condition qu'il coupe transversalement ces lignes magnétiques (autrement dit que le flux de force embrassé par son circuit varie), développe des tourbillons magnétiques autour du fil ainsi mis en mouvement, ou, en d'autres termes, donne naissance à ce que l'on nomme un courant électrique dans ce fil. L'introduction d'un pôle d'aimant dans une spire ou dans un circuit de fil engendre nécessairement aussi un courant momentanément dans cette spire de fil, en raison de ce qu'il y développe momentanément des tourbillons magnétiques. Dans le langage de Faraday, cette action augmente le nombre des lignes ou le flux de force embrassé par le circuit.

Il est cependant de toute nécessité que le conducteur mobile coupe

dans son mouvement les lignes de force, de manière à ce qu'il y ait modification dans le nombre de ces lignes ou variation du flux pénétrant le circuit dont fait partie le conducteur mobile. Si l'on fait mouvoir un circuit conducteur — fil en forme d'anneau ou simple spire par exemple — le long d'un champ magnétique uniforme, comme l'indique la figure 14, de telle sorte qu'il soit toujours traversé par les mêmes lignes de force ou qu'il embrasse le même flux, aucun courant n'y prendra naissance. De même encore, comme le montre la figure 13, si la spire se déplace, par un mouvement de translation, vers une autre partie du champ magnétique uniforme, elle laissera derrière elle autant de lignes de force qu'elle en gagnera en avançant de sa première à sa seconde position ; le flux restera constant et il ne s'y développera aucun courant. Si celle-ci tourne simplement sur elle-même autour d'un axe central, comme la jante d'une poulie, elle ne coupera pas une ligne de force de plus que précédemment ; le flux sera encore constant, et ce mouvement ne fera naître encore aucun courant. Autrement dit, elle sera toujours, dans ces deux cas, pénétrée par le même flux de force. Mais si, comme

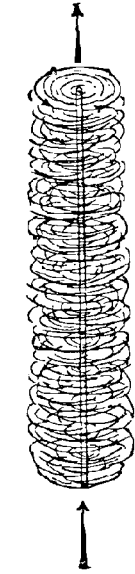


Fig. 13. — Tourbillon magnétique autour d'un fil parcouru par un courant.

dans la figure 16, la spire s'incline dans son mouvement à travers le champ uniforme, ou si elle tourne autour d'un axe quelconque situé dans son propre plan, alors le nombre des lignes qui la traversent sera modifié, il y aura variation du

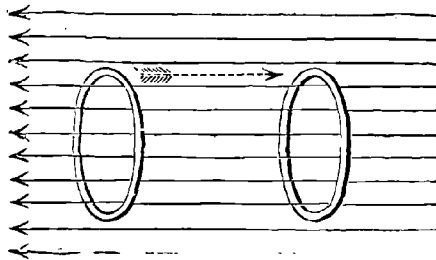


Fig. 14. — Circuit se mouvant sans couper les lignes de force d'un champ magnétique uniforme.

flux à travers la spire, et des courants seront engendrés. Ces courants parcourront la bobine annulaire en allant vers la droite (étant admis que l'on regarde le champ magnétique en long dans la direction des lignes de force), si le mouvement a pour effet de diminuer le nombre de lignes.

de force coupées ou le flux intercepté par le circuit; ils circuleront en sens contraire, si le mouvement a pour effet d'augmenter le nombre des lignes ou le flux de force intercepté.

Si le champ magnétique n'est pas uniforme, le seul fait de déplacer la bobine, par un simple mouvement de translation, d'un endroit où les

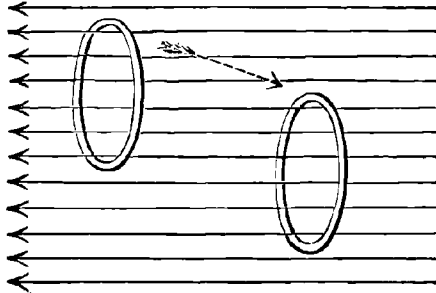


Fig. 15. — Circuit se mouvant en coupant toujours le même nombre de lignes de force.

lignes de force sont resserrées à un autre où elles sont moins denses, ou d'un endroit où le flux de force est plus grand que dans un autre,

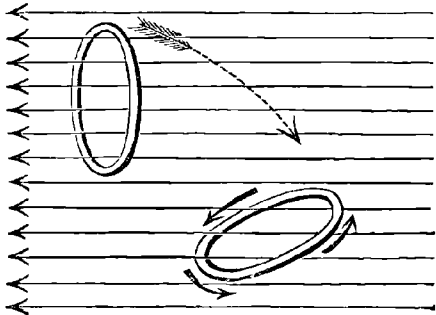


Fig. 16. — Circuit se mouvant de manière à couper un nombre variable de lignes de force.

comme de la première à la seconde position dans la figure 17, déterminera la naissance de courants; il en sera de même si le mouvement a lieu vers un endroit où les lignes de force sont dirigées en sens contraire¹, et, dans ce cas, l'action sera encore plus énergique.

¹ En fait, il serait impossible de réaliser un champ magnétique exactement semblable à celui de la figure 17. Dans la portion intermédiaire, entre les champs supé-

Les considérations qui précèdent et quelques-unes de leurs conséquences immédiates peuvent se grouper dans le résumé suivant :

1° Une partie au moins de l'énergie d'un courant électrique se présente sous forme de tourbillons magnétiques dans l'espace qui entoure le conducteur ;

2° On peut donner naissance à des courants dans des conducteurs en déterminant autour d'eux des tourbillons magnétiques ;

3° Ces tourbillons magnétiques peuvent prendre naissance soit sous l'influence d'aimants mis en mouvement dans le voisinage des conduc-

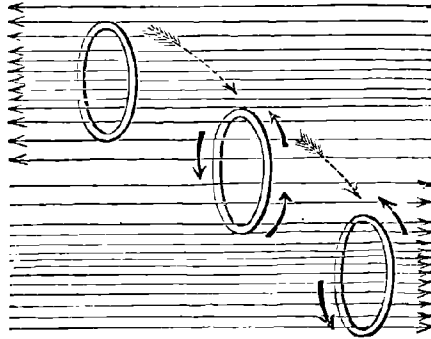


Fig. 17. -- Mouvement d'un circuit dans un champ magnétique non uniforme.

teurs, soit par suite du mouvement de conducteurs dans le voisinage d'aimants ;

4° La production de ces tourbillons magnétiques et leur maintien à l'aide d'un courant électrique circulant dans une bobine exigent une dépense continue d'énergie, ou, en d'autres termes, absorbent du travail ;

5° Pour qu'il y ait induction de courants dans un conducteur, il faut, entre le conducteur et l'aimant, un mouvement relatif de nature à modifier le nombre des lignes ou le flux de force intercepté par le circuit ;

6° Une augmentation dans le nombre des lignes ou le flux de force intercepté par le circuit produit un courant de sens contraire à celui que détermine une diminution dans le nombre de ces mêmes lignes ou dans ce flux de force ;

rieur et inférieur, les lignes de force affecteraient en effet la forme d'une courbe complexe.

7° Le rapprochement induit une force électromotrice de sens contraire à celle qui résulte de l'éloignement ;

8° Plus un pôle d'aimant ou un champ magnétique est puissant, plus, toutes choses égales d'ailleurs, la force électromotrice développée est élevée ;

9° Plus le mouvement est rapide, plus la force électromotrice est considérable ;

10° En réunissant en série un certain nombre de ces conducteurs mobiles, on ajoute les unes aux autres les forces électromotrices développées dans chacun des éléments de cet ensemble, ce qui permet de réaliser des forces électromotrices très élevées à l'aide de nombreuses bobines convenablement connectées ;

11° Du moment que l'intensité du courant, ou le quotient de la quantité d'électricité qui traverse des conducteurs en circuit par le temps qu'elle met à les traverser, dépend de la résistance de ces conducteurs, aussi bien que de la force électromotrice, on doit éviter toute résistance inutile ;

12° Le rapprochement étant forcément limité, le fait du rapprochement et de l'éloignement relatifs d'une bobine et d'un pôle d'aimant doit nécessairement engendrer des courants de sens alternatifs ;

13° L'emploi d'un commutateur convenable permet de diriger dans le même sens tous les courants, directs ou inverses, produits pendant le rapprochement ou l'éloignement, dans le fil qui doit porter ces courants aux circuits extérieurs ; et, si les bobines mobiles sont convenablement groupées, de telle sorte que l'une d'entre elles entre en action avant que la force électromotrice développée dans l'autre ait disparu, on pourra, à l'aide d'un commutateur disposé à cet effet, grouper en un seul courant pratiquement uniforme les courants engendrés dans chacune d'elles séparément ;

14° En ce qui concerne le conducteur dans lequel se développe la force électromotrice en raison de ce qu'il coupe des lignes de force magnétiques, l'origine de ces lignes est indifférente : qu'elles émanent d'un aimant permanent en acier ou d'un électro-aimant, peu importe, pourvu que le nombre des lignes magnétiques coupées ou le flux ainsi intercepté soit le même ;

15° Pour le conducteur mobile, l'origine du mouvement est également indifférente. Que le mouvement soit transmis par une machine à vapeur, par un moteur à gaz, ou à la main, ou encore par l'action d'un courant électrique dans le fil même (comme dans le cas des moteurs

électriques), peu importe ; le conducteur mobile deviendra le siège de la même force électromotrice, pourvu que sa vitesse et le nombre des lignes coupées ou le flux de force intercepté restent les mêmes.

Pour donner plus de clarté aux considérations que nous aurons à développer dans l'étude des divers types de dynamos pris individuellement, nous commencerons par examiner quelques points fondamentaux du mécanisme général et des organes des machines dynamos. Il y a en effet un grand nombre de conditions complémentaires à réaliser dans la construction d'une bonne dynamo. Nous aborderons dans un ordre méthodique les divers points, en commençant par les différents organes ou éléments de la machine. Après les avoir étudiés, nous examinerons la nature des phénomènes qui se produisent quand la machine fonctionne, l'action du champ magnétique sur l'induit en mouvement, les réactions de cet induit sur le champ magnétique dans lequel il se meut. Nous entrerons ensuite dans la partie magnétique du sujet et considérerons les propriétés magnétiques du fer en tant qu'il est nécessaire de les connaître pour l'établissement d'une dynamo. Nous passerons enfin à l'étude des inducteurs, ainsi qu'à l'étude et au mode de construction des induits.

ORGANES DES MACHINES DYNAMO-ÉLECTRIQUES

La dynamo la plus élémentaire qu'on puisse concevoir est représentée par la figure 18. Elle consiste en une seule boucle, ou spire rectangulaire, de fil tournant dans un champ magnétique simple et uniforme, entre les pôles d'un aimant de grandes dimensions. Si l'on commence par placer la boucle dans le plan vertical, le flux de force qui la traverse de droite à gauche sera maximum ; puis il diminuera pour tomber à zéro au fur et à mesure que dans sa rotation la spire avancera vers la position horizontale ; mais la continuation du mouvement laissera ensuite le flux de force pénétrer en sens inverse dans l'intérieur de la boucle, ce qui déterminera un maximum négatif quand celle-ci aura tourné de 180 degrés. Pendant cette demi-révolution des courants auront été ainsi induits dans la boucle ; ces courants seront d'arrière en avant dans la partie de la boucle qui s'élève sur la gauche, et de sens contraire, c'est-à-dire d'avant en arrière, dans la partie qui descend sur la droite. Au moment où elle passera par la position correspondant à 180 degrés de son point de départ, il y aura commencement d'induction en sens inverse, car alors le flux de force négatif diminue, ce qui équivaut à une augmen-

tation positive du flux de force ; et cette augmentation continuera jusqu'à ce que la boucle soit revenue à sa position initiale après avoir effectué une rotation complète.

Dans ces conditions, si chacune des extrémités de la boucle était reliée séparément à une bague métallique fixée sur l'axe, tout en étant isolée,

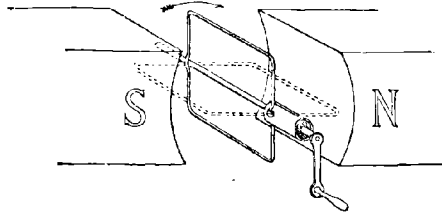


Fig. 18. — Dynamo élémentaire idéale.

et si chacune de ces bagues était pressée par un ressort, des fils attachés à ces ressorts porteraient au circuit un *courant alternatif*. Si, au contraire, on veut faire produire à l'appareil un courant continu, il est nécessaire d'y ajouter une disposition spéciale.

Pour transformer ces courants alternativement de sens contraires en un courant de même sens dans le circuit extérieur, il faut employer un *commutateur* formé d'un tube métallique fendu longitudinalement en deux parties et monté sur un cylindre de bois dur ou de toute autre matière isolante convenable, chacune des moitiés de ce tube étant reliée à l'une des extrémités de la boucle, comme l'indique la figure 18.

Contre ce commutateur viennent presser deux ressorts métalliques ou « balais » (fig. 19) qui recueillent les courants pour les conduire dans le circuit extérieur. Il est évident que, si les balais sont disposés de telle sorte que

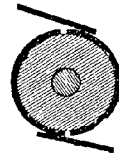


Fig. 19. — Commutateur ou collecteur en deux parties.

l'une des parties du tube fendu échappe du balai et que l'autre arrive en contact avec lui au moment où la boucle occupe les positions correspondant au renversement d'induction, les courants alternatifs induits dans la boucle seront « commués » en un courant d'un seul et même sens dans le circuit. On doit s'attendre en conséquence à ce que les balais soient placés de manière qu'il y ait commutation juste au moment où la boucle passe par la position verticale. La pratique montre cependant que le *calage* des balais doit être légèrement avancé dans le sens du mouvement pour des raisons que nous examinerons. La figure 20 représente les balais BB déplacés de manière à toucher le commutateur

non pas exactement aux points le plus élevé et le plus bas, mais en des points déviés dans la direction de la ligne DD qu'on nomme le « diamètre de commutation ». Le raisonnement ne change pas si à la spire idéale unique on substitue, comme l'a proposé Sturgeon en 1835, la simple

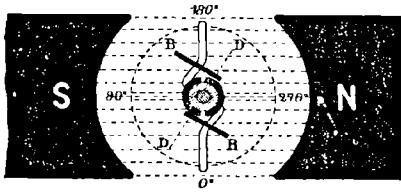


Fig. 20. — Spire unique dans un champ magnétique simple.

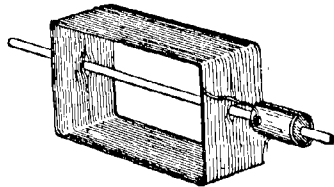


Fig. 21. — Bobine rectangulaire simple.

bobine rectangulaire représentée par la figure 21 et formée d'un grand nombre de tours de fil, dans chacun desquels se produit une action inductive simultanée, qui augmente proportionnellement la force électromotrice totale induite.

Cette disposition, avec addition d'un noyau de fer, n'est autre que la forme

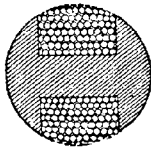


Fig. 22. — Section de l'ancienne armature en navette Siemens.

primitive donnée en 1836 aux armatures par Siemens, dont la figure 22 représente en section l'armature *en navette*. On voit dans la figure 23 une petite machine magnéto-électrique du type

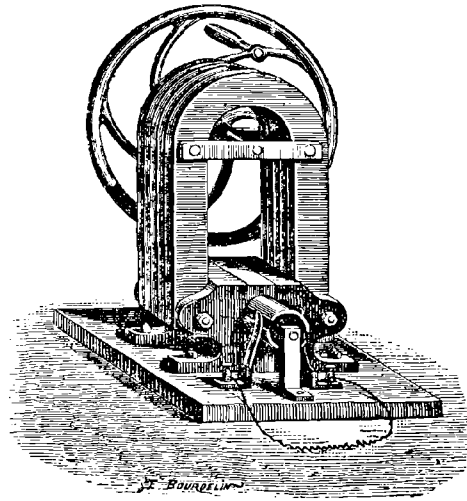


Fig. 23. — Ancienne machine Siemens à armature en navette et à aimants permanents.

primitif munie de cette armature. Bien que cette forme soit abandonnée depuis un certain nombre d'années, sauf pour de petits moteurs et autres appareils du même genre, elle a donné un grand élan aux machines de son temps ; mais dans toutes les machines puissantes elle est aujourd'hui universellement remplacée par les armatures en anneau ou en tambour que nous allons maintenant décrire.

ÉLÉMENTS ESSENTIELS D'UNE DYNAMO

On a vu que la dynamo, dans sa forme la plus simple, se compose de deux organes principaux : — 1° un *induit* qui, en tournant, devient le siège d'une force électromotrice développée dans le conducteur de cuivre dont il est enroulé ; — 2° un système *inducteur*, c'est-à-dire un aimant dont l'objet est de créer un champ magnétique déterminant un flux de force à travers le circuit des conducteurs de l'induit mis en mouvement. Dans toutes les dynamos, aussi bien à courants alternatifs qu'à courant continu, ces deux parties sont faciles à reconnaître. Dans presque toutes les machines à courant continu les inducteurs sont fixes et formés d'un électro-aimant massif et relativement simple, tandis que l'induit, d'une structure plus compliquée, est l'organe mobile. Dans les machines à courants alternatifs l'inducteur est ordinairement multipolaire et fixe dans la plupart des cas, tandis que l'induit est mobile ; néanmoins, dans un certain nombre d'alternateurs de types récents, c'est l'induit qui est fixe et l'inducteur mobile. Le critérium de la partie qui doit, à proprement parler, être appelée « inducteur » ou « induit » n'est pas une question de rotation ou de fixité. Le nom d'inducteur est spécialement attribué à la partie, stationnaire ou mobile, dans laquelle l'aimantation est maintenue d'une façon permanente ou invariable pendant la rotation, et celui d'induit à celle, mobile ou fixe, dans laquelle le magnétisme varie d'une façon régulièrement répétée quand la machine fonctionne.

Les machines à courant continu présentent une autre disposition d'une importance capitale ; c'est l'appareil destiné à la captation des courants engendrés dans l'induit. Cet appareil comprend deux parties essentielles : le *commutateur* ou *collecteur*, fixé à l'induit et tournant avec lui, et les *balais*. Ces derniers, qui ne sont autres que des pièces conductrices maintenues par pression en contact avec la surface du collecteur mobile, reposent dans des *porte-balais* spéciaux montés sur un support mobile réglable à volonté, ou *collier*.

Dans les machines à courants alternatifs le commutateur est inutile ; mais, en général, ces machines doivent être pourvues d'une disposition établissant une connexion à glissement. En effet, dans les types qui comportent un induit mobile, les bobines de cet induit doivent être en liaison métallique permanente avec les conducteurs du circuit principal, et dans ceux dont l'induit est fixe et n'exige pas lui-même ce dispositif, il faut encore des contacts à glissement pour maintenir les bobines de

l'inducteur mobile en connexion métallique permanente avec le circuit auxiliaire d'excitation. Dans un cas comme dans l'autre, on arrive à ce résultat au moyen de deux *anneaux collecteurs* ou *bagues collectrices* contre chacune desquelles presse un *balai*.

Outre les éléments électriques et magnétiques que nous venons d'énumérer, il y a encore à considérer un certain nombre de détails d'ordre purement mécanique. La partie mobile doit être montée sur un *axe* ou *arbre* convenable, dont l'étude appartient à l'ingénieur mécanicien. La transmission du couple moteur de l'arbre aux conducteurs mobiles qui recouvrent l'induit exige un *mode d'entraînement* assurant la solidarité de ces deux organes. L'arbre lui-même doit être supporté par des *coussinets* convenables munis de *graisseurs* pour parer à tout échauffement. Une *poulie* est indispensable pour communiquer à la dynamo le mouvement fourni par le moteur, à moins que celle-ci ne soit directement attelée par *manchonnage* sur l'arbre d'un moteur monté sur le même bâti. Enfin la dynamo doit être fixée elle-même sur un *socle* convenable, placé dans certains cas sur des *rails*, de manière à permettre de temps à autre de rattraper l'allongement de la courroie au moyen de tendeurs à vis.

Dans les considérations qui suivent nous concentrerons notre attention sur les machines destinées à fournir des courants continus et dont nous étudierons soigneusement les divers organes. L'étude des machines à courants alternatifs fera l'objet d'un chapitre ultérieur.

MACHINES A COURANT CONTINU

INDUITS ou ARMATURES

Revenant à la spire unique idéale, on voit un peu plus clairement dans la figure 24 ses liaisons avec le commutateur en deux parties. Le même tube fendu ou commutateur à deux coquilles suffit si l'on substitue à la spire unique une boucle formée de deux ou plusieurs tours, telle que l'indique la figure 25.

Mais on peut également remplacer la spire unique par une petite bobine formée de plusieurs tours roulés sur un anneau de fer. Cette bobine (fig. 26), véritable section d'anneau Pacinotti ou Gramme, sera pénétrée, comme la spire, par un flux de force induit. Dans la position indiquée, elle occupe le point le plus élevé de sa course, auquel correspond l'induction maximum du flux de force qui agit sur elle. Au fur et à mesure qu'elle tourne, le flux de force qui la pénètre diminue pour

tomber à zéro quand elle est à 90 degrés de sa position initiale. Mais il suffit de s'arrêter un instant sur l'action dont elle est le siège pour voir que, si une autre bobine occupe sur le côté opposé de l'anneau une posi-

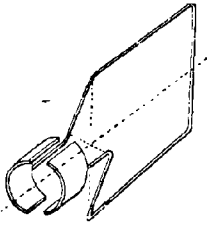


Fig. 24. — Induit en boucle à une seule spire.

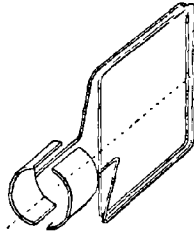


Fig. 25. — Induit en boucle à deux spires.

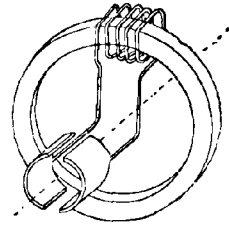


Fig. 26. — Induit annulaire simple à bobine unique.

tion symétrique, elle sera soumise au même moment à une action inductive exactement semblable, et pourra, par suite, être reliée au même commutateur. Si ces deux bobines sont réunies parallèlement (en arc multiple), comme l'indique la figure 27, leur force électromotrice con-

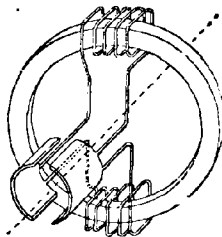


Fig. 27. — Induit annulaire simple à deux bobines reliées parallèlement.

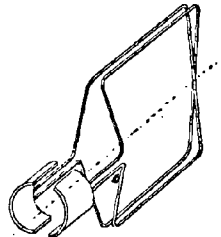


Fig. 28. — Induit en boucle simple à deux bobines reliées parallèlement.

juguée sera identique à celle due à l'une quelconque d'entre elles séparément ; mais la résistance qu'elles présenteront au courant dans ces conditions sera égale à la moitié de celle offerte par chacune d'elles individuellement. Il est évident que l'on peut réunir de la même manière à un simple collecteur en deux parties deux boucles du premier type reliées parallèlement. Si les deux bouclés ont chacune un seul tour, on aura la disposition schématiquement représentée par la figure 28 ; et ce mode de connexion sera également applicable à des boucles formées chacune de plusieurs spires.

Mais toutes ces dispositions qui comportent l'emploi d'un commutateur en deux parties, reliant, soit en un seul circuit, soit en deux circuits parallèles, les bobines qui y aboutissent, présentent cet inconvénient

que les courants, bien que ramenés dans une même direction, ne sont pas absolument continus. Dans une spire unique quelconque sans commutateur, les révolutions successives engendreraient des courants dont les variations pourraient, si elle était exempte de self-induction, être



Fig. 29. — Courbe simple de sinus représentant un courant alternatif.

graphiquement représentées par une sinusoïde récurrente, comme dans la figure 29. Mais si, par l'addition d'un simple commutateur formé d'un tube fendu, on redresse les moitiés renversées de ces courants, de manière à leur donner le même sens dans le reste du circuit, les courants résultants, sans être continus, deviendront de même signe, comme



Fig. 30. — Courbe d'un courant alternatif redressé en courant ondulateur.

l'indique la figure 30, deux courants étant engendrés pour chaque révolution de la bobine.

Les courants sont ainsi « rectifiés », ou « redressés », comme on dit sur le continent, mais ne sont pas continus. Pour obtenir cette *continuité* des courants, il faut procéder du simple commutateur en deux parties à une forme de commutateur formé d'un

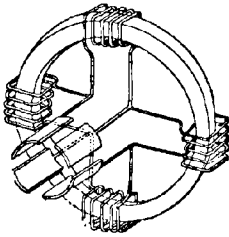


Fig. 31. — Induit en anneau à quatre sections (à circuit fermé).

plus grand nombre de sections et employer en même temps un plus grand nombre de bobines élémentaires. Les bobines doivent en outre être disposées de telle sorte que l'une entre en activité quand l'autre devient inactive. D'après cela, si l'on monte sur un anneau de fer deux jeux de bobines situés dans des plans perpendiculaires entre eux, comme l'indique la figure 31, de telle sorte que l'un arrive à sa position de maximum d'action quand l'autre est dans la position d'action minimum (l'un étant parallèle aux lignes de force, pendant que l'autre leur est normal), et si leurs actions se superposent, on arrivera au résultat indiqué par la figure 32, qui représente un courant continu, mais ondulateur, avec quatre légères ondulations par tour. Avec un plus grand nombre de bobines élémentaires, dont les actions,

se produisant à intervalles réguliers, se superposent, on obtiendra une courbe analogue mais dont les sommets seront relativement plus nombreux et moins saillants. Si le nombre des bobines employées est très considérable et le chevauchement des courbes encore plus complet, la série des sommets formera pratiquement une ligne droite, c'est-à-dire que, pratiquement, le courant total sera constant.

Montées comme dans la figure 31, les quatre bobines sont toutes réunies en un circuit *fermé*, la fin de la première étant reliée au commen-



Fig. 32. — Courbe de courant sensiblement, mais non absolument, continu.

cement de la seconde, et ainsi de suite sur tout le pourtour de l'anneau, jusqu'à la dernière section qui se ferme sur la première.

Pour donner un résultat parfaitement uniforme, les spires de l'induit doivent être divisées en un très grand nombre de sections (voir les calculs, p. 213 Chap. IX), et ces sections doivent être disposées de manière à venir l'une après l'autre, à intervalles égaux et par une succession régulière, dans la position d'induction maximum. La figure 33 donne le schéma d'une armature en tambour formée de deux paires de bobines élémentaires à angles droits l'une par rapport à l'autre et reliées à un collecteur à quatre sections. Il suffit de jeter les yeux sur les figures 31 et 33 pour voir que cha-

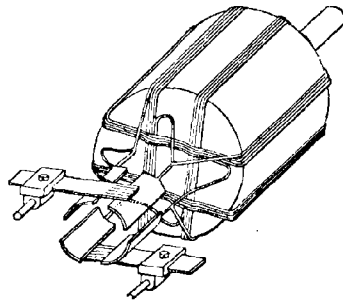


Fig. 33. — Induit en tambour à quatre sections (à circuit fermé).

cune des bobines élémentaires est reliée à sa voisine, d'où il résulte que l'ensemble des spires constitue une seule bobine fermée. Ainsi, la fin d'une section et le commencement de sa voisine sont reliés tous deux à une même lame du collecteur. Dans la pratique, les segments du collecteur ne sont pas de simples tranches de tube métallique ou « coquilles » ; ils sont formés d'un certain nombre de lames ou « touches » parallèles en cuivre, bronze ou bronze phosphoreux, comme on peut le voir sur la figure 36, page 41, circulairement disposées à la périphérie et suivant les génératrices d'un cylindre en matière isolante quelconque. Il est à noter également que, grâce à ce que le circuit est absolument continu autour de l'induit, deux voies sont ouvertes

au passage du courant d'un balai à l'autre à travers les induits, soit en tambour, soit en anneau, dont les figures 31 et 33 peuvent d'ailleurs être considérées comme des types simplifiés. Le raisonnement ici appliqué aux armatures à quatre sections subsiste pour celles qui en ont un plus grand nombre comme celle représentée par la figure 34. Nous y reviendrons plus longuement dans les chapitres suivants. Il suffira de dire ici que, dans toutes les armatures à circuit fermé, soit en « anneau », soit en « tambour », il y a ordinairement autant de segments au collecteur qu'il y a de sections ou bobines élémentaires dans le circuit de l'induit.

Le cas spécial des *induits à circuit ouvert* est examiné au Chapitre XVII. Dans ces machines, les bobines élémentaires ne sont pas

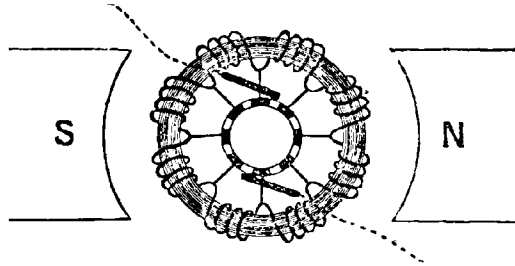


Fig. 34. — Induit simple en anneau, montrant les connexions d'un circuit fermé.

reliées en série, et leur collecteur, au lieu d'être constitué par la juxtaposition habituelle d'un grand nombre de lames parallèles, a une forme particulière.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, les « balais » pressent contre le commutateur, maintenus généralement dans la position voulue à l'aide d'un ressort. Au fur et à mesure que le collecteur tourne, chacune de ses lames passe successivement sous le balai et entre en contact avec lui. D'un côté, — c'est-à-dire du côté vers lequel marchent les deux courants dans l'armature, — le courant passe de la lame du collecteur au balai. De l'autre côté, le courant de retour s'écoule du balai négatif à la lame du collecteur en contact avec lui, pour se partager de là en deux parties à travers les deux circuits de l'induit. Comme les balais appuient contre les lames du collecteur, il arrive que, l'une de ces lames quittant le balai, et la suivante se présentant à lui, le contact se trouve un instant établi entre deux lames voisines; la bobine élémentaire ou section dont les extrémités sont reliées à ces deux lames est ainsi momentanément mise en court-

circuit. On verra plus loin ce qui en résulte quand on étudiera les réactions dans les armatures.

Nous n'avons considéré jusqu'ici que les deux types d'armatures « en tambour » et « en anneau » ; ce ne sont cependant pas les seuls modes de construction possibles. L'objet de toutes les combinaisons de bobines est d'obtenir la continuité et l'égalisation pratiques du courant, dont il a été parlé plus haut. Pour atteindre ce but, il est indispensable qu'une partie des bobines élémentaires arrive à la position d'action maximum pendant que d'autres passent au point neutre et sont momentanément inactives. Cette condition entraîne une disposition symétrique des bobines élémentaires ou groupes de bobines autour d'un axe ; et cette disposition peut affecter l'une des quatre formes typiques qui suivent :

- 1). *Induits en anneau*, dans lesquels les bobines sont groupées sur un anneau dont l'axe principal de symétrie est également l'axe de rotation ;
- 2). *Induits cylindriques ou en tambour*, dans lesquels les spires sont roulées longitudinalement sur la surface d'un cylindre ou tambour ;
- 3). *Induits polaires*, dont les spires sont roulées sur des pôles séparés rayonnant à la périphérie d'un disque ou moyeu central ;
- 4). *Induits disques*, dans lesquels les spires sont aplaties sur un disque.

Les induits en *anneau* figurent dans un grand nombre de machines ; et l'attention des inventeurs s'est spécialement portée sur les trois points suivants : assurer pratiquement la continuité du courant ; prévenir le développement de courants parasites dans les noyaux ; et réduire, autant que possible, les résistances inutiles. Dans la majeure partie de ces machines, les induits sont formés de bobines élémentaires en circuit fermé, mais rien ne s'oppose à ce qu'on établisse des induits en anneau à circuit ouvert ; c'est en effet le cas de la machine Brush bien connue, pour lumière à arc.

La plupart des inventeurs se sont contentés d'assurer approximativement la continuité du courant en multipliant le nombre des sections. Dans la machine originale de Pacinotti, les spires étaient roulées entre des dents en saillie sur un anneau de fer. Gramme a laissé de côté cette denture, préférant l'enroulement direct sur toute la surface d'un noyau lisse. Pour empêcher le développement de courants parasites dans les noyaux, Gramme a employé, pour cette partie de l'armature, un faisceau annulaire formé d'un grand nombre de tours de fil de fer vernissé.

Pour les induits cylindriques, on préfère presque généralement au-

jourd'hui des disques de tôle. Quant aux induits disques, le noyau est composé de cercles de feuillard concentriques, sur champ.

Dans les induits annulaires, les portions de spires qui passent à l'intérieur de l'anneau sont relativement inactives en ce qu'elles ne coupent pas de lignes de force, à moins que des pièces polaires inductrices ne viennent s'y épanouir intérieurement. Aussi, dans les types ordinaires de dynamos à inducteurs extérieurs, les parties intérieures du fil de l'anneau agissent-elles simplement comme conducteurs et non comme parties induites, et offrent-elles ainsi une certaine résistance inutile. Mais, dans les machines bien étudiées, cette résistance est insignifiante comparati-

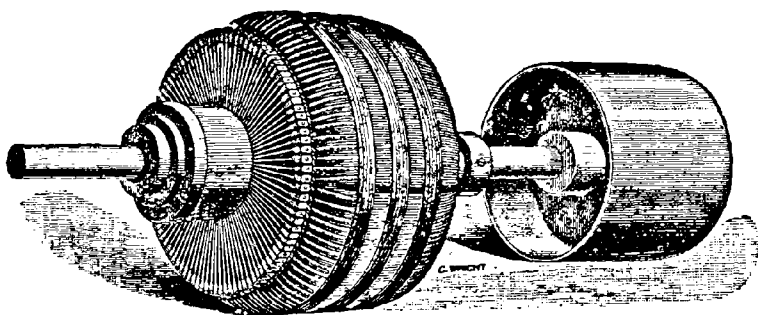


Fig. 35. — Induit en anneau de Gramme (modèle Fuller).

vement à celle du circuit extérieur, et l'infériorité qui en résulterait est réellement illusoire.

Divers inventeurs ont essayé de réduire ce prétendu inconvénient, soit en munissant les pièces polaires d'appendices rentrants, soit en employant des électro-aimants internes, ou bien encore en aplatissant l'anneau en forme de disque, de manière à diminuer, autant que possible, les portions internes des spires de l'anneau. En réalité, les armatures en forme d'anneau plat peuvent être regardées quant à présent comme un type distinct de celles dans lesquelles l'anneau tend vers la forme cylindrique¹.

Dans quelques grandes machines allemandes de récente création l'anneau est extérieur aux électro-aimants, de sorte que la portion externe des fils qui ne subit pas d'action inductrice est inerte. Les courants y sont recueillis par des balais directement appliqués sur la périphérie

¹ Dans le cours de cet ouvrage l'Auteur emploie souvent l'expression d' « anneau cylindrique » par opposition à « anneau plat » ou « disque ». Il serait peut-être plus correct de dire « anneau long » et « anneau plat ». [N. d. T.]

de l'anneau. Les différents modes de bobinage des induits et de connexion de leurs conducteurs font l'objet d'une étude spéciale au Chapitre XII. La figure 35 représente un induit annulaire terminé, muni de son collecteur et de sa poulie d'entraînement.

Dans les induits en *tambour* ou cylindriques, tels que les a construits tout d'abord Siemens, les noyaux étaient constitués par du fil de fer roulé sur une carcasse intérieure en matière non magnétique. Weston y substitua des disques de tôle estampés, munis de dents; Edison, des disques de tôle lisses. Un grand nombre d'inventeurs ont imaginé des modes spéciaux de bobinage et de connexion des conducteurs. On voit dans la figure 36 un induit complet en tambour, avec les

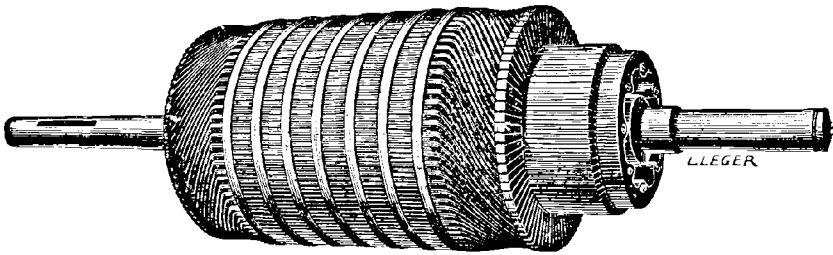


Fig. 36. — Induit en tambour (modèle de l'« Allgemeine Gesellschaft »).

chevauchements des fils à l'extrémité du tambour, leur liaison au collecteur et les frettes extérieures qui empêchent les bobines élémentaires de quitter leur position normale sous l'action de la force centrifuge pendant la rotation.

Les induits *polaires*, à bobines roulées sur des pôles disposés en pro-

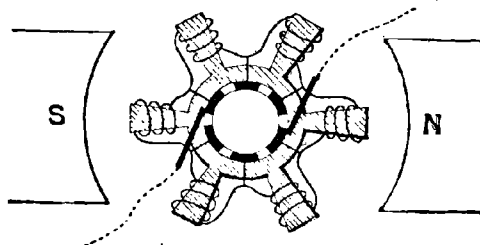


Fig. 37. — Induit polaire simple, montrant les connexions.

jections radiales, ont été imaginés par Allan, Lontin et Weston. Le principe de la machine Lontin, dont les bobines sont reliées entre elles comme les sections d'un anneau Pacinotti ou Gramme, est indiqué dans

la figure 37. Ici le diamètre de commutation est parallèle au diamètre polaire ; dans ce cas, en effet, le flux de force embrassé est maximum pour les bobines qui occupent les positions droite et gauche. Cette armature est d'une construction difficile, parce qu'elle n'est pas assez robuste au point de vue mécanique si les noyaux ne sont pas massifs ; et des noyaux massifs sont une mauvaise condition au point de vue électrique, à cause de l'échauffement qui s'y produit. Cette forme ne se

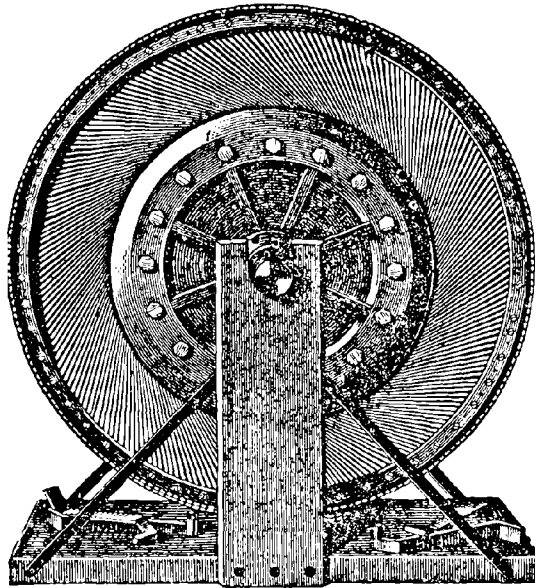


Fig. 38. — Induit en disque de la machine Fritsche.

prête pas non plus à une grande multiplication des sections, et les bobines, en raison de leurs positions relatives, se contrarient mutuellement dans leur action. Ce type d'armature est aujourd'hui abandonné.

Les induits en *disque* se distinguent actuellement en deux genres : — 1° ceux dans lesquels le fil est réparti sur un certain nombre de petites bobines séparées, juxtaposées, disposition spéciale aux machines à courants alternatifs, comme celles de Wilde, Siemens, Ferranti et Mordey ; — 2° ceux dans lesquels on fait chevaucher les bobines élémentaires sur un arc considérable de la périphérie, comme dans les dynamos à disque de Pacinotti, Rupp et Jehl, Desrozières, et Fritsche, toutes construites pour la production de courants continus. Communément l'induit en disque ne comporte aucun noyau de fer ; son peu d'épaisseur permet de le

loger dans un intervalle relativement étroit entre les surfaces polaires des inducteurs. La figure 38 représente l'induit terminé d'une machine à disque de Fritsche ; le collecteur est à la périphérie externe du disque.

NOYAUX DES INDUITS

Toutes les fois que l'on emploie du fer dans les induits, ce fer doit être fendu ou divisé en feuilles minces de manière à prévenir le développement de courants parasites. Ces noyaux de fer doivent être, dans leur structure, divisés en plans normaux aux circuits autour desquels est induite la force électromotrice, ou en plans parallèles aux lignes de force et à la direction du mouvement. Ainsi, les noyaux des armatures en tambour doivent être formés de disques en tôle mince. Dans les armatures en anneaux du type cylindrique ou allongé, les noyaux doivent être constitués d'anneaux de tôle estampés et serrés les uns contre les autres ; mais ceux en forme d'anneau plat doivent être formés de cerceaux concentriques. Des noyaux en fil de fer vernissé ou composés de disques de tôle mince séparés par du vernis, du carton d'amiante, ou du mica, satisfont en partie aux conditions requises. La discontinuité magnétique des noyaux en fil offre cependant certains inconvénients ; il est préférable que le fer ne présente pas de solution de continuité dans la direction où il doit s'aimanter. Il doit donc être plutôt en lames minces qu'en fil. On n'obtient pas de bons résultats des induits polaires à moins de ne donner que très peu de longueur aux rayons qui reçoivent les bobines.

Les noyaux en fer massif sont absolument inadmissibles, en raison des courants qui y prennent naissance et les échauffent. Quant aux noyaux massifs en métal autre que le fer, tel que le bronze ou le bronze phosphoreux, ils ne doivent sous aucun prétexte être employés dans une armature ; mais ces matériaux conviennent très bien pour les montures d'entraînement qui doivent être robustes et solides.

POINTS FONDAMENTAUX DANS UN PROJET D'ÉTUDE DE MACHINE

Comme on l'a déjà vu, le rôle des inducteurs est de créer un champ magnétique formé d'un grand nombre de lignes de force, tandis que

celui de l'induit est d'embrasser sous forme de flux de force le plus possible du champ ainsi créé. Le noyau de fer intérieur à l'induit peut, en conséquence, être considéré comme faisant partie du circuit magnétique de l'inducteur, l'induit étant, à proprement parler, formé des fils de cuivre qui tournent dans le champ magnétique. Aucune nécessité électrique n'impose la rotation du noyau de fer intérieur de l'armature ; il agirait même mieux à certains égards s'il était immobile. Mais des considérations d'ordre purement mécanique nécessitent cette rotation en même temps que celle du fil, aussi bien pour les induits en anneau que pour ceux en tambour.

Dans toutes les dynamos la force électromotrice est à chaque instant en raison directe de la variation du flux de force à travers l'induit, et celui-ci est, à son tour, proportionnel à trois quantités, savoir : — 1° le champ magnétique fourni par l'inducteur ; — 2° le nombre des conducteurs de cuivre reliés en série sur l'induit ; — 3° la vitesse à laquelle tournent ces conducteurs. Dans les machines à courants alternatifs la variation du flux à travers l'induit a lieu continuellement avec une périodicité régulière ; dans les machines à courant continu il est automatiquement maintenu à une moyenne et rendu constant par le mode de groupement des fils autour de l'anneau ou du tambour en un circuit fermé, et par leur liaison au collecteur. On verra plus loin (p. 205) que, pour les machines à courant continu du type bipolaire courant, la force électromotrice engendrée dans l'induit mobile peut se calculer de la manière suivante :

Soient n le nombre de tours de l'induit dans un temps t , et, par suite, $\frac{n}{t}$ sa vitesse angulaire ;

N le nombre de conducteurs de l'induit, reliés en série ;

Φ le flux de force passant d'un côté à l'autre, à travers le noyau de l'induit ;

E la force électromotrice, exprimée en volts, engendrée par la rotation de l'induit ; on a :

$$E = \frac{n}{t} N \Phi \cdot 10^{-8} \text{ volts.}$$

Exemple. — Dans une machine Kapp employée par l'Auteur au Collège technique de Finsbury, $N = 120$; $\Phi = 7\,170\,000$, à une vitesse de 780 tours par minute, ou 13 tours par seconde ; on a en conséquence pour la force électromotrice totale engendrée : $E = 411$ volts.

On voit par la formule ci-dessus que la force électromotrice sous

laquelle une dynamo quelconque fournira son courant est le produit de trois facteurs ; et qu'on peut l'augmenter en faisant croître l'un quelconque de ces trois facteurs, ou deux d'entre eux, ou les trois ensemble. Dans une machine donnée, N est constant, et le flux magnétique Φ ne peut dépasser la capacité du noyau de fer pour les lignes de force. Mais si l'on étudie de toutes pièces une machine, on peut naturellement assigner à l'un des trois facteurs telle valeur que l'on veut, à la condition que leur produit total atteigne la valeur fixée. C'est en conséquence une question de convenance qui, dans l'étude de la machine, déterminera l'augmentation de l'un quelconque des facteurs plutôt que celle de l'un des autres. L'accroissement de Φ comporte une plus grande section transversale de fer et une grosseur correspondante des inducteurs ; elle implique par conséquent une plus forte dépense de fer. Pour augmenter N , il faut un poids plus considérable et par suite une plus grande dépense de cuivre dans les conducteurs ; leur section dépend en effet du courant qu'ils doivent supporter, tandis que la force électromotrice engendrée est fonction du nombre de ces conducteurs reliés en série et de la variation du flux à travers l'espace qu'ils circonscrivent. De plus, l'expérience montre que cette augmentation de la quantité de cuivre sur un noyau d'induit de dimensions données entraîne, dès qu'on a atteint une certaine limite, le très sérieux inconvénient que la machine ne peut fonctionner sans étincelles aux balais. L'augmentation de la vitesse $\frac{n}{l}$ se traduit par des difficultés d'ordre mécanique au point de vue du graissage et de la tendance à la rupture ; en fait, des considérations mécaniques limitent cette vitesse. Depuis longtemps déjà, le principe moderne est de tenir cette vitesse peu élevée et de réduire le poids relatif du cuivre, en augmentant par contre celui du fer. Dans ces conditions en effet, non seulement le coût total de la machine est moindre que si les proportions relatives de cuivre et de fer étaient renversées ; mais les dépenses et les soins d'entretien se trouvent bien diminués. Les machines dans lesquelles les inducteurs sont relativement volumineux et puissants donnent moins d'étincelles, sont d'un réglage plus facile et exigent un renouvellement moins fréquent des balais et du collecteur que celles dont le système inducteur est comparativement léger. Récemment cependant il s'est manifesté une tendance en sens inverse en raison de ce que, si, par une étude spéciale et sans rien sacrifier des avantages résultant d'un champ magnétique relativement intense, on peut augmenter la vitesse et le poids du cuivre sur l'induit, la puissance de la machine bénéficiera de cette légère augmentation du poids total et du prix de revient.

Pour les machines à courants alternatifs la formule fondamentale a besoin d'être complétée par l'introduction de deux nouveaux facteurs. Les machines de ce genre sont ordinairement multipolaires, et si Φ représente le flux magnétique pour l'un quelconque des circuits magnétiques individuels, l'action magnétique totale devra être multipliée par le nombre N_p des paires de pôles magnétiques qui entourent l'induit. Il faut en outre introduire une constante k dont la valeur (variant de 1,8 à 2,5 dans les machines actuelles) dépend de la largeur relative des bobines et des pièces polaires employées. La formule générale exprimant le nombre de volts produits dans une machine à courants alternatifs quelconque deviendra alors :

$$E = k N_p \frac{n}{t} N \Phi \cdot 10^{-8} \text{ volts.}$$

Exemple. — Dans un alternateur Kapp, $k = 2,3$; $N_p = 6$; $N = 4190$; $\Phi = 1\ 230\ 000$, alors que la vitesse est de 700 tours par minute ; de sorte que $\frac{n}{t} = 11,66$, et l'on a $E = 2\ 395$ volts.

INDUCTEURS : MODES D'EXCITATION DU CHAMP MAGNÉTIQUE

Il existe cinq modes simples d'excitation du magnétisme qui doit être utilisé dans le champ magnétique. Ils peuvent être groupés en deux catégories, suivant que l'induit détermine lui-même l'aimantation de la machine dont il fait partie, ou que cette aimantation provient d'une source étrangère quelconque.

Dynamo magnéto-électrique ou magnéto-dynamo. — Dans les machines primitives on n'avait pas cherché à faire produire à la machine son propre magnétisme ; celui-ci lui était donné une fois pour toutes au moyen d'un aimant permanent en acier. Malheureusement le magnétisme soi-disant permanent des aimants d'acier décroît peu à peu, et diminue sous l'action des chocs ou des vibrations de toute nature auxquels la machine est exposée.

La *machine magnéto-électrique* ou *magnéto-dynamo*, dont la figure 39 donne un diagramme, subsiste néanmoins encore dans un grand nombre de petits types de machines. Elle a le grand désavantage d'être à la fois plus lourde et plus encombrante, à puissance égale, que d'autres

dynamos parce que l'acier ne peut pas prendre une aimantation perma-

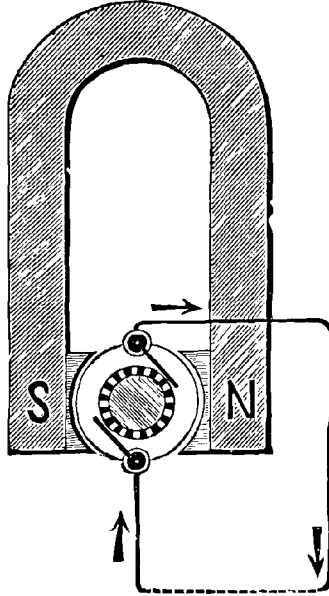


Fig. 39. — Dynamo à aimants permanents (magnéto-dynamo).

nente égale à celle qu'on peut donner temporairement au fer forgé, à la fonte, voire à l'acier lui-même.

Dynamo à excitation indépendante. — La substitution aux aimants en acier d'électro-aimants excités par des courants provenant d'une source étrangère quelconque, telle qu'une pile électrique, a évidemment constitué un progrès. La *dynamo à excitation indépendante*¹ (fig. 40) tient en conséquence le second rang dans l'ordre de développement successif des machines dynamos. Bien qu'il ait été employé par Faraday, ce mode d'excitation n'est pas entré dans la pratique jusqu'au jour où, en 1866, Wilde fit usage d'une petite machine magnéto auxiliaire pour produire le courant destiné à exciter les électro-aimants d'une machine plus importante. La dynamo à excitation indépendante a cela de commun avec la machine magnéto que, sauf en ce qui concerne les réactions dues

¹ Nous employons le terme « excitation indépendante » pour distinguer cette excitation, empruntée à une source extérieure, de l'excitation *séparée* fournie, dans certains cas, par quelques éléments séparés de la machine elle-même. [N. d. T.]

au courant dans l'induit, l'intensité de son champ magnétique et, par suite, la force électromotrice de la machine sont indépendantes des changements de résistance qui peuvent survenir dans le circuit de travail.

On peut régler et gouverner les dynamos de chacun des genres précédents en modifiant soit leur vitesse, soit le flux de force qui pénètre dans leur induit. Pendant longtemps on a eu recours, pour agir sur la

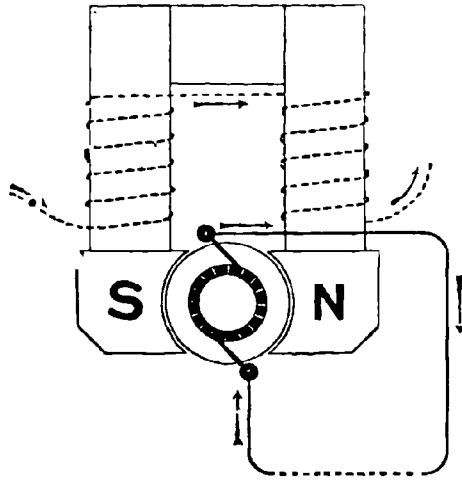


Fig. 40. — Dynamo à excitation indépendante.

force électromotrice des machines magnétos, à une pièce mobile en fer, susceptible d'être plus ou moins éloignée ou rapprochée des pôles de l'inducteur et servant, comme dérivation magnétique, à modifier l'intensité du champ magnétique auquel est soumis l'induit. Pour les machines à excitation indépendante deux autres moyens permettent de diminuer à volonté le magnétisme efficace : c'est ou d'affaiblir le courant d'excitation, en introduisant, par exemple, une résistance plus ou moins grande dans le circuit excitateur, ou bien de faire varier le nombre de tours du fil dans lequel circule autour des électro-aimants un courant constant d'excitation.

Trois procédés très simples permettent de rendre une machine *auto-excitatrice* : — 1° on peut faire passer tout le courant issu de l'induit dans les bobines de l'inducteur reliées en série avec le circuit principal ; — 2° on peut emprunter au circuit principal une partie seulement du courant fourni par l'induit et l'envoyer aux bobines des inducteurs mises en déri-

vation, auxquelles on donne une résistance un peu plus élevée que celle du circuit principal; — 3° le courant nécessaire à l'excitation des inducteurs peut être demandé soit à un second induit tournant dans le même champ magnétique, soit (si l'induit est formé de plusieurs bobines) à quelques-unes des bobines de l'armature, distraites des autres à cet effet et réunies entre elles.

Dynamo en série ou séries-dynamo. — La *dynamo en série* ou *dynamo ordinaire* (fig. 41) ne comporte qu'un seul circuit. Elle a l'inconvénient de ne pas entrer en fonctionnement tant qu'elle n'a pas atteint

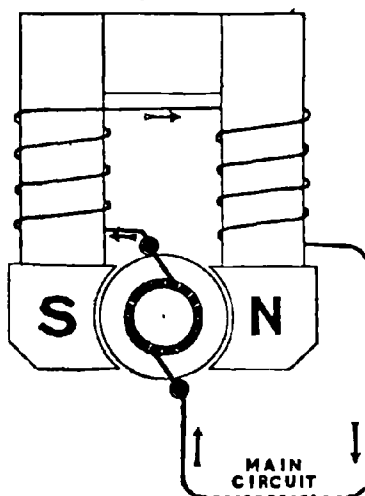


Fig. 41. — Dynamo en série (series-dynamo).
Main circuit = Circuit principal.

une certaine vitesse ou tant que la résistance du circuit extérieur n'est pas inférieure à une certaine limite, les inducteurs ne s'aimantant pas quand il y a trop de résistance ou quand la vitesse est insuffisante. La moindre vitesse nécessaire à l'auto-excitation donne une mesure relative de la qualité du circuit magnétique. Les machines en série sont également sujettes à des renversements de polarité, inconvénient sérieux qui rend ce type de machine absolument impropre à l'électrolyse et à la charge des accumulateurs. Toute augmentation de résistance du circuit de la dynamo en série réduit sa puissance productrice de courant, parce qu'elle diminue le courant dans les bobines inductrices, et, par suite, la quantité de magnétisme efficace. Quand des lampes sont montées en série (comme dans un circuit d'éclairage à arc) dans le circuit d'une dynamo

en série, l'introduction d'une lampe de plus a pour double résultat d'augmenter la résistance du circuit et de diminuer la puissance de production de courant de la machine. D'autre part, quand des lampes sont montées en dérivation entre deux conducteurs alimentés par une dynamo, si celle-ci est montée en série, l'introduction de nouvelles lampes n'a pas seulement pour effet de diminuer la résistance du circuit ; elle amène en outre une plus forte excitation des inducteurs due à l'augmentation du courant, de sorte que, plus on met de lampes en service, plus on risque de leur envoyer un courant excessif.

Dynamo en dérivation ou shunt-dynamo. — Dans la *machine* montée en dérivation (fig. 42), l'inducteur est recouvert d'un grand nombre de spires de fil fin, de manière à ne recevoir qu'une faible fraction du cou-

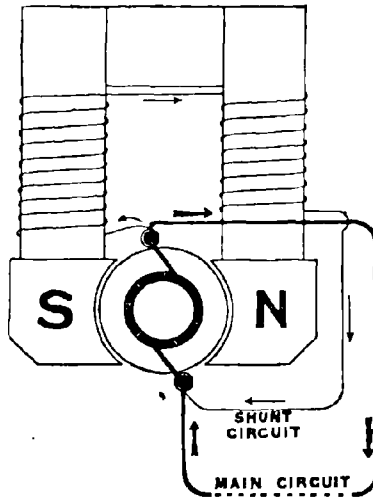


Fig. 42. — Dynamo en dérivation (shunt-dynamo).

Main circuit = Circuit principal. — *Shunt circuit* = Circuit dérivé ou dérivation.

rant total engendré dans l'induit. Ces bobines sont reliées aux balais de la machine et constituent un circuit annexé ou une dérivation. Les machines en dérivation sont moins sujettes que les machines en série aux renversements de polarité. En raison du coût un peu plus élevé du fil fin des bobines en dérivation, leur prix de revient est un peu supérieur à celui des machines en série d'égale puissance ; mais la dépense d'énergie électrique nécessaire au maintien du magnétisme est pratiquement la même dans les deux cas. Il faut autant d'énergie électrique

pour porter au même degré d'aimantation un électro-aimant, que ses bobines comportent un grand nombre de tours de fil fin ou un petit nombre de tours de gros fil, si le *volume* occupé par les spires est le même dans les deux cas, et si l'isolant a la même épaisseur relative. Quand une machine en dérivation alimente des lampes en arc multiple, toute addition de lampes, en réduisant la résistance totale du circuit, augmente le courant, mais non pas proportionnellement à cette réduction ; la diminution de résistance du circuit de travail réduit en effet un peu le courant qui circule dans la dérivation et affaiblit légèrement l'aimantation ; une machine de ce genre se règle néanmoins suffisamment bien elle-même si la résistance intérieure de son induit est très faible. S'il s'agit de lampes en série, le débit d'une machine en dérivation augmente avec les exigences du circuit extérieur en ce que tout accroissement de résistance dans le circuit de travail laisse passer plus de courant dans les bobines en dérivation qui excitent les inducteurs et rend ainsi le champ magnétique plus intense. D'un autre côté, la machine est plus sensible aux variations de vitesse à cause de la self-induction considérable que présente la dérivation ; pour des machines à haut voltage, le montage en dérivation est d'ailleurs trop coûteux. La portion du circuit mise en dérivation dans le cas actuel est formée d'un grand nombre de tours de fil fin roulé sur les noyaux de fer. Elle a en conséquence un coefficient de self-induction beaucoup plus élevé que le reste du circuit ; par suite, toute variation subite dans la vitesse agit nécessairement plus sur le courant principal que sur celui du shunt. Bref, si le montage en dérivation assure le courant contre des perturbations dues à des changements de résistance dans le circuit, il ne le garantit pas contre les perturbations résultant de variations dans la vitesse de rotation. On peut agir sur la force électromotrice d'une machine en dérivation en introduisant dans le shunt une résistance variable.

Une variété du mode d'excitation en dérivation comporte l'emploi d'un *troisième balai* touchant le collecteur en un point intermédiaire entre les points au plus haut et au plus bas potentiel. Les extrémités des bobines d'excitation sont reliées au troisième balai et à l'un des balais ordinaires, de sorte qu'une partie seulement des volts engendrés dans l'induit agit sur ces bobines.

Dynamo auto-excitatrice à circuit séparé. — Dans une troisième espèce de machine auto-excitatrice (fig. 43), les bobines inductrices sont montées de manière à faire partie d'un circuit absolument distinct du circuit principal, tout en étant alimentées par des courants issus des

bobines en mouvement dans le champ magnétique. On peut obtenir ce résultat de deux manières : — 1° en faisant tourner entre les mêmes inducteurs un second induit destiné à fournir le courant d'excitation ; chaque induit est naturellement muni d'un collecteur spécial. Ladd¹, et O. et F.-H. Varley² ont établi des machines de ce genre ; — 2° en reliant séparément quelques-unes des bobines élémentaires de l'induit à un collecteur spécial pour fournir le courant d'excitation. Des systèmes de ce genre ont été imaginés par Wilde, Holmes et Lonlin, vers les années 1868 ou 1869, en vue de rendre auto-excitatrices leurs machines à courants alternatifs. Holmes a décrit une machine à vingt bobines élémentaires dans l'induit,

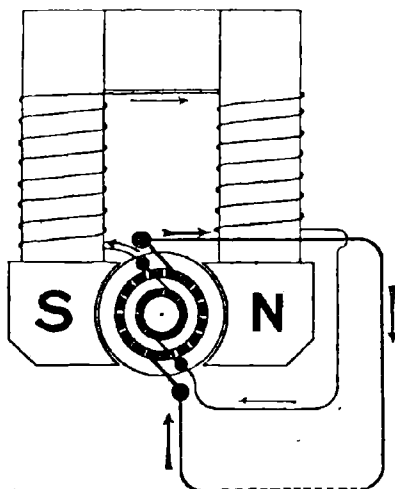


Fig. 43. — Dynamo auto-excitatrice, à circuit d'excitation séparé.

sur lesquelles dix envoyaient aux lampes des courants alternatifs, tandis que les autres, ou une partie d'entre elles, pouvaient, à l'aide d'un commutateur spécial, être reliées de manière à fournir aux électro-aimants le courant d'excitation. Ruhmkorff est arrivé au même résultat en roulant un second fil sur une armature en navette de Siemens munie, dans ce cas, d'un commutateur à chacune de ses extrémités. La machine Winkler³ s'excite elle-même intérieurement au moyen d'un second enroulement distinct du principal. L'effet de ce mode d'excitation

¹ *Phil. Mag.*, XXXIII. 544, 1867.

² Brevet anglais, 2525 de 1869.

³ *Electrical World*, XVII. 455, 1891.

par bobine séparée est à peu près le même que celui de l'excitation en dérivation, mais il présente cet avantage que le courant ainsi emprunté pour l'aimantation peut être capté à bas voltage, ce qui est préférable pour les machines à haute tension. En ce qui concerne ces dernières machines fonctionnant à 1 000 volts et au-dessus, le prix du fil fin à mettre en dérivation serait en effet absolument prohibitif.

Les cinq systèmes précédents peuvent s'appliquer aux machines à courant continu. Pour les machines à courants alternatifs, le montage en série ni le montage en dérivation ne sont applicables. Mais, si chacun de ces cinq modes d'excitation a ses avantages, aucun d'eux n'est parfait. Ils n'assurent en effet ni les uns ni les autres, pour une vitesse uniforme, la constance de la tension électrique aux bornes ni celle du courant, quelque changement qui se produise dans la résistance du circuit.

Si toutes les lampes placées dans le circuit d'une dynamo étaient destinées à fonctionner en même temps, c'est-à-dire si elles devaient être toutes insérées ou retirées simultanément, — en d'autres termes, si la puissance fournie par la machine devait être constante, — peu importerait le mode d'excitation soit en série, soit en dérivation de l'inducteur, pourvu que la vitesse fût elle-même toujours identique. Mais dans la pratique, où le nombre des lampes en service est généralement variable, aucun des cinq modes simples d'excitation ci-dessus n'assurera la régularité de la tension dans l'alimentation du circuit.

Mais si la théorie nous dit qu'aucun de ces systèmes n'est parfait, elle ne nous laisse cependant pas sans guide. Grâce à divers inventeurs, on sait aujourd'hui combiner ces méthodes de manière à obtenir pratiquement d'une machine marchant à une vitesse constante un courant sous une différence de potentiel constante. Ces méthodes sont soigneusement développées au Chapitre XI. Nous n'en donnons ici qu'une courte description pour compléter l'énumération sommaire des modes d'excitation des inducteurs.

MODES DE COMBINAISONS

La découverte du moyen à employer pour rendre *auto-régulatrice* une dynamo marchant à une vitesse constante est due à M. Marcel Deprez ; elle est le résultat d'études sur les diagrammes des caractéristiques des machines dynamos ¹. Deux cas distincts exigent cette auto-régulation.

¹ Voir *La Lumière électrique*, 3 décembre 1881 et 5 janvier 1884.

Comme, dans les applications industrielles, le premier rôle d'une dynamo est d'alimenter suffisamment et régulièrement un système de lampes, et que, dans la pratique, ces lampes sont ordinairement montées soit en dérivation, soit en série, il est évident qu'on a besoin, dans le premier cas, d'une *pression électrique* ou « *différence de potentiel* » constante entre les conducteurs, et, dans le second, d'un *courant constant*¹.

Supposons une dynamo possédant un induit sans réactions démagnétisantes, de résistance intérieure nulle, et dont les inducteurs soient excités par une source indépendante quelconque. A vitesse constante elle donnerait une différence de potentiel constante à ses bornes, quelle que fût la résistance du circuit. Mais si cet induit a une résistance intérieure, la tension extérieure sera moindre que la force électromotrice totale développée, et la différence entre elles sera d'autant plus considérable que la résistance intérieure et l'intensité du courant seront elles-mêmes plus grandes. Toute dynamo sans résistance, excitée séparément ou montée en dérivation, serait ainsi auto-régulatrice.

Or il est impossible, on le sait, d'avoir une armature de résistance nulle. Mais si, connaissant la résistance de l'armature d'une dynamo, on arrive à trouver quelle est l'aimantation additionnelle nécessaire à l'augmentation de la force électromotrice de fonctionnement de la machine, de telle sorte que la force électromotrice nette (déduction faite de la portion employée à vaincre la résistance intérieure) soit constante, et que, après l'avoir trouvée, on pourvoie à cette portion variable de l'aimantation par l'addition de bobines en série, la dynamo ainsi renforcée agira comme si elle n'avait pas de résistance interne et donnera entre certaines limites une différence de potentiel constante à ses bornes.

Pour une distribution *sous potentiel constant*, on devra avoir, en conséquence, des dynamos comportant une combinaison de bobines inductrices *en série* avec excitation auxiliaire indépendante constante.

D'autre part, si une machine en dérivation était construite avec une armature de résistance considérable, la force électromotrice qu'elle développerait à une vitesse constante serait très sensiblement propor-

¹ On monte accidentellement des lampes à incandescence par deux, trois, ou plus, en série, un certain nombre de ces séries étant placé en dérivation sur les conducteurs principaux entre lesquels est maintenue une tension constante. Il est plus rare de voir un petit nombre de ces lampes toutes en dérivation l'une par rapport à l'autre montées dans le circuit d'une série de lampes à arc traversées par un courant d'intensité constante. Ces exceptions rentrent dans l'un ou l'autre des deux cas étudiés ici.

tionnelle à la résistance extérieure, car, en doublant cette résistance extérieure, on doublerait très approximativement la proportion du courant passant dans le shunt, et dès lors (en admettant toujours que les noyaux de fer soient éloignés de leur point de saturation) le magnétisme des électro-aimants serait doublé ; en d'autres termes, on obtiendrait une intensité de courant approximativement constante.

Dans ce cas, une résistance élevée de l'induit ne serait pas économique, et la puissance de la machine serait très faible relativement à son poids ; son état magnétique serait d'ailleurs très instable. Aussi n'a-t-on pu encore réaliser jusqu'ici un mode d'enroulement compound donnant l'auto-régulation pour *courant constant*. On a recours à d'autres moyens de régulation dans le cas des machines pour éclairage à arc qui exigent la constance du courant. On les trouvera aux Chapitres XVII et XXVII.

Combinaisons pour différence de potentiel constante.

1). *Excitation en série et par circuit indépendant (Deprez)*. — Cette combinaison, représentée figure 44, peut être appliquée à toute machine

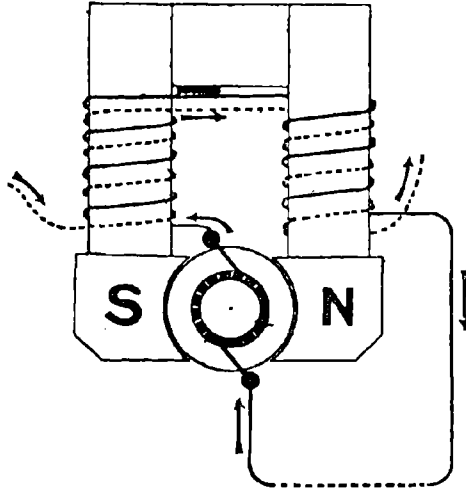


Fig. 44. — Combinaison d'excitation en série et d'excitation indépendante.

dynamo en série ; il suffit que les bobines des électro-aimants soient disposées de telle sorte qu'un courant distinct, provenant d'une source indépendante, puisse en traverser une partie, de manière à produire un champ magnétique initial indépendant du courant principal de la dynamo.

Quand la machine fonctionne, la force électromotrice qui produit le courant dépend à la fois de cette excitation indépendante et de l'action excitatrice de son propre courant sur les électro-aimants. Si la machine tourne à une vitesse telle que le quotient de la portion de la force électromotrice due à l'auto-excitation, divisée par l'intensité du courant, soit numériquement égal à la résistance intérieure de la machine, la force électromotrice dans le circuit sera constante, quelles que soient les variations des résistances extérieures. M. Deprez a démontré d'ailleurs que cette vitesse peut être déduite de l'expérience, et que, une fois la vitesse critique déterminée, la machine peut être réglée de manière à fonctionner avec une force électromotrice quelconque ; il suffit, à cet effet, de faire varier dans la proportion voulue l'intensité du courant d'excitation indépendant.

2). *Excitation en série avec adjonction de machine magnéto-électrique (Perry)*. — La force électromotrice initiale dans le circuit, exigée par la théorie de M. Deprez, n'a pas nécessairement besoin de provenir d'un champ magnétique initial d'origine indépendante. L'addition d'un aimant permanent pour donner aux pièces polaires des électro-aimants une aimantation partielle initiale résout également le problème dans une certaine mesure ; mais le professeur Perry a adopté la solution plus générale qui consiste à introduire dans le circuit d'une dynamo en série une machine magnéto séparée, tournant elle-même à une vitesse uniforme telle qu'elle produise dans le circuit une force électromotrice constante égale à celle qu'on veut obtenir entre les conducteurs principaux d'aller et de retour.

Cette disposition peut être modifiée par l'emploi d'une excitatrice montée en dérivation, dont les électro-aimants seraient intercalés, comme précédemment, dans la portion du circuit extérieure à la machine. La combinaison d'un aimant permanent avec des électro-aimants dans une seule et même machine est d'ailleurs bien antérieure aux idées émises par Deprez ou Perry ; elle a été décrite par Hjorth en 1854.

3). *Excitation en série et en dérivation*. — L'excitation des électro-aimants d'une dynamo, en partie par le courant principal et en partie par un courant pris en dérivation sur les balais de la machine, comme l'indique la figure 45, a été appliquée il y a quelques années. Une disposition adoptée par Brush¹ dès 1878 rendait sa machine très approximati-

¹ La dérivation d'une partie du circuit, originairement appelée « taquin », a été tout d'abord appliquée aux machines à galvanoplastie, en vue d'empêcher le ren-

vement auto-régulatrice, puisqu'elle donnait une variation de moins d'un volt dans la différence de potentiel entre des limites de courant très étendues. Si les spires en dérivation sont relativement peu nombreuses et ont une résistance élevée, de telle sorte que leur force magnétisante soit faible, la machine donnera approximativement une différence de potentiel uniforme, mais de quelques volts seulement; tandis que, si la dérivation a une force magnétisante relativement considérable, compa-

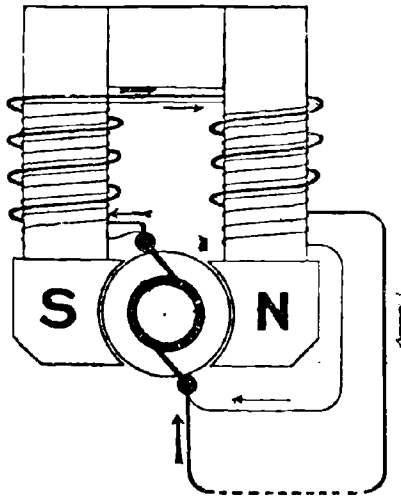


Fig. 45. — Dynamo en série et en dérivation.

rativement aux spires peu nombreuses du circuit principal, la machine sera apte à produire une différence de potentiel constante d'un grand nombre de volts. Mais, comme précédemment, à chaque cas correspondra une certaine vitesse critique dépendant de la construction de la machine. Le montage avec bobines en série et en dérivation est généralement connu sous le nom d'« *enroulement compound* ».

4). *Excitation en série et en Longue dérivation.* — En 1882, l'Auteur a proposé de donner ce nom à une combinaison tout à fait analogue à la précédente, et qui n'avait pas encore, à sa connaissance, été pratiquement essayée pour une application de ce genre, bien qu'elle eût été, comme elle, décrite par Brush. Si, comme dans la figure 46,

versement du courant par suite d'une inversion de l'aimantation des électroaimants; mais elle a été conservée dans un certain nombre d'autres types de machines en vue de donner plus de régularité au courant.

les électro-aimants sont excités partiellement en série, mais partiellement aussi par des spires de fil plus fin, prises en dérivation sur la *totalité du circuit extérieur*, cette combinaison s'appliquera mieux que la précédente au maintien d'une différence de potentiel constante, car le courant dans la *longue dérivation* sera plus constant qu'un courant dans une *courte dérivation* entre les balais.

En 1882 l'Auteur émettait l'opinion que, si ces deux dernières combi-

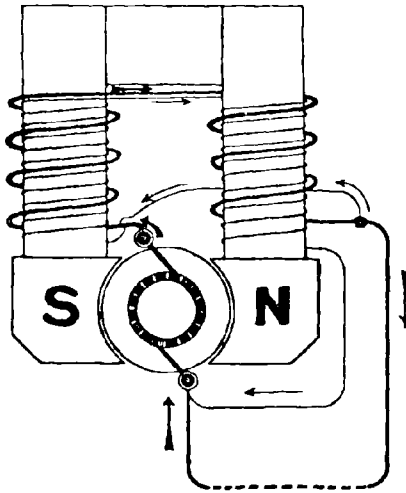


Fig. 46. — Dynamo en série et en Longue dérivation.

naisons ne résolvait pas le problème avec autant de perfection que les précédentes, elles se prêtaient mieux à une application immédiate¹, en ce sens qu'elles peuvent être adaptées sur une machine ordinaire

¹ La priorité de l'invention du double enroulement, « en série et en dérivation », est revendiquée par plusieurs rivaux. Brush est sans contredit le premier qui ait industriellement employé ce système, mais il est permis de douter qu'il en connût les avantages. Elle a été également réclamée par M. S. A. Varley s'appuyant sur la machine décrite dans son brevet anglais n° 4905 de 1876, dans laquelle figuraient deux circuits de différente résistance passant tous deux sur les bobines des électro-aimants et allant tous deux à la lampe. Il a obtenu une décision des tribunaux écossais établissant que cette bizarre disposition primait celle décrite par Brush. L'enroulement compound a été cependant décrit en 1871 par Sinsteden (*Pogg. Ann., Supplement-Band*, V. 651). Il est mentionné par Sir C. W. Siemens dans les *Philosophical Transactions* de mars 1880 comme présentant certains avantages. Il est également réclame au profit de Lauckert (voir la note de M. Boistel, p. 100, de la traduction de la première édition de ce livre); par Paget Higgs (*Electrical Review*, XI. 280; et *Electrician*, 23 décembre 1882); par J. W. Swan, voir Bosanquet (*Ibid.*, 9 décembre 1882); par J. Swinburne (*Ibid.*, 23 décembre 1882); par S. Schuckert (*Ibid.*, 13 octobre 1883). Il est revendiqué en Amérique par Edison; et a été breveté par

quelconque et n'exigent pas, comme les deux précédentes, l'emploi d'excitatrices séparées ou de machines magnétos indépendantes. Cette opinion a été pleinement justifiée par les progrès considérables réalisés depuis dans les machines « compound » auto-régulatrices.

5). *Excitation en série et par bobine séparée.* — Ce procédé ne paraît pas avoir été essayé sur des machines à courant continu. Pour les dynamos à courants alternatifs, Zipernowsky en a tenté avec succès une modification, l'excitation « en série » ou prise sur le circuit principal étant, dans ce cas, remplacée par une excitation dérivée du circuit principal à l'aide d'un petit transformateur. Ce système est développé au Chapitre XXV.

MM. Crompton et Kapp (*Ibid.*, 9 juin 1883). Voir également Hospitalier (*L'Electricien*, n° 20, 1882). Les électriciens peuvent aussi consulter une série d'articles parus dans *The Electrician*, t. X, commençant le 16 décembre 1882 et dus à M. Gisbert Kapp. Enfin *The Electrical World*, XVI. 383, 1891, a donné sur ce sujet un travail du Dr Louis Bell.

CHAPITRE IV

ACTIONS ET RÉACTIONS ÉLECTRIQUES DANS L'INDUIT

Ce chapitre s'applique surtout aux machines à courant continu, à induits en anneau ou en tambour, et à champ magnétique simple comme celui fourni par les inducteurs bipolaires si communs dans les machines de ce genre.

Pour plus de clarté nous supposerons que l'induit (vu du côté du collecteur) tourne dextrosum, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre. Nous admettrons en outre que le pôle nord de l'électro-aimant est placé à droite de l'observateur, comme dans les figures 39 à 46, de telle sorte que le flux de force va de droite à gauche à travers le noyau de l'induit. Nous supposerons enfin que les spires roulées sur la carcasse de l'induit sont dextrosum. Ce point de départ admis comme type général, il sera ensuite très facile de voir comment l'induction de force

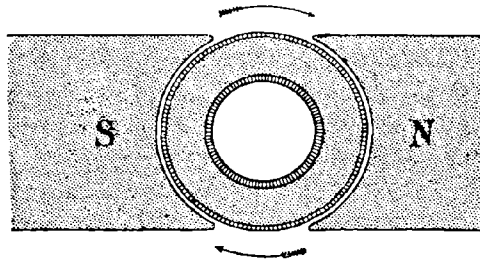


Fig. 47. — Induit vu de bout, dans un inducteur bipolaire.

électromotrice se trouve modifiée par un changement dans l'une quelconque de ces hypothèses.

La figure 47 est l'expression de ces conditions pour un induit en anneau vu de bout. Les lignes de force partant du pôle N traversent de

droite à gauche l'*entrefer*¹ voisin et arrivent dans le noyau de fer de l'induit ; après l'avoir pénétré (comme dans la figure 48), elles viennent alors franchir l'entrefer de gauche et rejoindre le pôle S de l'inducteur. Les fils ou conducteurs de cuivre de l'armature, au fur et à mesure de leur arrivée successive dans l'entrefer de gauche, découpent et embrassent chacun un flux de force. Chaque conducteur émerge ensuite à la partie supérieure de l'entrefer, passe, dans son mouvement de rotation, à la partie supérieure de l'induit, en allant de gauche à droite, et

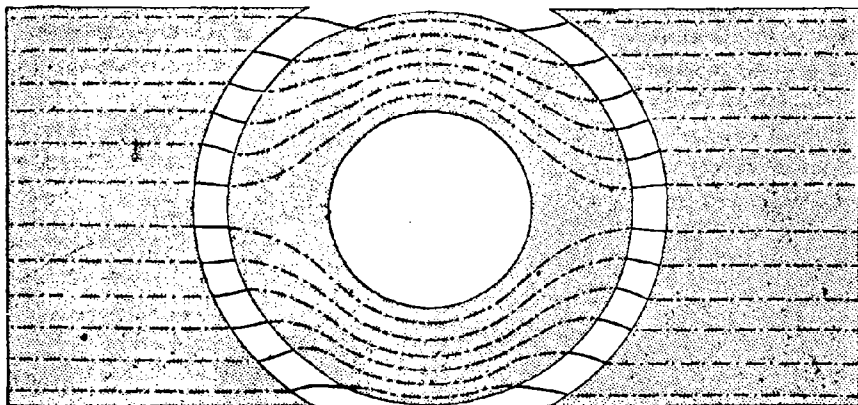


Fig. 48. — Lignes magnétiques d'une dynamo bipolaire (sans aucune perturbation de courant d'induit).

découpe et embrasse de nouveau un flux de force en redescendant dans l'entrefer droit. Si l'on applique alors la règle indiquée page 21, on trouve que le sens des forces électromotrices induites dans ces conducteurs pendant le mouvement est le suivant : — dans tous les conducteurs *montant* dans l'entrefer gauche, le sens des lignes de force se dirige *vers* l'observateur, — tandis que dans tous ceux qui *descendent* dans l'autre entrefer, celui de droite, le sens des forces électromotrices induites, va en s'éloignant *de* l'observateur. Si l'on admet que ces forces électromotrices engendrent effectivement des courants², on peut dire dès lors que

¹ Espace entre le fer du noyau d'induit et le fer du noyau d'inducteur. (surface polaire).

² Dans toutes les dynamos employées comme *génératrices*, les courants étant développés par les forces électromotrices sont naturellement *de même sens* que les forces électromotrices qui leur donnent naissance. Mais il ne faut pas oublier que, dans le cas des machines utilisées comme *moteurs*, les courants proviennent de

les courants vont vers l'observateur dans les conducteurs qui s'élèvent dans l'entrefer gauche, et qu'ils s'en éloignent dans ceux qui descendent dans l'entrefer de droite. Si l'induit est en forme d'anneau, les courants allant dans un sens dans l'entrefer marchent en sens contraire à l'intérieur de l'anneau. Dans un induit en tambour, les courants passent simplement d'un côté à l'autre de la surface du tambour par les connexions reliant les conducteurs sur la base opposée du noyau.

Examinons maintenant la manière dont sont reliées entre elles les bobines élémentaires roulées sur l'induit. Qu'on ait affaire à un anneau ou à un tambour, elles sont groupées symétriquement autour d'un noyau symétrique et réunies les unes aux autres en un circuit fermé; en même temps, des lames de connexion, disposées à intervalles réguliers dans la même direction que ces bobines, viennent aboutir isolément à chacune des touches du collecteur. La figure 34, p. 38, représente un enroulement simple en anneau, formé de 32 tours de fil groupés en huit « sections » ou « bobines élémentaires », dont chacune comprend quatre spires. La fin de chaque section est reliée au commencement de la suivante sur toute la périphérie. Le collecteur est à huit touches, et les extrémités de chacune des sections de l'enroulement sont reliées à deux touches voisines du collecteur. Dans la figure 34, les balais sont représentés en contact respectif avec la touche la plus haute et avec la plus basse du collecteur. L'enroulement du fil sur l'anneau étant dextrorsum, on verra avec un peu d'attention que, en conformité de ce qui précède, les courants induits dans les spires montantes sur la moitié gauche de l'anneau iront tous en s'élevant du point le plus bas vers le point le plus élevé, et que, de même, tous ceux parcourant la moitié de droite circuleront de bas en haut. Ces deux courants se réuniront à la touche supérieure du collecteur, s'écouleront ensemble par le balai supérieur (qui, par suite, sera considéré comme *positif*), et de là alimenteront le circuit extérieur; après quoi, le courant reviendra au balai inférieur ou *négalif* et rentrera dans l'induit par la touche inférieure du collecteur, où il se divisera alors en deux parties pour repasser, comme précédemment, par les deux moitiés de l'enroulement. Si les fils de l'armature étaient roulés (ou connectés) sinistrorsum, le balai inférieur serait le balai positif, et le balai supérieur le négatif. Tout ce qui précède s'applique également à l'induit en tambour; mais le recouvrement

forces électromotrices étrangères et supérieures, et que les forces électromotrices induites dans l'armature du moteur sont toujours *de sens contraire* à celui du courant qui lui arrive.

mutuel des deux moitiés de l'enroulement ne permet pas de suivre aussi facilement la marche du courant.

Il est à noter que le courant, après être entré dans les spires de l'induit et s'être partagé suivant les deux voies qui lui sont offertes, passe d'une section à l'autre sans arriver à l'une quelconque des touches du collecteur jusqu'à ce que les deux courants se réunissent de l'autre côté et affluent à la touche du collecteur qui, à l'instant considéré, passe sous le balai. Aux moments où l'une des touches du collecteur cesse d'être en contact avec un balai et où une autre arrive en contact avec lui, le balai porte sur deux touches consécutives et met un instant en court-circuit une des sections de l'induit. Tant que dure ce double contact, les deux courants qui affluent des deux moitiés de l'enroulement s'écoulent respectivement aux deux touches du collecteur et se réunissent ainsi pour passer par le même balai.

Il est évident que, si les lignes de force dans les entrefers sont plus denses dans une partie que dans une autre, les forces électromotrices induites dans chacune des sections prise isolément n'auront pas la même valeur quand ces sections découperont des flux différents dans le champ ; la force électromotrice la plus élevée sera engendrée dans les conducteurs qui traversent la partie du champ magnétique où les lignes de force sont le plus denses dans l'entrefer. Mais, quelles que soient les forces électromotrices dans les conducteurs individuels, du moment que ceux-ci sont réunis bout à bout, il est évident que la force électromotrice totale dans l'une ou l'autre des moitiés de l'enroulement, de balai à balai, sera la somme des forces électromotrices engendrées séparément dans chacune des bobines. Ce point ayant une grande importance demande à être étudié avec un certain soin.

INDUCTION DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE HORIZONTAL UNIFORME

En étudiant la dynamo dans sa forme la plus simple, en quelque sorte idéale, on a vu que l'induction dans la boucle ou spire était nulle pour la position correspondant au diamètre de commutation et qu'elle allait en augmentant (comme le *sinus* de l'angle) jusqu'au moment où elle atteint son maximum, vers 90 degrés (voir fig. 18, p. 31).

Ceci est vrai naturellement dans le cas idéal de lignes de force droites, horizontalement tendues et présentant une égale densité dans toute l'étendue du champ. Mais dans la réalité il n'en est pas ainsi de la distri-

bution des lignes de force dans l'entrefer des dynamos ; cette distribution n'est pas toujours symétrique, comme on le verra.

Revenant au cas idéal, la figure 49, qui n'est autre qu'une courbe de *sinus*, peut servir à représenter, par la hauteur de ses ordonnées, les variations de l'induction produite dans une armature, de dix en dix degrés de sa périphérie. S'il y a, par exemple, trente-six sections dans une armature en anneau, de telle sorte que ces sections occupent chacune 10 degrés, les sections les moins actives seront celles situées à 0 degré et à 180 degrés, tandis que les plus actives sont celles qui correspondent à 90 et 270 degrés. Mais, dans toutes les armatures ordinaires « à circuit fermé », les diverses sections sont reliées entre elles de telle sorte que toute force électromotrice induite dans la première section s'ajoute à celle induite dans la seconde ; celle induite dans la troisième, aux deux premières ; et

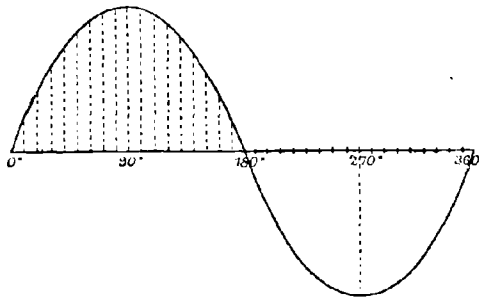


Fig. 49. — Courbe de force électromotrice induite.

ainsi de suite sur tout le pourtour jusqu'au balai situé du côté opposé par rapport au point de départ. Les forces électromotrices individuelles viennent ainsi s'ajouter les unes aux autres exactement comme les forces électromotrices individuelles des éléments d'une pile montée en série. Une couronne d'éléments de pile montés en série, dont une moitié tend à émettre son courant en sens inverse de l'autre dans la couronne ainsi formée (fig. 50), représente assez bien l'induction successive dans les sections d'une armature en anneau. S'il était possible d'indiquer que les sections situées à 90 degrés des balais ont un effet inducteur beaucoup plus puissant que celles qui occupent les positions voisines des balais, l'analogie serait encore plus frappante¹.

¹ Dans la figure 50, les éléments médians de chaque demi-couronne sont représentés plus grands pour en donner une idée ; mais malheureusement des éléments de grande dimension, tout en ayant une résistance intérieure moindre, ne possèdent pas une force électromotrice supérieure à celle d'éléments plus petits.

Sachant maintenant comment l'induction dans les bobines élémentaires ou sections individuelles va en s'élevant et s'abaissant sur le pourtour de l'anneau, on peut chercher à quoi on arrivera en sommant ces diverses forces électromotrices, de manière à trouver leur effet total. On aura à ajouter les effets de toutes les sections successives, depuis le balai négatif à 0 degré d'un côté, jusqu'au balai positif à 180 degrés de l'autre côté; et le résultat sera le même pour chaque moitié de l'anneau par raison de symétrie. Supposons qu'on prenne le côté partant de 0 degré pour aller à 180 degrés en passant par 90 degrés (à gauche des

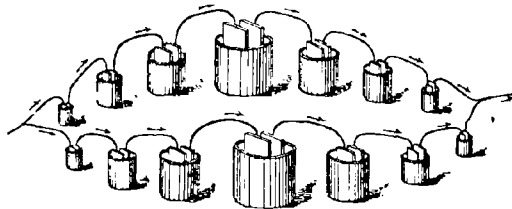


Fig. 50. — Couronne d'éléments de pile : les deux moitiés en parallèle.

fig. 20 et 47). Si on examine la courbe précédemment donnée (fig. 49), on verra que, si les hauteurs des lignes ponctuées représentent l'action inductrice, il suffira, pour obtenir l'effet total, d'ajouter les unes aux autres les longueurs de toutes ces lignes de 0 à 180 degrés; et naturellement leur somme sera égale à celle des longueurs négatives comprises entre 180 et 360 degrés. Mais on peut procéder d'une autre façon qui, tout en fournissant le total final, montrera en même temps comment la somme en question va en croissant à chaque addition successive d'une longueur. On trouvera que cette somme croît d'abord lentement, puis rapidement, puis enfin lentement encore en approchant de sa plus haute

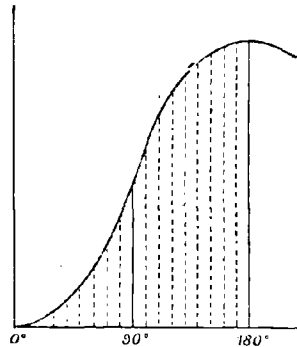


Fig. 51. — Courbe de potentiels intégrée.

valeur. La somme de ces effets croît en résumé d'une façon analogue aux indications fournies en réduction par la courbe de la figure 51. Ce mode d'opérer, qui consiste à ajouter les unes aux autres une série de valeurs variant d'une façon continue, est ce que les mathématiciens désignent sous le nom d'*intégration*. On obtient la courbe de la figure 51 en intégrant les valeurs de la courbe de la figure 49 entre les limites

de 0 et de 180 degrés. Dans la dynamo réelle, cette intégration s'effectue par la nature même des choses ; c'est une conséquence de ce fait que chaque section est réunie à celles qui la précèdent et qui la suivent.

MESURE DE LA FORCE ÉLECTROMOTRICE

Il est possible d'étudier directement par l'expérience ces deux effets¹ : l'induction dans les bobines individuelles, et le potentiel total ou intégré.

Diverses méthodes ont été proposées pour la mesure des forces électromotrices, et, comme elles offrent chacune des avantages, elles méritent d'être étudiées séparément.

Méthodes de S. P. Thompson. — 1^o La force électromotrice induite dans une section individuelle, au moment où elle arrive à une position déterminée, peut être étudiée de la manière suivante à l'aide d'un voltmètre ou galvanomètre de potentiel.

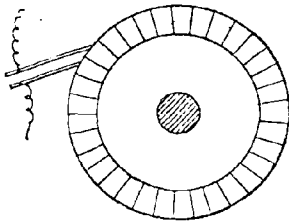


Fig. 52. — Mode d'exploration au collecteur d'une dynamo.

Deux petites brosses métalliques sont séparées par un morceau de bois de manière à laisser entre elles un espace libre égal à la largeur d'une des touches consécutives du collecteur. Ces brosses sont reliées par des fils aux bornes du voltmètre, de telle sorte que toute différence de potentiel entre elles est indiquée sur le cadran de l'instrument.

Les deux brosses sont mises en contact avec le collecteur pendant qu'il tourne, comme l'indique la figure 52 ; et, comme elles peuvent être appliquées en un point quelconque, elles donneront au voltmètre une indication mesurant la valeur de la force électromotrice dans telle section de l'armature qui passe dans le champ magnétique par la position particulière correspondant à la situation des contacts. Dans le cas de la petite dynamo Siemens qu'il étudiait, l'Auteur a trouvé que la différence de potentiel indiquée était presque *nulle* pour les sections voisines des véritables balais de la machine, et présentait son maximum vers la moitié de la distance qui les séparait. En réalité, la différence de potentiel s'accroissait surtout à 90 degrés des vrais balais,

¹ Pour les recherches faites dans cette voie par l'Auteur, le lecteur peut se reporter aux *Conférences* faites par lui en 1883 devant la *Society of Arts* ; il les trouvera également dans la première édition de cet ouvrage. Quant aux courbes d'induction obtenues par Gaugain, voir les *Annales de Chimie et de Physique*, 1873 ; et, pour celles d'Isenbeck, l'*Elektrotechnische Zeitschrift* d'août 1883.

du collecteur, on reconnaît que le potentiel va régulièrement en augmentant tout autour de l'induit, dans les deux directions, pour atteindre un maximum du côté opposé où se trouve le balai positif.

M. Mordey a trouvé que cette distribution était irrégulière dans des machines mal étudiées.

L'Auteur suggéra alors l'idée qu'on pourrait avantageusement grouper ces indications autour d'un cercle correspondant à la circonférence du collecteur. Les figures 54 et 55, extraites de ses *Conférences*, montrent ainsi comment, dans une bonne machine Gramme, le potentiel s'élève graduellement depuis son minimum jusqu'à son maximum.

On voit que, si l'on prend le balai négatif comme point inférieur du cercle, le potentiel s'élève d'une façon parfaitement régulière jusqu'à un

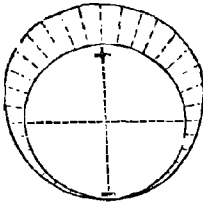


Fig. 54. — Diagramme de potentiels autour du collecteur d'une machine Gramme.

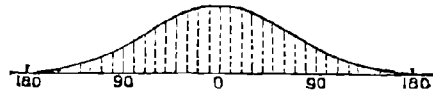


Fig. 55. — Diagramme développé de potentiels au collecteur d'une machine Gramme.

maximum au balai positif. Les valeurs portées radialement autour du cercle dans la figure 54 sont représentées en ordonnées verticales par rapport à une droite dans la figure 55, qui n'est autre que la figure 51 complétée pour les deux moitiés du collecteur. La figure 51 n'est cependant qu'un diagramme théorique de ce que doit être la distribution des potentiels, tandis que la figure 55 est la représentation d'observations relevées effectivement sur une machine Gramme « A ». Si le champ magnétique dans lequel se meut l'armature était uniforme, cette courbe serait une véritable *sinusoïde*, et la plus ou moins grande inclinaison de la courbe en différents points, permettrait de juger de l'activité ou de l'inactivité relative des bobines élémentaires dans les diverses parties du champ. Les points marqués + et - sont voisins de ceux qui donnent le moins d'étincelles, ou *points neutres*. La hausse de potentiel n'est pas égale entre chaque paire de lames, autrement la courbe serait simplement formée de deux droites obliques également inclinées à droite et à gauche du point neutre. Au contraire, il existe une très faible différence de potentiel entre les touches du collecteur immédiatement voisines des points neutres. La plus grande différence de potentiel se présente aux points où la courbe se redresse le plus rapidement dans une position voi-

sine de 90 degrés par rapport aux balais, c'est-à-dire par le fait vers la partie de la circonférence du collecteur en connexion avec les bobines élémentaires qui traversent la position d'action maximum. Si le champ magnétique était parfaitement uniforme, le flux de force traversant une spire devrait être proportionnel au sinus de l'angle que fait le plan de cette spire avec la direction de la résultante des lignes de force dans le champ, et la variation de ce flux de force à travers la spire devrait être proportionnelle au cosinus de cet angle. Or le cosinus est maximum quand cet angle = 0 degré; par suite, quand la spire est parallèle aux lignes de force, c'est-à-dire à 90 degrés par rapport aux balais, le taux d'accroissement du potentiel doit prendre son maximum; c'est ce que réalise très approximativement le diagramme de la figure 55, qui est, à très peu de chose près, une véritable *sinusoïde*.

Les courbes ainsi relevées d'après les mesures de la distribution du potentiel au collecteur ne fournissent pas seulement une indication du point où doivent être placés les balais pour donner le meilleur résultat; elles permettent encore de juger de l'*activité* ou de l'*inactivité* des spires dans les différentes parties du champ magnétique et de déterminer l'intensité réelle de ces dernières pendant la marche de la machine. Comme on le verra, le courant de l'induit réagit sur le champ magnétique et détermine une torsion dans la distribution des lignes de force à travers l'entrefer. Si les balais sont mal placés ou si les pièces polaires ne sont pas convenablement conformées, le potentiel croitra irrégulièrement et présentera des maximum et des minimum en d'autres points. La figure 56 donne un diagramme réel relevé sur une machine dynamo qui présentait des défauts de ce genre, et la figure 57 en est le développement sur une ligne horizontale; on y constate, non seulement que l'accroissement du potentiel était irrégulier, mais encore qu'une partie du collecteur était plus positive que le balai positif, tandis qu'une autre était moins négative que le balai négatif. Par suite, la différence de potentiel entre les balais n'était pas normale, et, dans une partie des bobines élémentaires, les courants se trouvaient réellement en opposition avec une force électromotrice contraire.

Ce mode de représentation de la distribution du potentiel à la périphérie du collecteur a rendu de véritables services dans la pratique et fourni l'explication de divers phénomènes anormaux qui avaient souvent embarrassé les observateurs impuissants à s'en rendre compte.

On peut obtenir des courbes analogues à celles ci-dessus sur les collecteurs de toutes les dynamos à courant continu avec induit à circuit

fermé. Les machines à circuit ouvert employées pour les éclairages à arc présentent des courbes tout à fait différentes, par suite de la disposition spéciale de leurs collecteurs. Il n'est naturellement pas indispensable, pour prendre ces diagrammes, que les balais réels de la machine soient au contact ou qu'ils soient reliés par un circuit quelconque ; mais, dans

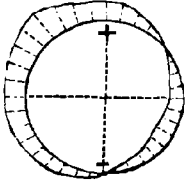


Fig. 56. — Diagramme de potentiels autour du collecteur d'une dynamo défectueuse.

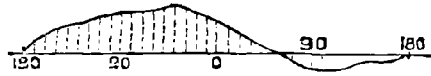


Fig. 57. — Diagramme développé de potentiels au collecteur d'une dynamo défectueuse.

ce cas, les électro-aimants doivent être excités extérieurement. Il ne faut pas oublier non plus que la présence de balais prenant le courant en un point quelconque du collecteur modifie la distribution du potentiel autour de ce collecteur ; la nature et l'importance de cette modification dépendent de la position des balais et de la résistance du circuit qui les relie.

Des courbes relatives aux torsions réelles du champ magnétique dues à la réaction de l'induit ont été données par von Gaisberg¹ pour une machine Schuckert, par Kohlrausch² pour une machine Lahmeyer, et par M. E. Thomson³ pour une dynamo Thomson-Houston, ainsi que par Ryan (voir ci-après).

Méthode de Swinburne. — Une élégante modification de la méthode précédente consiste à relier un fil de haute résistance entre les bornes de la machine, et à trouver le long de ce fil, à l'aide d'un galvanomètre détecteur, les positions des points situés au même potentiel que le balai-pilote appliqué au collecteur. Cette méthode de réduction à zéro est par cela même très exacte et dispense de recourir au voltmètre qui, pour l'emploi de la méthode ci-dessus, a besoin d'être précis sur une longue étendue de sa graduation.

Méthode de Joubert. — M. Joubert⁴ a imaginé un autre mode d'investigation de la force électromotrice induite en tous les points successifs pen-

¹ *Elektrotechnische Zeitschrift*, VII. 67, février 1886.

² *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 419, 1887.

³ *Electrical World*, XVII. 392, 1891.

⁴ *Annales de l'École Normale*, X. 131, 1881.

dant la rotation. Il place sur l'arbre de la dynamo deux bagues métalliques isolées, reliées aux extrémités du fil de l'induit, chacune de ces bagues étant munie d'une pièce saillante qui vient, à chaque tour, faire contact un instant avec un ressort. Le moment auquel a lieu ce contact dépend de la position des ressorts qui peuvent être ajustés en différents points, ce qui permet la mesure des valeurs instantanées de la force électromotrice pour toutes les positions de l'induit. La méthode de Joubert a été employée avec quelques modifications par Mordey et Raworth ¹, et par Ryan ².

Méthode statique de Mordey. — Une autre méthode, applicable aux machines au repos et sans courant dans l'induit, consiste à exciter extérieurement les électro-aimants tandis que les bobines de l'induit ou l'une quelconque d'entre elles sont reliées à un galvanomètre balistique convenable, et à observer les impulsions données quand on ouvre brusquement le circuit d'excitation. En répétant l'opération pour un certain nombre de positions successives de l'armature par rapport à l'inducteur, on obtient une mesure de la grandeur du flux magnétique correspondant à chaque position de l'armature, et les résultats peuvent en être réunis en une courbe montrant la distribution du magnétisme dans le champ. Toutefois cette distribution est, ainsi qu'on le verra, troublée, quand la machine fonctionne, par le courant qui circule dans les fils de l'induit.

RÉACTIONS DUES AU COURANT DANS L'INDUIT

Quand une machine fonctionne, on observe une série de phénomènes entièrement nouveaux dus aux réactions magnétiques et électriques qui se produisent entre l'induit et les inducteurs, et entre les sections individuelles des spires de l'armature. Le courant qui circule dans les fils de l'induit produit des effets magnétiques qui se combinent avec ceux résultant du courant d'excitation des inducteurs. Il peut en outre se développer dans les masses métalliques des courants parasites qui troublent le champ magnétique. Les réactions dues au mouvement de l'armature se manifestent de plusieurs manières, dont les plus importantes sont : (a) une tendance à l'aimantation transversale de l'induit ; (b) une tendance à la

¹ *Journ. Inst. Electrical Engineers*, XVIII. 670, 1889.

² *Trans. Amer. Instit. Electrical Engineers*, VII. 3, 1890

production d'étincelles aux balais ; (c) d'où la nécessité de déplacer les balais d'un certain angle, jusqu'à ce que les étincelles disparaissent ; (d) comme conséquence, une tendance à la désaimantation par le fait du courant d'induit ; (e) des variations dans la production des étincelles, et, par suite, dans la position des points neutres, suivant le courant demandé à la machine ; (f) un échauffement du noyau et des fils de l'induit ; (g) un échauffement des pièces polaires des électro-aimants ; (h) et par suite un écart entre la puissance mécanique fournie à l'arbre et la puissance électrique développée dans le circuit extérieur. La nature de ces réactions demande une attention spéciale.

Tendance du courant d'induit à l'aimantation transversale. —

On a vu (p. 64 et fig. 50) qu'un induit quelconque à circuit fermé peut être assimilé dans son fonctionnement à une pile voltaïque double, les deux séries de bobines élémentaires en circuit agissant comme deux ran-

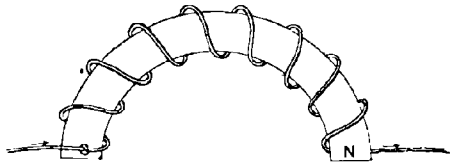


Fig. 58. — Pôles d'un demi-anneau.

gées d'éléments réunies en « quantité ». Il s'agit maintenant de montrer qu'un induit en anneau peut être également considéré comme un aimant double. — Imaginons un demi-anneau en fer, enroulé, comme l'indique la figure 58, d'une spire parcourue par un courant ; il s'aimantera, comme chacun sait, et présentera un pôle N à l'une de ses extrémités, et un pôle S à l'autre. Si l'on enveloppe de la même manière un anneau complet, mais cette fois avec un enroulement sans fin, et qu'on fasse alors pénétrer en un point de ces spires des courants électriques issus d'une pile ou d'une autre source, ces courants parcourant les deux moitiés de l'anneau pour émerger par un conducteur convenable en un point situé du côté opposé, chacune des moitiés de l'anneau s'aimantera. Il se produira, si les courants circulent comme l'indiquent les flèches dans la figure 59, un double pôle S au point par lequel pénètrent les courants, et un double pôle N au point où ils quittent la spire (comparer avec ce qui est dit p. 119). Les courants circulant dans un anneau Gramme tendront par conséquent à aimanter l'anneau de cette façon. Voyons maintenant comment se distribue cette aimantation dans l'inté-

rieur même du fer. La figure 60 montre la direction générale des lignes de force dans le fer ; leurs points d'émergence dans l'air sont les pôles effectifs de l'anneau considéré comme un aimant. Cette figure 60 demande à être attentivement comparée à la figure 59. On y voit que, si la majorité des lignes de force s'échappe extérieurement dans l'air à la circonférence extérieure, un petit nombre d'entre elles se fraye un che-

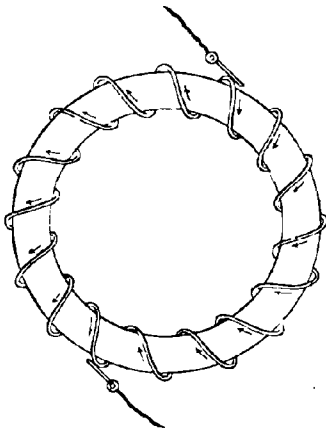


Fig. 59. — Circulation du courant autour d'un induit en anneau.

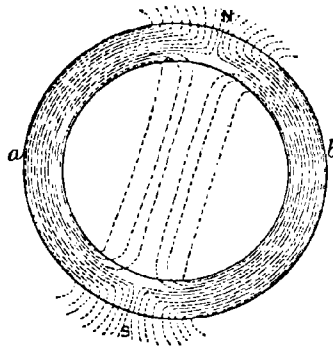


Fig. 60. — Champ magnétique dû au courant d'induit.

min à travers l'espace libre intérieur à l'anneau, du pôle N au pôle S. Cette partie du champ magnétique serait nuisible dans une dynamo réelle si le nombre de ces lignes de force n'était pas en fait très minime.

La présence des masses extérieures de fer aux parties polaires des inducteurs tend à faire dévier ces lignes de force vers l'extérieur.

Il est évident que cet effet d'aimantation transversale produira une torsion du champ magnétique dans les pièces polaires et dans l'entrefer ; et il aurait pour unique résultat de diminuer légèrement la force électromotrice de la machine si les balais devaient rester aux extrémités d'un diamètre exactement symétrique entre les deux pôles des inducteurs. Mais il ne peut en être ainsi pour des raisons que nous allons maintenant examiner. — Pour obvier à la production d'étincelles, il faut modifier la position angulaire des balais, le diamètre de commutation étant oblique quand les balais sont ainsi aux points neutres ; et, par suite de ce déplacement, le courant d'induit produit, comme on le verra, non seulement un effet d'aimantation transversale, mais aussi un effet de désaimantation, ce qui affaiblit la force électromotrice.

La figure 61¹ représente le flux magnétique à travers un induit au repos, quand les inducteurs sont excités séparément. La largeur de l'entrefer est exagérée, et les fils conducteurs, tant de l'armature que des inducteurs, sont représentés en section comme s'ils étaient constitués par une couche unique de gros fils. Les fils dans lesquels le courant circule en allant *vers* l'observateur sont marqués par un point central ; ceux dans lesquels le courant s'éloigne *de* l'observateur sont distingués par une croix. Le lecteur peut considérer le point comme représentant la pointe d'une flèche marchant vers lui, et les croix comme la plume

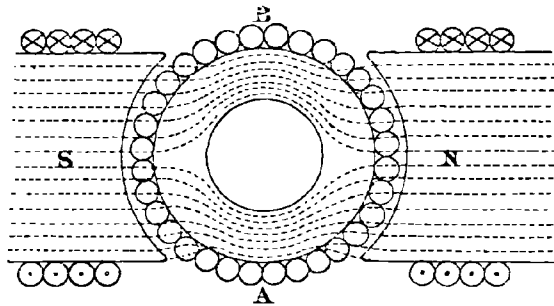


Fig. 61. — Flux magnétique à travers un induit qui n'est le siège d'aucun courant.

de la flèche qui s'éloigne de lui. Les fils qui ne portent aucun courant sont laissés en blanc. On remarquera que les lignes de force sont tout à fait uniformément distribuées tant dans les entrefers que dans les parties polaires des électro-aimants. L'induit est en tambour et n'a de fils qu'à l'extérieur ; l'effet d'aimantation produit sur lui par un courant sera du même genre, tout en étant moindre, que celui précédemment indiqué dans le cas d'un induit en anneau. Supposons qu'on supprime le courant d'excitation des inducteurs, et qu'on n'envoie de courant que dans les bobines de l'induit, de manière à imiter l'effet du courant engendré par la machine en marche.

S'il en est ainsi, et si les connexions de l'induit sont dextrorsum, la machine tournant d'ailleurs dans le sens des aiguilles d'une montre, les courants dans les deux parties de l'enroulement tendront à monter vers le haut, le balai supérieur étant le balai positif, et le double pôle ainsi créé sera un pôle nord. Supposons que les balais par lesquels entre et sort le courant soient respectivement aux points le plus élevé et le plus

¹ Les figures 61, 62, 63 et 69 sont empruntées, avec quelques modifications, à un travail d'Esson publié dans le *Journ. Inst. Electrical Engineers*, XIX. 135, 1890.

bas, comme dans la figure 62; les lignes ponctuées peuvent alors être considérées comme représentant le flux magnétique à travers le système. Ce flux de force dépendant de la qualité magnétique de la voie qui lui

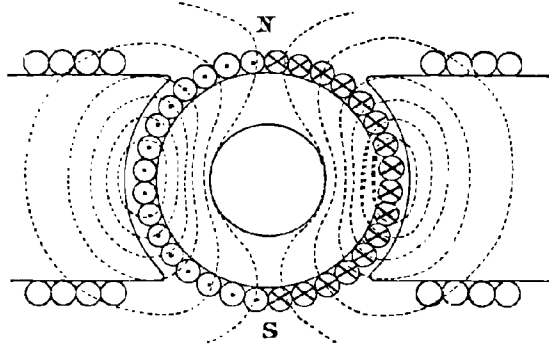


Fig. 62. — Aimantation transversale due au courant d'induit.

est offerte, il est clair que le champ transversal produit par un courant donné, circulant dans un ensemble donné de conducteurs, sera d'autant plus puissant que l'entrefer sera plus étroit, et que, d'autre part, l'arc sous-tendu des deux côtés par les masses polaires de fer¹ sera plus grand.

Mais dans une machine réelle, quand elle produit un courant, ces deux

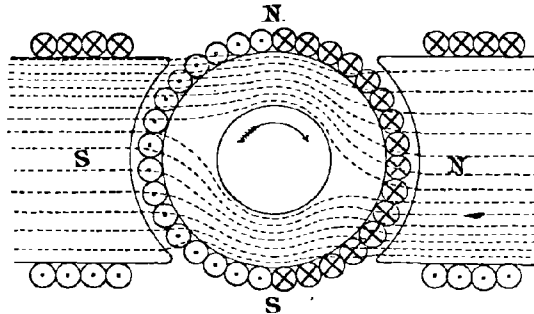


Fig. 63. — Aimantation résultante due aux courants dans l'inducteur et dans l'induit (sans décalage).

actions magnétisantes se produisent simultanément. Si l'on superpose

¹ Du moment que ces masses polaires constituent le passage par lequel les lignes de force du champ transversal reviennent sur elles-mêmes, il est évident qu'on pourra en partie contre-balancer l'aimantation transversale en divisant les masses polaires par des rainures horizontales. Voir le *Journ. Inst. Electrical Engineers*, XX. 290, 1891.

les figures 62 et 61, on obtiendra une représentation approchée de ce qui se passe, comme dans la figure 63. — Nous avons supposé les balais placés de manière à toucher les deux points situés sur le diamètre vertical. Les inducteurs tendent à aimanter l'anneau en développant un pôle N au point situé à l'extrémité gauche de son diamètre horizontal, et les courants d'induit tendent à l'aimanter de telle façon que son point le plus haut, où se trouve le balai, soit aussi un pôle N. Dès lors il se produira une aimantation résultante dans une direction oblique. Représentons par une ligne OF (fig. 64) la force magnétisante due aux inducteurs, et par une ligne perpendiculaire OC la force magnétisante due au courant passant dans l'induit; la diagonale OR du parallélogramme construit sur ces deux

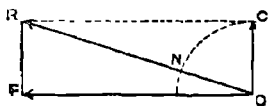


Fig. 64.

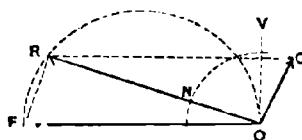


Fig. 65.

lignes représentera alors la direction de l'aimantation résultante. En décrivant du point O comme centre un cercle de rayon OC, son point N d'intersection avec la diagonale OR donnera la distance de déplacement du pôle résultant induit, par rapport à la ligne horizontale. Le magnétisme est ainsi tordu dans le sens du mouvement (pour des moteurs, ce serait l'inverse), comme si la rotation de l'induit avait effectivement un peu entraîné avec elle l'aimantation dans son mouvement circulaire. La position de potentiel maximum sera ainsi légèrement déplacée dans le sens du mouvement. Mais, pour des raisons qui seront bientôt examinées, on trouve, quand l'aimantation est ainsi tordue, que les *points neutres* (c'est-à-dire les points où les balais donneront le moins d'étincelles) se sont également déplacés en avant ou *décalés*. Si l'on admet quant à présent que les balais doivent être avancés d'un angle égal à celui dont a varié l'aimantation résultante, alors OC doit être déplacée jusqu'à devenir perpendiculaire à ON. Mais le déplacement de OC modifiera également un peu la position de N. Il est aisé de déterminer cette nouvelle position. Sur OF comme diamètre (fig. 65) décrivons une demi-circconférence et menons la corde FR, égale à la longueur que doit avoir OC. Traçons OC parallèle et égale à FR, ainsi que la diagonale OR comme précédemment. L'angle CON est droit, et N est très voisin de la position qu'il occupait avant. Soit OV une ligne verticale; dès lors l'angle $\text{VOC} = \text{angle FOR}$ est l'angle de calage, et, si OF représente la force

magnétisante des électro-aimants, et OC celle du courant de l'induit, on aura :

$$\frac{OC}{OF} = \sin CRO = \sin FOR;$$

c'est-à-dire que le sinus de l'angle de calage est proportionnel au rapport des deux forces magnétisantes.

Toute cette opération de rectification du calage est censée faite dans la figure 66 qui se réfère à une dynamo à anneau.

Mais un coup d'œil jeté sur les figures 63 et 66 montre également que le magnétisme de l'anneau réagit sur celui des pièces polaires. Les

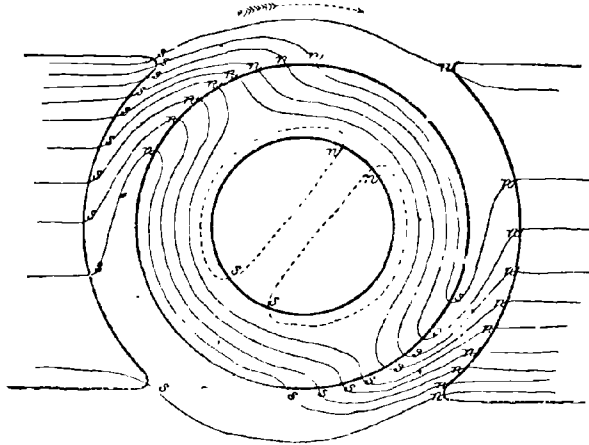


Fig. 66. — Réactions magnétiques entre l'inducteur et l'induit dans une génératrice.

lignes de force dans le fer de la pièce polaire de gauche sont plus massées vers l'angle supérieur, et vers l'angle inférieur dans la pièce polaire de droite, comme si la polarité avait été attirée d'un côté vers le haut et de l'autre vers le bas. La distribution du champ n'est plus nullement ce qu'elle était dans la figure 61. Les lignes de force du côté gauche supérieur sont serrées les unes contre les autres et tordues transversalement. Le pôle N résultant de l'anneau, — marqué n, n, n, où les lignes de force émergent de l'anneau —, attire le pôle S, — marqué s, s, s, où les lignes pénètrent dans le champ magnétique —, et le moteur qui entraîne la dynamo a une puissance considérable à développer pour arracher l'armature à ces attractions. Plus le courant dans l'induit est considérable, plus les pôles sont intenses dans l'anneau, et plus est énergique dans les inducteurs l'attraction de n, n, n, vers s, s, s; de sorte que

la machine à vapeur a encore plus de puissance à développer pour maintenir la vitesse. Il est à remarquer également dans cette figure qui se réfère à une machine à anneau qu'un *petit nombre* des lignes de force dues au passage du courant dans l'armature — elles sont représentées en pointillé au nombre de deux sur la figure — passe transversalement à l'intérieur de l'anneau et ne contribue en rien au champ extérieur. La direction oblique de ce champ interne marque l'angle de calage des balais. On remarquera en outre que les couches les plus internes du fer de l'anneau sont aimantées différemment des couches externes, car le pôle n des couches externes du fer occupe une région située obliquement

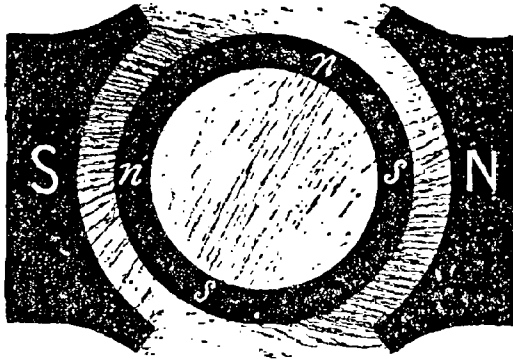


Fig. 67. — Champ magnétique d'une dynamo bipolaire.

sur la gauche, tandis que le pôle n des couches internes se trouve à droite du point le plus haut. Tous ces phénomènes, — la torsion du champ, — sa concentration sous l'angle « de sortie » des pièces polaires, — son affaiblissement sous l'angle « d'entrée », — le faible champ intérieur, — l'écart entre les positions des pôles induits sur les côtés interne et externe de l'anneau —, peuvent être réellement observés dans une dynamo. La figure 67 montre l'effet produit expérimentalement sur de la limaille de fer quand on met un anneau aimanté entre les pôles S et N d'un champ magnétique, qui tend à induire en lui des pôles n et s , et quand on donne à ses propres pôles n et s le calage convenable. On la comparera avec intérêt aux figures 63 et 66. Peut-être objectera-t-on que dans la figure 66 les pôles internes, tels qu'ils sont marqués, ne sont pas exactement à angles droits avec les pôles externes de l'anneau. Il n'en est pas non plus ainsi dans la réalité. La position des pôles internes est déterminée par le calage des balais, et les balais sont placés de telle façon que la machine ne donne pas d'étincelles.

Dans le cas des armatures en tambour, les phénomènes, quoique du même genre, sont un peu moins faciles à exposer. En raison de ce que l'enroulement enveloppe complètement la surface extérieure de l'induit, les courants dans quelques-unes des spires sont en partie neutralisés, dans leur action magnétisante sur le noyau, par les courants dans les spires transversales ; il en résulte que la polarité due au courant n'est pas aussi marquée que dans les armatures en anneau. Il ne peut d'ailleurs s'y constituer un champ magnétique interne considérable. En fait, les armatures en tambour sont moins sujettes que les armatures en anneau à des troubles d'induction de tous genres. Mais, à ces exceptions près, les considérations ci-dessus développées s'y appliquent également.

Points neutres. — Du jour où l'on a commencé à employer les dynamos, les ingénieurs ont constaté que, pour réduire au minimum les étincelles au collecteur, il fallait placer les balais en des points déterminés, à trouver par l'expérience, et appelés *points neutres*. Dans les machines bipolaires ordinaires les deux points neutres sont situés aux deux extrémités opposées d'un même diamètre dit pour cette raison *ligne neutre*. L'expression de *diamètre de commutation* doit être réservée pour indiquer la position réellement occupée par les balais, ou par les bobines élémentaires passant sous les balais, qu'elle soit ou non au point neutre. L'expérience montre que, dans presque tous les cas, la ligne neutre n'est pas exactement à angles droits avec la ligne qui joint les milieux des deux pièces polaires, mais qu'elle occupe une position oblique correspondant (dans un générateur) à un déplacement angulaire de quelques degrés dans le sens du mouvement. On reconnut de bonne heure que, dans un grand nombre de machines, la position exacte du point neutre était différente suivant la puissance qu'on demandait à la machine. Quand les balais étaient placés de manière à ne pas donner d'étincelles avec un certain nombre de lampes en service, la machine en donnait si l'on venait à modifier sa charge, à moins que les balais ne fussent réajustés aux points neutres correspondants. C'est ce qui détermina dans la pratique le montage des balais sur des *colliers mobiles* (voir p. 33) permettant d'avancer ou de reculer à volonté leur ligne de contact par rapport au point neutre. Les constructeurs se sont naturellement attachés avec beaucoup de sollicitude à la solution pratique du problème consistant à annuler ces variations de l'angle de calage. On a vu à la page 68 que les points neutres sont très voisins des points de potentiel maximum positif et de maximum négatif au collecteur ; mais ils ne coïncident pas exactement avec ces points. Au point

de potentiel maximum il y a généralement des étincelles. Ce point est, comme on va le voir, déplacé en avant, dans le sens du mouvement; mais le point où il se produit le moins d'étincelles, le vrai point *neutre*, est situé encore un peu plus en avant que le précédent, et cette augmentation de déplacement est due à une autre des réactions étudiées en ce moment.

Causes d'étincelles. — Toutes les fois qu'on ouvre subitement un circuit dans lequel circule un courant, on observe une étincelle, notamment si ce circuit renferme un électro-aimant ou des bobines quelconques de fil entourant un noyau de fer. L'étincelle à la rupture d'un circuit s'explique de la manière suivante : —

On sait que tout courant électrique possède une propriété appelée tantôt « inertie électrique », tantôt « self-induction », en vertu de laquelle il tend à poursuivre sa marche en avant. De même qu'un volant une fois mis en route tend à continuer son mouvement quand la cause qui l'a déterminé cesse d'agir, de même un courant circulant autour d'une bobine tend à continuer sa marche même après la rupture de toute connexion avec la source dont il émane. Ce phénomène ne dure généralement, il est vrai, qu'une faible fraction de seconde; mais le courant *tend* à poursuivre son chemin. On sait également que cette quasi-inertie est intimement liée à ses propriétés magnétiques, et que c'est dans son propre champ magnétique que réside principalement cette inertie de self-induction.

Un courant circulant autour d'un noyau de fer possède une inertie électrique (ou self-induction) beaucoup plus grande, parce qu'il crée un champ magnétique plus intense qu'un courant dans une bobine sans noyau. C'est en raison de cette propriété qu'il faut dépenser de l'énergie pour lancer un courant, et cette énergie peut être considérable. Le courant électrique circulant dans une bobine possède une certaine quantité d'énergie, et, si on l'arrête en ouvrant le circuit, cette énergie se manifeste par une étincelle dite (mais à tort) d'« extra-courant ». Si l'on ferme la bobine sur elle-même, son courant (à moins qu'il n'existe une force électromotrice pour le maintenir) se trouve aussi arrêté pendant une fraction de seconde par la quasi-friction intérieure communément appelée la « résistance » du fil.

Or, dans un induit en fonctionnement, la moitié du courant circule, dans le cas que nous avons choisi comme type pour cette étude, en remontant les spires dans la moitié gauche de l'anneau; et l'autre moitié, également en remontant les spires dans la moitié de droite. Si le

balai positif est en haut ou dans le voisinage, comme dans la figure 68, le courant va de gauche à droite à travers les sections X et W à gauche de ce balai, et de droite à gauche à travers les sections T et U à droite du balai. Mais, au fur et à mesure que l'induit tourne, les lames du collecteur viennent successivement en contact avec le balai. Dans la figure 68 les touches *c* et *d* ont déjà passé sous le balai, *e* va le quitter, et *f* commence à se présenter à lui. Pendant un instant le balai porte sur deux

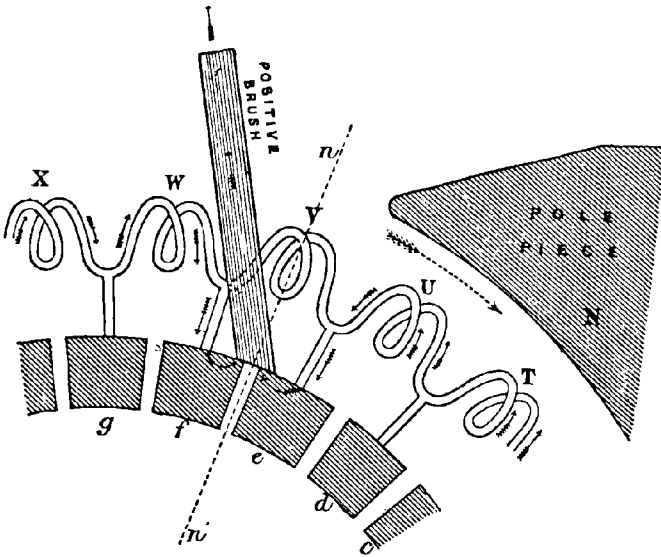


Fig. 68. — Commutation dans une section d'induit de génératrice.
Pole Piece = Pièce polaire. — *Positive Brush* = Balai positif.

touches adjacentes *e* et *f*, et met ainsi en court-circuit pour un moment la section V. La durée de ce double contact dépendra naturellement de la vitesse de rotation, de la largeur de l'espace isolant entre les touches du collecteur, et de l'épaisseur de la surface de contact du balai. Or la section V, un instant auparavant, appartenait à la moitié gauche de l'anneau, et, quand elle a passé sous le balai, c'est-à-dire quand *e* cesse de toucher ce balai, elle appartient à la moitié de droite. Il est évident dès lors que, par le fait de son passage sous le balai, le courant qui circulait dans la section V sera arrêté et reprendra ensuite son cours en sens inverse à travers les bobines. Chacune des sections de l'induit, en passant ainsi sous le balai, sera de même transférée d'une moitié à l'autre de l'anneau, et le courant qui la parcourt sera renversé. C'est là

en réalité le fait de la commutation. — Supposons maintenant que, par suite des dispositions prises, la commutation s'effectue exactement au point où les spires de la section n'embrassent aucun flux de force, de telle sorte que la bobine élémentaire, lorsqu'elle est mise en court-circuit, ne soit le siège d'aucune force électromotrice induite ; alors le courant qui la parcourait cessera, et, quand elle quittera le balai, elle arrivera subitement, comme bobine absolument inerte, dans la moitié droite de l'anneau, où le courant circule vers le balai. Immédiatement avant que e ne quitte le balai, le courant montant par T et U s'écoule par e au balai ; mais, quand e s'éloigne, ce courant a tout d'un coup à passer également par les spires de V. Il ne peut cependant pas atteindre instantanément toute son intensité dans la bobine inerte V ; aussi, avant que V arrive à travailler réellement, le courant produit-il une étincelle entre e et le balai. — Nous avons supposé ici que V était une bobine parfaitement inerte ; supposons maintenant qu'il n'en soit pas ainsi, mais que cette section embrasse encore réellement un flux de force, ce qui serait le cas si le balai, au lieu d'être déplacé en avant de la ligne neutre nn' , eût été plus loin vers la gauche ; il est clair dès lors que, pendant l'instant de mise en court-circuit, la bobine à son passage au balai sera soumise à une force électromotrice. Cette force électromotrice, si minime qu'elle soit, peut momentanément déterminer un fort courant, parce que la résistance mise en court-circuit est très faible. Aussi l'étincelle sera-t-elle plus nuisible que si la bobine était absolument inerte.

Supposons maintenant que, inversement, le balai soit tellement avancé, dans le sens du mouvement⁴, que, en passant sous ce balai, la bobine commence à s'engager sous le bord de l'électro-aimant de droite. Dans ce cas elle commencera à découper un flux de force tendant à développer en elle-même un courant de sens contraire. — On arrive à l'ajustement idéal en déplaçant les balais juste assez au delà du point de force électromotrice maximum pour que les sections élémentaires, quand elles passent sous le balai et sont mises en court-circuit, soient à ce moment soumises à une faible force électromotrice inverse ; et cette action doit durer juste assez longtemps dans chaque section successive pour arrêter la circulation du courant existant, déterminer un courant de sens inverse et le laisser acquérir une intensité exactement égale à celle du courant qui circule dans l'autre moitié de l'induit, auquel il peut alors se réunir. Si l'on pouvait réaliser cet ensemble de conditions,

⁴ Dans le cas d'un moteur, spécialement étudié au Chap. XX, les balais doivent être décalés en sens contraire, c'est-à-dire en arrière par rapport au sens du mouvement. On dit alors que le *décalage* est *négalif*.

il n'y aurait pas d'étincelles.— Un champ magnétique ayant exactement l'intensité voulue pour déterminer le renversement dans la section de l'induit où a lieu la commutation peut ordinairement se trouver juste à l'extrémité de la pièce polaire, parce que en ce point les lignes de force ont une densité qui augmente très rapidement. Du moment qu'il faut un champ magnétique plus puissant pour renverser des courants intenses qu'il n'en faut pour de faibles courants, il s'ensuit que le décalage à donner aux balais est plus grand pour des courants intenses que pour de faibles intensités.

Si le collier mobile ne permet pas d'avancer les balais suffisamment pour leur faire toucher les points neutres, les étincelles se produisent en toute liberté. Si on les déplace au delà des points neutres, il y a généralement moins d'étincelles. En d'autres termes, il y a ordinairement beaucoup d'étincelles quand le décalage est trop faible ; il y en a peu quand il est trop grand ; et il n'y en a pas quand il est bon. Si le décalage dépasse la limite voulue, il y a dépense inutile d'énergie due au développement, dans la bobine mise en court-circuit, d'un courant inverse plus grand qu'il n'est nécessaire. De plus, quand le calage est fait au delà du point neutre, toutes les bobines situées dans la région entre ce point neutre et le diamètre de commutation deviennent le siège de forces électromotrices inverses, et le potentiel aux balais tombe au-dessous de son maximum.

Si, dans une dynamo mal étudiée, le courant dans une section quelconque de l'induit est très intense, le champ magnétique étant de son côté très faible, il peut arriver qu'on ne trouve aucune position des balais¹ pour laquelle l'intensité du champ soit suffisante à renverser le courant dans la section. Dans ces conditions, il sera impossible d'empêcher les étincelles de se produire. Il est évident qu'on diminuera cette production d'étincelles : 1° en sectionnant l'induit, de telle sorte que les renversements de courants puissent s'effectuer d'une manière fractionnée ; 2° en rendant le champ magnétique aussi puissant que possible ; 3° en conformant les surfaces polaires de telle sorte qu'un épanouissement convenable du champ magnétique lui donne une intensité progressive ; 4° en choisissant des balais d'épaisseur appropriée et maintenant bien ajustées leurs surfaces de contact. (Voir également le Chapitre XVI.)

¹ L'Auteur a eu l'occasion de voir une dynamo dans laquelle la puissance de l'induit dépassait celle de l'inducteur. Quand les balais étaient peu déplacés, on obtenait une bonne force électromotrice, mais il y avait une énorme production d'étincelles. Avec un grand décalage, voisin de 90°, les étincelles disparaissaient, mais la force électromotrice se réduisait en même temps à rien.

Indépendamment de la cause ordinaire d'étincelles ci-dessus indiquée il en existe d'autres raisons de nature exceptionnelle. Dans les dynamos (généralement employées pour les éclairages à arc) construites pour fonctionner à haut potentiel, c'est-à-dire sous 1 000 volts et au delà, on voit quelquefois se produire un phénomène connu sous le nom de « cercle de feu ». Une longue étincelle bleue est entraînée de balai à balai autour de la circonférence du collecteur lorsque la résistance du circuit vient à changer brusquement. Cette étincelle, qui se rapproche plutôt d'un arc, est peu nuisible quand on a affaire à des dynamos dont le collecteur est formé d'un petit nombre de touches séparées par des intervalles d'air ; mais elle est désastreuse avec des dynamos dont les collecteurs comportent, comme d'ordinaire, des touches isolées par une mince feuille de mica. Les touches sont en effet aisément mises en court-circuit par ce cercle de feu.

Une autre cause d'étincelles est le défaut de symétrie dans le bobinage de l'induit ; quelques-uns des premiers types de l'induit Siemens péchaient sous ce rapport. Si les spires sur une des moitiés de l'induit sont ou plus nombreuses, ou, en moyenne, *plus rapprochées du noyau de fer* que celles qui composent l'autre moitié, les forces électromotrices induites dans ces deux moitiés sont inégales, et, par suite, à chaque tour de l'induit, les points neutres se déplacent successivement en avant et en arrière, déterminant ainsi des étincelles. Les soubresauts de balais quand le collecteur ne tourne pas rond, ou quand les porte-balais sont défectueux, sont une autre source féconde d'étincelles.

Autrefois la nécessité de décaler les balais était attribuée à une lenteur dans la désaimantation du fer de l'induit, et, même encore de nos jours, certaines autorités veulent voir une cause partielle du déplacement du magnétisme dans l'induit dans la lenteur de désaimantation du fer. On n'a pu cependant prouver encore expérimentalement que ce déplacement fût dû à un véritable retard magnétique. Ewing a montré (voir p. 160) que l'influence des forces magnétisantes prolongées se traduit par une certaine lenteur dans l'accroissement de l'aimantation ; mais cette « hystérésis visqueuse » n'est pour rien dans la nécessité du décalage des balais. La lenteur apparente de propagation des phénomènes magnétiques dans les grandes masses de fer est due, comme on peut le démontrer, à des courants induits internes, et c'est précisément pour cette raison que personne n'emploie du fer massif comme noyau d'induit. Il n'a pas été démontré davantage que des feuilles de tôle ou des fils de fer, tels que ceux qui constituent les noyaux d'induit, fussent plus longs à se

désaimanter qu'à s'aimanter. A vrai dire, c'est même probablement l'inverse qui a lieu ; et, jusqu'à ce que l'expérience ait mis le contraire en évidence, nous admettons que les effets du prétendu retard magnétique sont négligeables. Le développement de courants parasites dans une partie quelconque de l'induit en mouvement sera nécessairement accompagné d'une action démagnétisante et influera également sur le décalage des balais.

Action démagnétisante de l'induit. — Si dans une dynamo on avance les balais dans le but de faire disparaître les étincelles, il en résulte immédiatement une autre réaction, c'est la production d'une force réellement démagnétisante ou « induction inverse ». Il est facile de démontrer cet effet du courant d'induit en se reportant à la figure 69. Les inducteurs et l'induit sont représentés ici comme précédemment ; mais on a donné aux balais un calage en avant ou positif, indiqué par la ligne

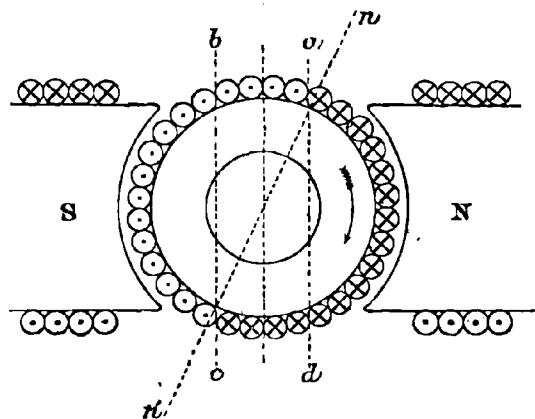


Fig. 69. — Action démagnétisante du courant d'induit d'une génératrice.

oblique nn' . Les courants circulent en allant vers l'observateur dans les conducteurs situés à gauche de la ligne neutre, et vont en s'éloignant de l'observateur dans ceux qui se trouvent à droite de cette ligne. Traçons maintenant à travers l'armature, les deux normales ad et bc menées par les points de commutation correspondant aux deux balais. Ces lignes coupent en quatre points l'extérieur de l'induit. Le diagramme comporte trente-deux conducteurs distribués autour du noyau de l'induit, et, comme celui-ci est bobiné en tambour, les connexions terminales de ces conducteurs présentent probablement quelque chose d'analogue à

celles qu'indique la figure 70, où chaque conducteur est relié transversalement, par une lame de connexion à deux courbures, au conducteur voisin de celui qui lui est diamétralement opposé¹. Du reste, en ce qui concerne les actions magnétisantes, peu importent les connexions terminales, pourvu qu'elles soient compatibles avec la circulation du courant précédemment indiquée dans la figure 69, c'est-à-dire vers l'avant de la figure dans les conducteurs à gauche de nn' et vers l'arrière dans les conducteurs à droite de nn' . Il résulte de là que l'on peut, momentanément, les considérer comme groupés d'une façon quelconque qui aide à com-

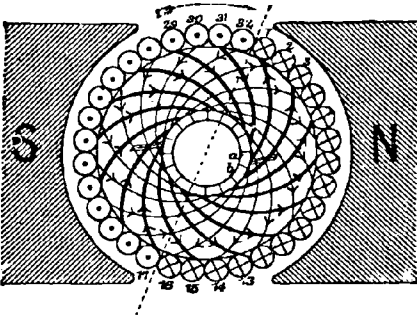


Fig. 70. — Connexions terminales réelles d'un bobinage en tambour.

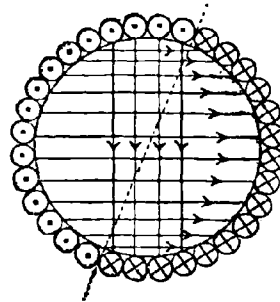


Fig. 71. — Groupement des conducteurs en bandes d'aimantation transversale et de désaimantation.

prendre leur action. Supposons donc que les quatre conducteurs de 29 à 32 soient reliés, transversalement aux bases du cylindre², aux quatre fils de 13 à 16; et que les douze conducteurs de 1 à 12 soient de même reliés aux douze de 17 à 28. Les fils d'induit se trouvent maintenant répartis en deux bandes, l'une horizontale, de douze fils, qui tend uniquement à *aimanter transversalement*, l'autre verticale, de quatre fils, tendant uniquement à *désaimanter*; on voit en effet que le sens du courant autour de la bande verticale est inverse de celui qui circule dans les fils magnétisants. La largeur de la bande de fils démagnétisants est naturellement proportionnelle à l'angle de calage, puisqu'elle sous-tend le double de cet angle. — Si l'induit considéré porte 100 ampères, comme le circuit de l'induit offre au courant deux passages égaux (p. 62), chaque conducteur doit porter 50 ampères. Par suite le nombre d'ampères-tours de force magnétisante transversale est de $50 \times 12 = 600$; et le nombre d'ampères-tours de force démagnétisante est de $50 \times 4 = 200$.

¹ Pour les modes de connexion des enroulements en tambour, voir le Chapitre XIII.

² Voir Swinburne dans le *Journ. Soc. Teleg. Engineers*, XV. 542, 1886.

Mais l'action d'aimantation transversale qui, ainsi qu'on l'a vu, tord le champ magnétique, diminue légèrement par elle-même le flux de force qui passe transversalement d'un côté à l'autre du noyau de l'induit, parce que, dans le sens résultant oblique de l'aimantation, le flux augmenté tend à produire une plus grande saturation.— Pour une étude plus approfondie des effets d'aimantation transversale amenant une diminution dans l'aimantation du noyau, on se reportera utilement à des articles de Siemens¹ et de Schültze² dans les *Annales de Wiedemann*. Schültze, au cours de vingt-quatre expériences, a trouvé que l'aimantation transversale d'un noyau de fer diminuait toujours l'aimantation longitudinale. Les expériences les plus récentes à cet égard sont celles de Kennelly³.

Frölich, dans des expériences sur un ancien type Siemens, a trouvé que la réaction du courant d'induit diminuait de 25 p. 100 environ le magnétisme efficace des électro-aimants. — Dans des recherches plus récentes, Strömberg⁴ a mesuré sur une machine Schuckert l'effet démagnétisant du courant d'induit et l'a exprimé comme équivalent à un certain nombre d'ampères-tours négatifs. Quand la puissance excitatrice du courant dans les inducteurs était maintenue à 6 250 ampères-tours, il a trouvé pour l'effet démagnétisant du courant d'induit les chiffres suivants :

Courant d'induit	Ampères-tours négatifs équivalents
7,4	650
12,0	850
25,4	1 450
44,0	2 450
60,4	3 650

Pour une plus forte excitation constante des inducteurs, l'effet démagnétisant des courants d'induit était plus grand. Avec 13 400 ampères-tours, l'effet démagnétisant de soixante ampères dans l'induit était équivalent à 4 400 ampères-tours ; avec 25 000 ampères-tours, l'effet démagnétisant de 30,5 ampères seulement était équivalent à 3 100 ampères-tours. Ce résultat inattendu était probablement dû à ce que le fer des inducteurs arrivait plus tôt que le noyau de l'induit à un degré

¹ Werner Siemens, *Wiedemann's Annalen*, XIV. 631, 1882.

² Schültze, *Wied. Ann.*, XXIV. 663, 1885.— Voir également Oberbeck, *IIabilitations-Schrift*, 1878.

³ *Electrician*, XXV. 111, 1890.

⁴ *Centrablatt für Elektrotechnik*, 283, 1887.

plus élevé de saturation. Il pouvait également dépendre de la position des balais, dont ne parle pas Strömberg. — Une dynamo Manchester essayée par le professeur Ayrton¹ exigeait 5 846 ampères-tours de force magnétisante quand elle n'alimentait aucune lampe, et 10 000 quand elle fournissait son plein courant ; sur les 4 154 ampères-tours supplémentaires, 1 754 étaient nécessaires pour compenser les volts perdus (en raison de la résistance intérieure et de la diminution de perméabilité) et 2 400 pour compenser l'effet démagnétisant du courant d'induit, étant donnée l'augmentation de décalage indispensable pour éviter les étincelles. Plus est grand le décalage des balais dans une dynamo fonctionnant comme génératrice, plus l'effet de désaimantation du courant d'induit est considérable.

Dans les moteurs, un mouvement de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, dans un champ magnétique dextrorsum, correspondant à un courant d'induit de sens inverse de celui de la dynamo, il faut donner aux balais, pour éviter les étincelles, un décalage négatif ou en arrière, et ce décalage en arrière se traduit également par une tendance à la désaimantation.

Si l'on donne aux balais d'une génératrice un décalage négatif (c'est-à-dire un déplacement, par rapport à la ligne neutre, en sens inverse du sens de rotation), l'action magnétisante des courants d'induit tendra à favoriser l'aimantation du noyau. Les docteurs J. et E. Hopkinson² ont même montré que, avec un décalage en arrière, une dynamo pouvait s'exciter elle-même sous la seule action des courants d'induit ; mais dans ces conditions le décalage négatif donne lieu à une grande et désastreuse production d'étincelles. L'effet démagnétisant est naturellement proportionnel au nombre d'ampères-tours effectifs du circuit d'induit qui entoure le circuit magnétique, et, par suite, au nombre réel d'ampères-tours compris, comme on l'a vu, dans une bande d'une largeur angulaire double de l'angle de calage³. — On a proposé plusieurs expédients pour compenser la tendance des courants d'induit à produire cette aimantation transversale, et obvier ainsi aux variations de décalage. Dans un procédé dû à Mather⁴, un petit électro-aimant droit, excité

¹ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XIX. 175, 1890.

² *Phil. Trans.*, partie I. 347, 1886.

³ Suivant Peukert, qui cependant ne spécifie pas l'angle de calage, l'effet démagnétisant du courant d'induit est proportionnel à 1,3 fois la puissance du courant d'armature. Voir *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 484, 1887.

⁴ Voir *La Lumière électrique*, XIX. 404, 1885.

par le courant d'induit, est placé perpendiculairement entre les pièces polaires. Swinburne¹ a discuté les avantages de diverses dispositions analogues ayant le même objet. Le professeur E. Thomson propose de placer une bobine en série sur un bâti mobile au-dessus de l'armature et de l'incliner jusqu'à ce qu'elle ramène le point neutre en arrière.

A propos de l'influence de l'induit sur l'aimantation des électro-aimants, on peut faire remarquer que les « caractéristiques » des machines dynamos (voir Chapitre X), employées pour montrer les variations de la force électromotrice de la machine en fonction de l'intensité correspondante du courant, sont quelquefois prises comme représentation des variations de l'aimantation des électro-aimants. Ce n'est pas absolument exact; elles représentent plutôt l'aimantation dans l'induit. Mais, si un électro-aimant peut atteindre une saturation pratique d'aimantation, il n'y a pas, avec un courant encore plus intense, de diminution d'aimantation. Cependant, les caractéristiques de presque toutes les dynamos en série présentent, au moins pour de grandes vitesses, une tendance marquée à s'abaisser après avoir atteint un maximum; et dans certaines machines, telles que l'ancien type de Brush à anneau de fonte (voir fig. 156), cette réaction est très accentuée. La force électromotrice diminue, mais le magnétisme des inducteurs ne change pas. Le Dr Hopkinson a suggéré une explication de cet abaissement de la caractéristique dans sa conférence sur « l'Éclairage électrique » devant l'*Institution of Civil Engineers*, en avril 1883; il l'attribue à la réaction de self-induction et de mutuelle induction entre les sections de l'induit. C'est là, sans aucun doute, une des causes du phénomène, puisque toutes les réactions de ce genre diminuent la force électromotrice efficace; mais cet effet est dû en partie à la torsion du magnétisme, et surtout à l'action démagnétisante résultant de l'augmentation de décalage des balais. Il est au moins très significatif que, dans l'ancien type de machine Brush, où la réduction de force électromotrice est très considérable, l'induit comporte également une grande masse de fer, et les balais un décalage très variable. Ces machines à caractéristique plongeante sont préférées pour les éclairages à arc.

La question du décalage des balais, des étincelles et du champ nécessaire pour renverser le courant dans une section est traitée plus loin (Chap. XVI) au point de vue de l'étude des dynamos et de la charge (ou des ampères-tours) que peut supporter un induit.

¹ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XIX. 105, 1890.

Résistance apparente. — La self-induction dans les spires de l'induit se manifeste encore autrement. Dans chaque section le courant tend à poursuivre son chemin et, par le fait, s'écoule réellement pendant un instant après son arrivée au balai. L'énergie du courant dans cette section est alors consommée en échauffement du fil pendant l'instant où elle est mise en court-circuit; et, au moment de ce passage, il faut de nouveau dépenser de l'énergie pour y lancer un courant en sens contraire. Toutes ces réactions se produisent naturellement au détriment de la puissance extérieure de la machine; la perte par mise en court-circuit est particulièrement préjudiciable. M. Joubert¹ a montré que la perte de puissance due aux renversements de courant dans les sections d'une armature en anneau est égale à $\frac{nLi_a^2}{4t}$, $\frac{n}{t}$ étant le nombre de tours par seconde, L le coefficient de self-induction pour l'anneau entier, et i_a l'intensité du courant dans l'induit. Les professeurs Ayrton et Perry² ont fait remarquer très judicieusement que ce même phénomène était susceptible d'une autre expression parfaitement rationnelle. La puissance absorbée par un circuit de résistance r portant un courant i étant égale à ri^2 , il est évident que la perte de puissance due à la self-induction est la même que si l'on introduisait dans l'armature une résistance additionnelle³ de la valeur $r = \frac{nL}{4t}$. Il y a, par suite, dans un induit en mouvement, un accroissement *apparent* de résistance proportionnel à sa vitesse, et l'on ne peut vaincre cet accroissement apparent, dû à la self-induction, par une augmentation du nombre des sections de l'armature. On l'atténue seulement jusqu'à un certain point en mettant plus de fer dans l'induit et en réduisant le nombre des spires de cuivre, ou, en d'autres termes, en diminuant le moment magnétique de l'induit au

¹ *Comptes rendus*, 23 juin 1880, 9 janvier 1882, 5 mars 1883; et *l'Electricien*, avril 1883. — Il est facile de démontrer l'exactitude de l'expression ci-dessus. La puissance électrique (en watts) est le produit des volts par les ampères. Si un flux Φ est découpé $\frac{n}{t}$ fois par seconde, la variation moyenne de ce flux est $\frac{n}{t} \Phi$. Si de son côté le circuit d'un anneau a un coefficient de self-induction L , le courant $\frac{1}{2} i_a$ en pénétrant dans ce circuit créera un flux égal à $\frac{1}{2} L i_a$ unités. Le courant $\frac{1}{2} i_a$ est en conséquence virtuellement amené à découper $\frac{n}{t}$ fois par seconde un flux $\frac{1}{2} L i_a$, et la puissance nécessaire pour arrêter le courant de la moitié de l'induit dans toutes les sections l'une après l'autre est $\frac{1}{4} \frac{n}{t} L i_a^2$.

² *Journal Soc. Telegr. Eng. and Electr.*, XII. n° 49, 1883.

³ La valeur ici donnée repose sur l'hypothèse que, pendant la mise en court-circuit, le courant dans la section considérée cesse simplement; mais s'il y a réellement arrêt et renversement par l'introduction d'une force contre-électromotrice, ce qui doit être, cette valeur sera moindre.

profit du champ magnétique qui se trouve relativement augmenté. L'existence d'une résistance apparente variant avec la vitesse a été signalée pour la première fois par Cabanellas ¹.

Courants parasites. — Deux autres réactions inductrices sont encore à considérer dans l'induit. Si le bâti de la machine ou les supports métalliques sur lesquels repose l'armature constituent des circuits fermés susceptibles d'intercepter un flux de force, ils deviendront en pure perte le siège de courants parasites qui s'y développeront, en les échauffant et absorbant du travail. Dans le fer du noyau d'induit, s'il n'est pas convenablement divisé, il peut se développer des courants parasites intérieurs (dits « courants de Foucault »), absorbant de l'énergie et déterminant un échauffement nuisible. Des courants du même genre se produiront également à l'intérieur des conducteurs qui constituent l'enroulement de l'armature si ces conducteurs sont massifs comme dans les « induits à barres » employés pour les machines à grand débit. Frölich a, en 1880 ², signalé les effets de la présence de ces courants et leur a attribué, non seulement le déficit, autrement inexpliqué, dans la transmission électrique du travail d'un générateur à un moteur, mais aussi la diminution dans le magnétisme efficace (ci-dessus présentée comme le résultat d'une aimantation transversale et trouvée par Frölich égale à 25 p. 100 du magnétisme total) observée avec des courants intenses et de grandes vitesses ; il a également attribué à la même cause l'augmentation apparente du nombre de « tours morts ³ » à des vitesses élevées. Ces courants existent sans aucun doute et l'énergie qu'ils absorbent est sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse ⁴ ; mais on peut les diminuer indéfiniment par une division, un isolement et une disposition convenables des éléments de la carcasse de l'induit.

Division des masses métalliques. — Les règles à appliquer pour cette division dans la constitution de l'induit varient suivant les éléments considérés. Dans le noyau, en effet, on doit chercher à supprimer toute

¹ *Comptes rendus*, 9 janvier 1882 et 24 novembre 1884 ; voir aussi Picou, *Manuel d'Electrométrie*, p. 123 ; et Lodge, dans *Electrician*, 31 juillet 1885.

² Académie de Berlin, *Berichte*, 18 novembre 1880 ; et *Elektrotechnische Zeitschrift*, II. mai 1881, et IX. novembre et décembre 1888.

³ Il appelle ainsi le nombre de tours dont la vitesse réelle dépasse le nombre de tours qui serait nécessaire, en l'absence de toutes réactions, pour produire la force électromotrice.

⁴ Clausius a introduit dans ses équations (*Wied. Ann.*, XX. 354, 1883 ; et *Phil. Mag.*, série 5, XVII. 46 et 119, 1883) des termes comprenant les effets des courants parasites. Cette question a également été traitée théoriquement par H. Lorberg (*Wied. Ann.*, XX. 389, 1887).

circulation de courant qui pourrait être induit parallèlement aux conducteurs qui le recouvrent, et, dans ces conducteurs, l'objectif est de ne laisser passer aucun courant d'un côté ou d'un bord de conducteur à l'autre. Les plans de division doivent naturellement être disposés de manière à couper normalement la direction dans laquelle les courants parasites pourraient se développer sans cette précaution. Mais comme, ainsi qu'on l'a vu page 21, la direction de la force électromotrice induite, celle du mouvement et celle des lignes de force sont toutes trois à angles droits l'une par rapport à l'autre, il suffit dans chaque cas, pour déterminer le plan de division, de fixer celle de ces trois directions à laquelle il doit être normal. Ce plan contiendra alors les deux autres directions ou leur sera parallèle.

SENS	DIRECTION DES PLANS DE DIVISION		
	Noyaux d'induits	Conducteurs des induits	Masses polaires
du Mouvement	Parallèle.	Normale.	Parallèle.
des Lignes de force	Parallèle.	Parallèle.	Parallèle.
de la Force électromotrice induite	Normale.	Parallèle.	Normale.

On remarquera que la direction de la division des masses polaires est la même que celle des noyaux d'induits; de sorte que ces masses polaires peuvent être considérées, ainsi qu'il a déjà été dit page 44, comme étant virtuellement la continuation des disques constitutifs des induits.

On peut se rendre compte graphiquement de la nécessité de diviser en feuilles circulaires les noyaux des induits en tambour ou en anneau (long, mais non en forme de disque) : — En effet, dans tout conducteur s'élevant dans l'entrefer de gauche, il y aura développement d'une force électromotrice dirigée d'arrière en avant. Si donc le noyau était en fer massif, un courant s'écoulerait d'arrière en avant le long de la paroi gauche du noyau, et d'avant en arrière le long de la paroi de droite. La division du noyau en disques parallèles centrés sur l'arbre réduira naturellement ces courants au minimum. Elle ne les éliminera cependant pas complètement; car, ainsi qu'on le voit dans la coupe en travers des disques de noyau sur la figure 72, des courants parasites peuvent se déve-

lopper dans la substance même de ces disques. En fait on reconnaît que, si ces disques sont trop épais, ou s'ils ne sont pas convenablement isolés les uns des autres, ils s'échauffent, et cet échauffement se manifeste surtout à la surface extérieure où les courants parasites sont le plus intenses. Comme règle générale on peut dire que l'épaisseur des tôles de noyaux ne doit pas dépasser 2 millimètres. Cette épaisseur convient aussi pour

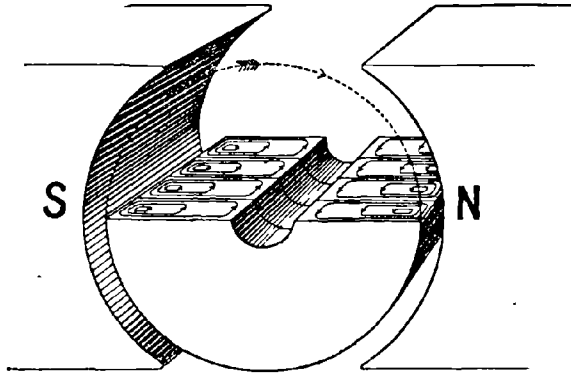


Fig. 72. — Courants parasites dans les disques de noyaux.

le feillard qui sert à faire le noyau des anneaux plats. On a reconnu que le nouvel induit feuilleté de la machine Brush pour lumière à arc (fig. 309), employé au lieu de l'ancienne armature massive (fig. 308), diminuait considérablement le nombre des « tours morts », indépendamment d'une grande économie réalisée dans l'énergie antérieurement consommée par échauffement.

Dans les machines à anneau où se trouve créé un champ intérieur (voir p. 73) il se développera, dans l'arbre d'entraînement et dans les bras métalliques qui supportent les disques de l'induit, des courants parasites analogues qui les échaufferont et détermineront une dépense inutile d'énergie.

Si les disques terminaux du noyau sont soumis à l'action d'un champ magnétique dérivé, allant des bords des masses polaires à leur surface, des courants parasites y prendront également naissance. On peut parer à cet inconvénient en donnant au noyau de l'induit une longueur axiale totale un peu supérieure à la profondeur des masses polaires mesurée parallèlement à l'axe.

Courants parasites dans les pièces polaires. — Si les masses de fer dans l'armature sont disposées de telle sorte que, pendant sa rotation, la distribution des lignes de force se modifie continuellement dans

l'étroit espace qui sépare l'induit des pièces polaires, il arrivera, malgré la constance du magnétisme total de l'inducteur, que des courants parasites se développeront dans les pièces polaires et les échaufferont. Ce fait est mis en évidence par les figures 73 à 78 qui représentent l'effet d'une dent en saillie, comme dans l'anneau de Pacinotti, et le changement qui en résulte dans la distribution du magnétisme dans la pièce polaire. Les

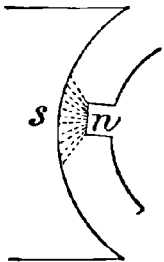


Fig. 73.

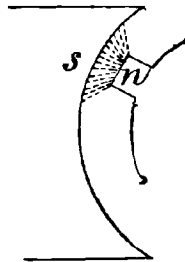


Fig. 74.

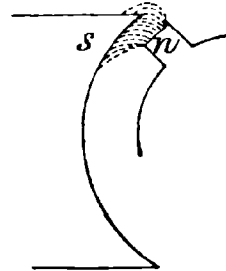


Fig. 75.

Modifications du champ magnétique dues au mouvement d'une masse de fer dans l'induit.

figures 76 et 77 (correspondant respectivement aux figures 73 et 74) montrent les courants parasites groupés par paires de tourbillons. Le

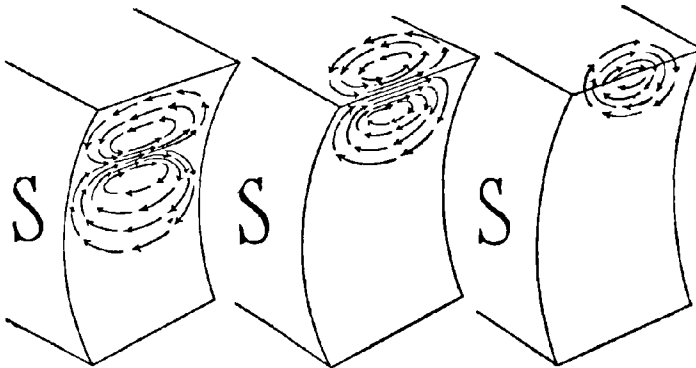


Fig. 76.

Fig. 77.

Fig. 78.

Courants parasites induits dans les pièces polaires par le mouvement d'une masse de fer.

courant le plus intense s'écoule entre les tourbillons et se trouve juste au-dessous de la dent en saillie, où le magnétisme est le plus intense; il suit la dent dans son mouvement. La figure 78 montre ce qui arrive au moment où la dent quitte finalement la pièce polaire. Ces courants para-

sites pénètrent à l'intérieur du fer, à une faible profondeur cependant¹. Il est évident que la plus grande quantité de ces courants parasites se développera à la partie des pièces polaires où les perturbations magnétiques sont le plus accentuées et le plus brusques. Un coup d'œil jeté sur les figures 66, 67, 77 et 78 suffit à faire voir que ce sera à l'« angle » ou « bec » de sortie de l'excavation polaire dans une machine génératrice. C'est en réalité ce qu'on constate quand une dynamo dont les pièces polaires se terminent par un bec ou angle vif (comme dans la machine Gramme), a fonctionné un certain temps comme génératrice. Les becs « de sortie » *a* et *c* de la figure 79 sont chauds, tandis que les

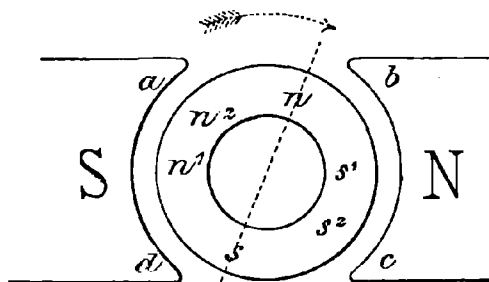


Fig. 79.

becs « d'entrée » *b* et *d* restent relativement froids. Quand la machine fonctionne comme moteur, c'est l'inverse qui a lieu : les becs « de sortie » *a* et *c* sont froids, alors que les becs « d'entrée » *b* et *d* sont chauds. On trouvera l'explication de ce dernier phénomène dans l'étude du champ magnétique d'un moteur au Chapitre XX.

Un autre effet, signalé pour la première fois à l'Auteur par Cabanellas, se relie étroitement au précédent. On constate qu'une machine Gramme à aimants permanents servant comme moteur perd de sa puissance ; l'intensité de son champ magnétique diminue. Si on la fait ensuite fonctionner comme génératrice, le champ magnétique reprend sa valeur. Ce phénomène s'explique² si l'on tient compte de l'action magnétisante des courants parasites.

¹ C'est pour obvier au développement de ces courants parasites que Rehniewski a constitué les *inducteurs*, comme l'induit, de sa machine de feuilles de tôle mince juxtaposées et isolées les unes des autres. [N. d. T.]

² L'Auteur en a donné l'explication suivante à la Conférence Internationale des Electriciens de Philadelphie, en 1884 (voir compte rendu dans l'*Electrical Review* du 13 décembre 1884). « Pour expliquer ces faits et leur corrélation, je dois men-

Effets d'induction mutuelle. — Certaines formes d'induits présentent ce défaut particulier que, leur mode de construction permettant une grande induction entre des sections ou parties de l'enroulement voisines l'une de l'autre, l'augmentation du courant dans une section exerce un effet d'induction inverse sur la section voisine, et, par suite, tout en n'entraînant pas nécessairement de perte d'énergie, conduit à ce résultat que la machine fonctionne comme si elle était de moindre puissance. L'armature Bürgin, dans laquelle figuraient six ou huit anneaux juxtaposés sur un même arbre, se ressentait de l'induction qui se produisait entre chaque section et celles appartenant aux anneaux voisins de droite et de gauche ; on ne pouvait arriver à atténuer ce défaut qu'en alternant

tionner une autre observation que j'ai faite et qui relie les deux phénomènes... Supposons qu'on prenne un aimant en fer à cheval avec son armature ordinaire en fer. Si l'on achète un aimant de ce genre chez un opticien quelconque, il recommandera probablement de ne jamais arracher brusquement l'armature pour ne pas nuire à l'aimantation. Il n'est pas possible de donner une plus fausse instruction. Prenons en effet un aimant de ce genre et voyons ce qui se passe réellement. Fixons-le sur une table avec des boulons de bronze, plaçons dans son voisinage un magnétomètre (une boussole ordinaire suffira) et observons la déviation que produit l'aimant sur son aiguille. Appliquons alors l'armature en la plaçant à la courbure de l'aimant ; amenons-la ensuite lentement à sa position habituelle, et arrachons-la brusquement. On trouvera qu'à la suite de cet arrachement l'aimant est devenu plus puissant. Re commençons ainsi une vingtaine de fois et nous le rendrons beaucoup plus fort. J'ai augmenté ainsi de 1,2 p. 100 la puissance d'un aimant en y appliquant doucement l'armature et l'arrachant ensuite brusquement. En faisant l'opération inverse, c'est-à-dire en laissant l'armature frapper vivement contre les pôles et la détachant ensuite doucement, on voit l'aimantation diminuer. J'ai fait perdre de la sorte 1,3 à 2,1 p. 100 d'aimantation à des aimants. — Quelle en est la cause ? Comment expliquer ces deux phénomènes ? — Si l'on arrache brusquement un morceau de fer d'un aimant, on effectue un certain travail pour vaincre l'attraction magnétique, et les courants ainsi induits dans le fer ou l'acier de l'aimant sont toujours (comme l'enseigne la loi de Lenz) de sens tel qu'ils s'opposent au mouvement, c'est-à-dire de sens tel qu'ils donneront à l'aimant une puissance d'attraction plus grande que précédemment. En détachant brusquement l'armature, on augmente le magnétisme de l'aimant, en raison des courants qui se trouvent ainsi développés dans sa propre masse et dans celle de l'armature. Dans l'action inverse, lorsqu'on laisse l'armature frapper l'aimant qui l'attire, il y a développement de courants induits dans un sens qui tend à s'opposer à l'attraction de l'aimant ; d'où, par conséquent, diminution de son aimantation. — Appliquons les mêmes principes au cas d'une dynamo et d'un moteur. On produit une aimantation plus intense en arrachant l'induit. C'est précisément ce qui se passe dans le champ quand la machine fonctionne comme génératrice. On soustrait rapidement l'induit à l'action du bec actif *a* de la pièce polaire, ce qui a pour effet d'engendrer en ce point des courants induits. Il s'y développe en conséquence de la chaleur. Il en est exactement de même pour l'autre bec de sortie *c* et pour la même raison. Dans le cas d'un moteur, ce sont les becs *b* et *d* qui sont actifs ; l'induit est constamment entraîné vers eux, puis arraché, et ils s'échauffent sous l'action de courants induits internes. C'est pour ce motif que, dans mes conférences, j'ai toujours recommandé la division des pièces polaires. La présence de ces courants induits explique l'échauffement, en même temps qu'elle montre comment, dans une machine magnéto employée comme moteur, les aimants s'affaiblissent, tandis qu'ils se renforcent quand la machine fonctionne comme génératrice ».

avec grand soin leurs positions respectives. Dans les armatures en disque de Niaudet et de Wallace-Farmer, chacune des bobines parallèles agissait par induction sur sa voisine. Sans aucun doute, le type d'armature pour lequel ce défaut existe le moins est l'induit en tambour. Clausius a montré ¹ que, lorsqu'une section vient d'être mise en court-circuit par son passage sous un balai, elle exerce une induction nuisible sur la bobine qui la précède dans le sens du mouvement et que cette action est proportionnelle au nombre de spires de la section. On peut en conséquence la diminuer en augmentant le nombre des sections, ce qui réduit le nombre des spires de fil dans chacune des sections de l'induit.

L'induction mutuelle entre parties adjacentes joue un rôle capital dans les machines à courants alternatifs et par le fait dans toutes les dynamos d'une manière générale.

Retard dû à la Self-induction. — L'inertie électrique du courant qui circule dans les bobines élémentaires affecte légèrement le décalage à donner aux balais et réagit également sur les bobines voisines. Si une bobine est mise trop tôt en court-circuit avant d'atteindre le point neutre, l'irruption soudaine de son propre courant en elle-même tend, par induction mutuelle, à arrêter le courant dans la bobine qui la suit, et à accélérer le courant inverse dans celle qui précède. On réduit ces actions en augmentant le nombre des sections et diminuant ainsi les sections individuelles. La self-induction s'étend même au fer des noyaux. Dans chaque molécule du fer, au moment où elle arrive à la position pour laquelle son magnétisme doit s'inverser, il se développe un courant interne qui retarde ce renversement de magnétisme et donne lieu à un retard *apparent* dans son aimantation ; en même temps, elle s'échauffe. Cet effet peut également être atténué par une division convenable du noyau et par une disposition telle que son aimantation se renverse graduellement et non pas tout d'un coup.

Moyen de remédier aux Troubles par induction. — Le moyen si capital de diminuer ces réactions nuisibles est heureusement très simple. Il est évident que l'action démagnétisante est due au décalage des balais, nécessité lui-même par l'aimantation transversale. C'est en conséquence cette dernière qu'il faut compenser ou réduire à un minimum par un procédé quelconque. On a vu que la force électromotrice d'une dynamo

¹ *Annales de Wiedmann*, novembre et décembre 1883 ; et *Phil. Mag.*, janvier et février 1884.

est proportionnelle à trois facteurs, le nombre $\frac{n}{t}$ de tours par seconde, le flux de force total Φ à travers l'induit ou le champ efficace, et le nombre N de conducteurs autour de l'induit. Or, pour un induit de dimensions données, les réactions inductrices sont proportionnelles à N . Si l'on peut diminuer ce facteur en augmentant en même temps l'un des autres, on arrivera ainsi à réduire les réactions nuisibles sans modifier la force électromotrice. Mais il n'est pas pratique d'augmenter la vitesse, et d'ailleurs quelques-unes des réactions nuisibles, mécaniques (comme les frottements) aussi bien qu'électriques, augmentent en même temps que cette vitesse. Le seul remède est donc d'augmenter le flux de force Φ ou le champ magnétique efficace. On réalisera cette amélioration au moyen d'inducteurs extrêmement puissants qui maîtriseront complètement l'induit. Si les électro-aimants sont volumineux et garnis de noyaux en fer forgé, si, d'autre part, il y a abondance de fer dans l'induit, alors on pourra, sans augmentation de vitesse, obtenir la même force électromotrice, tout en mettant moins de spires sur l'induit. La machine idéale de l'avenir pour fonctionnement sous potentiel constant n'aura qu'un seul tour de fil par section. Elle ne comportera ni déplacement des balais, ni étincelles, et sa résistance intérieure sera pratiquement *nulle*.

Il est également important de faire remarquer que la torsion du champ magnétique et quelques-unes des perturbations qui en résultent peuvent être partiellement évitées par une conformation des surfaces polaires telle qu'elles se rapprochent de l'armature dans la région normale au diamètre de commutation. Les bords extérieurs des pièces polaires peuvent, à cet effet, être adoucis de manière à laisser un peu plus d'entrefer en ces points. Une conformation convenable des pièces polaires permet, naturellement, de concentrer un flux de force plus considérable dans une région déterminée du champ magnétique. Ryan¹ a étudié d'une manière spéciale la relation entre la forme des pièces polaires, la largeur de l'entrefer et la courbe résultante de force électromotrice induite.

¹ *Amer. Inst. Electrical Engineers*, 22 septembre 1891.

CHAPITRE V

ACTIONS ET RÉACTIONS MÉCANIQUES DANS L'INDUIT

Toutes les fois qu'un conducteur parcouru par un courant électrique est situé dans un champ magnétique transversalement aux lignes de ce champ, il subit l'action d'une force mécanique. Cette force tend toujours à entraîner le conducteur latéralement en dehors du champ magnétique et agit dans une direction normale aux lignes de force et au conducteur lui-même. Divers auteurs ont donné des règles pour fixer dans la mémoire la relation entre le sens des lignes de force, celui du courant et celui de la force résultante. La plus pratique est celle de Fleming dans laquelle ces trois directions sont respectivement représentées par l'index, le médium et le pouce de la main *gauche*¹. Dans un moteur c'est cet effort sur les conducteurs qui entraîne mécaniquement l'induit. Dans une dynamo l'effort agit en sens contraire de la puissance de la machine qui sollicite l'armature et il s'oppose à la rotation. Quand un ingénieur-mécanicien se trouve pour la première fois en présence d'une dynamo, il se rend difficilement compte tout d'abord de la puissance d'entraînement qui lui est nécessaire. Il voit l'armature tourner avec un jeu très large entre les faces polaires des inducteurs. Les frottements sur les coussinets n'absorbent qu'une minime fraction de la puissance fournie par le moteur mécanique. Il voit les balais presser sur le collecteur en

¹ Il existe ici un contraste avec ce qui est dit page 21, où, pour le courant engendré par une *dynamo*, on se sert de la main *droite*. Il ne faut pas oublier en effet que, dans une dynamo, le sens du courant concorde avec celui de la force électromotrice induite, tandis que, dans un moteur, le courant s'écoule en sens contraire de la force électromotrice induite. En outre, dans une dynamo, l'effort mécanique agit à contresens du mouvement, tandis que, dans un moteur, l'effort produit le mouvement dans le sens où il agit lui-même. De là l'emploi de la main *droite* dans le cas d'une dynamo, et l'emploi de la main *gauche* dans celui d'un moteur, pour donner la relation entre les sens respectifs du magnétisme, du courant et du mouvement.

cuivre, mais il sait que leur frottement est, lui aussi, une quantité négligeable ; on lui apprend d'ailleurs bientôt que le frottement n'intervient en rien dans le fonctionnement de la machine. — Où passe donc la puissance absorbée ? Qu'y a-t-il qui exige l'application continue d'une telle puissance pour entretenir le mouvement ? — La réponse est simple : les lignes de force invisibles exercent un effort continu sur les conducteurs qui livrent passage au courant, et le courant prend précisément naissance sous l'action de cet effort exercé par le champ magnétique sur les conducteurs. Quelle que soit la forme d'un appareil engendrant des courants par induction magnétique, les courants produits déterminent une réaction mécanique qui tend à arrêter le mouvement même qui les développe.

L'effort exercé par un champ magnétique sur un conducteur portant un courant peut être considéré au point de vue magnétique. Comme on l'a vu précédemment (p. 25), un conducteur dans ces conditions est enveloppé par un tourbillon de lignes de force. Autour d'un long conducteur droit, non situé dans un champ magnétique, ces lignes de force forment dans chaque plan normal au fil un système de cercles concentriques (voir fig. 13, p. 26) très rapprochés dans le voisinage du fil, et

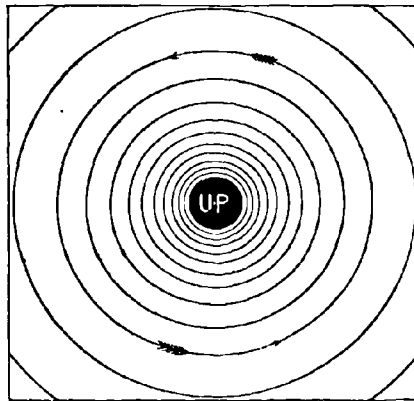


Fig. 80. — Champ magnétique d'un conducteur droit parcouru par un courant
UP = Vers le haut.

plus espacés à une certaine distance, analogues, comme disposition générale, à ce qu'indique la figure 80.

Si le courant se dirige vers l'observateur, ou *vers le haut*, dans la figure qui donne une section transversale du conducteur, le sens dit « positif » de la direction des lignes de force sera *sinistrorsum* ou en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre.

Mais si un conducteur de ce genre est placé dans un champ magnétique uniforme tel, par exemple, que celui créé par un fort pôle magnétique nord à droite et un pôle sud à gauche, il en résultera un champ composé dû à la combinaison des lignes de force du conducteur avec celles du champ. En considérant ce champ magnétique déformé il faut se rappeler que les actions mécaniques résultantes peuvent toujours être connues à l'aide de cette hypothèse que les lignes de force agissent comme des cordes élastiques tendant à se raccourcir. Il y a par le fait tension dans

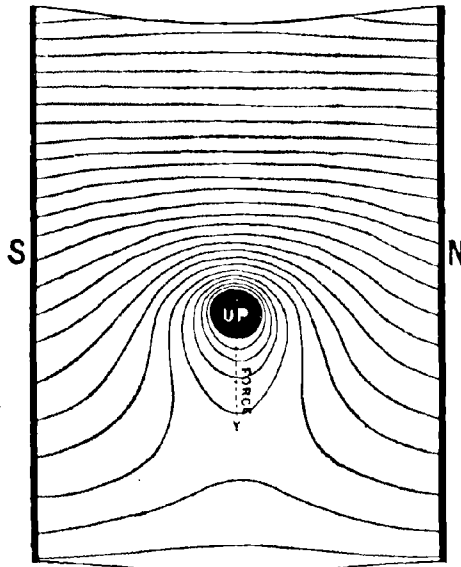


Fig. 81. — Lignes magnétiques dues à un conducteur parcouru par un courant et situé dans un champ magnétique.
UP == Vers le haut.

la direction des lignes de force et pression à angles droits avec elles, ces deux actions étant, en chaque point, proportionnelles au carré de leur densité. A la simple inspection des lignes de la figure 81, on verra que, dans ces conditions, il s'exercera sur le conducteur un effort résultant dans le sens indiqué par la flèche ponctuée.

La figure 82 montre le champ magnétique réellement produit autour d'un fil en charge, ou parcouru par un courant, dans un intervalle magnétique entre deux pôles, tel que le révèle la limaille de fer.

On peut considérer la figure 82 comme représentant approximativement ce qui se passe, pour une dynamo ou un moteur, dans chacun.

des entrefers formés par le noyau de l'induit et la face polaire opposée. Chacun des conducteurs recouvrant l'armature sera de même soumis

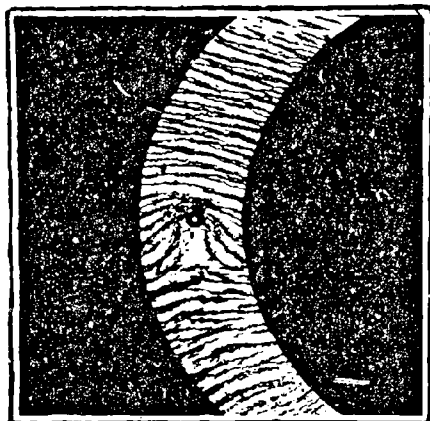


Fig. 82. — Champ magnétique réel autour d'un fil conducteur dans un espace magnétique (entrefers).

à un effort proportionnel à l'intensité du champ magnétique et à celle du courant.

Couple mécanique et Vitesse. — Les ingénieurs savent que la puissance, c'est-à-dire le taux de dépense d'énergie ou de production de travail, autrement dit le quotient du travail dépensé ou produit divisé par le temps correspondant, peut toujours s'exprimer par le produit de deux facteurs. Dans le cas d'un mouvement rectiligne, la puissance a pour expression le produit de la force par la vitesse. Si, par exemple, la force exercée sur une courroie dans le sens de sa longueur ¹ est égale au poids de 30 kilogrammes, et si la vitesse de cette courroie est de 600 m par minute, ou 10 m par seconde, la puissance qu'elle fournit est de 300 kgm par seconde, ou de 4 chevaux-vapeur.

Mais cette puissance peut aussi bien s'exprimer en fonction d'une force angulaire, couple mécanique (ou *torque*), et d'une vitesse angulaire; ces grandeurs s'appliquent même mieux au cas de la puissance transmise le long d'un axe de rotation.

L'expression très heureuse de *torque*, aujourd'hui acceptée d'une façon générale par les ingénieurs anglais, a été pour la première fois suggérée par

¹ Ou, plus exactement, la différence de tension entre le brin conducteur ou brin tendu et le brin conduit ou brin mou.

le professeur James Thomson, qui occupait alors la chaire de mécanique appliquée à l'Université de Glasgow. Elle a la même signification que les autres expressions anglaises « moment de rotation », « moment de couple », « couple axial », « force angulaire », « force axiale » ; que l'expression allemande « Zugkraft » ; et que les expressions françaises « effort statique » et « couple mécanique ». Le mot *torque* est, à bien des égards, préférable à l'un quelconque des autres termes. Exactement comme la définition Newtonienne de *force* est la cause qui produit ou tend à produire un mouvement (suivant une ligne), de même le *torque* peut être défini la cause qui produit ou tend à produire la *torsion* (autour d'un axe). Il vaut mieux employer une expression qui traite cette action comme une simple entité définie que des expressions telles que « couple » et « moment » qui impliquent des idées plus complexes. La simple notion d'une torsion appliquée à faire tourner un arbre est préférable à la notion plus compliquée de l'application d'une force linéaire (ou d'un système de deux forces) à l'extrémité d'un certain bras de levier.

[Malgré les excellentes raisons données par l'Auteur, nous ne chercherons pas à surcharger le langage scientifique d'un nouveau terme. Nous en laissons le soin, si le besoin s'en fait sentir, à d'autres innovateurs plus autorisés. Désirant avant tout être compris de tous et unifier les termes électriques français, nous conformerons nos expressions, notations et symboles à ceux de notre ami Hospitalier qui a si vaillamment combattu le bon combat en vue de la précision et de l'unification du langage scientifique en général et électrique en particulier.] (N. d. T.)

Pour le moment d'un couple (homogène à un travail), nous emploierons le même symbole W . — Si une force F agit avec un bras de levier (c'est-à-dire sur un rayon) r , son moment, homogène à un travail, est égal à $F \times r$, ou, plus généralement, à $F \times L$, L désignant une longueur, et le moment d'une force par rapport à un axe étant exactement défini comme le produit de la projection de cette force sur un plan perpendiculaire à l'axe par la distance de l'axe à cette projection. — Si la force est exprimée en kilogrammes et la longueur en mètres, son moment sera exprimé en kilogrammètres : c'est-à-dire en fonction du nombre de kilogrammes qui, agissant sur un bras de levier d'un mètre, donnerait à l'axe la même tendance à la rotation. Si la force est donnée en dynes et la distance en centimètres, son moment sera exprimé en dynes-centimètres ou unités C. G. S. (Voir l'Appendice A sur les Unités).

Comme table de réduction, on se rappellera que :

1 gramme-centimètre = 1 centimètre-dyne \times 981, ou 981 ergs ;
 1 grammètre = 1 centimètre-dyne \times 98 100, ou 98 100 ergs ;
 1 kilogrammètre = 1 centimètre-dyne \times 981 \times 10⁵, ou 98,1 még-ergs.

La vitesse angulaire est ordinairement exprimée par les ingénieurs

en nombre de tours par minute, ou quelquefois en nombre de tours par seconde. L'habitude scientifique est de l'exprimer en *radians par seconde*. (Le radian est l'arc de longueur égale au rayon ; de sorte que 2π radians sont égaux à un tour ou à 360° , et le radian = $360 : 2\pi = 57^\circ 17' 44''$.) Le symbole de la vitesse angulaire est ω , de sorte que, si n représente le nombre de tours en t secondes, $\omega = 2\pi \frac{n}{t}$ radians par seconde.

Comme table de réduction,

- 1 tour par seconde = 60 tours par minute ;
- 1 radian par seconde = 0,159 tour par seconde ;
- 1 tour par minute = 0,10472 radian par seconde ;
- 1 tour par seconde = 6,28 radians par seconde ;
- 1 radian par seconde = 9,55 tours par minute.

On a par conséquent les relations suivantes entre une force F , la vitesse linéaire v , le couple mécanique W , la vitesse angulaire ω , la distance L , le nombre de tours par seconde $\frac{n}{t}$ et la puissance P :

$$P = vF = \frac{v}{L} FL = \omega W = 2\pi \frac{n}{t} W.$$

La puissance P sera exprimée en *ergs par seconde* si v est donné en centimètres par seconde et F en dynes, ou si W est donné en centimètres-dynes.

Comme table de réduction,

- 1 watt = 10^7 ergs par seconde ;
- 1 kgm par seconde = $9,81 \times 10^7$ ergs par seconde = 9,81 watts ;
- 1 cheval-vapeur = 736 watts ;
- 1 poncelet = 981 watts ;
- 1 kilowatt = 1000 watts.

Puissance des dynamos et des moteurs. — Une bonne dynamo doit transformer en puissance électrique plus de 90 p. 100 de la puissance mécanique qui lui est appliquée. De même un bon moteur électrique donnera en puissance mécanique plus de 90 p. 100 de la puissance électrique qui lui sera fournie. Ces deux puissances, mécanique et électrique, peuvent être exprimées en fonction des mêmes unités, c'est-à-dire en *chevaux-vapeur*, en *poncelets*, en *watts* ou en *kilowatts*.

Il est facile de calculer approximativement le nombre de chevaux nécessaire à actionner une dynamo devant fournir une puissance déter-

minée. En multipliant le nombre d'ampères i que doit donner la machine par le nombre de volts e sous lequel le courant doit être fourni, on obtiendra sa puissance en *watts*. En divisant ce nombre par 736, on aura le nombre de chevaux électriques correspondant qui sera égal à environ 90 p. 100 du nombre de chevaux mécaniques à fournir à l'arbre de la machine.

Exemple. — Une dynamo doit fournir 300 ampères (pour alimenter 600 lampes à incandescence) sous une tension de 105 volts. Sa puissance devra être de $300 \times 105 = 31500$ watts = 42,8 chevaux (électriques). Il faudra en conséquence lui fournir 47,6, soit 50 chevaux (mécaniques) environ.

Inversement on peut calculer la puissance électrique à fournir à un moteur.

Exemple. — On demande à un moteur une puissance mécanique effective de 5 chevaux. En multipliant 5 par 736, on trouve qu'il doit développer 3 680 watts de puissance mécanique représentant environ 90 p. 100 de la puissance électrique à lui fournir. Celle-ci sera en conséquence de 4 090 watts. Si l'alimentation se fait sous une différence de potentiel de 200 volts entre les conducteurs principaux, le courant nécessaire sera, par suite, d'un peu plus de 20 ampères.

Relation entre le Couple mécanique et le Courant. — Puisque la puissance électrique (en watts) fournie par l'induit d'une dynamo est le produit de deux facteurs, — le nombre de volts par le nombre d'ampères —, et que la puissance mécanique qui lui est transmise par la rotation de son arbre est également le produit de deux facteurs, — la vitesse par le couple mécanique —, il devient intéressant de voir s'il existe une relation directe quelconque entre ces facteurs eux-mêmes. Soient E le nombre des volts développés dans l'induit, et i_a le nombre des ampères qu'il débite. On peut égaler les deux expressions du nombre de watts que reçoit et que rend cet induit, ce qui donnera la relation

$$\text{watts} = E i_a = 2\pi \frac{n}{t} W \times 9,81,$$

dans laquelle W est exprimé en kilogrammètres, $\frac{n}{t}$ représentant le nombre de tours par seconde, E le nombre total des volts engendrés par l'induit, et i_a le nombre total des ampères qui circulent dans ses fils. Mais E est proportionel à la vitesse si le magnétisme est constant, et son expression fondamentale en volts est (voir p. 44 et 205), pour une machine bipolaire ordinaire :

$$E \text{ (volts)} = \frac{n}{t} N \Phi \cdot 10^{-8},$$

N étant le nombre de conducteurs autour de l'armature, et Φ le flux magnétique à travers son noyau. En transportant cette valeur de E dans l'expression précédente et faisant disparaître $\frac{n}{t}$ des deux membres, on trouve :

$$N\Phi i_a \cdot 10^{-9} = 2\pi W \times 9,81 = 61,6 W;$$

d'où

$$W \text{ (en kilogrammètres)} = \frac{N\Phi i_a}{61,6 \times 10^9}.$$

Il résulte de cette expression que, si dans une machine donnée le magnétisme est constant, le couple mécanique est absolument indépendant de la vitesse, et qu'il est uniquement fonction du courant qui circule dans l'induit, ainsi que du magnétisme.

Ces expressions s'appliquent aussi bien aux moteurs qu'aux dynamos. Elles montrent que, si l'on veut construire des machines à faible vitesse, il faut prévoir un flux magnétique très considérable. C'est en effet seulement pour une haute valeur de Φ que la dynamo peut, à faible vitesse, fournir les volts nécessaires, ou que le moteur est capable d'exercer le couple mécanique voulu.

Effort sur les conducteurs de l'induit. — On est maintenant à même de comprendre que l'effort s'exerce réellement sur les conducteurs de l'induit. Dans la dynamo ce sont eux qu'il faut entraîner ; dans le moteur, ce sont eux qui doivent entraîner l'induit. On peut immédiatement calculer la valeur de cet effort. Trois procédés permettent de l'obtenir : deux méthodes électriques, et la troisième purement mécanique.

Première Méthode. — La dernière formule ci-dessus donne le couple mécanique ; on peut en déduire l'effort exercé sur la périphérie totale en divisant cette valeur par le rayon connu de l'induit. Pour passer de là à l'effort supporté par chaque conducteur, il suffira de diviser le nombre précédent par le nombre de conducteurs actifs.

Exemple. — Dans la dynamo Edison-Hopkinson prise comme type au cours de cet ouvrage, $i_a = 326$, $N = 80$; $\Phi = 10\ 826\ 000$; le rayon extérieur de l'induit = 13,4 cm ; d'où $W = 45,8$ kgm, et la force périphérique totale = 341,79 kg. Ce chiffre donnerait comme force moyenne environ 4,3 kg par conducteur, si ceux-ci étaient tous actifs ; mais il ne s'en trouve guère que 58 simultanément dans le champ magnétique, d'où il résulte que la force moyenne exercée sur chaque conducteur est à peu près de 5,891 kg. Si le champ magnétique n'est pas uniforme dans les entrefers, les conducteurs correspondant aux points

où les lignes de force sont plus nombreuses [ou le flux plus intense] supportent un effort plus considérable.

Deuxième Méthode. — L'effort exercé sur un conducteur de longueur l , dans un champ magnétique d'intensité \mathcal{H} , portant un courant de i ampères, est

$$f \text{ (dynes)} = \frac{il \mathcal{H}}{10}$$

ou

$$f \text{ (kilogrammes)} = \frac{il \mathcal{H}}{9,81 \cdot 10^6}$$

Cette formule n'est applicable que si la densité \mathcal{H} du champ dans l'entrefer est connue.

Exemple. — Sur les mêmes données que ci-dessus, le courant dans un conducteur quelconque sera $\frac{1}{2} i_a = 163$ ampères, la longueur l du fil = 53,1 cm, et $\mathcal{H} =$ environ 6750 unités C. G. S., la surface de l'entrefer étant d'environ 1600 centimètres carrés. — D'où l'effort sur chaque conducteur = 5,9 kg.

Troisième Méthode. — On relève la puissance réelle en chevaux-vapeur développée sur l'induit ; on la multiplie par 4 500 pour la réduire en kilogrammètres par minute et on divise par la vitesse périphérique (en mètres par minute). [La puissance mécanique en chevaux peut être déduite de la puissance électrique, comme il est dit p. 105.] Enfin on divise par le nombre de conducteurs actifs.

On a ainsi

$$f \text{ (effort moyen par conducteur, en kg)} = \frac{\text{Chx} \times 4500}{\text{m par minute} \times N}$$

Exemple. — Sur les mêmes données que précédemment, du moment que $i_a = 326$ et $E = 108,5$ volts, $\text{chx} = 326 \times 108,5 : 736 = 48$. De même, la périphérie = $2 \pi \times$ le rayon = 0,84 mètre, ce qui, à raison de 750 tours par minute, donne 630 mètres par minute comme vitesse périphérique. En supposant qu'il y ait, comme précédemment, 58 conducteurs actifs, on a :

$$\text{effort moyen exercé sur chaque conducteur} = \frac{48 \times 4500}{630 \times 58} = 5,9 \text{ kg.}$$

On peut donner comme approximation suffisante la règle suivante : — Si l'on admet, comme moyenne grossière du champ dans l'entrefer d'une dynamo ou d'un moteur, la valeur de 6 200 unités C. G. S.,

l'effort sera, par centimètre de conducteur, de 0,000 631 kilogramme pour chaque ampère de courant qui y circule. — Dans les machines à courants alternatifs, l'intensité du champ magnétique est rarement supérieure à la moitié du chiffre admis d'autre part.

Tel est l'effort exercé par les inducteurs sur les conducteurs de l'induit; et encore ne faut-il pas oublier que cet effort de traction n'est pas absolument fixe. Quand un conducteur émerge de l'entrefer, la traction magnétique cesse, bien que ce conducteur soit encore le siège d'un courant. En conséquence, deux fois par tour cette traction cesse subitement pour revenir brusquement s'exercer, ce qui augmente les actions supportées par le fil. Dans le cas des machines à courants alternatifs, où la relation de phase entre les courants et les actions des champs complique le phénomène, l'effort ne cesse pas simplement pour reprendre ensuite deux fois par période complète; il se renverse réellement; les conducteurs de l'armature, entraînés malgré une traction qui s'exerce sur eux en sens inverse, ont donc à supporter un effort de traction dans le sens de la marche et tendent à entraîner l'induit; ils sont ensuite tirés encore une fois, et tendent de nouveau à tirer eux-mêmes quand le courant se renverse. Dans les machines à courants alternatifs fonctionnant comme génératrices, les tractions intermédiaires en avant sont faibles et de courte durée; quand les machines fonctionnent comme moteurs, ce sont les tractions en arrière qui durent peu.

Il ne faut pas en outre perdre de vue qu'en marche les conducteurs de l'armature sont également soumis à l'action de la force centrifuge, et qu'il est nécessaire de les maintenir solidement à l'aide de frettes extérieures pour les empêcher de se déplacer.

Nécessité d'Entraînement mécanique de l'induit. — On conçoit aisément que, dans les conditions mécaniques ci-dessus indiquées, il soit nécessaire de réaliser un mode d'entraînement aussi sûr que possible pour transmettre, de l'arbre aux conducteurs qui recouvrent l'induit, la puissance voulue. Dans une dynamo, ce sont ces fils, et non pas les disques du noyau, qui doivent être entraînés. Dans un moteur, ce sont eux qui entraînent l'arbre. Ce point est de la plus haute importance dans l'étude et la construction des machines. La question de construction se complique en outre de cette considération que, si les conducteurs doivent être rendus mécaniquement solidaires de l'arbre de la façon la plus sûre, ils ne peuvent pas lui être reliés métalliquement, mais doivent, au contraire, en être isolés. Ce desideratum est réalisé de différentes manières par les divers constructeurs. Les uns clavettent sur

l'arbre un robuste moyeu garni de rais qui dépassent la surface du noyau et qui, protégés par une isolation convenable, entraînent ainsi les conducteurs de cuivre. D'autres fixent mécaniquement sur l'arbre les disques du noyau et placent à la périphérie, de distance en distance, des coins de bois ou de fibre dure entre les projections radiales desquels le fil est logé et entraîné par eux. Quand l'induit est denté, on n'a besoin de recourir à aucun artifice de ce genre ; les conducteurs de cuivre sont bobinés entre les dents elles-mêmes. — Ceux qu'intéressent ces détails de construction devront étudier avec soin les modes pratiques de liaison employés par les constructeurs modernes et décrits au Chapitre XIII.

Courbes du Couple mécanique. — On a vu précédemment que, si le flux magnétique est constant, W était proportionnel à i . Mais, dans tous les cas, le courant même de l'armature tord le champ magnétique et,

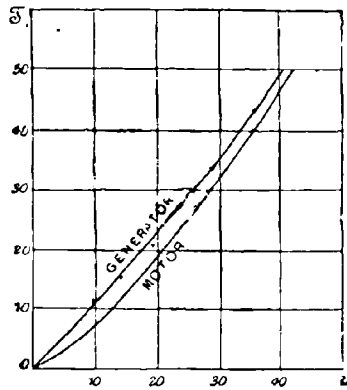


Fig. 83. — Courbes de couple mécanique.
Generator = Génératrice.
Motor = Moteur ou Réceptrice.

quand les balais sont calés en un point où il n'y a pas d'étincelles, il exerce une action démagnétisante. En fait, le magnétisme de la machine dépend de la manière dont elle est montée, à excitation indépendante, en série ou en dérivation. Ces éléments compliquent les relations entre W et i , et pour les suivre il devient nécessaire de recourir à l'emploi de courbes.

Le docteur Frölich a donné¹ des courbes représentant ces relations ;

Elektrotechnische Zeitschrift, IV. 61, février 1883.

il a également conclu de la loi de saturation magnétique que ces lignes devaient, pour de petites vitesses, être légèrement courbes et devenir sensiblement droites pour de grandes vitesses. Il a montré en outre que, pour une réceptrice, le couple mécanique est moins approximativement proportionnel au courant que pour une génératrice. Les deux tableaux suivants résument les résultats de ses expériences sur une machine Siemens montée en série et employée dans les deux conditions : —

Condition de génératrice :

Courant	2,83	9,56	14,3	19,8	24,3	36,6	ampères;
Couple mécanique.	5,1	10,61	14,8	21,3	29,6	44,0	kg à la circonférence.

Condition de réceptrice :

Courant.	13,3	21,0	28,1	36,8	ampères;
Couple mécanique	10	20	30	40	kg à la circonférence.

Ces résultats sont groupés pour les deux cas dans la figure 83.

Des courbes analogues ont été données par M. Deprez¹ pour une machine Gramme, et par Ayrton et Perry² pour une réceptrice de Méritens. On peut démontrer que le couple mécanique est proportionnel à la racine carrée de la chaleur perdue dans la génératrice ou la réceptrice. Comme d'ailleurs le courant ne peut être maintenu dans un moteur sans une dépense continue de puissance égale à $i^2 r$ watts, il en résulte que le maintien du couple mécanique dans une réceptrice coûte une certaine dépense, qui non seulement varie avec la charge réelle de la réceptrice, mais encore est différente suivant les types de machines. Dans un moteur mal conçu, à faible champ magnétique, un courant intense parcourant une résistance intérieure considérable (et par suite donnant lieu à une grande dépense d'énergie sous forme de chaleur) ne produira qu'un faible couple mécanique. Au point de vue économique, il est en conséquence important de savoir au prix de quelle dépense en chaleur W' le couple mécanique W est obtenu. Cette relation peut s'exprimer algébriquement de la manière suivante :

$$\frac{W \text{ (couple mécanique)}}{W' \text{ (chaleur développée)}} = \frac{Eit}{2\pi n i^2 r t} = \frac{E}{2\pi n i r},$$

¹ *La Lumière électrique*, XI. 42, 5 janvier 1884.

² *Journ. Soc. Teleg. Eng. and Electricians*, XII. n° 49, mai 1883. — Voir aussi Hummel, *Elektrotechnische Zeitschrift*, VIII. 427, 1887.

r étant la résistance intérieure, E la force électromotrice totale de la dynamo, et $\frac{n}{t}$ le nombre de révolutions par seconde. Il est toutefois préférable de mesurer W par un procédé dynamométrique direct. M. Marcel Deprez, qui a donné à cette importante relation le nom assez singulier (awkward) de « prix de l'effort statique », a également représenté par des courbes les variations de ce rapport avec l'allure de la machine. Les professeurs Ayrton et Perry ont démontré, dans leur *Mémoire sur les Moteurs électriques*, que toute augmentation de vitesse nécessite dans le moteur un courant de plus en plus intense pour la production d'un couple mécanique donné, probablement en raison de l'action démagnétisante des courants parasites.

On trouvera au Chapitre XX sur les moteurs un certain nombre de *caractéristiques mécaniques* donnant les relations entre la vitesse et le couple mécanique dans quelques cas différents.

Puissance dissipée. — Dans tout ce qui précède, on a supposé que la puissance mécanique transmise à l'arbre pour l'entraînement de l'induit correspondait intégralement à la puissance électrique effectivement développée dans cet induit. La puissance appliquée à la poulie est cependant toujours supérieure à la puissance électrique réellement fournie ; en effet, une fraction de cette puissance est tout d'abord perdue en frottements sur les coussinets, etc., et n'arrive jamais jusqu'à l'armature. Mais ce qui lui parvient réellement n'est même pas effectivement converti en puissance électrique. Outre les frottements dans les coussinets et aux balais, il existe trois sources de pertes, savoir : — 1° les frottements de l'air ; 2° l'hystérésis ; 3° les courants parasites. La première de ces causes est insignifiante, sauf dans les cas où l'on a recours à des rais en ailettes dans le but de faire agir l'armature comme ventilateur, et encore cette réaction est-elle peu importante. La seconde est loin d'être négligeable, mais elle absorbe rarement plus de 1 ou 2 p. 100 de la puissance d'entraînement. La troisième est de beaucoup la plus considérable, surtout dans les grandes machines. Dans toutes les masses métalliques en mouvement, à moins qu'elles ne soient divisées en lames minces, il se développe des courants parasites si ces pièces coupent les lignes de force. Dans le métal même de l'arbre, il peut y avoir, de ce fait, perte de puissance si des lignes de force s'égarer dans sa masse. Le mode de recherche de chacune de ces pertes est décrit au Chapitre XXVIII relatif aux épreuves des dynamos et moteurs. Quelles que soient ces pertes, il est évident qu'elles se répercutent toujours sur

la puissance initiale à fournir, car cette puissance d'alimentation est nécessairement égale à la somme de la puissance réellement convertie dans l'induit en puissance électrique et de celle dissipée par suite des trois causes énumérées ci-dessus. — De là la considération du rendement.

Rendement des dynamos et des moteurs. — Le mot « rendement » s'emploie dans plusieurs sens qu'il est utile de bien distinguer :

1° Le *Rendement de transformation* ou *Rendement brut* est le rapport de la puissance électrique brute développée dans l'induit à la puissance mécanique brute fournie par la courroie ou par le manchon d'accouplement avec l'arbre moteur. Si, par exemple, 12 p. 100 de la puissance mécanique brute sont perdus en frottements dans les coussinets, frottements aux balais, friction de l'air, hystérésis et courants parasites, alors que le reste, ou 88 p. 100, est réellement transformé dans l'armature, on pourra dire que le coefficient de transformation est de 88 p. 100.

2° Le *Rendement électrique* ou *Coefficient économique* est le rapport de la puissance électrique nette de la dynamo à sa puissance électrique brute ou à la puissance réellement transformée dans l'armature. Ainsi, dans une dynamo en dérivation, si 3 p. 100 de la puissance électrique brute sont consommés en échauffement des fils de l'induit, et 3 autres p. 100 dépensés pour maintenir le courant d'aimantation dans les bobines en dérivation, sa puissance électrique nette sera seulement de 94 p. 100 de sa puissance électrique brute; autrement dit, son rendement électrique sera de 94 p. 100. Ce rapport dépend uniquement, comme on le voit, des résistances de la machine. Dans les types récents, il peut atteindre jusqu'à 97 p. 100.

3° Le *Rendement commercial* ou *Rendement net* est le rapport de la puissance électrique nette à la puissance mécanique brute transmise par la courroie ou le manchon d'accouplement. Il est en conséquence égal au produit du coefficient de transformation par le rendement électrique, soit, dans l'exemple choisi, 94 p. 100 de 88 p. 100, ou 82,72 p. 100.

Relation entre les Dimensions d'une machine, sa Puissance et son Rendement. — Depuis de longues années l'Auteur plaide la cause des dynamos de grandes dimensions. Ce n'est pas qu'il ait la moindre admiration pour les grosses machines en elles-mêmes; mais il en est des dynamos comme des machines à vapeur : les fortes machines sont susceptibles d'un meilleur rendement que les petites, relativement à leur prix de revient. Il s'est élevé de nombreuses controverses en ce qui

concerne le rapport existant entre les dimensions linéaires de machines semblables et la puissance aussi bien que le rendement qu'on en peut obtenir. La divergence des vues sur ce point a surtout pour cause une différence d'opinion sur les hypothèses les plus convenables à admettre comme point de départ. Dans la première édition de cet ouvrage, l'Auteur a émis cette proposition que, si la vitesse de rotation reste la même et que l'intensité du champ magnétique (par centimètre carré) demeure également constante, la puissance d'une machine de dimensions linéaires n fois égales à celles d'une autre machine donnée augmentera dans la proportion de n^4 , et que le coefficient de perte sera dans la proportion de n^{-3} . Mais, s'il en est bien réellement ainsi *a priori* au point de vue purement abstrait, les hypothèses faites pour la simplification de la démonstration sont en opposition avec les conditions réelles de fonctionnement. Il n'est pas pratique en effet de donner à de grandes machines la même vitesse qu'à des petites, et la production d'une même aimantation, avec de grands électro-aimants, exige proportionnellement une dépense d'énergie plus considérable, en raison de la difficulté relativement plus grande de réagir contre la dissipation en chaleur dans les spires magnétisantes. L'énergie consommée pour l'aimantation est, en effet, sensiblement proportionnelle au volume du fer à aimanter, tandis que le pouvoir de dispersion de la chaleur n'est proportionnel qu'à la surface de ce fer.

Parmi les savants qui ont traité la solution de ce problème, nous citerons Hopkinson, Frölich, Ayrton, Mascart et Joubert, Kapp, Storch, Rechniewski, et Pescetto. — D'après Hopkinson¹, la capacité de machines semblables est en raison du *cube* de leurs dimensions linéaires ; le travail dépensé pour l'aimantation des inducteurs, proportionnel à ces dimensions linéaires ; et la chaleur dépensée en échauffement des conducteurs de l'induit, proportionnelle au carré de ces mêmes dimensions linéaires. — Mascart et Joubert² abaissent la capacité jusqu'au *carré* des dimensions linéaires et en tirent cette conclusion que les petites machines sont préférables aux grandes. — Pescetto³ arrive à des conclusions analogues. — Rechniewski⁴ suit Hopkinson en fixant le rapport à n^3 . — Frölich⁵ lui assigne la valeur n^4 et critique la règle de la cinquième puissance donnée par l'Auteur de cet ouvrage et par Deprez, comme

¹ *Proc. Inst. Civil Engineers*, avril 1883.

² *Leçons sur l'Electricité* (1886), II. 815.

³ *L'Electricien*, XI. 357, 1887.

⁴ *La Lumière électrique*, XXII. 311.

⁵ *Die dynamo-elektrische Maschine* (1886), p. 168 ; traduction française, p. 186.

comportant une augmentation de n^3 pour le courant, alors que la section des fils n'augmente que dans le rapport de n^2 , ce qui implique nécessairement une augmentation de densité du courant dans les fils avec l'accroissement des dimensions de la machine, résultat évidemment impossible à atteindre pratiquement. — Storch¹ estime que les machines à courant constant appartiennent à une catégorie différente de celles à potentiel constant. En admettant une égale intensité de champ magnétique, une même vitesse périphérique, et supposant qu'on puisse se permettre la même densité de courant, il trouve que, dans toutes les machines, les ampères-tours nécessaires à l'excitation varient comme les dimensions linéaires. Pour les machines à courant constant, la capacité serait proportionnelle à n^3 , c'est-à-dire au poids de la machine, ou au volume du cuivre de l'induit. Pour les machines à potentiel constant, il trouve que la longueur totale de fil sur l'induit est indépendante des dimensions de ces machines; que le nombre des conducteurs extérieurs de l'induit doit varier en raison inverse des dimensions linéaires; tandis que la capacité des machines varierait comme n^4 , et même avec un échauffement anormal, à moins qu'on n'augmentât également dans le rapport de n^4 le volume du cuivre sur l'armature. Storch et Rechniewski sont d'accord avec Hopkinson sur ce que la perte d'énergie dans les électro-aimants diminue relativement à la perte dans les armatures, quand les dimensions linéaires augmentent. D'un autre côté, toute augmentation dans les dimensions des masses en mouvement augmente la tendance aux pertes de puissance par développement de courants parasites.

Kapp² et le professeur Ayrton³ ont apporté récemment de nouveaux éléments à la discussion. Kapp propose d'admettre que les vitesses de rotation varient en raison inverse des dimensions linéaires, de manière à placer toutes les machines dans les mêmes conditions relativement aux effets de la force centrifuge, et de considérer toutes les machines semblables comme pouvant fonctionner jusqu'à la même limite de sécurité d'échauffement. Ceci implique que le travail consommé intérieurement en chaleur soit proportionnel à la surface ou dans le rapport de $\frac{1}{n^2}$. Les résistances, tant magnétiques qu'électriques, des électro-aimants seront alors proportionnelles à n^{-4} ; les puissances d'excitation,

¹ *Centralblatt für Elektrotechnik*, VIII. 544, 594 et 743, 1886.

² *Proc. Inst. Civil Engineers*, LXXXIII. 36, 1886.

³ *Ibid.*, 116.

à $n^{\frac{3}{2}}$; les intensités des champs magnétiques, à $n^{\frac{5}{2}}$; et les forces électromotrices, à $n^{\frac{3}{2}}$. Les diamètres de fils convenables seront comme n^1 sur les inducteurs et comme $n^{\frac{3}{2}}$ sur les armatures; les résistances des armatures seront proportionnelles à n^{-2} , et le courant possible, à n^2 . Il en résulte immédiatement que les puissances des machines varieront comme $n^{\frac{3}{2}}$, et l'énergie dissipée, comme n^2 ; d'où, augmentation du coefficient économique avec les dimensions de la machine. Kapp indique le prix de revient des machines comme proportionnel $n^{\frac{3}{2}}$, d'où il résulte que le coût d'une dynamo par unité de puissance (ou par lampe) varie en raison inverse de ses dimensions linéaires. A l'appui de cette théorie, il donne comme exemple le tableau ci-dessous :

Diamètre de l'induit (en centimètres)	25,4	38
Nombre de tours par minute.	1000	670
Nombre de lampes à incandescence.	150	620
Poids (en kilogrammes).	508	1727
Prix (en francs).	2500	6900
Prix par lampe (en francs).	16,65	11,65
Rendement électrique (p. 100).	80	89

Le professeur Ayrton admet que les vitesses de machines semblables peuvent en toute sécurité suivre l'inverse des racines carrées de leurs dimensions linéaires ou le rapport $n^{-\frac{1}{2}}$ au lieu de n^{-1} , attendu qu'on peut aisément augmenter dans les grandes machines le nombre et la force des frettes. Dans ces machines, l'espace, relativement plus petit, nécessaire à la libre rotation, permet d'admettre une augmentation de courant dans le rapport de n^2 . Mais cet accroissement de courant porte à un degré proportionnellement plus élevé l'aimantation du fer, et la force électromotrice est supérieure à $n^{\frac{3}{2}}$, probablement plus voisine de $n^{1,7}$, ce qui conduit à $n^{3,7}$ pour la capacité relative de la machine.

Il paraît résulter de l'opinion générale des constructeurs que, pour des dynamos semblables, la capacité est un peu supérieure aux poids relatifs des machines.

Esson ¹ a discuté cette question au point de vue des machines multipolaires et est arrivé à cette conclusion que la diminution ou l'augmentation de rendement, quand on augmente les dimensions des machines, n'est qu'une affaire d'étude convenable.

¹ *Journal Inst. Engineers*, XX. 265, 1891.

CHAPITRE VI

PRINCIPES MAGNÉTIQUES ET PROPRIÉTÉS MAGNÉTIQUES DU FER

Toutes les machines dynamo-électriques sont fondées sur les principes du magnétisme ; il est en conséquence indispensable de connaître ces principes à fond. Le champ magnétique des dynamos étant créé par des électro-aimants dont les noyaux de fer sont excités par des courants électriques circulant dans des bobines qui les entourent, il est d'importance primordiale d'étudier la loi qui régit l'électro-aimant. La relation qui existe entre le courant d'excitation et le magnétisme auquel il donne naissance étant établie, on pourra alors appliquer à l'étude d'un projet de dynamo les résultats acquis ; leur connaissance permettra en effet de calculer d'avance les dimensions des inducteurs, ainsi que le nombre des spires et la section du fil nécessaires à l'établissement d'une machine destinée à fournir une puissance électrique donnée.

Nous définirons d'abord les termes employés ; nous résumerons ensuite les faits et nous étudierons les propriétés de fers de différents genres ; incidemment nous passerons en revue les diverses formules algébriques proposées pour la représentation approximative de la loi de l'électro-aimant. Le Chapitre VII suivant contiendra des considérations de toute première importance sur le circuit magnétique et sa théorie ; nous y joindrons quelques exemples et règles utiles, et finalement nous discuterons les différentes formes données aux électro-aimants en indiquant les calculs y relatifs.

La théorie physique de la dynamo étant ainsi épuisée, nous passerons à sa théorie analytique élémentaire.

DÉFINITIONS ET PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES¹

UNITÉ DE MAGNÉTISME. — L'unité internationale universellement adoptée pour la quantité de magnétisme en un pôle magnétique quelconque est définie, dans le système C. G. S., comme l'intensité du pôle qui repousse, dans l'air, un pôle semblable placé à une distance de 1 centimètre avec une force égale à 1 *dyne*.

INTENSITÉ DE CHAMP MAGNÉTIQUE. — On a vu au Chapitre III que tout aimant est entouré d'un certain « champ » (c'est-à-dire « espace soumis à son action ») dans l'étendue duquel on peut constater une force magnétique. On peut déterminer complètement les propriétés du champ en un point quelconque en mesurant la *grandeur* et la *direction* de cette force, c'est-à-dire en mesurant l'« *intensité du champ* » et la direction des lignes de force. L'« *intensité du champ* » en un point quelconque est mesurée par la force avec laquelle il agit sur une unité de pôle magnétique placée en ce point. Par suite, l'unité d'intensité de champ est celle d'un champ qui exerce une force de 1 *dyne* sur un pôle de 1 unité d'intensité placé dans le champ. Il existe en conséquence un champ d'une unité d'intensité en un point situé à un centimètre de distance d'un pôle d'aimant d'une unité d'intensité. — Supposons un pôle magnétique, dont l'intensité est m , placé dans un champ en un point où l'intensité est H ; la force exercée sera dès lors m fois aussi grande que si le pôle avait une unité d'intensité, et la grandeur de cette force (en dynes) pourra se calculer par la simple multiplication de l'intensité de magnétisme du pôle par l'intensité du champ; on aura ainsi :

$$f = m \times H,$$

d'où

$$H = \frac{f}{m};$$

¹ Le lecteur qui n'est pas familiarisé avec la mesure des quantités magnétiques fera bien de lire attentivement l'Appendice A sur les unités électriques et magnétiques. Nous lui recommandons aussi tout particulièrement de se bien remémorer la théorie élémentaire des phénomènes magnétiques. Les *Leçons élémentaires d'Électricité et de Magnétisme* de l'Auteur, publiées par MM. Macmillan et C^{ie}, en expliquent les termes et les faits fondamentaux. Son ouvrage tout récent sur *L'Électro-aimant*, publié par MM. Spon, donne une étude plus complète des propriétés magnétiques du fer, ainsi que de la conception et de la construction des électro-aimants.

[Nous renvoyons également le lecteur français au *Traité élémentaire de l'Energie électrique* et au *Formulaire de l'Electricien* de M. Hospitalier.] (N. d. T.)

c'est-à-dire que l'intensité du champ H est le quotient de la force f qu'exerce ce champ sur un pôle par l'intensité m de ce pôle. — On en déduit la définition ci-dessus de l'unité C. G. S. d'intensité de champ.

LIGNES MAGNÉTIQUES. — Dans tout champ magnétique il est possible de faire passer par un point donné quelconque une ligne dans une direction telle qu'elle représente la direction de la force magnétique en ce point du champ (fig. 10, p. 23). Les courbes formées par la limaille de fer autour des aimants révèlent les formes de ces lignes magnétiques qui, autrement, resteraient invisibles. Même en l'absence de toute représentation effective, ces lignes peuvent être supposées tracées, et l'on peut ainsi concevoir tout l'espace compris dans le champ magnétique comme traversé par des lignes de ce genre. Faraday a, le premier, donné une signification quantitative à la conception des lignes magnétiques. On peut s'en servir pour spécifier, non seulement la *direction*, mais aussi la *grandeur* des forces magnétiques en adoptant la convention suivante : — Admettons qu'on trace autant de lignes par centimètre carré qu'il s'exerce de dynes de force (par unité de pôle) au point considéré. Le symbole H représentera alors *soit* le nombre de dynes agissant sur une unité de pôle, *soit* le nombre de lignes de force par centimètre carré, selon l'expression anglaise dérivée de la conception de Faraday.

Suivant ce principe [plus patriotique que scientifique], on prend comme mesure de l'intensité du champ en un point quelconque le nombre des lignes de force qui traversent un centimètre carré de surface placé normalement au champ en ce point. *Il s'ensuit que 4π lignes de force émaneront d'une unité de pôle magnétique*, puisque cette unité de pôle crée une unité de champ à une unité de distance ou une ligne de force par centimètre carré, et que la surface d'une sphère, ayant le pôle pour centre et un rayon égal à une unité, est de 4π centimètres carrés. L'acier d'un aimant, dont l'intensité de pôle est égalé à m , est en conséquence pénétré par $4\pi m$ lignes de force qui, en son pôle, divergent dans l'espace.

[Conformément à ce que nous avons dit précédemment de la préférence à donner à l'expression « flux de force » au lieu de celle de « nombre de lignes de force », nous en rappellerons avec M. Hospitalier la notion exacte]. (N. d. T.)

FLUX DE FORCE. — Si l'on considère un champ magnétique uniforme et un plan perpendiculaire à la direction des lignes de force qui le constituent, et qu'on découpe dans ce plan une surface S , elle sera tra-

versée par un certain nombre de lignes de force ou *flux de force magnétique* proportionnel à la surface S et à l'intensité H du champ. — On appelle *flux de force magnétique*, *flux d'induction magnétique*, ou, plus simplement, *flux de force*, *flux d'induction*, dans une surface S , le produit HS de cette surface S par l'intensité H du champ supposé uniforme, chacun des éléments de la surface étant perpendiculaire à la direction des lignes de force qui le traversent. Nous le représentons par la lettre Φ .

Dans ces conditions, l'unité C. G. S. de flux de force est le flux traversant une surface de 1 centimètre carré, lorsque l'intensité du champ est de 1 unité C. G. S.

Lorsque le champ n'est pas uniforme, le flux élémentaire dH est égal à Hds . Pour une surface quelconque, son expression générale est donc

$$\int Hds,$$

expression dans laquelle H peut varier d'un point à un autre.

Il en résulte que le *flux de force total dû à un pôle d'intensité m* , ou rayonné par ce pôle, est égal à $4\pi m$. En effet, à une distance l du pôle m , le champ produit par ce pôle est, d'après la loi de Coulomb, $H = \frac{m}{l^2}$, et, pour une surface ds , le flux de force $= Hds = \frac{m ds}{l^2}$; pour la sphère entière de rayon l , dont la surface est égale à $4\pi l^2$, le flux de force total est donc égal à

$$4\pi m.$$

Dans un barreau aimanté très long, dont l'intensité de pôle est m , le flux d'induction totale sera dès lors égal $4\pi m$ à l'intérieur du barreau, et à $4\pi m$ en dehors du barreau, en vertu du principe de la *conservation* de l'énergie, ici du *flux*, les lignes de force constituant des circuits fermés.

POLARITÉ. — On sait couramment que la polarité d'un électro-aimant dépend du sens du courant dans les fils qui l'entourent. On a donné différents procédés mnémoniques pour rappeler cette relation entre le flux électrique et la force magnétique. Parmi ces règles l'une des plus pratiques est celle qui consiste à se souvenir que, si l'on regarde le pôle nord d'un électro-aimant, le courant circulera autour de ce pôle en sens inverse de la marche des aiguilles d'une montre. Ceci implique, pour les bobines d'un électro-aimant à deux branches parallèles, la con-

nexion faite de telle sorte que les courants y circulent de la manière indiquée par la figure 84. La figure 85 donne l'illustration d'une autre règle imaginée par Maxwell et qui s'énonce ainsi : le sens de circulation

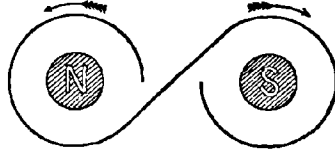


Fig. 84. — Circulation du courant autour d'un électro-aimant en fer à cheval.

du courant (dextrorsum ou sinistrorsum) et la direction positive de la force magnétique résultante ont entre eux la même relation que la rotation et la marche longitudinale d'une vis dextrorsum ou d'un tire-

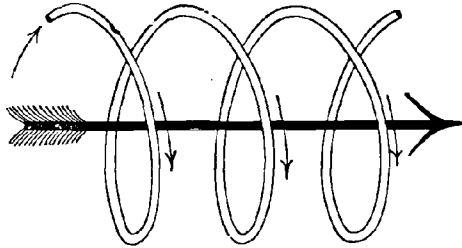


Fig. 85. Diagramme indiquant la relation entre le sens d'un courant magnétisant et celui de la force magnétique résultante.

bouchon. La circulation dextrorsum d'un courant correspond à une force magnétique tendant à produire une polarité nord à l'extrémité du noyau vers laquelle il marche.

RÈGLES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

L'inducteur étant, dans presque toutes les dynamos, un électro-aimant en fer dont l'aimantation est due au passage d'un courant dans un conducteur qui l'entoure, il est nécessaire d'établir quelques propositions élémentaires donnant la relation entre les courants électriques et les forces magnétiques.

1. — FORCE MAGNÉTOTRICE ou *Force magnétisante totale* d'un courant électrique circulant dans une bobine. — Quand un courant suit un fil de cuivre enroulé en un certain nombre de spires autour d'un noyau et

circule ainsi autour d'un circuit magnétique intérieur, on reconnaît que la force ou tendance magnétisante de cette circulation électrique est proportionnelle à l'intensité de ce courant, en même temps qu'au nombre des spires ainsi réunies en bobine. Toutes choses égales d'ailleurs, la force magnétisante totale dépend uniquement de ces deux quantités ; elle est absolument indépendante de la section ou de la nature du fil, aussi bien que de sa forme, et est la même, que les spires se touchent ou soient écartées les unes des autres. Si l'on désigne par N_s le nombre de *spires* de la bobine, et par i l'intensité *en ampères* du courant auquel elles livrent passage, N_s multiplié par i sera le nombre d'*ampères-tours* de circulation du courant. On prouve expérimentalement que vingt ampères circulant dans cinq spires développent une force magnétisante totale exactement égale à celle d'un ampère parcourant cent spires, ou de cent ampères faisant une seule fois le tour du noyau. Dans chacun de ces cas la circulation du courant est de cent ampères-tours. En conséquence, pour calculer la valeur, en unités absolues C. G. S., de la force magnétomotrice, il faut multiplier les ampères-tours par $\frac{4}{10} \pi$, ou par 1,257. En d'autres termes, on a :

$$\text{Force magnétomotrice } \mathcal{F} = \frac{4\pi}{10} \times N_s i = 1,257 \times N_s i.^1$$

On peut éviter l'emploi de ce facteur numérique, en introduisant dans les calculs les ampères-tours eux-mêmes au lieu et place de la force magnétomotrice. On applique alors un coefficient au calcul de la résistance magnétique du circuit (voir Chap. XVI).

Certains auteurs désignent la force magnétomotrice sous le nom d'« intégrale des forces magnétiques ».

2. — INTENSITÉ DE LA FORCE MAGNÉTIQUE EN UN POINT QUELCONQUE DANS UNE LONGUE BOBINE MAGNÉTISANTE. — L'expression précédente de la force magnétisante totale d'une bobine ne fournit aucune indication sur la variation de la force magnétique en ses divers points. Si, sur la figure 86, on trace une courbe fermée (la courbe ponctuée) passant à travers toutes les spires, et qu'on demande « Quelle est l'intensité de la force magnétique aux divers points de cette courbe ? », on devra répondre que l'intensité de cette force varie considérablement d'un point à un autre et qu'elle atteint son maximum au milieu de la partie de

¹ La force magnétisante, force magnétique, ou intensité de champ magnétique, est la force magnétomotrice produite par le nombre des spires N_s comprises dans une unité de longueur :

$$\mathcal{H} = 1,257 \times N_s i. \quad (\text{N. d. T.})$$

cette courbe qui se trouve à l'intérieur des spires. Si une bobine uniformément enroulée avait une très grande longueur (soit au moins cent fois son propre diamètre), l'intensité de la force magnétique serait très sensiblement uniforme sur toute la longueur de son axe, jusque dans le voisinage des extrémités de la bobine, où elle diminue rapidement. On trouve l'expression de la valeur de H en un point quelconque le long de l'axe (sauf dans le voisinage des extrémités) d'une longue bobine de ce genre en considérant la force magnétomotrice comme uniformément distribuée suivant sa longueur : ou symboliquement, en

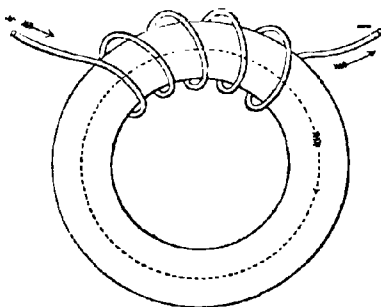


Fig. 86. — Bobine magnétisante roulée autour d'un circuit magnétique.

désignant par l la longueur de la bobine, en centimètres, et par \mathcal{H} la force magnétique ou force magnétisante d'induction, expressions équivalentes à intensité de champ magnétique *inducteur* (alors que la notation H est réservée à un champ magnétique en général),

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi}{10} \frac{N_s i}{l} = 1,257 \text{ fois les ampères-tours par centimètre de longueur.}$$

Dans le cas où un fil est roulé en une hélice annulaire sur un anneau de fer, de telle sorte que la bobine soit sans fin, \mathcal{H} est uniforme en tous les points de la courbe fermée tracée à l'intérieur de la bobine, et on en calcule la valeur comme ci-dessus, en prenant pour l la longueur moyenne du corps de l'anneau. Il va de soi que, quand \mathcal{H} est uniforme, $\mathcal{H} \times l$ donne la force magnétisante totale ou la force magnétomotrice.

3. — INTENSITÉ DE LA FORCE MAGNÉTIQUE AU CENTRE D'UN ANNEAU SIMPLE.
— Au centre d'un simple anneau ou d'une spire circulaire de fil portant

un courant de i ampères et dont le rayon est r centimètres, l'intensité de la force magnétique se calcule à l'aide de la formule

$$\mathcal{H} = \frac{2\pi i}{10r} = 0,6283 \times \frac{\text{intensité en ampères}}{\text{rayon en centimètres}}$$

Tel est le cas d'un cadre circulaire de galvanomètre de tangentes, dont les indications sont à multiplier par N , s'il y a N , spires sur le cadre.

4. — FORCE EXERCÉE SUR UN CONDUCTEUR (portant un courant) DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE. — Supposons un champ magnétique créé par un aimant permanent (fig. 87) et un fil conducteur, portant un courant, amené dans ce champ magnétique ; on observe que ce fil est soumis à une force mécanique dont la direction est normale à sa propre longueur et aux lignes magnétiques du champ. Dans la figure, la direction du flux de force magnétique est horizontale et va de droite à gauche entre les branches de l'aimant ; la direction du courant est horizontale et son sens est d'avant en arrière ; et la force mécanique résultante sollicitera le conducteur verticalement de bas en haut, comme l'indique la flèche. Le renversement du courant se traduirait naturellement par une force agissant de haut en bas.

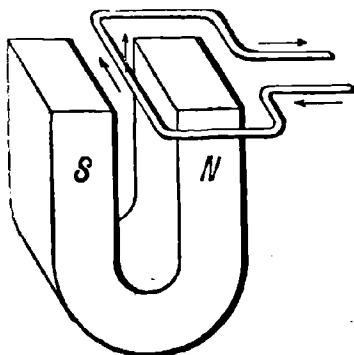


Fig. 87. — Action d'un champ magnétique sur un conducteur portant un courant.

On peut calculer la grandeur de cette force de la manière suivante : — Supposons le champ d'une intensité uniforme \mathcal{H} , et soit l la longueur (en centimètres) d'un conducteur placé normalement à la direction du champ. Si i est (en ampères) l'intensité du courant, la force (en dynes) qui agit sur lui aura pour expression

$$f = \frac{\mathcal{H}li}{10} \text{ dynes,}$$

et (en grammes-poids) :

$$f = \frac{\mathcal{K}li}{10 \times 981} \text{ grammes-poids.}$$

5. — TRAVAIL EFFECTUÉ PAR UN CONDUCTEUR (portant un courant) EN MOUVEMENT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE. — Si le conducteur se meut sur une largeur b (en centimètres) du champ magnétique, le travail (en ergs) aura pour expression :

$$w = fb = \frac{b\mathcal{K}li}{10},$$

i étant exprimé en ampères et l en centimètres.

Mais bl est la surface S du champ découpée par le conducteur, et cette surface multipliée par l'intensité du champ (\mathcal{K}) donne le flux de force magnétique à travers la surface S ($\Phi = \mathcal{K}S$) ; il en résulte que

$$w = \frac{\Phi i}{10}.$$

Preuve : — On peut arriver à la même conclusion par une autre voie tout à fait indépendante de la précédente : — Par définition du potentiel électrique, le travail effectué par le mouvement de Q unités de quantité d'électricité sous une différence de potentiel $V_1 - V_2$ est

$$w = Q (V_1 - V_2).$$

Mais le fait de découper dans un champ magnétique un flux Φ dans un temps égal à t secondes donne lieu au développement d'une force électromotrice égale à $\frac{\Phi}{t}$ qui constitue la différence de potentiel $V_1 - V_2$ et peut lui être substituée.

De plus, si le courant i est exprimé en ampères, la quantité Q d'électricité transportée en t secondes dans le circuit sera égale en valeur absolue C. G. S. à $\frac{it}{10}$.

En remplaçant, dans l'expression précédente, Q par cette dernière valeur et $V_1 - V_2$ par sa valeur ci-dessus, on arrive immédiatement au même résultat que précédemment :

$$w = \frac{\Phi i}{10}.$$

INDUCTION MAGNÉTIQUE

Quand une pièce de métal magnétique est placée dans un champ magnétique, une partie des lignes de force de ce champ la pénètre et

lui donne une certaine aimantation qui dépend de l'intensité du champ dans lequel le métal est placé et du métal lui-même. Ce phénomène porte le nom d'*induction magnétique* et l'aimantation ainsi développée s'appelle *aimantation induite*. Le champ magnétique est le *champ inducteur*. Si l'on désigne par \mathcal{H} ou H l'intensité du champ magnétique inducteur dans lequel est placé le barreau magnétique, parallèlement à la direction des lignes de force, et par S la section de ce barreau, il est traversé par un *flux d'induction magnétique total* proportionnel à sa section S et à un facteur symbolisé par la lettre \mathfrak{B} ou B qu'on appelle *induction magnétique*; c'est le quotient $\frac{\Phi}{S}$ du flux d'induction par la section qu'il traverse. On peut envisager ce phénomène sous deux aspects qui ont chacun leurs avantages. On peut regarder le magnétisme du fer, ou autre métal, comme un état spécial des surfaces polaires, exprimé, par suite, en unités de magnétisme; c'est l'ancienne manière, adoptée à une époque où le magnétisme était considéré comme un fluide. Ou bien on peut envisager la condition intérieure de la pièce de métal et le flux de force qui la pénètre pour en émerger ensuite dans l'espace environnant. Cet aspect de la question est conforme aux idées modernes.

Le fait qu'un barreau de fer doux placé dans un champ magnétique devient lui-même hautement magnétique peut en conséquence s'exprimer des deux manières suivantes: — (1) quand on place du fer dans un champ magnétique, les lignes de force se resserrent et se pressent en plus grand nombre dans l'espace occupé par le fer, parce que le fer est très *perméable* aux lignes de force¹, ou est pour elles un bon conducteur; (2) si un barreau de fer est placé dans un champ magnétique, il se développe des pôles intenses à ses surfaces terminales qui possèdent une *susceptibilité* élevée pour la réception du magnétisme. — Chacune de ces idées peut revêtir une forme précise par l'introduction des coefficients respectifs de *perméabilité* et de *susceptibilité*.

PERMÉABILITÉ MAGNÉTIQUE. — La notion de *perméabilité* (ou *coefficient d'induction magnétique*) est basée sur la conception de la pénétration des lignes de force dans toute la masse du fer, telle qu'elle a été définie ci-dessus.

¹ Certaines autorités font une distinction entre les lignes de force (ou celles qui existeraient dans l'air) et les lignes d'induction (ou celles qui existent dans une substance en plus ou en moins de celles qui existeraient dans l'air seul). Cette distinction est absolument inutile, toutes les lignes de force ayant les mêmes propriétés. Nous les appelons toutes simplement « lignes de force » ou « lignes magnétiques ».

Le rapport de l'induction magnétique \mathfrak{B} à la force magnétisante \mathcal{H} qui la produit s'exprime par un coefficient numérique d'induction, ou de *perméabilité*, μ . — On peut en conséquence, écrire :

$$\mathfrak{B} = \mu \mathcal{H}$$

ou

$$\mu = \frac{\mathfrak{B}}{\mathcal{H}}$$

Ce coefficient est toujours positif : dans le vide ou dans l'air il est égal à 1 ; pour les substances magnétiques il est plus grand que 1 ; et pour les substances diamagnétiques il est inférieur à 1. On peut s'en faire une idée de la façon suivante : — Supposons qu'une force magnétisante déterminée agisse dans une certaine direction ; il résultera naturellement de son action un certain flux suivant les lignes d'induction (que nous appelons lignes de force). Dans l'air ce flux de force représentera numériquement la force magnétisante ; mais, si l'espace considéré est occupé par du fer, la même force magnétisante induira un flux beaucoup plus considérable, le fer jouissant d'une espèce de pouvoir multiplicateur, d'une capacité inductive spécifique, ou encore d'une conductibilité plus grande pour les lignes de force. Par exemple, on trouvera qu'un certain échantillon de fer soumis à une force magnétique capable de créer, dans l'air, un flux de force de 50 unités C. G. S. sera pénétré par un flux de force qui ne sera pas inférieur à 16050 unités. En divisant ce dernier chiffre par le premier, on trouve comme valeur de la per-

¹ Nous donnons ci-dessous les diverses expressions sous lesquelles figurent ces trois quantités dans les différents auteurs :

\mathfrak{B} Aimantation intérieure.

Induction.

Induction magnétique.

Induction spécifique.

Intensité d'induction.

Nombre de lignes de force par centimètre carré dans la substance.

Perméation.

\mathcal{H} Force magnétisante en un point.

Force magnétique en un point.

Intensité de champ magnétique.

Intensité de la force magnétique.

Nombre de lignes qui existeraient dans l'air par centimètre carré.

μ Conductibilité spécifique pour les lignes magnétiques.

Perméabilité.

Perméabilité magnétique.

Pouvoir magnétique multiplicateur de la substance.

méabilité, à ce degré d'aimantation, 321 ; c'est-à-dire que la perméabilité du fer est égale à 321 fois celle de l'air. On admet que la perméabilité des corps non magnétiques, tels que la soie, le coton et autres substances isolantes, aussi bien que celle du laiton, du cuivre et de tous les métaux non magnétiques, est égale à 1, c'est-à-dire pratiquement la même que celle de l'air.

INTENSITÉ D'AIMANTATION ET SUSCEPTIBILITÉ MAGNÉTIQUE. — On ne fait plus guère entrer aujourd'hui dans les calculs la *susceptibilité* ou *coefficient d'aimantation* (*superficielle*). Supposons qu'un barreau aimanté possède à chacun de ses pôles m unités de magnétisme et que la longueur entre ces deux pôles soit l ; le produit $ml = \mathfrak{M}$ prend le nom de *moment magnétique* du barreau, et l'on désigne par *intensité d'aimantation* le quotient du moment magnétique du barreau par son volume. Tout en étant basée sur l'unité superficielle d'intensité de pôle, cette expression comporte une idée d'état magnétique intérieur. Supposons maintenant que l'intensité d'aimantation, pour laquelle on emploie le symbole \mathfrak{J} , soit due à l'introduction d'un morceau de fer dans un champ magnétique d'intensité \mathfrak{H} ; le rapport entre ces deux quantités, ou rapport de l'intensité d'aimantation à l'intensité du champ qui la produit, est ce qu'on appelle la *susceptibilité* ; on la représente par le symbole κ , ce qui permet d'écrire

$$\mathfrak{J} = \kappa \mathfrak{H},$$

ou

$$\kappa = \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}.$$

Cette expression peut être interprétée comme signifiant que, pour chaque unité dans le champ magnétisant, il y aura κ unités de magnétisme sur la surface terminale du barreau de fer.

Il existe une relation entre ces deux coefficients : — du moment que chaque unité de champ produit κ unités de magnétisme, et que chacune de ces dernières donne lieu à une émergence de 4π unités de flux à l'extérieur, la présence du fer ajoutera $4\pi\kappa$ unités de flux à chaque unité existant dans l'air seul ; d'où

$$\mu = 1 + 4\pi\kappa = 1 + 4\pi \frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}},$$

ou

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J}.$$

Cette manière d'exprimer les faits se complique cependant de la tendance, dans tous les échantillons de fer, vers une saturation magnétique. Quel que soit le fer expérimenté, la capacité magnétique de la matière va en diminuant au fur et à mesure qu'on pousse plus loin l'aimantation effective. En d'autres termes, quand un morceau de fer a été aimanté jusqu'à un certain degré, il devient, à partir de ce point, moins accessible à une aimantation supérieure, et, bien qu'on ne puisse jamais réaliser une saturation absolue, il existe une limite pratique au delà de laquelle on ne peut utilement pousser l'aimantation. Joule a été un des premiers à établir cette tendance vers une saturation magnétique. Des recherches récentes ont établi numériquement cette décroissance de perméabilité au fur et à mesure qu'on pousse plus loin l'aimantation. La limite pratique de l'induction \mathfrak{B} dans du fer forgé de bonne qualité est d'environ 20000 unités C. G. S., et de 12000 unités à peu près dans la fonte.

Dans une étude d'électro-aimant, avant de pouvoir calculer les dimensions d'un barreau de fer destiné à la construction du noyau d'un inducteur en vue d'une application spéciale, il est indispensable de connaître les propriétés magnétiques de cette pièce de fer. Il est clair, en effet, que, si la perméabilité magnétique de ce fer est inférieure, il en faudra une plus grande quantité pour produire l'effet magnétique qui pourrait être réalisé avec un barreau de plus petites dimensions mais de perméabilité plus élevée. Autrement dit, l'échantillon de moindre perméabilité exigera plus de cuivre dans la bobine qui l'enveloppera ; car, pour amener son aimantation au point voulu, il faudra le soumettre à des forces magnétisantes plus élevées qu'il n'eût été nécessaire si l'on avait eu affaire à un échantillon de perméabilité plus élevée.

COURBES MAGNÉTIQUES

Une excellente manière d'étudier les phénomènes magnétiques relatifs à un échantillon spécial quelconque de fer consiste à construire la courbe d'induction, c'est-à-dire la courbe pour laquelle les abscisses représentent la force magnétique \mathfrak{H} , et les ordonnées les valeurs correspondantes de l'induction résultante \mathfrak{B} . La figure 88, qui est une modification de celle fournie par les recherches du professeur Ewing¹, donne cinq courbes relatives à du fer doux recuit, du fer écroui par étirage, de l'acier recuit, de l'acier étiré dur et de l'acier trempé. On remarquera que toutes ces courbes ont la même allure générale. A de faibles

¹ *Phil. Trans.*, 1885.

valeurs de \mathcal{H} correspondent de petites valeurs de \mathcal{B} , et \mathcal{B} croît en même temps que \mathcal{H} . En outre, la courbe s'élève très rapidement, du moins pour tous les échantillons de fer doux ; elle s'infléchit ensuite et devient presque horizontale. Quand l'induction est dans la plage inférieure au coude de la courbe, on dit que le fer est loin de son point de saturation.

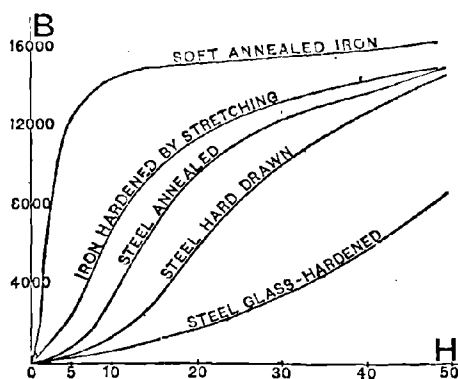


Fig. 88. — Courbes d'induction dans divers échantillons de fer.

Soft annealed Iron = Fer doux recuit.

Iron hardened by Stretching = Fer écroui par étirage.

Steel Hard drawn = Acier étiré dur.

Steel Glass-Hardened = Acier trempé très dur.

Mais, quand l'aimantation induite a été poussée au delà du coude de la courbe, le fer est dit dans un état voisin de la saturation, parce que, à ce point d'aimantation, il faut augmenter beaucoup la force magnétisante pour obtenir le moindre accroissement de magnétisme. On remarquera que, pour le fer doux forgé, le point voisin de la saturation correspond à une valeur de \mathcal{B} égale à 16 000 unités C. G. S. environ, ou à une valeur de \mathcal{H} s'élevant à 50 à peu près. Comme on le verra plus loin, il n'est pas économique de pousser \mathcal{B} au delà de cette limite ; en d'autres termes, l'emploi de forces magnétiques supérieures à celles voisines de $\mathcal{H} = 50$ n'est pas compensé par un gain suffisant.

MESURE DE LA PERMÉABILITÉ

Il existe quatre genres de méthodes expérimentales pour la mesure de la perméabilité, savoir : —

DYNAMO-ÉLECTRIQUES.

9

I. — *Les Méthodes magnétométriques.*

II. — *Les Méthodes de balance.*

III. — *Les Méthodes d'induction.*

IV. — *Les Méthodes d'arrachement.*

I. **Méthodes Magnétométriques.** — Elles consistent à entourer d'une bobine magnétisante le barreau de fer soumis à l'essai et à observer la déviation que produit l'aimantation de ce fer sur un magnétomètre.

II. **Méthodes de Balance.** — Ces méthodes sont une variété des précédentes; on emploie un aimant compensateur pour équilibrer l'action du fer aimanté sur l'aiguille du magnétomètre. Cette méthode a reçu une application mieux définie dans l'emploi de la balance magnétique du professeur Hughes. Aucune de ces méthodes n'est, toutefois, comparable à celles qui suivent.

III. **Méthodes d'Induction.** — Ces méthodes comportent plusieurs variétés; mais elles sont toutes basées sur le développement d'un courant d'induction passager dans une bobine d'exploration qui enveloppe l'échantillon de fer expérimenté; le courant intégral est proportionnel au flux de force qui pénètre le circuit de la bobine d'exploration ou qui s'en échappe. Ces différents modes d'opérer méritent chacun une mention particulière.

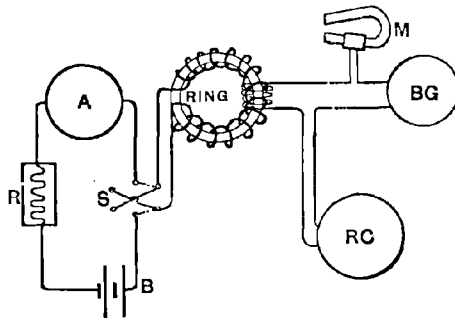


Fig. 89. — Méthode de l'anneau pour la mesure de la perméabilité (disposition de Rowland).

Ring = Anneau.

(A). *Méthode de l'Anneau.* — Dans cette méthode due à Kirchhoff, le fer soumis à l'essai est façonné en un anneau roulé d'une bobine pri-

maire, ou excitatrice ; le système est complété par une bobine secondaire, ou d'exploration. Des déterminations à l'aide de ce procédé ont été faites par Stoletow, Rowland, Bosanquet, et Ewing, ainsi que par Hopkinson. La figure 89 représente la disposition adoptée par Rowland ; B est la pile qui fournit le courant ; S le commutateur-inverseur qui permet d'envoyer ou de renverser le courant dans la bobine d'excitation roulée sur l'anneau de fer ; R une résistance variable ; A un ampèremètre ; et B G le galvanomètre balistique, dont la première impulsion mesure le courant intégral induit. R C est un inducteur de terre, ou bobine de renversement, destiné à calibrer les lectures au galvanomètre ; au-dessus, une bobine et un aimant sont disposés de manière à maintenir les déviations de l'aiguille dans les limites des observations. La bobine d'excitation et celle d'exploration sont toutes deux roulées sur l'anneau ; la première se distingue par un trait plus gros. On procède habituellement en commençant avec un faible courant d'excitation qu'on renverse brusquement et qu'on ramène ensuite de nouveau à son sens initial. Le courant est ensuite augmenté, renversé et réinversé ; et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on ait atteint les points les plus élevés possibles. On calcule les valeurs de la force magnétisante \mathcal{H} d'après les valeurs observées du courant, au moyen de la règle suivante : — Soient i l'intensité du courant donnée par l'ampèremètre, N_s le nombre des spires de la bobine d'excitation, et l la longueur de celle-ci en centimètres (c'est-à-dire la circonférence moyenne de l'anneau) ; \mathcal{H} est alors donné (voir p. 122) par la formule

$$\mathcal{H} = \frac{4\pi}{10} \frac{N_s i}{l} = 1,257 \frac{N_s i}{l}.$$

Bosanquet, en appliquant cette méthode à un certain nombre d'anneaux de fer, est arrivé à des résultats importants et a résolu la question controversée de savoir si les couches extérieures d'un noyau de fer protégeaient les couches intérieures contre l'influence des forces magnétisantes. Si tel était le cas, des anneaux minces devaient fournir pour \mathcal{B} des valeurs plus élevées que des anneaux plus épais ; mais Bosanquet n'a rien trouvé d'analogue.

(B). *Méthode du Barreau.* — Cette méthode consiste à employer, au lieu d'un anneau, un long barreau de fer. Il est recouvert de bout en bout par la bobine d'excitation ; mais la bobine d'exploration est formée d'un petit nombre de tours de fil placés juste au-dessus de la

partie médiane du barreau. Rowland, Bosanquet, et Ewing ont tous eu recours à cette méthode. Ewing en particulier a employé des barreaux dont la longueur était supérieure à cent fois leur diamètre, de manière à rendre négligeables les erreurs pouvant provenir des effets de leurs extrémités.

(C). *Méthode du Barreau divisé.* — Cette méthode, due au docteur Hopkinson¹ et représentée par la figure 90, comporte l'emploi d'un bloc de fer forgé recuit, ayant environ 46 centimètres de long, sur 16,5 de large et 5 d'épaisseur, dans le milieu duquel est découpé un espace rectangulaire destiné à recevoir les bobines magnétisantes. Les

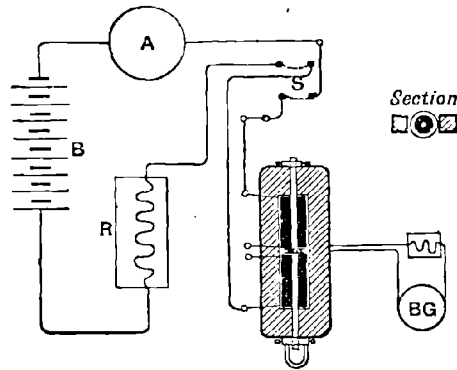


Fig. 90. — Méthode du barreau divisé pour la mesure de la perméabilité (Hopkinson).

échantillons de fer soumis à l'épreuve sont deux baguettes de 12,65 millimètres de diamètre, tournées avec soin et glissant dans des trous forés aux extrémités du bloc de fer. Ces deux baguettes se rencontrent au milieu du bloc, leurs bouts bien dressés de manière à assurer un parfait contact entre elles. L'une d'elles est solidement maintenue ; l'autre est munie d'une poignée qui permet de la tirer. Les deux grandes bobines magnétisantes ne se touchent pas ; un espace est réservé entre elles. Dans cet intervalle on introduit la petite bobine d'exploration roulée sur une carcasse d'ivoire et dans l'œil de laquelle passe l'extrémité de la baguette mobile. La bobine d'exploration est reliée au galvanomètre balistique B G et fixée à un ressort de caoutchouc (qu'on ne voit pas sur la figure) sous l'action duquel elle sort

¹ *Phil. Trans.*, 456, 1885.

complètement du champ magnétique lorsque la baguette est brusquement tirée en arrière. Cette bobine est formée de 350 tours de fil fin ; les deux bobines magnétisantes comportent 2 008 tours effectifs. Le courant magnétisant, fourni par une pile B de huit éléments Grove, était réglé au moyen d'une résistance liquide variable R et d'une résistance en dérivation. Un commutateur-inverseur et un ampèremètre A étaient insérés dans le circuit magnétisant. L'appareil ainsi disposé permettait de soumettre à des forces magnétisantes quelconques, petites ou grandes, les baguettes d'échantillon expérimentées, et l'on pouvait observer à un instant quelconque leur condition magnétique en rompant le circuit et retirant en même temps la baguette mobile. On pouvait en conséquence procéder à l'observation individuelle d'une série d'aimantations croissantes (ou décroissantes) sans aucun renversement intermédiaire du courant entier.

Les résultats obtenus par Hopkinson sont consignés pages 136 à 142.

Pour faciliter les observations sur de nouveaux échantillons de fer, M. J. Swinburne a récemment ¹ imaginé une méthode d'expérimentation qui dispense de l'emploi d'un galvanomètre balistique. — Le lecteur pourra, pour plus amples détails, se reporter au travail original.

IV. Méthodes d'Arrachement. — Un autre groupe de méthodes de mesure de la perméabilité est basé sur la loi de l'attraction magnétique. Il existe plusieurs manières de procéder.

(D). *Méthode de l'Anneau divisé.* — M. Shelford Bidwell a bien voulu prêter à l'Auteur l'appareil à l'aide duquel il a appliqué cette méthode. Il se compose d'un anneau formé d'une baguette de fer au bois très doux, de 6,4 millimètres d'épaisseur, ayant lui-même un diamètre extérieur de 8 centimètres et scié en deux demi-anneaux ; chacune de ces moitiés est soigneusement recouverte d'une bobine d'excitation en fil de cuivre isolé, formée de 1 929 spires en tout. Ces deux moitiés s'adaptent exactement l'une sur l'autre, bout à bout, et dans cette position constituent un anneau pratiquement continu. Quand on lance un courant d'excitation dans les bobines, les deux demi-anneaux s'aimantent et s'attirent mutuellement ; on mesure alors la force nécessaire pour les séparer par arrachement. Conformément à la loi d'attraction dont nous nous occuperons dans un chapitre suivant, la force d'attraction (sur une

¹ Voir *The Electrician*, XXV. 648, 10 octobre 1890.

surface de contact donnée) est proportionnelle au carré du flux de force qui passe de l'une des surfaces de contact à l'autre à travers le joint de contact. On peut en conséquence se servir de la force d'attraction pour déterminer \mathcal{B} , et, en calculant \mathcal{H} comme précédemment, on pourra déterminer la perméabilité. Le tableau III, page 143, donne le résumé des résultats obtenus par M. Bidwell.

(E). *Méthode de la Baguette divisée.* — Dans cette méthode, également employée par M. Bidwell, une baguette de fer soutenue à ses deux extrémités est divisée en son milieu et placée à l'intérieur d'une bobine magnétisante verticale qui l'entoure. L'appareil est suspendu par un crochet à un point d'attache situé au-dessus de lui; le crochet inférieur est fixé à un plateau de balance.

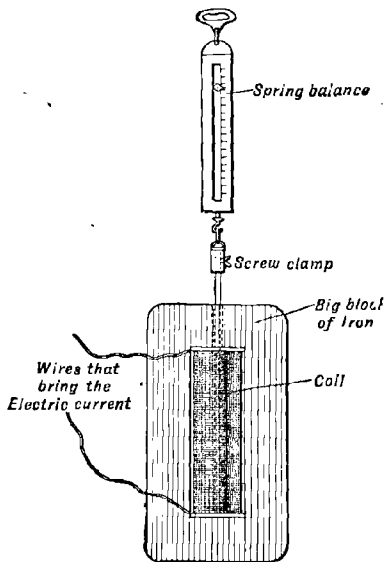


Fig. 91. — Perméamètre
(S. P. Thompson).

Spring balance = Balance à ressort.

Screw clamp = Emboitement à vis.

Big block of Iron = Gros bloc de fer.

Coil = Bobine.

Wires that bring the Electric current =
Fils d'arrivée du courant électrique.

Le crochet inférieur est fixé à un plateau de balance. On lance dans la bobine magnétisante des courants d'intensité progressivement croissante provenant d'une pile, et l'on note le poids maximum qui peut être, dans chaque cas, mis dans le plateau de la balance sans séparer les extrémités des baguettes.

(F). *Méthode du Perméamètre.* — Cette méthode a été imaginée par l'Auteur même de cet ouvrage dans le but d'éprouver des échantillons de fer. Ce qui la distingue, c'est qu'elle constitue une méthode d'atelier et non une méthode de laboratoire. Elle ne nécessite pas de galvanomètre balistique et le fer soumis à l'épreuve n'a pas besoin d'être forgé en anneau, ni recouvert d'une bobine. Son application n'exige qu'un instrument très simple que l'Auteur se hasarde, comme il le dit

lui-même, à appeler *perméamètre*. Extérieurement cet instrument rappelle comme apparence générale l'appareil du docteur Hopkinson, et consiste, ainsi que l'indique la figure 91, en un morceau rectangulaire de fer doux forgé, évidé intérieurement de manière à recevoir une

bobine magnétisante, suivant l'axe de laquelle passe un tube de laiton. Le bloc a 30 centimètres de long, sur 16,5 centimètres de large et 7,5 centimètres d'épaisseur. A l'une de ses extrémités il est foré pour recevoir l'échantillon de fer à éprouver. Ce dernier consiste simplement en une mince baguette de 30 centimètres de long environ, dont une des extrémités doit être soigneusement dressée. Quand on la place à l'intérieur de la bobine magnétisante et qu'on lance le courant d'excitation, la baguette vient s'appliquer fortement par son extrémité inférieure contre la surface du bloc de fer ; et la force nécessaire pour l'en détacher (ou plutôt la racine carrée de cette force) donne la mesure de la pénétration des lignes de force dans sa surface terminale. Dans le premier perméamètre construit par l'Auteur, la bobine magnétisante avait 13,64 centimètres de long et contenait 371 spires de fil. Un courant d'excitation de 1 ampère développait en conséquence une force magnétisante $\mathcal{H} = 34$. Le fil était assez gros pour porter 30 ampères, de sorte qu'il était facile d'obtenir une force magnétisante égale à 1 000 unités. Dans une de ses expériences le courant envoyé était de 23 ampères ; les deux baguettes étaient en « fer au bois » et en « fer de première qualité » ; elles avaient 40 millimètres carrés de section. L'Auteur se servait d'une balance à ressort, soigneusement graduée et munie d'un arrêt automatique fixant son index au point de lecture le plus élevé. La force d'attraction pour le fer « au bois » a été trouvée égale à 5,670 kg tandis que le fer de « première qualité » n'a donné que 3,400 kg, de sorte que \mathcal{B} était de 19 000 unités C. G. S. environ dans le fer au bois, et, \mathcal{H} étant égal à 850 unités, μ était à peu près de 22,3.

La formule générale qui permet de calculer \mathcal{B} quand un noyau est ainsi arraché par un poids de F kilogrammes, la surface de contact étant de S centimètres carrés, est :

$$\mathcal{B} = 4965 \sqrt{\frac{F}{S}} + \mathcal{H}.$$

On est en effet amené à introduire \mathcal{H} dans la formule parce que dans cet appareil la bobine reste fixe, le noyau seul étant mobile. Il en résulte que l'arrachement ne s'effectue que sur $\mathcal{B} - \mathcal{H}$ unités.

(G). *Méthode de la Balance de traction.* — M. H.-G. Du Bois¹ a récemment décrit une méthode dans laquelle l'échantillon de fer est placé à l'intérieur d'une bobine entre deux joues en fer, faisant ainsi partie

¹ *The Electrician*, XXVII. 635, 9 octobre 1891.

d'un circuit magnétique dont une autre partie est constituée par un fléau de fer dont on mesure l'attraction pour en déduire ensuite le flux par le calcul.

Résultats d'expériences sur Divers échantillons de fer.

Hopkinson a essayé trente-cinq échantillons de fers divers de com-

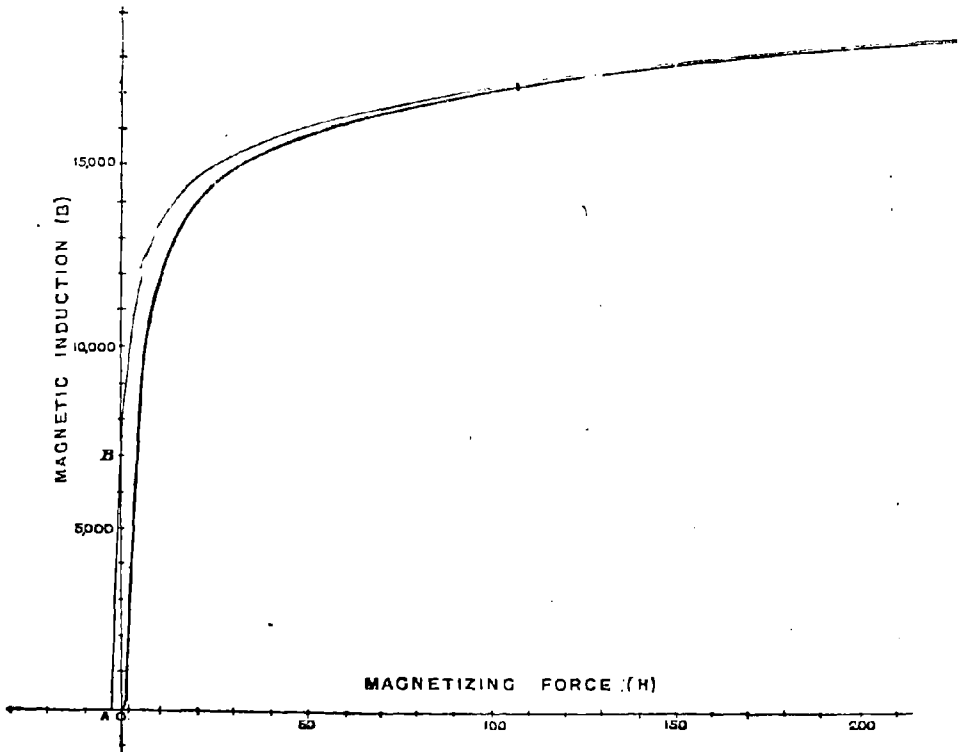


Fig. 92. — Fer.

Magnetizing Force = Force magnétisante.

Magnetic Induction = Induction magnétique.

position chimique connue, parmi lesquels les deux plus importants au point de vue qui nous occupe sont des spécimens de fer forgé recuit et de fonte grise, tels que les emploient MM. Mather et Platt dans la construction de leurs machines dynamos. Hopkinson a réuni en courbes les résultats qu'il a obtenus, ce qui permet de construire, à titre de

référence, des tables numériques d'une exactitude suffisante pour des calculs ultérieurs.

La figure 92 donne des courbes d'induction pour du *fer forgé recuit*, obtenues à l'aide de la seconde méthode expérimentale du docteur Hopkinson¹. La ligne forte indique la relation entre la grandeur de la force magnétisante \mathcal{H} et de l'induction spécifique \mathfrak{B} correspondant à une augmentation progressive de la force magnétisante de zéro à 220 unités

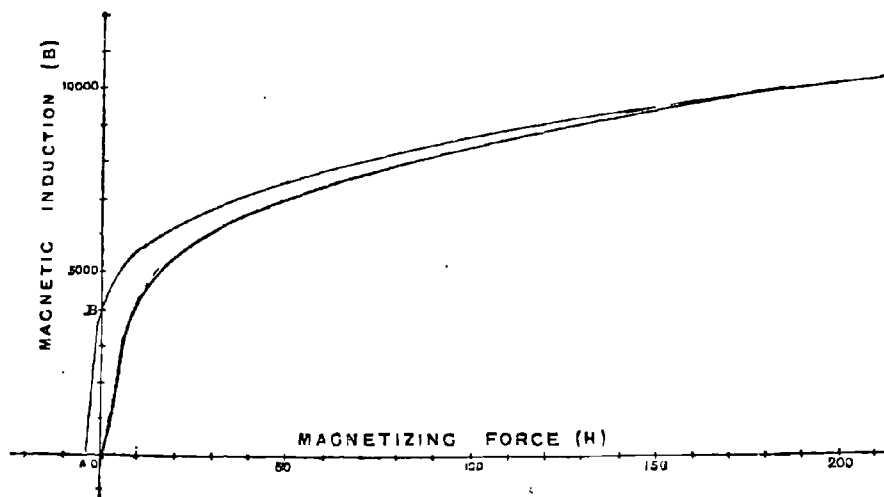


Fig. 93. — Fonte.

Magnetizing Force = Force magnétisante.
Magnetic Induction = Induction magnétique.

environ ; et la ligne faible représente la même relation correspondant à la diminution de cette force magnétisante successivement réduite jusqu'à zéro, puis à son renversement de manière à écarter toute induction magnétique résiduelle. Dans la figure 93 on voit les courbes correspondantes pour un échantillon de *fonte grise* telle que l'emploient MM. Mather et Platt pour les bâtis de leurs machines.

Chaque échantillon de fer présentera, à l'essai, la même série de phénomènes susceptible d'être réunie en une courbe qui caractérise la relation en question ; mais les courbes afférentes à la fonte et à l'acier se maintiennent toujours au-dessous de celles qu'on trouve pour le fer forgé. On remarquera d'ailleurs que, lorsqu'on soumet un nouveau morceau de fer ou d'acier à une force magnétisante graduellement

¹ Hopkinson, dans les *Phil. Trans.*, pt. II. 455, 1885.

croissante, la partie inférieure de la courbe présente dans le voisinage de l'origine une légère concavité (voir fig. 93), qui indique que, pour une certaine plage, sous l'action de faibles forces magnétisantes, la perméabilité est plus grande qu'au point initial. La concavité est plus prononcée dans le cas du fer écroui, de la fonte et de l'acier que dans celui du fer doux. Mais ces courbes diffèrent dans leurs détails même pour différents spécimens de la même sorte de fer. Dans l'étude des projets de dynamos, il convient de s'appuyer comme référence sur une série de courbes analogues à celles des figures 92 et 93 résultant d'essais soigneusement faits sur des échantillons de fer identique à celui qui doit être employé dans la construction.

Les calculs relatifs au circuit magnétique devant faire revenir ultérieurement à ces courbes, il est bon d'en obtenir des données aussi complètes que possible. Malheureusement un grand nombre d'ingénieurs anglais, peu familiarisés avec le système C. G. S. international ne s'accommoderaient par des expressions basées sur ce système auquel ils préfèrent par habitude les unités anglaises (pouces, pieds, livres, etc.). Cette routine oblige l'Auteur à doubler, dans un grand nombre de cas, ses symboles, coefficients, expressions, tableaux, etc.

[Nous serions, quant à nous, heureux de le féliciter d'avoir, par cette transition, ouvert la voie à l'extension d'un système universellement adopté et aussi simple que rationnel, s'il n'avait cru devoir, en maint autre endroit de son livre, sacrifier exclusivement aux habitudes nationales, en donnant, sans éléments de conversion, des chiffres et calculs en mesures anglaises à côté de mesures C. G. S. Il en résulte un mélange fâcheux, véritable chaos, parfois inextricable, qui déparerait son œuvre si, dans l'intérêt de tous, nous n'en avions rétabli l'homogénéité.]
(N. d. T.)

On remarquera que les courbes d'Hopkinson sont doubles : l'une correspond aux inductions ou aimantations croissantes, et l'autre, un peu supérieure à la première, aux inductions ou aimantations décroissantes. Ce point a peu d'importance dans une étude d'électro-aimants ; mais le fer, et particulièrement ses variétés dures, la fonte et l'acier, après avoir été soumis à une force magnétisante élevée, puis à une force magnétisante moindre, conservent, comme le montre l'expérience, un degré d'aimantation plus élevé que si on les avait soumis simplement à

la force magnétisante la plus basse. Par exemple, en se reportant à la figure 94 qui résume les deux précédentes, on voit que le fer forgé, soumis à une force magnétisante graduellement croissante de zéro à $\mathcal{H} = 30$, présente une induction de $\mathcal{B} = 14\ 250$ unités C. G. S. ; mais après que \mathcal{H} a été porté jusqu'au delà de 150, puis réduit de nouveau à 30, \mathcal{B} ne retombe plus à 14 250, mais seulement à 14 700. Tout échantillon de fer, dans lequel cette propriété se manifeste à un degré élevé ou pour lequel la courbe des aimantations descendantes diffère notablement de la courbe des aimantations ascendantes, est susceptible, dans

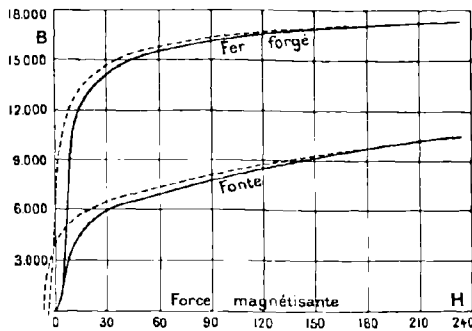


Fig. 94. — Courbes d'induction du fer.

son emploi à la construction d'une dynamo, de faire produire à celle-ci, après qu'elle a été fortement aimantée, un voltage plus élevé qu'antérieurement. Ce phénomène est plus sensible pour la fonte que pour le fer forgé, et beaucoup plus encore pour l'acier dur que pour les deux variétés précédentes. Dans les induits des dynamos, il ne faut employer que du fer aussi doux que possible. Pour les inducteurs, la plupart des constructeurs préfèrent le fer forgé ; mais quelques-uns emploient de la fonte douce bien recuite. Il existe très peu de cas où il vaille la peine de faire des calculs séparés pour les courbes d'aimantation ascendante et descendante, attendu que l'aimantation varie constamment soit en plus, soit en moins. En conséquence, pour les données numériques destinées aux calculs, nous prendrons la moyenne des deux courbes. Ces valeurs moyennes sont groupées dans le tableau I d'autre part (p. 140).

Les valeurs moyennes extraites du tableau I sont réunies sous forme de courbes à une échelle un peu plus grande dans les figure 95 et 96 ; les valeurs de \mathcal{B} sont portées en abscisses, et celles de \mathcal{H} en ordonnées ;

TABLEAU I. — (UNITÉS C. G. S.)

FER FORGÉ RECUIT			FONTE GRISE		
ℑ	μ	ℋ	ℑ	μ	ℋ
5000	3000	1,66	4000	800	5
9080	2250	4	5000	500	10
10000	2000	5	6000	279	21,5
11000	1692	6,5	7000	133	42
12000	1412	8,5	8000	100	80
13000	1083	12	9000	71	127
14000	823	17	10000	53	188
15000	526	28,5	11000	37	292
16000	320	50			
17000	161	105			
18000	90	200			
19000	54	350			
20000	30	666			

TABLEAU II. — VALEURS DE ℑ DANS CINQ ANNEAUX DE FER « CROWN »

DÉSIGNATION	G.	E.	F.	H.	K.
DIAMÈTRE MOYEN :	21,5	10,035	22,1	10,735	22,725
Épaisseur de la barre: (en cm)	2,535	1,298	1,292	0,7137	0,7544
Force magnétisante ℋ					
0,2	126	73	62	82	85
0,5	377	270	224	208	214
1	1 449	1 293	840	675	885
2	4 564	3 952	3 533	2 777	2 417
5	9 900	9 147	8 293	8 479	8 884
10	13 023	13 357	12 540	11 376	11 388
20	14 941	14 653	14 710	14 066	13 273
50	16 217	15 704	16 062	15 174	13 890
100	17 148	16 677	17 900	16 134	14 837

l'échelle en est placée à droite. Ces mêmes figures donnent également

pour \mathfrak{B} et μ des courbes très utiles dans les calculs; les échelles de μ sont placées à gauche.

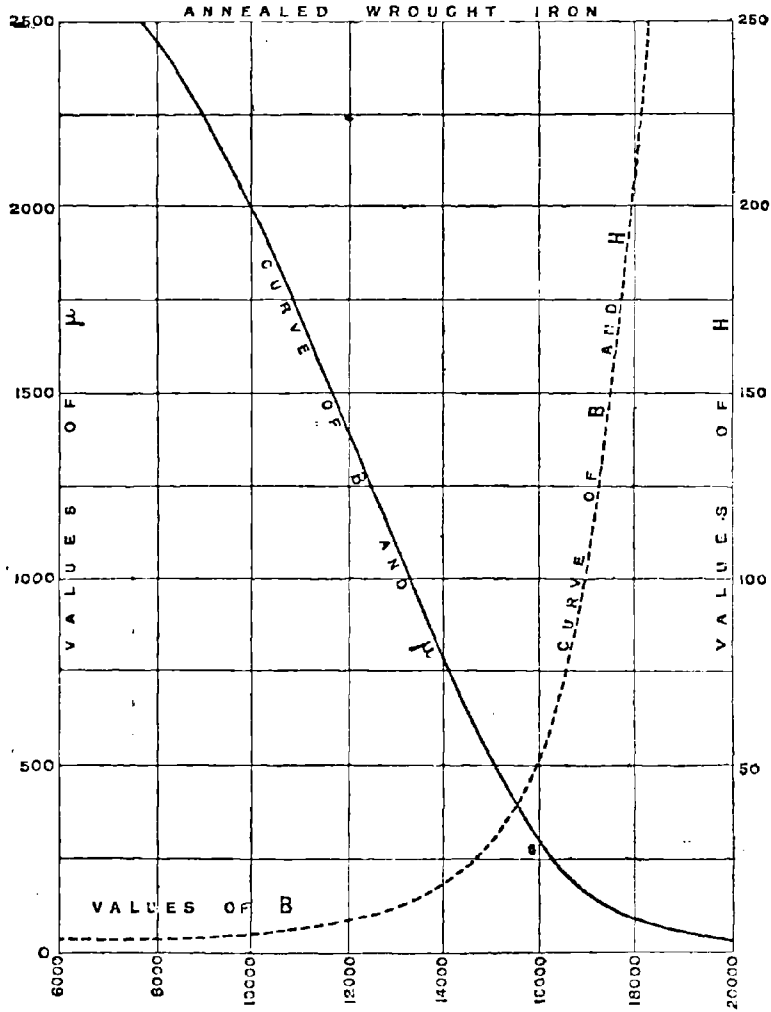


Fig. 95.

Annealed wrought Iron = Fer forgé recuit.

Values of μ , B, H = Valeurs de μ , \mathfrak{B} , \mathcal{H} .

Curve of B and μ = Courbe de \mathfrak{B} et de μ .

Curve of B and H = Courbe de \mathfrak{B} et de \mathcal{H} .

Bosanquet a trouvé pour cinq échantillons de fer « Crown » les données réunies dans le tableau II, p. 140.

Bosanquet a rencontré un anneau de fer de Lowmoor dépassant tous

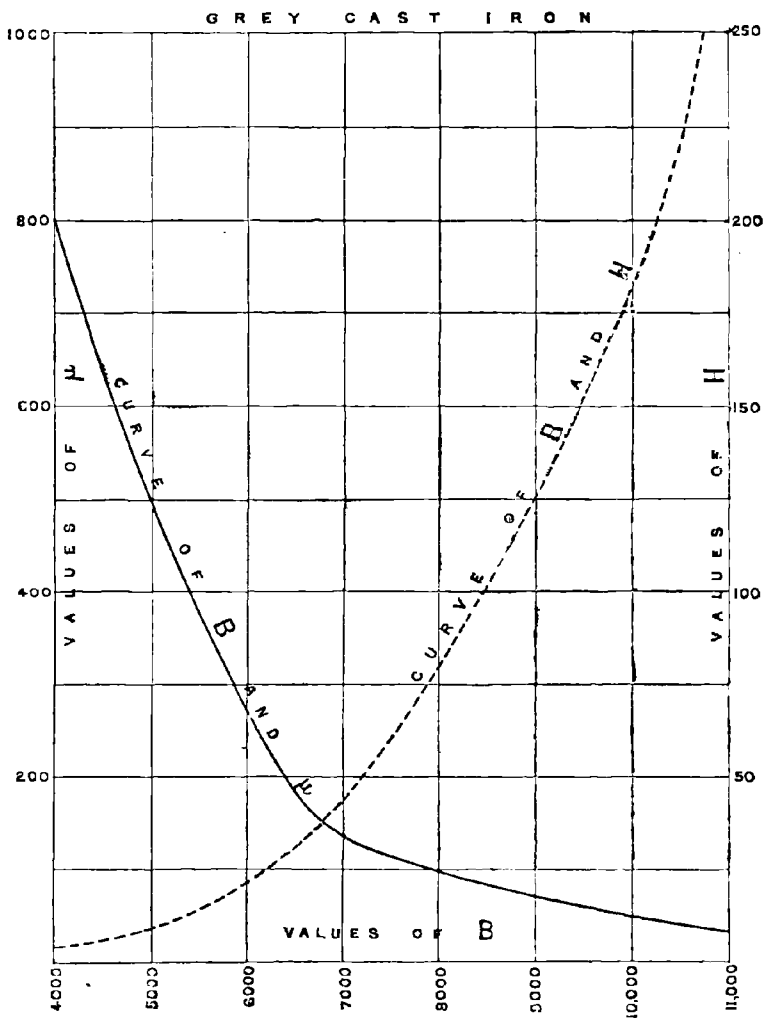


Fig. 96.

Grey cast Iron = Fonte grise.

Values of μ , B , H = Valeurs de μ , \mathfrak{B} , \mathcal{H} .

Curve of B and μ = Courbe de \mathfrak{B} et de μ .

Curve of B and H = Courbe de \mathfrak{B} et de \mathcal{H} .

les échantillons de fer « Crown » : pour $\mathcal{H} = 50$, il a trouvé \mathfrak{B} supérieur à 17 000; et, pour $\mathcal{H} = 100$, $\mathfrak{B} = 18\,300$ unités C. G. S.

Bidwell, qui a poussé plus loin l'aimantation, en employant la méthode d'arrachement, a obtenu les résultats suivants :

TABLEAU III. — (UNITÉS C. G. S.)

FER DOUX AU BOIS		
\mathfrak{B}	μ	\mathfrak{H}
7 390	1899,1	3,9
11 550	1121,4	10,3
15 460	386,4	40
17 330	150,7	115
18 470	88,8	208
19 330	45,3	427
19 820	33,9	585

Une autre manière très utile d'étudier comparativement les résultats obtenus par l'expérience consiste à construire des courbes analogues à celles de la figure 97, page 144, dans lesquelles les valeurs de la perméabilité sont portées en ordonnées par rapport aux valeurs de \mathfrak{B} portées en abscisses, comme dans les figures 95 et 96. On remarquera que, dans le cas de l'échantillon de fer doux recuit éprouvé par Hopkinson, entre les points $\mathfrak{B} = 7\ 000$ et $\mathfrak{B} = 16\ 000$, les valeurs moyennes de μ correspondent presque à une ligne droite et pourraient se calculer approximativement à l'aide de l'équation

$$\mu = \frac{17000 - \mathfrak{B}}{3,5} .$$

Limites de l'Aimantation et de la Perméabilité.

En considérant les résultats obtenus, on constatera que les courbes d'induction présentent toutes la même allure générale ; elles tendent vers un maximum pratique qui diffère cependant suivant les échantillons. Joule émettait l'opinion qu'*aucune intensité de courant ne pouvait donner une attraction égale à 14,216 kilogrammes par centimètre carré*, le maximum atteint par lui n'étant que de 12,474 kilogrammes par centimètre carré. Rowland estimait que la limite était

d'environ 13,381 kilogrammes par centimètre carré pour une bonne qualité ordinaire de fer, même avec une puissance d'excitation infiniment grande. Ce chiffre correspondrait *grosso modo* à une valeur-limite pour \mathfrak{H} de 17 500 unités C. G. S. Cette valeur a cependant été souvent dépassée. Bidwell a obtenu 19 820, ou peut-être même un peu

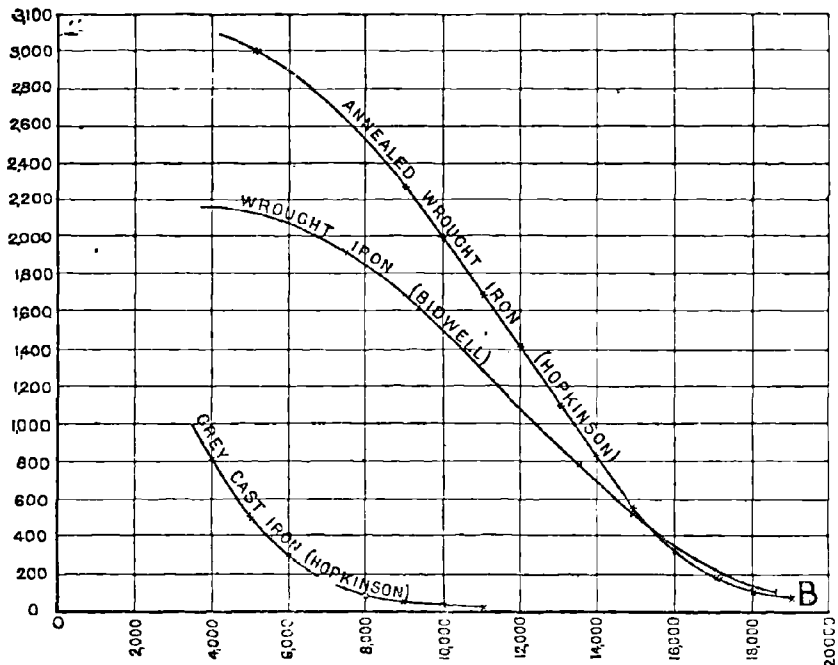


Fig. 97. — Courbes de Perméabilité en fonction de l'induction.

Annealed wrought Iron = Fer forgé recuit.

Wrought Iron = Fer forgé.

Grey cast Iron = Fonte grise.

plus, la valeur de \mathfrak{H} ayant été dans ses calculs inutilement déduite. Hopkinson donne 18 250 pour du fer forgé, et 19 840 pour de l'acier doux de Whitworth. Kapp indique 16 740 pour le fer forgé, 20 460 pour la tôle de fer au bois, et 23 250 pour le fer au bois en fil. Bosanquet a trouvé que la valeur la plus élevée, dans la région médiane d'un long barreau, s'élevait pour un échantillon jusqu'à 21 428, pour un autre à 29 388, et pour un troisième à 27 688. Ewing, en opérant avec une force magnétique extraordinaire par la méthode de « l'isthme »¹,

¹ Voir *Electrician*, XXV. 307, 1890.

a poussé la valeur de \mathfrak{B} dans du fer de Lowmoor jusqu'à 31 560 (quand μ tombait à 3), et ensuite à 45 350 unités. Ce dernier chiffre correspond à un effort d'arrachement dépassant 70 kilogrammes par centimètre carré.

Le tableau suivant donne quelques chiffres d'Ewing relatifs aux éléments magnétiques du fer de Suède dans des champs très intenses :

TABLEAU IV. — FER DE SUÈDE. (UNITÉS C. G. S.)

\mathfrak{H}	\mathfrak{B}	μ
1 490	22 660	15,20
3 600	24 650	6,85
6 070	27 130	4,47
8 600	30 270	3,52
18 310	38 960	2,13
19 450	40 820	2,10
19 880	41 140	2,07

La fonte de fer descend bien au-dessous de ces chiffres. Hopkinson, en employant une force magnétisante de 240 unités C. G. S., a trouvé, comme valeurs de \mathfrak{B} , 10 783 pour la fonte grise, 12 408 pour la fonte malléable, et 10 546 unités pour la fonte truitée. Ewing, avec une force magnétisante à peu près cinquante fois aussi grande, est arrivé à porter à 31 760 la valeur de \mathfrak{B} dans de la fonte. Le métal « mitis », qui est une sorte de fer forgé fondu, puisque c'est un fer forgé rendu fusible par l'addition d'une faible quantité d'aluminium, est, d'après les expériences de l'Auteur, plus magnétique que la fonte, et peu inférieur, à cet égard, au fer forgé. Il doit constituer une excellente matière pour les noyaux d'électro-aimants.

On a, dans un temps, attribué à \mathfrak{B} une valeur-limite aux environs de 20 000, par exemple, pour le fer forgé. Les chiffres obtenus par Ewing à l'aide d'énormes forces magnétisantes détruisent cette hypothèse; mais, d'autre part, ils montrent que $\mathfrak{B} - \mathfrak{H}$ tend vers une limite. En d'autres termes, l'élément de \mathfrak{B} directement dû à la présence du fer tend vers une limite réelle de saturation. Ce maximum paraît être de 21 360 environ pour le fer forgé, et de 15 580 unités pour la fonte.

Pour plus amples données magnétiques, le lecteur pourra se reporter aux travaux d'Hopkinson, Bosanquet, et Ewing, et particulièrement aux articles d'Ewing sur le Magnétisme, dans *The Electrician* de 1890-91. On trouvera un résumé méthodique des recherches de ces

savants, qui font autorité, dans le traité de l'Auteur sur « *L'Électro-aimant* ».

EFFETS DES ACTIONS EXTERNES SUR L'AIMANTATION

Effet des Espaces d'air dans un circuit magnétique. — Tous les résultats qui précèdent se réfèrent exclusivement à ce qui se passe dans le fer même : les courbes d'induction se rapportent uniquement aux substances magnétiques. Elles indiquent (en fonction de \mathcal{H}) la force magnétisante nécessaire pour faire passer \mathcal{B} unités C. G. S. à travers un simple centimètre cube de substance. Si l'on a affaire à un morceau réel de fer de plus d'un centimètre carré de section et de plus d'un centimètre de longueur, il suffit pour représenter les faits (en ce qui concerne le magnétisme purement intérieur du fer) de modifier l'échelle des courbes. Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'un anneau de fer formé avec un fragment de barre carrée de fer forgé recuit (du même échantillon que celui employé par Hopkinson), cette barre ayant 2 centimètres de côté et une longueur moyenne de 80 centimètres ; on n'a qu'à prendre comme coordonnées (au lieu de \mathcal{B} et de \mathcal{H}) le flux total Φ dans la section du fer, et \mathcal{H} , l'intégrale de la force magnétisante pour la longueur du circuit de fer.

En prenant pour point de départ la courbe de \mathcal{B} et de \mathcal{H} dans la figure 95, on aura à modifier les échelles de la manière suivante : — La section étant de 4 centimètres carrés, Φ pour un degré quelconque d'aimantation sera égal à quatre fois la valeur de \mathcal{B} correspondant au même degré d'aimantation. Par suite, sur l'échelle horizontale, le point $\mathcal{B} = 16\ 000$ deviendra alors $\Phi = 64\ 000$. Et, comme la longueur l de la barre est de 80 centimètres, le même point, qui représente actuellement $\mathcal{H} = 50$ sur l'échelle verticale (à droite) et donne la valeur correspondante de la force magnétisante, devra être marqué $\mathcal{H} = 4\ 000$. Par le fait de ces changements d'échelles, la courbe servira alors à représenter l'allure magnétique de l'anneau entier ; elle indiquera la force magnétisante intégrale qu'il faut développer (à l'aide d'un courant dans une bobine) pour amener le flux de force total Φ à un point voulu quelconque. \mathcal{H} étant connu, on calculera aisément le nombre d'ampères-tours nécessaire, puisque (suivant ce qui a été dit p. 121) le nombre d'ampères-tours multiplié par 1,257 est égal à l'intégrale de la force magnétisante exprimée en unités C. G. S.

Mais, s'il existe dans le circuit magnétique un intervalle d'air ou un espace occupé par une matière non magnétique, et si l'on admet que toutes ces substances possèdent une perméabilité égale à celle de l'air (c'est-à-dire = 1), il est évident que, pour forcer le même flux de force à travers une couche semblable, de perméabilité inférieure, il faudra augmenter le montant de la force magnétisante nécessaire.

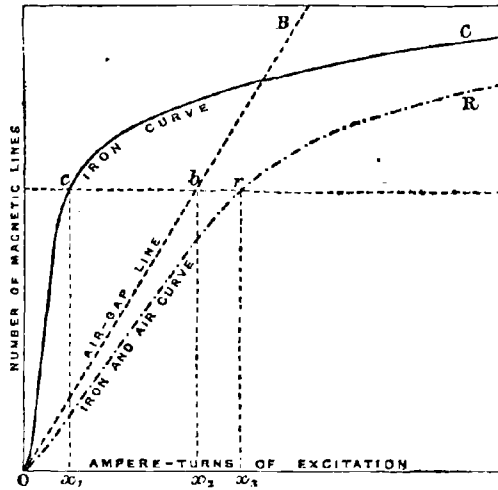


Fig. 98. — Flux d'induction (en fonction de l'excitation) dans un circuit magnétique avec entrefer.

Ampere-Turns of Excitation = Ampères-tours d'excitation.
Number of Magnetic Lines = Flux de force magnétique.
Iron Curve = Courbe du fer. — *Air-Gap Line* = Ligne de l'entrefer.
Iron and Air Curve = Courbe du fer et de l'entrefer.

Ce fait est mis en évidence par la figure 98, dans laquelle la courbe $O c C$ représente la relation entre le flux d'induction dans un barreau de fer et le nombre d'ampères-tours d'excitation $\left(\frac{\mathcal{H} l}{1,257}\right)$ nécessaire pour faire pénétrer dans le fer ce flux de force. Par exemple, pour atteindre la hauteur c , l'excitation doit avoir la valeur représentée par la longueur Ox_1 . Sur le même diagramme, la ligne $O b B$ représente la relation entre le flux de force à travers l'intervalle d'air et le nombre d'ampères-tours nécessaire pour y faire pénétrer ce flux. Si l'intervalle d'air avait 1 centimètre carré de section et 1 centimètre de longueur, 0,793 ampère-tour de courant produirait un champ $\mathcal{H} = \mathfrak{B} = 1$. Dans le cas actuel, l'intervalle est supposé avoir une section supérieure à 1 centimètre carré et une longueur moindre que 1 centimètre, la

courbe prenant une pente telle que la longueur Ox_3 représente les ampères-tours nécessaires pour porter le flux magnétique jusqu'à b , qui est sur l'échelle à la même hauteur que c . Il est en conséquence facile de réunir les deux éléments, car l'excitation totale nécessaire pour faire passer ce flux de force à travers l'air et le fer (abstraction faite des dérivations) sera la somme des deux excitations considérées séparément. Le point x_3 est choisi de telle sorte Ox_3 est égal à la somme de Ox_1 et de Ox_2 , ou que la distance du point r à l'axe vertical est égale à la somme des distances respectives de c et de b . En opérant de même pour un grand nombre de points correspondants, on pourra construire la courbe résultante $O r R$ à l'aide des deux courbes séparées. On constatera alors, en général, que la présence d'un espace non-magnétique dans un circuit magnétique a pour effet de faire incliner la courbe magnétique, *l'inclinaison initiale étant déterminée par l'espace d'air*.

Nous engageons le lecteur à étudier comparativement un certain nombre d'expériences intéressantes faites par M. Leduc ¹, de Paris, qui commet cependant une erreur en ce qui concerne les noyaux tubulaires.

Effet des Joints. — Etant maintenant en situation de calculer la force magnétique additionnelle nécessaire pour faire traverser un espace d'air à un flux magnétique, on est à même de discuter une question négligée jusqu'ici, savoir l'effet de la résistance des joints dans le fer d'un circuit magnétique. Les électro-aimants en fer à cheval ne sont pas toujours, en effet, constitués par un même barreau de fer recourbé; ils sont souvent formés de deux noyaux droits, épaulés et vissés ou rivés sur une culasse.

L'expérience seule permet de déterminer dans quelle mesure un plan de section transversale dans le fer s'oppose au passage du flux magnétique. Des armatures en contact avec les noyaux ne sont jamais en contact parfait; autrement, elles adhèreraient sans l'intervention d'aucune force magnétisante; elles ne sont qu'en contact imparfait, et le joint présente une résistance magnétique considérable. Cette question a été traitée en 1887 par le professeur J. J. Thomson et M. Newall, dans les « Cambridge Philosophical Society's *Proceedings* », et récemment, plus complètement, par le professeur Ewing dont les recherches sont publiées dans le *Philosophical Magazine* de septembre 1888. Ewing ne s'est pas borné à essayer les résultats fournis par le sectionnement et

¹ *La Lumière électrique*, XXVIII. 520, 1888.

l'opposition de deux surfaces bien planes; il a encore employé différentes forces magnétisantes et appliqué aussi sur le joint des pressions extérieures variables. Il est inutile pour l'instant de faire intervenir la question de pressions extérieures; il suffira de résumer dans le tableau V les résultats auxquels est arrivé Ewing en coupant son barreau de fer forgé, par des sections droites planes, d'abord en deux, puis en quatre, et enfin en huit morceaux. La perméabilité apparente du barreau diminuait, comme on le voit, à chaque sectionnement.

TABLEAU V

EFFET DES JOINTS DANS UN BARREAU DE FER FORGÉ (NON COMPRIMÉ)

\mathcal{H}	\mathcal{B}				ÉPAISSEUR moyenne de l'intervalle d'air équivalent par section.	ÉPAISSEUR de fer de résistance équivalente par section.
	Barreau d'une seule pièce.	Barreau coupé				
		en deux.	en quatre.	en huit.		
7,5	8 500	6 900	4 800	2 600	0,0036	4
15	13 400	11 550	8 900	5 550	0,0030	2,53
30	15 350	14 550	12 940	9 800	0,0020	1,40
50	16 400	15 950	15 000	13 300	0,0013	0,43
70	17 100	16 840	16 120	15 200	0,0009	0,22

Supposons qu'on travaille avec une induction poussée jusqu'à 16 000 unités C. G. S. environ (soit à peu près une attraction de 10,5 kilogrammes par centimètre carré) exigeant une force magnétisante $\mathcal{H} = 50$ environ; dès lors, en se reportant au tableau V, on verra que chaque joint transversal du fer présentera une résistance égale à celle qu'offrirait un espace d'air de 0,0013 centimètre d'épaisseur, ou encore qu'il augmentera la résistance autant que le ferait l'addition d'une couche supplémentaire de fer de 0,43 centimètre d'épaisseur. Pour de petites forces magnétisantes, l'effet d'un sectionnement transversal du fer avec une bonne surface de contact est à peu près le même que si l'on avait introduit une couche d'air de 0,0030 centimètre d'épaisseur ou que si l'on avait ajouté au circuit de fer 2,53 centimètres environ de longueur supplémentaire. Mais, pour de grandes forces magnétisantes, cette augmentation de résistance disparaît, probablement en raison de l'attraction des deux surfaces à travers la section. Cette action dans le

circuit magnétique, avec des forces magnétisantes élevées, allant jusqu'à 15 000 ou 20 000 unités C.G.S., détermine par elle-même une pression de 9,140 à 17,577 kilogrammes par centimètre carré, ce qui réduit considérablement ces résistances ; elles tombent par le fait à un vingtième environ de leur valeur initiale. En appliquant particulièrement des forces de compression s'élevant jusqu'à 226 kilogrammes par centimètre carré, qui, par elles-mêmes, auraient ordinairement diminué la capacité d'induction d'un barreau de fer continu, Ewing a trouvé que cette infériorité du fer lui-même dans ces conditions était sensiblement compensée par la meilleure conductibilité de la surface sectionnée. L'ancienne surface, sectionnée et comprimée de cette façon, se ferme, bien entendu, magnétiquement, mais n'agit pas comme s'il n'y avait eu aucun sectionnement ; on perd juste autant que l'on gagne, parce que le fer devient moins apte à s'aimanter.

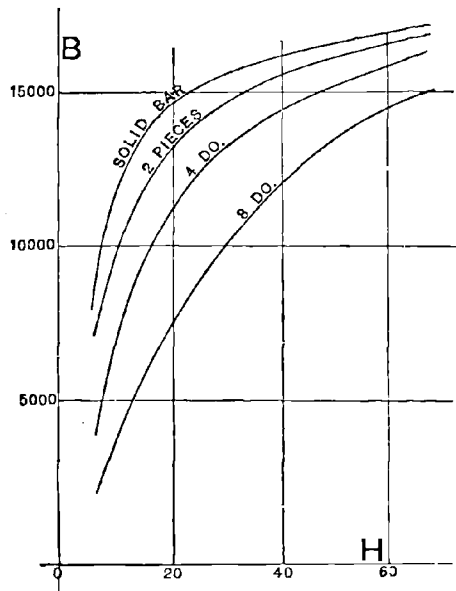


Fig. 99. — Courbes d'Ewing relatives à l'effet des joints.
Solid Bar = Barreau d'une seule pièce.

Les résultats ci-dessus obtenus par Ewing sont d'ailleurs représentés par les courbes magnétiques qui font l'objet de la figure 99. Quand les faces d'une section étaient soigneusement dressées suivant des plans parfaits, l'inconvénient du sectionnement était considérablement réduit

et disparaissait presque complètement sous l'action d'une forte pression extérieure.

L'influence de la compression était importante. Quand on appliquait au barreau de fer une compression de 226 kilogrammes par centimètre carré, le joint présentait, sous l'action de forces magnétiques croissantes, une résistance qui allait en diminuant au fur et à mesure qu'on augmentait cette force magnétique. Le tableau suivant donne les valeurs de \mathcal{H} et de \mathcal{B} dans le barreau en une seule pièce, puis dans le barreau sectionné, en même temps que l'épaisseur moyenne de l'espace d'air équivalent :

TABLEAU VI. — EFFET DE LA COMPRESSION DES JOINTS

\mathcal{H}	\mathcal{B} { sous une compression de 226 kg par centimètre carré.		ÉPAISSEUR MOYENNE de l'intervalle d'air équivalent.
	BARREAU en une seule pièce.	BARREAU coupé en huit.	
7,5	7 500	3 600	(Millimètres.) 0,020
10	10 000	4 900	0,019
20	13 900	8 300	0,018
30	15 200	10 700	0,017
50	16 500	13 750	0,014
70	17 200	15 700	0,007

Quand on essayait des charges variables, l'augmentation de charge, dans un champ magnétique faible, avait pour effet pratique de resserrer les joints bien dressés, comme l'indique le tableau suivant :

TABLEAU VII. — EFFET DE CHARGES VARIABLES SUR LES JOINTS

CHARGE Kg par cm ² .	\mathcal{B} (pour $\mathcal{H} = 5$)		ÉPAISSEUR de l'intervalle d'air équivalent.
	Avant sectionnement.	Après sectionnement et dressage.	
0	5 600	4 700	(Millimètres.) 0,022
56,5	5 400	4 670	0,020
131	4 700	4 200	0,017
169,5	4 050	3 800	0,010
226	3 650	3 650	0,000

Effet des Actions mécaniques. — Le changement d'état moléculaire d'un morceau de fer par actions mécaniques modifie ses propriétés magnétiques. Si l'on exerce une traction longitudinale sur du fer soumis à l'aimantation, on trouve tout d'abord que sa perméabilité augmente, tandis qu'une action latérale tendant à le comprimer diminue sa perméabilité. C'est ce qu'indiquent clairement les chiffres donnés dans la seconde colonne du tableau précédent. On y voit en effet qu'une compression de 226 kg par centimètre carré faisait tomber la valeur de \mathfrak{B} dans un barreau de fer forgé de 5 600 à 3 650 unités, ou diminuait la perméabilité de 1 120 à 730. L'état moléculaire influe également sur la douceur du fer. Un bout de fil de fer recuit, écroui ensuite par étirage, se comporte plutôt comme de l'acier, ainsi que l'indiquent les courbes d'Ewing, figure 88, page 129. Les efforts de torsion affectent aussi les qualités magnétiques. On peut, à cet égard, consulter les travaux d'Ewing sur le magnétisme.

Non moins important est le fait que toutes les actions telles que le martelage, l'enroulement, la torsion, et autres analogues, altèrent les qualités magnétiques du fer doux recuit. Des pièces de fer forgé recuit, vierges de tout contact d'outil, à la condition de ne pas constituer de circuits magnétiques réellement fermés, présentent à peine des traces d'aimantation résiduelle, même après l'application de forces magnétiques. Mais le contact de la lime les déflore immédiatement. Le martellement continu d'une armature d'électro-aimant venant frapper sur les pôles peut, à la longue, produire un effet analogue de durcissement du métal.

Effet des Vibrations. — En ce qui concerne le magnétisme, les vibrations ont pour effet de diminuer toutes les actions résiduelles et de faire que l'échantillon qui y est soumis acquiert plus rapidement l'état moyen correspondant à la force magnétique qui agit sur lui. Si l'on étudie ce qui se passe pour un échantillon de fer doux soumis à des vibrations rapides, on reconnaît que les courbes d'induction montante et descendante y relatives présentent à peine quelques différences. Un léger coup donné sur un fil de fer doux détruit immédiatement en lui tout magnétisme résiduel.

Effet de la Chaleur. — Quand on chauffe du fer, ses propriétés magnétiques subissent des changements singuliers. L'élévation de la température produit des effets divers suivant le degré d'aimantation, et ces effets diffèrent entre eux selon les substances. Dans le fer doux, pour des champs magnétiques de faible intensité, l'élévation de la tem-

pérature a pour effet de produire une augmentation de perméabilité, qui va en croissant jusqu'à ce que l'échantillon arrive au rouge vif, vers 760° C. Elle atteint alors l'énorme valeur de 10 000. Au-dessus de ce point elle tombe brusquement, et, quand il arrive à la température de 780° environ, le fer cesse d'être un corps magnétique; sa perméabilité à cette température et pour les températures plus élevées ne diffère pas sensiblement de celle de l'air ou du vide. Mais, si l'échantillon est placé dans un champ magnétique très intense, l'élévation de la température se traduit par une diminution de perméabilité, faible d'abord, puis plus rapide jusqu'à ce que cette température atteigne 780° C. A partir de là tout magnétisme disparaît comme précédemment. — En ce qui concerne l'acier, l'effet diffère d'une façon très curieuse. Pour les aciers durs, comme pour le fer doux, l'élévation de la température, dans un champ magnétique très faible, d'environ $\mathcal{H} = 0,2$, a pour résultat d'augmenter la perméabilité, jusqu'à ce que le corps soit échauffé à un point voisin de 760° C., au-dessus duquel cette perméabilité tombe brusquement à l'unité. Dans un champ pour lequel $\mathcal{H} = 2$ à peu près, l'aimantation du métal est plus grande aux températures plus basses, et l'abaissement final se produit à une température de beaucoup inférieure à 700° . Dans un champ intense de $\mathcal{H} = 40$, la perméabilité décroît d'une façon continue au fur et à mesure que la température s'élève. Pour de hautes températures, tous les effets résiduels sont également plus faibles.

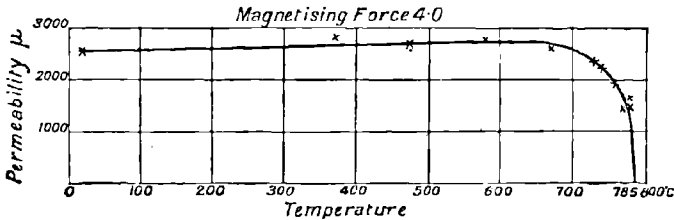


Fig. 100. — Effet de la chaleur sur la perméabilité du fer doux.

Permeability = Perméabilité.

Magnetising Force = Force magnétisante.

La figure 100 montre comment la température modifie la courbe magnétique du fer doux sous l'action d'une force magnétisante $\mathcal{H} = 4$: en même temps que la température s'élève, la perméabilité augmente progressivement, depuis 2 500 environ jusqu'à près de 3 000 correspondant à une température de 630° ; après quoi elle tombe à l'unité pour une température de 785° C.

MAGNÉTISME RÉSIDUEL OU RÉMANENT

Il est parfaitement connu que diverses substances magnétiques — la pierre d'aimant, l'acier, particulièrement l'acier dur, et les sortes de fer dures — conservent du magnétisme *résiduel* ou *rémanent* quand elles ont été soumises à des forces magnétiques. On sait également que des circuits fermés de fer doux, — même du plus doux possible —, présentent une quantité considérable de magnétisme résiduel tant qu'ils ne sont pas rompus. On en trouve une très simple démonstration dans un électro-aimant quelconque dont le noyau et l'armature bien ajustés constituent un circuit magnétique compact. Si on l'excite en y lançant un courant, et qu'on ouvre ensuite doucement le circuit d'excitation, l'armature ne l'abandonne généralement pas et exige même parfois l'application d'une force considérable pour se détacher ; mais, une fois détachée, elle ne peut plus adhérer aux noyaux, le magnétisme résiduel n'étant pas permanent. De même un aimant d'acier en fer à cheval, puissamment aimanté quand il est muni de son armature, peut se « sursaturer », c'est-à-dire prendre un degré d'aimantation supérieur à celui qu'il peut conserver d'une manière permanente, une portion de cette aimantation résiduelle disparaissant la première fois qu'on éloigne l'armature. Tous ces phénomènes résiduels font partie d'un vaste ensemble d'effets magnétiques subséquents. Au point de vue des causes que nous examinons ici, des forces magnétiques, si elles sont suffisamment puissantes, produisent sur les molécules d'un corps magnétique des effets qui subsistent après que la cause a cessé, et ont pour résultat que, si les causes changent d'une façon continue, les effets changent également d'une façon continue, mais subissent un retard *de phase*, l'effet retardant sur la cause. Ce phénomène ne doit pas être confondu avec un prétendu retard de temps dans l'action du magnétisme, retard auquel on a attribué bien des conséquences d'une tout autre origine. Les considérations ici présentées s'appliquent à des retards de phase plutôt que de temps, sans qu'il y ait à s'inquiéter de la façon plus ou moins rapide dont sont conduites les opérations elles-mêmes.

En se reportant à la figure 92 on voit que, si l'on augmente progressivement la force magnétisante \mathcal{H} depuis zéro jusqu'à une valeur élevée, et qu'on la ramène ensuite graduellement à zéro, l'induction intérieure résultante \mathcal{B} croît d'abord jusqu'à un maximum, pour décroître

ensuite, mais sans revenir à zéro. La courbe descendante depuis le maximum ne coïncide pas avec la courbe ascendante. En réalité, quand la force magnétisante avait complètement cessé d'agir, il restait (dans cet échantillon) un magnétisme résiduel de 7 300 unités environ. On a proposé de donner le nom de *rémanence* au nombre d'unités C. G. S. restant ainsi comme valeur résiduelle de \mathfrak{B} . Pour faire disparaître cette *rémanence*, il est nécessaire d'appliquer une force magnétisante négative. Supposons qu'on ait fait usage d'une force magnétisante suffisante, la courbe descendra et coupera l'axe horizontal en un point à gauche de l'origine; et, avec des forces magnétisantes négatives plus élevées, l'échantillon considéré commencera à être aimanté par un flux d'induction qui le pénétrera en sens contraire. La valeur particulière de la force magnétisante négative nécessaire pour ramener à zéro le magnétisme rémanent a reçu d'Hopkinson le nom de *force coercitive*. Dans l'échantillon de fer forgé en question, la force coercitive (en unités C. G. S.) est de 2 environ. La force ainsi nécessaire pour dépouiller un échantillon quelconque de son magnétisme rémanent peut servir de mesure à la tendance que possède le fer de la qualité considérée à retenir une aimantation permanente. Les fers et aciers durs présentent toujours une force coercitive plus grande que les fers doux. Ainsi, celle du fer doux forgé étant 2, celle de l'acier dur peut s'élever jusqu'à 50.

HYSTÉRÉSIS

Le professeur Ewing, qui a particulièrement étudié les effets résiduels présentés par diverses qualités de fer et d'acier, a donné le nom d'*hystérésis* à cette tendance des effets à retarder, en phase, sur les causes qui les produisent. La manière la plus convenable d'étudier l'hystérésis consiste à soumettre l'échantillon examiné à un cycle complet (ou à un certain nombre de cycles successifs) de forces magnétisantes. On peut, par exemple, faire partir la force magnétisante de zéro et la faire croître jusqu'à une valeur élevée (soit jusqu'à $\mathcal{H} = 200$), puis la faire décroître jusqu'à zéro, la renverser ensuite pour la porter à une haute valeur négative, et enfin la faire de nouveau passer par zéro. Un cycle de ce genre est représenté par la figure 101, qui est empruntée aux recherches d'Ewing et se rapporte à une série d'expériences faites sur un fragment de corde à piano en acier recuit. La courbe commence au milieu du diagramme, et, au fur et à mesure que \mathcal{H} augmente positivement, elle s'élève en présentant d'abord une

convexité vers la droite, puis elle se redresse pour s'infléchir ensuite, et, quand $\mathcal{H} = 90$, \mathcal{B} s'est élevé un peu au-dessus de 14 000. Quand on ramène ensuite \mathcal{H} à zéro, la courbe revient en arrière sur elle-même, mais ne s'abaisse pas aussi vite qu'elle s'est élevée tout d'abord. En effet, quand \mathcal{H} est réduit à 20, \mathcal{B} n'est retombé qu'à 12 000, et, quand $\mathcal{H} = 0$, la rémanence est d'environ 10 500. Si, à partir de ce point, on avait de nouveau fait croître \mathcal{H} jusqu'à 90, \mathcal{B} serait remonté à 14 000,

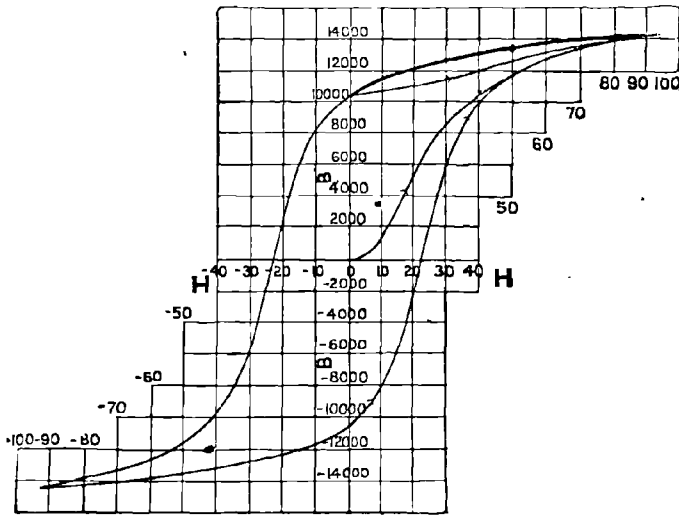


Fig. 101. — Cycle magnétique sur un fil d'acier recuit (Hystérésis).

comme l'indique le trait fin. Si, cependant, la force magnétisante est renversée, la courbe descend sur la gauche, et coupe l'axe horizontal à -24 , qui est dès lors la force coercitive. En augmentant la force magnétisante renversée jusqu'à $\mathcal{H} = -90$, l'aimantation inverse croît jusqu'à la valeur $\mathcal{B} = -14\,000$, ou un peu plus. Ensuite, quand ces forces magnétisantes inverses sont ramenées à zéro, la courbe revient vers la droite, en croisant l'axe vertical en $\mathcal{B} = -10\,500$ (rémanence négative); et, si l'on renverse de nouveau la force magnétisante, on trouve que, pour $\mathcal{H} = +24$, l'aimantation repasse encore une fois par la valeur zéro. A partir de ce point, l'augmentation de \mathcal{H} fait remonter très rapidement l'induction, qui, sans suivre exactement son premier tracé, arrive cependant à la même hauteur que précédemment, quand \mathcal{H} a atteint le même maximum de 90 unités C. G. S.

Cycles d'aimantation. — Ces cycles d'aimantation, tels que nous

venons de les décrire comportent toujours, quand on les rapporte à un spécimen quelconque de fer ou d'acier, des courbes qui embrassent, comme dans la figure 101, une surface fermée. Warburg¹ et Ewing² ont montré que ce fait a une signification spéciale; la surface fermée est en effet une mesure du travail dépensé pour faire parcourir au fer un cycle complet d'aimantations. Comme la surface circonscrite sur la carte à diagramme d'une machine à vapeur donne une mesure de la chaleur transformée en travail utile dans le cycle d'opérations effectué par la machine, de même, dans le cycle magnétique, la surface enveloppée par la courbe est une mesure du travail transformé en chaleur (inutile)³.

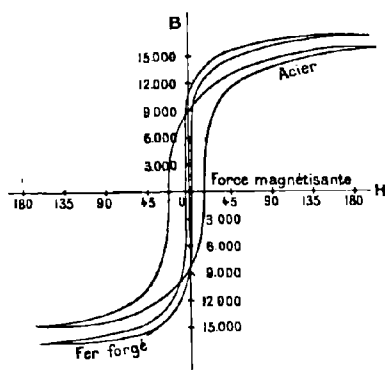


Fig. 102. — Hystérésis dans le fer forgé et l'acier.

A titre de comparaison, la figure 102 reproduit, côte à côte, deux courbes, l'une pour le fer forgé, l'autre pour l'acier. Dans tous les cas, la surface fermée représente le travail consommé ou dissipé dans le passage du fer par les divers états correspondant à ces forces magnétisantes alternatives. Pour du fer très doux, qui présente des courbes

¹ *Wied. Ann.*, XIII. 141, 1881.

² *Proc. Roy. Soc.*, XXXI. 22, 1881; XXXIV. 39, 1884 et XXXV. 1, 1885; et *Phil. Trans.*, pt. II. 523, 1885.

³ On peut démontrer mathématiquement ce fait. — Dans un champ magnétique d'intensité \mathcal{H} il faut \mathcal{H} unités de travail pour faire mouvoir une unité de magnétisme sur une longueur de 1 centimètre contre les forces magnétisantes. Par suite, comme un flux de 4π unités correspond à chaque unité de magnétisme, le travail effectué dans un cycle complet sur un seul centimètre cube du fer sera égal à $\frac{1}{4\pi} \int \mathcal{H} d\mathcal{B}$. Si \mathcal{H} et \mathcal{B} sont exprimés en unités C. G. S., le travail sera donné en ergs par centimètre cube. En multipliant ce nombre par le nombre de cycles par seconde et le divisant par 10^7 , on obtiendra en watts la puissance dissipée.

ascendante et descendante très voisines l'une de l'autre, la surface fermée est petite ; et en fait, il est dissipé très peu d'énergie dans un cycle d'opérations magnétiques. D'autre part, pour du fer commun, et particulièrement de l'acier, il existe un grand écart entre les deux courbes et il y a une dépense considérable d'énergie. L'hystérésis peut être regardée comme une sorte de friction magnétique interne ou moléculaire, par suite de laquelle des aimantations alternatives déterminent l'échauffement du fer. De là l'importance de bien comprendre ce curieux effet, en vue de la construction des électro-aimants destinés à être employés avec des courants alternatifs de grande fréquence. Les chiffres du tableau VIII ci-dessous indiquent le nombre de watts ($1 \text{ watt} = \frac{1}{736}$ de cheval-vapeur) consommés par hystérésis dans de la tôle de fer doux forgé soumise à une succession de cycles rapides d'aimantation :

TABLEAU VIII. — PUISSANCE DISSIPÉE PAR HYSTÉRÉSIS

B	WATTS DISSIPÉS PAR CENTIMÈTRE CUBE	
	à 10 cycles par seconde.	à 100 cycles par seconde.
4 000	0,0014	0,014
5 000	0,0020	0,020
6 000	0,0026	0,026
7 000	0,0032	0,032
8 000	0,0039	0,039
10 000	0,0055	0,055
12 000	0,0072	0,072
14 000	0,0092	0,092
16 000	0,0114	0,114
17 000	0,0139	0,139
18 000	0,0172	0,172

On remarquera que la perte de puissance augmente d'une manière disproportionnée au fur et à mesure qu'on pousse plus loin l'aimantation ; ainsi, cette perte, pour $B = 18\ 000$, est égale à six fois sa valeur pour $B = 6\ 000$. Dans le cas du fer ordinaire ou de l'acier cette perte en échauffement serait beaucoup plus élevée.

Hopkinson a consigné cette remarque que la surface $\int \mathcal{H}_d B$ est sensiblement égale à celle d'un rectangle dont la longueur représenterait le double de la rémanence, et la largeur le double de la force coercitive.

Ewing donne les valeurs suivantes pour l'énergie dissipée par hystérésis dans un cycle magnétique d'aimantation puissante, relevées sur divers échantillons de fer et d'acier :

TABLEAU IX. — DISSIPATION D'ÉNERGIE PAR HYSTÉRÉSIS

ÉCHANTILLONS SOUMIS A L'ÉPREUVE	Ergs par cm ³ perdus dans un cycle complet d'aimantation.
Fer recuit très doux	9 300
Fer recuit moins doux	16 300
Fil de fer étiré dur.	60 000
Fil d'acier recuit	70 500
Fil d'acier trempé très dur.	76 000
Corde d'acier à piano (état ordinaire)	116 000
— — (recuite)	94 000
— — (trempée très dure)	117 000

Ces chiffres sont inférieurs à ceux fournis par certains échantillons étudiés par Hopkinson qui a trouvé, pour l'acier au tungstène trempé à l'huile (sorte préférée pour la construction des aimants permanents, en raison de sa force coercitive élevée), une perte allant jusqu'à 216 864 ergs par centimètre cube et par cycle.

Ewing a montré que les vibrations tendent à détruire les effets résiduels. Le Dr Finzi¹ a trouvé également que des noyaux de fer soumis à un courant électrique alternatif ne présentaient pas d'hystérésis, les courbes d'aimantation ascendante et descendante coïncidant entre elles. On conçoit en effet qu'une très rapide fréquence doive donner lieu à une moindre perte de travail par cycle que n'en absorberait le même cycle lentement effectué.

Quand un noyau d'induit tourne dans un champ magnétique intense, l'aimantation du fer parcourt continuellement un cycle, mais d'une manière absolument différente de ce qui se passe quand la force magnétisante est périodiquement renversée, comme dans le noyau d'un transformateur. Mordey² a trouvé que les pertes par hystérésis sont un peu plus faibles dans le premier cas que dans le second.

¹ *The Electrician*, XXVI. 72, 3 avril 1891.

² Voir également Ewing, dans *The Electrician*, XXVII. 602, 1891.

AIMANTATION PROGRESSIVE

Ewing a découvert un autre genre d'effet subséquent auquel il a donné le nom d' « *hystérésis visqueuse* ». Il a ainsi désigné l'accroissement progressif d'aimantation qui se produit quand on applique à un morceau de fer une force magnétisante d'une régularité absolue. Cet accroissement graduel peut durer une demi-heure et même davantage, et atteindre plusieurs centièmes de l'aimantation totale. Il y a là un véritable, mais lent, retard magnétique qu'il faut bien se garder de confondre soit avec le retard de phase précédemment étudié sous le nom d'hystérésis, soit avec le retard apparent dû à l'action de la self-induction sur le courant magnétisant, soit enfin avec le retard apparent que l'on peut observer dans les noyaux de fer massifs et qui est dû à des courants parasites se développant dans la masse même du fer.

EXPRESSION DE LA LOI DE L'ÉLECTRO-AIMANT

On a essayé bien des fois d'exprimer par une formule pratique la quantité de magnétisme produite, dans un électro-aimant donné, par un courant d'excitation d'une valeur déterminée quelconque. Ces expressions ont fait l'objet d'une étude très minutieuse dans les précédentes éditions anglaises. Comme elles ne reposent pas sur le principe du circuit magnétique, elles ont le défaut de ne pas tenir compte des faits multiples qui se présentent. Etant donné d'ailleurs qu'on n'en fait pas usage dans les projets d'étude de dynamos, elles peuvent être très sommairement résumées. Elles ont toutes pour objet de donner l'équation algébrique des courbes d'induction ou d'aimantation analogues à celle représentée par la figure 92, page 136.

La première conception de Lenz et de Jacobi était une simple proportionnalité entre le courant d'excitation (c'est-à-dire les ampères-tours) et le magnétisme produit. Ceci revenait à dire que la courbe d'induction est une ligne droite qui va en s'élevant à partir de l'origine. — Joule a montré que cette loi n'était pas exacte, la saturation intervenant pour une force magnétisante suffisante. — Müller (suivi par Von Waltenhofen, Kapp, et autres) proposa une formule d'arc-tangente, prétendant que, si le courant d'excitation est représenté par la longueur d'une droite mené tangentiellement à un cercle, l'arc correspondant représentera la quantité de magnétisme engendré. Cette interprétation fixe une saturation limite (quand, en effet, la tangente est infiniment longue, l'arc atteint une valeur finie), mais elle ne représente pas les faits pour les premières valeurs de l'aimantation. — Lamont, s'appuyant sur des considéra-

tions théoriques, proposa une formule exponentielle, dont il déduisit une expression approchée

$$m = \frac{Mkx}{1 + kx},$$

dans laquelle m est le magnétisme à un degré quelconque, M la valeur maximum qu'il peut atteindre, x le courant d'excitation, et k une constante dépendant des unités employées. L'interprétation de cette expression revient à dire que le rapport de m à x (en d'autres termes, la perméabilité) est, à tous les degrés d'aimantation, proportionnel à ce qui manque pour que la saturation soit complète, soit à $M - m$.

Formule de Frölich. — La formule de Lamont a été remise au jour par Frölich¹, et largement employée sous diverses formes par différents écrivains, parmi lesquels l'Auteur de cet ouvrage. Supposons que le flux magnétique Φ ait, à complète saturation, une valeur maximum $\bar{\Phi}$, et que la capacité d'aimantation de l'électro-aimant, soit, à tout degré d'aimantation, proportionnelle à la place laissée pour un flux magnétique $\bar{\Phi} - \Phi$. Désignons maintenant par N_s le nombre de spires du circuit d'excitation et par i le courant qui les parcourt; $N_s i$ sera le nombre d'ampères-tours d'excitation, et $\frac{\Phi}{N_s i}$ le rapport du magnétisme à la force magnétisante. On peut dès lors écrire

$$\frac{\Phi}{N_s i} = \frac{\bar{\Phi} - \Phi}{h},$$

h étant une constante spéciale à l'électro-aimant, et dont on va voir la nature. Par simple transformation cette équation devient

$$\Phi = \bar{\Phi} \frac{N_s i}{N_s i + h},$$

et il est évident que la valeur de h est le nombre particulier d'ampères-tours qui réduira la capacité magnétique à la moitié de sa valeur initiale, ou portera le magnétisme à demi-saturation.

L'Auteur a désigné ce nombre d'ampères-tours sous le nom de nombre *diacritique* et a appelé courant *diacritique* celui qui produit la demi-saturation. Le docteur Frölich est, de son côté, arrivé à la même conception, et l'a appliquée à sa formule des dynamos. Le raisonnement lui appartient; mais la notation ici employée est celle de l'Auteur. Si l'on désigne par $(N_s i)'$ le nombre diacritique d'ampères-tours, on a $(N_s i)' = h$, d'où

$$\Phi = \bar{\Phi} \frac{N_s i}{N_s i + (N_s i)'}$$

Mais, si N_s est connu, on peut ne pas en tenir compte et écrire simplement

$$\Phi = \bar{\Phi} \frac{i}{i + i'}$$

¹ *Elektrotechnische Zeitschrift*, p. 90, 139, 170, 1881; et p. 73, 1882.

expression dans laquelle i' est le courant diacritique ou celui qui produit la demi-saturation. Cette équation très simple est approximativement exacte pour tout électro-aimant excité par un seul courant. Deux observations faites sur un électro-aimant quelconque suffisent à déterminer les deux constantes Φ et i' . De plus, si r est la résistance de la bobine magnétisante, comme $ir = e$ (potentiel nécessaire pour lancer le courant i dans la bobine), on peut naturellement écrire l'équation ci-dessus sous la forme

$$\Phi = \bar{\Phi} \frac{e}{e + e'};$$

e' est la différence de potentiel diacritique, c'est-à-dire la différence de potentiel qui, appliquée à la bobine de N_s spires et de résistance r , saturera le noyau à demi. Cette dernière forme est la plus convenable pour les calculs à effectuer sur les machines shunt, tandis que la précédente convient mieux pour l'application aux dynamos en série.

Aucune de ces expressions ne tient compte des phénomènes auxquels il est fait allusion page 138, comme observés dans l'aimantation d'un grand nombre de barreaux (et en particulier dans des anneaux fermés) de fer et d'acier, savoir, qu'il existe un accroissement apparent de perméabilité après qu'on a atteint un premier degré déterminé d'aimantation. Lenz est le premier à l'avoir consigné en 1854. Wiedemann, Dub, Stoletow, Rowland, Chwolson, Bosanquet, et Siemens ont tous approfondi cette question. Rowland, Bosanquet et Ewing ont notamment donné des déterminations numériques très soigneusement faites sur les variations de la perméabilité à divers degrés d'aimantation ascendante. Les recherches de Chwolson et de Siemens semblent cependant prouver que l'augmentation apparente de perméabilité est due à un défaut d'homogénéité dans le fer, et à la présence d'une certaine proportion de molécules douées des propriétés de l'acier dur et exigeant un certain minimum de force magnétisante avant de s'aimanter sensiblement. Il en résulterait un accroissement en apparence plus rapide du magnétisme quand ce point est atteint. Dans cette hypothèse, la perméabilité due au magnétisme temporaire commencerait par être un maximum et diminuerait ensuite en même temps que la force magnétisante augmenterait; tandis que la perméabilité due au magnétisme rémanent serait l'unité d'abord et jusqu'à un certain degré, à partir duquel elle s'élèverait d'elle-même jusqu'à un maximum, pour redescendre ensuite graduellement. Ce que Stoletow, Rowland et Bosanquet se sont appliqués à mesurer minutieusement, c'est la somme de ces deux effets. Siemens consigne cette remarque importante que, plus est dur l'échantillon de fer ou d'acier, plus se trouve reculé le point où l'on observe ce maximum apparent de perméabilité magnétique.

La superposition de ces effets dans la machine dynamo a pour résultat que, quand on en prend la « caractéristique » avec des intensités croissantes de courant, on peut observer, — mais ce phénomène se marque uniquement dans les dynamos dont le fer constitue un circuit très sensiblement fermé sur lui-même —, une concavité dans la première partie de la courbe, concavité qui, ainsi qu'on l'a vu page 138, est souvent prise pour une droite oblique. Mais, si la caractéristique est prise avec des intensités décroissantes de courant, on n'observe pas

de concavité de ce genre, et le magnétisme des inducteurs, aussi bien que la force électromotrice, ont alors des valeurs notablement plus élevées, pour une même valeur du courant d'excitation, que dans la courbe ascendante. La présence de magnétisme rémanent dans les noyaux est en conséquence nuisible à la fixité du champ. Même avec le fer de Suède le plus doux, on peut observer des différences dans la force électromotrice, à la même vitesse et pour le même courant d'excitation, avant et après que ce courant a été porté à une haute intensité. Aussi, la formule approchée connue sous le nom de formule de Frölich est-elle suffisamment bonne comme première approximation, bien qu'elle ne tienne pas compte de la présence de l'augmentation apparente de perméabilité ou du retard apparent de maximum dans des noyaux doués d'une plus grande force coercitive. — Pour plus amples renseignements sur les différences existant entre les courbes de magnétisme ascendante et descendante, nous renvoyons le lecteur aux recherches de Warburg, Ewing, et Hopkinson, ou au résumé qui en est donné dans la première partie de ce chapitre.

Théorie moléculaire du Magnétisme, d'Ewing. — La récente théorie d'Ewing sur le magnétisme induit tient compte des effets observés, mais ne se prête pas à une expression simple. Il a montré ¹ que tous les phénomènes d'hystérésis, de rémanence, d'influence des actions mécaniques, de la chaleur, et autres analogues, pouvaient s'expliquer par l'hypothèse que les molécules individuelles, se comportant comme des aimants élémentaires, sont soumises à des actions directrices mutuelles. Il suppose, avec Weber, que le fait de l'aimantation consiste à orienter ces molécules suivant la direction de la force magnétique, la saturation complète se trouvant atteinte quand elles ont toutes complètement effectué cette rotation sur elles-mêmes. Il explique l'augmentation apparente de perméabilité quand la force magnétisante a atteint une certaine valeur en montrant que, à un certain degré, il y a instabilité, le plus petit accroissement de force magnétisante déterminant un grand nombre d'aimants moléculaires à évoluer brusquement pour prendre de nouvelles positions. Il a montré en outre que, dans un appareil formé d'un grand nombre de petits aimants montés sur pivots et s'influçant mutuellement, les propriétés magnétiques pouvaient s'expliquer par l'examen des configurations résultant des positions prises par le système sous l'action réunie des forces magnétiques externes et internes. M. A. Hoopes ² a vérifié la théorie d'Ewing en étudiant les propriétés magnétiques d'un assemblage de petites aiguilles montées sur pivots et agissant comme un tout ; il a trouvé que le système présentait des instabilités et des effets d'hystérésis semblables à ceux qu'on constate pour des masses de fer.

Réductivité magnétique. — Kennelly ³ a désigné sous le nom de « réductivité » l'inverse de la perméabilité magnétique. Si, sur \mathcal{H} comme abscisses, on groupe en une courbe les valeurs observées pour cette grandeur,

¹ *Proc. Roy. Soc.*, 19 juin 1890 ; et *The Electrician*, XXV. 514 et 541.

² *Electrical World*, XVII. 358, 1891.

³ *Ibid.*, XVIII. 350, 1891.

la courbe ainsi tracée est sensiblement une ligne droite, c'est-à-dire que cette grandeur est une fonction linéaire de \mathcal{H} , de la forme $a + b\mathcal{H}$. Cette ligne oblique est simplement la réciproque des courbes hyperboliques trouvées par Stoletow et autres pour μ et \mathcal{H} . Comme l'a fait remarquer Fleming¹, et plus récemment Kennelly, le fait que la réductivité se rapproche autant d'une fonction linéaire de \mathcal{H} est une justification de la formule empirique de Frölich donnée ci-dessus, page 161.

¹ *Journ. Inst. Electrical Engineers*, XV. 570, 1886.

CHAPITRE VII

LE CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Le progrès le plus important réalisé dans la solution pratique des problèmes magnétiques a été la conception du circuit magnétique avec ses conséquences. Ce principe peut brièvement s'énoncer ainsi : *on obtient un maximum de magnétisme efficace avec une dépense minimum de force magnétisante quand l'élément-fer de la dynamo (noyaux des inducteurs, bâti, pièces polaires, et noyau de l'induit) est disposé de manière à constituer dans son ensemble un circuit magnétique présentant un minimum de résistance magnétique.*

Ce n'est pas une idée nouvelle que de considérer le magnétisme d'un aimant comme suivant une trajectoire fixe ou circulant autour d'elle plus librement dans certaines substances, telles que le fer, que dans d'autres matières relativement non-magnétiques. On trouve dans l'histoire de la science de nombreuses analogies relevées entre le flux d'électricité dans un circuit électriquement conducteur et le passage du flux de force à travers des circuits possédant une conductibilité magnétique. — Dès 1821, Cumming¹ fit des expériences sur la conductibilité magnétique. — L'idée de circuit magnétique hanta plus ou moins les esprits de Ritchie², Sturgeon³, Dove⁴, Dub⁵, et de la Rive⁶, parmi lesquels ce dernier emploie explicitement l'expression de « circuit magnétique fermé ». — Joule⁷ trouva que la puissance maximum d'un électro-aimant était proportionnelle à « la moindre section du circuit magnétique entier », et considéra la résistance à l'induction comme

¹ *Camb. Phil. Trans.*, 2 avril 1821.

² *Phil. Mag.*, série III. t. III. 122.

³ *Ann. of Electr.*, XII. 217.

⁴ *Pogg. Ann.*, XXIX. 462, 1833. Voir aussi *Pogg. Ann.*, XLIII. 517, 1838.

⁵ Dub, *Elektromagnetismus*, p. 401 (éd. 1816) ; et *Pogg. Ann.*, XC. 440, 1853.

⁶ De la Rive, *Treatise on Electricity* (traduction Walker), I. 292.

⁷ *Ann. of Electr.*, IV. 59, 1839 ; V. 195, 1841 ; et *Scientific Papers*, p. 8, 34, 35, 36.

proportionnelle à la longueur du circuit magnétique.—Faraday¹ estima avoir *prouvé* que chaque ligne de force magnétique constituait une courbe fermée; que la trajectoire de ces courbes fermées dépendait de la conductibilité magnétique des masses disposées dans le voisinage; que ces lignes de force magnétique étaient tout à fait analogues aux lignes de flux électrique dans un circuit électrique. Il parle d'un aimant plongé dans l'air comme strictement comparable à une pile voltaïque immergée dans l'eau ou dans tout autre électrolyte. Il vit même l'existence d'une cause analogue à la force électromotrice dans les circuits électriques, bien que le nom de force *magnétomotrice* soit d'une origine plus récente. — La même idée est plus ou moins explicitement admise dans la dernière moitié des travaux de sir William Thomson réunis en volume sous le titre de « *Électrostatique et Magnétisme* ». — La notion de la conductibilité magnétique se trouve aussi dans le grand traité de Maxwell (t. II, p. 51); mais elle n'y est que sommairement mentionnée.—Rowland², en 1873, adopta le raisonnement et le langage de Faraday dans l'exposition de quelques résultats nouveaux sur la perméabilité magnétique, et fit ressortir que le flux des lignes magnétiques de force à travers un barreau pouvait être exactement soumis au calcul; la loi élémentaire est, dit-il, « semblable à la loi d'Ohm ». Désignant par R la « résistance aux lignes de force », par M « la force magnétisante d'un solénoïde », et par Q le nombre des « lignes de force dans un barreau en un point quelconque », il posa, pour un cas particulier (un aimant en anneau, présentant en conséquence un circuit magnétique fermé), l'équation

$$Q = \frac{M}{R},$$

expression que tout électricien reconnaîtra immédiatement comme étant précisément pour le circuit magnétique celle de la loi d'Ohm pour le circuit électrique. Il appliqua le calcul à la détermination de la perméabilité de certains échantillons de fer, d'acier et de nickel. — En 1882³, puis en 1883⁴, M. R. H. M. Bosanquet développa plus longuement un

¹ *Experimental Researches*, III. art. 3117, 3228, 3230, 3260, 3271, 3276, 3294 et 3361.

² *Phil. Mag.*, série IV. t. XLVI. août 1873, « De la perméabilité magnétique et du magnétisme maximum du fer, de l'acier et du nickel ».

³ *Proc. Roy. Soc.*, XXXIV. 445, décembre 1882.

⁴ *Phil. Mag.*, série V. t. XV. 205, mars 1883, « De la force magnétomotrice »; *Ibid.*, XIX. février 1885; et *Proc. Roy. Soc.*, n° 223, 1883. Voir également *Electrician*, XIV. 201, 14 février 1885.

raisonnement analogue, en employant la très juste expression de « force magnétomotrice » pour spécifier la force tendant à faire passer les lignes magnétiques d'induction à travers la « résistance magnétique » ou « réluctance » du circuit. Dans ses travaux les calculs sont systématiquement déduits et ne traitent pas seulement les propriétés spécifiques du fer, mais aussi des problèmes résultant des formes du fer. Bosanquet indique la manière de calculer les diverses résistances de chacune des parties du circuit; il les additionne ensuite pour arriver à la résistance totale du circuit magnétique.

Antérieurement, cependant, lord Elphinstone et M. Vincent étaient partis du principe du circuit magnétique pour en faire l'application à la construction de machines dynamo-électriques. En deux circonstances¹ ils communiquèrent à la Société Royale de Londres les résultats d'expériences destinées à montrer qu'un même courant d'excitation développait une plus grande quantité de magnétisme dans une carcasse de fer donnée constituant un circuit magnétique fermé, que s'il en était autrement. Ils réalisèrent leur idée sous forme d'une dynamo² qui, cependant, par suite de difficultés mécaniques de construction, ne s'est pas implantée comme type permanent de machine. Le travail de lord Elphinstone et de M. Vincent ne fut pas néanmoins perdu; le principe ainsi introduit par eux dans la construction des dynamos prit racine et porta des fruits. — En juin 1884, l'Auteur de cet ouvrage, dans la préface de sa première édition, écrivait, à propos de notre connaissance imparfaite de la loi qui régit l'induction magnétique : « *Il nous faudrait un savant qui fit pour le circuit magnétique ce que fit, il y a un demi-siècle, le Dr Ohm pour le circuit voltaïque.* » — L'automne suivant, à la conférence des électriciens réunis à Philadelphie, le professeur Rowland lut un travail³ dans lequel il proposait une formule pour le nombre de lignes de force magnétique [flux de force] dans un champ magnétique. Elle était exprimée par une fraction ayant pour numérateur le produit du courant d'excitation par le nombre de spires parcourues (c'est-à-dire les ampères-tours), et pour dénominateur une expression complexe représentant la résistance offerte par l'air et le fer au flux de lignes magnétiques [flux de force]; il laissait une marge pour la tendance d'un

¹ *Proc. Roy. Soc.*, XXIX. 292, 1879; et XXX. 287, 1880. — Voir *Electrical Review*, VIII. 134, 1880.

² Brevets anglais, 332 de 1879 et 2893 de 1880. Voir également les précédentes éditions anglaises de cet ouvrage.

³ Compte rendu de la Conférence électrique de Philadelphie en 1884, p. 77. Voir également *Electrical Review*, XV. 368, 1884; et *Electrician*, XIII. 536, 1884.

certain nombre de ces lignes à se disperser extérieurement, c'est-à-dire pour les « dérivations » magnétiques.

M. Gisbert Kapp a donné un grand développement aux idées ci-dessus dans une série de publications faites dans l'*Electrician*¹ entre les mois de février 1885 et d'avril 1886. Il y a discuté la question d'étude des dynamos en partant de ce point de vue et en y ajoutant un grand nombre de figures relatives aux formes des inducteurs, ainsi que des calculs et formules du plus haut intérêt. Au cours de la publication de ces articles, l'Auteur préparait la seconde édition de cet ouvrage, et dessinait les diagrammes des circuits magnétiques d'un grand nombre de types de machines dynamos, groupés méthodiquement dans la figure 119. Trois mois plus tard M. Kapp donnait, dans un travail important² communiqué par lui le 24 novembre 1885 à l'Institut des Ingénieurs civils, une planche de figures tout à fait analogue, qu'il avait, de son côté, préparée. Dans ce travail, Kapp adoptait pour l'évaluation des lignes de force une nouvelle unité égale à 6 000 lignes par pouce carré anglais ou à $\frac{6\ 000}{6,4516} = 930$ unités C. G. S. de flux de force. Kapp en donnait la raison d'être en ce qu'il préférait avoir à diviser par 10^6 au lieu de 10^8 , et à considérer dans un induit tournant le nombre de tours par minute plutôt que le nombre de tours par seconde. En désignant par Z le nombre de lignes magnétiques, en unités Kapp (Z équivalant à 930Φ unités de notre notation C. G. S.) et par $\frac{n}{t_m}$ le nombre de tours par minute, Kapp pose :

$$E \text{ (volts dans un induit)} = Z.N_s. \frac{n}{t_m} \cdot 10^{-6},$$

N_s , représentant le nombre total de spires de fil autour de l'armature, compté sur toute la périphérie (tel que l'indique le même symbole N_s employé dans la suite de cet ouvrage). Kapp donne alors pour le circuit magnétique la formule

$$Z = \frac{P}{R_A + R_a + R_m},$$

dans laquelle P est la puissance d'excitation en ampères-tours, R_A la résistance magnétique de l'espace d'air ou entrefer, R_a celle du noyau

¹ *Electrician*, XIV. 159, 307, 347, 390, 431, 511; XV. 23, 190, 250; XVI. 7, 406.

² *Proc. Inst. Civil Engineers*, LXXXIII. (1885-86), pt. 1, « Modern Continuous-Current Dynamo-Electric Machines and their Engines ».

d'induit, et R_m celle des noyaux des inducteurs. Si maintenant on représente par δ la distance entre le noyau d'induit et la surface polaire, c'est-à-dire l'épaisseur de l'entrefer, par b la profondeur de l'induit mesurée parallèlement à l'axe, par λ la longueur de l'arc embrassé par la surface polaire, de sorte que λb exprime la surface polaire d'où émanent les lignes magnétiques, par a l'épaisseur radiale du noyau d'induit de sorte que ab est sa section (en tenant compte uniquement de l'espace réellement occupé par le fer), par AB la section des noyaux des inducteurs, par l la longueur du circuit magnétique à l'intérieur de l'induit, par L cette même longueur dans les inducteurs ; toutes ces dimensions étant mesurées respectivement en *pouces et pouces carrés anglais* ; Kapp donne, pour le cas d'un simple circuit magnétique ordinaire,

$$R_A = 1440 \frac{2\delta}{\lambda b},$$

$$R_a = \frac{l}{ab},$$

$$R_m = 2 \frac{L}{AB}.$$

Le coefficient 1440 provient des unités spéciales adoptées, le pouce pour la longueur, la minute pour le temps, et 930 unités C. G. S. comme unité de flux magnétique ; ce nombre peut être regardé, *dans ce système mixte d'unités*, comme la résistance magnétique spécifique de l'air. Le coefficient 2 se rapporte à la résistance spécifique du fer forgé ou du fer au bois ; il devrait être remplacé par le chiffre 3 dans le cas de noyaux d'inducteurs en fonte ¹. En outre, en raison des dérivations magnétiques, on doit, dans l'expression de Z , prendre $0,8 P$ au lieu de P . Dans la discussion qui suivit cette communication, le professeur Forbes a présenté une modification de la formule de Kapp. Plus récemment encore M. Kapp ² est revenu sur la question et a donné une règle empirique pour le calcul des variations que subit la résistance magnétique du fer aux différents degrés de son aimantation.

En mai 1886, les docteurs John et Edward Hopkinson communi-

¹ Ces formules sont expliquées dans *Electrician*, XV. 250, 14 août 1885. — [Leur intérêt aujourd'hui purement historique nous dispense de les traduire en unités C. G. S.] (N. d. T.)

² *Journal Soc. Telegraph. Engineers and Electricians*, XV. 524-529, 11 novembre 1886. • De la prédétermination des caractéristiques des dynamos •, travail de grande valeur amoindri par l'emploi d'unités mixtes. — Ceux qui désirent étudier ce mode de calcul sur des exemples en trouveront quelques-uns dans un travail communiqué par le professeur Jamieson, en janvier 1889, à l'*Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland* ; voir *Electrician*, 1^{er} mars 1889.

quèrent à la Société Royale de Londres¹ une étude très complète et très élégante du problème des circuits magnétiques, dans le but d'arriver à une expression commode et exacte de la force électromotrice des dynamos en fonction du courant magnétisant ; la partie la plus importante de leur travail tend à la construction de la caractéristique d'aimantation de la dynamo d'après les lois ordinaires du magnétisme et les propriétés connues du fer. Le procédé ressemble à première vue à celui adopté par Kapp, mais il s'en distingue par un point important : ses auteurs déterminent en effet une caractéristique séparée pour la relation entre la force magnétisante et l'induction particulières à chaque portion distincte du circuit magnétique prise isolément ; ils somment ensuite ces courbes individuelles de manière à obtenir une caractéristique résultante finale. Ils opèrent ainsi d'abord dans l'hypothèse qu'il n'y a aucune dérivation magnétique et en admettant encore d'autres hypothèses, dans un but de simplification. Après avoir obtenu de la sorte une première approximation, ils comparent le résultat avec les données réelles de l'expérience, ce qui leur fournit le moyen d'estimer les corrections à introduire, et, la valeur des coefficients de correction étant ainsi connue, la théorie se trouve portée à un degré plus avancé d'approximation.

Dans l'étude des formules d'Hopkinson, nous n'emploierons pas leur notation, mais bien celle qui est uniformément adoptée dans cet ouvrage (voir p. 202).

Soit Φ le flux magnétique total à travers l'induit, c'est-à-dire le nombre total de lignes de force magnétique qui pénètrent le noyau d'induit par un côté et en sortent par l'autre. Admettons, pour simplifier, qu'il n'y ait ni dérivation ni déperdition de lignes magnétiques. Rappelons ensuite que la force magnétomotrice (ou intégrale des forces magnétisantes² agissant le long du circuit) est égale à $\frac{4\pi N_s i}{10}$, N_s étant le nombre de spires de fil et i le nombre d'ampères ; et, en outre, que la résistance magnétique d'un conducteur magnétique quelconque est proportionnelle à sa longueur et inversement proportionnelle à sa section ainsi

¹ *Phil. Trans.*, part. I. 331, 1886, « Dynamo-Electric Machinery ». Cet important travail est reproduit *in extenso*, mais sans les planches, dans l'*Electrical Review*, XVIII. 471, 12 novembre 1886, et numéros suivants. Voir aussi *Electrician*, XVIII. 39, 63, 86 et 175, dans les n^{os} des 19 et 26 novembre, 3 et 31 décembre 1886, où les figures des planches sont insérées dans le texte.

² Voir Maxwell, *Electricity and Magnetism*, II. art. 499 ; ou S. P. Thompson, *Elementary Lessons on Electricity and Magnetism* (édition de 1887), p. 291-296. Voir également p. 121 de cet ouvrage.

qu'à sa perméabilité. Supposons alors, comme l'indique la figure 103, que le circuit magnétique ne comporte que trois parties : un noyau d'induit en fer, les deux entrefers directs et le fer des inducteurs. Dès lors, le noyau de fer de l'induit, dans lequel la trajectoire moyenne du flux de force a pour longueur l_1 , et dont la section moyenne est S_1 , et la perméabilité μ_1 , aura pour résistance magnétique $\frac{l_1}{\mu_1 S_1}$. De même pour les deux entrefers, si l'on appelle l_2 la longueur de la trajectoire dans chacun d'eux, de fer à fer, S_2 la surface de l'une des faces polaires, et μ_2 la perméabilité de la matière qui remplit les entrefers, la résistance magnétique qu'ils présentent tous deux au flux magnétique sera $2 \frac{l_2}{\mu_2 S_2}$; ou, si l'on se rappelle que, pour l'air, le cuivre et toutes les substances non-magnétiques ordinaires, $\mu = 1$, plus simplement $2 \frac{l_2}{S_2}$. De même encore pour le fer des inducteurs, si l_3 est la longueur de la trajectoire à travers le fer, de pôle à pôle, S_3 sa section transversale (supposée égale dans toute leur longueur), et μ_3 sa perméabilité, sa résistance magnétique sera $\frac{l_3}{\mu_3 S_3}$. En additionnant ces trois résistances, on trouve pour valeur de la résistance totale du circuit magnétique

$$\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + 2 \frac{l_2}{S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3}.$$

On peut immédiatement déduire de là comme formule approchée,

$$\text{flux de force magnétique} = \frac{\text{force magnétomotrice}}{\text{résistance magnétique}}; \quad \Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}};$$

ou

$$\Phi = \frac{4\pi N i}{10 \left\{ \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + 2 \frac{l_2}{S_2} + \frac{l_3}{\mu_3 S_3} \right\}}.$$

En fait, MM. Hopkinson ont donné à leur formule un caractère un peu plus général. En premier lieu, au lieu d'additionner les résistances magnétiques individuelles, ils ont calculé les forces magnétisantes nécessaires dans les différentes parties du circuit et les ont ensuite additionnées. En second lieu, au lieu d'introduire μ pour les diffé-

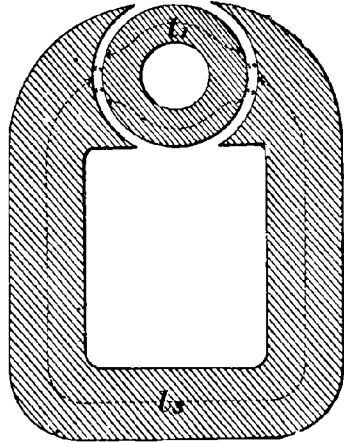


Fig. 103. — Circuit magnétique théorique d'une dynamo.

férentes parties, ils se sont contentés de dire que l'induction magnétique dans chaque partie devait être une fonction de la force magnétisante agissant dans cette partie. Mais si un flux de force Φ passe à travers une section de S centimètres carrés, l'« induction spécifique », \mathfrak{B} , sera égale à $\frac{\Phi}{S}$. En conséquence, on peut écrire pour la force magnétomotrice \mathfrak{F} agissant dans la partie-armature du circuit magnétique $f\left(\frac{\Phi}{S_1}\right) \times l_1$. Cette « fonction » peut être étudiée et représentée par une courbe. En réalité les courbes magnétiques, telles que celles données page 129, ne sont autre chose que des courbes exprimant la relation entre les forces magnétisantes et la quantité de magnétisme induit par elles. On aura une expression analogue $f\left(\frac{\Phi}{S_3}\right) \times l_3$ pour la force magnétomotrice qui agit dans la partie-inducteur du circuit, tandis que pour les entrefers la force magnétomotrice sera simplement $\frac{\Phi}{S_2} \times 2 l_2$, puisque la fonction pour l'air = 1. Dès lors, si l'on connaît les grandeurs des forces magnétisantes nécessaires pour produire ces inductions magnétiques dans chacune des parties du circuit prise individuellement, il est évident qu'on obtiendra la force magnétisante totale ou intégrale en question en les additionnant, ce qui donne

$$l_1 f\left(\frac{\Phi}{S_1}\right) + 2l_2 \frac{\Phi}{S_2} + l_3 f\left(\frac{\Phi}{S_3}\right) = \frac{4\pi N_3 i}{10}.$$

Ce mode de procéder présente trois avantages : (1) l'emploi d'une fonction dont on trouve la valeur à l'aide d'une courbe ou d'un tableau d'observations (comme les données graphiques des figures 92, 93 et 95, ou numériques p. 140), au lieu d'un simple symbole μ , rend l'expression plus générale ; (2) chacun des termes de l'expression étant différemment affecté par les dérivations de lignes magnétiques, il est facile de faire à l'un quelconque d'entre eux la correction voulue ; (3) cette forme d'expression est commode, dans le cas d'une carcasse de fer donnée, pour calculer le nombre d'ampères-tours nécessaires à produire la quantité voulue de magnétisme. On a en effet trois termes, dont le premier indique combien il faut d'ampères-tours d'excitation pour faire passer un flux de force Φ à travers la résistance du noyau d'induit ; le second, combien il en faut pour faire passer le même flux Φ à travers les entrefers ; et le troisième, ce qu'il en faut encore pour faire traverser à ce même flux Φ les noyaux de fer des inducteurs. Dans une dynamo bien étudiée, le second terme est numériquement le plus important des trois et il ne se complique d'aucune question de

saturation, car dans l'air l'induction magnétique est toujours proportionnelle à la force magnétique inductrice.

Pour représenter graphiquement ce résultat (fig. 104), on prend pour ordonnées les flux de force qui passent dans le circuit, et l'on porte en abscisses les valeurs correspondantes de la force magnétomotrice nécessaire $\frac{4\pi N_1 i}{10}$. Pour le second terme qui s'applique aux entrefers, la relation sera simplement représentée par une droite inclinée telle que O B. Par exemple, le flux magnétique Φ qui doit franchir l'entrefer qui sépare l'induit et les inducteurs étant représenté à l'échelle par la longueur O N, la valeur correspondante de $2 l_2 \frac{\Phi}{S_2}$, qui est la partie

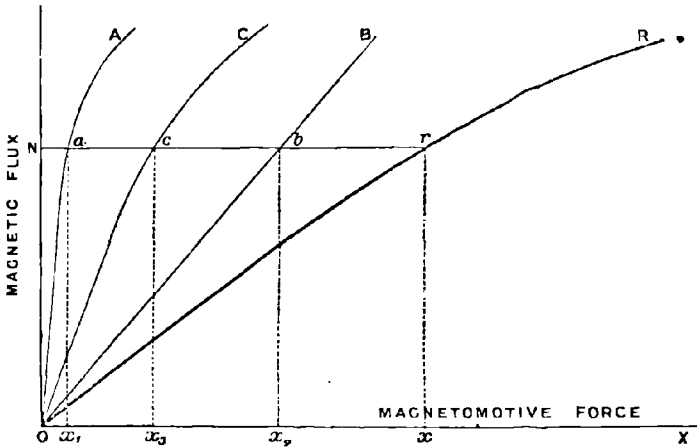


Fig. 104.

Magnetomotive Force = Force magnétomotrice.
Magnetic Flux = Flux magnétique.

afférente de la force magnétomotrice, étant portée en Ox_2 sur l'échelle horizontale, donnera b pour un des points de la ligne. On pourra opérer de même pour représenter le premier terme par la courbe A ; si, en effet, on connaît, par des expériences faites sur un fer de même nature que celui employé dans le noyau d'induit, les valeurs de la fonction f (ou, ce qui revient au même, les diverses valeurs correspondantes de μ_1), on pourra calculer la valeur de la quantité $l_1 f \left(\frac{\Phi}{S_1} \right)$ et la porter en Ox_1 , ce qui donnera a comme un des points de cette courbe. On calculera également ainsi, point par point, la courbe C pour le troisième terme, à l'aide des résultats fournis par des expériences sur un fer identique à celui employé dans les inducteurs. On pourra alors, avec

ces trois courbes A, B, et C qui représentent les diverses valeurs des trois termes du premier membre de l'équation, obtenir immédiatement la courbe résultante qui est caractéristique du circuit magnétique total de la dynamo. En effet, si l'on mène au point N une parallèle à l'axe des x , on sait que les trois longueurs chevauchantes Na , Nb , Nc (respectivement égales aux trois longueurs Ox_1 , Ox_2 , Ox_3) représentent les trois parties distinctes correspondantes de la force magnétomotrice. En additionnant ces trois longueurs, on obtient Ox ou Nr pour la force magnétomotrice totale ; le point r ainsi donné appartient à la courbe résultante. On la complètera en cherchant d'autres points de la même manière et faisant passer la courbe OR par ces points. — Après avoir ainsi construit une courbe caractéristique de l'induction, MM. Hopkinson s'occupèrent de la corriger en considérant les dériviatives. Ils ont trouvé que, dans la machine expérimentée par eux (une dynamo Edison-Hopkinson), il ne pénétrait guère réellement dans le noyau d'induit que les trois quarts du champ créé ou du flux traversant les inducteurs ; le reste se dérivait latéralement soit entre les pièces polaires, à travers l'air ou le socle, soit vers le sommet en revenant des pièces polaires à la culasse. L'expérience leur a donné 1,32 comme rapport du flux magnétique en un point situé à la demi-hauteur des noyaux de fer verticaux au flux traversant l'armature. C'est-à-dire que, dans ce type particulier de machine, pour faire passer un flux de 100 unités à travers le noyau d'induit, il fallait en produire un de 132 unités dans les noyaux inducteurs, et, par suite, développer une force magnétomotrice supérieure correspondante. Désignons ce rapport par le symbole v^1 . La dynamo particulière considérée comportait à la partie supérieure une culasse à travers laquelle la longueur (courbe) de trajectoire était l_4 , et dont la section droite était S_4 . Elle possédait également des pièces polaires massives pour lesquelles les grandeurs corrélatives de celles étudiées précédemment étaient l_3 et S_3 . L'introduction de ces facteurs additionnels dans l'équation donne

$$l_1 f \left(\frac{\Phi}{S_1} \right) + 2l_2 \frac{\Phi}{S_2} + l_3 f \left(\frac{v \Phi}{S_3} \right) + l_4 f \left(\frac{v \Phi}{S_4} \right) + 2l_5 f \left(\frac{\Phi}{S_5} \right) = \frac{4 \pi N_s i}{10}.$$

On a maintenant à calculer cinq termes qui donneront cinq courbes. D'ailleurs, la courbe d'aimantation est, comme on sait, différente pour

¹ Ce symbole est connu sous le nom de *Coefficient v* d'Hopkinson. Il peut être déterminé expérimentalement, ou calculé comme on le verra ci-après.

des forces magnétisantes descendantes de ce qu'elle est pour des forces magnétisantes ascendantes. La figure 105, relevée dans le mémoire de MM. Hopkinson, indique les cinq courbes qu'ils ont obtenues pour des aimantations croissantes et décroissantes. Parmi elles, A se rapporte à

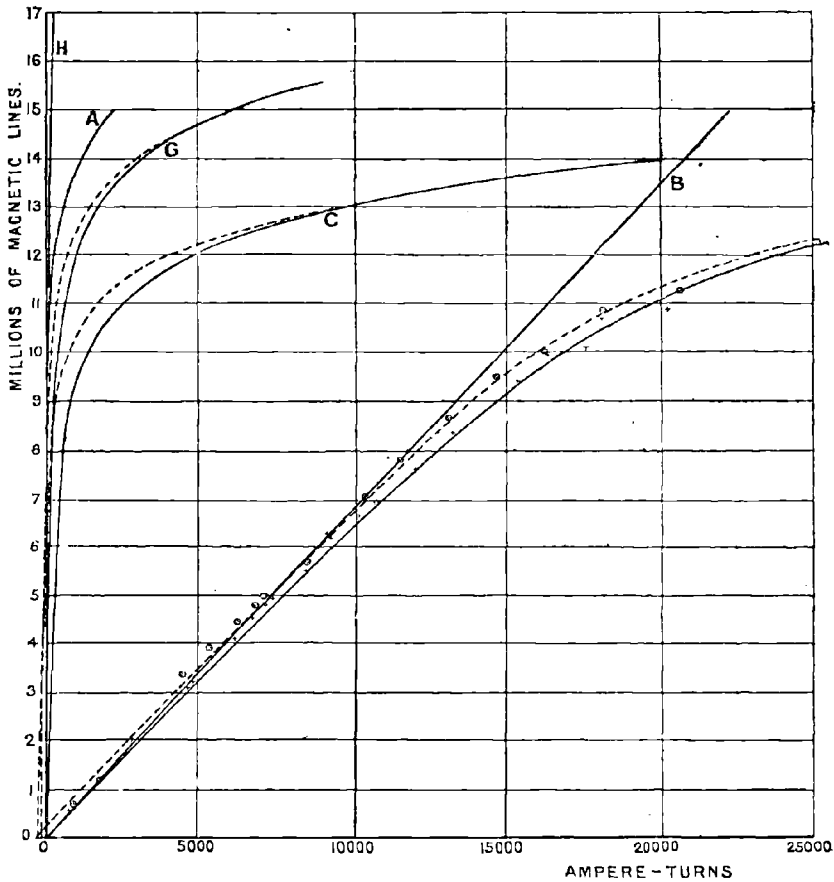


Fig. 105.

Millions of Magnetic Lines = Millions d'unités de flux magnétique.
Ampere-Turns = Ampères-tours.

l'induit, B aux deux entrefers, C aux noyaux d'inducteurs, G à la culasse, et H aux deux pièces polaires. Les courbes résultantes, ascendante et descendante, y sont également tracées. Elles coïncident d'une manière remarquable avec les croix et les points relevés d'après l'expérience même. Les courbes ponctuées et les croix entourées d'un cercle se réfèrent à

l'aimantation décroissante. Le lecteur fera bien de consulter le mémoire original qui, malgré sa brièveté, est rempli de considérations importantes et donne des applications de cette méthode à deux dynamos de différents types.

Les courbes d'induction (fig. 95 et 96, p. 141 et 142) étant identiques à celles employées par MM. Hopkinson pourront servir à cet effet. Les ordonnées représentent les valeurs de $\frac{\Phi}{S}$; les abscisses donnent en conséquence les valeurs correspondantes de $f\left(\frac{\Phi}{S}\right)$ ou de $\frac{1}{\mu}\left(\frac{\Phi}{S}\right)$.

Exemple. — Dans la machine particulière étudiée par MM. Hopkinson, la dynamo Edison-Hopkinson décrite plus loin (p. 398 à 402), les constantes étaient : $l_1 = 13$ centimètres; $l_2 = 1,5$ centimètre; $l_3 = 91,4$ centimètres; $l_4 = 49$ centimètres; $l_5 = 18$ centimètres; $S_1 = 810$ centimètres carrés; S_2 sur le noyau = 1 400, sur la face polaire = 1 500 centimètres carrés, ou, en tenant compte de la dispersion, 1 600 centimètres carrés environ; $S_3 = 980$ centimètres carrés; $S_4 = 1135$ centimètres carrés; $S_5 = 1240$ centimètres carrés; $v = 1,32$; Φ , quand la machine fonctionnait à pleine charge, = 10 826 000 unités; $N_d = 3260$; $i_d = 16,93$.

DÉRIVATIONS MAGNÉTIQUES

Dans toutes les dynamos il y a une certaine dérivation magnétique, c'est-à-dire que, dans toutes les dynamos, quelques-unes des lignes magnétiques créées dans le champ ne passent pas à travers l'induit et se dérivent latéralement, en constituant un *champ perdu*. [En d'autres termes, le flux à travers l'induit est inférieur à celui qui passe dans les inducteurs.] Dans certains cas plus de la moitié de ces lignes est ainsi perdue en dérivations inutiles. Le rapport du champ total au champ utile est connu sous le nom « de coefficient de dérivation » ou « coefficient d'Hopkinson »; on le désigne par v . Esson¹ en a donné pour plusieurs machines les valeurs indiquées au tableau ci-contre.

On comprendra mieux la nature de la dérivation en se rappelant que l'air est réellement un conducteur magnétique, quoique moins perméable que le fer. On peut explorer le champ perdu autour d'une dynamo à l'aide d'une boussole promenée dans son voisinage; et son intensité en divers points peut être évaluée au moyen d'une bobine d'ex-

¹ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XIX. 122, 1890.

COEFFICIENT ν DANS DIFFÉRENTES DYNAMOS

NOM de la machine	SYSTÈME INDUCTEUR	INDUIT	OBSERVATIONS	VALEUR de ν
Edison-Hopkinson.	Electro-aimant simple, 2 pôles.	Tambour.	Pôles voisins du socle.	1,32
Siemens.	Id.	Id.	Culasse voisine du socle.	1,30
« Phénix ».	Id.	Anneau long.	Id.	1,32
« Phénix ».	Electro-aimant double, 2 pôles.	Id.	Horizontale.	1,40
« Manchester ».	Id.	Id.	Bâti et un des pôles venus ensemble de fonte.	1,49
« Victoria ».	Electro-aimant double, 4 pôles.	Anneau court.	Type ordinaire.	1,40
Ferranti.	Electro-aimant double, multipolaire.	Disque sans noyau.	Type ordinaire (à courants alternatifs).	2,00

ploration reliée à un galvanomètre convenable. La figure 106 représente la direction générale des lignes magnétiques qui se dérivent d'une machine Edison-Hopkinson. On remarquera que la dérivation n'a pas

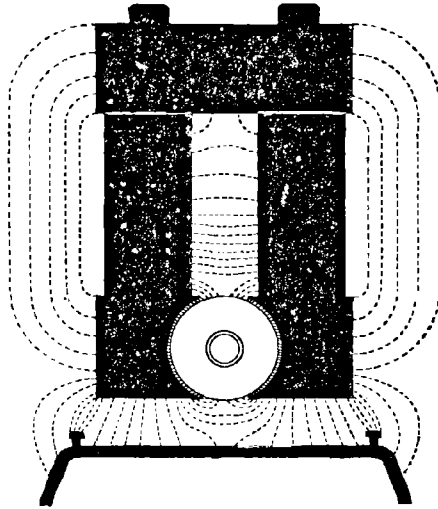


Fig. 106. — Champ perdu d'une dynamo Edison-Hopkinson.

lieu seulement de pôle à pôle. Il y a tendance à dérivation entre deux points quelconques du système magnétique entre lesquels existe une différence de potentiel magnétique. Ainsi, des lignes de force tendront

à dévier en remontant des pièces polaires à la *culasse*. Le socle de fonte étant voisin des deux pôles (où la différence de potentiel magnétique est le plus élevée) provoque une dérivation à travers sa propre substance, bien que la machine proprement dite en soit magnétiquement isolée par une plaque de zinc.

Carl Hering¹ a expérimenté un grand nombre de machines au point de vue de leur dérivation magnétique, dont il a également donné des reproductions graphiques. Le champ perdu de la machine à arc de Thomson-Houston (fig. 307) a présenté un cas extraordinaire. Le lecteur peut aussi se reporter à un certain nombre d'expériences faites par Carhart² et à d'autres dues à Trotter³.

Il est évident que le coefficient de dérivation ne saurait être constant dans une machine donnée ; son importance dépend en effet de la conductibilité magnétique relative de la trajectoire à travers le noyau d'induit et des trajectoires extérieures de dérivation. De plus la perméabilité de l'air est constante, tandis que celle du fer décroît au fur et à mesure que le degré de saturation du métal augmente ; de sorte que la dérivation augmente avec l'excitation. De même, lorsqu'on demande à l'induit un grand débit, la réaction démagnétisante du courant d'induit provoque directement des dérivations, en ce qu'elle détermine une force magnétomotrice contraire sur la trajectoire directe des lignes de force. D'ailleurs, du moment que la dérivation n'est pas confinée aux extrémités polaires réelles, mais se manifeste plus ou moins tout autour d'un aimant, il est clair que ce qu'on désigne sous le nom de coefficient de dérivation n'est guère qu'un chiffre moyen.

On peut déterminer expérimentalement la valeur réelle du coefficient de dérivation dans les diverses parties d'une machine. Les docteurs J. et E. Hopkinson⁴ l'ont fait pour une dynamo « Manchester », en employant des bobines d'exploration disposées autour des inducteurs de la dynamo en différents points. On déterminait le flux de force ainsi embrassé en rompant brusquement le courant d'excitation et notant le courant d'induction résultant sur un galvanomètre convenable. Lahmeyer⁵ a poussé encore plus loin l'investigation sur une dynamo « blindée » ou « cuirassée » (fig. 107). Il employa à cet effet six bobines d'exploration distinctes, ayant chacune le même nombre de spires.

¹ *Electrical Review*, XXI. 186 et 205, 1887.

² *Electrical Review*, XXV. 286 ; et *Electrician*, XXIII. 644, 1889.

³ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XIX. 243, 1890.

⁴ Voir leur Mémoire dans les *Phil. Trans.*, pt. I. p. 331, 1886 ; et dans *Electrician*, XVIII. 39, 63, 86 et 175, novembre et décembre 1886.

⁵ *Elektrotechnische Zeitschrift*, IX. 283, 1887.

Celle qui entourait l'induit, enveloppant ainsi le champ magnétique utile, est désignée par la lettre A ; les autres sont numérotées de 1 à 5. Les déviations obtenues sont indiquées dans la colonne II du tableau ci-dessous. La bobine 3 présenta le flux maximum. Ce nombre étant représenté par 100, les dérivations sont indiquées par rapport à 100

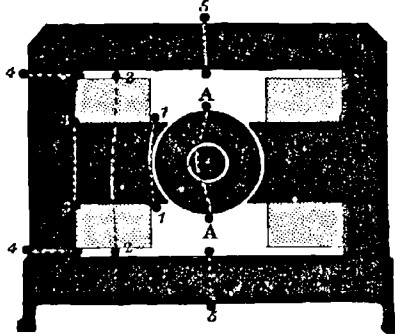


Fig. 107. — Exploration des dérivations magnétiques d'une dynamo.

dans la colonne III. La colonne IV donne la valeur des différents flux, celui qui passe par A étant pris comme terme de comparaison égal à 100; et la colonne V, les valeurs de v aux divers points explorés. On voit

I	II	III	IV	V
A	780	10,9	100	1,00
1	788,5	9,9	101	1,01
2	861	1,7	110	1,10
3	876	0,0	112	1,12
4	850	2,9	109	1,09
5	749	14,5	96	0,96

clairement que les parties formant culasse étaient d'une épaisseur insuffisante.

Dans le cas de la machine Edison-Hopkinson étudiée par eux, MM. Hopkinson donnent $v = 1,32$, ce rapport étant celui observé entre les déviations au galvanomètre quand la bobine d'exploration était placée à demi-hauteur des branches des inducteurs et autour de l'induit. Ce nombre est sans aucun doute trop faible. Si la bobine d'exploration avait été placée plus haut, et si l'induit avait été excité de manière à exercer une action démagnétisante, le coefficient de dérivation eût été trouvé au moins égal à 1,4.

CALCUL DES DÉRIVATIONS

Il est possible de déterminer d'avance, d'après les dessins d'exécution d'une dynamo, avant sa construction, l'importance probable des dérivations de ce genre. Ces calculs sont basés sur ce principe que, si un circuit offre au flux magnétique plusieurs passages, celui-ci se partagera entre eux dans le rapport de la facilité relative qu'ils présenteront à son écoulement, exactement comme un courant électrique se partage suivant la conductibilité des voies qui s'ouvrent à lui. En fait, on a reconnu que la loi des circuits dérivés s'applique aux lignes magnétiques. Le lecteur peut consulter les recherches d'Ayrton et Perry¹ sur ce sujet. Il en résulte que, sur le parcours d'un circuit ramifié, la perméabilité² conjuguée (ou conductibilité magnétique réduite) sera la somme des perméabilités des divers branchements. En conséquence, si l'on connaît les perméabilités individuelles de chacun des passages offerts aux flux utile et perdu d'une dynamo, on pourra calculer le coefficient de dérivation v qu'on doit réserver comme marge, ce coefficient étant le rapport du flux total au flux utile. Soient Φ_u le flux utile, Φ_p le flux perdu, et φ_u et φ_p les conductibilités correspondantes ; on a

$$v = \frac{\Phi_u + \Phi_p}{\Phi_u} = \frac{\varphi_u + \varphi_p}{\varphi_u}.$$

Mais chacun des termes φ_u et φ_p du second membre de cette expression est une quantité complexe, et la formule plus complète est

$$v = \frac{\varphi_u' + \varphi_u'' + \varphi_u''' + \dots + \varphi_p' + \varphi_p'' + \varphi_p''' + \dots}{\varphi_u' + \varphi_u'' + \varphi_u''' + \dots}.$$

¹ *Journal Soc. Telegraph Engineers and Electricians*, 1886, p. 530.

² Afin de les distinguer des termes correspondants, relatifs au circuit électrique, les Anglais ont adopté ceux de « reluctance » et de « conductance » ou « permeance » pour désigner la résistance et la conductibilité magnétiques. — [Ces expressions ne sont pas encore entrées dans notre langage scientifique.]

Pour déterminer les conductibilités ou perméabilités respectives des différentes voies offertes à la dérivation considérée, il faut recourir à quelques règles ou lemmes utiles, originairement dus au professeur Forbes¹ et qui consistent en certaines intégrations approchées, ci-dessous formulées.

Règle I. — Conductibilité entre deux surfaces parallèles opposées. — Supposons (fig. 108) que les lignes de force soient des droites uniformément réparties d'une surface à l'autre ; on a

Conductibilité = surface moyenne (en centimètres carrés) : distance entre elles (en centimètres) ;

$$\text{Conductibilité} = \frac{\frac{1}{2} (S_1 + S_2)}{d}.$$

Règle II. — Conductibilité entre deux surfaces rectangulaires adjacentes situées dans un même plan. — En admettant (fig. 109) que

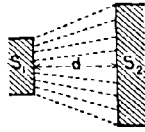


Fig. 108.

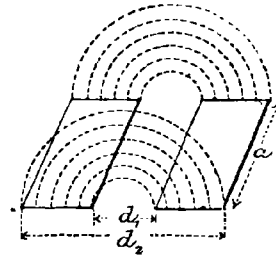


Fig. 109.

les lignes de dérivation sont des demi-cercles et que l'on donne les distances d_1 et d_2 entre les bords des surfaces les plus voisins et les plus éloignés, ainsi que la profondeur a entre les bords parallèles considérés,

$$\text{Conductibilité} = \frac{a}{\pi} \log_e \frac{d_2}{d_1}.$$

Règle III. — Conductibilité entre deux surfaces égales, parallèles et rectangulaires, situées dans un même plan à une certaine distance l'une de l'autre. — Supposons (fig. 110) que les lignes de dérivation soient des quadrants reliés par des lignes droites,

$$\text{Conductibilité} = \frac{a}{\pi} \log_e \left(1 + \frac{\pi (d_2 - d_1)}{d_1} \right).$$

¹ *Journal Soc. Telegr. Engineers*, XV, 551, 1886.

Règle IV. — Conductibilité entre deux surfaces égales, à angles droits l'une par rapport à l'autre. —

Conductibilité = le double des valeurs respectives calculées d'après la règle II.

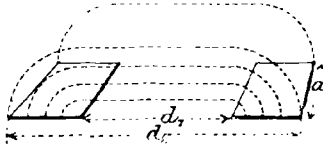


Fig. 110.

M. Ravenshaw s'est servi de ces règles et les a développées pour calculer des dynamos pour MM. W. T. Goolden and C^o. En les appliquant à la prédétermination des dérivationes par les poulies, les supports de paliers et les arbres, il est arrivé à prévoir, à 2 p. 100 près, les qualités d'une machine d'après les dessins d'exécution.

EXEMPLE DE CALCULS DE DÉRIVATION MAGNÉTIQUE ¹

On veut déterminer *a priori* le coefficient de dérivation de la machine Edison-Hopkinson représentée par les figures 362 à 364 et dont les constantes de construction et dimensions sont données aux Chapitres XVI et XVIII. C'est la machine dont le champ perdu est représenté dans la figure 106, page 177.

La première chose à faire est de déterminer les éléments de la conductibilité au flux utile φ_u , puis ceux qui constituent la conductibilité au flux perdu φ_p . Après les avoir obtenus, on calculera v . Mais, comme la conductibilité au flux utile dépend de celle du noyau de fer de l'induit qui varie avec le degré de saturation, il sera nécessaire de calculer les valeurs de φ_u correspondant à divers états d'aimantation.

Or les éléments de φ_u sont au nombre de cinq (fig. 111, où les chiffres 1 à 5 correspondent respectivement aux quantités φ_u à φ_u^5 ci-

¹ L'emploi des mesures anglaises dans l'ouvrage original, joint aux regrettables différences de cotes que présentent tant cet exemple même que les autres parties du livre où elles sont disséminées, le travail primitif de Forbes et les divers traités où se trouvent indiqués ces calculs, les a rendus très laborieux. Sans nous en exagérer l'importance comme exactitude pratique, nous avons cherché, en en rétablissant l'unité, à les donner exactement en mesures C. G. S. (N. du T.)

après) et doivent être évalués séparément. On y procédera de la manière suivante :

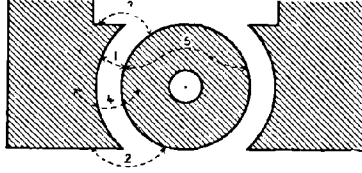


Fig. 111.

Conductibilité φ_u au Flux utile.

φ'_u Conductibilité d'un entrefer direct.

Application de la règle I.

$$\varphi'_u = \frac{1}{2} (\text{rayon du noyau de l'induit} + \text{rayon de la cavité polaire})$$

$$\times 2\pi \times \frac{\text{angle sous-tendant la cavité polaire}}{360} \times \text{profondeur de la}$$
 pièce polaire parallèlement à l'axe : distance du noyau d'induit à la face polaire (ou entrefer direct); ou

$$\varphi'_u = \frac{1}{2} (12,25 + 13,75) \cdot 2\pi \cdot \frac{129}{360} \cdot 48,3 : 1,5;$$

d'où

$$\varphi'_u = 942.$$

φ''_u Conductibilité de l'induit à l'inducteur

au-dessous des pôles (entrefer indirect inférieur) (fig. 112).

On suppose plane la surface inférieure du noyau et on applique la règle II, en admettant que l'action s'exerce entre deux portions de surfaces situées de part et d'autre de l'extrémité du bec polaire, sur une largeur égale à la moitié de l'intervalle qui sépare les deux becs polaires, et à une distance l'une de l'autre égale à 2,5 centimètres.

$$\varphi''_u = \frac{48,3}{\pi} \cdot \log_e \frac{12,7}{2,5},$$

$$= 15,374 \times 1,645;$$

d'où

$$\varphi''_u = 25.$$

φ''_u Conductibilité de l'induit aux branches de l'inducteur au-dessus des pôles (entrefer indirect supérieur) (fig. 113).

On la prend comme deux fois égale à φ''_u , la trajectoire des lignes de force étant la moitié de la précédente :

$$\varphi'''_u = 2 \varphi''_u = 50.$$

φ^{iv}_u Conductibilité latérale entre les faces verticales d'une pièce polaire et du noyau d'induit (fig. 114).

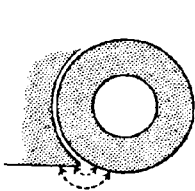


Fig. 112.

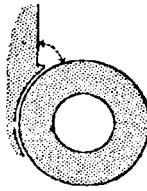


Fig. 113.

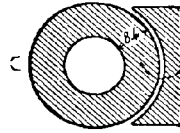


Fig. 114.

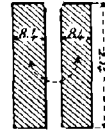


Fig. 115.

On applique la règle II en admettant que ces deux faces (fig. 114) agissent comme deux rectangles de 23,4 centimètres de long et de 8,4 centimètres de large, distants l'un de l'autre de 1,5 centimètre (fig. 115).

$$\begin{aligned} \varphi^{iv}_u &= \frac{23,4}{\pi} \cdot \log_e \frac{18,3}{1,5}, \\ &= 8,085 \times 2,50; \end{aligned}$$

$$\varphi^{iv}_u = 20.$$

φ^{v0} Conductibilité à travers le noyau de l'induit.

Supposons que la longueur de la trajectoire, d'un côté à l'autre du noyau d'induit, soit de 13 centimètres, arc moyen entre la circonférence extérieure du noyau et celle du trou central. Il est nécessaire de faire trois calculs, dans l'hypothèse de trois degrés différents d'aimantation du noyau. L'expression sera l'inverse de celle trouvée au Chapitre XVI pour la résistance magnétique.

[a] Noyau non saturé : hypothèse $\mu = 3000$.

$$\begin{aligned} \varphi^v_u &= \frac{S\mu}{l}, \\ &= \frac{810 \times 3000}{13}; \end{aligned}$$

$$\varphi^v_u = 186923 \text{ (noyau loin de la saturation).}$$

[b] Noyau saturé jusqu'à $\Phi = 10\,826\,000$ unités C.G.S., ou $\mathfrak{B} = 13\,365$; d'où, d'après le tableau I, page 140, $\mu = 930$. Cette valeur correspond au degré d'excitation de la machine fonctionnant à pleine charge (voir p. 176).

$$\varphi_u^v = \frac{810 \times 930}{13};$$

$$\varphi_u^v = 57946 \quad (\text{à pleine charge}).$$

[c] Noyau saturé, comme dans des machines plus récentes, jusqu'à $\mathfrak{B} = 17\,050$, d'où, d'après le tableau I, page 140, $\mu = 160$.

$$\varphi_u^v = \frac{810 \times 160}{13};$$

$$\varphi_u^v = 9970 \quad (\text{dans le voisinage de la saturation}).$$

φ_u Conductibilité utile nette.

Revenant maintenant à la figure 111, on voit que les conductibilités φ_u' , φ_u'' , φ_u''' , et φ_u^{iv} sont toutes en parallèle les unes avec les autres et peuvent être additionnées; mais que φ_u^v est en série avec leur somme, de chaque côté. La conductibilité nette sera en conséquence :

$$\varphi_u = \text{réciproque de } \left(\frac{2}{\varphi_u' + \varphi_u'' + \varphi_u''' + \varphi_u^{iv}} + \frac{1}{\varphi_u^v} \right),$$

avec

$$\varphi_u' + \varphi_u'' + \varphi_u''' + \varphi_u^{iv} = 942 + 25 + 50 + 20 = 1037.$$

On prendra alors successivement les trois valeurs trouvées pour φ_u^v et on calculera les trois valeurs correspondantes de φ_u , ce qui donne :

- [a] (Noyau loin du point de saturation). $\varphi_u = 517$
 [b] (Noyau à pleine charge). $\varphi_u = 513,9$
 [c] (Noyau fortement saturé). $\varphi_u = 492,8$.

On calculera ensuite la

Conductibilité φ_p au Flux perdu.

φ_p' Conductibilité par le socle (fig. 106, p. 177).

Les deux pièces polaires étant en tension avec le socle, elle sera égale à la moitié de la conductibilité entre une pièce polaire et la moitié de la surface supérieure du socle, cette conductibilité étant calculée d'après

la règle I et sur la section minimum de la pièce polaire qui étrangle le flux. On aura ainsi :

$\varphi'_p = \frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$ (section minimum d'une pièce polaire + aire de la demi-surface supérieure du socle : largeur de l'intervalle d'air qui les sépare).

$$\varphi'_p = \frac{1}{4} \frac{(22,86 \times 48,30) + \frac{1}{2} (73,14 \times 48,3)}{12,7} = \frac{1}{4} \frac{1104 + 1766}{12,7} ;$$

$$\varphi'_p = 113.$$

φ''_p Conductibilité entre les branches d'inducteurs (fig. 116).

Elle se compose de deux parties, l'une intérieure, l'autre extérieure ; on calculera séparément chacune d'elles et on les additionnera.

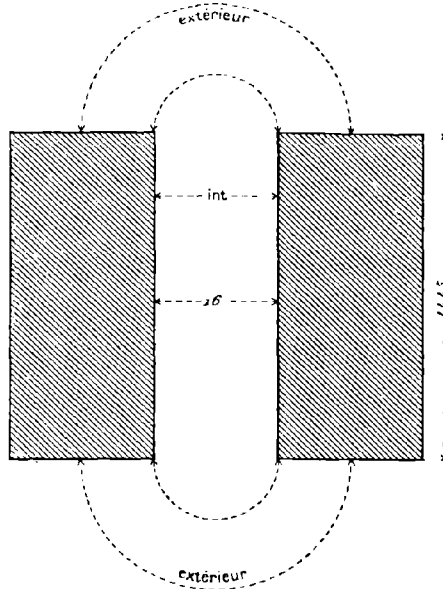


Fig. 116.
Int = Intérieur.

Partie intérieure. — On la calcule d'après la règle I, mais en ajoutant à la profondeur, en avant et en arrière, une longueur égale au rayon du plus petit arc, en raison de la courbure d'épanouissement des lignes de force :

$$\varphi''_p (\text{int.}) = \frac{1}{2} \frac{(44,45 + 16 + 44,45) \times 43,7}{16} ;$$

$$= 150.$$

Partie extérieure. — On fait le calcul pour un des côtés, d'après la règle II, et l'on double :

$$\begin{aligned}\varphi_p''(\text{ext.}) &= \frac{43,7}{\pi} \log_e \frac{60,17}{16} \times 2; \\ &= 38,6.\end{aligned}$$

En additionnant les deux chiffres obtenus pour l'intérieur et l'extérieur, on a

$$\varphi_p'' = 150 + 38,6 = 188,6.$$

φ_p''' , *Conductibilité par les faces verticales des pièces polaires.*

On les traite (conformément à la figure 117) comme des blocs de

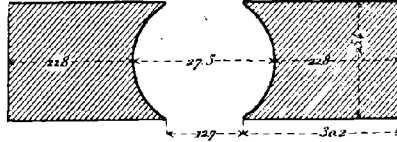


Fig. 117.

25 centimètres de haut sur 25 centimètres de large, séparés par une distance de 27,5 centimètres. On applique la règle II et l'on double :

$$\begin{aligned}\varphi_p''' &= \frac{25}{\pi} \log_e \frac{77,5}{27,5} \times 2; \\ \varphi_p''' &= 16,5.\end{aligned}$$

φ_p^{IV} *Conductibilité entre les pièces polaires et la culasse (fig. 118).*

Chaque pièce polaire a trois faces planes extérieures. On les suppose développées sur une longueur totale de $(25,4 + 48,3 + 25,4)$ centimètres; on applique la règle III et l'on prend la moitié du résultat, les dérivations étant, d'un côté à l'autre, en série l'une sur l'autre.

$$\begin{aligned}\varphi_p^{IV} &= \frac{99}{\pi} \log_e \left(1 + \frac{\pi (71 - 43,7)}{43,7} \right) \times \frac{1}{2}; \\ \varphi_p^{IV} &= 15,7.\end{aligned}$$

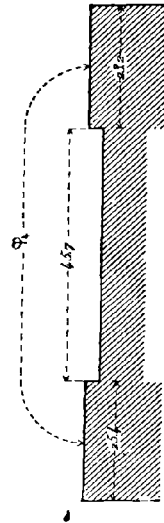


Fig. 118.

φ_p Conductibilité nette au flux perdu.

On remarquera que les dérivations suivant les trajectoires dont les conductibilités sont respectivement φ'_p , φ''_p , φ^{IV}_p , seront proportionnelles à la différence de potentiel magnétique aux pièces polaires, tandis que la dérivation φ''_p (entre les branches d'électros) ne sera proportionnelle qu'à sa moitié, en raison de ce que la dérivation à l'extrémité supérieure est pratiquement nulle. Par suite, en les additionnant et prenant $\frac{1}{2} \varphi''_p$ au lieu de φ''_p lui-même, on aura

$$\begin{aligned}\varphi_p &= \varphi'_p + \frac{1}{2} \varphi''_p + \varphi''_p + \varphi^{IV}_p \\ \varphi_p &= 113 + 94,3 + 16,5 + 13,7 = 239,5.\end{aligned}$$

Calcul final du Coefficient de dérivation v .

Il y a encore ici trois cas qui correspondent aux trois valeurs de φ_u trouvées précédemment. On appliquera la formule

$$v = \frac{\varphi_u + \varphi^p}{\varphi_u}$$

à chacun de ces cas, ce qui donne :

[I.] Quand le fer est loin du point de saturation :

$$\begin{aligned}v &= \frac{517 + 239,5}{517}, \\ v &= 1,46.\end{aligned}$$

[II.] Quand le noyau travaille à pleine charge :

$$\begin{aligned}v &= \frac{513,9 + 239,5}{513,9}, \\ v &= 1,46.\end{aligned}$$

[III.] Quand le noyau est fortement saturé :

$$\begin{aligned}v &= \frac{492,8 + 239,5}{492,8}, \\ v &= 1,48.\end{aligned}$$

Ces résultats confirment l'opinion que le nombre (1,32) admis par MM. Hopkinson pour cette machine est trop faible.

On peut remarquer comme conclusion que la conductibilité nette au flux perdu augmentera, pour un type donné de machine, tant avec la

longueur qu'avec le diamètre de l'induit, puisque cette conductibilité est sensiblement proportionnelle à la racine carrée du produit de ces deux dimensions. Par suite, si deux machines, construites avec des disques de noyau de mêmes dimensions, ont des induits de longueurs différentes, celle dont l'induit sera le plus long aura une plus grande conductibilité de dérivation.

CHAPITRE VIII

FORMES D'INDUCTEURS

Dans le Chapitre III, relatif aux éléments d'une dynamo, nous avons dit quelques mots des idées générales qui doivent présider à l'étude d'un projet d'électro-aimants inducteurs. Avec le principe du circuit magnétique pour guide, le lecteur appréciera aisément la valeur relative des diverses formes qui peuvent leur être données. Il se rappellera que, pour offrir la conductibilité la plus élevée, le circuit magnétique doit être compact, de la plus grande section possible, constitué par du fer très doux, et présenter le moins de joints possible. Rowland a d'ailleurs fait observer que, au point de vue théorique, il vaut mieux n'avoir qu'un seul circuit magnétique plutôt que deux ; l'auteur estime cependant que, pour des raisons de construction, le double circuit est préférable dans bien des cas. Le double circuit, analogue au numéro 3 ou au numéro 8 de la figure 119 ci-après, présente en général l'avantage d'assurer plus de stabilité à l'ensemble de la machine et de réaliser communément un champ magnétique plus symétrique que le numéro 2. L'examen des formes représentées par les figures ci-jointes fixera dans l'esprit les valeurs relatives des différents types connus.

Le N° 1 donne la forme adoptée par Wilde avec l'emploi de la bobine en navette de Siemens. Deux plateaux de fer verticaux sont réunis au sommet par une culasse et boulonnés à la partie inférieure avec deux pièces polaires massives. On y compte quatre joints dans le circuit magnétique, indépendamment des entrefers de l'induit, et la section de la culasse est insuffisante.

Le N° 2 représente la forme adoptée dans les dernières dynamos Edison (modèle américain). Les noyaux verticaux sont de lourds cylindres ; la culasse a une épaisseur considérable ; les pièces polaires sont massives, mais leurs angles inférieurs sont abattus. Cet ensemble

présente autant de joints que la forme de Wilde ; mais il possède une conductibilité magnétique bien supérieure au précédent, grâce à sa section beaucoup plus grande. La seule difficulté résultant d'un circuit

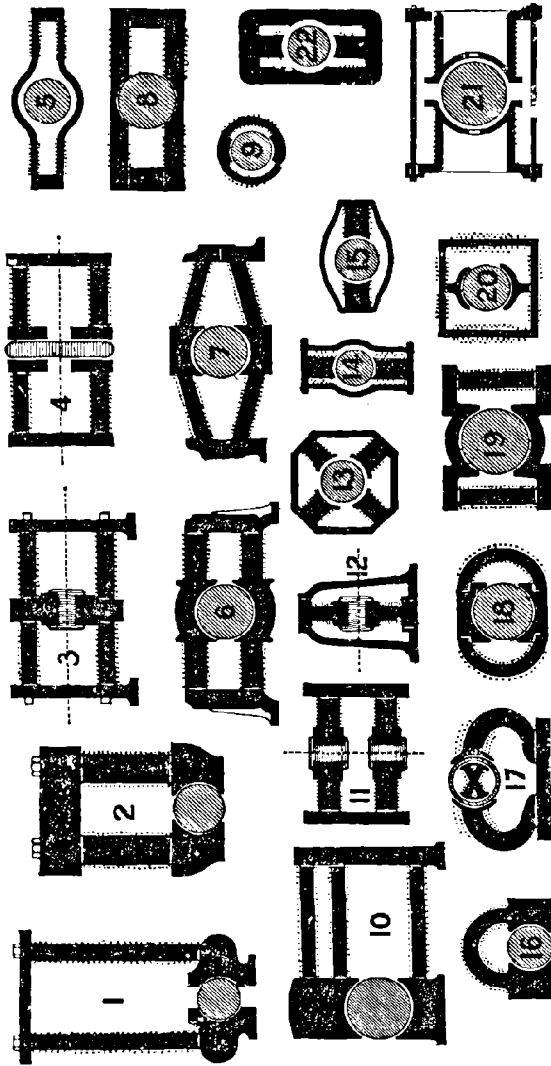


Fig. 119. — Formes typiques d'inducteurs.

unique de ce genre consiste dans son montage sur un socle convenable. Si la plaque de fondation est en fer, une fraction considérable du magnétisme est mise en court-circuit et échappe à l'induit, comme on l'a vu dans le chapitre précédent. — Dans le type plus grand, N° 10,

un moment adopté par Edison, on n'a remédié que partiellement à cette difficulté en couchant sur un côté les électro-aimants.

Un type d'inducteur très en faveur, à double circuit magnétique avec pôles conséquents, est représenté par le N° 3 ; il a été introduit par Gramme. On peut le regarder comme la combinaison de deux formes analogues au N° 1 avec pièces polaires communes.

Les N°s 3 et 9 peuvent être considérés comme des modifications d'une même idée fondamentale.

Le N° 4 reproduit (en plan) la forme employée dans la machine Brush, les deux circuits magnétiques étant séparés par l'armature en anneau. Ce diagramme s'applique également à un grand nombre de machines à anneau plat ; mais dans la grande majorité de celles-ci les pôles disposés latéralement à l'anneau sont réunis deux à deux par une pièce polaire commune, creuse, qui embrasse une portion de la périphérie de l'induit.

On voit dans le N° 5 un ancien type de Siemens formé d'une série de bandes en fer forgé juxtaposées et recourbées en arc, avec pôles conséquents. Le circuit a ici une section insuffisante.

Le N° 6 est une forme adoptée par Weston, et reproduite d'une façon tout à fait analogue par Crompton et par Paterson et Cooper. Ici la section est mieux proportionnée.

Le N° 7, employé par Bürgin et Crompton, diffère peu du précédent. Il offre cependant un avantage en ce qu'il y a moins de joints dans le circuit.

Le N° 8 est un modèle employé par Crompton, Kapp, et Paterson et Cooper.

Le N° 9 est le type adopté dans le petit moteur Griscom.

Le N° 18 en est une modification due à Kapp.

Le N° 19, à pôles conséquents, comme les précédents, est le type de Mac Tighe, de Joel, d'Hopkinson (dynamo « Manchester »), de Clark, Muirhead and Co (dynamo « Westminster »), de C. E. Brown (à Oerlikon), de Blakey, Emmott and Co, et de quelques moteurs Sprague ; il n'a subi que de légères modifications de détail et de proportions entre les mains de ces divers constructeurs. La principale différence entre le N° 19 et le N° 6 réside dans l'emplacement choisi pour le montage des bobines ; le N° 19 en comporte deux ; le N° 6, quatre.

Le N° 20, dû à Elwell et Parker, est une modification postérieure du N° 3 et gagnerait à avoir une plus grande section transversale.

Dans le N° 3 (Gramme), les pièces polaires et les montants verticaux sont ordinairement en fonte, tandis que les noyaux longitudinaux sont en fer forgé. La surface polaire nécessaire doit être réalisée par un moyen quelconque, et, si les noyaux sont minces, les deux voies ouvertes au flux magnétique obligent soit à fixer sur eux des pièces polaires massives (N°s 1, 3, 4, 6, 7, 19, 20), soit plutôt à recourber ces noyaux (N° 5) de manière à faire servir comme pôles leur face sur plat. Aujourd'hui, cependant, que l'on reconnaît l'avantage de noyaux volumineux, on peut obtenir la surface polaire voulue sans addition d'expansions ou « pièces » polaires, en donnant simplement aux noyaux la forme qu'ils comportent (N° 8). Ce procédé ne doit pas être regardé comme aboutissant au même résultat qu'un amincissement de l'électro-aimant; si, en effet, toute réduction de section transversale en un point quelconque du circuit diminue la conductibilité magnétique, l'amincissement en vue de mettre l'induit plus intimement dans le circuit a un effet diamétralement opposé. En réalité, les barres horizontales au-dessus et au-dessous de l'induit pourraient être réduites à rien en leur milieu; des raisons de construction s'y opposent seules. Dans tous les types de ce genre à double circuit magnétique, chaque moitié du système inducteur peut être regardé comme ayant à fournir un flux de force à la moitié de l'induit à laquelle elle est opposée.

Les N°s 11 à 15 représentent des formes d'inducteurs à pôles *saillants*, qu'il faut distinguer des pôles *conséquents*.

Le N° 11 est la double machine Gramme combinée par Deprez.

Les N°s 12 et 13 sont deux des nombreux types encore dus à Gramme. Ces inducteurs sont tous deux en fonte; et il est à noter que le N° 13 ne comporte pas de joints; il est fondu en une seule pièce.

Le N° 14 est le modèle employé par Hochhausen; il est pratiquement identique au N° 21, sauf en ce qui concerne la position de l'axe de rotation. Les flasques en fer du N° 14 tendent à déterminer un certain court-circuit du magnétisme par leur proximité des pôles; leur section est d'ailleurs insuffisante.

Le N° 15 qui appartient à Van de Poele est analogue au précédent.

Le N° 16 est la forme employée par l'Auteur pour de petits moteurs; il est fondu d'une seule pièce. La forme semi-circulaire adoptée pour le noyau a pour objet de réduire à un minimum de longueur le circuit magnétique.

Le N° 17 reproduit la forme employée par Jürgensen, avec pôles

saillants renforcés par d'autres électro-aimants à l'intérieur de l'armature.

Le N° 21 représente en section le double inducteur tubulaire de la

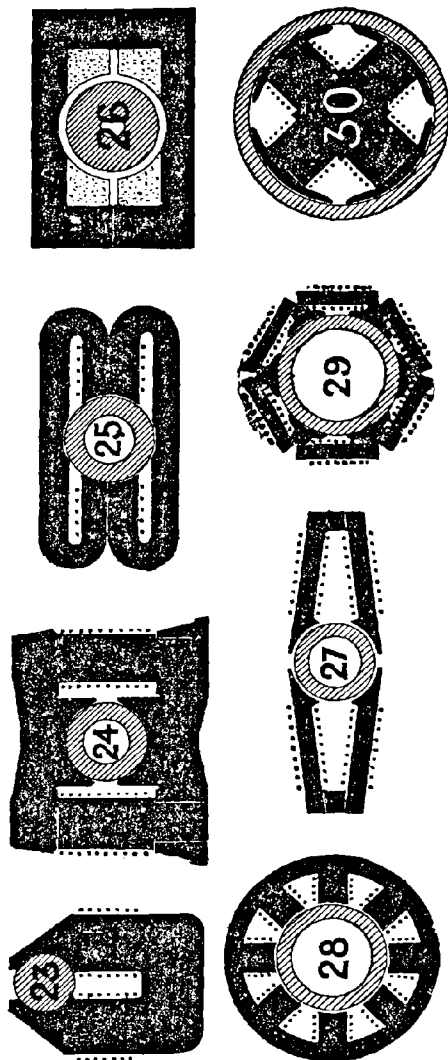


Fig. 120. — Formes typiques d'inducteurs.

machine Thomson-Houston, dont l'induit sphérique est placé, comme dans les numéros 12, 14 et 15, entre deux pôles saillants évidés hémisphériquement. — Il y a une curieuse analogie entre les numéros 19 et 21 ; mais ils diffèrent complètement par la position des bobines.

Le N° 22 est dû à Kapp ; il présente deux pôles conséquents et, entre eux, deux pôles saillants de même polarité ; une seule paire de bobines suffit à aimanter le quadruple circuit tout entier.

Des formes presque identiques ont été employées par Kennedy (dynamo « cuirassée » ou « blindée »). — Lahmeyer, et Wenström emploient des formes à cuirasse ressemblant au numéro 15. Le type de Wenström a comme culasse un cylindre de fer extérieur.

Le N° 23 (fig. 120) est un type qui, employé il y a longtemps par Sawyer et par Lontin, est devenu récemment très en vogue ; il a été remis au jour presque simultanément par Gramme (« type supérieur »), par Kapp, par Siemens (type « F »), par Cabella (« Technomasio »), et par Paterson et Cooper.

Le N° 24 est un type très ramassé, de Brown.

Le N° 25 est la dynamo « cuirassée » de Kennedy ; les noyaux de fer sont forgés de forme.

Le N° 26 a été imaginé par le professeur Forbes. La carcasse de fer est en deux parties ; les bobines, complètement enveloppées par elle, sont disposées de manière à aimanter l'induit directement, l'une d'elles occupant tout l'espace disponible entre le fer inducteur et la moitié supérieure de l'armature ; l'autre, l'espace correspondant pour la moitié inférieure. — Eickemeyer, de Yonkers, fait usage d'une forme tout à fait voisine.

Le N° 27 est le type à quatre pôles adopté par Elwell et Parker dans quelques-unes de leurs grandes machines.

Le N° 28 est une forme multipolaire employée par Wilde, Gramme, et autres ; les pôles qui entourent l'anneau sont alternativement de signes contraires. Elle est aujourd'hui très usitée dans les machines à courants alternatifs telles que celles de Westinghouse (Stanley), Mather et Platt (Hopkinson), Paterson et Cooper (Esson), Elihu Thomson, Blakey et Emmott, et autres.

Dans le N° 29, modification du type précédent due à Thury en vue de son emploi avec un induit en tambour, les six pôles dirigés vers l'intérieur sont excités par des bobines roulées sur le bâti hexagonal extérieur. Ce mode de construction est indiqué en détail dans la figure 124. Les noyaux qui reçoivent l'enroulement sont des plaques de fer forgé, boulonnées à des pièces polaires intermédiaires en fonte.

Le N° 30 donne le diagramme d'une forme récemment adoptée par Siemens et Halske, dans laquelle un anneau externe tourne à l'extérieur d'un électro-aimant à quatre pôles très compacts et très volumineux. — Ganz, Fein, et autres ont construit des machines analogues ;

elles sont très employées en Allemagne pour les grandes stations centrales.

Le N° 31 représente une autre forme récente d'inducteur. Ce type en simple fer à cheval, garni d'une seule bobine, a été primitivement imaginé par l'Auteur de cet ouvrage en 1886; MM. Goolden et Trot-

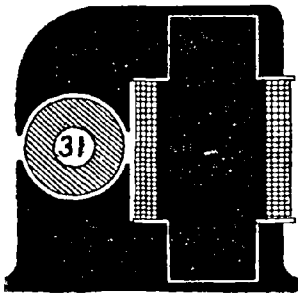


Fig. 121.

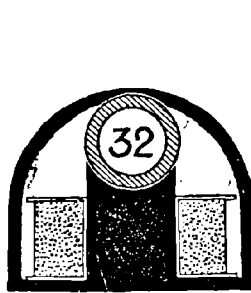


Fig. 122.

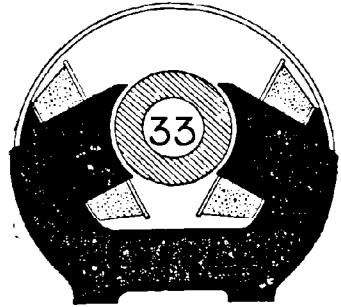


Fig. 123.

Formes typiques d'inducteurs.

ter en ont, de leur côté, établi une forme analogue vers la même époque. Des machines à une seule bobine ont également été produites dans ces derniers temps par Schorch, de Darmstadt, par R. Kennedy, de Glasgow, par Immisch, et par J.-G. Statter and C^o.

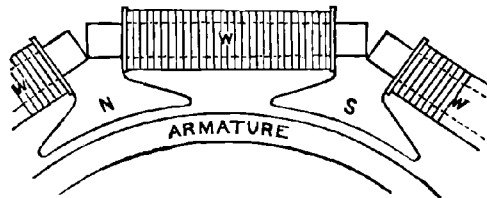


Fig. 124. — Détail de l'inducteur Thury.

Le N° 32 représente également une machine du type cuirassé n'exigeant qu'une seule bobine. Elle a été imaginée en 1882 par Mac Tighe et récemment remise en honneur par Stafford et Eaves. — Un nouveau type étudié par Mordey pour la Compagnie Brush ressemble au numéro 32, à cela près que la bobine est enveloppée par un cylindre de fer extérieur.

Le N° 33 représente la dernière machine de Fein, de Stuttgart, à pôles convergeant vers l'intérieur.

La figure 125 donne une vue de la machine Lahmeyer, à pôles également dirigés vers l'intérieur. (Voir aussi fig. 107, p. 179.)

La dynamo d'Eickemeyer (fig. 126) réalise l'idée de Forbes de mettre les bobines magnétisantes par-dessus l'armature. Les bobines, qui sont roulées séparément sur des formes spéciales, sont logées entre les cu-

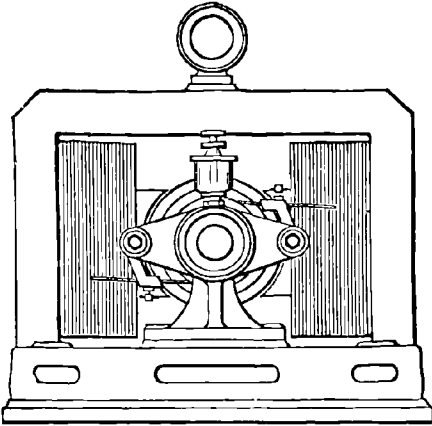


Fig. 125. — Machine Lahmeyer.

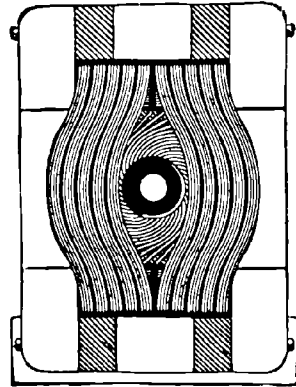


Fig. 126. — Machine Eickemeyer.
(Vue des bobines inductrices.)

lasses supérieure et inférieure et les masses polaires qui se projettent intérieurement. La figure 127 en donne une vue représentant la dispo-

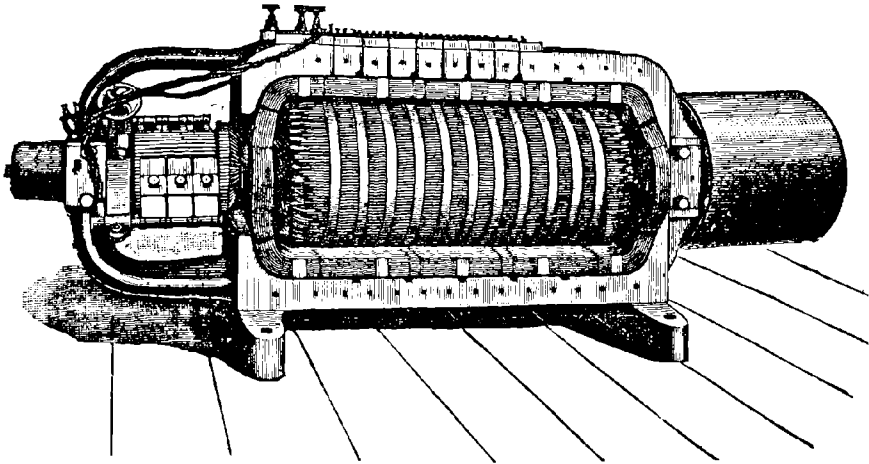


Fig. 127. — Machine Eickemeyer, avec bobines magnétisantes entourant l'induit.

sition intérieure, l'une des masses polaires étant enlevée. Le défaut de cette disposition est la difficulté de ventiler l'induit qui est complètement enveloppé.

Une forme typique des machines à courants alternatifs est celle introduite par Wilde et employée par Siemens, par Gordon et par Ferranti, avec deux couronnes de pôles alternés opposés l'un à l'autre (fig. 128).

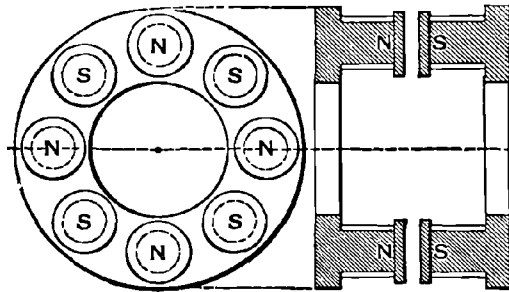


Fig. 128. — Inducteur typique de courants alternatifs.

La figure 129 représente une forme d'électro-aimant à quatre pôles employée par la Compagnie Brush pour ses machines « Victoria » (Mordey) ; elle possède un circuit magnétique double et des pôles consécutifs. Les noyaux destinés à recevoir les bobines sont en fer forgé ;

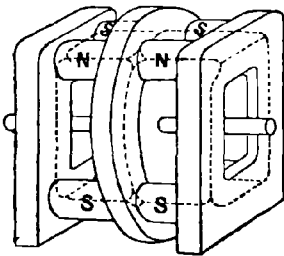


Fig. 129. — Inducteur à 4 pôles (Mordey).

les montants du bâti et les pièces polaires sont fondus. Ce type contraste avec l'électro-aimant à quatre pôles employé par Brown, à Oerlikon, dans de grandes machines de 300 chevaux destinées au transport de l'énergie. Ces dernières sont entièrement venues de fonte avec des pôles saillants. La direction du flux dans ces machines est indiquée par les lignes ponctuées (fig. 130).

Le système inducteur qui s'écarte le plus des précédents depuis ces dernières années est celui de Mordey, dont l'alternateur comporte un inducteur (voir fig. 453) qui, tout en ne possédant qu'un seul circuit magnétique avec une seule bobine excitatrice, est néanmoins multipolaire. Ce résultat est obtenu à l'aide de pièces polaires multiples qui subdivisent le flux magnétique en lui faisant créer plusieurs champs magnétiques distincts. La machine « marine » de la Compagnie Edison (fig. 131)¹, à induit en anneau soumis à l'action de

¹ *Electrical World*, XIII. 201, 1889 ; pour un projet analogue de Mariotti, voir *Electrician*, XXV. 139, 1890.

quatre pôles internes et quatre pôles externes, offre un autre exemple récent d'une machine multipolaire (à huit pôles) n'ayant qu'un seul circuit magnétique. La bobine excitatrice est située derrière l'armature

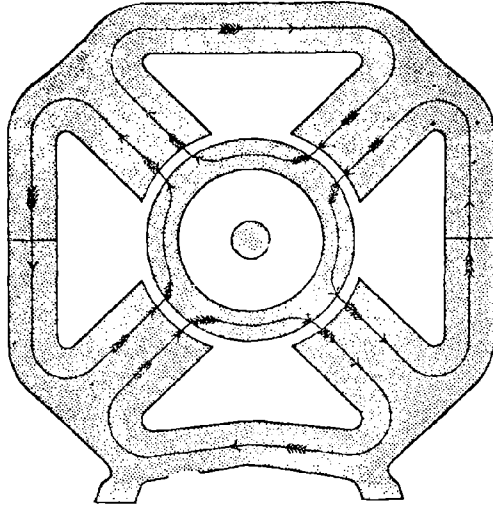


Fig. 130. — Inducteur à 4 pôles (Brown).

entre les deux jeux de pôles. — L'inducteur de l'alternateur triphase (fig. 463), étudié par Brown pour le transport d'énergie de Lauffen à Francfort, appartient également à ce nouveau type à bobine excitatrice unique.

Au milieu d'une telle multiplicité de conceptions, on se demande à laquelle on doit donner la préférence. Mais le type qui convient le mieux à un certain point de vue n'est pas le meilleur à tous égards. Certaines dispositions sont bonnes pour l'emploi de la fonte; d'autres pour l'application du fer forgé; d'autres encore, comme celles représentées par les figures 121 et 129, sont manifestement indiquées pour une construction mixte, comportant des noyaux en fer forgé pour les bobines et de la fonte pour les masses polaires. Dans les petites machines, un circuit unique est probablement le meilleur. Pour les grandes, on est conduit à multiplier le nombre des pôles; et, pour les alternateurs, les formes multipolaires deviennent indispensables pour fournir des alternances de courants suffisamment fréquentes.

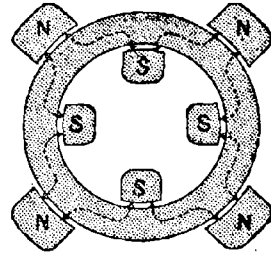


Fig. 131. — Machine marine de la Cie Edison.

L'avenir nous réserve probablement une simplification générale des formes multipolaires par l'adoption de circuits magnétiques ramifiés.

Dans l'étude des formes qui comportent des circuits magnétiques doubles ou multiples, on simplifie généralement la question en considérant un seul élément de l'ensemble auquel on applique le calcul. Ainsi, par exemple, dans la figure 132, qui représente la moitié d'une

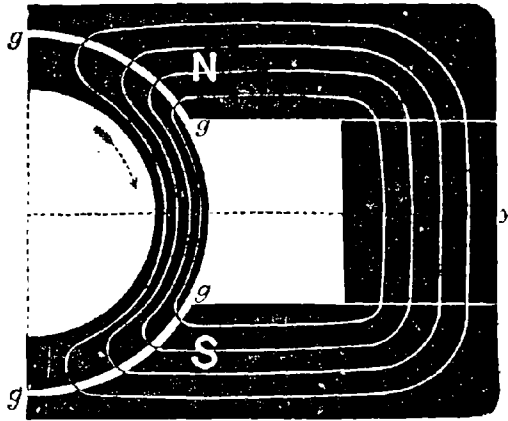


Fig. 132. — Moitié d'une machine à circuit magnétique double.

machine telle que le numéro 8 de la figure 119, il suffit de calculer les résistances magnétiques de la moitié de la machine de manière à déterminer le nombre d'ampères-tours qui doit lui être fourni ; on applique le même nombre à l'autre moitié.

Les types à double circuit magnétique sont préférables à ceux à un seul circuit, comme les numéros 2, 23 et 31, dans tous les cas où l'on peut prévoir beaucoup de réaction d'induit. Dans les formes telles que le numéro 23, le champ est en effet plus faible sous les deux bords supérieurs qu'entre les deux extrémités inférieures des pièces polaires ; l'induit se trouve en conséquence soumis à une plus forte attraction de haut en bas. De plus, en raison de cette inégalité de champ, l'action magnétisante transversale de l'induit produit dans les formes à circuit unique une torsion dissymétrique. Il en résulte forcément des étincelles aux balais. Pour les induits à grand débit, il est bon, non seulement d'employer des électro-aimants doubles, mais encore de séparer l'un de l'autre les deux circuits par des pièces de laiton.

CHAPITRE IX

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DE LA DYNAMO

MACHINES MAGNÉTOS ET A EXCITATION INDÉPENDANTE MACHINES EN SÉRIE. — MACHINES EN DÉRIVATION

L'expérience a démontré que, pour la solution des principaux problèmes à envisager dans l'étude d'un projet de dynamo, le mieux était de considérer le *circuit magnétique de la machine comme un ensemble*, le noyau de fer intérieur à l'induit étant regardé comme partie intégrante de ce circuit, et non pas comme un élément n'ayant d'autre but que d'augmenter la surface efficace embrassée par les spires de cet induit. Dans tout ce qui suit, l'armature est considérée simplement comme formée d'un certain nombre N de conducteurs, groupés d'une façon spéciale autour d'un axe de rotation et dont la fonction est de découper transversalement et d'embrasser un certain flux de force réel fourni par le circuit magnétique. Dans ces conditions le symbole Φ représente *le flux de force total traversant l'induit*, c'est-à-dire qui le pénètre d'un côté pour le quitter de l'autre ; c'est ce que certains auteurs désignent sous le nom d'« induction totale » à travers l'armature, et d'autres de « flux magnétique utile ».

Le nombre de révolutions *par seconde* effectuées par l'induit est désigné par le symbole $\frac{n}{t}$, n représentant le nombre de tours effectués en t secondes.

On reconnaît que la force électromotrice moyenne développée par l'induit est simplement proportionnelle à chacune de ces quantités, de sorte que, en fonction des unités C. G. S., on peut, ainsi qu'on le verra tout à l'heure, écrire comme équation fondamentale :

$$E \text{ (moyenne)} = \frac{n}{t} N\Phi . \quad [I.]$$

Dans la première édition de cet ouvrage, le système inducteur était considéré, indépendamment de l'induit ou de son noyau, comme ayant pour fonction de créer un champ magnétique; et l'induit était uniquement regardé comme une bobine complexe possédant une certaine « surface efficace » et tournant dans ce champ. L'intensité moyenne de ce champ était représentée par le symbole H , et la surface efficace correspondante par A ; la force électromotrice de la dynamo étant proportionnelle au produit de ces deux facteurs et à la vitesse $\frac{n}{t}$, on avait :

$$E \text{ (moyenne)} = 4 \frac{n}{t} AH.$$

Cette manière d'envisager la question n'avait rien d'incorrect; mais aucune des quantités A et H n'était facile à déterminer pour les différents degrés de fonctionnement de la machine. Le noyau de fer de l'induit est regardé, dans la manière actuelle de traiter le sujet, comme n'ayant rien de commun avec le facteur d'induit N , mais comme faisant partie du circuit magnétique et contribuant à la détermination du flux Φ qui sera découpé par l'induit dans son mouvement. En résumé, au lieu de chercher à trouver une *intensité* moyenne, il faut se figurer le champ magnétique comme un tout et se préoccuper de sa valeur.

Dans le présent chapitre nous donnerons tout d'abord une expression de la force électromotrice moyenne, qui servira d'équation fondamentale pour toutes les dynamos. En introduisant ensuite des formules appropriées aux divers circuits, nous en déduirons des équations pour les différents genres de machines montées en série, en dérivation ou en compound.

SYMBOLES ET NOTATIONS

Nous indiquons ici les notations et symboles dont nous ferons usage dans ce chapitre et dans les suivants, avec leurs significations :

B ou \mathfrak{B} induction magnétique spécifique.	
b nombre de fils extérieurs dans une section de l'induit.	
β largeeur angulaire d'une section d'induit ou d'un segment de collecteur.	
E force électromotrice totale engendrée dans un	} exprimées en volts.
induit,	
\mathfrak{E} force électromotrice sous laquelle est fourni un cou-	
rant extérieur,	
e différence de potentiel de borne à borne,	
ϵ différence de potentiel de balai à balai,	
η coefficient économique (voir p. 226 et Chapitre XXVIII).	
F force (traction, poussée ou pression), exprimée en <i>dynes</i> , grammes ou kilogrammes (poids).	

- H ou \mathcal{H} intensité de champ magnétique ou force magnétisante.
- i courant dans un circuit extérieur,
 i_a courant dans un induit,
 i_d courant dans une bobine en dérivation,
 i^n ou i_s courant dans une bobine en série d'électro-aimant, } exprimés en ampères.
- L coefficient de self-induction.
- l ou λ longueur moyenne d'un tour de fil ou spire dans une bobine ; — angle de calage.
- μ coefficient de perméabilité magnétique du fer.
- N nombre de conducteurs sur un induit, compté sur tout le pourtour de la périphérie extérieure.
- n nombre abstrait.
- $\frac{n}{t}$ nombre de tours ou de révolutions par seconde.
- n_c nombre de segments d'un collecteur ou commutateur.
- n_d nombre de tours de fil ou spires sur une bobine d'électro-aimant en dérivation.
- n_p nombre de paires de pôles d'une dynamo multipolaire.
- n_m ou n_s nombre de tours de fil ou spires sur une bobine d'électro-aimant en série avec un induit.
- P } puissance exprimée en *watts*, en *chevaux-vapeur*, ou en *kilowatts*.
- v } R résistance d'un circuit extérieur,
 r résistance intérieure d'une dynamo ; égale à $r_a + r_m$
ou à $r_a + r_d$, suivant les cas,
 r_a résistance des bobines d'induit,
 r_d résistance de bobines en dérivation } sur un électro-aimant, } exprimées en ohms.
- r_m ou r_s résistance de bobines en série
- ρ résistance par unité de longueur,
- S surface exprimée en *centimètres carrés*.
- T temps périodique, mesuré en *secondes*, d'un courant alternatif.
- t temps exprimé en *secondes*.
- v coefficient de dérivation magnétique.
- W ou w travail, couple mécanique ou torque, exprimés en *ergs* ou *dynes-centimètres*, en *grammètres* ou en *kilogrammètres*, suivant les cas.
- Φ Flux de force magnétique ou flux magnétique utile traversant un noyau d'induit.
- ω vitesse angulaire exprimée en *radians par seconde*.

ÉQUATION FONDAMENTALE DE LA DYNAMO

Pour trouver la force électromotrice moyenne développée dans le circuit d'un conducteur en mouvement, il faut se rappeler que, par définition, cette force électromotrice est (en unités absolues C. G. S.) numériquement égale à la variation du flux de force qui le pénètre.

Comme l'unité pratique, le *volt* (voir l'Appendice A) est, par définition, égale à 10^8 unités C. G. S. de force électromotrice, il faudra diviser par 10^8 le nombre d'unités C. G. S. pour le réduire en volts. En outre, quand il y a, comme dans les induits de machines, un certain nombre de conducteurs en série l'un sur l'autre, la force électromotrice totale d'une dynamo est égale à la somme des forces électromotrices développées dans ces conducteurs en série l'un par rapport à l'autre. L'équation fondamentale prendra dès lors la forme :

$$E \text{ (moyenne) [en volts]} = \frac{n}{t} N\Phi \cdot 10^{-8}. \quad [I a.]$$

Nous considérerons tout d'abord une machine bipolaire ordinaire. Le nombre de « sections » ou « bobines élémentaires » de son induit étant désigné par le symbole n_c , le nombre des « segments » ou touches du commutateur ou collecteur sera également n_c . Supposons qu'il y ait dans chaque section b fils ou conducteurs extérieurs, comptés à la périphérie du noyau d'induit. (Dans les armatures en anneau il y aura autant de fils extérieurs que de spires ou boucles dans la section ; dans une armature en tambour, il y en aura deux fois autant que de spires ou boucles dans cette section.) Le nombre de conducteurs ou fils extérieurs, comptés sur tout le pourtour de l'induit, sera en conséquence bn_c ; mais il sera plus commode d'employer le symbole unique N pour représenter ce nombre ; et le nombre de conducteurs ou fils extérieurs montés électriquement en série l'un sur l'autre, de balai à balai, sera $\frac{bn_c}{2}$ ou $\frac{N}{2}$. Admettons maintenant que l'induit tourne à une vitesse de $\frac{n}{t}$ révolutions *par seconde*. (Les ingénieurs ont l'habitude de compter les tours par minute, ce qui obligera à diviser ce nombre par 60 pour obtenir $\frac{n}{t}$.) Par suite, un tour s'effectuera en $\frac{t}{n}$ de seconde.

On peut dès lors calculer la force électromotrice.

Flux de force découpé en 1 tour par 1 fil extérieur = 2Φ ,
(puisque chaque spire de fil est pénétrée par le flux deux fois par tour, une fois avant son entrée dans le champ sur un côté de l'induit, et l'autre à sa sortie de l'autre côté) ;

Flux de force découpé dans un temps t par 1 fil extérieur = $\frac{2n\Phi}{t}$;

Flux de force découpé dans un temps t par $\frac{N}{2}$ fils extérieurs en série = $\frac{2n}{t} \Phi \frac{N}{2}$,

ou = $\frac{n}{t} N \Phi$.

Force électromotrice moyenne (en unités C.G.S.) = $\frac{n}{t} N \Phi$;

Force électromotrice moyenne (en volts). . = $\frac{n}{t} N \Phi \cdot 10^{-8}$. [I a.]

On pourrait se dispenser d'écrire dans chaque cas le facteur 10^{-8} dans la formule. Il serait en effet facile de se rappeler que, s'il est omis par abréviation, on peut immédiatement déduire en volts ¹ les nombres obtenus en effectuant cette opération.

Dans bien des cas il est plus commode d'avoir cette équation fondamentale en fonction de la vitesse angulaire. Le symbole de cette vitesse angulaire étant ω , on a

$$\omega = 2\pi \frac{n}{t} ;$$

en effet, l'angle décrit par tour est 2π radians ou 360 degrés. On en tire $\frac{n}{t} = \frac{\omega}{2\pi}$, d'où :

$$[\text{volts}] E \text{ (moyenne)} = \frac{\omega}{2\pi} N\Phi \cdot 10^{-8}. \quad [\text{I b.}]$$

On remarquera que cette force électromotrice est simplement une moyenne, et que, suivant la construction de l'induit, il y a plus ou moins d'ondulations de cette valeur dans une révolution.

Si, comme dans la figure 133, l'induit n'avait que deux fils extérieurs formant une seule spire, la force électromotrice oscillerait entre zéro et un maximum. Si l'on appelle 0 degré le point le plus bas de la position verticale occupée par la boucle mobile, la position gauche de la ligne ponctuée correspondra à 90 degrés, si l'on admet que la machine tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Le point le plus haut correspondra à 180 degrés ; et le point extrême sur la droite, à 270 degrés. La force électromotrice induite sera en conséquence nulle quand la bobine passera par les points 0 et 180 degrés, car dans ces positions les fils

¹ Il y aurait un autre moyen de simplifier la formule ; ce serait d'adopter cent millions ou 10^8 unités C. G. S. comme unité de quantité de flux magnétique. Dans ce cas, le symbole Φ représenterait le nombre de flux fractionnés de chacun cent millions d'unités C. G. S. Mais il a été construit très peu de dynamos dans lesquelles le flux magnétique atteigne un chiffre aussi élevé comme faisceau de ce genre. L'inconvénient d'avoir toujours des nombres fractionnaires pour valeur de Φ irait d'ailleurs à l'encontre des avantages que présente une unité qui concorde si bien avec les autres unités pratiques internationales. Il n'y a pas en somme grand inconvénient à omettre le diviseur 10^8 dans les formules [qui seront ainsi exprimées en unités C. G. S.].

rasent plutôt qu'ils ne coupent les lignes de force, et elle atteindra son maximum quand la spire passera à 90 et à 270 degrés. La « variation du flux » à l'intérieur de la spire sera *maximum* quand ce flux sera *minimum*, et *vice versa* (voir p. 30-31).

Pour tout angle intermédiaire, si le champ est uniforme, le flux de force effectif à travers la spire est proportionnel au cosinus de l'angle dont cette spire a tourné depuis sa position zéro, et la force électromo-

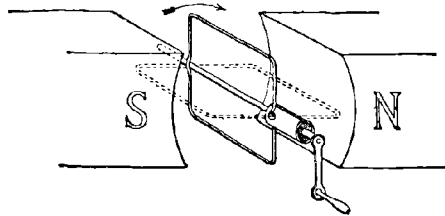


Fig. 133. — Dynamo élémentaire idéale.

trice est proportionnelle au sinus de cet angle. Strictement parlant, il faut prendre le sinus avec le signe —, ou en valeur *négative*, pour représenter cette force électromotrice, parce que, suivant la définition usuelle, la force électromotrice induite est proportionnelle à la variation *décroissante* du flux de force dans la spire. Il n'y a pas, toutefois, à s'inquiéter du signe, attendu que, si le commutateur est convenablement disposé, toutes les forces électromotrices induites sont, par son action, dirigées dans le même sens à travers le circuit extérieur.

On peut calculer de la manière suivante l'expression exacte de la force électromotrice dans la spire pour un angle donné quelconque θ : — Le flux à travers la spire, quand cette spire a tourné de l'angle θ , est $= \Phi \cos \theta$; d'où il résulte que la variation du flux sera $\omega \Phi \sin \theta$, ou $2 \pi \frac{n}{t} \Phi \sin \theta$. Or, comme la valeur moyenne de $\sin \theta$, entre les limites $0 = 0$ degré et $0 = 90$ degrés, est $\frac{2t}{n}$, on aura la force électromotrice *moyenne par spire* en substituant cette valeur dans son équation, ce qui donne

$$[\text{volts}] E \text{ (moyenne) par spire} = 4 \frac{n}{t} \Phi \cdot 10^{-8};$$

et, comme le nombre de spires en série, de balai à balai, est $\frac{N}{4}$, on aura finalement

$$[\text{volts}] E \text{ (moyenne)} = \frac{n}{t} N \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Si les bobines élémentaires étaient constituées par un grand nombre de spires toutes réunies en un seul faisceau, comme dans la bobine en navette de Siemens (p. 32), les mêmes expressions subsisteraient naturellement, à la condition qu'on donnât à N la valeur convenable.

Ondulations de la Force électromotrice dans un induct à une seule spire.

Ainsi qu'on l'a vu ci-dessus, la force électromotrice réelle induite est proportionnelle au sinus de l'angle dont la bobine a tourné, c'est-à-dire que, en unités C. G. S.,

$$E = 2\pi \frac{n}{t} \Phi \sin \theta \times \frac{N}{4},$$

ou

$$E = \frac{\pi}{2} \frac{n}{t} N \Phi \sin \theta. \quad [\text{II.}]$$

Quand θ augmente de 0 à 360 degrés, la valeur du sinus passe de 0 à 1, puis de 1 à 0, ensuite de 0 à -1, et revient finalement de -1 à 0. Les variations du sinus sont représentées dans la figure 134. La même courbe peut donc servir à montrer comment oscillerait la force électro-

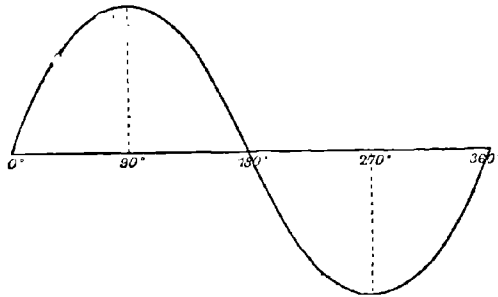


Fig. 134.

motrice s'il n'y avait pas de commutateur. Mais le commutateur a pour effet de transformer les inductions négatives en inductions positives, les balais étant disposés de manière à passer d'une touche du commutateur à l'autre au moment où commence l'induction inverse. Il en résulte pour la courbe la forme indiquée par la figure 135, qui, par suite, représente les pulsations du voltage dans le circuit d'une ancienne armature en navette de Siemens. Mais si l'on pouvait niveler ces sinuo-

sités et transformer l'induction ondulatoire en une induction régulière, on obtiendrait une seule ligne droite, indiquée en pointillé dans la figure 135, qui comprendrait, au-dessous d'elle, une surface rectangulaire égale à la somme des surfaces enveloppées par les lignes courbes

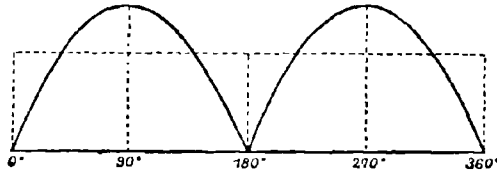


Fig. 135.

et se trouverait, par suite, à une hauteur qui serait la moyenne des hauteurs des différents points de ces courbes : par le fait, chacune de ces lignes faisant partie d'une courbe de sinus, la hauteur *moyenne* serait $\frac{2}{\pi}$ ou environ $\frac{7}{11}$ de leur hauteur maximum. Par suite de la self-induction dans les spires, le courant est moins ondulatoire ¹ que le voltage ; les vides sont en partie comblés.

Ondulations dans un induit en circuit fermé divisé en sections.

Comme on l'a vu dans la description donnée pages 37 et 38, ce sont des raisons de construction qui font rouler les bobines d'armature en deux groupes reliés en parallèle. Les deux moitiés de l'anneau Pacinotti, les deux moitiés de la bobine en tambour de Siemens, se réunissent ainsi aux balais en arc multiple ou en parallèle. Si chacune d'elles est formée de 100 tours de fil, leur effet conjugué n'est pas plus grand, comme induction de force électromotrice, que celui de l'une d'entre elles agissant séparément, mais la résistance intérieure de l'armature est réduite à moitié. Partant de là, nous admettons, dans les développements qui suivent, que les enroulements d'induit sont formés de *paires* de bobines. Ainsi, au lieu d'une bobine de 200 tours de fil, comme l'indique la figure 136, nous admettons qu'il y a une paire de bobines de 100 tours chacune comme dans la figure 137.

Supposons maintenant que, pour obtenir une ondulation moindre, on divise chacune des paires primitives de bobines en deux parties, et

¹ Voir les remarques de Cromwell F. Varley dans le *Phil. Mag.*, 1867, et de Puluj dans les *Sitzungsber. Wien. Akad.*, II a. mai 1891.

qu'on les dispose à angles droits l'une par rapport à l'autre. Pour prendre un exemple numérique, supposons qu'il y eût primitivement 100 tours de fil sur chaque bobine, et qu'on les partage chacune en

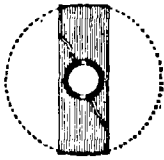


Fig. 136.

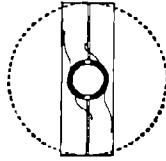


Fig. 137.

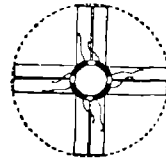


Fig. 138.

deux bobines de 50 spires, mais qu'on les monte en croix l'une par rapport à l'autre, de telle sorte que l'une arrive à la position d'action maximum dans le champ au moment où l'autre la quitte. (Cette disposition est indiquée dans la figure 138 que l'on peut comparer avec la

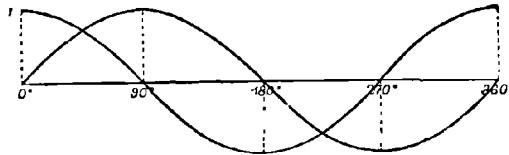


Fig. 139.

figure 137 représentant la bobine non divisée.) Dans ce cas, on aura deux systèmes de courbes chevauchant l'une sur l'autre et chacune de ces courbes ne devra plus avoir que la moitié de la hauteur précédente en raison de ce que le nombre de spires de chaque bobine ne sera

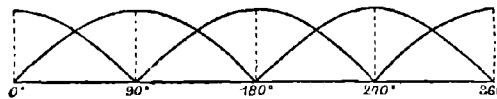


Fig. 140.

plus que la moitié de ce qu'il était pour la bobine entière. Dès lors, s'il n'y avait pas de commutateur, la force électromotrice induite dans les deux groupes de bobines présenterait les ondulations indiquées par les deux courbes de la figure 139. Mais si les extrémités des deux « sections » de la bobine sont reliées à un commutateur ou à un collecteur convenable, toutes les inductions « inverses » seront changées en inductions « directes » par le passage sous les balais au moment voulu, et les deux courbes deviendront telles qu'elles sont indiquées dans la figure 140. Il s'agit dès lors de voir quel sera le résultat conjugué de ce chevauche-

ment de forces électromotrices : il est évident que de 0 degré à 90 degrés les deux actions inductrices viennent s'ajouter et qu'à 45 degrés elles sont égales. Le résultat net est, par suite, ici double de l'effet qu'elles produiraient individuellement ; et, par le fait, la courbe représentant la

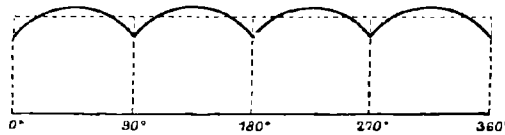


Fig. 141.

somme des deux courbes est celle donnée par la figure 141. On voit de suite que cette courbe est un acheminement vers la *continuité* ; ses ondulations sont bien moindres que celles fournies par une bobine unique (fig. 135). Si, comme tout à l'heure, on nivelle les sommets ondulatoires par une ligne ponctuée, on obtient exactement la même hauteur que

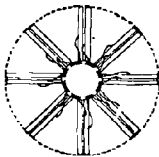


Fig. 142.

précédemment. L'induction *totale* produite est la même, et la force électromotrice *moyenne* est aussi la même. Il n'y a par conséquent aucun gain dans le travail électrique total résultant du nouveau montage des bobines de l'armature en deux groupes perpendiculaires entre eux ; mais il y a amélioration réelle en ce que le courant est plus continu et plus régulier.

Si l'on divise encore les bobines, qu'on les monte à 45 degrés l'une de l'autre, comme l'indique la figure 142, en quatre groupes de paires, chaque bobine ayant vingt-cinq spires, et qu'on les relie ensuite à un commutateur convenablement disposé, on obtiendra un effet qu'on peut

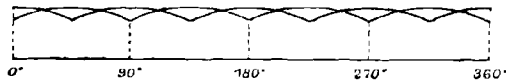


Fig. 143.

très facilement représenter à l'aide de deux courbes semblables à la précédente, mais de hauteur moitié moindre, et se compensant comme l'indique la figure 143. L'une d'elles présentera naturellement ses sommets en avance de 45 degrés sur ceux de l'autre, et leur sommation fournira une courbe résultante telle que celle de la figure 144 qui a exactement la même hauteur *moyenne* que précédemment, mais avec encore moins d'ondulation. On conçoit aisément que ce mode de procéder, consistant à diviser la bobine d'induit en sections et à disposer

symétriquement ces sections à distances angulaires égales, conduise à un résultat aussi approché qu'on voudra de la continuité absolue. Si la paire primitive de bobines de 100 tours de fil chacune était divisée en

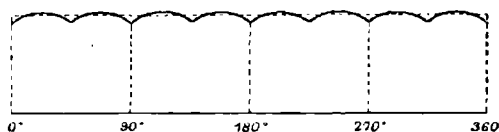


Fig. 144.

vingt groupes de paires de cinq spires chacune, ou même en dix groupes de paires de dix spires, on arriverait aussi près que possible de la continuité absolue. Il ne reste plus qu'à calculer algébriquement cette approximation de continuité, opération plus fastidieuse que difficile.

Calcul des Ondulations de la Force électromotrice dans les induits en circuit fermé.

On a vu au Chapitre III que, dans tout induit, une section de la bobine reliée à deux touches quelconques du commutateur subit, à chaque instant, un effet d'induction exactement semblable, mais de signe contraire, à celui produit dans la section reliée aux deux touches diamétralement opposées de ce commutateur. Nous avons assimilé les deux groupes de bobines, dans les deux moitiés de l'induit, à deux groupes d'éléments galvaniques montés parallèlement. Supposons que l'armature ait en tout trente-six sections; il y en a, en réalité, deux groupes de dix-huit, et la force électromotrice induite dans chaque groupe est identique. Nous prendrons comme exemple le cas d'un induit en anneau, qui est moins compliqué qu'un tambour. Représentons par le symbole n_c le nombre total des sections de l'induit. Il y aura, par suite, $\frac{n_c}{2}$ sections dans chaque moitié, de balai à balai. Supposons que chaque section comporte b tours de fil. L'armature totale contiendra bn_c spires. Si ces n_c sections sont disposées symétriquement autour de la bobine, l'angle compris entre le plan de chaque section et celui de la suivante sera de $\frac{360}{n_c}$ degrés ou $\frac{2\pi}{n_c}$ radians. Cette expression peut s'écrire $\frac{\pi}{\frac{1}{2}n_c}$; et, pour abrégé, nous appellerons cet angle $= \beta$. On calculera dès lors la force électromotrice totale induite dans un des groupes de sections, c'est-à-dire dans l'un des groupes des $\frac{1}{2}n_c$ sections de bobines, en parcourant la moitié de l'armature de l'un des balais à l'autre. En se reportant à ce qui précède et se rappelant que un flux égal à $\frac{\Phi}{2}$ seulement, au plus, pénètre une section quelconque à un moment quelconque, on voit que, dans la première section, lorsqu'elle a tourné d'un angle θ , la force électromotrice induite e_1 est

$$e_1 = \omega \frac{\Phi}{2} b \sin \theta,$$

ω représentant la vitesse angulaire. Dans la seconde section, la force électromotrice sera

$$e_2 = \omega \frac{\Phi}{2} b \sin (\theta + \beta),$$

puisque cette section occupe une position différant d'un angle β de celle de la première section. Dans la troisième section, on aura de même

$$e_3 = \omega \frac{\Phi}{2} b \sin (\theta + 2 \beta);$$

et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive à la dernière section du groupe, pour laquelle la force électromotrice sera

$$e_{\frac{1}{2} n_c} = \omega \frac{\Phi}{2} b \sin \left[\theta + \left(\frac{1}{2} n_c - 1 \right) \beta \right].$$

Mais la force électromotrice totale du groupe est la somme de toutes ces forces électromotrices individuelles, ce qui donne :

$$E = \omega \frac{\Phi}{2} b \times \left\{ \sin \theta + \sin (\theta + \beta) + \sin (\theta + 2 \beta) + \dots + \sin \left[\theta + \left(\frac{1}{2} n_c - 1 \right) \beta \right] \right\}.$$

On ne peut néanmoins avoir aucune indication relative aux valeurs maximum et minimum de cette force électromotrice ondulatoire tant que l'expression de E conserve la forme d'une longue série de valeurs. Il faut sommer cette série entre accolades.

En insérant cette somme on a immédiatement

$$E = \omega \frac{\Phi}{2} b \frac{\cos \left(\frac{\beta}{2} - \theta \right)}{\sin \frac{\beta}{2}}.$$

Le degré d'ondulation impliqué par cette formule dépend de la position occupée par les balais. Ils passent, naturellement, d'une touche du commutateur à l'autre, quand le commutateur tourne de l'angle β . Ainsi, si $\theta = 0$ au début, quand la lame du commutateur commence juste à toucher le balai, alors $\theta = \beta$ au moment précis où la lame cesse d'être en contact avec lui. Et, quand le balai touche le milieu de la lame, $\theta = \frac{\beta}{2}$. Mais le cosinus est maximum quand l'angle est minimum. Par suite E sera maximum pour $\frac{\beta}{2} = 0$, c'est-à-dire pour $\frac{\beta}{2} - \theta = 0$; et E sera minimum soit pour $\theta = 0$, soit pour $\theta = \beta$. On a par conséquent les résultats suivants pour le passage de la touche du commutateur sous le balai :

(1.) Au début ($\theta = 0$),

$$E \text{ (minimum)} \dots \dots = \omega \frac{\Phi}{2} b \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

$$= \omega \frac{\Phi}{2} b \cotang \frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}.$$

(2.) Au milieu de la touche ($\theta = \frac{\beta}{2}$),

$$E \text{ (maximum)} \dots \dots = \omega \frac{\Phi}{2} b \frac{1}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

$$= \omega \frac{\Phi}{2} b \operatorname{coséc} \frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}.$$

(3.) A la fin ($\theta = \beta$),

$$E \text{ (de nouveau minimum)} = \omega \frac{\Phi}{2} b \frac{\cos \frac{\beta}{2}}{\sin \frac{\beta}{2}}$$

$$= \omega \frac{\Phi}{2} b \cotang \frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}.$$

La plus grande ondulation qui puisse se présenter correspondra donc à la différence entre $\operatorname{coséc} \frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}$ et $\cotang \frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}$; et, comme chaque touche en passant sous les balais arrive juste à la position occupée par la touche qui la précède, il y aura autant d'ondulations par tour qu'il y a de touches au collecteur ou de sections dans l'induit, c'est-à-dire n_c . De plus, si l'on pouvait augmenter indéfiniment le nombre des sections, de telle sorte que $\frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}$ ou $\frac{\beta}{2}$ fût pratiquement $= 0^\circ$, alors $\operatorname{coséc} \frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}$ et $\cotang \frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c}$ seraient toutes deux égales à $\frac{n_c}{\pi}$; car $\frac{90^\circ}{\frac{1}{2} n_c} = \frac{\pi}{n_c}$, et pour de faibles angles l'arc est sensiblement égal soit au sinus, soit à la tangente. Nous calculerons cependant le véritable degré d'ondulation pour certains cas.

Un assez grand nombre de dynamos comportent des armatures à 36 sections avec un collecteur à 36 touches. On désire connaître les ondulations dans ce cas et dans d'autres avec plus ou moins de sections. Le tableau suivant fournit le résultat des calculs; le nombre des sections de l'induit et du collecteur étant donné dans la première colonne, et leur largeur angulaire dans la seconde, l'ondulation est la différence entre les colonnes 3 et 4 (voir le tableau p. 214).

Ces chiffres montrent clairement que les ondulations deviennent pratiquement insignifiantes quand on augmente le nombre des sections; c'est ce qu'indiquaient d'ailleurs les courbes des figures 135 à 144. Avec un

n_c	β	$\frac{\text{COSÉC } \frac{\beta}{2}}{n_c}$	$\frac{\text{COTANG } \frac{\beta}{2}}{n_c}$	ONDULATION	ONDULATION p. 100
1	2	3	4	5	6
2	180°	0,5	0,0000	0,5	± 50,00
4	90	0,3479	0,2500	0,0979	14,04
10	36	0,3236	0,3077	0,0159	2,38
12	30	0,3220	0,3110	0,0110	1,70
15	24	0,3206	0,3136	0,0070	1,10
20	18	0,3196	0,3157	0,0039	0,61
24	15	0,3192	0,3165	0,0027	0,42
30	12	0,3189	0,3171	0,0018	0,28
36	10	0,3187	0,3175	0,0012	0,19
40	9	0,3186	0,3177	0,0009	0,14
45	8	0,31857	0,31780	0,00077	0,12
60	6	0,31846	0,31802	0,00044	0,07
90	4	0,31838	0,31819	0,00019	0,03
360	1	0,31832	0,31830	0,00002	0,003
5 400	0°4'	0,3183099	0,3183098	0,0000001	0,00001

collecteur à 20 touches, les ondulations de la force électromotrice dans l'armature sont inférieures à 1 p. 100 de la force électromotrice totale. Avec un collecteur en 36 parties, elles sont inférieures à 2 p. 1 000. En ce qui concerne uniquement les ondulations, c'est donc un raffinement pratiquement inutile que d'employer des collecteurs à plus de trente-six touches. Mais, ainsi qu'on le verra en étudiant les phénomènes de self-induction dans les sections individuelles, d'autres raisons militent en faveur d'un nombre de sections aussi grand que possible.

En supposant maintenant qu'on donne à l'enroulement un grand nombre de sections, de telle sorte que les ondulations puissent être négligeables, quelle sera la force électromotrice totale? — On peut écrire, ainsi qu'on l'a vu, $\frac{n_c}{\pi}$ au lieu de $\text{coséc } \frac{\beta}{2}$ ou $\text{cotang } \frac{\beta}{2}$, ce qui donne

$$E = \omega \frac{\Phi}{2} b \frac{n_c}{\pi}$$

Mais $\omega = 2\pi \frac{n}{t}$ radians et $bn_c = N$, de sorte que la formule devient encore

$$E = \frac{n}{t} N \Phi,$$

comme précédemment.

Mesure de l'Ondulation.

Le degré relatif d'ondulation dans le courant fourni par une dynamo peut être déduit de son effet inducteur sur un circuit voisin. Introduisons une bobine dans le circuit et disposons une seconde bobine, tout à fait indépendante de la première, dans le prolongement de celle-ci, c'est-à-dire suivant le même axe, de telle sorte que le coefficient de mutuelle induction entre ces deux bobines soit aussi grand que possible. Introduisons dans le circuit de la seconde bobine le récepteur d'un téléphone Bell. Si le courant est constant dans le circuit principal, on n'entendra aucun son. S'il est ondulatoire, chaque ondulation induira un courant secondaire correspondant dans le circuit téléphonique, et l'intensité ainsi que la fréquence des ondulations pourront être estimées d'après la hauteur ou la gravité du son dans le téléphone. Les ondulations du courant d'une machine Brush, qui sont d'environ 1,25 p. 100, se dénotent aisément de cette façon. Le professeur Ayrton a imaginé d'introduire dans le circuit d'induction secondaire un électro-dynamomètre destiné à servir de « mesureur de discontinuité ».

Effet d'un défaut de simultanéité dans la Commutation.

Si les balais sont montés de telle sorte que le passage au contact sous l'un d'eux ne s'effectue pas au même instant que le passage sous l'autre, il est évident que les forces électromotrices dans les deux moitiés du circuit d'induit seront légèrement inégales. Cette inégalité momentanée disparaîtra pour faire place à une autre (de signe contraire) quand la commutation s'effectuera à l'autre balai. Le résultat sera le même que si un petit courant alternatif variant de $\frac{2nn_c}{f}$ périodes par seconde était amené à agir sur le circuit de l'induit. Ce défaut dans les induits peut provenir de différentes causes : il se manifestera si le nombre des sections de l'induit est impair, si le nombre des fils n'est pas le même dans toutes les sections, ou si leurs connexions ne sont pas symétriques, ou finalement si le contact des balais ne se fait pas exactement sur les extrémités opposées d'un même diamètre. Ces effets sont indépendants d'un trouble, moins sensible cependant, résultant, dans toute armature, d'inductions mutuelles entre les courants dans les spires où s'effectue la commutation et dans les spires adjacentes.

Mesure de Φ .

La manière de procéder pour mesurer le flux de force qui traverse réellement l'induit constitue un problème de haute importance. Le mieux est, par le fait, de le calculer d'après le fonctionnement même de la machine. La vitesse étant contrôlée à l'aide d'un compteur de tours convenable, le nombre de fils autour de l'induit étant connu, et la force électromotrice totale engendrée

dans la machine étant mesurée par les méthodes électriques employées à cet effet, il ne reste plus qu'à appliquer la formule fondamentale, transformée pour dégager Φ :

$$\Phi = \frac{E \cdot 10^8}{\frac{n}{t} N}.$$

Le moyen adopté pour mesurer E devra dépendre de la construction de la machine. S'il s'agit d'une machine à courant continu, soit magnéto, soit à excitation indépendante, il suffira d'appliquer à circuit ouvert un simple voltmètre entre les bornes ou les balais. Si l'on a affaire à une machine en série ou en dérivation, on pourra recourir à la même méthode, à la condition de déconnecter les bobines inductrices et de les exciter séparément (à l'aide d'accumulateurs, par exemple) exactement au même point que quand la machine fonctionne. Dans ces différents cas cependant le résultat ne donnera pas exactement les valeurs de fonctionnement, en raison des réactions dues, en marche normale, aux courants considérables dans les spires de l'induit. Pour mesurer E quand la machine tourne, il faut ou la faire fonctionner sur des résistances connues (de manière à pouvoir calculer E d'après la loi d'Ohm), ou bien mesurer (voir p. 220) la différence de potentiel aux balais à l'aide d'un voltmètre, et calculer, d'après la résistance de l'induit et le courant qui y circule, le nombre de volts perdus intérieurement. En les ajoutant aux volts mesurés, on aura le montant total de E .

Un autre moyen, qui n'implique pas la marche de la machine et est par suite moins satisfaisant, consiste à rouler autour de l'armature, dans son voisinage immédiat et exactement suivant le diamètre de commutation, un seul tour de fil fin isolé, dont les extrémités sont reliées par deux fils isolés très rapprochés l'un de l'autre, ou mieux encore tordus ensemble, à un galvanomètre balistique à période lente et de sensibilité convenable. Ceci étant fait, on s'arrange alors pour exciter séparément les inducteurs, au moyen d'un courant auxiliaire, au degré correspondant à l'excitation de fonctionnement. En appliquant le courant d'excitation, on donne naissance dans le circuit à un courant de courte durée, proportionnel en valeur intégrale au flux de force ainsi introduit dans la spire de fil, et qui donne une impulsion au galvanomètre. On peut régler cette impulsion en introduisant des résistances convenables. En rompant le circuit d'excitation ou mettant en court-circuit les bobines d'excitation, on observe une autre impulsion de sens contraire et d'égale valeur. Pour déterminer le flux de force absolu indiqué par cette impulsion, il est nécessaire de faire une expérience comparative à l'aide d'un appareil quelconque permettant d'introduire un flux connu dans le même circuit. On se servira avantageusement à cet effet d'une bobine à main de grandes dimensions (analogue, en grand, à la bobine d'un galvanomètre des tangentes), comportant un nombre connu de spires de fil fin, dont la surface moyenne aura été soigneusement mesurée. Une bobine de ce genre sera insérée dans le circuit du galvanomètre ci-dessus mentionné, mais avec des fils de connexion suffisamment longs pour qu'il puisse être placé à une distance de la dynamo ou de tout autre agent magnétique telle qu'il ne puisse y avoir place pour aucune

erreur résultant de ces causes de perturbation. Elle devra être bien verticalement réglée en un point où la valeur de la composante verticale du champ magnétique terrestre soit connue. (Elle est à Paris de 0,4222 unité C. G. S.) En renversant brusquement cette bobine, on obtient une autre impulsion sur le galvanomètre balistique. Le résultat se calcule de la manière suivante : — Soient δ_1 l'impulsion due à l'introduction du flux Φ à travers la spire, et δ_2 celle fournie par le renversement de la bobine ; si N est le nombre de tours de fil sur la bobine, S la surface (moyenne) embrassée par chacun d'eux, et H_v l'intensité de la composante verticale du champ terrestre, le flux embrassé par le renversement de la bobine sera $2NSH_v$, et Φ sera donné par la simple règle de trois :

$$\frac{\Phi}{2NSH_v} = \frac{\delta_1}{\delta_2}.$$

Dans une modification de cette méthode, brièvement décrite page 71, M. Mordey mesure dans un alternateur le flux de force qui passe, pour chaque position de l'induit, à travers ses spires.

MACHINE MAGNÉTO ET MACHINE A EXCITATION INDÉPENDANTE

Dans les équations considérées jusqu'ici, on a supposé que l'induit tournait dans un champ magnétique dont la valeur était représentée par le symbole Φ . Il n'a rien été spécifié comme genre d'inducteur; la formule générale précédemment déduite s'applique donc naturellement à tous les systèmes inducteurs pourvu que leur force magnétique soit connue. Dans les machines magnéto-électriques, dont le champ inducteur est constitué par des aimants permanents en acier, Φ dépend à la fois de l'aimantation de l'acier, et du noyau de fer de l'induit. Le flux de force qui traverse cet induit est cependant diminué par la réaction d'induit quand on demande à la machine un grand débit. Si le magnétisme du système inducteur était assez prépondérant sur celui des bobines d'induit pour que cette réaction fût tout à fait insignifiante, la formule fondamentale étant

$$E = \frac{n}{t} N\Phi,$$

E serait, pour une machine magnéto donnée quelconque, directement proportionnel à la vitesse de rotation $\frac{n}{t}$. Mais on sait qu'en pratique il n'en est pas ainsi. Supposons que l'on fasse marcher une machine magnéto à la vitesse de 600 tours par minute ($\frac{n}{t} = 10$, puisqu'elle fera ainsi 10 révolutions par seconde) et qu'elle donne, par exemple, 17 volts

de force électromotrice ; dès lors, s'il n'y avait aucune réaction du fait de l'induit, à l'allure de 1 200 tours par minute elle devrait fournir exactement 34 volts. On n'y arrive jamais en réalité, bien que dans certaines machines, telles que les machines magnétos Gramme, *type de laboratoire*, construites par Breguet (fig. 7, p. 15), la proportion directe soit très approximativement atteinte, même à de beaucoup plus grandes vitesses.

Relation entre la Vitesse et la Force électromotrice. — Tours morts.

Si le courant dans l'induit est maintenu constant par l'addition, dans le circuit, de résistances proportionnelles à l'augmentation de vitesse, l'action démagnétisante de l'induit peut être maintenue constante, malgré le débit de la machine. Dans un certain nombre d'ex-

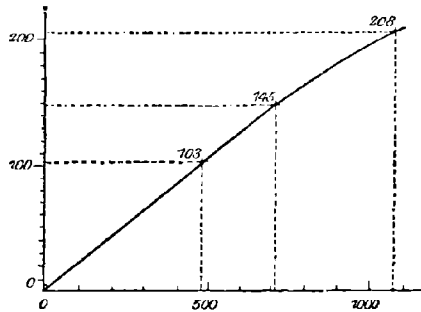


Fig. 145. — Courbe indiquant la relation entre la Vitesse et la Force électromotrice.

périences faites par lui sur des vitesses différentes, M. Joubert a mesuré la force électromotrice à l'aide d'un électromètre qui ne donnait passage à aucun courant. Les seules réactions possibles étaient celles dues aux courants parasites susceptibles de se développer dans le noyau, et la loi théorique s'est vérifiée presque exactement. Nous donnons ci-dessous le relevé des observations faites, et, dans la figure 145, la courbe qui en résulte ; on y verra par sa tension avec quelle remarquable exactitude la condition théorique était réalisée ¹.

Vitesse	500	720	1070 tours par minute.
Force électromotrice.	103	145	208 volts.

L'écart que l'on constate entre l'allure de la courbe et une ligne droite, pour de grandes vitesses, est probablement dû à l'action démagnétisante de courants parasites dans les masses en mouvement.

¹ Voir également les expériences de Mordey, *Journal I. E. E.*, XIX, 233, 1890.

On désigne sous le nom de *tours morts* le nombre de tours dont la vitesse, pour une puissance fournie quelconque, dépasse le nombre de tours strictement nécessaire au maintien de la proportion théorique.

Potentiel aux bornes d'une dynamo. — Volts perdus.

Le potentiel aux bornes d'une machine magnéto — comme de toute machine dynamo — est, sous charge, inférieur à la force électromotrice totale induite E , attendu qu'une partie de E est employée à faire passer le courant à travers la résistance de l'armature. Le symbole e s'emploie généralement pour représenter la différence de potentiel entre les bornes. C'est seulement quand le circuit extérieur est ouvert, de telle sorte qu'il n'y ait pas de courant produit, que $e = E$. Il est commode d'avoir une expression de e en fonction des autres quantités, car on voit que, lorsqu'il y a production de courant, il est impossible de mesurer E directement à l'aide d'un voltmètre ou d'un électromètre, tandis que e peut toujours se mesurer ainsi.

Soit r_a la résistance intérieure de la machine, c'est-à-dire la résistance des bobines d'induit et de toute autre partie en circuit entre les bornes ; et soit R la résistance du circuit extérieur. D'après la loi d'Ohm, si i est l'intensité du courant,

$$E = i (r_a + R).$$

Mais, d'après la loi d'Ohm également, si e est la différence de potentiel entre les bornes de la partie du circuit dont la résistance est R ,

$$e = iR;$$

d'où

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{r_a + R}, \quad \text{[III.]}$$

ce qui donne

$$e = \frac{R}{r_a + R} E.$$

Il convient également de noter que :

$$E = \frac{r_a + R}{R} e;$$

car cette formule permet de calculer E d'après les valeurs de e relevées sur un voltmètre.

Mais les valeurs de R sont souvent inconnues ; aussi le mode de calcul suivant est-il plus utile dans la pratique. En retranchant membre à membre la seconde des équations ci-dessus de la première, on a :

$$E - e = ir_a$$

ou

$$e = E - ir_a, \quad [\text{IV.}]$$

ce qui revient à dire que le nombre de volts aux bornes est égal au nombre total des volts engendrés dans l'induit moins le nombre nécessaire à faire passer le courant i à travers la résistance intérieure r_a . Les volts ir_a ainsi inutilisables dans le circuit extérieur sont appelés *volts perdus* ; le nombre en sera d'autant moindre que la résistance intérieure sera plus faible. Si l'on observe e au moyen d'un voltmètre, on peut déterminer E en ajoutant à e les volts perdus ; et ceux-ci peuvent être calculés d'après les indications d'un ampèremètre donnant le courant qui circule dans l'induit, multiplié ensuite par la résistance intérieure connue.

Relation entre la Force électromotrice totale et la Différence de potentiel aux bornes.

La distinction essentielle relevée plus haut entre la force électromotrice totale E et la portion qui en est utilisable comme différence de potentiel aux bornes e est susceptible d'une démonstration géométrique due à M. Ernst Richter ¹ et que nous reproduisons ci-dessous.

Dans une machine (comme celles dont il sera surtout question ultérieurement) pour laquelle e est constant, E ne le sera pas, sauf dans le cas irréalisable d'une machine sans résistance intérieure. Appelons r la résistance intérieure de la machine, comprenant celle de l'induit et de toute bobine d'inducteur faisant partie du circuit principal ($r = r_a + r_m$) ; on a

$$E = e + ir_a$$

Si E est constant, il ne peut en être de même de e quand i varie ; et si c'est e qui est constant, E ne le sera pas. On a en conséquence deux cas à considérer : —

¹ *Elektrotechnische Zeitschrift*, IV. 161, avril 1883.

(1) *E constant.* — Prenons les résistances comme abscisses et les forces électromotrices comme ordonnées et portons (fig. 146) $OA = r$,

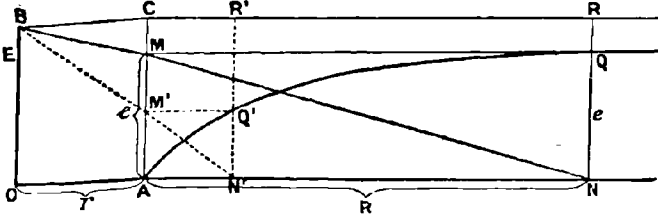


Fig. 146.

$AN = r$, $OB = E$. La ligne BN représente la chute de potentiel pour tout le circuit. De la force électromotrice totale OB , une portion égale à CM est consommée à faire passer le courant à travers la résistance r , laissant la portion AM utilisable comme différence de potentiel aux bornes, tandis que la résistance totale du circuit est représentée par la longueur ON . En N élevons en conséquence une verticale NQ égale à AM . Si l'on prend une résistance extérieure moindre $R' = AN'$, on trouvera par le même procédé la valeur correspondante de e , AM' ou $N'Q'$. On déterminera ainsi un certain nombre de points ; ils se trouveront tous sur la courbe AQQ' qui montre, par suite, comment la différence de potentiel aux bornes augmente, en même temps que la résistance extérieure, alors que la force électromotrice totale reste constante et est représentée par la droite horizontale BR . L'équation de cette courbe est donnée par la condition

$$\frac{E - e}{E} = \frac{r}{R + r},$$

d'où

$$(E - e)(R + r) = Er = \text{constante},$$

équation d'une hyperbole équilatère ayant OB et BR pour asymptotes.

(2) *e constant.* — Comme dans le cas précédent, $OA = r$; $AN = R$; et $AM = e$. Du point N (fig. 147) menons la ligne NM et prolongeons-la jusqu'en B . OB représente alors la valeur de E donnant e volts aux bornes quand $R = AN$. Reportons alors en N l'ordonnée $NR = OB$. Menons de même NB' correspondant à une autre valeur quelconque de R , et $N'R'$ égale à OB . $N'R'$ représentera la valeur de E correspondant à la valeur de la résistance extérieure R égale à AN' . En déterminant d'une manière analogue d'autres valeurs, on obtiendra les points suc-

cessifs de la courbe RR' qui montre comment doit varier la force électromotrice totale pour maintenir constante la différence de potentiel

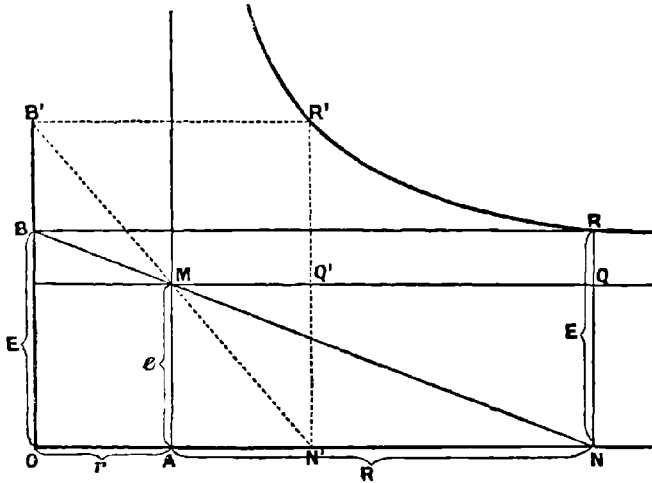


Fig. 147.

aux bornes représentée par la ligne horizontale MQ . L'équation de cette nouvelle courbe est donnée par la condition

$$\frac{E - e}{r} = \frac{e}{R}$$

ou

$$(E - e) R = er = \text{constante.}$$

Cette courbe est encore une hyperbole équilatère.

Dynamo à Excitation indépendante.

Les formules applicables aux machines magnétos subsistent pour les dynamos à excitation indépendante; mais dans ce cas Φ dépend de l'intensité du courant d'excitation extérieur.

Dans l'estimation du rendement net (ou commercial) d'une dynamo à excitation indépendante, il faut tenir compte de la puissance dépensée pour exciter les inducteurs.

Caractéristique de la machine Magnéto et de la dynamo à Excitation indépendante.

Dans la machine magnéto l'aimantation des aimants en acier est sensiblement constante. Ce fait a donné naissance à l'idée généralement répandue que, dans ces machines, la force électromotrice n'était fonction que de la vitesse. Il n'en est rien. Par suite, en effet, de la tendance des courants d'induit à l'aimantation transversale et à la désaimantation, le flux de force qui traverse réellement le noyau diminue quand l'induit est parcouru par des courants intenses. Plus le courant dans l'armature est considérable, plus cette réaction est sensible. Comme on le verra page 236, il est commode de représenter par certaines courbes, dites *caractéristiques*, la relation qui existe entre la

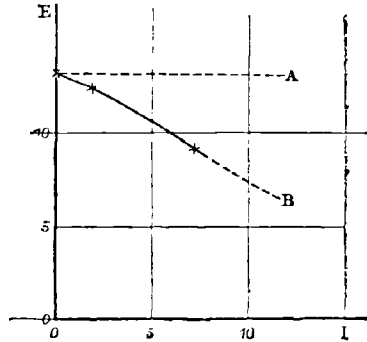


Fig. 148. — Caractéristique d'une machine magnéto-électrique.

force électromotrice et le courant dans diverses conditions de vitesse, de résistance, etc. Une des conditions généralement admises est la constance de la vitesse. Ces courbes sont particulièrement utiles dans l'étude des différentes réactions entre les inducteurs et l'induit. La figure 148 donne la caractéristique d'une petite machine magnéto-électrique de laboratoire à anneau Gramme. Cette petite machine était capable d'alimenter deux petites lampes Swan de cinq bougies environ. A circuit ouvert, sa force électromotrice était de 13,1 volts à la vitesse de 1 400 tours par minute. La valeur de cette force électromotrice totale E développée dans l'induit tombait de 13,1 à 12,4 volts quand on empruntait à la machine un courant de 1,8 ampère ; et, quand celle-ci était mise en court-circuit de manière à fournir 6,1 ampères, la valeur de E s'abaissait à 9,2 volts. C'est là toutefois un cas exceptionnellement défectueux.

La réaction du courant d'armature était ici très marquée. S'il n'y avait pas eu de réaction de ce genre, la caractéristique aurait suivi la ligne ponctuée A au lieu de s'incliner vers B. Comme on l'a vu page 85,

la tendance démagnétisante du courant d'induit augmente avec le décalage des balais.

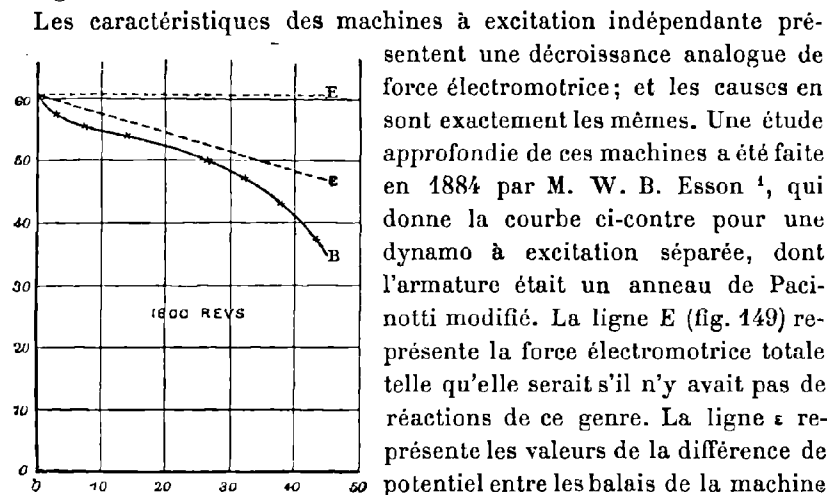


Fig. 149. — Caractéristique d'une machine à excitation indépendante.

Revs = Tours (par minute).

Les caractéristiques des machines à excitation indépendante présentent une décroissance analogue de force électromotrice; et les causes en sont exactement les mêmes. Une étude approfondie de ces machines a été faite en 1884 par M. W. B. Esson ¹, qui donne la courbe ci-contre pour une dynamo à excitation séparée, dont l'armature était un anneau de Pacinotti modifié. La ligne E (fig. 149) représente la force électromotrice totale telle qu'elle serait s'il n'y avait pas de réactions de ce genre. La ligne ϵ représente les valeurs de la différence de potentiel entre les balais de la machine (que nous sommes convenus d'appeler ϵ pour la distinguer de la force électromotrice totale E et de la différence de potentiel e entre les bornes), telle qu'elle serait également sans ces réactions. La courbe B donne les valeurs réellement observées pour ϵ selon le débit de la machine. L'abaissement très accentué de la courbe à droite de la figure est probablement dû à l'action démagnétisante du courant d'induit qui est plus grande quand les balais sont (comme pour des courants intenses) fortement décalés. La caractéristique plonge toujours d'une manière analogue quand les inducteurs sont faiblement excités (voir fig. 434).

Rendement et Coefficient économique des machines dynamos.

Supposons que l'on connaisse le nombre de chevaux-vapeur mécaniques réellement employés à actionner une dynamo. Cette mesure peut être prise directement, soit à l'aide d'un dynamomètre de transmission, soit d'après des diagrammes fournis par la machine motrice, ou bien encore, dans certains cas spéciaux où les électro-aimants peuvent être

¹ *Electrical Review*, XIV. 393, avril 1884. Voir également les travaux de M. Marcel Deprez, *Comptes rendus*, XCIV. 15 et 86, 1882.

montés sur pivots et équilibrés, par l'application de la méthode primitivement suivie par le révérend F. J. Smith, et décrite plus tard par M. Marcel Deprez et par le professeur Brackett, méthode dans laquelle on utilise réellement la réaction mécanique mutuelle des inducteurs et de l'induit pour mesurer la puissance mécanique employée à produire le mouvement. Si donc on connaît la puissance mécanique absorbée et qu'on mesure la puissance de la dynamo, c'est-à-dire le travail électrique qu'elle fournit dans un temps donné, ou, comme disent les Anglais, son *output* électrique, on aura, en comparant la puissance mécanique absorbée et la puissance électrique développée, une mesure du « rendement » de la dynamo considérée au point de vue économique comme transformateur d'énergie mécanique en énergie électrique. Il faut naturellement se bien pénétrer de ce fait, qu'une partie de l'énergie électrique développée est forcément consommée dans la machine elle-même, en conséquence de la résistance inévitable du fil de l'induit, et, dans le cas des machines auto-excitatrices, du fil des inducteurs. Il est donc nécessaire d'appliquer ici la distinction établie page 112 entre le rendement brut de la machine ou, comme on dit quelquefois, son « rendement de transformation électrique », et son rendement net ou « rendement commercial ».

Pour exprimer le rendement, brut ou net, il faut cependant avoir le moyen de mesurer la puissance électrique de la dynamo, ou d'une partie quelconque de son circuit.

Tout le monde sait qu'on peut donner en watts l'expression de la puissance d'un courant, à la condition de connaître deux éléments, savoir : l'intensité du courant en ampères et la différence de potentiel en volts entre les deux extrémités de la partie du circuit dans laquelle se dépense cette puissance. Le nombre d'ampères se mesure à l'aide d'un ampèremètre convenable ; le nombre de volts, avec un voltmètre approprié. Le produit des volts par les ampères est l'expression de la puissance électrique dépensée, en fonction de l'unité de puissance appelée « watt » (voir l'Appendice A sur les unités). Un cheval-vapeur étant égal à 736 watts, le nombre de volts-ampères (c'est-à-dire de watts) doit être divisé par 736 pour donner le résultat en chevaux-vapeur. Si i représente le courant en ampères, et e la différence de potentiel en volts, la puissance électrique, pour laquelle nous emploierons le symbole p , peut s'écrire

$$p = \frac{ei}{736} \text{ chx.} \quad [V.]$$

Le rapport de l'énergie électrique utile disponible dans le circuit extérieur à l'énergie totale développée dans le même temps s'appelle le « rendement électrique » ou « coefficient économique » de la machine. Il peut s'exprimer algébriquement de la manière suivante : — Si un induit donne un courant de i_a ampères et si sa force électromotrice totale est de E volts, sa *puissance électrique totale* sera :

$$p_t = E i_a \text{ watts.}$$

Si la différence de potentiel aux bornes de la dynamo est de e volts et le courant extérieur de i ampères, sa *puissance utile* sera :

$$p_n = e i \text{ watts.}$$

En employant le symbole η pour le « coefficient économique » ou ce qu'on appelle le « rendement électrique », on aura :

$$\eta = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance totale}} = \frac{e i}{E i_a},$$

ou, s'il n'y a pas de dérivation dans la machine, de sorte que $i = i_a$,

$$\eta = \frac{e}{E}.$$

Mais on sait que le rapport $\frac{e}{E}$ dépend de la relation des résistances intérieure et extérieure, car

$$\frac{e}{E} = \frac{R}{r + R}, \quad (\text{équation [III.]})$$

R représentant la résistance du circuit extérieur, et r la résistance intérieure (inducteurs, induit, etc...) de la machine.

D'où, pour une machine magnéto ou une dynamo en série,

$$\eta = \frac{R}{r + R}. \quad [\text{VI.}]$$

Naturellement, ce coefficient se rapprochera d'autant plus de l'*unité* que la valeur de r pourra être diminuée. Car, si la machine pouvait être construite sans *aucune* résistance intérieure, il n'y aurait pas d'énergie dépensée à faire passer le courant dans l'induit et consommée en échauffement de ses bobines.

On verra plus loin comment l'expression du coefficient économique η

doit être modifiée dans le cas des machines en dérivation et compound.

Revenant maintenant au rendement réel de la machine, employons le symbole P pour la puissance mécanique, exprimée en chevaux-vapeur, réellement employée à actionner la machine. Si on se rappelle que la puissance électrique brute de la machine est $\frac{Ei_n}{736}$, on a pour le *rendement brut*, ou rendement de transformation électrique,

$$\frac{Ei_n}{P \times 736},$$

et pour le *rendement net*, ou rendement commercial utile,

$$\frac{ei}{P \times 736}.$$

On voit que la première de ces expressions contenant E , et la seconde e , on peut déduire le rendement net du rendement brut en multipliant ce dernier par η , c'est-à-dire par le coefficient économique.

Avant de quitter cette question, il est bon de remarquer que, l'intensité i du courant entrant comme facteur dans chacune des expressions de rendement, et i ne dépendant pas seulement de la résistance de la machine elle-même, mais de celle des lampes et des autres parties du système qu'elle doit alimenter, il y a quelque chose de confus à parler du rendement de la *dynamo*, comme si le rendement était une propriété de la machine. Par contre, non seulement le rendement brut, mais aussi le coefficient économique, et par suite *a fortiori* le rendement net, dépendent de la résistance extérieure, c'est-à-dire du nombre de lampes qui peuvent se trouver en action. Il y a cependant un sens dans lequel cette expression peut se justifier. Toute dynamo est calculée pour alimenter un certain nombre de lampes, par exemple, et par suite pour fournir une certaine moyenne de courant. Son rendement et son coefficient économique doivent, par conséquent, être exprimés en fonction de ce courant (et de cette résistance extérieure) qui peut être considéré comme le régime normal de la machine,

Variation du Coefficient économique avec le Courant.

On remarquera que, dans le cas de la machine en série considéré ci-dessus, la valeur de η sera différente selon qu'on fera varier la résistance extérieure R . Quand R est très grand par rapport à r , la valeur de η est très sensible-

ment = 1 ; mais, pour de petites valeurs de R , la valeur de η diminue indéfiniment. Or, quand R est grand, le courant est faible, et quand R est faible, le courant est intense. On voit par là que, pour une dynamo en série, la valeur maximum du coefficient économique correspond au cas où la machine développe sa puissance minimum.

DYNAMO EN SÉRIE

Dans la dynamo en série (fig. 150 et fig. 41), il n'existe qu'un seul circuit et, par conséquent, un seul courant dont l'intensité i dépend de la force électromotrice E et de la somme des résistances en circuit, savoir :

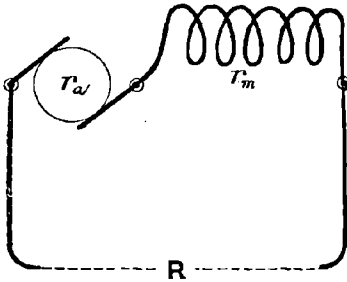


Fig. 150.

R = la résistance extérieure (variable),

r_a = la résistance de l'induit,

r_m = la résistance des inducteurs.

D'après la loi d'Ohm :

$$E = (R + r_a + r_m) i.$$

On a également pour la différence de potentiel aux bornes de la machine

$$e = Ri.$$

Il convient, en outre, de trouver une expression de la différence de potentiel entre les balais de la machine, le nombre de volts mesuré en ces points étant ici supérieur à e à cause de la résistance des inducteurs, et inférieur à E en raison de la résistance de l'induit. Pour cette différence de potentiel entre les balais, nous emploierons le symbole ϵ . Alors, si on se rappelle que le courant qui traverse r_m et R est d'intensité i , on aura d'après la loi d'Ohm

$$\epsilon = (R + r_m) i ;$$

d'où, par suite,

$$e = E - (r_a + r_m) i.$$

Coefficient économique de la dynamo en série.

De la loi de Joule relative à l'énergie du courant il résulte que le coefficient économique η , qui est le rapport de l'énergie électrique utile

disponible dans le circuit extérieur à l'énergie électrique totale développée sera

$$\eta = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail total}} = \frac{i^2 R t}{i^2 (R + r_a + r_m) t} = \frac{e}{E},$$

ou

$$\eta = \frac{R}{R + r_a + r_m}. \quad [\text{VII.}]$$

Cette expression est évidemment maximum quand r_a et r_m sont *tous deux* très petits. Sir W. Thomson recommande de faire r_m un peu plus petit que r_a .

Exemple : — Dans une machine à arc « Phénix » étudiée par Esson, $r_a = 3,448$ ohms, et $r_m = 4,541$ ohms. Si $i = 10$ ampères, il y aura 79,89 volts perdus.

Comme complément à ce qui précède, il ne faudrait pas quitter ce sujet sans donner une expression qui relie E au nombre d'ampères-tours des bobines excitatrices. Mais cette expression comporte toute la question de la loi d'aimantation et ne saurait trouver place ici. En introduisant la formule approchée de Frölich donnée page 161, on arrivera à des expressions approchées pour la dynamo.

DYNAMO EN DÉRIVATION

Dans la dynamo en dérivation (fig. 151 et 42), on a deux circuits à considérer : le circuit principal et le circuit en dérivation. Les symboles employés sont les suivants :

R = résistance du circuit principal extérieur (conducteurs, lampes, etc.),

r^a = résistance de l'induit,

r_a = résistance du circuit en dérivation (bobines des inducteurs),

i = courant dans le circuit principal extérieur,

i_a = courant dans l'induit,

i_d = courant dans le circuit en dérivation (ampères perdus).

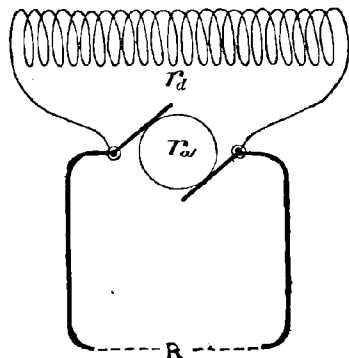


Fig. 151.

On a évidemment

$$i_a = i + i_d,$$

puisque le courant développé dans l'induit se partage en deux, partie dans le circuit principal, partie dans le circuit dérivé, et est égal à leur somme.

On peut appeler *ampères perdus* la portion du courant total qui retourne par la dérivation et n'est pas disponible dans le circuit extérieur ; dans une bonne machine moderne ils ne dépassent pas 2 à 3 p. 100 au plus du débit total. Si e est la différence de potentiel aux bornes, on a pour les ampères perdus :

$$i_d = \frac{e}{r_d}.$$

Exemple : — Dans une machine Kapp donnant 200 ampères sous 105 volts aux bornes, r_d était de 31 ohms ; les ampères perdus étaient en conséquence de 3,4 et le courant total dans l'induit, à pleine charge, de 203,4 ampères.

D'après la loi d'Ohm, on a pour la différence de potentiel aux bornes

$$e = Ri,$$

et de même

$$e = r_d i_d,$$

puisque les bornes du circuit principal sont également celles du circuit dérivé.

De plus, comme la résistance réduite d'un circuit ramifié est la réciproque de la somme des réciproques des résistances de ses parties, la résistance extérieure réduite, de borne à borne, est égale à $\frac{Rr_d}{R + r_d}$, d'où il résulte que

$$E = \left(r_a + \frac{Rr_d}{R + r_d} \right) i_a.$$

On peut en même temps trouver une expression pour la portion de la force électromotrice totale uniquement employée à vaincre la résistance de l'induit et qui est naturellement la différence entre la force électromotrice totale E et la force électromotrice effective e aux bornes.

La loi d'Ohm donne immédiatement

$$E - e = r_a i_a,$$

ou

$$E - e = r_a (i + i_d),$$

d'où l'on tire

$$e = E - r_a (i + i_d). \quad [\text{VIII.}]$$

On trouvera également une expression de E en fonction de e et des diverses résistances. Prenant l'expression ci-dessus

$$E = \left(\frac{Rr_d}{R + r_d} + r_a \right) i_a,$$

et remplaçant i_a par sa valeur $i + i_d$, puis chacune de ces dernières par $\frac{e}{R}$ et $\frac{e}{r_d}$, respectivement, on obtient

$$E = e \left\{ \frac{Rr_d + Rr_a + r_a r_d}{R + r_d} \times \frac{R + r_d}{Rr_d} \right\},$$

ou

$$E = e \times r_a \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_d} \right). \quad [\text{VIII bis.}]$$

On peut remarquer que l'expression $\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_d} \right)$ est la somme des conductibilités de trois branchements et, par suite, égale à la conductibilité de ces trois branchements reliés parallèlement, c'est-à-dire à la conductibilité réunie du circuit extérieur, du circuit induit et du circuit inducteur de balai à balai. De sorte que si l'on pose $R =$ résistance de tout le système, machine et circuit extérieur, prise aux balais, l'équation peut s'écrire :

$$E = e \frac{r_a}{R}.$$

Coefficient économique de la dynamo en dérivation.

Le coefficient économique η est le rapport de l'énergie électrique utile disponible dans le circuit extérieur à l'énergie électrique totale développée.

D'après la loi de Joule, il est développé en t secondes dans le circuit extérieur un

$$\text{travail utile} = i^2 R t,$$

et, dans le même temps, il y a en échauffement une

$$\text{énergie dépensée dans la dérivation} = i_d^2 r_d t,$$

et une

énergie dépensée dans l'induit = $i_a^2 r_a t$;

d'où, t disparaissant,

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\text{travail utile}}{\text{travail total}} = \frac{i^2 R}{i^2 R + i_a^2 r_a + i^2 r_a} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_a} + \frac{i^2 r_a + 2 i i_d r_a + i_a^2 r_a}{i^2 R}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_a} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{i_d r_a}{i R} + \frac{r_a}{R} \left(\frac{i_d}{i}\right)^2} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_a} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{R}{r_a} \cdot \frac{r_a}{R} + \frac{r_a}{R} \left(\frac{R}{r_d}\right)^2} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_a} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d} + R \frac{r_a}{r_d^2}} \\ &= \frac{1}{1 + \frac{R}{r_a} \cdot \left(1 + \frac{r_a}{r_d}\right) + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d}} \end{aligned}$$

Maintenant, pour abrégier, représentons la résistance interne totale $r_a + r_d$ par le symbole unique r ; il vient

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{R}{r_d} \cdot \frac{r}{r_d} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d}}$$

Pour que ce rapport soit maximum, il faut évidemment qu'on ait

$$\frac{d \left(1 + \frac{R}{r_d} \cdot \frac{r}{r_d} + \frac{r_a}{R} + 2 \frac{r_a}{r_d} \right)}{d R} = 0$$

ou

$$\frac{r}{r_d^2} - \frac{r_a}{R^2} = 0 ;$$

d'où

$$R^2 = \frac{r_a r_d^2}{r} = r_a r_d \frac{r_d}{r},$$

et

$$R = \sqrt{r_a r_d} \sqrt{\frac{r_d}{r}}, \quad [\text{IX.}]$$

ou

$$R = r_d \sqrt{\frac{r_a}{r}}. \quad [\text{IXa.}]$$

Cette équation détermine la résistance particulière du circuit principal extérieur la plus économique, pour des résistances intérieures données. Substituant alors cette valeur dans les termes de l'équation de η qui contiennent R , on obtiendra pour leurs valeurs :

$$\frac{Rr}{r_d^2} = \frac{r}{r_d} \sqrt{\frac{r_a}{r}} = \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d}$$

$$\frac{r_a}{R} = \frac{r_a}{r_d} \sqrt{\frac{r}{r_a}} = \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d};$$

d'où

$$\eta = \frac{\text{travail utile}}{\text{travail total}} = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d} + 2 \frac{r_a}{r_d}}.$$

Cette expression peut d'ailleurs être encore simplifiée, car on sait que la résistance de la dérivation est très élevée comparativement à celle de l'induit; elle peut être de 300 à 1 000 fois aussi grande. Si donc $\frac{r_a}{r_d}$ est assez petit pour être négligeable vis-à-vis de l'autre terme, on aura

$$\eta = \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r}}{r_d}}; \quad [\text{X.}]$$

et, comme r_a est petit relativement à r_d , r est très approximativement égal à r_d , de sorte que l'on peut écrire comme égalité approchée

$$\eta \doteq \frac{1}{1 + 2 \frac{\sqrt{r_a r_d}}{r_d}},$$

ou

$$\eta \doteq \frac{1}{1 + 2 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}}}. \quad [\text{XI.}]$$

Cette dernière valeur approximative est identique à celle donnée par Sir W. Thomson dans les Comptes rendus de l'Association Britannique de 1881; l'équation N° [X.] est cependant plus correcte.

Comme on peut le remarquer, il résulte de l'équation N° [IX.] ci-dessus que si la résistance de l'induit est faible comparativement à celle de la dérivation, de telle sorte que r_a puisse être pris comme égal à la valeur de r (ce qui serait très désirable, si l'on pouvait y arriver dans la pratique), on aura

$$R = \sqrt{r_a r_d}; \quad [\text{XII.}]$$

c'est-à-dire que, quand la proportion entre r_a et r_d est rendue aussi avantageuse que possible, la résistance extérieure de fonctionnement la plus économique est celle qui est moyenne géométrique entre les résistances de l'induit et des bobines en dérivation, tout écart de cette condition diminuant la valeur du coefficient économique.

Règles pratiques pour un projet économique.

On trouve là une indication pratique relativement à la répartition des résistances dans une dynamo en dérivation. Admettons que la question soit ainsi posée : Etant donnée la résistance r_a de l'induit, quelle doit être la résistance de la dérivation pour que la dynamo puisse (dans des conditions favorables de proportion de la résistance extérieure R) avoir un coefficient économique de 90 p. 100 ? — De l'équation [XI.] on tire :

$$\frac{90}{100} = \frac{1}{1 + 2 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}}},$$

$$\frac{100}{90} = 1 + 2 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}},$$

$$10 = 180 \sqrt{\frac{r_a}{r_d}},$$

$$r_d = (18)^2 r_a,$$

$$r = 324 r_a.$$

Une machine en dérivation ne peut donner dans le circuit extérieur

90 p. 100 de sa puissance électrique totale si son shunt n'a pas une résistance au moins 324 fois égale à celle de son induit.

On peut dans la pratique adopter la règle suivante qui donne de bons résultats : — On commence par déterminer le nombre de lampes que doit alimenter la machine en plein fonctionnement courant et l'on vérifie leur résistance quand elles sont dans le circuit. Supposons que l'induit ait une résistance vingt fois moindre, et la dérivation une résistance vingt fois aussi considérable : dans ce cas, 4 p. 100 environ de l'énergie électrique seront consommés dans l'induit et 4 p. 100 environ dans la dérivation, ce qui laissera un peu plus de 90 p. 100 pour le coefficient économique.

Une machine en dérivation décrite par Sir C. W. Siemens dans les *Philosophical Transactions*, en 1880, a donné les chiffres suivants :

	INDUIT r_a	ÉLECTRO-AIMANT en dérivation r_d	$\frac{r_d}{r_a}$	η OBSERVÉ p. 100
Siemens. . . .	0,204	11,26	48,4	69,0

Pour une machine Edison (« K », 250 lampes) éprouvée à Munich on a trouvé :

Edison « K ». . .	0,0361	13,82	382,8	88,6
-------------------	--------	-------	-------	------

La machine Edison-Hopkinson décrite au Chap. XVIII a fourni :

Résist. à froid.	0,009947	16,93	1 702,0	93,66
------------------	----------	-------	---------	-------

On a trouvé pour la machine Kapp à laquelle il est fait allusion ci-dessus, p. 230, et décrite au Chap. XVIII, y compris la bobine en série avec l'induit :

A froid.	0,0306	29,133	952,0	92,0
A chaud.	0,0329	31,08	945,0	

CHAPITRE X

COURBES CARACTÉRISTIQUES

La méthode graphique, ses diagrammes et plus particulièrement l'emploi de certaines courbes connues sous le nom de *caractéristiques* se prêtent, dans l'état actuel de la science, à la solution de tant de problèmes relatifs à l'établissement des machines dynamo-électriques que le mode de construction et l'utilisation de ces courbes constituent une partie importante de la théorie de la dynamo. Il est même certains points de pratique pour l'étude desquels aucune autre méthode ne saurait lui être substituée avec avantage.

La courbe dite « caractéristique » joue à l'égard de la dynamo un rôle tout à fait analogue à celui que remplit vis-à-vis de la machine à vapeur le diagramme obtenu à l'aide de l'indicateur de Watt. De même que l'ingénieur-mécanicien peut, à la simple inspection d'un diagramme de ce genre, se faire immédiatement une idée des qualités d'une machine à vapeur, l'électricien peut, en jetant les yeux sur une caractéristique de dynamo, juger des qualités et du fonctionnement de cette machine. — On peut même pousser plus loin la comparaison.

Le diagramme d'une machine à vapeur a deux objets qui, s'ils ont bien quelque relation l'un avec l'autre, sont cependant distincts. Etant donnée l'échelle du diagramme, on est directement renseigné sur la puissance en chevaux-vapeur développée par la machine, puissance qui dépend uniquement de la surface totale embrassée par la courbe, et nullement de sa forme. Mais, même à défaut d'échelle connue, les détails de forme de la courbe en ses différents points fournissent à l'ingénieur des indications parfaitement définies sur le fonctionnement de la machine, sur la perfection du vide, la position des tiroirs, le réglage de l'admission, et les conditions de bonne proportionnalité entre les tuyaux et les orifices.

La caractéristique peut également servir à deux fins. Quand on connaît l'échelle à laquelle elle est dressée, on y voit la puissance en che-

vaux développée par la dynamo ; on peut même y trouver l'indication de ce qu'il faut demander à la machine pour en tirer le meilleur parti. Mais, même sans échelle connue, les détails de forme de la courbe fournissent des renseignements très nets sur les conditions de fonctionnement de la machine : sur le degré de saturation de ses électroaimants, l'appropriation de leur puissance à celle de l'induit, et la

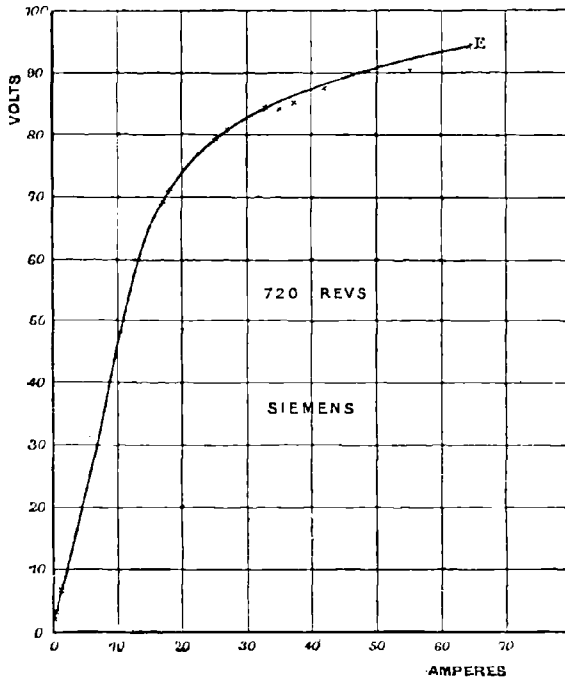


Fig. 152. — Caractéristique d'une dynamo en Série.
Revs = Tours (par minute).

valeur respective des divers éléments de la machine à d'autres égards.

L'idée de représenter les propriétés d'une machine dynamo à l'aide d'une courbe caractéristique est due au D^r Hopkinson qui, en 1879, présenta ces courbes à l'Institut des Ingénieurs-mécaniciens de Londres et donna la courbe de la machine Siemens représentée dans la figure 152. Le nom de « caractéristique » a été donné, en 1881, par M. Marcel Deprez¹ aux courbes du D^r Hopkinson. Le choix heureux de cette expression a été consacré par son adoption générale.

¹ Voir *La Lumière électrique*, 3 décembre 1881, où Deprez donne cependant une méthode d'observation sujette à critique, en ce qu'il y néglige les réactions d'induit.

Le D^r Hopkinson avait pour objectif la représentation de la relation existant entre la force électromotrice et le courant ; il déduisit en conséquence de ses observations une courbe dont les abscisses représentent le nombre d'ampères dans le circuit et les ordonnées les valeurs correspondantes de la force électromotrice. Le tableau suivant (emprunté, sauf quelques modifications insignifiantes, au travail du D^r Hopkinson dans les *Comptes rendus de l'Institut des Ingénieurs-mécaniciens* de Londres, 1879, p. 249) contient les valeurs relevées de l'intensité i du courant et de la force électromotrice E d'une machine déterminée montée en série :

EXPÉRIENCES SUR UNE MACHINE SIEMENS A LA VITESSE DE 720 RÉVOLUTIONS
PAR MINUTE

COURANT (en ampères) i	RÉSISTANCE (en ohms) R	FORCE ÉLECTROMOTRICE (en volts) E
0,0027	1025	2,72
0,48	8,3	3,95
1,45	5,33	7,73
16,8	4,07	68,4
18,2	3,88	70,6
24,8	3,205	79,5
26,8	3,025	81,1
32,2	2,62	84,4
34,5	2,43	83,8
37,1	2,28	84,6
42	2,08	87,4

On remarquera que la force électromotrice E est la force électromotrice totale engendrée dans la machine ; elle ne doit pas être confondue avec la différence de potentiel e aux bornes, telle qu'on peut la mesurer avec un voltmètre ou tout autre instrument analogue.

On préfère généralement aujourd'hui porter en ordonnées les valeurs de e au lieu de celles de E ; mais tel n'était pas le mode primitif d'opérer du D^r Hopkinson. Il déterminait E d'après la mesure directe de i qu'il multipliait par la résistance totale du circuit, conformément à la loi d'Ohm $iR = E$. On remarquera également que la machine était une « dynamo en série », les machines montées en dérivation n'étant pas encore à l'ordre du jour à cette époque.

Avant d'aller plus loin, il est intéressant d'étudier les indications fournies par cette courbe. Elle commence en un point un peu au-dessus de l'origine, ce qui indique la présence d'une petite quantité de magnétisme rémanent dans les électro-aimants. Au début, la courbe s'élève sous un angle très ouvert; elle s'incurve ensuite et paraît prendre une allure sensiblement droite, mais sous un angle plus fermé que précédemment. — A quoi faut-il attribuer cette forme typique ?

On sait que la force électromotrice d'une dynamo ne dépend pas uniquement de sa vitesse de rotation et du nombre des spires de l'induit; mais aussi de l'intensité du champ magnétique. Or, si la vitesse est constante, — et dans les expériences du D^r Hopkinson elle était maintenue à un nombre fixe de 720 révolutions par minute —, la seule variable importante est l'intensité du champ magnétique. A mesure que l'aimantation des inducteurs croît et tend vers son maximum, l'intensité du champ magnétique croît également et tend vers un maximum; il en est de même de la force électromotrice induite. Il fallait par conséquent s'attendre, comme le fait observer le D^r Hopkinson, à ce que la courbe qui fournit la relation entre le courant et la force électromotrice présentât des particularités de forme analogues à celles de la courbe qui indique la relation entre le courant magnétisant et l'aimantation d'un électro-aimant; il suffit en effet de comparer la « caractéristique » de la machine (fig. 152) avec la « courbe d'induction » d'un électro-aimant (fig. 92) pour reconnaître leur analogie. Il ne faut pas oublier cependant que l'intensité du champ magnétique ne dépend pas uniquement de l'intensité du courant dans les inducteurs; elle est également fonction du courant qui circule dans les spires de l'induit, en raison de la réaction entre les inducteurs et l'induit.

Certaines perturbations dues à la self-induction dans les spires de l'induit interviennent en outre pour de grandes vitesses et des courants intenses, et empêchent la force électromotrice d'être proportionnelle à l'intensité du champ. La conclusion du D^r Hopkinson, que la caractéristique de la dynamo peut être prise également comme représentation de l'intensité du champ magnétique, ne doit en conséquence être acceptée que sous réserve de son exactitude dans le cas seulement où ces réactions sont assez faibles pour être négligeables, ce qui arrive rarement.

Il est possible de faire décrire à une dynamo sa propre caractéristique par un mouvement mécanique du style par rapport au papier (comme dans l'indicateur de Watt). Il suffit d'adapter convenablement

deux électro-aimants dont l'un est excité par le courant principal et l'autre placé en dérivation sur les bornes de la machine.

Le Dr Hopkinson, dans le travail auquel nous avons fait allusion, et dans une autre communication publiée dans le même recueil, en avril 1880, p. 206, a fait ressortir le grand nombre de déductions utiles qu'on peut tirer de l'examen de ces courbes. D'autres déductions en ont été tirées depuis par M. Marcel Deprez; elles sont résumées dans *La Lumière électrique*, du 5 janvier 1884, à laquelle nous renvoyons le lecteur. Le Dr Frölich a également publié d'importants travaux sur cette question dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* de 1881 et 1885. Enfin, plus récemment encore, le Dr Hopkinson est revenu sur ce sujet dans une communication faite devant l'Institut des Ingénieurs Civils de Londres, en avril 1882, et qui a pour titre *On some points in Electric Lighting* (De quelques points relatifs à l'éclairage électrique).

Caractéristiques de Puissance en chevaux-vapeur.

Ainsi qu'on l'a vu au commencement de ce chapitre, si les caractéristiques sont construites à l'échelle, on peut y voir la puissance de la dynamo en chevaux-vapeur. Le produit du courant par la différence de potentiel est proportionnel à la production d'énergie électrique, c'est la puissance fournie par la machine. Le produit d'un volt par un ampère est quelquefois appelé *volt-ampère*; on lui a également donné le nom spécial de *watt*. Un watt ou volt-ampère est égal à $\frac{1}{736}$ de cheval.

Pour calculer la puissance (électrique) en chevaux-vapeur développée dans le circuit quand la machine fonctionne à une allure déterminée quelconque sur un nombre donné de lampes en circuit, on a, par suite, généralement deux mesures à prendre : celle de la différence de potentiel en volts et celle du courant en ampères. Il suffit alors de les multiplier l'un par l'autre et de diviser le produit par 736 pour obtenir la puissance en chevaux. Mais, si l'on connaît la caractéristique de la dynamo pour la vitesse considérée, il suffit de se reporter à la courbe pour voir de suite quelle est la force électromotrice qui correspond à un courant donné quelconque. Dans le cas, par exemple, de la dynamo Siemens étudiée par le Dr Hopkinson et dont la caractéristique est représentée dans la figure 152, page 237, supposons la machine travaillant sur une résistance telle qu'elle fournisse 30 ampères à une allure de 720 tours par minute, on voit de suite que la force électromotrice correspondante est de 83 volts.

D'où

$$\frac{83 \times 30}{736} = 3,38 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Mais, pour éviter tous ces calculs, on peut réunir sur le même diagramme quelques courbes additionnelles coupant la caractéristique et la partageant en égales valeurs de puissance. Ces « lignes de puissance

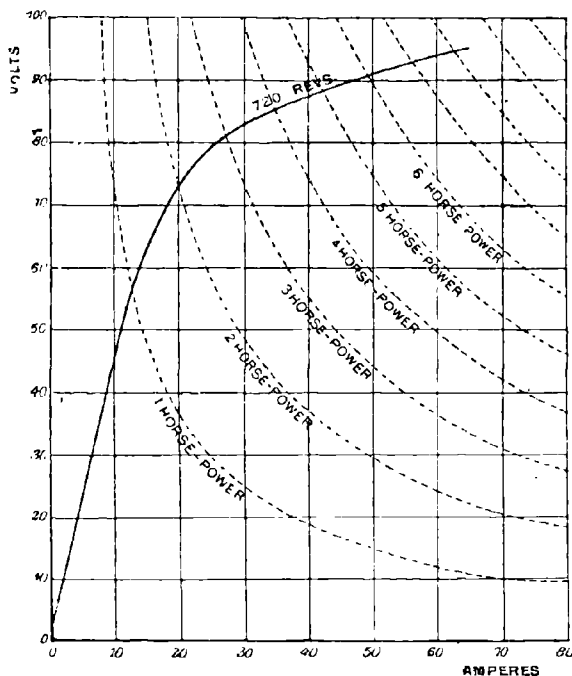


Fig. 153. — Caractéristique avec courbes de Puissance en chevaux-vapeur.

Revs = Tours (par minute).
Horse-Power = Chevaux-vapeur.

en chevaux » ne sont autres qu'une série d'hyperboles équilatères. La ligne de puissance correspondant à 1 cheval passera, par exemple, par tous les points pour lesquels le produit des volts par les ampères est égal à 736. Elle passera ainsi par le point correspondant à 73,6 volts et 10 ampères ; par le point 36,8 volts et 20 ampères ; par le point 14,72 volts et 50 ampères, etc., parce que, dans chacun de ces cas, les produits des volts par les ampères correspondants sont égaux à 736 watts ou à 1 cheval. La ligne de puissance correspondant à 2 chevaux

passera par les points pour lesquels les valeurs de ces produits sont égales à $736 \times 2 = 1\,472$ watts, et ainsi des autres.

La figure 153 reproduit la caractéristique de la machine Siemens de la figure 152, mais avec addition des lignes de puissance en chevaux-vapeur.

Ici les volts portés en ordonnées sont ceux de la force électromotrice totale E de la machine, et la puissance représente en conséquence la puissance électrique totale fournie dans le circuit de la dynamo. Si, au lieu des valeurs de E , on avait pris celles de la différence de potentiel aux bornes e pour construire la courbe, on aurait obtenu une courbe légèrement différente et représentant la puissance électrique développée dans le circuit extérieur et utilisable sous une forme quelconque.

Nous donnons plus loin (fig. 161) une caractéristique de puissance pour une dynamo montée en dérivation.

Si les échelles des ordonnées et des abscisses ne sont pas les mêmes, la forme des lignes de puissance est, naturellement, modifiée; ce ne sont plus des hyperboles équilatères.

Caractéristiques « externes » ou Courbes de Potentiel aux bornes.

Dans bien des cas, il est plus utile de connaître la relation entre l'intensité du courant et la différence de potentiel « extérieure » aux bornes que la relation entre cette intensité et la force électromotrice totale induite dans l'armature; il est surtout plus facile de mesurer e que E , attendu que le premier se mesure directement à l'aide d'un volt-mètre, tandis que le second ne s'obtient qu'indirectement. On peut, pour distinguer les deux courbes, attribuer le nom de *caractéristique externe* à celle qui représente la relation entre la différence de potentiel et le courant dans le circuit extérieur. Pour la dynamo en série, il est aisé de déduire l'une de ces courbes de l'autre; il suffit de connaître la résistance intérieure de la machine (inducteurs et induit). Dans la dynamo Siemens étudiée par le D^r Hopkinson, en 1879, et dont les figures 152 et 153 donnent la caractéristique totale, la résistance intérieure totale était de 0,6 ohm. Cette courbe est reproduite pour la troisième fois dans la figure 154 où elle est marquée E. Or, pour lancer un courant de 10 ampères dans une résistance de 0,6 ohm, il faut une différence de potentiel de 6 volts aux bornes. En examinant la courbe

on voit que la force électromotrice totale correspondant à 10 ampères était d'environ 46,5 volts. Sur ce nombre, 6 étaient employés, comme nous venons de le dire, à vaincre la résistance intérieure, laissant ainsi 40,5 volts comme différence de potentiel disponible entre les bornes.

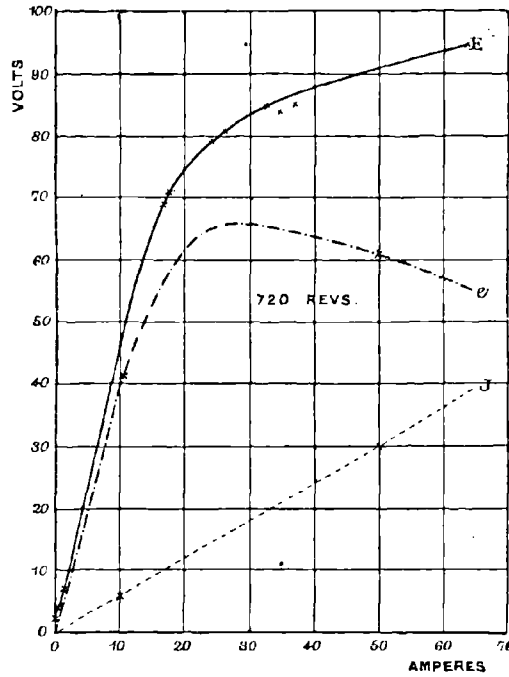


Fig. 154. — Caractéristiques totale et externe.
Revs = Tours (par minute).

De même, quand le débit était de 50 ampères, il n'y avait pas moins de 30 volts perdus pour vaincre la résistance intérieure de 0,6 ohm ; et, comme la valeur de E correspondant à ce courant était de 90,5 volts, il restait 60,5 volts pour e .

Il y a deux manières de représenter ces relations sur le diagramme ; la figure 154 les donne toutes deux. La ligne J passe par l'origine et par les valeurs de 6 volts pour 10 ampères, et 30 volts pour 50 ampères. (La tangente de l'angle d'inclinaison de la ligne J est égale à $\frac{6}{10} = 0,6$. On verra plus tard que cette tangente représente la résistance intérieure.) Si donc les hauteurs des ordonnées depuis l'axe des x jusqu'à la courbe E représentent la totalité des volts induits, et si les hauteurs des ordonnées de l'axe des x à la ligne J représentent les volts

correspondants employés à vaincre la résistance intérieure, il en résulte que *la différence des potentiels aux bornes sera représentée par les différences des ordonnées comprises entre les lignes J et E.*

Telle est la première manière de représenter ces différences de potentiel.

Le second mode de représentation consiste à déduire à partir des sommets des ordonnées des portions égales aux ordonnées de la ligne J, ce qui revient à soustraire de E les volts internes, que l'on a vus dans la théorie algébrique égaux à $i(r_a' + r_m)$, et à obtenir ainsi les valeurs de e . Ces dernières sont réunies dans la courbe e sur la figure ; et, comme cette courbe représente la force électromotrice disponible dans le circuit extérieur, elle peut très légitimement être nommée « *caractéristique externe* », ou courbe de potentiel aux bornes. En fait, il est plus pratique de renverser l'opération. Les valeurs du potentiel aux bornes et du courant sont faciles à relever à l'aide d'un voltmètre et d'un ampèremètre. En construisant alors la courbe pour e et i et *ajoutant* aux ordonnées les valeurs correspondantes des volts perdus, on obtiendra la courbe pour E et i .

S'il existe du magnétisme rémanent dans les inducteurs, la courbe, au lieu de partir de l'origine, commencera un peu au-dessus.

Caractéristiques de la dynamo en Série.

La machine Siemens dont la figure 152 représente la caractéristique était une dynamo en série.

Nous donnons, à titre de comparaison, dans la figure 153 la caractéristique d'une machine Gramme « A » également montée en série. Cette machine présentait, suivant les mesures prises par M. Marcel Deprez, une résistance de 0,41 ohm pour l'induit est de 0,61 ohm pour les inducteurs. La figure donne deux caractéristiques correspondant l'une à une allure de 1 440 tours par minute, l'autre à une allure de 950 tours par minute.

Les courbes de puissance en chevaux y sont également indiquées en pointillé.

Les chiffres afférents sont consignés dans le tableau au-dessous de la figure.

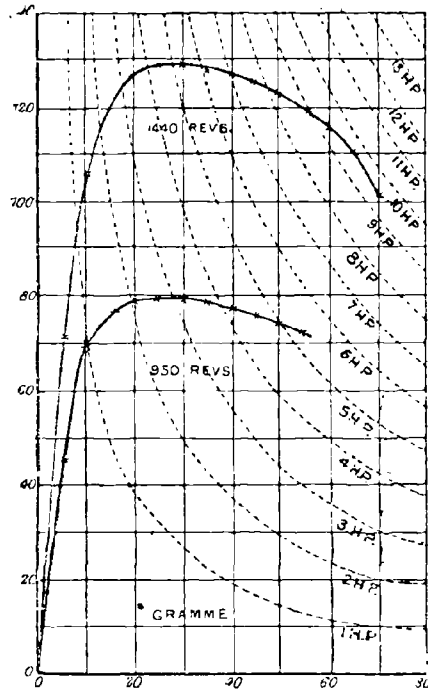


Fig. 155. — Caractéristiques pour différentes vitesses.
 Revs = Tours (par minute).
 HP = Chevaux-vapeur.

EXPÉRIENCES SUR UNE MACHINE GRAMME MONTÉE EN SÉRIE

COURANT EN AMPÈRES	FORCE ÉLECTROMOTRICE (EN VOLTS)	
	Vitesse : 1 440 tours par minute	Vitesse : 950 tours par minute
5	72	45
10	107	70
15	122	77
20	127	79
25	129	79
30	128	79
35	128	79
40	127	78
45	125	76
50	123	74
55	121	72
60	116	»
65	110	»
70	101	»

Dans la dynamo en série, l'aimantation des inducteurs croît avec le courant, et, par suite, la force électromotrice commence également par croître, ce qui fournit la première portion rectiligne de la courbe. Au fur et à mesure que les inducteurs approchent de la saturation, la courbe s'incurve, et, comme les réactions dues au courant dans l'induit prennent alors une importance relativement grande, elle s'infléchit et finit par s'abaisser tout à fait.

Une circonstance contribue souvent à diminuer la force électromotrice quand l'induit est le siège de courants intenses ; c'est la puissance relativement insuffisante des inducteurs. L'aimantation transversale due au courant d'induit détermine un déplacement considérable du point neutre et nécessite un grand décalage des balais, ce qui a pour résultat d'augmenter beaucoup l'action démagnétisante de l'induit sur les inducteurs (p. 85). L'inflexion de la caractéristique est toujours plus accentuée quand les inducteurs sont faibles. Elle est également très prononcée pour les machines dans lesquelles le noyau d'induit est

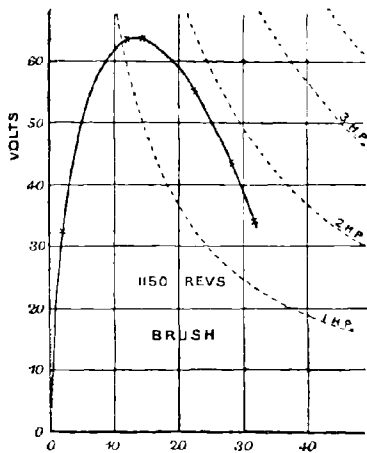


Fig. 156. — Caractéristique plongeante.

Revs = Tours (par minute).

HP = Chevaux-vapeur.

plus voisin de la saturation que ceux des inducteurs. En effet, quand des courants intenses arrivent à saturer les noyaux d'induit, la dérivation magnétique par les pièces polaires devient relativement plus grande.

La figure 156 représente encore une courbe de dynamo en série. C'est celle d'une petite machine Brush (pour un seul foyer à arc), ancien modèle, à anneau de fer massif. Par suite de la disposition particulière des bobines, les réactions de l'induit s'y manifestent par un abaissement tout à fait extraordinaire de la caractéristique. Ce phénomène est dû en partie au montage destiné à mettre hors du circuit

une paire de bobines à l'approche du point neutre. On remarquera que la puissance maximum de cette petite machine est de 1,75 cheval, et qu'elle n'atteint cette valeur qu'après l'intervention déjà marquée de ces réactions. La diminution considérable de force électromotrice qui se produit quand on demande à la machine un débit pour lequel elle

n'est pas faite est dans la pratique un réel avantage. Si, en effet, la machine vient, en marche, à être mise accidentellement en court-circuit, les réactions de l'induit empêchent le développement d'un courant exagéré qui pourrait surchauffer les bobines. On considère comme favorable, pour les éclairages par arc qui exigent un courant sensiblement constant, l'emploi de machines à caractéristiques plongeantes fonctionnant dans cette partie de la courbe.

Relation entre la Caractéristique et la Vitesse.

On sait que la force électromotrice engendrée dans une bobine ou une armature en mouvement serait strictement proportionnelle à l'intensité du champ magnétique, sans l'influence des réactions du courant développé dans cet induit. Or, dans une dynamo en série, l'intensité du champ magnétique dépend de l'intensité du courant ; et, si le courant est maintenu constant (à l'aide de résistances convenablement réglées), l'intensité du champ magnétique sera également constante, malgré les changements d'allure de l'induit. Si donc on connaît la caractéristique d'une machine pour une vitesse quelconque, on pourra trouver sa caractéristique pour toute autre vitesse en augmentant ou diminuant simplement les ordonnées de la première courbe dans la même proportion. Prenons, par exemple, le cas de la machine Gramme dont la figure 135 donne la caractéristique à la vitesse de 950 tours par minute. On pourrait calculer sa caractéristique à la vitesse de 1 440 tours d'après la première en augmentant ses ordonnées dans le rapport de $\frac{1\ 440}{950}$. Ainsi l'on voit d'après la courbe inférieure que, pour un courant de 20 ampères, sa force électromotrice était de 79 volts. On devrait donc avoir pour la courbe supérieure, au débit de 20 ampères, $\frac{79 \times 1\ 440}{950} = 119,7$ volts. La force électromotrice réellement observée, à la vitesse de 1 440 tours et pour un courant de 20 ampères, a été de 127 volts. Il y a un léger écart, et en réalité on le constate toujours ; les machines dynamos se comportent en effet invariablement comme si un certain nombre de tours ne comptaient pas au point de vue électrique. En admettant qu'ici le nombre des « tours morts » (voir p. 218) fût de 140, le nombre de volts calculé d'après la théorie concorderait très exactement avec celui fourni par l'expérience.

De la Résistance dans la caractéristique.

Dans la caractéristique, les ordonnées représentent les volts et les abscisses les ampères. Mais, d'après la loi d'Ohm, des volts divisés par des ampères donnent des ohms. Comment pourra-t-on en trouver la représentation dans la caractéristique ? — Supposons par exemple qu'on veuille représenter la résistance du circuit correspondant à un courant donné quelconque. Soit (fig. 157) la caractéristique de la dynamo en question ; on désire connaître la résistance correspondant à cet état de fonctionnement pour le point marqué P. Menons l'ordonnée PM et joignons le point P à l'origine. La ligne OP a une certaine inclinaison dont l'angle est POM. Or PM est égal à la force électromotrice considérée, et OM est l'intensité du courant ; par suite, d'après la loi d'Ohm,

$$\text{Résistance} = \frac{\text{force électromotrice}}{\text{intensité du courant}} = \frac{PM}{OM};$$

mais

$$\frac{PM}{OM} = \text{tang POM};$$

donc la

$$\text{Résistance} = \text{tang POM},$$

ce qui signifie en langage vulgaire que : la résistance correspondant

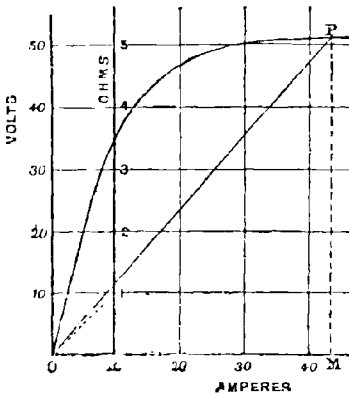


Fig. 157. — Représentation graphique de la résistance.

à un point quelconque de la caractéristique est représentée dans cette caractéristique par la tangente trigonométrique de l'angle que fait avec l'axe des x la droite joignant l'origine au point considéré.

La figure 157 indique une manière simple de déterminer ces tangentes. Au point de l'axe des x correspondant à 10 ampères, élevons une ordonnée. Une ligne menée de l'origine sous un angle dont la tangente est = 1 (soit 45°) coupera cette ligne verticale en un point situé à la hauteur marquée 10 volts.

L'ordonnée de ce point correspondra en conséquence à 1 ohm, et, en portant successivement sur

cette ordonnée une série de longueurs égales, on constituera une échelle de résistances. Dans la figure 157 la résistance correspondant au point P de la caractéristique est, comme on le voit, de 1,2 ohm environ sur l'échelle des résistances. Or P est situé à 51,3 volts et le courant est de 43,2 ampères. En divisant l'un par l'autre, on obtient 1,18 ohm qui est très sensiblement ce qu'indique la courbe. La construction graphique ci-dessus épargne ce genre de calculs.

Si dans la dynamo réelle on augmentait graduellement la résistance du circuit, le point P se déplacerait en arrière le long de la courbe en se rapprochant de l'origine, les volts et les ampères allant tous deux en diminuant, et la ligne OP se redressant de plus en plus, c'est-à-dire formant avec l'axe des x un angle de plus en plus ouvert. Arrivée à un certain angle d'ouverture, cette ligne OP deviendrait pratiquement tangente à la partie de la caractéristique qui est sensiblement droite, et alors la moindre augmentation de résistance dans le circuit ferait perdre à la machine son aimantation, faute de courant pour exciter ses inducteurs.

La résistance peut être représentée d'une façon analogue sur la caractéristique des machines en dérivation (voir fig. 161); mais dans ce cas, si la caractéristique est construite sur le courant et la différence de potentiel extérieurs, la résistance ainsi représentée sera aussi la résistance extérieure.

Relation entre la Caractéristique et l'Enroulement des inducteurs et de l'induit.

Supposons qu'on refasse l'enroulement d'un induit de machine en y mettant un plus grand nombre de spires de fil proportionnellement plus fin. Quel résultat obtiendra-t-on à la même allure que précédemment? — La résistance de la machine augmentera dans une certaine proportion et sa force électromotrice sera également plus élevée. Supposons que la figure 158 représente la caractéristique de la machine primitive avec N tours de fil sur l'induit : que deviendra-t-elle quand le nombre des spires sera porté à N' ? — Soit P un point quelconque de la première courbe correspondant à une certaine intensité de courant O C. Prenant la seconde armature, faisons varier la résistance extérieure jusqu'à ce que le courant reprenne la même valeur O C. Les électro-aimants seront alors portés exactement au même degré d'aiman-

tation que précédemment ; mais le flux de force traverse N' au lieu de N tours de fil. La force électromotrice sera par suite également supérieure

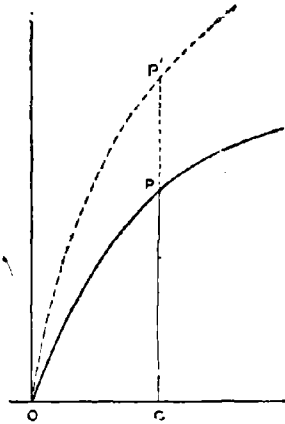


Fig. 158.

dans la proportion de $\frac{N'}{N}$. Menons dès lors $P' C$ de manière à avoir la proportion $\frac{P' C}{P C} = \frac{N'}{N}$; le point P' appartiendra à la nouvelle caractéristique. On peut obtenir tous les autres points de la nouvelle caractéristique en prolongeant ainsi les ordonnées de la première dans le même rapport.

Il est évident d'après ce qui précède que l'augmentation du nombre des tours de fil sur l'induit produit le même effet qu'un accroissement de vitesse de rotation. Ceci prouve qu'on peut construire des dynamos à *faible vitesse* (telles qu'il les faut à bord des navires, etc.), fournissant la force électromotrice voulue, à la condition d'augmenter d'autant le nombre des spires de l'induit. Ce mode d'opérer implique cependant un sacrifice au point de vue économique en raison de l'augmentation de résistance qui en résulte pour l'armature.

L'effet des modifications dans le nombre de spires des inducteurs

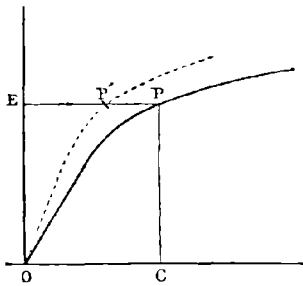


Fig. 159.

peut également être reproduit sur le diagramme de la caractéristique. Supposons que N_1 étant le nombre primitif des spires sur les bobines inductrices, le nouvel enroulement de la machine porte ce nombre à N_2 spires. Quel en sera le résultat ? — Dans ce cas, on obtiendra la même force électromotrice pour la même vitesse que précédemment, à la condition que les électro-aimants soient portés au même degré d'aimantation. Mais, si le

courant circule N_2 au lieu de N_1 fois autour des inducteurs, il faudra un courant d'intensité $\frac{N_2}{N_1}$ fois seulement aussi grande que précédemment, pour produire la même aimantation. Pour obtenir la nouvelle caractéristique (fig. 159), menons d'un point P quelconque de la première une parallèle $P E$ à l'axe des x . $P E = O C =$ le courant

correspondant à la force électromotrice $O E$. Déterminons P' de telle sorte que $\frac{P' E}{P E} = \frac{N_s}{N'_s}$; la nouvelle caractéristique passera alors par le point P' , et tous les autres points de cette caractéristique pourront se déterminer de la même façon par une réduction de leurs abscisses dans le même rapport.

Il est à noter qu'aucun de ces deux procédés n'est applicable aux caractéristiques des machines montées en dérivation.

Courant critique d'une dynamo en Série.

Le seul fait que, pour une même machine, les caractéristiques correspondant à diverses vitesses différent uniquement par l'échelle relative de leurs ordonnées conduit à une conséquence importante. La première portion de toute caractéristique pour une vitesse quelconque est sensiblement droite jusqu'à un point où, pour cette vitesse, la force électromotrice atteint approximativement les deux tiers de sa valeur maximum. Quand le courant est tel que la force électromotrice est arrivée à cette valeur, la moindre variation, soit dans la vitesse du moteur, soit dans la résistance du circuit, détermine une grande variation de la force électromotrice, et par suite du courant; en conséquence, comme ce point critique correspond toujours à la même intensité (fig. 160), ce courant — pour lequel la partie droite de toutes les courbes commence à s'infléchir — peut être désigné sous le nom de « courant critique » de la machine considérée. Chaque dynamo en série a son courant critique propre et ne fonctionne pas bien avec un courant moindre; car ce courant moins intense n'excite pas au degré voulu les électro-aimants. On verra plus loin que, du moment qu'à chaque vitesse correspond une certaine inclinaison de la caractéristique, il y a une résistance particulière à chaque valeur de la vitesse pour laquelle on obtiendra le courant critique; et, plus la vitesse sera grande, plus cette résistance pourra être considérable. Il n'y a donc pour une dynamo en série rien d'analogue à une résistance

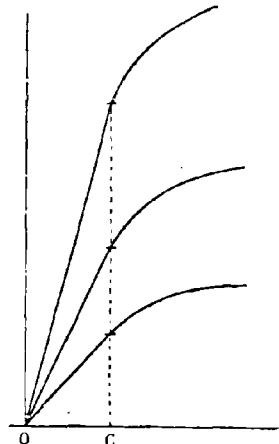


Fig. 160.

critique : qu'une résistance en effet soit ou non critique, c'est une affaire de vitesse. *Il n'existe non plus rien d'analogue en soi à une vitesse critique pour une dynamo en série* : que la vitesse soit ou non critique, cela dépend en effet de la résistance du circuit.

Caractéristique d'une dynamo en Dérivation.

La dynamo en dérivation comporte deux caractéristiques distinctes : la *caractéristique externe*, dans laquelle les valeurs portées en abscisses

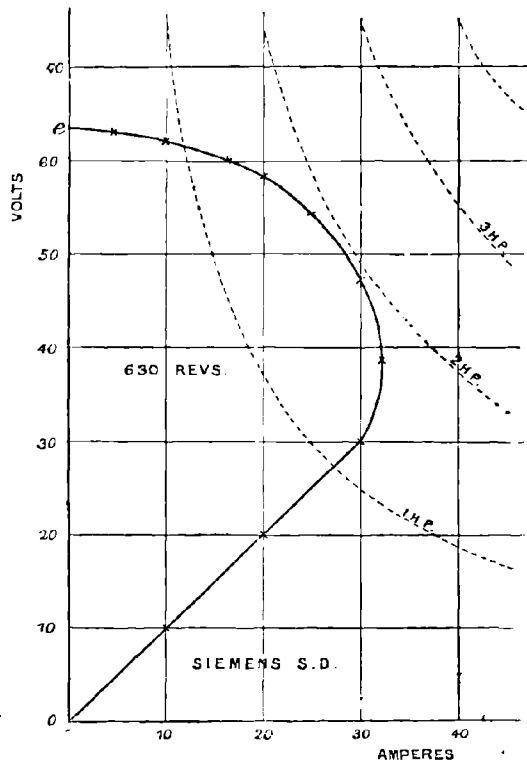


Fig. 161. — Caractéristique Externe d'une machine en Dérivation.

Revs = Tours (par minute).

HP = Chevaux-vapeur.

S. D. = *Shunt Dynamo* = Dynamo en dérivation.

sont les intensités en ampères dans le circuit extérieur, et celles portées en ordonnées, les volts représentant la différence de potentiel aux

bornes ; et la *caractéristique interne*, construite sur les volts et les ampères du circuit dérivé. La caractéristique interne de la dynamo en dérivation est absolument identique à la caractéristique externe d'une dynamo en série ; elle indique le degré de saturation des inducteurs. Il est préférable de la construire sur les ampères-tours au lieu des ampères, parce que l'aimantation dépend du nombre de tours de fil sur les bobines aussi bien que des ampères.

La caractéristique externe d'une machine Siemens en dérivation (donnée par feu sir William Siemens à la Société Royale, en 1880, et par M. Alexandre Siemens dans le *Journal de la Société des Ingénieurs-Télégraphistes*, mars 1880) est représentée dans la figure 161 ; les courbes de puissance en chevaux y sont également indiquées en pointillé. La puissance extrême de cette machine, à la vitesse de 630 révolutions par minute, est un peu inférieure à 2 chevaux avec un courant de 30 ampères et une force électromotrice de 47, 5 volts.

La courbe de la dynamo en dérivation diffère d'une façon singulière de celle de la dynamo en série. — Elle commence par une portion droite ou presque telle qui se renverse ensuite sur elle-même en se rapprochant presque horizontalement de l'axe des forces électromotrices. — La portion droite représente l'état instable correspondant à une valeur du courant dérivé inférieure à sa véritable valeur critique. Le courant critique externe, si on peut l'appeler ainsi, est le courant pour lequel la dérivation commence à produire tout son effet ; il est d'environ 30 ampères dans la figure 161. A partir de ce point le courant dérivé agit avec une grande puissance et la force électromotrice croît alors très rapidement. L'inclinaison de la ligne qui forme la première portion de la caractéristique représente la résistance qu'on peut appeler, pour la vitesse considérée, la résistance critique et qui est dans ce cas particulier de 1 ohm environ. Si la résistance du circuit extérieur se modifie si peu que ce soit, la force électromotrice et le courant varient dans de grandes proportions. Une résistance tant soit peu inférieure fait immédiatement perdre aux électros leur aimantation. Une résistance tant soit peu supérieure détermine de suite une élévation de la force électromotrice au-dessus de sa valeur critique, 30 à 31 volts environ dans le cas actuel. Si la résistance augmente constamment (et que la droite reliant l'origine à la partie courbe se redresse), la force électromotrice va toujours en augmentant et devient maximum quand la résistance est infinie, c'est-à-dire quand le circuit est complètement ouvert et que les bobines en dérivation reçoivent la force électromotrice totale développée dans l'induit. La figure 162 repré-

sente la caractéristique d'une machine Gramme en dérivation, susceptible de fournir 400 ampères. Ici la courbe e est la caractéristique externe d'après laquelle est calculée la courbe E par addition de portions d'or-

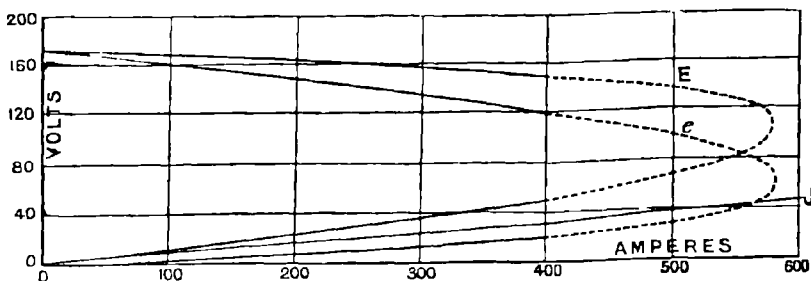


Fig. 162. — Caractéristiques d'une machine en Dérivation.

données égales à $r_a i_a$. Les fils de l'induit ne pouvant supporter en toute sécurité plus de 400 ampères, la portion ponctuée de la courbe représente des résultats qui n'ont pas été réellement observés.

Il est intéressant de suivre le contraste entre la caractéristique de la machine en dérivation et celle de la dynamo en série (fig. 152).

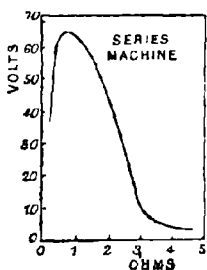


Fig. 163.

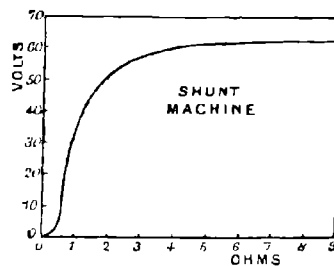


Fig. 164.

Series Machine = Machine en Série. *Shunt Machine* = Machine en Dérivation.

Dans la dynamo en série, la première partie de la caractéristique est aussi une ligne inclinée, et la tangente de son angle d'inclinaison est également la résistance critique pour la vitesse donnée. Mais la dynamo en série ne fonctionne que si la résistance du circuit extérieur est *inférieure* à cette valeur critique, tandis que la dynamo en dérivation ne fonctionne que si la résistance extérieure est *supérieure* à cette valeur critique. Le contraste est encore plus frappant quand, au lieu de considérer les caractéristiques ordinaires, on étudie dans ces deux cas les courbes indiquant la relation entre le potentiel aux bornes et

les résistances du circuit extérieur. La figure 163 donne la représentation de cette courbe pour la dynamo en série, et la figure 164 la même courbe pour la dynamo en dérivation. La force électromotrice de la première tombe tout d'un coup quand la résistance dépasse 2 ohms ; celle de la seconde s'élève subitement quand la résistance atteint 1 ohm.

Dans la dynamo en dérivation, on n'obtient pas, comme dans le cas de la dynamo en série, la caractéristique pour une vitesse double en doublant les hauteurs des ordonnées. En effet, si pour une vitesse double on règle les résistances extérieures de manière à avoir le même courant extérieur que précédemment, on ne double pas par cela même la force électromotrice parce qu'on n'a plus la même intensité dans le circuit dérivé inducteur. Si, d'un autre côté, on règle les résistances de manière à avoir le même courant dérivé que précédemment et par suite une force électromotrice double, on n'a plus le même courant extérieur. Si, cependant, on modifie la résistance extérieure, en donnant plus d'intensité au courant extérieur, de manière à réduire le courant dérivé à sa valeur primitive, l'aimantation reste la même que précédemment. Dans ce cas, à une vitesse double correspondra une force électromotrice très sensiblement double ; mais la différence de potentiel dans la dérivation peut rester la même que précédemment, bien que le courant extérieur soit sensiblement doublé. C'est ce qu'indique la figure 165 dans laquelle $e a$ représente le courant extérieur dans le premier cas, et $e A$ ce même courant dans le second cas. OA reste une ligne droite, mais à cette vitesse plus considérable son inclinaison est moindre. Cette dernière considération permet de prévoir qu'à des vitesses plus élevées la résistance peut être réduite à une valeur inférieure avant d'atteindre le point critique auquel la machine « se désamorce », c'est-à-dire cesse de fournir l'aimantation à ses électro-aimants.

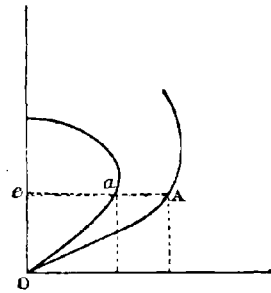


Fig. 165.

Courbe du Courant total dans l'induit.

Dans la dynamo en dérivation, le courant qui circule dans l'induit est égal à la somme des courants dans le circuit extérieur et dans le circuit dérivé ; en d'autres termes

$$i_a = i + i_d.$$

Il est facile d'obtenir une courbe donnant la relation entre i_a et c . Dans la figure 166, supposons que $O m i$ soit la « caractéristique externe » pour la vitesse donnée. Prenons sur cette courbe un point quelconque m ; en ce point la différence de potentiel aux bornes est mesurée en volts par la longueur $m x$ ou $O e$, et le courant en ampères par la longueur $O x$ ou $e m$. Menons maintenant la ligne $O s$ sous un angle $s O x$ tel que sa tangente soit égale à la résistance de la dérivation ; $e s$ représentera alors le courant dans la dérivation quand la différence de potentiel est de $O e$ volts. Prolongeons $e m$ d'une longueur $m n$ égale à $e s$; la ligne entière $e n$ représentera dès lors le courant d'induit ou total i_a pour une différence de potentiel égale à $O e$. On peut ainsi trouver une série de points analogues qui détermineront la nouvelle courbe cherchée $O n i_a$.

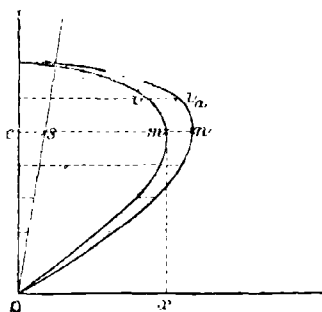


Fig. 166.

Fig. 166. Prenons maintenant la ligne $O s$ sous un angle $s O x$ tel que sa tangente soit égale à la résistance de la dérivation ; $e s$ représentera alors le courant dans la dérivation quand la différence de potentiel est de $O e$ volts. Prolongeons $e m$ d'une longueur $m n$ égale à $e s$; la ligne entière $e n$ représentera dès lors le courant d'induit ou total i_a pour une différence de potentiel égale à $O e$. On peut ainsi trouver une série de points analogues qui détermineront la nouvelle courbe cherchée $O n i_a$.

Caractéristique Totale de la dynamo en Dérivation.

En portant sur un système de coordonnées les valeurs de la force électromotrice totale E et celles du courant total i_a , on obtiendra la caractéristique totale de la dynamo.

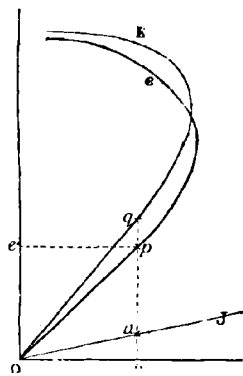


Fig. 167.

Traçons, comme dans le cas précédent, la courbe sur e et i_a (fig. 167). Soit p un point quelconque de la courbe, dont le potentiel est $p x$ ou $O e$ et le courant $e p$ ou $O x$. Menons ensuite la ligne $O J$ sous un angle $J O x$ tel que sa tangente soit égale à la résistance de l'induit. Appelons a le point où cette ligne coupe l'ordonnée $p x$; $a x$ représentera le nombre de volts nécessaire à la production du courant $O x$ dans la résistance de l'induit. Si l'on prolonge ensuite $p x$ d'une longueur $p q$ égale à $a x$, la hauteur $q x$ représentera la force électromotrice totale E pour un courant i_a de valeur égale à $O x$.

Caractéristique d'une dynamo en Dérivation avec Aimantation permanente.

S'il existe du magnétisme rémanent dans les électro-aimants, il y aura induction de force électromotrice, même avant la fermeture du circuit dérivé. Dans ce cas, la caractéristique prendra naissance en un point V situé à une petite distance de l'origine suivant l'axe des x . Par le fait la machine se comporte comme s'il existait déjà une petite force électromotrice (indépendante de la courbe), ayant pour effet de lancer un courant initial dans la machine, de sorte que celle-ci s'excite elle-même sous l'action de courants proportionnels, pour les premiers degrés (instables) d'aimantation, aux ampères-tours du circuit dérivé, *plus* quelques ampères-tours imaginaires, cause

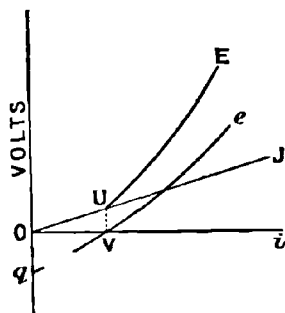


Fig. 168.

du magnétisme rémanent. Si l'inducteur porte une seconde bobine permettant d'introduire une aimantation indépendante, on obtiendra un résultat analogue : la caractéristique commencera en un point tel que V. La force électromotrice due aux ampères-tours de la dérivation sera portée au-dessus de O (fig. 168), tandis que la longueur Oq au-dessous de O correspondra à la portion de la force électromotrice due aux ampères-tours (réels ou imaginaires) du magnétisme indépendant, et OV représentera le courant fourni par la machine mise en court-circuit.

Une machine en dérivation comportera en réalité quatre courbes respectivement construites sur e et i , e et i_a , E et i , E et i_a . Parmi ces courbes, la première est la *caractéristique externe* et la quatrième la *caractéristique totale*.

La figure 169 représente ces quatre courbes respectivement désignées par les lettres A, B, C et D. Si D est donnée, on pourra en déduire A de la manière suivante : — Soient OJ et OZ deux droites dont les coefficients angulaires respectifs représentent les résistances de l'induit et du circuit dérivé. On obtiendra la courbe B en déduisant des ordonnées de D des longueurs égales aux portions d'ordonnées comprises entre l'axe des x et la ligne OJ; et la courbe C, en retranchant des abscisses

de la courbe D des longueurs égales à la portion des abscisses comprises entre l'axe des y et la ligne OZ. On aura, par suite, la courbe A en prenant les ordonnées de B et les abscisses de C correspondant à un point quelconque de D.

On remarquera que, DB représentant les volts perdus par suite de la résistance de l'induit, CD représentera les ampères perdus dans l'excitation des inducteurs. Plus la résistance de l'induit sera faible et la résistance de la dérivation élevée, plus ces pertes seront réduites. En

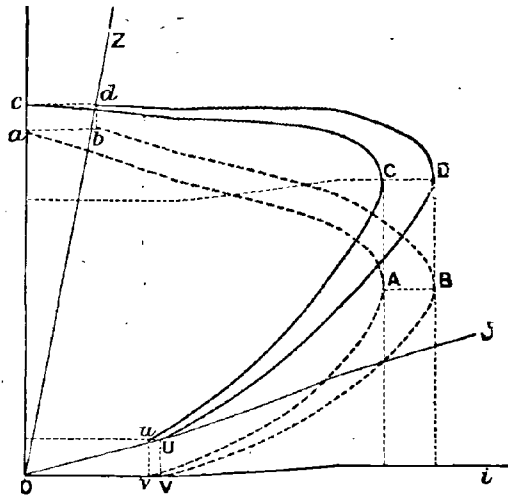


Fig. 169. — Quatre courbes d'une machine en Dérivation.

réalité, dans une machine moderne bien établie, les quatre courbes se rapprochent beaucoup les unes des autres.

Si la courbe d'induction de la machine est connue, il est facile de déterminer la caractéristique par une construction géométrique. La courbe d'induction OPM (fig. 170) montrera la relation entre Φ et les ampères-tours de la dérivation, $i_a N_a$ de notre notation.

Supposons cette courbe tracée à gauche de l'axe des y ; la ligne OR peut être divisée suivant une échelle représentant soit les ampères-tours, soit les ampères, N_a divisions sur la première échelle correspondant à une division de la seconde. Une échelle verticale établie sur OE peut, de la même manière, représenter soit Φ , soit E , $\frac{n}{t} N 10^{-8}$ étant le rapport des divisions de ces deux dernières échelles. Menons maintenant la ligne OM faisant avec OR un angle tel que sa tangente corresponde, en

nant à son fonctionnement normal est ordinairement la partie supérieure (fig. 170), et il est évident, d'après sa construction, que, plus sa résistance intérieure sera faible, plus la courbe s'étendra vers la droite et plus les sommets des deux courbes s'approcheront de l'horizontalité; une bonne machine en dérivation, à très faible résistance intérieure, sera *très approximativement* auto-régulatrice pour potentiel constant.

S'il n'y a pas d'aimantation initiale ou résiduelle, les deux courbes passeront par le point O; dans le cas contraire, il n'en sera ainsi pour aucune d'elles. Alors la courbe d'induction commencera au-dessus

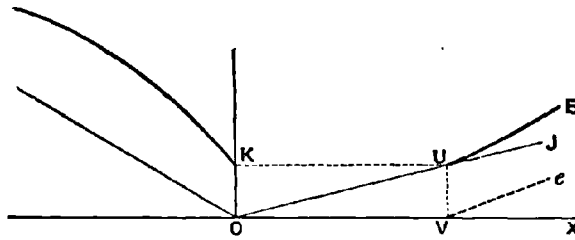


Fig. 171.

de O en un point tel que K (fig. 171) et les extrémités inférieures des deux courbes pour E et e se reculeront d'autant plus vers la droite que la distance $UV = KO$ sera plus grande. Pour presque toutes les machines en dérivation, on trouve que, si l'on prend des valeurs descendantes de e (à une vitesse quelconque donnée), e s'annule alors que i conserve encore une valeur finie.

On remarquera également que la valeur limite de E dépend de l'inclinaison de MO (fig. 170), c'est-à-dire de la résistance, par spire, de la bobine en dérivation; toute diminution de cette résistance fera croître E , en portant à un degré plus élevé l'aimantation correspondant à une valeur donnée de e .

Contraste entre la machine en Série et la machine en Dérivation.

Nous avons déjà effleuré, page 253, la différence entre la manière dont se comportent les machines en série et les machines en dérivation quand on augmente ou diminue la résistance du circuit extérieur. En matière d'éclairage, les dynamos sont généralement appelées : (a) soit à alimenter des lampes à incandescence montées parallèlement, auquel

cas les machines doivent maintenir une différence de potentiel constante entre les conducteurs principaux; (b) soit à alimenter des lampes à arc montées en série, et dans ce cas la machine doit fournir un courant constant. Quand la différence de potentiel doit être maintenue constante, le courant varie avec le nombre de lampes fonctionnant en parallèle; dans le second cas, où le courant doit être constant, la force électromotrice doit nécessairement varier suivant le nombre de lampes en série fonctionnant simultanément.

Pour bien comprendre l'application à faire des machines en série ou en dérivation selon les circonstances, il convient de construire (soit expérimentalement, soit théoriquement) des courbes comparatives. Dans le cas d'une distribution en dérivation, l'addition de toute lampe mise en circuit augmente la conductibilité de ce circuit d'une quantité égale à sa propre conductibilité (c'est-à-dire à l'inverse de sa résistance

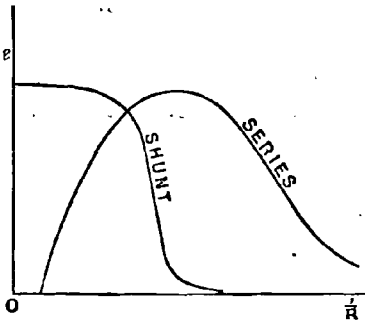


Fig. 172.

Series = Machine en Série.
Shunt = Machine en Dérivation.

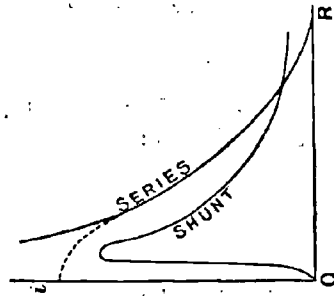


Fig. 173.

Series = Machine en Série.
Shunt = Machine en Dérivation.

propre). On est ainsi conduit à construire des courbes sur les valeurs de e et de $\frac{1}{R}$. C'est ce que donne la figure 172 pour deux dynamos présentant la même valeur maximum de e . On voit que, pour aucune des machines, soit en série, soit en dérivation, la valeur de e ne reste constante quand on augmente le nombre des lampes en circuit. La machine en dérivation donne la différence de potentiel la plus constante; mais elle s'abaisse tout d'un coup quand le nombre des lampes augmente.

Dans le cas d'un circuit unique de distribution sur des lampes en série, chaque lampe additionnelle ajoute à la résistance du circuit, et alors ce sont les valeurs de i et de R sur lesquelles doit être construite

la courbe. La figure 173 donne ce dernier résultat pour les deux genres de machines. Aucune d'elles ne fournit, comme on le voit, rien qui ressemble à un courant constant ; mais, pour la machine en dérivation, il existe une courte plage, correspondant à son courant maximum, pour laquelle cette valeur présente plus de constance qu'on n'en peut trouver avec la machine en série. La partie ponctuée de l'une des courbes correspond au cas d'une machine en série construite de manière à avoir une caractéristique plongeante (comme dans la figure 156, page 246), qui donne plus approximativement (pour des résistances modérées) un courant constant. Mais on voit de reste qu'il faut quelque chose de plus qu'une simple machine en série ou en dérivation pour obtenir une autorégulation réelle résolvant l'un ou l'autre des deux problèmes.

Applications diverses des Caractéristiques.

Les exemples suivants d'utilisation des caractéristiques sont extraits du travail du D^r Hopkinson publié dans les *Proc. Inst. Mech. Engineers* d'avril 1880 :

Détermination de la Vitesse la plus faible possible pour une Dynamo alimentant un Foyer à arc.

On sait qu'avec les charbons usuels et sous la pression atmosphérique ordinaire, un arc voltaïque stable ne peut se former avec une différence de potentiel inférieure à 40 volts environ ; et qu'en fonctionnement courant, avec un arc de

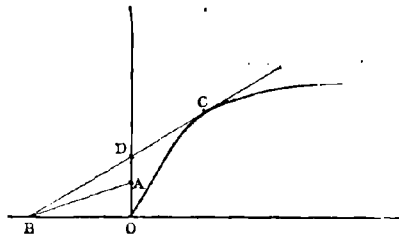


Fig. 174.

3 millimètres, la différence de potentiel est de 45 à 50 volts. En adoptant le premier chiffre, 40 volts environ, pour la différence de potentiel, on peut donner un exemple de l'utilisation de la courbe des forces électromotrices pour la détermination de la vitesse minimum à laquelle puisse tourner une machine donnée pour produire un petit arc. Prenant O pour origine des coordonnées

(fig. 174), portons sur l'axe des y la longueur OA égale à 40 volts ; menons AB jusqu'à son intersection avec l'axe des x prolongé du côté négatif, de telle sorte que le rapport $\frac{OA}{OB}$ représente la résistance métallique inévitable du circuit. Par le point B ainsi obtenu menons à la courbe une tangente qui la touche au point C et coupe l'axe des y en D .

Le rapport $\frac{OD}{OA}$ sera l'extrême limite à laquelle puisse être réduite la vitesse correspondant à la courbe spéciale employée pour qu'il y ait formation d'un arc excessivement petit.

Emploi de la Caractéristique pour expliquer l'Instabilité de la Lumière à arc.

Cette courbe peut être également employée à mettre sous une forme un peu différente l'explication donnée par le Dr Siemens à la Société Royale de Londres, relativement à l'instabilité que l'on constate parfois dans la lumière électrique par arc obtenue à l'aide de machines dynamos ordinaires. — Le rôle de tous

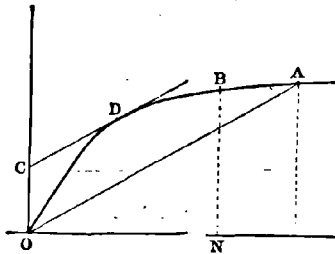


Fig. 175.

les régulateurs usuels est d'écarter les charbons quand le courant dépasse une certaine intensité et de les rapprocher quand il est inférieur à cette limite. Au début les charbons sont au contact. Par l'origine O (fig. 175) menons la droite OA sous un angle d'inclinaison dont la tangente représente les résistances en circuit autres que celle de l'arc, et rencontrant la courbe en A . L'abscisse du point A représente le courant-limite de fonctionnement de la lampe. Supposons que ON représente le courant pour lequel la lampe est réglée : dès lors, si l'abscisse du point A est plus grande que ON , les charbons s'écarteront. Par le point N menons l'ordonnée BN qui rencontre la courbe au point B ; et parallèlement à OA menons une droite tangente à la courbe au point D . Si le point B est à droite de D ou plus éloigné de l'origine, l'arc persistera ; mais si B est à gauche de D ou plus voisin de l'origine, les charbons continueront à s'écarter jusqu'à ce que le courant manque tout à coup et que la lampe s'éteigne. Si B , tout en étant à droite de D , en est très voisin, la moindre réduction dans la vitesse de la machine suffira à éteindre la lampe ; le fonctionnement sera tout à fait instable.

Relation entre la Caractéristique et les Dimensions d'une machine.

Supposons qu'une certaine dynamo de construction donnée ait pour caractéristique la courbe Oa (fig. 176), quelle sera la caractéristique d'une machine construite exactement sur le même type, mais dont toutes les dimensions linéaires seront doublées? — Les surfaces seront quatre fois aussi grandes; le volume et le poids huit fois aussi considérables. Il y aura le même nombre de spires de fil; mais la longueur du fil étant double et sa section quadruple, les résistances intérieures seront diminuées de moitié. Si les résistances exté-

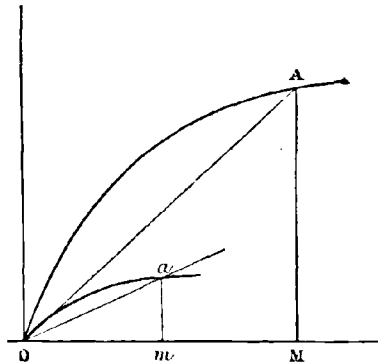


Fig. 176.

rieures étaient réglées en vue du même courant que précédemment, la nouvelle machine aurait un champ magnétique égal à la moitié seulement du premier. Si, au contraire, on les règle de manière à produire la même intensité de champ magnétique que précédemment, le courant sera doublé.

Mais, la surface enveloppée par les spires en mouvement étant quadruple, il y aura un flux de force quatre fois égal découpé (à la même vitesse), et par suite la force électromotrice sera quatre fois aussi grande. Or on ne demande qu'un courant double; il faudra donc doubler la résistance extérieure pour avoir un champ magnétique de même intensité. Pour représenter cet état de choses, prenons le point a sur la caractéristique de la petite machine et menons l'ordonnée am . Prenons ensuite OM double de Om et élevons au point M une ordonnée AM de longueur égale à quatre fois am . La nouvelle caractéristique passera par le point A . La résistance — c'est-à-dire l'inclinaison de OA — sera aussi double de celle qui correspond à Oa . Les points a et A sont des points homologues en ce qui concerne la saturation du fer des électro-aimants; et c'est cette saturation qui détermine les limites pratiques de fonctionnement économique d'une machine d'un type donné à une vitesse donnée. La force électromotrice étant quadruplée et le courant doublé, on voit que la puissance électrique développée sera huit fois égale à celle fournie par la petite machine fonctionnant à la même limite de saturation. Ces conditions peuvent être com-

parées à celles précédemment trouvées (p. 112) dans la discussion du rapport entre les dimensions et le rendement.

Application des Caractéristiques aux Dynamos employées à la Charge des accumulateurs.

Le problème suivant a une grande importance pratique : — *Étant donnée une dynamo employée à charger des accumulateurs et tournant à une vitesse déterminée, quelle sera l'intensité du courant qui la traversera ?*

Le D^r Hopkinson a donné la solution de ce problème pour le cas d'une dynamo en série. — Construisons la caractéristique totale de la dynamo (fig. 177) pour la vitesse donnée. Sur l'axe des y , prenons une

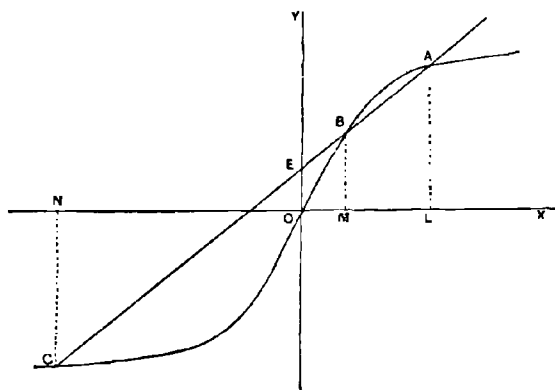


Fig. 177.

longueur OE équivalente à la force électromotrice des accumulateurs, et par le point E menons la ligne CEA faisant avec l'axe des x un angle tel que sa tangente représente la résistance du circuit total, y compris celle des accumulateurs. Cette ligne coupera la caractéristique aux points B et A , et, si la courbe est prolongée au delà de l'origine, au point C également. Cette branche négative de la caractéristique n'est autre que la caractéristique de la machine correspondant au renversement du courant qui la parcourt, et par suite aussi à l'inversion de sa force électromotrice. OL représente alors le courant réel dans le circuit, OM un courant instable qui pourrait exister momentanément, et ON le courant qui parcourrait le circuit si la force électromotrice des accumulateurs venait à surpasser celle de la dynamo et à la faire tourner en

sens inverse, ce qui arrive souvent quand on emploie à cet usage des dynamos montées en série. En effet, dans le cas où les accumulateurs arrivent à être complètement chargés, si leur force électromotrice vient à augmenter, ou si la résistance du circuit vient à croître par suite d'échauffement, ces deux circonstances ont pour résultat inévitable de réduire la force électromotrice effective AL et le courant OL , de sorte que l'aimantation des électro-aimants baisse également, et le point A se rapproche de la position d'instabilité au coude de la courbe.

Avec une machine en dérivation, il n'en est plus de même. — Soit

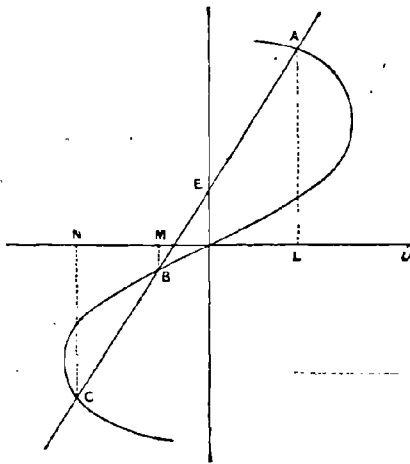


Fig. 178.

(fig. 178) la caractéristique de la dynamo en dérivation, les valeurs du courant extérieur étant portées le long de l'axe des x et celles de la force électromotrice totale sur l'axe des y ; comme précédemment, menons la ligne CEA . Elle coupe en A la branche positive, et OL est le courant dans le circuit extérieur. Si, maintenant, la force contre-électromotrice des accumulateurs ou la résistance du circuit vient à croître, ces augmentations auront pour effet de faire remonter le point A vers une partie plus élevée de la courbe. Le courant de charge OL pourra diminuer, mais le courant de dérivation augmentera et la force électromotrice AL subira un accroissement. Par suite, avec une dynamo en dérivation, on n'aura pas à craindre un renversement de marche de la machine, résultant d'une prépondérance prise par les accumulateurs.

CHAPITRE XI

DYNAMOS A DIFFÉRENCE DE POTENTIEL CONSTANTE

Conditions de fonctionnement. — Les conditions d'alimentation électrique commandent le régime de fonctionnement de la dynamo.

Pour certaines applications, — telles que le service d'un système de lampes à incandescence montées en dérivation, — le courant doit être fourni aux conducteurs principaux sous une *différence de potentiel* absolument *constante*, ou, comme on dit vulgairement, sous *pression* ou *tension constante*; c'est-à-dire que la différence de potentiel entre ces conducteurs, aux bornes de la dynamo, ou mieux encore aux bornes des lampes, doit être constante. Cette condition implique naturellement que le débit de la machine varie exactement en raison inverse de la résistance du circuit extérieur, qu'il augmente quand cette résistance diminue par suite de l'addition d'un certain nombre de lampes entre les conducteurs. Mais on a vu que, grâce à deux causes, — (1) la résistance intérieure de la machine, (2) les réactions démagnétisantes de l'induit, — les volts aux bornes à pleine charge tombent un peu au-dessous du chiffre qu'ils atteindraient (pour la même vitesse et la même aimantation) avec une charge nulle. En d'autres termes, les *volts perdus* augmentent avec la charge. Force est donc de recourir à des moyens artificiels pour compenser cette perte en volts, si l'alimentation doit être maintenue *sous tension constante*. Si une machine doit alimenter des lampes sous 60 volts, par exemple, la tension ne devra pas tomber au-dessous de 57 à 58 volts quand toutes les lampes fonctionneront.

Dans d'autres cas, comme pour alimenter un groupe de lampes à arc montées en une seule série, ou pour charger un certain nombre de batteries d'accumulateurs dans différents postes, ou encore pour actionner un certain nombre de moteurs échelonnés sur une même

ligne, il est nécessaire de maintenir sur cette ligne un *courant* absolument *constant*, quel que puisse être à un moment quelconque le nombre des lampes ou des moteurs en activité. Cela veut dire que, si la résistance du circuit extérieur se trouve augmentée par la mise en fonctionnement de plus de lampes ou de moteurs, la machine doit, d'elle-même, faire face à une augmentation proportionnelle de force électromotrice.

Les deux buts à atteindre pour la régulation sont, en conséquence, non seulement distincts, mais incompatibles ; il n'est pas possible qu'une dynamo conserve sa force électromotrice constante et qu'en même temps elle la modifie proportionnellement aux variations de résistance du circuit extérieur. Les deux systèmes doivent, par suite, être envisagés tout à fait séparément. Ils s'appliquent à des cas de distribution électrique totalement différents. Leur théorie n'est pas la même, non plus que le moyen pratique de les mettre en œuvre.

Les machines à courant constant, telles qu'il les faut pour l'éclairage à arc en série et pour certaines lampes à incandescence spéciales, sont décrites au Chapitre XVII. Dans le présent chapitre, nous ne nous occuperons que des machines destinées à l'alimentation sous tension constante.

Il existe différentes manières de régler les dynamos pour leur faire donner soit un potentiel, soit un courant constant. Parmi ces procédés, les uns comportent un réglage à la main ; les autres, l'introduction ou le retrait de résistances destinées à faire varier l'excitation des inducteurs ; d'autres encore, un déplacement automatique des balais ; d'autres enfin, un réglage électrique de la vitesse. Le chapitre relatif aux Régulateurs traitera de ces procédés. Notons tout d'abord que le voltage d'une dynamo donnée dépend, comme l'indique l'équation fondamentale (p. 44), de trois éléments : — la vitesse, le nombre de fils de l'induit, et le flux magnétique. Il en résulte que l'on peut agir sur l'un quelconque de ces trois éléments pour régler le fonctionnement de la machine. Des dispositions d'ordre purement mécanique permettent en effet de modifier la vitesse ; on peut aussi changer le nombre des fils d'induit travaillant utilement en avançant plus ou moins les balais au delà du point neutre ; on peut enfin faire varier le flux magnétique en modifiant la force magnétisante excitatrice, ou en changeant la disposition du circuit magnétique. On a eu recours à tous ces procédés pour gouverner les dynamos.

Dans des installations privées et isolées il peut être à propos

d'appliquer un régulateur (tel que celui de Willans ou celui de Richardson) pour modifier la vitesse suivant la demande du circuit, et maintenir la pression constante ; mais ce mode de procéder ne saurait convenir quand le moteur a d'autres travaux à effectuer que le simple entraînement d'une dynamo. Aussi a-t-on donné la préférence à des méthodes qui permettent de laisser à la machine une vitesse constante. Dans tout le cours de ce chapitre, nous admettrons que cette condition est toujours remplie ; et, comme on fait peu usage de méthodes de régulation purement magnétiques, nous ne nous occuperons ici que des méthodes basées sur la modification des forces magnétisantes. Parmi elles, quelques-unes comportent une manœuvre à la main ; d'autres sont automatiques.

Régulateur d'Edison. — Pour fournir des courants sous potentiel constant, Edison emploie une dynamo en dérivation dans le circuit inducteur de laquelle il introduit une résistance variable, sous forme de rhéostat, R (fig. 179). Un levier manœuvré à la main, dès que le

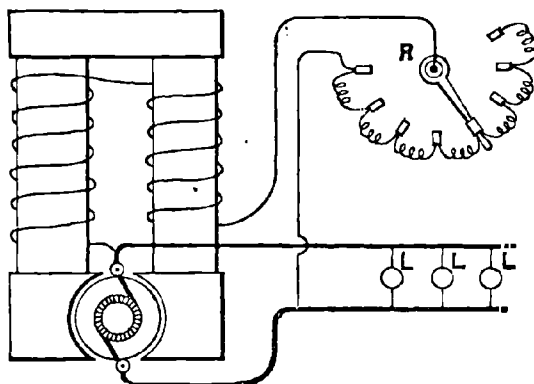


Fig. 179. — Mode de régulation d'Edison.

potentiel passe au-dessus ou au-dessous de sa valeur normale, fait contact avec un certain nombre de plots reliés à un jeu de résistances et diminue ou augmente le degré d'excitation des inducteurs. On a employé une disposition analogue dans plusieurs autres systèmes. Pour la rendre parfaite, il faut faire actionner automatiquement la résistance variable par un électro-aimant dont les bobines constituent une dérivation indépendante entre les conducteurs. C'est ce qu'a fait Edison. Une machine en dérivation bien construite a, comme on l'a vu page 260, un voltage presque constant ; la tension aux bornes baisse très peu à

pleine charge. Avec une machine de ce genre il suffit d'une très faible augmentation dans la puissance d'excitation pour compenser la perte en volts à pleine charge. Le rhéostat régulateur est également applicable à une dynamo à excitation indépendante.

DYNAMOS AUTO-RÉGULATRICES

Etant donné qu'il faut augmenter le magnétisme pour compenser les volts perdus, on peut rendre la dynamo auto-régulatrice en amenant toute augmentation de courant dans le circuit principal, qui déterminerait l'abaissement du voltage, à produire aussi automatiquement une augmentation compensatrice du magnétisme. Si, en plus de la bobine excitatrice qui produit l'aimantation initiale voulue de l'inducteur, on garnit celui-ci d'une bobine compensatrice en fil suffisamment gros pour porter le courant principal, on obtiendra le résultat cherché. Si la machine est tout d'abord montée en dérivation et qu'on y ajoute ainsi une bobine compensatrice en série avec l'induit, on aura la combinaison généralement connue sous le nom d'enroulement *compound*. L'expression de « dynamo compound » a été introduite dans le langage par MM. Crompton et Kapp pour désigner une dynamo à enroulement mixte, en série et en dérivation, par analogie avec l'expression mécanique de « moteur compound » appliquée à une machine à vapeur fonctionnant avec deux cylindres, l'un à haute, l'autre à basse pression. — Le compoundage n'est cependant pas le seul mode possible d'auto-régulation; une bobine compensatrice en série est également applicable à toute machine à courant continu bien étudiée, dans laquelle l'excitation magnétique initiale est indépendante ou constante. — On peut en conséquence employer les combinaisons suivantes : —

(I.) Bobines régulatrices en série + Aimants permanents pour produire l'excitation initiale, avec aimantation indépendante constante.

(II.) Bobines régulatrices en série + Circulation d'un courant indépendant dans des bobines distinctes autour des inducteurs, pour produire une aimantation indépendante constante.

(III.) Bobines régulatrices en série + Courant indépendant circulant dans le circuit principal (et produit soit par une batterie, soit par une machine magnéto indépendante) et ayant pour effet d'exciter partiellement les inducteurs, avec une aimantation indépendante constante.

(IV.) Bobines régulatrices en série + Bobines en dérivation alimentées par une portion du courant de la machine elle-même et excitant

ainsi partiellement les inducteurs, avec aimantation indépendante et sensiblement constante.

(V.) Pour les machines à courants alternatifs on ne peut employer des bobines en série avec le circuit principal ; mais on peut compounder ces machines en les munissant de bobines régulatrices alimentées par un courant dérivé (à l'aide d'un transformateur convenable) des courants principaux et proportionnel à leur intensité, ces courants dérivés passant d'abord par un commutateur spécial qui les redresse. L'aimantation indépendante peut être demandée soit à une excitatrice auxiliaire, soit à une bobine ou un groupe de bobines de l'induit, ou, par le fait, à un autre transformateur dont le primaire est mis en dérivation entre les conducteurs. Dans ces deux derniers cas, le courant doit subir une rectification convenable.

Théoriquement on peut employer plusieurs autres modes de combinaisons auto-régulatrices, comme, par exemple : — une machine avec une longue armature placée entre deux systèmes inducteurs distincts, excités, l'un séparément, l'autre en série ; — une machine en série à inducteurs non saturés combinée avec une machine (quasi indépendante) en série à inducteurs sursaturés, sur le même arbre ; — une machine en série à deux jeux de pôles inducteurs différemment disposés, l'un de ces jeux étant celui excité en série, l'autre étant excité d'une façon indépendante, ou formant circuit dérivé, etc.

Théorie de l'Auto-régulation.

Dans l'étude de la théorie de l'auto-régulation nous procéderons de la manière suivante : — Nous chercherons d'abord une expression du potentiel aux bornes de la dynamo. Elle comprendra généralement trois termes. Nous considérerons ensuite ces trois termes au point de vue de la nature constante ou variable de leurs facteurs. Ayant alors déterminé ceux de ces termes qui contiennent des facteurs variables, nous étudierons les conditions à réaliser (telles que la détermination d'une vitesse particulière ou un nombre spécial de spires) de manière à faire disparaître les termes contenant des facteurs variables. Ces conditions seront incorporées dans une « équation de condition » que nous discuterons alors. On trouvera en général que, si la vitesse est fixée d'avance, il y aura à en déduire un certain nombre « critique » de spires régulatrices, ou bien que, si le nombre des spires est déter-

miné d'avance, il y aura une vitesse particulière ou « critique » à laquelle l'auto-régulation s'effectuera dans de bonnes conditions.

Cette théorie peut être exposée soit algébriquement soit géométriquement. Nous recourrons successivement aux deux méthodes.

Cas (I.). — Bobines régulatrices en série + Aimants permanents. — Si les électro-aimants sont partiellement excités d'une façon permanente, ou si des aimants permanents en acier sont ajoutés aux électro-aimants, de manière à constituer un champ partiel permanent, indépendant de celui dû au courant dans le circuit, on peut désigner par Φ_1 le flux de force dû à ce champ indépendant.

Or, l'équation fondamentale de la dynamo en série est, en unités C. G. S.,

$$E = \frac{n}{l} N \Phi,$$

et la différence de potentiel aux bornes, autrement dit la tension, est, conformément à ce qui est dit page 228 et pour un même système d'unités,

$$e = E - (r_a + r_m) i.$$

Mais le flux de force Φ qui passe par l'induit à un instant quelconque se compose de deux parties, l'une indépendante et permanente Φ_1 , et l'autre subordonnée au courant et égale (pour i en ampères) à

$$\frac{4\pi N_s i}{10 \sum \frac{l}{\mu S}},$$

expression dans laquelle N_s est le nombre de spires de la bobine régulatrice, l la longueur du circuit magnétique en cm, S sa section droite en cm², et μ la valeur *moyenne* de la perméabilité (voir p. 140) entre les deux valeurs extrêmes correspondant à $i = \text{zéro}$ et $i = \text{maximum}$. Si, pour abrégér, on écrit

$$\frac{4\pi}{10 \sum \frac{l}{\mu S}} = q,$$

on peut représenter par $qN_s i$ la partie variable de Φ et poser en conséquence

$$\Phi = \Phi_1 + q N_s i,$$

ce qui donne pour expression complète de e :

$$e = \frac{n}{t} N (\Phi_1 + q N_s i) - (r_a + r_m) i,$$

ou

$$e = \frac{n}{t} N \Phi_1 + \frac{n}{t} N q N_s i - (r_a + r_m) i.$$

Le membre de droite de cette équation se compose de trois termes dont le premier contient comme facteurs la vitesse et deux constantes. Les deux derniers termes contiennent une variable, le courant, et l'un d'entre eux renferme également comme facteurs la vitesse $\frac{n}{t}$ et le nombre N_s de spires régulatrices. Si ce nombre N_s est fixé d'avance, la vitesse particulière pour laquelle la machine sera auto-régulatrice sera évidemment celle pour laquelle l'expression de e ne contiendra que des constantes. Si $\frac{n}{t}$ est fixé d'avance, il faudra alors faire varier N_s de manière à éliminer les termes qui contiennent le facteur variable. Comme les deux derniers termes sont de signes contraires, il est certain que, en faisant varier N_s ou $\frac{n}{t}$, ou les deux à la fois, on pourra rendre la valeur de $\frac{n}{t} N q N_s$ numériquement égale à $r_a + r_m$. Par suite, à la vitesse constante que nous désignerons par $\frac{n_1}{t}$, les deux derniers termes s'annuleront l'un l'autre, c'est-à-dire qu'on aura :

$$\frac{n_1}{t} N q N_s i - (r_a + r_m) i = 0.$$

En d'autres termes, N_s et $\frac{n_1}{t}$ doivent être tels que

$$\frac{n_1}{t} N q N_s = r_a + r_m. \quad [\text{XIII.}]$$

Telle est l'équation de condition.

Si la condition imposée par cette équation est réalisée, les deux derniers termes disparaissent dans l'expression de e , et l'on a simplement

$$e = \frac{n_1}{t} N \Phi_1 = \text{constante.}$$

Etant ainsi donnée, la constance de e à la vitesse considérée, il

est intéressant de voir ce qui détermine la valeur de e . Evidemment e est directement proportionnel au flux Φ_1 , provenant du champ indépendant et permanent. On peut en conséquence s'arranger pour que la dynamo, toujours à l'allure fixée, donne tel potentiel qu'on voudra, dans certaines limites, à la condition de faire varier Φ_1 dans la proportion voulue.

Supposons que la vitesse soit déterminée par des considérations mécaniques; le nombre convenable et critique des spires régulatrices sera donné par l'expression

$$N_s = \frac{r_a + r_m}{\frac{n_1}{t} Nq}. \quad [\text{XIV.}]$$

Ceci est intéressant. Plus la résistance intérieure de la dynamo est élevée, plus il faut mettre de spires régulatrices en série, pour rendre la machine auto-régulatrice.

Revenant à l'équation de condition mise sous sa seconde forme

$$\frac{n_1}{t} Nq N_s = r_a + r_{m_1},$$

on aura pour valeur de la vitesse critique

$$\frac{n_1}{t} = \frac{r_a + r_m}{N_s} \cdot \frac{1}{Nq},$$

ce qui montre que, si les spires en série sont déterminées d'avance, il y aura une certaine vitesse critique d'auto-régulation et que cette vitesse sera d'autant plus grande que les résistances intérieures seront plus élevées.

Finalement, on peut mettre la dernière équation sous cette forme :

vitesse critique = $\frac{\text{résistance intérieure totale}}{\text{nombre de spires de la bobine en série}} \times$ une quantité dépendant uniquement de l'enroulement de l'induit et du circuit magnétique, ainsi que de sa perméabilité dans les limites de fonctionnement entre lesquelles la régulation doit s'effectuer.

Jusqu'ici nous avons admis que la seule cause d'abaissement de la tension exigeant une compensation était celle due aux résistances intérieures. Mais l'abaissement dû à l'action démagnétisante de l'induit est, dans les machines modernes, une considération de plus d'importance encore. Pour faire entrer cette action en ligne de compte, il faut se rappeler que, si l'angle de décalage λ est connu, la bande démagnétisante

de conducteurs (voir p. 86) sera celle comprise sous un angle 2λ , soit $\frac{N_s\lambda}{90^\circ}$, et, comme chacun de ces conducteurs porte $\frac{1}{2}i$ ampères, les ampères-tours démagnétisants seront $\frac{N_s\lambda i}{180^\circ}$, ou, si l'on désigne par N_s' le nombre de conducteurs compris sous l'angle λ , $2N_s' \frac{1}{2}i = N_s'i$. Ceci s'applique aux machines à tambour; pour les machines à anneau, le produit doit être doublé. Comme, cependant, ces spires sont placées sur l'induit, alors que les spires compensatrices sont roulées sur l'inducteur, leur action sera plus grande à peu près dans le rapport du coefficient de dérivation v (voir p. 177). Il faudra en conséquence augmenter les spires en série N_s et en porter le nombre, de la valeur précédemment trouvée, à la valeur

$$N_s = \frac{r_a + r_m}{\frac{n_1}{l} Nq} + N_s' v. \quad [\text{XV.}]$$

Cas (II). — *Dynamo en série + Bobines d'excitation indépendante.* (Voir *Machine en série et à excitation indépendante*, fig. 44, p. 55.) — Il y a dans ce cas un magnétisme indépendant dû à un courant circulant autour des inducteurs dans des bobines distinctes, et fournissant une partie du magnétisme du champ. La figure 180 indique les connexions.

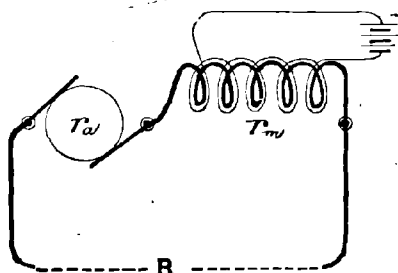


Fig. 180.

Si l'on désigne par Φ_1 le flux magnétique dû à l'excitation indépendante, le même raisonnement et les mêmes conclusions que ci-dessus s'appliqueront ici. Φ_1 ne sera cependant pas réellement une constante, car l'introduction d'une quantité constante de force magnétisante aura un effet variable suivant le degré de saturation résultant de la force magnétisante totale. Si, cependant, on tient compte dans le calcul de Φ_1 ,

comme pour celui de N_s , de la perméabilité moyenne dans les limites de fonctionnement de la régulation, on parera implicitement à tout abaissement dans l'effet du courant d'excitation indépendant.

MM. Wright et Kapp sont arrivés au même résultat que celui obtenu dans ce Cas II, en employant dans le circuit principal une seule bobine sur laquelle cependant une pile ou une dynamo indépendante était mise en dérivation. — M. Picard a émis une idée analogue.

Démonstration géométrique des Cas (I) et (II).

On a vu (p. 222) comment les valeurs du potentiel aux bornes s'abaissent dans les machines magnéto ou dynamos à excitation indépendante, au fur et à mesure que le courant augmente, e étant toujours ¹ inférieur à E d'une quantité égale à $r_a i$.

Pour représenter graphiquement ce qui se passe, soient OX et OP deux axes de coordonnées sur lesquels on porte les ampères et les volts, et soit OP la force électromotrice ($E = \frac{n_1}{l} N_s \Phi_1$) due au magnétisme permanent ou indépendant et mesurée quand aucun courant ne circule dans l'induit. Supposons maintenant les réactions d'induit assez faibles pour être négligées; E restera constant, à vitesse constante, quels que

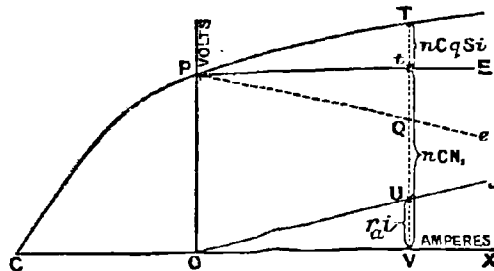


Fig. 181.

$$nCqSi = \frac{n_1}{l} NqN_s i.$$

$$nCN_1 = \frac{n_1}{l} N\Phi_1.$$

soient les courants produits; mais e s'abaissera. Au point O menons la ligne OJ sous un angle tel que sa tangente représente la résistance intérieure de la machine, et considérons le cas où le courant i a la valeur particulière correspondant à la longueur OV. La hauteur UV

¹ On en voit la représentation dans la figure 149, page 224, dans laquelle la courbe e montre l'abaissement dû à cette cause, et la courbe B l'abaissement réel dû principalement à cette cause et en partie aussi aux réactions démagnétisantes qui se produisent dans l'induit.

représentera la chute de potentiel extérieure, car $UV = \text{tang } UOV \times OV = r_a i$. Prenons sur tV une longueur $tQ = UV$, et QV représentera e . Tandis que la courbe construite sur E et sur i est sensiblement une ligne horizontale, celle construite sur e et i (la caractéristique externe) s'abaisse, comme l'indique la ligne ponctuée. Pour obtenir un point quelconque de la courbe e d'après la courbe E , il suffit de déduire des ordonnées de cette dernière des longueurs égales aux ordonnées correspondantes de la droite OJ . Mais comme, si la ligne E est horizontale, la ligne e s'abaisse évidemment, il faudra nécessairement que la ligne E s'élève d'une quantité précisément égale si l'on veut obtenir pour e une horizontale, c'est-à-dire si l'on veut arriver à une différence de potentiel constante. Or, comment donnera-t-on à E l'inclinaison ascendante voulue? — Rappelons-nous que, à une vitesse donnée $\frac{n_1}{t}$, la valeur de E est $\frac{n_1}{t} N \Phi_1$, Φ_1 indiquant que le circuit magnétique a été d'une façon quelconque (soit par aimant permanent, soit par excitation séparée) excité jusqu'à un degré tel qu'un flux de force Φ_1 pénètre l'induit. Le même tracé qui sert pour les volts servira aussi pour les valeurs de Φ , si l'on choisit une échelle convenable; c'est-à-dire que OP peut représenter Φ_1 . P est en conséquence un point de la courbe magnétique; il suffira, pour le porter encore plus haut, d'augmenter le nombre des ampères-tours d'excitation. La seule chose à faire est, par suite, de mettre sur les inducteurs une bobine en série garnie d'un nombre de spires N_s tel que les ampères-tours $N_s i$ arrivent à augmenter le magnétisme dans la proportion voulue, ou, en fait, que Tt soit égal à UV . On obtient ainsi pour E une courbe qui s'élève, sans être assurément une ligne droite, mais telle que, si l'on déduit de ses ordonnées les volts nécessaires à faire passer le courant à travers la résistance de l'induit, on réalise pour e une ligne très sensiblement horizontale.

En comparant les deux méthodes, algébrique et géométrique, on reconnaît que tV correspond à $\frac{n_1}{t} N \Phi_1$; Tt à $\frac{n_1}{t} N_s N_s i$; et UV , à $r_a i$; ou bien, si la résistance de la bobine additionnelle en série est comprise dans l'inclinaison de la ligne OJ , UV correspondra à $(r_a + r_m) i$.

Cas (III). — Dynamo en série + Force électromotrice indépendante agissant dans le circuit principal. — Ce cas en comprend réellement deux : celui où la force électromotrice indépendante constante est due à une pile, et celui où elle est due à une machine magnéto séparée tournant à vitesse constante (*Dynamo en série et machine magnéto*,

voir p. 272). Le raisonnement est toutefois le même dans les deux cas. La figure 182 représente l'un d'eux.

Nous avons ici comme force électromotrice totale du système la force électromotrice E de l'induit, plus la force électromotrice indépendante E_b provenant de la pile ou de la machine magnéto. On obtiendra la différence de potentiel entre les bornes, que nous avons toujours désignée par e , en retranchant de $E_b + E$ la portion de la force élec-

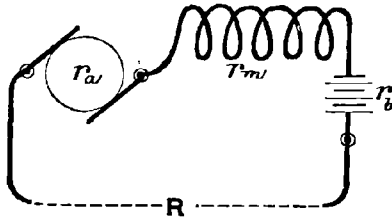


Fig. 182.

tromotrice employée à lancer le courant i dans les résistances intérieures qui sont maintenant r_a , r_m et r_b ; de sorte qu'on a

$$e = E_b + E - (r_a + r_m + r_b) i;$$

or $E = \frac{n}{t} NqN_s i$; par suite, pour que les deux derniers termes du second membre s'annulent mutuellement et laissent e constant, il faut donner à la dynamo une vitesse $\frac{n_1}{t}$ telle que

$$\frac{n_1}{t} NqN_s i = r_a + r_m + r_b,$$

qui est l'équation de condition. Dans ce cas,

$$e = E_b.$$

On voit ainsi que, dans ce cas également, le potentiel constant aux bornes est égal à celui qui est dû à l'excitation indépendante. Naturellement cela *ne veut pas dire* que la dynamo n'effectue aucun travail. Il faut y voir au contraire que, quand la résistance du circuit extérieur est infinie, de telle sorte que la dynamo n'effectue aucun travail, la seule force électromotrice agissant dans le circuit est celle qui est due à la source indépendante.

Cas (IV). — Bobines régulatrices en série + Bobines excitatrices en dérivation ; « Enroulement Compound ». — La machine à enroulement

compound peut être regardée soit comme une dynamo en série à laquelle on a ajouté un certain nombre de spires en dérivation, de manière à produire une aimantation initiale, soit comme une dynamo en dérivation à laquelle est ajouté un certain nombre de spires en série pour compenser la chute de potentiel aux bornes. Il existe deux modes possibles de connexion des bobines en dérivation sur la dynamo, et le nombre relatif de leurs spires varie légèrement dans les deux cas. Dans la méthode en « courte dérivation » (voir p. 57), les spires en

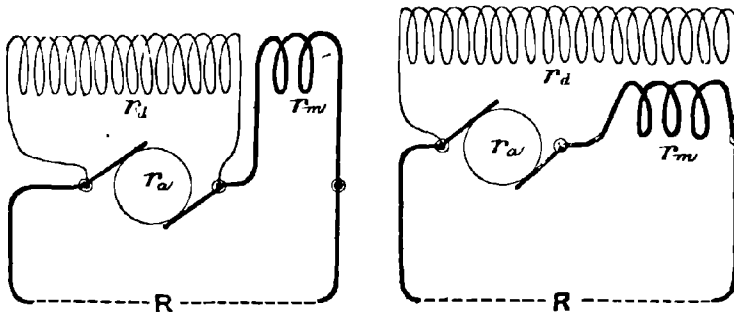


Fig. 183.

Fig. 184.

Montage compound : Courte dérivation. Montage compound : Longue dérivation.

dérivation sont placées en dérivation uniquement sur la portion de la dynamo constituée par l'induit, c'est-à-dire de balai à balai. Dans la méthode en « longue dérivation », les spires en dérivation sont reliées aux bornes de la machine et peuvent être considérées comme une dérivation soit sur le circuit extérieur, soit sur l'induit et les bobines en série réunis. Dans la première disposition, le courant n'est pas constant dans la dérivation, attendu que le potentiel ϵ aux balais n'est pas ϵ ; et, bien que ϵ puisse rester très constant, il n'en est pas de même de ϵ qui croit quand la résistance du circuit extérieur diminue. Dans la seconde disposition, le courant dans la dérivation est constant si ϵ est constant, et ce cas se rapproche de ceux précédemment étudiés d'une excitation indépendante constante.

Les connexions du système en courte dérivation sont indiquées dans la figure 183. Du moment que, dans une machine bien conçue, r_a est très faible, il en sera de même de r_m , car elle exigera peu de spires régulatrices en série. Comme d'ailleurs la résistance r_d de la dérivation est relativement très élevée, le courant dans cette dérivation sera relativement faible, et il est, par suite, presque indifférent que la dérivation soit reliée aux balais ou bien aux bornes du circuit principal exté-

rieur. La figure 184 montre les connexions dans la disposition en longue dérivation.

Les calculs sont pratiquement identiques pour les deux cas, et ils impliquent le même genre de raisonnement. Celui qui s'applique à la longue dérivation est cependant un peu plus simple ; aussi le donnons-nous ci-dessous.

On a donc

$$E = \frac{n}{l} N \Phi ;$$

$$e = E - (r_a + r_m) i_a ;$$

et, comme le magnétisme dépend du nombre total des ampères-tours circulant autour des inducteurs, on peut écrire

$$\Phi = q (N_d i_d + N_s i_a) ;$$

q ayant la même signification que précédemment (p. 272), savoir :

$$q = \frac{4\pi}{10 \sum \frac{l}{\mu S}} ;$$

ou, plus exactement, étant le nombre variable qui représente, aux différents degrés d'aimantation, le rapport numérique entre Φ et le nombre total d'ampères-tours pour le circuit magnétique de la dynamo considérée. On l'obtiendra naturellement mieux en se reportant à un diagramme analogue à celui de la figure 105. Pour l'objet qui nous occupe, il est nécessaire de considérer (1) la valeur que prend q quand le courant extérieur est nul et que la seule excitation en jeu est celle due à la dérivation, soit $N_d i_d$ ampères-tours ; on peut la désigner par q_0 ; et (2) la valeur que prend q quand le courant dans l'induit atteint le maximum de débit que doit fournir la machine. Si l'on désigne ce courant par x , on pourra donner à cette valeur correspondante le symbole q_x . Or, comme le courant varie de 0 à x , les valeurs correspondantes de Φ varieront de

$$\Phi_0 = q_0 N_d i_d$$

à

$$\Phi_x = q_x (N_d i_d + N_s x).$$

Mais entre ces deux limites, que l'on peut appeler le champ dans l'étendue duquel la machine doit être rendue auto-régulatrice, q aura

des valeurs intermédiaires, et il faudra choisir l'une d'entre elles pour l'introduire dans la formule. La valeur $\frac{1}{2}(q_0 + q_x)$ ne sera pas éloignée d'une bonne moyenne. Désignons cette valeur moyenne par q_1 , dans les équations qui suivent. On aura alors, d'après les précédentes :

$$e = \frac{n}{t} Nq_1 N_d i_d + \frac{n}{t} Nq_1 N_s i_a - (r_a + r_m) i_a.$$

Or on a ici trois termes, dont le premier contient comme facteurs la vitesse (qui peut être maintenue constante) et le courant i_d dans la dérivation qui deviendra constant si e est lui-même rendu constant ; le second et le troisième termes contiennent tous deux le courant variable i_a . Les deux termes variables sont de signes contraires. Mais il est impossible que e soit une constante si deux de ses termes renferment une variable comme facteur, à moins que les coefficients de ce facteur variable soient tels que ces deux termes s'annulent réciproquement ; e ne peut être constant à moins que la vitesse $\frac{n}{t}$ ou les spires N_s , ou les deux ensemble, ne soient réglées de manière à satisfaire à cette condition. Ce réglage peut être obtenu et l'on peut même trouver, pour une valeur donnée de N_s , une valeur particulière $\frac{n_1}{t}$ de la vitesse telle que

$$\frac{n_1}{t} Nq_1 N_s = r_a + r_m. \quad [\text{XVI.}]$$

On a donc là une des deux équations de condition ; et alors, si la vitesse est donnée, le nombre critique de spires en série sera :

$$N_s = \frac{r_a + r_m}{\frac{n_1}{t}} \cdot \frac{1}{Nq_1} ;$$

ou, si N_s est fixé d'avance, on aura pour la vitesse critique :

$$\frac{n_1}{t} = \frac{r_a + r_m}{N_s} \cdot \frac{1}{Nq_1}.$$

Cette condition étant remplie, e sera constant et aura pour valeur :

$$e = \frac{n_1}{t} Nq_1 N_d i_d.$$

Cette équation laisserait cependant e indéterminé. Mais il est facile de voir que, malgré l'impossibilité de tirer de là la valeur de e , il y

aura néanmoins pour cette quantité une valeur déterminée, savoir celle que prendra e quand on ne demandera aucun courant à la dynamo et qu'elle tournera uniquement en circuit ouvert. Dans ces conditions, e aura pour valeur

$$e = \frac{n_1}{t} N \Phi_0 - (r_a + r_m) i_d,$$

ou, puisqu'ici q a la valeur q_0 ,

$$e = \frac{n_1}{t} N q_0 N_d i_d.$$

Mais $e = i_d r_d$, d'où l'on tire

$$\frac{n_1}{t} = \frac{r_d}{N_d} \cdot \frac{1}{N q_0}. \quad [\text{XVII.}]$$

En comparant cette valeur de $\frac{n_1}{t}$ avec celle obtenue d'après la première équation de condition, on trouve

$$\frac{r_d}{N_d q_0} = \frac{r_a + r_m}{N_s q_1},$$

d'où finalement, comme seconde équation de condition,

$$\frac{N_d}{N_s} = \frac{r_d}{r_a + r_m} \cdot \frac{q_1}{q_0}. \quad [\text{XVIII.}]$$

q_0 étant proportionnelle à la perméabilité μ_0 quand il n'y a pas de courant extérieur, et q_1 à la perméabilité moyenne μ_1 correspondant à la plage de fonctionnement entre le courant zéro et le courant maximum, il en résulte que, s'il n'y avait pas de modification dans la saturation, $\frac{q_1}{q_0}$ serait égal à 1.

Dans la première édition de cet ouvrage, où la théorie du compoundage était expressément basée sur l'hypothèse qu'il n'y avait pas de saturation, ou, en d'autres termes, que la perméabilité était constante, les formules obtenues étaient en conséquence incorrectes, il faut le reconnaître. Le Dr Frölich a trouvé pour une dynamo Siemens donnée, montée en série et en dérivation,

$$\frac{N_d}{N_s} = 17,7 \text{ tandis que } \frac{r_d}{r_a + r_m} = 61,9.$$

Il résulte clairement de là que μ_0 devait être environ 3,5 fois égal

à μ_1 ; en d'autres termes, cette machine manquait de fer dans son système inducteur ou dans son noyau d'induit, ou dans les deux à la fois. Cette dynamo devait avoir été mal conçue et avoir en même temps un faible rendement ; r_a aurait dû être non pas 61,9, mais au moins 300 fois égal à $r_a + r_m$.

On remarquera que, sauf l'action démagnétisante de l'induit, l'excitation à fournir par les spires en série est toujours proportionnelle aux résistances placées dans le circuit principal et comprises entre les points entre lesquels on veut obtenir la différence de potentiel constante ; ceci le rend possible dans le cas où les conducteurs allant de la dynamo aux lampes sont assez longs pour permettre de compounder la dynamo en ajoutant plus de spires en série, de manière à donner un potentiel constant, non pas à ses bornes, mais au point éloigné du circuit où doivent fonctionner les lampes. C'est là une circonstance très favorable dans tous les cas où les lampes sont loin de la machine, comme dans l'éclairage des mines à l'aide d'une machinerie placée à l'extérieur. En effet, en *surcompoundant* la machine, on peut arriver à une tension constante, non pas aux bornes de la dynamo, mais sur les conducteurs en un point déterminé au milieu du réseau. Le *surcompoundage* (ou *hyper-compoundage*) présente un autre avantage, c'est que, lorsqu'on met toute la charge sur la machine, le moteur, si bien réglé qu'il soit, se ralentit généralement un peu et tend à produire un nouvel abaissement du voltage.

Pour compenser l'action démagnétisante de l'induit, il est nécessaire d'ajouter des spires sur la bobine en série, comme nous l'avons expliqué plus haut, page 274. Pour compléter la série des formules ci-dessus, il faudrait donc remplacer N_s par $N_s - N_s'v$.

Montage des Bobines destinées au Compoundage.

Les bobines de compoundage peuvent être montées de différentes manières. Quand elles sont roulées sur le même noyau, les spires en dérivation sont quelquefois placées extérieurement aux spires en série ; la disposition inverse est moins souvent adoptée. Dans quelques machines Siemens les deux sortes de bobines sont roulées sur des carcasses distinctes, puis juxtaposées sur le même noyau. Dans d'autres cas où (comme dans les types Siemens courants) les pôles sont situés au milieu du noyau magnétique, l'une des branches du noyau peut por-

ter les bobines en dérivation, l'autre celles en série ; ou bien les deux bobines montées sur l'une des branches peuvent être les bobines en série et celles montées sur l'autre les bobines en dérivation. Dans les machines d'Elihu Thomson, les bobines en série sont roulées sur des carcasses recouvrant immédiatement l'induit. Dans certaines machines Siemens à circuit magnétique double, les bobines en série étaient roulées exclusivement sur les noyaux adjacents à l'angle de la pièce polaire qui, sans cela, aurait été affaiblie par la réaction de l'induit ; ce mode de montage avait pour résultat de corriger en partie la torsion du champ. — On doit toujours chercher à réduire le plus possible la résistance des bobines en série, en raison de ce qu'elles font partie du circuit principal ; par contre, la résistance additionnelle résultant de la nécessité de rouler le fil sur des bobines de plus grand diamètre n'est pas, en somme, un inconvénient pour une bobine en dérivation. — Dans la première édition de cet ouvrage, il était recommandé de mettre les bobines en série plus près des pôles que les bobines en dérivation. Grâce aux meilleurs circuits magnétiques aujourd'hui réalisés dans les dynamos, cette recommandation est maintenant sans objet. Avec un bon circuit magnétique dans la carcasse métallique, la position des bobines est à peu près indifférente.

Réalisation pratique du Compoundage.

Il résulte de ce qui précède qu'une machine compound tournant à circuit ouvert sans autre courant que celui qui circule dans la dérivation doit fournir à ses bornes la même différence de potentiel que la machine compoundée. De là le procédé pratique ci-après indiqué pour effectuer le compoundage. On fait tourner la machine à la vitesse exacte qu'imposent les considérations mécaniques, un voltmètre étant relié à ses bornes. Deux expériences sont nécessaires. A l'aide de bobines provisoires placées sur les noyaux inducteurs, roulées d'un nombre connu de spires et alimentées par des courants exactement mesurés, provenant d'accumulateurs ou d'une autre dynamo, on commence par déterminer le nombre d'ampères-tours suffisant pour exciter les inducteurs au degré voulu. Cette première opération permet de déterminer \mathcal{N}_d ; on sait en effet d'avance que r_d doit être égal au moins à 300 ou 400 fois (et même quelquefois jusqu'à 1 000 fois) r_a ; par suite, i_d est en réalité connu d'avance. On intercale ensuite dans le circuit principal une

résistance représentant la charge maximum en lampes, et, pendant que la machine tourne à sa vitesse de régime, on détermine, toujours à l'aide de bobines provisoires et d'accumulateurs, le nombre d'ampères-tours d'excitation nécessaires en tout quand la machine fonctionne à pleine charge. En retranchant de ce chiffre la valeur de $N_a i_a$ donnée par la première expérience, on obtient le nombre d'ampères-tours que doit fournir la bobine en série; et, comme le courant maximum est connu, N_s se trouve immédiatement déterminé. On emploie le même procédé pour le *surcompoundage*; il suffit d'augmenter l'excitation à pleine charge jusqu'à ce que le nombre de volts aux bornes atteigne le chiffre plus élevé destiné à compenser la chute de potentiel dans les conducteurs.

Projet de machine à Potentiel constant.

Il est évidemment de première importance que pour les machines de ce genre la partie fer soit étudiée (1) de telle sorte que la caractéristique soit aussi voisine que possible d'une droite dans la partie correspondant à la plage des courants pour lesquels on veut obtenir l'auto-régulation; (2) de telle sorte que celle-ci ne s'abaisse pas. Ces machines doivent en conséquence avoir juste assez de fer dans le circuit magnétique pour que le courant dû à la dérivation porte l'aimantation initiale au delà du coude de la courbe d'aimantation, et que les réactions dues aux courants d'induit soient faibles; il faut en d'autres termes qu'il n'y ait pas trop de cuivre sur l'induit et que les inducteurs soient relativement puissants. La résistance de l'induit doit être également, on le conçoit, maintenue aussi faible que possible.

Délai nécessaire au Compoundage.

Les machines qui possèdent des inducteurs très massifs ne peuvent satisfaire immédiatement, par une modification de leur magnétisme, à un brusque changement dans la demande de courant; les courants induits dans la masse du fer s'opposent aux changements de leur état magnétique et les retardent. Aussi, des machines dans ces conditions n'arrivent-elles pas à maintenir la tension constante, bien qu'elles soient montées en compound, parce qu'elles n'agissent pas assez vite. Pour un objet tel que la fourniture du courant à un tramway électrique, la meilleure génératrice est une dynamo surcompoundée à noyaux inducteurs *lamellés* ou *feuilletés*.

Caractéristique de la dynamo Compound.

Dans la théorie originale des machines à potentiel constant donnée par Marcel Deprez, le raisonnement était basé sur l'absence de saturation et sur la présence d'une aimantation initiale indépendante. Voici quel était le raisonnement de Deprez. S'il existe une excitation permanente de magnétisme, tout à fait indépendante de celle due aux bobines inductrices de la dynamo insérées dans le circuit principal, la caractéristique (fig. 185) ne partira pas du point O , mais d'un point quelconque situé au-dessus de l'origine et à une hauteur variable suivant la vitesse et l'intensité de l'aimantation indépendante. Soit P son point de départ.

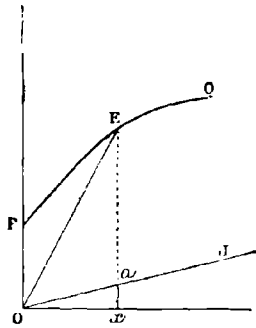


Fig. 185.

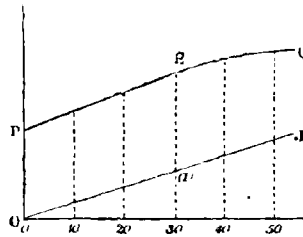


Fig. 186.

OP est la force électromotrice entre les bornes quand le circuit principal est ouvert ; mais il n'y a pas alors de courant extérieur, tant que le circuit n'est pas fermé ; aussi la caractéristique suit-elle sa marche ascensionnelle ordinaire de P à Q . Menons OJ sous l'inclinaison voulue pour qu'elle représente la résistance tant de l'induit que des électros en série. Considérons maintenant une ligne OE inclinée sous un angle tel que sa tangente soit équivalente à la résistance totale du circuit à un moment déterminé quelconque. Ox sera alors la force électromotrice totale à cet instant ; une portion égale à ax en sera employée à faire passer le courant Ox à travers la résistance de l'induit et des bobines en série ; et la portion restante Ea représentera la différence de potentiel aux bornes du circuit extérieur. Le problème se réduit dès lors à ceci : — quelles dispositions faut-il prendre pour que Ea ait toujours la même longueur, égale à OP , quelle que soit l'inclinaison de la ligne OE ? — La seule manière d'arriver à ce résultat est évidemment de régler la vitesse de la dynamo de telle sorte que la portion de courbe de P à Q soit paral-

lèle à O J. La vitesse étant ainsi exactement réglée, l'inclinaison de la caractéristique sera égale à celle de la ligne OJ, et, comme on le voit dans la figure 186, la différence de potentiel entre les bornes sera constante. On remarquera que ce résultat concorde avec les déductions auxquelles nous avons été conduits en traitant la question algébriquement, à savoir : que la vitesse critique est proportionnelle à la résistance intérieure, et que la différence constante de potentiel Ea est égale à celle produite par l'aimantation indépendante O P à la vitesse critique.

Il est à noter également que, si la partie considérée de la caractéristique n'est pas droite, c'est-à-dire si les noyaux des électro-aimants ne sont pas éloignés de leur point de saturation, la régulation ne peut pas être parfaite. Si la ligne P Q est courbe, la différence de potentiel pour des courants intenses ne sera pas égale à celle fournie par de faibles intensités. Si, en procédant pratiquement à l'enroulement des électro-aimants, on a établi les bobines de manière à amener e au nombre de volts voulu, tant en circuit ouvert (c'est-à-dire O P) qu'en un autre point (soit Q J), où la machine alimente son nombre maximum de lampes, on constatera généralement une différence de potentiel un peu plus élevée pour des nombres intermédiaires de lampes, en raison de la légère convexité de la courbe entre P et Q.

Le raisonnement précédent subsiste, que l'excitation indépendante soit due à une aimantation permanente ou à une combinaison de bobines d'excitation séparée (voir p. 55 et 56), ou encore à des bo-

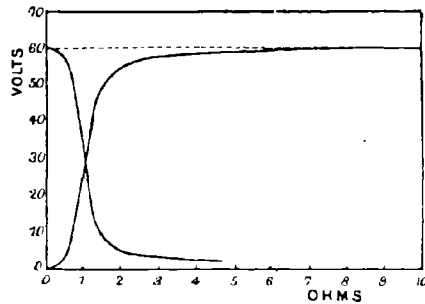


Fig. 187.

binés d'excitation en dérivation. Dans ce dernier cas, O P représente la différence de potentiel aux bornes due au circuit dérivé seul.

Le cas de la dynamo « compound » peut encore être envisagé à un autre point de vue. Nous avons donné page 254 deux courbes — qui ne

sont pas des caractéristiques, mais montrant la relation entre la différence de potentiel et la résistance extérieure pour une machine en série et pour une machine en dérivation. L'une de ces courbes part d'une certaine hauteur et s'abaisse quand la résistance a atteint une valeur déterminée ; l'autre suit une marche inverse : elle part d'en bas et s'élève dès que la résistance est arrivée à une certaine valeur. On conçoit que, si une dynamo est montée avec un double jeu d'électros en dérivation et d'électros en série fonctionnant chacun au même potentiel à la même vitesse et combinés de telle sorte que le nombre d'ohms correspondant à l'abaissement de l'une des courbes soit le même que celui qui correspond à l'élévation de l'autre, ce double enroulement qui constitue la machine « compound » aura pour effet de donner, comme l'indique la figure 187, une différence de potentiel constante. — Il nous reste à voir dans quelle mesure ce résultat est atteint dans la pratique.

Caractéristiques Externes des dynamos auto-régulatrices.

L'observation simultanée du courant extérieur i et de la différence de potentiel extérieure e permet de construire la caractéristique externe

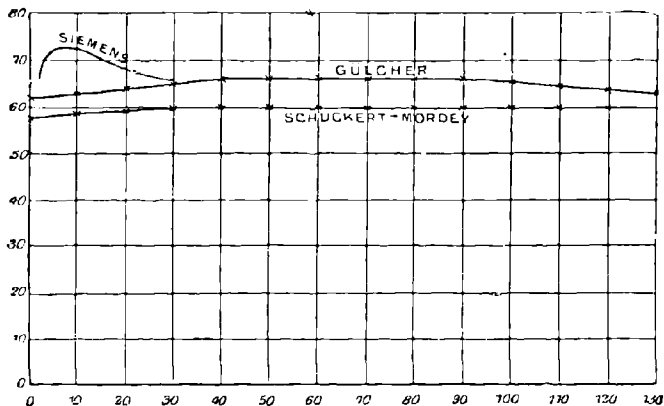


Fig. 188. — Caractéristiques externes de dynamos compound.

qui, dans une dynamo auto-régulatrice parfaite, serait une ligne horizontale. Les courbes données dans la figure 188 se réfèrent à une

dynamo Siemens ¹, à une dynamo « Victoria » Mordey ² et à une machine Gülcher qui seront décrites plus loin.

Si le nombre des spires régulatrices en série est trop faible, la caractéristique s'abaissera au fur et à mesure que le courant augmentera ; si ce nombre est trop élevé, la courbe montera doucement au début dans le voisinage de l'origine (voir fig. 188). Cette dernière condition n'est cependant pas toujours un inconvénient, attendu que, dans les machines actionnées par un moteur spécial, la marche se ralentit souvent, faute d'une bonne régulation, au fur et à mesure qu'on charge la machine davantage.

Observations d'Esson. — Un certain nombre d'observations publiées par M. W. B. Esson, dans l'*Electrician* de juin 1883, méritent considération au point de vue théorique récent. M. Esson se demande comment une machine compound montée de manière à être auto-régulatrice à une vitesse donnée fonctionne aussi bien à cet égard à une vitesse quelconque dans des limites très larges ? Pour expliquer cette particularité, il fait observer que dans aucune dynamo la quantité de fer ni sa qualité ne sont telles qu'on puisse négliger l'effet de la saturation. Si l'aimantation était rigoureusement proportionnelle aux ampères-tours d'excitation, il existerait réellement une vitesse critique. Mais la règle approchée $\frac{N_s}{N_d} = \frac{r_a + r_m}{r_d}$ donne pour les spires en série un nombre beaucoup trop bas ; en effet, quand les spires en dérivation ont déjà produit un certain degré d'aimantation, les spires en série ne peuvent plus apporter leur contingent proportionnel. Dans une machine en série (étudiée pour donner un courant de 20 ampères), la force électromotrice ajoutée à la machine par une variation du courant d'excitation passant de 5 à 10 ampères est bien supérieure à la force électromotrice supplémentaire résultant du passage du courant de 10 à 15 ampères. Il en est de même d'une machine (auto-régulatrice) de 100 volts, dans laquelle, par conséquent, la dérivation donne une excitation suffisante pour 100 volts en circuit ouvert, et munie de spires en série capables de fournir 60 volts aux bornes quand la dérivation est supprimée et qu'on la fait fonctionner à pleine charge. L'action excitatrice de la bobine en série diminue en même temps que l'excitation due à la dérivation augmente. Tous ces effets sont dus, naturellement, à ce que la perméabilité du fer de la machine diminue au fur et à mesure que le degré de saturation augmente. Il résulte de là qu'il doit exister une certaine relation entre la vitesse de la machine et le point auquel les inducteurs sont excités par la bobine en dérivation. Mais le magnétisme fourni par la bobine en dérivation dépend également de la vitesse et croît avec elle. Si donc, pour une allure, cette relation est telle qu'elle produise l'auto-régulation, la relation sera presque également vraie pour d'autres vitesses. Pour de grandes vitesses la valeur relative des

¹ Richter, *Elektrotechnische Zeitschrift*, avril 1833. — *L'Électricien*, V. 15 juin 1883.

² *Journal of the Society of Arts*, 7 mars 1884.

spires en série est moindre, et pour de faibles vitesses elle est plus élevée ; mais la somme des deux effets peut être constante. A des vitesses inférieures à la vitesse de régime, la différence de potentiel est plus basse pour une grande que pour une faible résistance dans le circuit. A des vitesses plus élevées que la vitesse normale, la différence de potentiel baisse au fur et à mesure que la résistance diminue. Des considérations qui précèdent, M. Esson déduit certaines données pratiques sur la manière d'améliorer la régulation d'une dynamo dont le potentiel s'élève suivant qu'on met plus ou moins de lampes en circuit.

Nous renvoyons les ingénieurs qui désireraient plus de détails sur l'enroulement compound des dynamos à une suite d'articles de M. Gisbert Kapp dans l'*Electrician* de 1883, ainsi qu'à deux articles de M. Esson dans l'*Electrician* de juin 1885. On consulera également avec fruit des articles de M. Hospitalier dans l'*Electricien* et de M. Uppenborn dans le *Centralblatt für Elektrotechnik*. Le lecteur devra lire avant tout la série d'articles publiés par le Dr Frölich dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* de 1885, ainsi qu'un travail encore plus remarquable du professeur Rücker paru dans le *Philosophical Magazine* de juin 1885. Des résumés de ces travaux ont été donnés dans les Appendices de la troisième édition anglaise de cet ouvrage. Les derniers travaux contributifs à l'étude de cette question sont ceux de C. Zickler, *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 264, 1887; de M. Baumgardt, *ib.*, X. 281, 1888; et du Dr Louis Bell, dans l'*Electrical World*, XVI. 383, 1891.

CHAPITRE XII

ENROULEMENT DES INDUITS. — THÉORIE DES CONNEXIONS

Ce chapitre est consacré à la théorie des modes de liaison et de disposition des conducteurs sur les induits des machines. On trouvera au Chapitre XIII des données d'atelier concernant les matériaux à employer et la construction proprement dite. Pour l'instant nous nous occuperons des importantes considérations préliminaires qui président à l'étude d'un projet de dynamo plutôt qu'à sa construction même.

On a vu, page 38, que, sauf dans le cas des machines pour lumière à arc, dont les induits sont ordinairement à « circuit ouvert », les dynamos à courant continu comportent des induits à « circuit fermé », c'est-à-dire des induits, soit en anneau, soit en tambour, soit en disque, dans lesquels le fil se referme sur lui-même, le courant se partageant suivant deux voies au moins qui se réunissent ensuite au moment où il quitte l'induit. Dans les machines bipolaires deux voies seulement sont en effet ouvertes au courant qui ne se partage qu'une seule fois. Mais dans les machines multipolaires il peut en exister soit deux, soit un plus grand nombre, impliquant une ou plusieurs bifurcations du courant. La force électromotrice de la machine dépendra naturellement du mode de connexion des conducteurs entre eux, c'est-à-dire du nombre plus ou moins grand de ces fils reliés en série. De là la nécessité de bien comprendre la théorie de l'enroulement de l'induit.

La bonne liaison des conducteurs sur un induit, en vue d'un résultat déterminé, est de la plus grande simplicité dans le cas d'un anneau pour machines à courant continu bipolaires ou multipolaires. La question est beaucoup moins facile à traiter en ce qui concerne les induits en tambour, et particulièrement ceux des machines multipolaires. On a souvent le choix entre plusieurs manières d'arriver au même résultat ; et, du fait que des méthodes, équivalentes au point de vue électrique,

peuvent différer géométriquement et mécaniquement, il est indispensable de traiter le sujet d'une façon systématique.

Dans le Chapitre III, pages 39 à 43, nous avons déjà examiné la structure élémentaire d'induits en anneau, en tambour et en disque. Ces éléments seraient suffisants en ce qui concerne de petits induits ne comportant qu'un petit nombre de spires de fil. Mais, quand on arrive à l'étude de projets de grandes machines, ou de machines dont l'enroulement doit faire face à des potentiels de 400 volts et plus, la question demande plus d'attention. — Supposons, par exemple, qu'on projette une machine à 4 pôles avec armature à barres comprenant 100 barres sur le pourtour de l'induit, toutes en une seule couche, et numérotées par conséquent de 1 à 100, et qu'on désire en effectuer les connexions terminales ; il faut qu'on puisse donner à l'ouvrier des instructions sur l'ordre dans lequel doivent être établies ces connexions. Doit-il relier l'extrémité antérieure ¹ de la barre n° 1 directement à la barre n° 50 ou à celle qui porte le n° 49 ? Ou bien doit-il se relier transversalement sur un quart de la périphérie, et, dans ce cas, faire sa connexion sur le n° 25 ou sur le n° 24, ou bien sur le n° 75 ou le n° 76 ? A quelle barre de retour doit-il relier l'extrémité postérieure de la barre ? Et quelles sont les barres à relier finalement au collecteur ?

L'objet de ce chapitre est précisément de renseigner à cet égard. On pourrait développer beaucoup ce sujet, mais la brièveté est essentielle dans le cadre de cet ouvrage. Ceux qui désireront l'approfondir davantage pourront consulter les travaux de Hering ², Arnoux ³, Fritsche ⁴, Weymouth ⁵, et Arnold ⁶, ainsi que diverses spécifications de brevets auxquelles nous référerons.

Comme nous l'avons fait remarquer ci-dessus, l'enroulement en anneau est en général assez facile à comprendre, à la condition qu'on saisisse bien la distinction entre un enroulement dextrorsum et un enroulement sinistrorsum. Aussi, laissant de côté, quant à présent, toute étude d'enroulement pour anneau multipolaire, passons-nous immédiatement à l'étude de l'enroulement en tambour.

¹ Par « extrémité antérieure » il faut comprendre celle qui se trouve du côté du collecteur ; c'est toujours de ce côté qu'il est le plus intéressant de considérer un induit.

² Hering : *Principles of Dynamo-Electric Machines*, New-York, 1891.

³ Arnoux : *L'Electricien*, XII. 737, 774, 827, 1888.

⁴ Fritsche : *Die Gleichstrom-Dynamomaschine*, Berlin, 1889.

⁵ Weymouth : *The Electrician*, XXV. 7 nov. au 19 déc. 1890.

⁶ Arnold : *Die Ankerwicklung der Dynamomaschinen*, Berlin, 1891.

Le premier point à établir est la différence entre un enroulement dextrorsum et un enroulement sinistrorsum. Dans le cas des induits en anneau, il n'y a aucun doute à avoir. La figure 189 représente une section d'anneau sur laquelle le sens des courants est indiqué de la même manière que dans les figures 61 à 63, pages 74-75. Si l'on passe circulairement de gauche à droite en avant et en montant de *a* à *b*, on

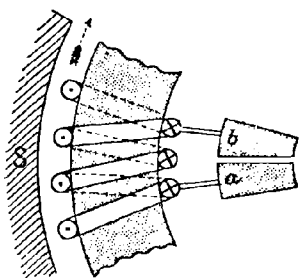


Fig. 189.

Bobinage dextrorsum d'un anneau.

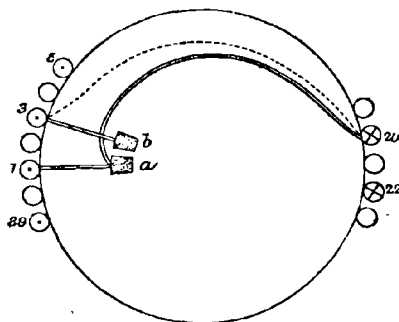


Fig. 190.

Bobinage dextrorsum d'un tambour.

décrit une hélice dextrorsum et le courant s'élève (comme nous l'avons expliqué page 62) vers le balai positif situé en haut. (Un bobinage sinistrorsum, tel que celui indiqué figure 31, page 36, donnerait le balai positif en bas, à moins que le sens de rotation ou les pôles de la dynamo ne fussent inversés.) Examinons maintenant la figure 190 qui représente un élément ou une section d'enroulement en tambour à 40 conducteurs extérieurs. En partant de *a* pour monter vers *b* et en prenant note du sens des courants dans les conducteurs, il est évident que *a* doit être relié, par une spirale de connexion oblique sur la face antérieure du tambour, à l'un des conducteurs descendants tel que le n° 20, pour revenir de là, par une autre spirale de connexion sur la face postérieure, à l'un des conducteurs ascendants, tel que le n° 3, où il rejoint *b*, en faisant ainsi un tour dextrorsum. Considérons maintenant les figures 205, 207 et 211, pages 306, 307 et 309. Elles représentent toutes des hélices sinistrorsum, dont la dernière comprend huit spires de fil par section. Notons en passant que, si la spirale de connexion d'arrière dans la figure 190, allant du n° 20 au n° 3, avait passé au-dessous de l'arbre, au lieu de passer par dessus, l'enroulement eût encore été dextrorsum.

Il y a maintenant à déterminer le nombre des conducteurs par-dessus lesquels doivent passer les spirales de connexion. Nous avons relié le n° 1 (par l'entremise de la touche *a*) au n° 20, pour le ramener de là

au n° 3. Existe-t-il une raison qui ait fait choisir le n° 20 plutôt que l'un des n° 21, 19 ou 18 ? Pour bien comprendre, il faut considérer en bloc la question de commutation dans les conducteurs, et se rappeler en même temps que l'enroulement offre au courant deux passages de balai à balai. Il s'agit d'un tambour à 40 conducteurs en une seule couche ; il y aura donc 20 touches au collecteur. Rappelons-nous que les forces électromotrices induites seront dirigées d'arrière en avant dans les conducteurs qui s'élèvent sur la gauche, et d'avant en arrière dans ceux qui descendent à droite. Il est naturel de penser que chaque conducteur devrait être relié à celui qui lui est diamétralement opposé. Dans ce cas le n° 1 serait relié au n° 21, le n° 2 au n° 22, et ainsi de suite ; mais on n'aboutira pas ainsi. Chaque conducteur sur un côté a besoin d'un conducteur de retour de l'autre côté. Les nombres pairs doivent ainsi être pris comme retours des nombres impairs. Par suite le n° 1 ne doit pas être relié au n° 21. Doit-il l'être au n° 20 ou au n° 22 ? ou bien encore au n° 18 ? Les n° 20 et 22 sont placés de chaque côté de celui diamétralement opposé au n° 1, et électriquement il est indifférent de choisir l'un ou l'autre. Si l'on doit faire à l'arrière une connexion passant au-dessus de l'arbre (comme dans la figure 190), il y a une légère économie de cuivre à choisir le n° 20. Si la connexion de

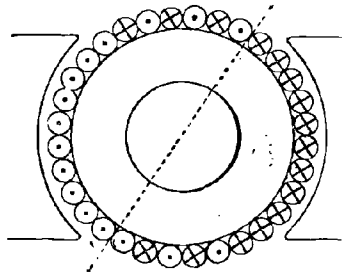


Fig. 191. — Résultat de liaisons suivant des cordes (au lieu de diamètres).

retour doit se faire par-dessous l'arbre, on peut à volonté prendre l'un ou l'autre. On économisera encore plus de cuivre en choisissant le n° 18 et passant par-dessus l'arbre, parce que les spirales de connexion seront plus courtes. Mais, en faisant ainsi les connexions suivant de petites cordes de la circonférence, au lieu de prendre la corde la plus voisine du diamètre, on risque de donner naissance à des forces contre-électromotrices dans les spires en série de balai à balai. D'un autre côté, comme l'a montré Swinburne, les connexions suivant de petites cordes présentent cet avantage que l'induit a une moindre action déma-

gnétisante. La figure 191 montre le résultat de liaisons suivant une corde sous-tendant l'arc embrassé par la pièce polaire ; on y voit que la bande de conducteurs démagnétisants entre les extrémités polaires est maintenant remplacée par une bande dans laquelle les courants circulent en sens contraires et se neutralisent ainsi mutuellement. Dans aucun cas la corde ne doit sous-tendre un angle inférieur à celui qui correspond à l'arc embrassé par les pièces polaires. Voici en conséquence la règle pour les connexions d'un induit en tambour à deux pôles seulement. Le nombre des conducteurs N étant pair, toute connexion d'avant doit passer diagonalement d'un conducteur quelconque à celui qui est $\frac{1}{2} N \pm 1$ (ou $\frac{1}{2} N \pm 3$ pour raccourcir la corde) plus en avant ; et la connexion d'arrière doit aboutir au conducteur voisin à un près. Dans le tableau que nous donnons ci-dessous pour l'enroulement les lettres A et P signifient *antérieures* et *postérieures*, et les lettres M et D *montant* et *descendant*, c'est-à-dire montant vers la face d'avant et s'en éloignant respectivement. En s'y reportant on voit qu'en partant du conducteur n° 1 on le suit *en descendant vers l'arrière*, où il est relié au n° 22, puis on le ramène *en montant vers l'avant*, où il se relie (après avoir pris contact, en passant, avec une touche du collecteur) au n° 3, d'où il va, en descendant, se relier à l'arrière au n° 24, et ainsi de suite. Le nombre des chevauchements est, dans tous les cas, de 21. Finalement on arrive au n° 20 d'où l'on revient, en montant, à l'avant pour se relier au n° 1 (par l'entremise de la dernière touche du collecteur).

TABEAU DE BOBINAGE. — TAMBOUR A 2 PÔLES. — 40 CONDUCTEURS

A	P	A	P	A	P	A	P	A
D	M	D	M	D	M	D	M	
1	22	3	24	5	26	7	28	
9	30	11	32	13	34	15	36	
17	38	19	40	21	2	23	4	
25	6	27	8	29	10	31	12	
33	14	35	16	37	18	39	20	

Si simple que paraisse la question au premier abord, le problème consistant à établir, diagonalement aux faces du tambour, les connexions

entre un conducteur et celui qui, à un ou à trois près, est le plus voisin de celui qui lui est diamétralement opposé, est loin de se présenter avec autant de simplicité quand on fait entrer en ligne de compte les difficultés mécaniques et électriques. Pour réduire la longueur des spirales de connexion et rendre ces connexions plus symétriques aux extrémités, on a parfois recours à la disposition indiquée par la figure 192 : — Les spirales sont divisées en deux bandes superposées, comme dans la figure 257, ce qui correspond comme résultat à une rotation d'un quart de tour environ virtuellement effectuée sur lui-même par le

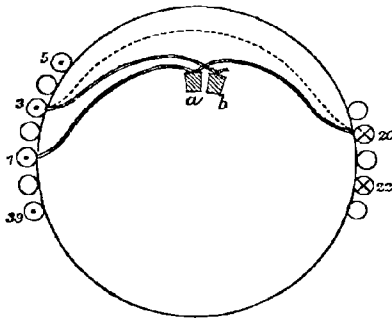


Fig. 192.

Bobinage de tambour avec jeu de spirales connectrices doubles.

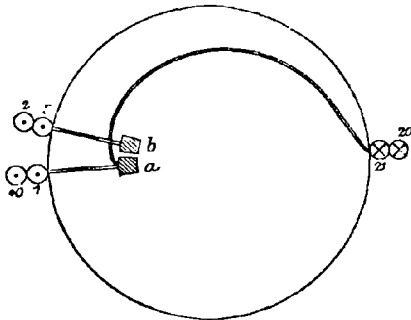


Fig. 193.

Bobinage de tambour en deux couches.

collecteur, de sorte que le balai positif se trouve à gauche au lieu d'être en haut. Cette disposition est adoptée entre autres dans les induits Edison-Hopkinson. Elle offre l'avantage de permettre de donner les mêmes dimensions aux spirales de connexion d'avant et d'arrière.

Si cependant les conducteurs sont roulés en deux couches superposées, les connexions peuvent se faire suivant un diamètre, le dernier tour étant ramené transversalement à son voisin dans la même couche. Les conducteurs de la couche extérieure remplissent alors l'office des éléments intermédiaires de la disposition en une seule couche. Dans la figure 193, l'extrémité du n° 1 est amenée en *a* ; de là le conducteur contourne l'arbre pour se rendre, par la connexion en spirale, au n° 21 où il est relié au n° 3 diagonalement à la base d'arrière, et ainsi de suite. La figure 194 montre les connexions de l'armature Edison-Hopkinson à 80 conducteurs souvent citée dans cet ouvrage, dans laquelle il y a en réalité deux couches de 40 fils chacune et un collecteur à 40 sections.

DIAGRAMMES D'ENROULEMENTS DÉVELOPPÉS

Si l'on essaye de dessiner toutes les connexions d'un enroulement en tambour, les lignes en se croisant donnent lieu à des confusions. Il y a

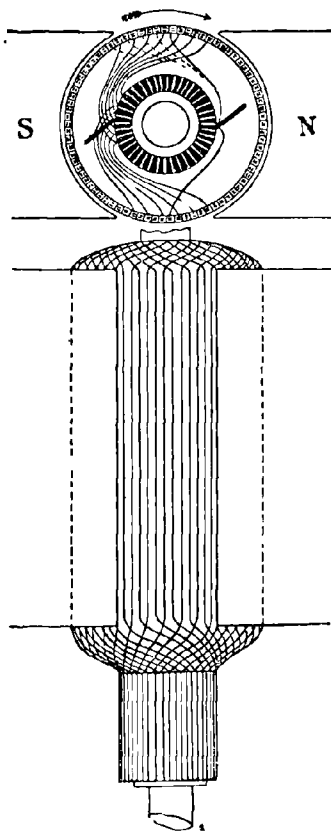


Fig. 194. — Bobinage en tambour de l'induit Edison-Hopkinson.

par suite grand avantage à adopter un mode de représentation originairement suggéré par Fritsche¹, de Berlin, et qui consiste à considérer l'enroulement d'induit complètement développé sur un plan. Etudions tout d'abord la figure 195 qui donne le schéma partiel d'une machine à 4 pôles dressée debout sur son axe. Le noyau, qui pourra être ultérieurement bobiné en anneau ou en tambour, est placé entre les quatre pôles de polarités alternées. Si l'on suppose une baguette de cuivre *a* parallèle à l'axe, représentant l'un des fils de l'induit, se mouvant de gauche à droite en passant dans

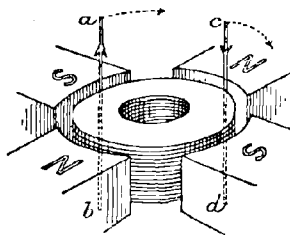


Fig. 195. — Schéma d'un champ magnétique à 4 pôles.

l'entrefer situé devant le pôle S, elle coupera les lignes de force qui pénètrent ce pôle. Conformément à la règle donnée page 21, elle sera le siège d'une force électromotrice ascendante. Dans un autre conducteur *c* passant devant le pôle N, il sera induit une force électromotrice descendante. Si l'on cherchait à reproduire dans un

¹ *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 649, 1887.

dessin analogue vingt conducteurs, ou davantage, avec leurs connexions respectives, ce dessin serait inintelligible. Il faut en conséquence se transporter au centre par la pensée, et se figurer développé à plat, comme dans la figure 196, le panorama des quatre pôles dont on est

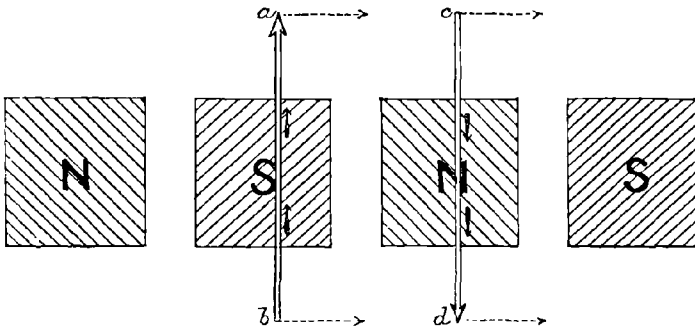


Fig. 196. — Développement d'un inducteur à 4 pôles.

entouré. On remarquera que les surfaces des pôles N et S sont hachées en sens inverse pour en faciliter la distinction⁴.

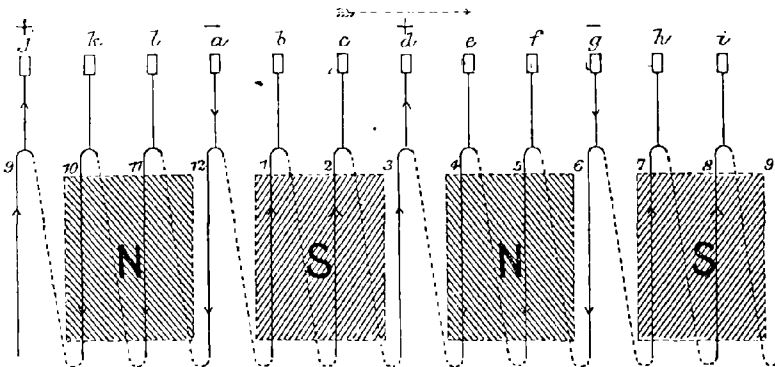


Fig. 197. — Développement d'un bobinage d'anneau de machine à 4 pôles.

Mais une machine réelle comporte un grand nombre de conducteurs d'induit symétriquement espacés sur sa périphérie et qui doivent être

⁴ Voici ce qui a déterminé le choix du sens de ces lignes obliques : — Si, au lieu de la ligne *ab* (représentant un conducteur), on place sur le dessin de la face polaire une feuille de papier dans laquelle on aura pratiqué une fente étroite, et qu'on la fasse mouvoir vers la droite, comme l'indiquent les flèches ponctuées, la fente, en passant sur les lignes obliques, donnera l'illusion d'un mouvement dans le sens où le courant tend réellement à s'écouler. Il est facile de se rappeler le sens de l'inclinaison des hachures : celles tracées sur une face polaire N sont inclinées parallèlement à la barre transversale de la lettre N.

groupés ensemble par des fils de connexion. Dans le cas des enroulements en anneau, les fils qui forment les conducteurs actifs dans l'entrefer passent par l'ouverture centrale de l'anneau où ils échappent au champ magnétique. Supposons, pour simplifier, qu'on ait un induit en anneau, formé de 12 spires seulement, avec 12 touches au collecteur ; si on l'ouvre par l'intérieur, on aura le développement indiqué par la figure 197 dans laquelle les lignes ponctuées sont les parties inactives des fils situées à l'intérieur de l'anneau. En suivant le tracé des flèches, on verra qu'il doit y avoir deux balais positifs et deux balais négatifs. La figure 198 donne un diagramme, vu de bout, du même enroulement,

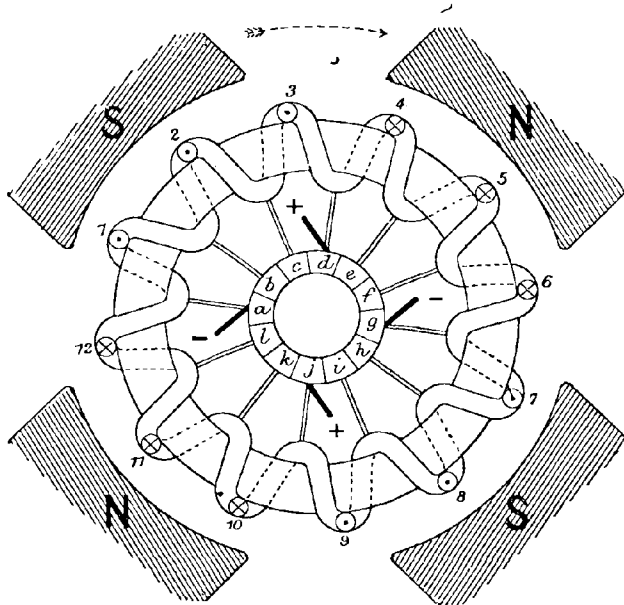


Fig. 198. — Bobinage d'anneau de machine à 4 pôles.
(Correspondant à la figure 197.)

ce qui permet de comparer les deux manières de présenter les faits. Il est évident que, dans ce cas, l'induit pourrait être employé comme organe double fournissant deux courants distincts ; mais ce serait un mauvais mode d'utilisation. On couple habituellement ensemble les deux balais positifs d'une part et les balais négatifs de l'autre. Une machine à 6 pôles exigerait, sans cela, six balais, et ainsi de suite. Le lecteur peut se reporter aux figures des machines de Berlin (fig. 357, Chap. XVIII) et à celles de la machine à anneau multipolaire d'Edison

(fig. 349, Chap. XVIII). Quand les balais de même signe sont ainsi reliés ensemble, la force électromotrice de l'induit total est simplement égale à celle d'un groupe quelconque de bobines d'un balai + au balai — adjacent. Dans cette machine à quatre pôles les bobines des quatre quadrants sont groupés en quatre circuits parallèles ; la résistance intérieure est égale au quart de la résistance totale que présenterait tout le fil de l'anneau.

Il existe, comme on le verra, un autre mode de connexion pour les bobines d'un anneau multipolaire : au lieu d'être groupés en parallèle, les quadrants sont reliés en série, de manière à donner deux circuits parallèles seulement. Ce mode de connexion est quelquefois désigné sous le nom d'enroulement en *série multipolaire* ; il serait plus exact de l'appeler *groupement en série*. Il n'exige que deux balais, puisqu'il n'existe que deux points neutres au collecteur, quel que soit le nombre des pôles autour de l'anneau.

Revenant à la méthode de développement et à la figure 197, nous sommes arrivés jusqu'ici à la solution du problème relatif à la connexion des fils convenables en faisant passer le fil de connexion par l'intérieur d'un noyau en anneau, ce qui constitue un *enroulement en hélice*. Si nous passons de là aux cas dans lesquels l'enroulement est tout à fait extérieur au noyau, comme pour les induits en tambour, ou à ceux qui ne comportent aucun noyau, comme les induits en disque, nous verrons qu'il est possible de procéder de deux manières différentes que l'on peut respectivement désigner sous les noms d'*enroulement* ou *bobinage imbriqué* et d'*enroulement* ou *bobinage ondulé*¹.

La distinction s'établit entre eux de la manière suivante. Comme les conducteurs qui passent devant un pôle nord deviennent le siège de forces électromotrices dans un sens, et que ceux passant devant un pôle sud sont le siège de forces électromotrices de sens contraire, il est évident qu'un conducteur faisant partie de l'un de ces groupes devra être relié à un conducteur situé dans une position à peu près correspondante dans l'autre groupe, de telle sorte que le courant puisse descendre dans l'un et monter dans l'autre, conformément aux sens des forces électromotrices. Or, si l'on jette les yeux sur la figure 199, on verra que, à l'arrière de l'induit (c'est-à-dire à l'extrémité opposée au collecteur), chaque conducteur se relie à un autre qui se trouve de cinq rangs en avance, — le n° 1 au n° 6, le n° 3 au n° 8 —, et qu'à

¹ En anglais : *Lap-winding* et *Wave-winding*. — En allemand : *Scheitel-wicklung* (Arnold) et *Wellen-wicklung* (Fritsche).

l'avant, le bobinage, après avoir formé un « élément » (comme par exemple $d-7-12-e$), en forme un second ($e-9-14-f$), qui che-

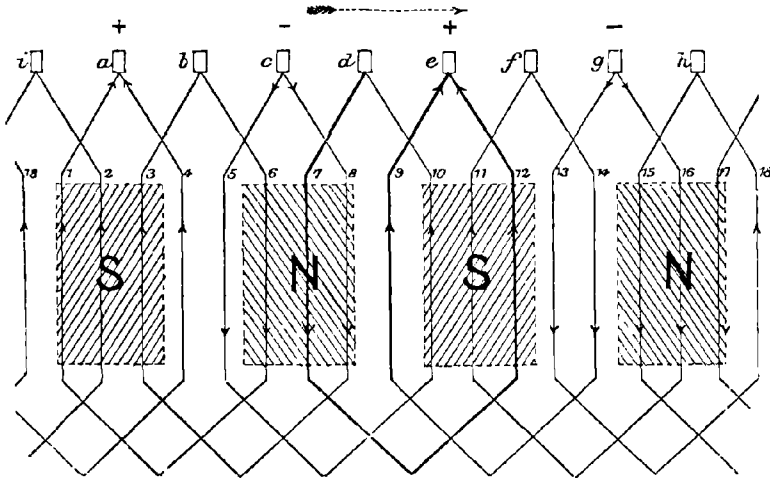


Fig. 199. — Type de bobinage imbriqué.

vauche sur le premier; et ainsi de suite sur toute la périphérie, jusqu'à ce que le bobinage se referme sur lui-même.

Comparons maintenant cette figure à la figure 200 dans laquelle, bien

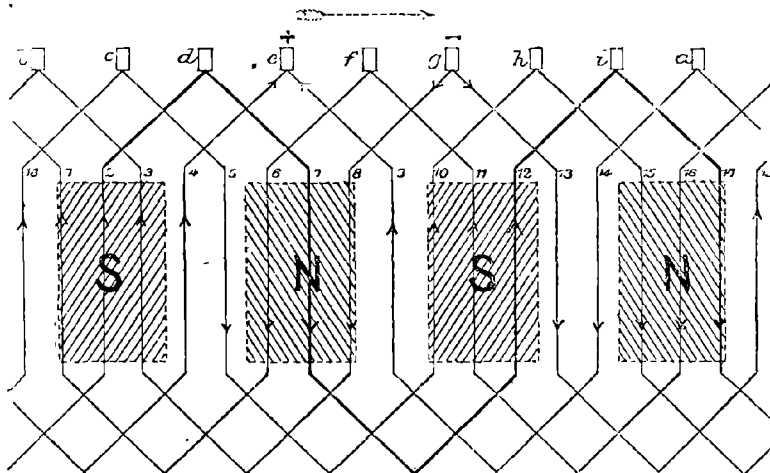


Fig. 200. — Type de bobinage ondulé.

que les connexions soient les mêmes à l'arrière, celles du côté du collecteur sont différentes. On verra que, quand le bobinage revient vers le collecteur, au lieu de chevaucher en arrière sur le côté d'où il est

parti, il se dirige dans l'autre sens. L'enroulement $d-7-12$ ne revient pas de suite vers e ; il continue vers i , d'où part un nouvel élément $i-17-4-e$, formant ainsi une sorte de zigzag ou de vague ; il est ondulé, au lieu d'imbriqué qu'il était tout à l'heure. Tels sont les deux enroulements en tambour, dont les tableaux suivants permettent de suivre les liaisons :

TABEAU DE BOBINAGE POUR LA FIG. 199
(ENROULEMENT IMBRIQUÉ)

	A	P	A	
+	a	1	6	b
	b	3	8	c
-	c	5	10	d
	d	7	12	e
+	e	9	14	f
	f	11	16	g
-	g	13	18	h
	h	15	2	i
	i	17	4	u

TABEAU DE BOBINAGE POUR LA FIG. 200
(ENROULEMENT ONDULÉ)

	A	P	A	
	a	1	6	f
	f	11	16	b
-	b	3	8	g
	g	13	18	c
	c	5	10	h
	h	15	2	d
	d	7	12	i
	i	17	4	e
+	e	9	14	a

On remarquera en passant que, avec ce nombre particulier de conducteurs (18), tandis que le bobinage imbriqué aboutit à quatre circuits parallèles de sections exigeant quatre balais, le bobinage ondulé se

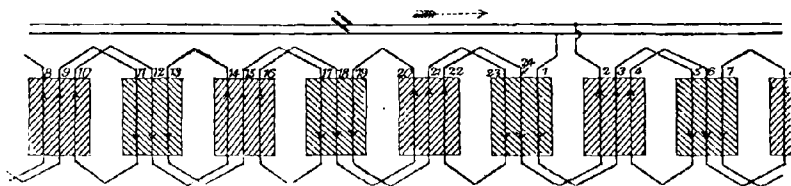


Fig. 201. — Machine à courants alternatifs : Bobinage imbriqué.

résume en deux circuits parallèles pour lesquels il suffit de deux balais.

Avant de poursuivre l'étude d'autres enroulements en tambour, il est bon de noter que la même distinction entre les bobinages imbriqués et les bobinages ondulés s'applique aux machines à courants alternatifs. Ces machines sont généralement multipolaires. La figure 201 se rapporte à un alternateur à 8 pôles à bobinage imbriqué, dont chaque « élément », « section » ou groupe de spires s'étend sur la même largeur que la distance de centre à centre de deux pôles adjacents. On n'a des-

siné que 24 conducteurs, et l'on remarquera que les bobines successives sont alternativement dextrorsum et sinistrorsum. Dans la figure 202 on

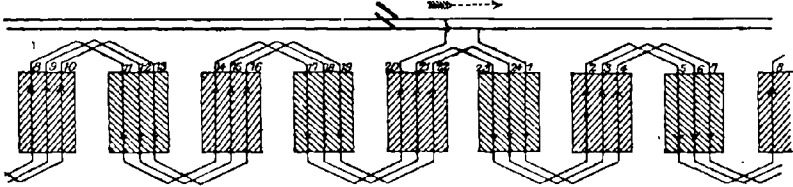


Fig. 202. — Machine à courants alternatifs : Bobinage ondulé.

voit le même alternateur avec bobinage ondulé. La force électromotrice de ces deux machines serait exactement la même; le choix entre les deux modes de liaison est ici une simple question de convenance

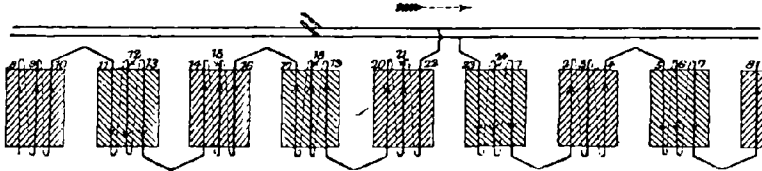


Fig. 203. — Machine à courants alternatifs : Bobinage en anneau.

comme construction et prix de revient, au point de vue mécanique. La figure 203 donne le développement d'un bobinage d'anneau pour courants alternatifs. Il implique également un champ magnétique à 8 pôles et sera utilement comparé aux données des figures 201 et 202.

FORMULES DE BOBINAGE POUR INDUITS A CIRCUIT FERMÉ

Hopkinson et Arnold ont donné des formules générales de liaisons, principalement applicables aux bobinages en tambour. Nous suivrons en principe celles d'Arnold. Soit N le nombre de conducteurs disposés à la périphérie du noyau d'induit. Soit n_p le nombre de paires de pôles, de sorte que, dans le cas actuel, le nombre des pôles est de $2n_p$. Soient b le nombre de conducteurs actifs dans un « élément » ou « section » quelconque du bobinage, c le nombre des sections et n_c le nombre des touches du collecteur. Naturellement, dans les bobinages en anneau, b est le nombre de spires par section. Soit y l'espacement numérique dont on avance d'une section à l'autre en reliant les conducteurs (si, par exemple, la section n° 8 est reliée à la section n° 15, $y = 7$). Ce nombre

y représentant le nombre de sections par-dessus lesquelles on passe peut être désigné sous le nom d' « *espacement* ». Il devra toujours être un nombre premier par rapport à c ; autrement le bobinage ne rentrerait pas sur lui-même en un circuit fermé. Si c et y ont un diviseur commun (comme, par exemple, $c = 36$, $y = 27$, nombres pour lesquels 3 est le plus petit commun diviseur), il y aura autant de circuits *indépendants*.

Des circuits indépendants de ce genre ont été employés par Weston et par MM. Siemens frères. Les induits ainsi bobinés exigent des balais épais couvrant au moins deux touches du collecteur.

Les formules d'Arnold qui relient entre elles ces quantités sont :

$$y = \frac{1}{n_p} \left(\frac{N}{b} \mp a \right) ;$$

$$N = b (n_p y \pm a) ;$$

dans lesquelles a est un certain nombre entier (souvent = 1), de la valeur duquel dépend le nombre de bifurcations du courant à travers les groupes de bobines parallèles l'un à l'autre. Le nombre de points neutres sur le collecteur sera toujours = $2 a$. Dans l'application de ces formules on a plusieurs cas à considérer : —

(I). **Groupement en parallèle.** — Comme on l'a vu pour le cas d'un anneau ordinaire dans un champ à 4 pôles, il y aura 4 groupes de $\frac{N}{4}$ bobines chacun en parallèle l'un avec l'autre. Dans un champ à 2 pôles, il y a 2 groupes de $\frac{N}{2}$ bobines chacun. Dans un champ à 12 pôles, on aurait en parallèle 12 groupes de $\frac{N}{12}$ bobines chacun. Ainsi qu'on l'a vu précédemment, dans le cas d'un anneau à 4 pôles à bobinage en hélice, chaque paire de groupes de ce genre peut être considérée comme formant un induit distinct à 2 pôles. Il en est de même pour les induits en tambour à bobinage imbriqué, mais non pour ceux à bobinage ondulé. Voici les constantes pour les deux cas : —

(a). *Bobinage hélicoïdal* ou *imbriqué*. — Faire dans la formule $n_p = 1$ et $a = 1$, et l'appliquer à un jeu de conducteurs placés entre deux pôles de même nom.

(b). *Bobinage ondulé*. — Faire $a = n_p$, c'est-à-dire qu'il doit y avoir autant de bifurcations du courant que de paires de pôles. Dans une

machine à 6 pôles $n_p = 3$, et le courant se bifurquera en trois points (les trois balais négatifs), pour se rendre par six trajets parallèles aux trois balais positifs (ou aux connexions transversales qui conduisent à ces trois balais).

(II). **Groupement en série.** — Dans ce cas, puisque le courant ne se bifurque qu'une seule fois, $a = 1$, quel que soit le mode de bobinage. Pour les machines bipolaires le groupement en série et le groupement en parallèle sont identiques : il y a 2 groupes de bobines en parallèle l'un avec l'autre, et le bobinage peut être soit ondulé, soit imbriqué ; ou, comme on le verra, on peut employer un bobinage hélicoïdal pour les machines à anneau. Il en est de même pour les machines à 4 pôles. Pour celles à plus de 4 pôles les seuls modes possibles de groupement en série sont des bobinages ondulés.

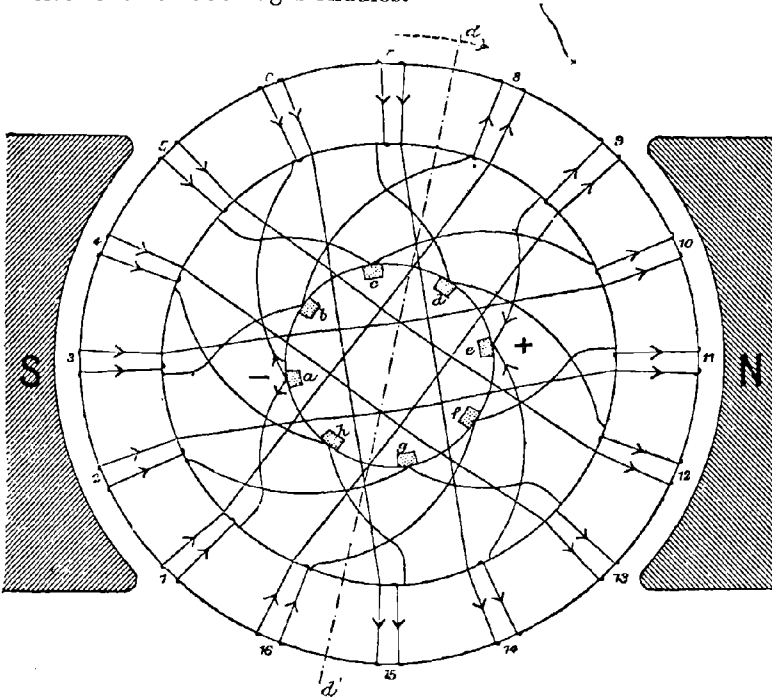


Fig. 204. — Bobinage d'anneau avec bobines opposées reliées en série.

(III). **Groupements mixtes.** — Il existe plusieurs modes possibles de bobinages mixtes, imbriqués et ondulés, correspondant aux cas où l'on a $a > 1$ ou $a \leq n_p$.

Comme vérification de ces formules on peut prendre les exemples suivants :

Dans l'enroulement en anneau (fig. 34, p. 38), $N = 32$; $n_p = 1$; $b = 4$; $c = 8$; $n_c = 8$. D'où $y = 7$ ou 9. Mais l'anneau n'a que huit sections dont, par suite, la septième et la neuvième, à partir d'une section donnée quelconque, sont celles entre lesquelles se trouve située la section considérée.

Dans l'enroulement en tambour (fig. 70, p. 86), $N = 32$; $n_p = 1$; $b = 2$ (parce que chaque « élément » de l'enroulement, de touche à touche du collecteur, renferme deux conducteurs actifs); $c = 16$; $n_c = 16$. D'où $y = 15$ ou 17. On peut considérer le premier nombre comme se rapportant à la couche antérieure des connexions (n° 1 à n° 16), le second comme se rapportant à la couche de dessous (n° 2 à n° 19).

On en trouve un autre exemple dans un enroulement spécial en anneau employé par Wodicka (fig. 204), dans lequel chaque section est reliée en série avec une autre située du côté opposé, de sorte que le nombre des touches du collecteur est moitié de celui des sections. Ici chaque « élément » de l'enroulement se compose de deux sections contenant chacune des conducteurs actifs; d'où $b = 4$; $N = 32$; $c = 16$; $n_p = 1$; ce qui donne $y = 9$ ou 7.

ENROULEMENTS EN TAMBOUR

Tambours bipolaires. — La figure 205 donne le dessin d'un enrou-

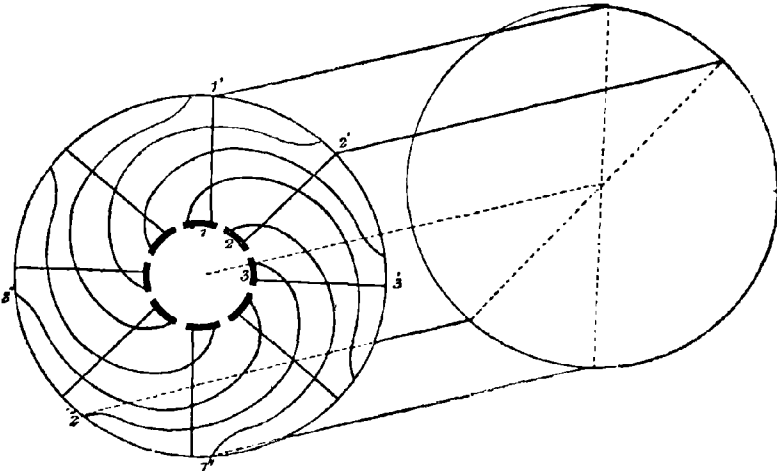


Fig. 205. — Connexions du bobinage Siemens (von Hefner-Alteneck).

lement en tambour appliqué à un induit à 8 bobines. Comme dans tous les anciens induits Siemens en tambour, l'enroulement est fait en deux couches, chaque section étant bobinée diamétralement. Ainsi, en partant

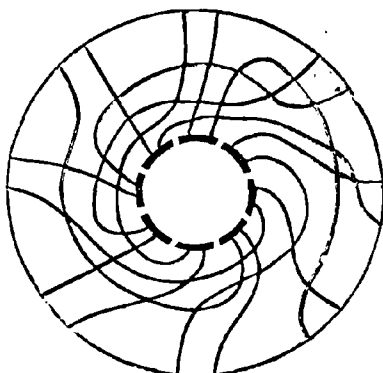


Fig. 206. — Connexions de l'ancien bobinage Siemens.

de la touche du collecteur marquée 1 on passe extérieurement à 1', puis on longe l'armature dont on franchit la base d'arrière diamétralement

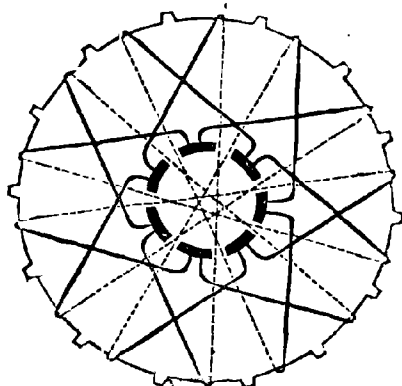


Fig. 207. — Connexions du bobinage Edison.

pour revenir en 1", et (après avoir bobiné un nombre de spires suffisant pour former une section) on relie le fil, par une connexion en spirale, à la touche 2 du collecteur. Dans la spécification du brevet Siemens original, les connexions terminales n'étaient pas symétriques, comme l'indique la figure 206. On voit dans la figure 207 la variété Edison de l'enroulement Siemens. Le diagramme ne représente qu'un cas simple avec collecteur à 7 touches. Ici $N = 14$; $b = 2$; et, suivant la formule, y devrait être égal à 6; mais la valeur réelle de l'espacement est 7

à l'arrière et 5 à l'avant, comme on le verra. Avec un nombre impair de sections la commutation ne s'effectue pas simultanément (dans les machines bipolaires) aux deux balais, mais bien alternativement.

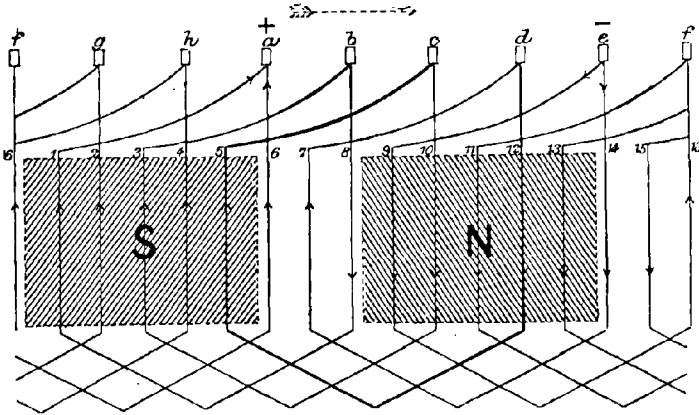


Fig. 208.

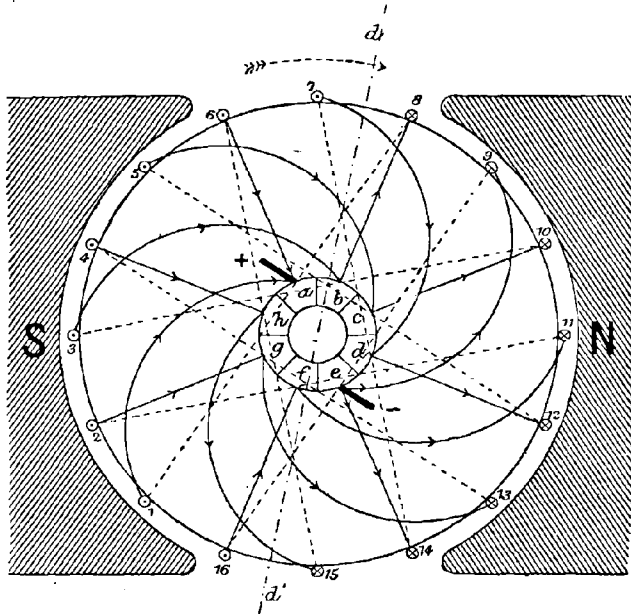


Fig. 209.

Fig. 208 et 209. — Développement et vue de bout d'un bobinage dextrorsum imbriqué de Siemens.

Une étude plus approfondie de l'enroulement en tambour est néces-

saire ; aussi donnons-nous ici une série de diagrammes d'enroulement qui en montreront plusieurs variétés.

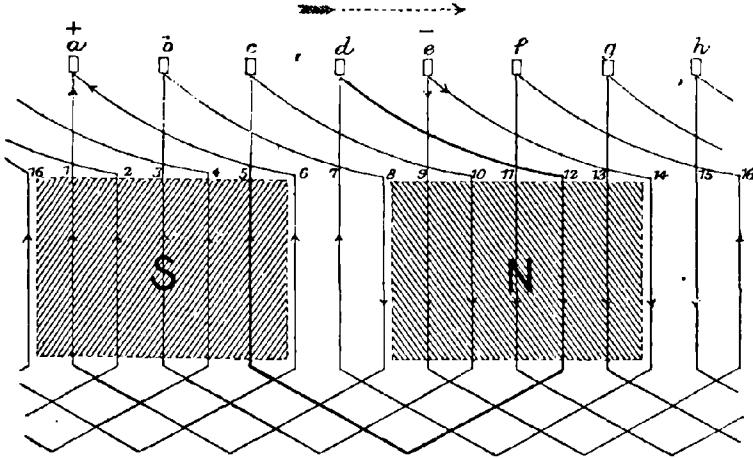


Fig. 210.

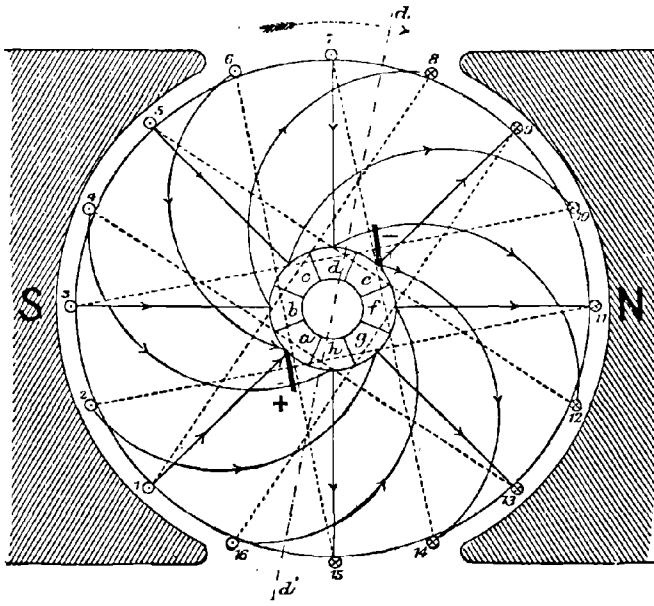


Fig. 211.

Fig. 210 et 211. — Développement et vue de bout d'un bobinage sinistrorsum imbriqué de Siemens.

Les figures 208 et 209 représentent un enroulement dextrorsum sur

le type de Siemens pour un collecteur à 8 touches et une seule spire par section, c'est-à-dire avec 16 conducteurs distribués sur la périphérie. Les pièces de connexion à la partie antérieure comportent des connexions droites (telles que *a 6*) et des connexions en spirales (telles que *a 1*), qui croisent les précédentes (soit en dessous, soit en dessus). Les pièces de connexion à l'arrière ne sont indiquées que par les lignes ponctuées transversales. Dans le diagramme développé, on voit que chaque élément de l'enroulement est analogue à *c-5-12-d*, et que le bobinage est imbriqué. Les connexions d'arrière sont espacées sur 7 conducteurs, ce qui correspond exactement, à un près, au nombre $\frac{N}{2}$ sur la demi-circonférence; les connexions antérieures ne sont, au contraire, espacées que de 5 en 5, c'est-à-dire à 3 près du nombre des conducteurs appartenant à la demi-circonférence. Il est à remarquer en outre que, avec ce bobinage dextrorsum, tournant dextrorsum dans un champ magnétique dextrorsum, le balai + est dans le voisinage de la partie supérieure du collecteur.

Les figures 210 et 211 représentent le même enroulement, à cela près que le bobinage est sinistrorsum, ce qui a dès lors pour résultat de placer le balai + vers le bas du collecteur.

Le tableau du bobinage est le même pour les deux cas; il est donné ci-dessous :

	A	P	A
+ <i>a</i>	1	8	<i>b</i>
<i>b</i>	3	10	<i>c</i>
<i>c</i>	5	12	<i>d</i>
<i>d</i>	7	14	<i>e</i>
- <i>e</i>	9	16	<i>f</i>
<i>f</i>	11	2	<i>g</i>
<i>g</i>	13	4	<i>h</i>
<i>h</i>	15	6	<i>a</i>

Mais dans le bobinage dextrorsum les connexions en spirales, telles que celle de *a* à 1, vont vers la gauche, tandis qu'elles se dirigent vers la droite dans le cas du bobinage sinistrorsum.

Sur les figures 208 et 210 (développements), on voit que pour ces deux enroulements l'« élément » du bobinage, indiqué par les traits forts, est dissymétrique sur la face d'avant du tambour, ce qui est dû à l'emploi de deux sortes de connexions à l'avant, l'une droite, l'autre en spirale. La touche *a* du collecteur est reliée aux extrémités anté-

rieures des conducteurs n° 1 et n° 6. Dans le premier cas, elle est figu-

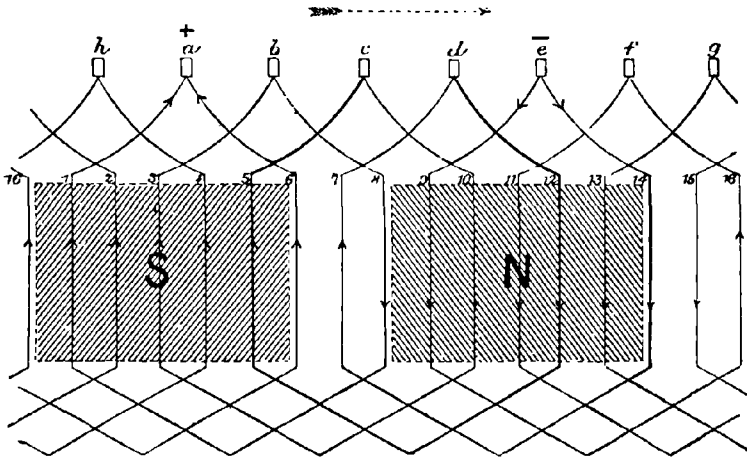


Fig. 212.

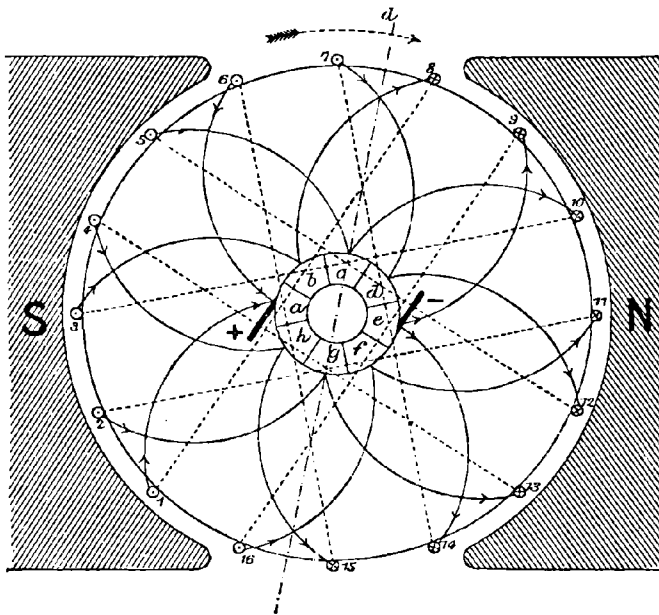


Fig. 213.

Fig. 212 et 213. — Développement et vue de bout d'un bobinage imbriqué symétrique à deux pôles.

rée en avant comme opposée au n° 6 ; dans le second, comme opposée

en arrière au n° 1. Pourquoi ne la mettrait-on pas symétriquement entre eux ?

Les figures 212 et 213 représentent un bobinage imbriqué symétrique, équivalent exactement aux précédents au point de vue électrique, et ayant le même tableau de bobinage. Il offre deux avantages : d'abord (pour les induits terminés) les connexions sur la face antérieure sont maintenant toutes du même type et formées de deux jeux de courtes spirales ; ensuite les balais se trouvent maintenant sur un diamètre horizontal où ils sont plus facilement accessibles. Les connexions d'arrière restent absolument les mêmes que précédemment et sous-tendent une corde plus longue que les connexions antérieures.

Pour assurer la parfaite symétrie dans le bobinage, il faudrait égaliser les connexions d'arrière et d'avant. L'espacement théoriquement convenable est $y = 7$ ou $y = 9$. Pour atteindre ce but, il suffit de relier le n° 1 au n° 8 sur l'une des extrémités du tambour, et au n° 10 sur l'autre. On en voit le résultat sur les figures 214 et 215, d'où il appert immédiatement que l'on est passé d'un bobinage imbriqué à un bobinage ondulé, chaque élément faisant le tour du tambour et ne revenant qu'à la lame du collecteur voisine de celle d'où il est parti. Voici le tableau de bobinage dans ce cas :

	A	P	A
+ a	16	9	b
b	2	11	c
c	4	13	d
d	6	15	e
- e	8	1	f
f	10	3	g
g	12	5	h
h	14	7	a

Électriquement cet enroulement est tout à fait équivalent aux trois précédents. Les connexions en spirales à l'arrière marchent par paires, comme celles d'avant se réunissent par paires au collecteur.

Un enroulement à deux couches pour 24 conducteurs, avec son développement, est donné par les figures 216 et 217. On voit qu'une couche entière se trouve bobinée quand la moitié de l'enroulement, de a à g, est effectuée.

Tambours multipolaires. — Comme on le verra ci-après, page 323,

le bobinage des induits multipolaires avec groupement en série a été

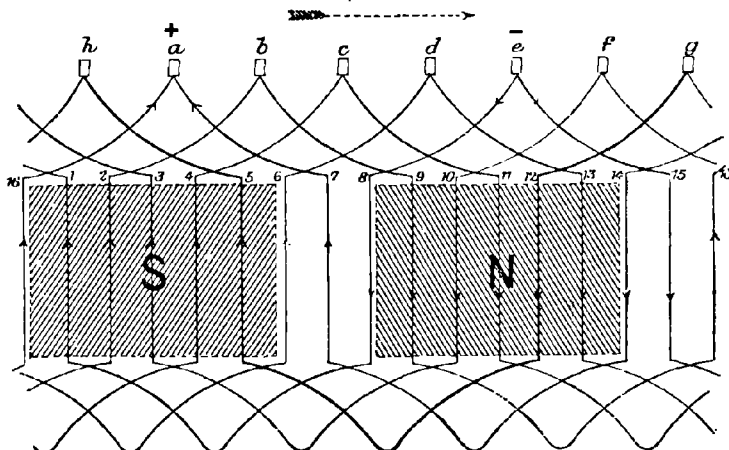


Fig. 214.

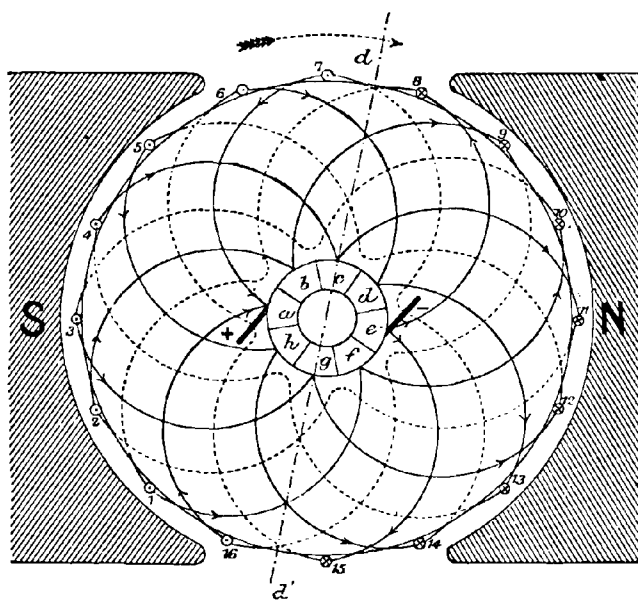


Fig. 215

Fig. 214 et 215. — Développement et vue de bout d'un bobinage ondulé symétrique à deux pôles.

imaginé par le professeur Perry¹. Il a été appliqué à l'enroulement en

¹ Brevet anglais, 3036 de 1882.

tambour par MM. Paris et Scott¹, et par M. Kapp. Dans le cas des

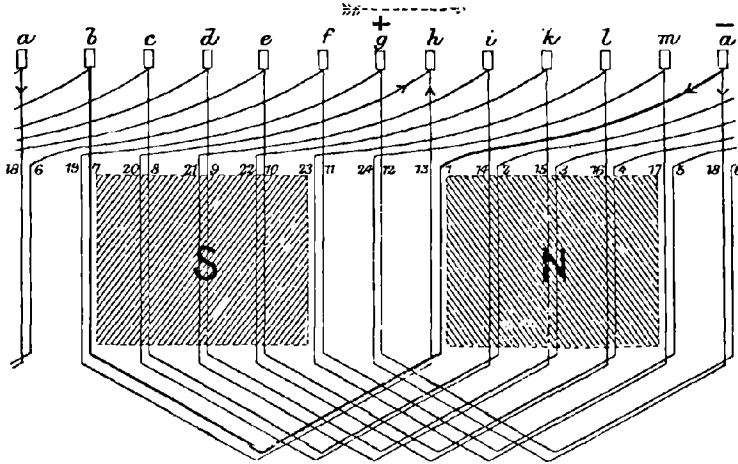


Fig. 216.

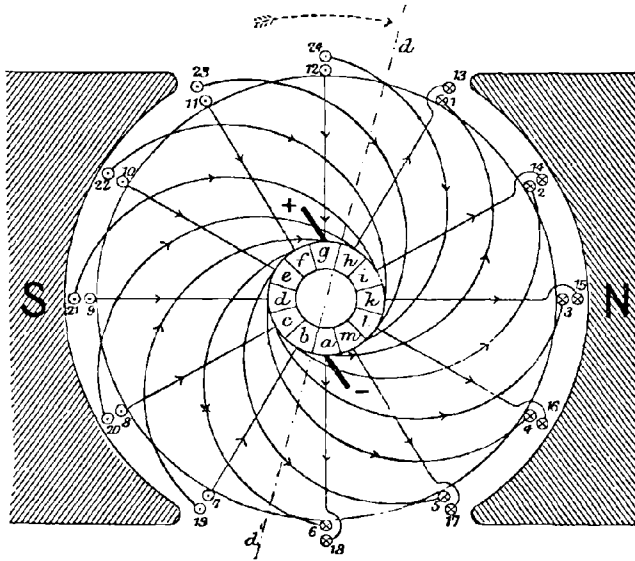


Fig. 217.

Fig. 216 et 217. — Développement et vue de bout d'un hobinage de tambour à deux couches.

machines multipolaires, l'algèbre n'est pas nécessaire pour formuler

¹ Brevet anglais, 4683 de 1884.

la règle. On peut dire que, si l'on veut effectuer un groupement en

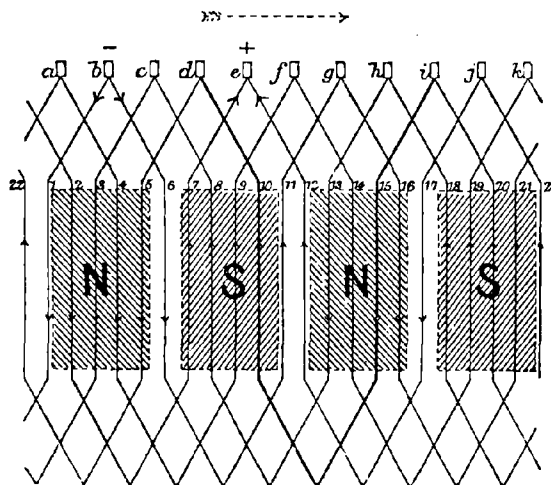


Fig. 218.

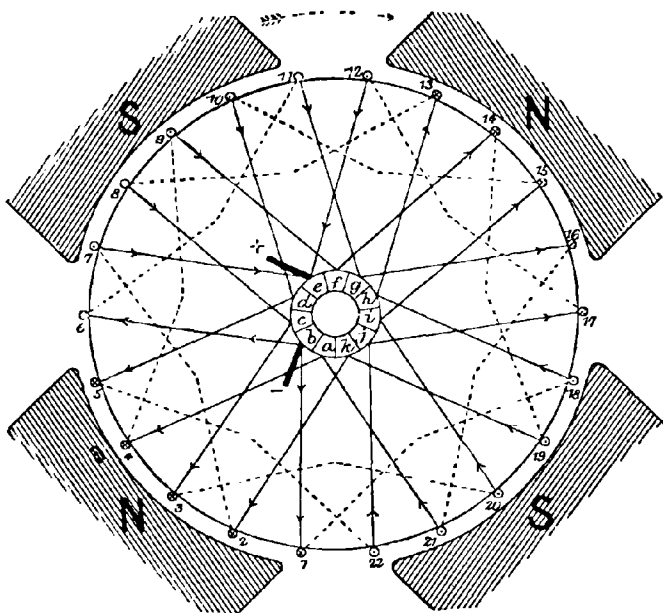


Fig. 219.

Fig. 218 et 219. — Développement et vue de bout d'un bobinage de tambour multipolaire : groupement en série.

série (de manière à obtenir un haut voltage), y doit être un nombre impair et le nombre total de conducteurs doit être égal à y fois le nombre total des pôles, plus ou moins deux. Par exemple, pour un tambour à 6 pôles, si l'on prend 15 pour valeur de y , le nombre des conducteurs devra être de 88 ou de 92 ; mais non de 90. Nous donnons ci-dessous un tableau de bobinage calculé par M. Kapp pour une machine à 8 pôles ayant un espacement de $y = 25$.

TABEAU DE BOBINAGE POUR UN INDUIT EN TAMBOUR A 8 PÔLES; 202 CONDUCTEURS; GROUPEMENT EN SÉRIE; BALAIS (\pm) A 135° L'UN DE L'AUTRE

A	P	A	P	A	P	A	P	A
D	M	D	M	D	M	D	M	D
202	23	50	75	100	123	150	175	
200	23	48	73	98	123	148	173	
198	21	46	71	96	121	146	171	
196	19	44	69	94	119	144	169	
194	17	42	67	92	117	142	167	
192	15	40	65	90	115	140	165	
190	13	38	63	88	113	138	163	
188	11	36	61	86	111	136	161	
186	9	34	59	84	109	134	159	
184	7	32	57	82	107	132	157	
182	5	30	55	80	105	130	155	
180	3	28	53	78	103	128	153	
178	1	26	51	76	101	126	151	
176	201	24	49	74	99	124	149	
174	199	22	47	72	97	122	147	
172	197	20	45	70	95	120	145	
170	195	18	43	68	93	118	143	
168	193	16	41	66	91	116	141	
166	191	14	39	64	89	114	139	
164	189	12	37	62	87	112	137	
162	187	10	35	60	85	110	135	
160	185	8	33	58	83	108	133	
158	183	6	31	56	81	106	131	
156	181	4	29	54	79	104	129	
154	179	2	27	52	77	102	127	
152	177	202						

On remarquera en passant que, dans les machines multipolaires, si le nombre des sections est un multiple exact, pair ou impair, de n_p , le groupement sera en parallèle ; et, si c'est un multiple impair, la commutation ne s'effectuera pas simultanément à tous les balais, mais

alternativement à tous les balais + et à tous les balais —, exactement comme dans le cas d'une machine bipolaire, où la commutation est alternative quand l'enroulement comporte un nombre impair de sections.

Les figures 218 et 219 donnent les connexions pour le bobinage d'un induit à 4 pôles à 22 conducteurs ; ici $y = 5$. En voici le tableau de bobinage :

A		P		A		P		A	
D		M		D		M			
1		18		13		8			
3		20		15		10			
5		22		17		12 +			
+ 7		2		19		14			
9		4		21		16			
11		6		1					

Les figures 220 et 221 représentent un bobinage imbriqué employé par Thury (voir fig. 374, Chap. XVIII) dans le cas d'un tambour à 4 pôles. Le bobinage est imbriqué pour groupement en parallèle avec espacement à l'arrière juste égal à l'écartement des pôles et espacement encore moindre en avant. C'est une forme de bobinage en polygone étoilé destiné à maintenir les conducteurs à des potentiels très différents par rapport à ceux sur lesquels ils chevauchent ; il permet une très bonne isolation parce que les diverses sections peuvent être bobinées sur des formes séparées avant d'être appliquées sur le noyau.

On voit sur les figures 222 et 223 deux enroulements plus complexes dus à Alioth¹. Dans la figure 222, qui s'applique à un groupement en parallèle, le courant entrant par le balai négatif se bifurque deux fois, quatre trajets s'offrant à lui à travers les spires ; deux bobines sont mises alternativement en court-circuit aux balais + et —. Dans la figure 223 les connexions sont modifiées de manière à ne donner qu'une seule bifurcation, et par suite deux groupes seulement de spires.

Fritsche² a proposé un mode d'enroulement en tambour dans lequel

¹ Voir *Electrician*, XXIV. 140, 13 décembre 1889, article de A. T. Snell.

² *Op. cit.*

les conducteurs sont tous disposés obliquement sur la surface du

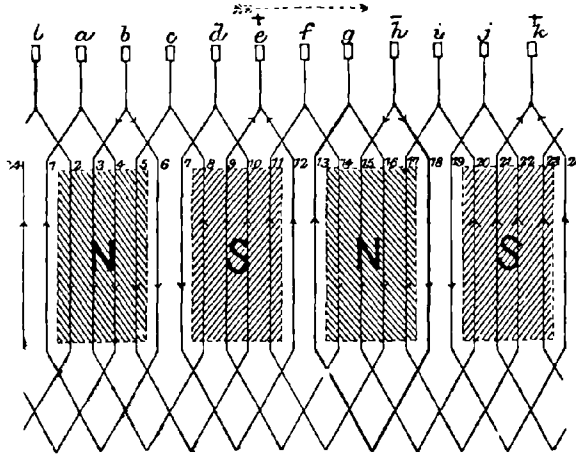


Fig. 220.

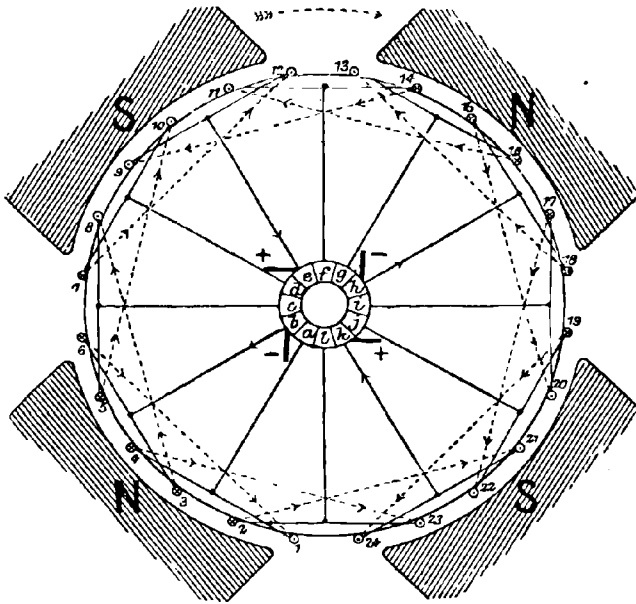


Fig. 221.

Fig. 220 et 221. — Développement et vue de bout du bobinage imbriqué à 4 pôles de Thury.

noyau; aucun d'eux n'est parallèle à l'arbre. Dans ce cas les faces

polaires des inducteurs sont également montées obliquement. Cet

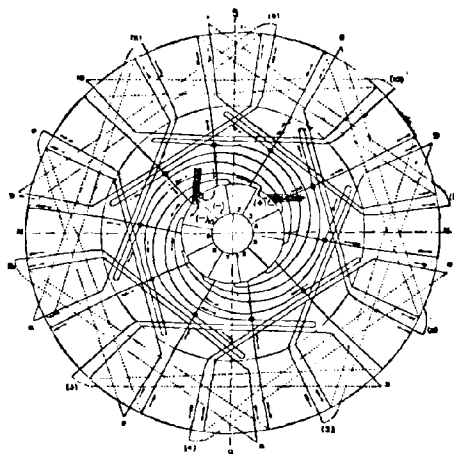


Fig. 222. — Bobinage à 4 pôles d'Alioth : groupement parallèle en quatre groupes.

enroulement oblique est représenté par la figure 224 qu'on pourra uti-

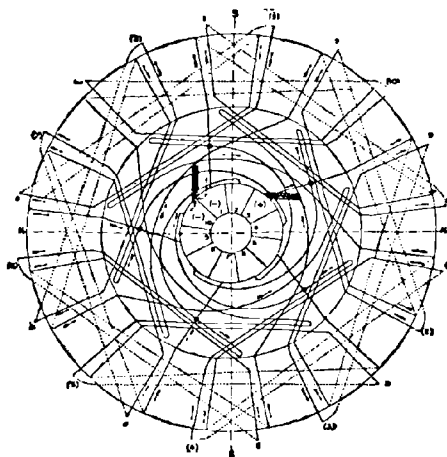


Fig. 223. — Bobinage à 4 pôles d'Alioth : groupement en série en deux groupes.

lement comparer avec le bobinage de la figure 200 auquel il est électriquement équivalent.

Des enroulements en tambour multipolaires ont été également proposés par Hopkinson et par Bradley.

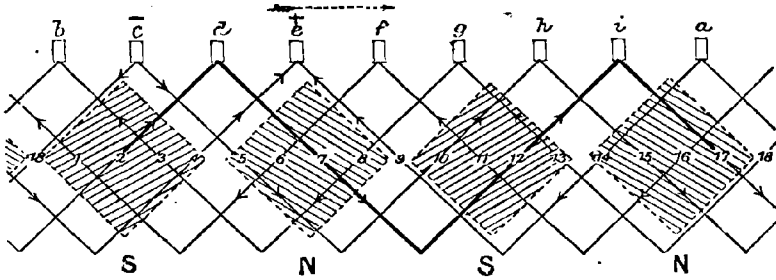


Fig. 224 — Bobinage oblique ondulé de Fritsche.

ENROULEMENTS EN ANNEAUX MULTIPOLAIRES

Nous avons déjà dit quelques mots de ces enroulements page 299. On a vu qu'un anneau ordinaire placé dans un champ multipolaire devait avoir autant de points neutres à son collecteur qu'il existe de pôles

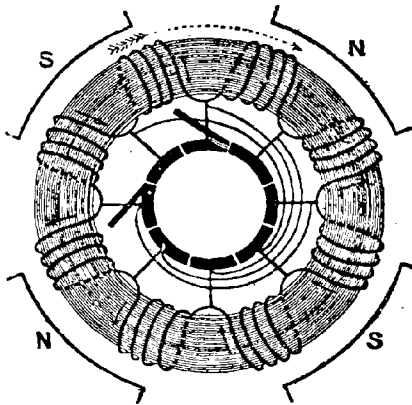


Fig. 225. — (Mordey) Mode de connexions multipolaires d'anneau. (Connexions parallèles.)

autour de lui et qu'il exigeait, en conséquence, des balais en nombre égal à celui des pôles de la machine. Il est possible néanmoins de réduire le nombre des balais à deux à l'aide de deux méthodes indépendantes ; dans l'une d'elles les groupes de sections sont reliés parallèle-

ment à des trajets multiples à travers l'anneau ; dans l'autre ils sont montés en série avec deux voies seulement à travers l'induit.

La figure 225 représente une manière de réduire à deux le nombre des balais en reliant transversalement les bobines d'un côté à l'autre de l'anneau, idée due à M. Mordey. Cette manière de procéder revient à relier simplement en parallèle l'une avec l'autre chacune des bobines et celle qui occupe la même position opposée par rapport au pôle correspondant. La disposition semble dissymétrique ; mais il n'en est rien en réalité. Dans une machine à 6 pôles chaque bobine devrait être reliée

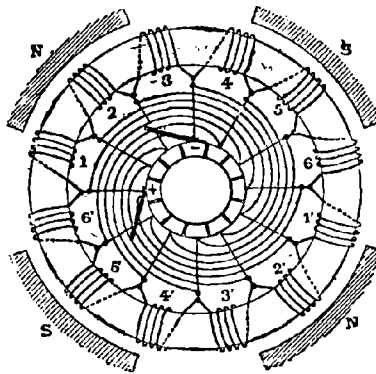


Fig. 226. — Connexions des induits « Victoria » (Mordey) à 4 pôles.

avec les deux qui se trouvent placées à 120° à sa droite et à sa gauche. On y arrive dans la pratique de plusieurs manières, soit au moyen de connecteurs en spirales, soit en reliant transversalement les touches correspondantes du collecteur. Dans les machines « Victoria » de la Compagnie Brush (fig. 347), la longueur d'arbre entre l'anneau et le collecteur permet une double connexion transversale, chaque jonction de deux sections adjacentes est reliée en dessous par un fil à la touche la plus voisine du collecteur, en même temps qu'elle est reliée en spirale à la touche opposée de l'autre côté, comme dans la figure 226. Dans quelques machines de la Compagnie Gülcher la connexion transversale est réalisée par une série de bagues métalliques enfilées sur un manchon isolé de l'arbre ; chacune de ces bagues est munie de deux oreilles diamétralement opposées qui relient transversalement les fils aboutissant à deux touches opposées du collecteur. Les machines ainsi connectées transversalement ont en réalité quatre points neutres ; mais les balais ne captent le courant qu'en deux de ces points.

Il existe plusieurs manières de grouper les bobines en série en vue d'obtenir une force électromotrice double. L'une de ces dispositions, symétrique électriquement, est représentée par la figure 227 où l'on voit les touches du collecteur reliées transversalement, tandis que les

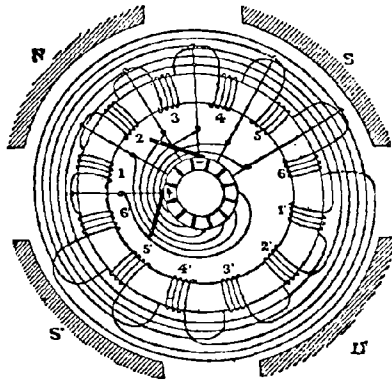


Fig. 227. — Anneau à 4 pôles : groupement en série (2 groupes).

bobines opposées sont couplées en série. Ce montage n'exige également que deux balais à 90° l'un de l'autre. Les figures 228 et 229 indiquent

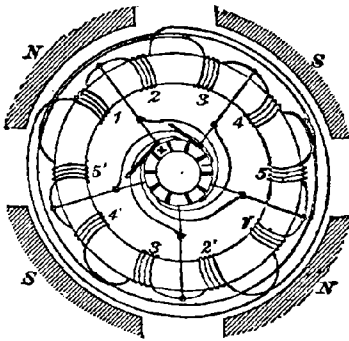


Fig. 228. — Anneau à 4 pôles : groupement en série (2 groupes).

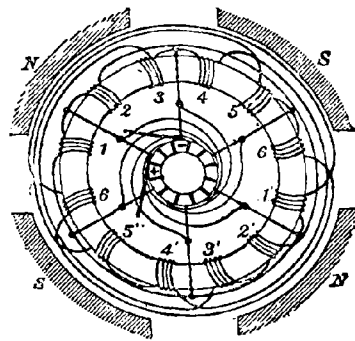
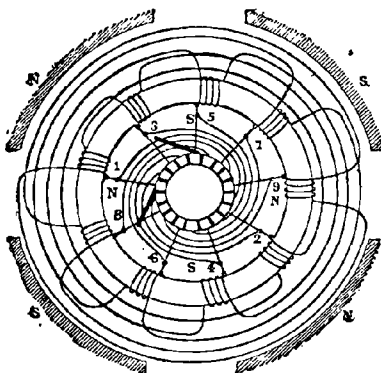


Fig. 229. — Anneau à 4 pôles : groupement en série (2 groupes).

deux autres manières d'arriver au même résultat. Ici cependant les connexions ne sont pas symétriques, de sorte que les résistances de deux trajets et par suite les courants respectifs ne peuvent être égaux chaque instant.

Dans une autre disposition (fig. 230), chaque bobine est reliée à n_p segments à des intervalles de $\frac{360^\circ}{n_p}$ autour de l'anneau, ce qui entraîne un plus grand nombre de touches au collecteur.

Dans un enroulement encore différent imaginé par le professeur Perry (fig. 231), les connexions de chaque section suivent une corde du col-



• Fig. 230. — Anneau multipolaire : groupement en série.

lecteur. Le cas figuré est celui d'un anneau à onze sections dans un champ à 4 pôles. Le nombre des sections et des touches du collecteur

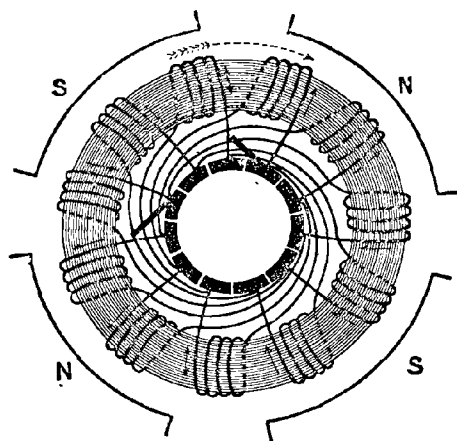


Fig. 231. — (Perry) Mode de groupement en série sur anneau multipolaire.

doit être impair si celui des pôles est pair. Il peut être soit pair soit

impair dans les machines à 6 ou 10 pôles. C'est ce qu'indique la formule suivante donnée par Arnold pour ce cas :

$$c = n_p y \pm 1 .$$

Arnold ¹ a décrit un grand nombre d'autres bobinages d'anneaux à enroulements plus complexes.

ENROULEMENTS EN DISQUES

Ces bobinages de disques peuvent être traités en général comme de

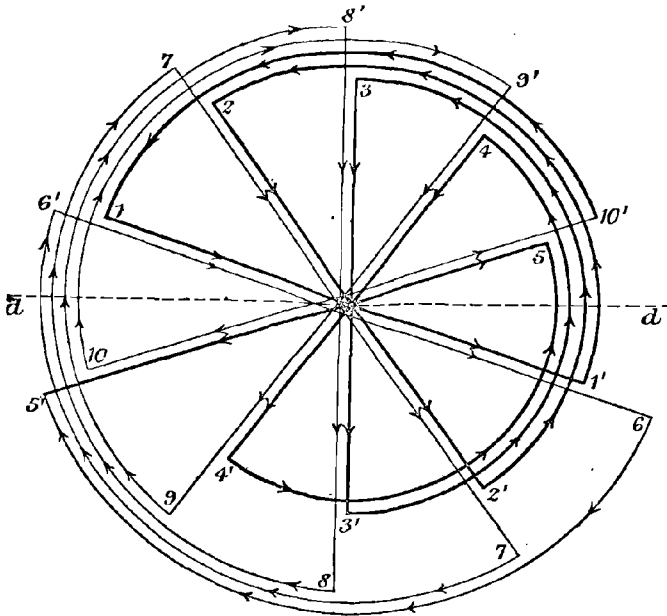


Fig. 232. — Induit en disque de Pacinotti.

enroulements de tambours épanouis radialement, la périphérie extérieure correspondant à la face d'arrière du tambour. Le plus ancien bobinage de ce genre est celui imaginé en 1875 par Pacinotti. C'est un bobinage imbriqué adapté à un champ à 2 pôles ; le pôle N est,

¹ *Op. citat.*

dans la coupe ci-contre, supposé en arrière de la partie supérieure, et le pôle S en arrière de la partie inférieure (fig. 232). On remarquera que l'extrémité extérieure de chaque conducteur radial est ramenée circulairement, par une pièce de connexion qui suit la périphérie, vers

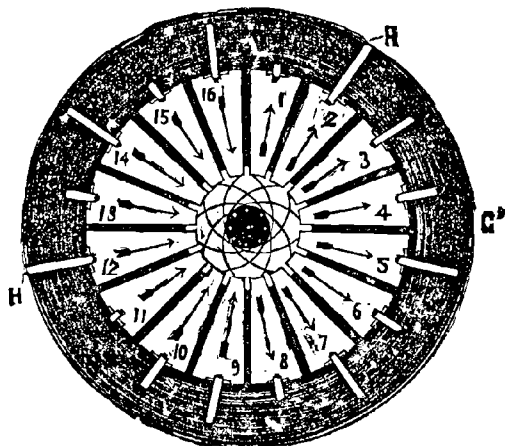


Fig. 233. — Induit de la machine à disque d'Edison

un autre conducteur radial auquel il se relie et qui, dans une machine bipolaire, serait, à un près, celui qui lui est diamétralement opposé. Le schéma en question s'applique à un induit à dix sections composé de vingt conducteurs radiaux. Ils sont numérotés de manière à permettre de

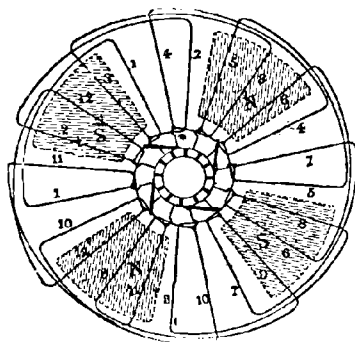


Fig. 234. — Bobinage imbriqué de disque à 4 pôles.

suivre l'ordre des connexions. La commutation se faisant suivant dd , les courants s'écoulent radialement vers l'intérieur dans une moitié et vers l'extérieur dans l'autre moitié de ce disque. La construction des

machines d'expérimentation de Pacinotti est décrite dans son travail original.

Depuis cette époque on a proposé bien des modes d'enroulement de ce type, y compris celui d'Edison représenté par la figure 233.

Dans ce disque la lame radiale de cuivre n° 1 est reliée à la lame n° 11 par des bandes de cuivre qui viennent aboutir à une sorte de

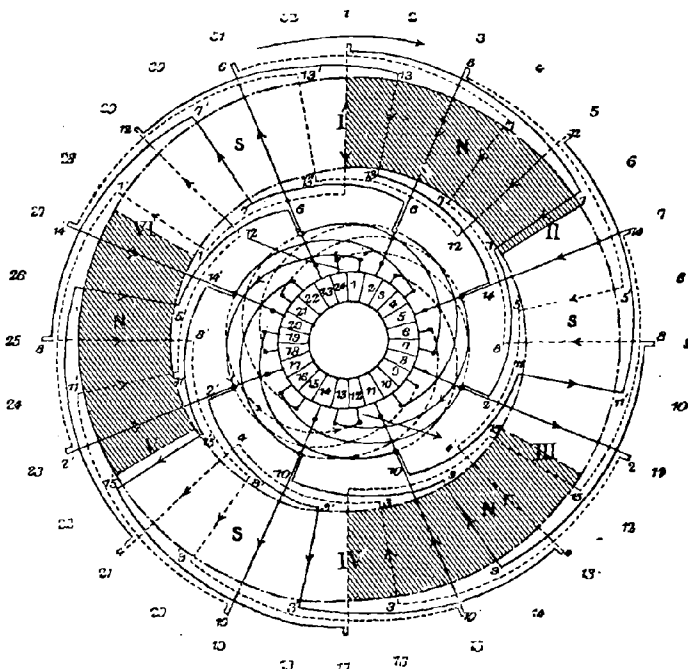


Fig. 235. — Bobinage de disque à 6 pôles de Desroziers.

rebord extérieur de plateau, formé de cuivre isolé. L'espacement a lieu ici sur cinq et onze conducteurs en même temps.

Un bobinage imbriqué, identique à celui de Pacinotti, mais adapté à un champ à 4 pôles, est représenté par la figure 234 ; il est connu sous le nom de bobinage de « nouveau disque » d'Edison. — Les induits en disques des compteurs électriques d'Hookham sont également à bobinage imbriqué. — Bollman a imaginé un disque multipolaire à bobinage ondulé.

Dans ces derniers temps un renouveau a été donné aux induits en disques par Desroziers, et Fritsche. Desroziers emploie pour une machine à 6 pôles le bobinage ondulé très laborieusement étudié que

représente la figure 233. Arnoux¹ a donné une étude spéciale de cette classe d'enroulements. Fritsche fait usage de pôles polygonaux, ce qui lui permet d'employer comme conducteurs des bandes de métal montées en polygones étoilés, sans parties radiales, avantage réel au point de vue de la construction. Son disque, développé rectilignement, serait, pour une machine à 4 pôles, parfaitement représenté par la figure 224, page 320. Les deux jeux de conducteurs forment deux couches reliées par leurs extrémités extérieures aux touches d'un collecteur qui constitue la périphérie extérieure de l'induit. On voit dans la figure 38, page 42, l'induit en disque de Fritsche sorti des inducteurs.

¹ Voir le renvoi p. 292.



CHAPITRE XIII

CONSTRUCTION PRATIQUE DES INDUITS

La bonne réalisation des conditions magnétiques, électriques et mécaniques de construction d'un induit exige des connaissances électriques, l'habitude des études mécaniques et une certaine expérience. Nous avons indiqué au Chapitre V les problèmes mécaniques qu'elle implique ; au Chapitre VII, les questions magnétiques qui y interviennent ; et la théorie du bobinage des induits a été exposée dans le Chapitre XII précédent. Nous avons cependant peu insisté jusqu'ici sur la manière convenable d'assurer la fixité des conducteurs, de les isoler et de les ventiler. La majeure partie, sinon la totalité de ce chapitre, s'applique aux induits des machines et moteurs à courant continu ; mais un grand nombre de ses indications est également applicable aux machines à courants alternatifs.

NOYAUX

La masse métallique des noyaux est toujours divisée, que ceux-ci soient formés (1) de *disques* de tôle, (2) de *feuillard*, ou (3) de *fil* de fer. Le feuillard n'est employé que pour les induits en disque qui s'aimantent par leurs faces latérales. Pour les tambours et les anneaux allongés, l'emploi de disques estampés dans de la tôle de fer douce est presque universel. L'épaisseur ordinaire de ces tôles est de 1 à 2 millimètres. Elles doivent être en fer très doux présentant le moins possible d'hystérésis. Après avoir été estampées, elles exigent un recuit et un ébarbage. A cet effet certains constructeurs les montent d'abord sur l'arbre, les mettent sur le tour ainsi assemblées, puis les démontent, enlèvent les bavures en les passant légèrement sur une meule d'émeri et les remontent ensuite. Avant d'être finalement montées sur l'arbre, elles doivent être légèrement isolées l'une de l'autre. Dans ce but, on revêt

ordinairement de papier gomme-laqué l'une des faces de chaque disque ou bien on vernit les deux faces. L'emploi du mica serait ici trop coûteux ; il est d'ailleurs inutile, l'isolement n'ayant pas besoin d'être très grand. On a l'habitude de donner aux deux disques terminaux une plus grande épaisseur allant jusqu'à 6 millimètres. Pour les induits en disques, il faut isoler le feuillard par l'interposition d'une bande de papier gomme-laqué. Afin de donner de la rigidité au noyau en disque, on le monte habituellement sur une plaque de fondation circulaire en fer doux, au centre de laquelle est dans certains cas fixé un pivot de fer sur lequel on roule le feuillard d'un côté ou de l'autre. Comme exemple on peut citer le noyau de la machine « Victoria » (Mordey), (figure 346).

Pour les grandes machines le coût des disques d'induit devient très dispendieux en raison de la perte considérable résultant de l'estampage. Aussi a-t-on proposé différentes manières d'employer des segments. Pendant longtemps les noyaux d'induit des machines Joel ont été formés de pièces séparées, boulonnées ensuite ensemble, de manière à permettre le bobinage fractionné de l'anneau et l'assemblage ultérieur de ses éléments. Dans les induits multipolaires, en tambour, de Kapp (fig. 337) les noyaux sont composés de segments formés, comme l'in-

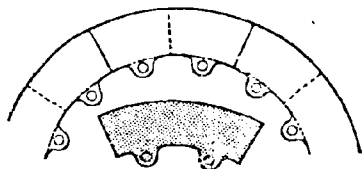


Fig. 236. — Disques de noyau en segments (Kapp).

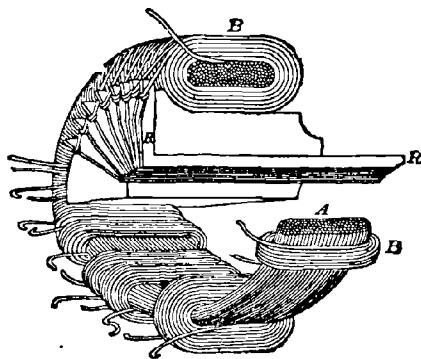


Fig. 237. — Anneau Gramme à noyau de fil de fer (1871).

dique la figure 236, de pièces qui chevauchent d'une couche à l'autre et sont munies d'appendices à œil pour l'assemblage par boulons.

Les noyaux en fil de fer employés par Gramme (fig. 237) ont été longtemps en vogue. Le fil de fer doux, verni ou légèrement oxydé à la surface, était roulé sur une forme spéciale qu'on retirait ensuite, puis revêtu extérieurement d'un isolant et finalement recouvert des sections de fil de cuivre.

Les noyaux en fil ont trois inconvénients : (I.) au point de vue mécanique ils donnent moins de sécurité que les noyaux formés de disques ; (II.) ils offrent, pour un volume donné de noyau, une moindre section de fer, à cause des interstices résultant de la forme ronde des fils : leur section n'est guère que les trois-quarts de la section totale de l'anneau ; (III.) ils présentent radialement une discontinuité qui constitue une résistance inutile au passage du flux de force. La substitution d'un fil de fer à section carrée au fil rond, comme dans le noyau des machines de la Compagnie Gülcher (fig. 330), est une amélioration à ces différents points de vue.

Pour les machines à grand débit, Gramme a eu recours à une armature représentée par la figure 238. Elle se composait d'un cylindre creux, formé de 100 barres de cuivre à section trapézoïdale, séparément recouvertes d'une enveloppe en papier bitumé, puis assemblées. Chaque barre se terminait aux deux bouts par une équerre en cuivre. Ces extrémités en équerres formaient les collecteurs qui étaient au nombre de deux. L'espace entre les deux jeux de pro-

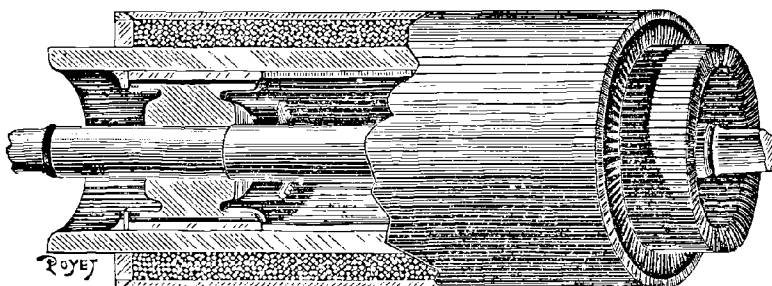


Fig. 238. — Anneau Gramme pour courants très intenses.

jections radiales était rempli par des spires de fil de fer verni qui constituaient le noyau, et finalement 100 autres barres de cuivre à section aplatie étaient reliées extérieurement de l'équerre fixée à l'extrémité d'une barre à celle située à l'autre extrémité de la barre voisine, ce qui réunissait les barres en un circuit fermé. Quelques-unes des barres intérieures étaient plus épaisses et de forme spéciale, de manière à pouvoir être clavetées sur des manchons à ailettes fixés à l'arbre de rotation.

La machine Bürkin présente un autre mode de construction de noyaux en fil de fer. L'induit de la machine originale, telle qu'elle arriva de Suisse, était composé de plusieurs anneaux montés côte à côte sur le même arbre ; ces anneaux étaient faits de fil de fer roulé sur une carcasse carrée, portant ainsi quatre bobines chacun. M. Crompton remplaça la forme carrée par un hexagone à six bobines (fig. 239), et porta à dix le nombre des anneaux. Voici la description qu'il en donnait en 1882 : — « Chaque anneau se compose d'une bobine hexagonale en fil de fer, montée sur une légère étoile métallique, dont les bras

aboutissent aux angles de l'hexagone. Sur ce bâti hexagonal sont montées six bobines de fil de cuivre isolé, plus épaisses au milieu des côtés du polygone, ce qui donne très approximativement à chaque anneau la forme d'un cercle. Chacune des six bobines est séparée de sa voisine, et chacun des dix anneaux est fixé sur l'arbre en avance d'un sixième de la circonférence par rapport à celui qui le précède, de sorte que les soixante bobines distinctes dont se compose l'induit sont par le fait équidistantes les unes des autres autour de l'axe et symétriquement disposées si on les regarde de bout.

Le collecteur comporte 60 touches reliées chacune à l'extrémité d'une des bobines élémentaires et au commencement de celle qui est en avance sur elle

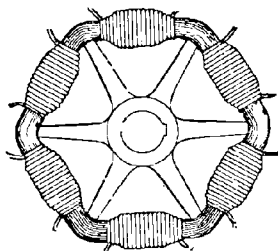


Fig. 239. — Anneau élémentaire d'un induit Crompton-Bürgin.

d'un sixième de tour, c'est-à-dire à la bobine correspondante de l'anneau voisin. Cet induit offre, au point de vue pratique, les avantages considérables d'une construction facile, légère et assurant une excellente ventilation.

Cette disposition se ressentait cependant de l'échauffement résultant de l'induction entre les anneaux contigus, et l'on avait dû alterner les positions respectives des anneaux, au lieu de les disposer en hélice régulière autour de l'arbre, comme on le voit sur la plupart des dessins de cette machine bien connue. Elle ne présentait, à l'expérience, aucune supériorité sur l'induit ordinaire de Gramme, pourvu que ce dernier fût mécaniquement bien établi et eût un noyau d'une section de fer suffisante.

Noyaux dentés et lisses. — L'induit construit par Pacinotti en 1864 (fig. 240) comportait un noyau denté en fer massif, supporté par des bras de bronze, et sur les dents duquel étaient fixés de distance en distance des morceaux de bois destinés à séparer les spires conductrices. On a beaucoup employé depuis quelque temps, notamment pour les moteurs, des disques de noyau dentés. Ils présentent sur les noyaux lisses deux avantages : (I.) les dents sont un excellent mode d'entraînement pour les conducteurs retenus par elles ; (II.) ces dents peuvent être très rapprochées des surfaces polaires des inducteurs ; l'entrefer se trouve ainsi réduit, ce qui améliore le circuit magnétique et réduit en conséquence la quantité de cuivre nécessaire à la production du flux magnétique. En regard de ces réels avantages les dents ont l'inconvénient

d'exiger un peu plus de travail pour la régularisation de la cannelure qui les sépare, le noyau une fois constitué; de rendre plus difficile l'isolation des conducteurs par rapport aux noyaux; et de permettre un développement plus facile des courants parasites sur les surfaces polaires (voir p. 94). On peut remédier à ce dernier inconvénient en multipliant les dents et en réduisant leur largeur, ainsi qu'en divisant les surfaces polaires par des gorges et en augmentant l'entrefer, ou bien, ce qui vaut encore mieux, en revêtant finalement tout l'induit, y compris les conducteurs de cuivre, d'une couche de fil de fer. — Au point de vue magnétique le gain obtenu par l'emploi de dents entre les conducteurs est si grand que certains constructeurs, et notamment MM. Chamberlain et Hookham, et MM. Lahmeyer et C^{ie}; ont ajouté de toutes pièces des projections en fer à l'extérieur de disques lisses.

On verra des exemples de noyaux en disque munis de dents en saillie sur leurs faces latérales dans les induits Brush (fig. 308 et 309).

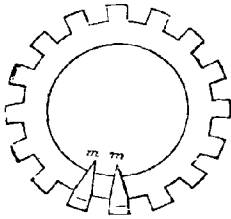


Fig. 240. — Induit en anneau denté de Pacinotti.

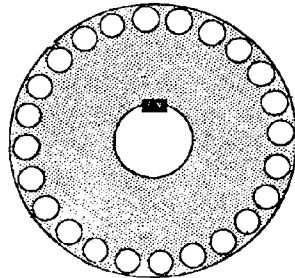


Fig. 241. — Disque de noyau repercé.

Noyaux repercés. — Les avantages que présentent les disques dentés pour les noyaux d'induits sont encore plus accentués dans des disques percés d'ouvertures dans le voisinage immédiat de la périphérie. Tels sont ceux employés par Wenström, Swinburne, Brown (fig. 241). Dans ces induits, les conducteurs sont renfermés dans des tubes de matière isolante qui garnissent les trous. Brown a reconnu que ce mode de construction donnait la plus absolue satisfaction au double point de vue mécanique et magnétique. On l'emploie aussi bien pour les machines à tambour que pour les machines à anneau (fig. 338, 463 et 464) construites dans les ateliers d'Oerlikon. Il ne convient cependant pas pour les voltages supérieurs à une centaine de volts, en raison des difficultés d'isolation qu'il présente. L'une des pro-

priétés particulières et très précieuses des disques de noyau ainsi reperçés est de protéger complètement les fils de cuivre qu'ils emprisonnent, si massifs qu'ils soient, contre les courants parasites qui autrement s'y développeraient.

Bras et Manchons d'entraînement. — Les noyaux d'induits sont généralement montés sur une carcasse intérieure ou un manchon solidement claveté sur l'arbre. Dans les induits en tambour, ce support intérieur peut être supprimé, les disques des noyaux étant eux-mêmes directement clavetés sur l'arbre. MM. Laurence et Scott poinçonnent des trous hexagonaux au centre des disques et les enfilent sur un arbre à six pans.

Dans les induits en tambour de Weston, les disques, perforés en vue de la ventilation, sont clavetés sur l'arbre, comme on le voit sur la figure 242.

Souvent les disques de noyaux sont assemblés à l'aide de boulons

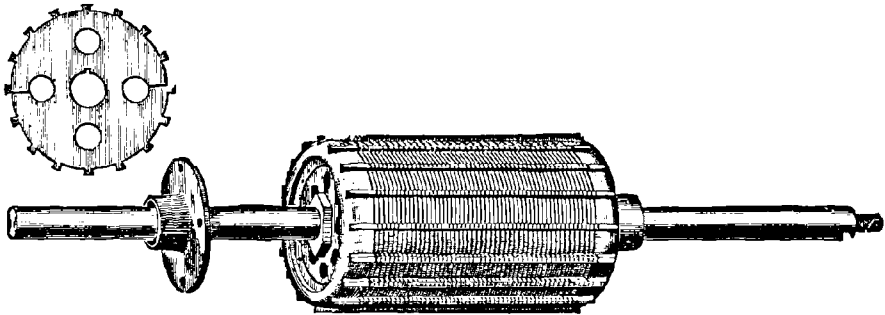


Fig. 242. — Noyau et disque de noyau de l'induit Weston.

isolés qui les traversent, et entraînés par une étoile clavetée sur l'arbre comme dans la figure 243. On fait à ce mode de construction l'objection que les trous de boulons réduisent la section effective du fer et étranglent le flux magnétique. Il est également indispensable que les boulons soient isolés des bras des étoiles par des rondelles et des dés en ébonite, sans quoi ils constitueraient avec le bâti un circuit fermé facilitant le développement de courants parasites qui l'échaufferaient.

MM. Paterson et Cooper ont employé un meilleur mode d'attache pour les noyaux de leurs dynamos « Phénix » (fig. 342), dans les-

quels la section du fer n'est que très légèrement réduite et où les boulons sont tout à fait intérieurs aux disques (fig. 244).

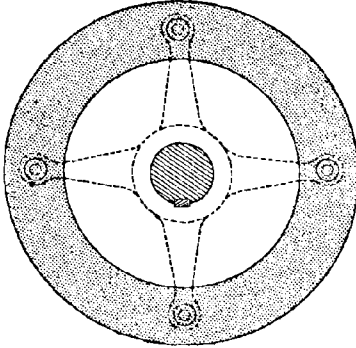


Fig. 243. — Mode d'entraînement des disques de noyau.

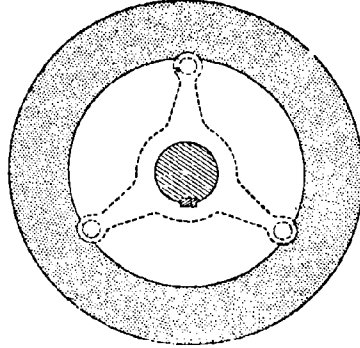


Fig. 244. — (Paterson et Cooper) Mode d'entraînement des disques de noyau.

Une autre manière de faire consiste à pratiquer à l'intérieur des disques en tôle des entailles en queue d'aronde dans lesquelles viennent

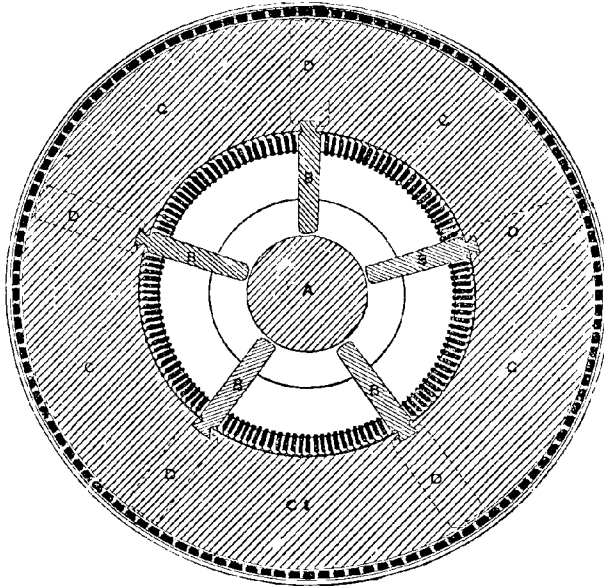


Fig. 245. — Section d'un induit Crompton (1886), montrant les flasques d'entraînement assemblés en queue d'aronde avec les disques de noyau.

s'engager de longs flasques partant de l'arbre. M. Crompton introduisit en 1886 ce mode de construction sous la forme représentée par la

figure 245. Les bobines sont roulées sur un noyau de fer formé de disques de tôle douce très mince fixés sur un arbre central par l'entremise de petits bras radiaux engagés en queue d'aronde dans des entailles découpées à la circonférence intérieure des disques. A certains intervalles des espaces laissés libres entre les disques facilitent la ventilation. Les bobines, au nombre de 96 dans quelques-unes de ces machines et de 120 dans d'autres, sont enfilées sur le cylindre, et maintenues en place par de petits coins en bois et des frettes extérieures en fil de laiton mince. Cet induit a 70 centimètres de long sur 32 centi-

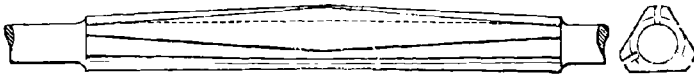


Fig. 246. — Arbre d'entraînement d'une machine Crompton.

mètres de diamètre extérieur. L'arbre en acier A porte cinq profondes rainures longitudinales destinées à recevoir cinq bras B en forme de flasques assemblés à queue d'aronde avec les disques de fer C. Tous les 5 centimètres environ sur la longueur sont interposées les pièces D, de 3 millimètres d'épaisseur, destinées à maintenir les vides de venti-

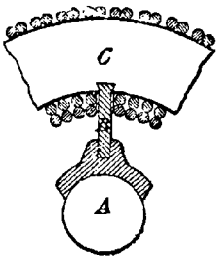


Fig. 247. — Bobinage du fil sur l'induit Crompton.

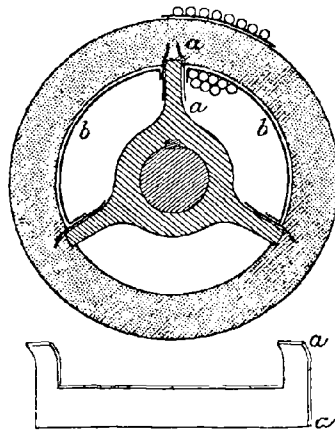


Fig. 248. — (Kapp) Mode d'entraînement des disques de noyau.

lation. Le mode de liaison adopté par M. Crompton entre l'induit et l'arbre de rotation au moyen de rainures pratiquées dans ce dernier est également représenté par la figure 246, qui montre un arbre à trois rainures sans affaiblissement de résistance.

En raison de leur coût élevé de façon, ces arbres rainés sont aujourd'hui rarement employés ; un manchon à ailettes, glissant sur un arbre cylindrique et fixé par une longue clavette est moins coûteux et tout aussi mécanique. La figure 247 représente une disposition à manchon de ce genre, destinée à recevoir un enroulement d'une seule couche de fil extérieurement et de deux couches intérieures.

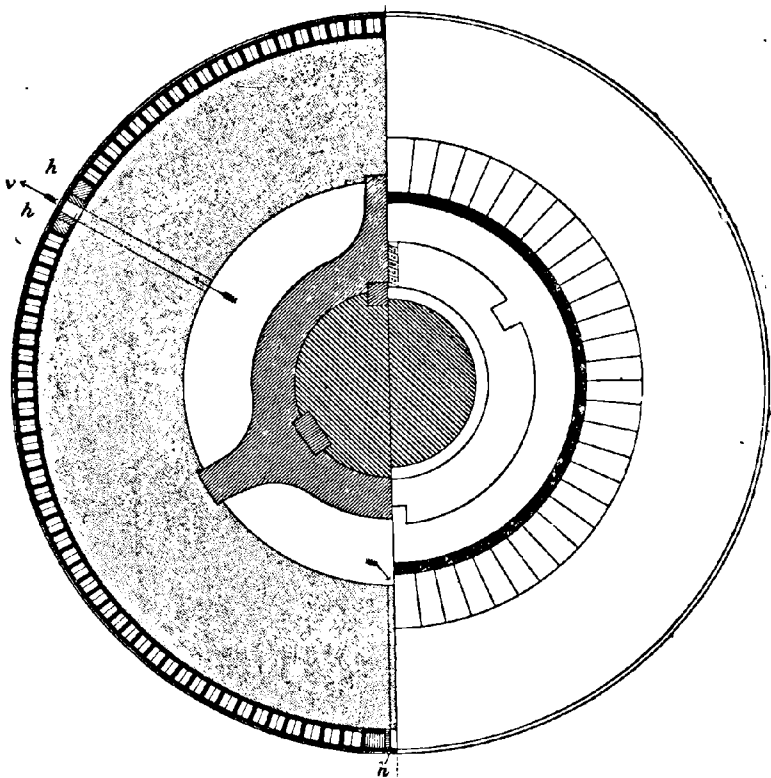


Fig. 249. — Machine Kapp. — Section d'induit et vue de bout montrant le collecteur.

Plus récemment, M. Crompton a constitué d'une seule pièce les quatre flasques radiaux et le manchon, au lieu de les diviser en quatre pièces distinctes.

Le mode d'entraînement adopté par M. Kapp pour les disques de noyau est indiqué dans les figures 248 et 249. Sur l'arbre est emmanché à glissement un long manchon garni de trois flasques radiaux destinés

à soutenir les disques du noyau. Ce manchon, qu'une longue clavette légèrement forcée dans une rainure empêche de tourner, a l'avantage de donner à l'arbre de la rigidité. Pour les induits en anneau, cette structure intérieure est en bronze ; pour ceux en tambour, elle est en fonte. Le manchon est arrêté par une rondelle extrême butée contre un épaulement de l'arbre, et les disques du noyau sont serrés entre les deux plaques terminales par un écrou vissé sur l'arbre.

Le mode de soutènement et d'entraînement employé par Brown pour les disques de noyaux est représenté par la figure 250.

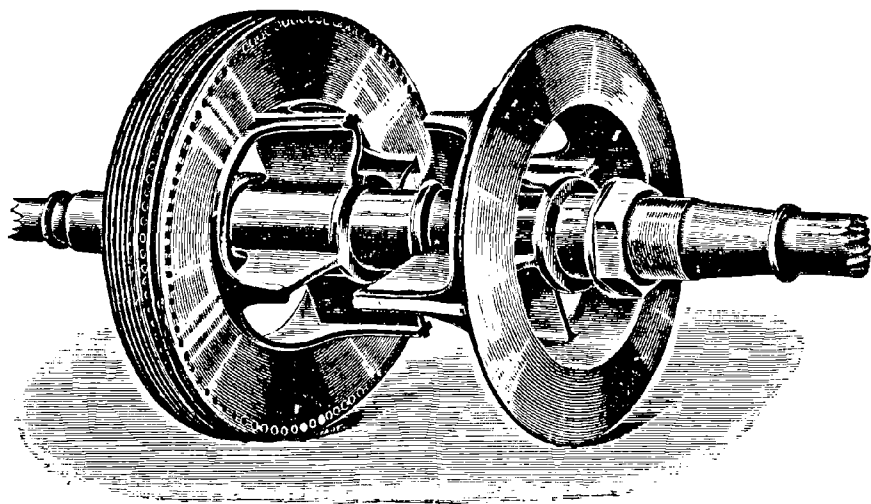


Fig. 250. — (Brown) Mode d'entraînement des disques de noyau.

Les manchons, au nombre de deux, sont munis chacun de quatre ailettes et de larges rondelles terminales. Ils sont emmanchés sur l'arbre et maintenus par des clavettes qui les empêchent de tourner. L'un d'eux vient buter contre un épaulement réservé sur l'arbre ; l'autre est serré, au moyen d'un large écrou à six pans, contre les disques une fois assemblés. On voit que deux des ailettes de chaque manchon portent sur champ une languette ; elle correspond à une entaille pratiquée dans les disques au moment de l'estampage et, en s'y engageant, les maintient immobiles. Sur les quatre ailettes de chaque manchon, deux sont plus courtes que les autres ; elles sont, dans le montage, opposées aux deux ailettes plus longues de l'autre manchon, de manière à constituer un emboîtement qui permet de comprimer les disques au fur et à mesure du serrage des manchons l'un contre l'autre. — On

trouve des dispositions tout à fait analogues pour le maintien des disques dans les dynamos « Manchester » d'Hopkinson et dans les machines « Castle » de Holmes.

Une autre disposition, très-remarquable par sa solidité, est employée dans les dynamos et moteurs Immisch. L'arbre porte deux cônes de bronze maintenus par des clavettes basses *ff* qui les empêchent de tourner. Dans chacun d'eux sont pratiquées, à 120° l'une de l'autre, trois rainures inclinées suivant la pente du cône. Ces rainures reçoivent deux

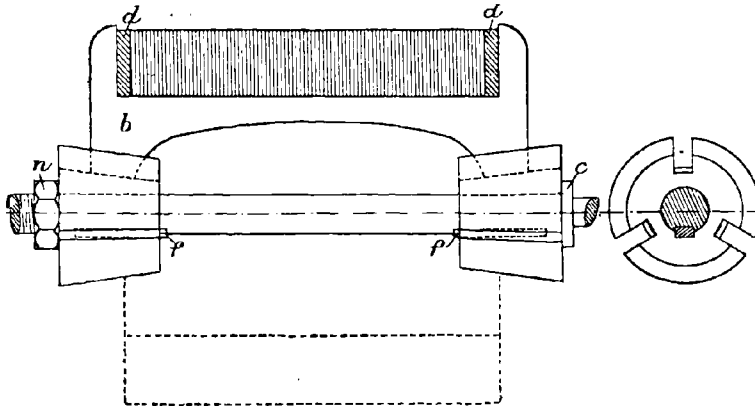


Fig. 251. — (Immisch) Mode d'entraînement par deux cônes.

à deux trois flasques de bronze *b* qui forment le pont entre les deux cônes et sont évidés en leur milieu, de *a* en *d*, de manière à recevoir les disques maintenus par les épaulements *a d*. En vissant un écrou *n* sur l'arbre, on serre les cônes l'un contre l'autre ; l'inclinaison des rainures assujettit fermement les flasques, et les disques se trouvent supportés en trois points de leur évidement intérieur. — Des dispositions coniques plus ou moins analogues à ce montage mécaniquement très bien compris se rencontrent dans certaines formes d'induits en anneau étudiés par Spang et dans d'autres dus à Raffard. Dans les machines Immisch les disques ne sont ni entaillés ni clavetés ; mais aux extrémités et à certains intervalles sont insérés des disques de fer plus épais, munis de saillies d'entraînement.

Il ne faut pas oublier que les efforts de compression diminuent la perméabilité du fer dans le sens de ces efforts, et que les efforts contraires l'augmentent.

Isolation des noyaux de fer. — On a déjà vu précédemment comment on isole intérieurement les uns des autres les disques de noyaux par

l'interposition de papier ou de vernis. Théoriquement il est inutile de les isoler de l'arbre dans le cas où ils sont directement enfilés sur lui ; c'est surtout à leur périphérie qu'il faut empêcher des contacts métalliques de s'établir entre eux. Mais, en plus de cette isolation interne, ils doivent être très soigneusement protégés contre tout contact *extérieur* avec les fils de cuivre. On enduit généralement le noyau entièrement terminé d'une ou deux couches de vernis, puis on le recouvre d'une épaisseur de tissu grossier, comme du canevas, du papier de manille, ou du papier Willesden, enduit ensuite lui-même de vernis à la gomme-laque ou de vernis au caoutchouc de Scott. Dans le cas des noyaux pour bobinage en anneau, il faut prendre particulièrement soin d'isoler l'évidement intérieur et les bras d'entraînement contre lesquels s'appuie la partie interne de l'enroulement. Pour les noyaux en tambour, ce sont les extrémités et les parties de l'arbre avoisinantes qu'il faut spécialement garnir d'isolant. Dans les induits en anneaux de Kapp, de minces feuilles de fibre vulcanisée, ayant la forme indiquée sur la figure 248, page 333, sont appliquées de chaque côté des flasques d'entraînement, et d'autres bandes de même matière revêtent la périphérie interne, entre les flasques, comme on le voit sur la figure. Le mode d'isolation des anneaux Brush est décrit en même temps que la machine.

Ventilation des induits. — Trois causes concourent à échauffer un induit : l'hystérésis, les courants parasites et la chaleur développée par le passage du courant dans les conducteurs. La division raisonnée des masses métalliques et l'isolation soignée dont il est parlé précédemment sont précisément des moyens de prévenir une absorption inutile d'énergie et d'éviter le danger d'un échauffement exagéré. Dans le cas des enroulements en anneau il existe ordinairement une surface suffisante exposée à l'air pour dissiper la chaleur développée dans les conducteurs, sans qu'il soit besoin de recourir à un mode spécial quelconque de ventilation. Mais quand il s'agit de grands et robustes induits en tambour, il peut être nécessaire de forcer la ventilation par un procédé quelconque. Dans les induits en tambour bobinés à l'ancienne manière, avec chevauchement des bobines élémentaires aux extrémités, une ventilation convenable est impossible. Comme exemple de noyaux ventilés on peut se reporter à l'induit Crompton (fig. 245, p. 334), et à l'induit de Kapp en tambour (fig. 252 ci-après).

Pour les bobinages en tambour à connexions terminales spéciales, faites de toutes pièces, la disposition comportant d'une part des con-

nexions en spirales et de l'autre des connexions radiales droites (comme dans la figure 211, p. 309) est préférable à celle à deux jeux de spirales de la figure 213, p. 311 ; la première agit mieux en effet comme ventilateur. Certains constructeurs emploient des manchons à ailettes inclinées comme les ailes d'un moulin à vent, de manière à forcer le passage de l'air à l'intérieur de l'induit.

Équilibre des induits. — Il est de toute nécessité que les induits soient aussi bien équilibrés que possible ; autrement il se produit en marche des vibrations nuisibles. La plupart des constructeurs vérifient le bon équilibre de leurs induits en les faisant reposer par leurs extrémités sur deux rails métalliques parallèles ou deux couteaux et en observant si dans toutes les positions ils conservent bien leur immobilité sans tendance à tourner sur eux-mêmes. Il est bon, en effet, de faire cette vérification une première fois sur le noyau terminé prêt à passer au bobinage, et une seconde fois après l'application du fil. Si les disques extrêmes du noyau sont en tôle plus épaisse, on peut, après coup, soit y percer des trous, soit couler du plomb dans ces trous, pour rétablir l'équilibre.

On remarquera que ce mode de vérification de l'équilibre statique n'est pas parfait ; si, en effet, les masses qui s'équilibrent autour de l'axe sont distribuées d'une façon dissymétrique sur sa longueur, il y aura, en marche, tendance à mouvement autour de l'axe de moment d'inertie maximum, ce qui donnera lieu à des vibrations.

CONDUCTEURS

Coins d'entraînement. — Il est absolument indispensable que les conducteurs de l'induit soient mécaniquement entraînés dans le mouvement ; autrement ils peuvent être arrachés de leurs positions par l'effort tangentiel qui s'exerce dans le champ magnétique (p. 108). Cette action nuisible a moins de tendance à se produire avec les enroulements en anneau qu'avec les bobinages en tambour, parce que les fils rentrant à l'intérieur de l'anneau contribuent à les maintenir et viennent presser contre les bras d'entraînement. Mais, même dans ce cas, on reconnaît la nécessité de disposer à la périphérie, en un certain nombre de points, des pièces d'entraînement effectif. Crompton fait usage de coins de buis placés entre les disques de noyau. Il a adopté le mode de construction de la figure 245, page 334, dans lequel des morceaux de fibre D sont

répartis de distance en distance pour assurer la ventilation entre les disques; les espaces ainsi réservés conviennent très bien pour l'insertion ultérieure de coins d'entraînement entre les fils. Kapp emploie d'étroites projections en acier protégées par un revêtement en fibre dure. Goolden place des bandes de fibre blanche dure dans d'étroites rainures fraisées sur la longueur du noyau; il met ordinairement 24 petites clavettes de fibre, fixées dans 8 cannelures à 45 degrés l'une de l'autre et qui en reçoivent chacune 3. Elles sont maintenues par les frettes extérieures. Dans les induits en disque les coins d'entraînement doivent faire saillie sur les faces latérales; on les insère entre les couches de feuillard du noyau.

Frettes. — Quand le bobinage d'un induit est terminé, les conducteurs en doivent être maintenus en place par un certain nombre de

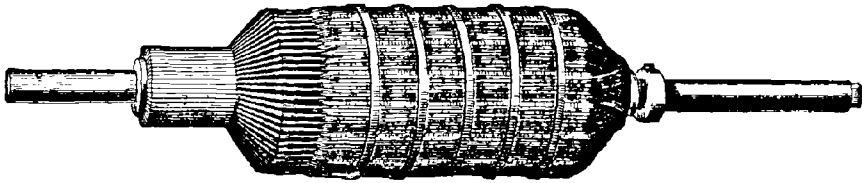


Fig. 253. — Induit complet en tambour (modèle Weston).

liens extérieurs connus sous le nom de *frettes*. Ces frettes doivent être très fortes, de manière à résister à l'action de la force centrifuge et à empêcher les conducteurs de céder aux efforts latéraux auxquels ils sont soumis dans le champ. Elles doivent en même temps occuper très peu de place en épaisseur radiale, l'espace entre les conducteurs et les faces polaires devant être aussi réduit que possible. Les constructeurs emploient à cet effet les uns du laiton étiré dur; les autres du bronze phosphoreux; d'autres enfin de l'acier. On se sert presque invariablement dans la pratique de fil étamé qui, après enroulement, peut être soudé de manière à former une sorte de ruban continu. Il n'est pas possible de fixer de règles pour les dimensions des frettes. Pour le fil d'acier une dimension assez usuelle est celle d'un fil d'un peu moins d'un millimètre de diamètre. Le fil est roulé en bandes de 10 à 30 tours chacune en largeur, les bandes étant elles-mêmes espacées de 2, 3 à 5 centimètres l'une de l'autre. Sous chacune de ces frettes il faut avoir soin de placer une bande isolante. On la forme habituellement de deux couches :

la première est une bande de fibre vulcanisée mince, un peu plus large que la frette de fils, la seconde est composée de petites lames de mica mises bout à bout et à peu près de la même largeur que la précédente. Quelques constructeurs mettent sous chaque frette un mince ruban de laiton dont les extrémités peuvent être renversées et soudées de manière à empêcher les deux bouts du fil de se dérouler. La figure 253 représente un induit en tambour de Weston complètement terminé (à comparer avec la figure 242, page 333) sur lequel on voit cinq rangs de frettes.

M. Esson dit que MM. Paterson et Cooper emploient trois dimensions de corde à piano en acier de 45, 50 et 65 millimètres de diamètre respectivement. Sur un induit en tambour de 25 centimètres de diamètre et de 30 centimètres de longueur, ils mettraient six frettes en fil de 45 millimètres, ayant chacune environ 1^m,5 de largeur et formée de trois fils à peu près; les frettes seraient ainsi à un peu moins de 37 millimètres d'intervalle l'une de l'autre. Sur un tambour ou un anneau de 50 centimètres de diamètre ils mettraient du fil de 9 millimètres, en frettes de 12 millimètres de large placées à 5 centimètres d'intervalle.

BOBINAGE DES INDUITS

Etant donné un des schémas étudiés au Chapitre XII, il s'agit de voir comment on réalisera à l'atelier le bobinage qu'il indique. Nous nous occuperons d'abord des bobinages en anneau pour passer ensuite à ceux en tambour. Quant aux bobinages en disque pratiqués par Desroziers et par Fritsche, ils ont été suffisamment considérés page 326.

Il y a une grande distinction à faire entre les induits enroulés de fil et ceux formés de sections composées de barres reliées par des connecteurs, ou de sections établies d'avance séparément, puis rapportées, au lieu d'être directement roulées, sur le noyau. Les induits enroulés de fil s'appliquent ordinairement à des débits inférieurs à 200 ampères, comprenant toutes les machines d'éclairage par arc. Pour les induits dont le débit doit dépasser 200 ampères on emploie plus généralement des barres de cuivre, à cause du peu de flexibilité des fils nécessaires au passage de courants aussi intenses. Ces deux classes d'induits comprennent plusieurs variétés ci-après énumérées :

INDUITS A FILS

Fil rond unique.
 Deux ou plusieurs fils menés parallèlement.
 Fil toronné.
 Fil carré unique.
 Fil rectangulaire unique.
 Conducteur laminé en bandes.

INDUITS A BARRES

Barres rondes.
 Barres rectangulaires.
 Bandes rectangulaires imbriquées.
 Barres rectangulaires de fil toronné et comprimé.
 Formes forgées spéciales.

Un fil rond unique, à deux guipages de coton, verni ensuite à la gomme-laque, est couramment adopté pour les petites machines et les dynamos à arcs. — Pour les petites machines à galvanoplastie on emploie fréquemment plusieurs fils ronds conduits parallèlement et comprenant jusqu'à vingt ou trente fils distincts groupés ensemble côte à côte. — L'étirage au banc fournit des fils à section rectangulaire de toutes dimensions; mais, pour avoir une plus grande souplesse au bobinage, on leur préfère généralement un conducteur rectangulaire formé de trois ou quatre bandes distinctes juxtaposées, puis revêtues d'un ruban qui les maintient assemblées. Ce genre de conducteur est employé depuis plusieurs années dans les dynamos de Holmes. Il a l'avantage d'éliminer partiellement les courants parasites dans les conducteurs eux-mêmes.

Pour les induits à barres on emploie des barres rectangulaires placées de champ sur le noyau, plus souvent que des barres rondes. Mais ces induits à barres massives donnent lieu à de sérieuses pertes d'énergie qu'on ne rencontre pas avec les induits enroulés de fil. Quand les conducteurs ont une largeur considérable, il s'y développe des courants parasites lorsqu'ils entrent dans le champ magnétique ou qu'ils le quittent, en raison de ce fait qu'un des angles de la barre peut être amené à couper une partie du champ dont l'intensité n'est pas la même que celle d'une autre partie coupée en même temps par le bord opposé de la même barre. Si l'on suppose une vitesse périphérique de 520 à 550 mètres par minute, il est pratiquement impossible, quelque forme que l'on donne aux angles polaires, d'éviter un échauffement excessif de barres de cuivre massif sur l'induit, si leur largeur dépasse 5 millimètres. L'énergie absorbée par la production de ces courants parasites peut même réduire de plus de 5 p. 100 le rendement de la machine. Le même phénomène ne se présente pas pour les induits dont les barres sont profondément engagées dans des dents ou passent à

travers des trous pratiqués dans les disques du noyau. Pour réduire ces pertes, on a essayé des barres faites de plusieurs lames oxydées à la surface, ou légèrement isolées à l'huile ou au vernis, et réunies seulement par leurs extrémités. Crompton ¹ a proposé différentes manières de tordre ou de tresser ensemble deux ou plusieurs bandes, de manière à neutraliser plus efficacement les courants parasites. Plus récemment d'autres constructeurs et lui ont employé des barres faites de fils toronnés, comprimés ensuite en forme de barres à section rectangulaire, chaque fil étant d'ailleurs préalablement oxydé ou légèrement isolé.

Il existe encore un autre mode de construction d'induit, ultérieurement décrit, qui consiste à bobiner les bandes ou fils isolés sur des formes ou des moules spéciaux, pour en former des sections séparées que l'on pose ensuite sur le noyau. Un des avantages de ce mode de procéder réside dans la grande facilité qui en résulte au point de vue



Fig. 254. — Isolement alterné de fils de bobinage.

du parfait isolement entre les parties de l'enroulement situées à des différences de potentiel considérables l'une par rapport à l'autre. Dans les induits en tambour, si les conducteurs sont bobinés en une seule couche, il existe une très grande différence de potentiel entre chaque conducteur et son voisin immédiat. Si, au contraire, le bobinage est fait en plusieurs couches, on peut intercaler entre celles-ci une feuille de matière isolante. On a également proposé, même pour les bobinages en une seule couche, d'interposer une feuille isolante, comme dans la figure 254, pour séparer les deux séries de conducteurs.

Après achèvement du bobinage, on passe ordinairement sur les induits en fil du vernis à la gomme-laque ou une solution de caoutchouc. Finalement on les sèche soigneusement, après vernissage, dans une étuve chauffée à la vapeur.

Bobinage des anneaux. — Quand un noyau d'anneau est prêt à recevoir son bobinage, on trace habituellement sur ses faces latérales un certain nombre de rayons correspondant à la largeur des différentes sections, de manière à guider le bobineur dans son travail.

Le bobinage en anneau se prête peu, en général, aux erreurs. Une

¹ Voir *Journal Institution Electrical Engineers*, XIX. 240, 1890.

certaine surveillance est néanmoins nécessaire. Chacune des « sections » est presque invariablement bobinée séparément sur le noyau : ses extrémités sont laissées libres et provisoirement réunies deux à deux par un mode d'attache quelconque ; on les relie ultérieurement ensemble et au collecteur. Un ouvrier inexpérimenté peut aisément se tromper

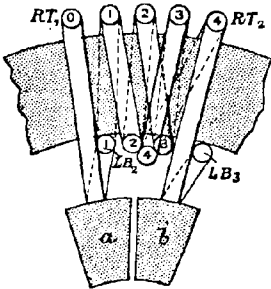


Fig. 255.

Diagramme de bobinage.
Induit en anneau.

RT = *Right Top* = Droite en haut.
LB = *Left Bottom* = Gauche en bas.

dans les connexions, et faire un bobinage sinistrorsum au lieu d'un bobinage dextrorsum ou *vice versa*. Aussi est-il bon de lui fournir un dessin d'exécution analogue à celui de la figure 255, qui représente un bobinage dextrorsum à quatre spires par section. Le fil marqué « 0 » est le dernier ou le bout extérieur de la section qui précède celle considérée. Ce bout est destiné à être ramené à une touche *a* du collecteur pour se relier par elle au commencement, ou bout de gauche en bas, marqué *LB*₂, de la section en question. D'après ce diagramme, le bobineur verra que le fil *LB*₂ doit être conduit à l'arrière de l'anneau en

passant par-dessous et revenir en avant par le dessus, faisant ainsi la spire n° 1. Il le courbera ensuite en l'inclinant vers la droite et le passant par-dessous, et le ramènera en avant par-dessus, en effectuant la spire n° 2 ; de même pour le n° 3 ; mais, comme l'espace libre à l'intérieur de l'anneau est plus étroit que l'espace correspondant de la périphérie extérieure, la spire n° 4 devra probablement monter sur les spires précédentes en s'engageant un peu dans l'interstice qu'elles laissent entre elles. Le bout de droite à la partie supérieure, marqué *RT*₂, sera ultérieurement relié à la touche *b* du collecteur. Si l'on montre au bobineur que le bout supérieur droit d'une section se relie à la spire inférieure gauche de la section suivante par la touche du collecteur, toute erreur de sa part sera inexcusable. — Le bobinage des anneaux multipolaires est absolument semblable, à la condition que le collecteur doive recevoir autant de balais qu'il y a de pôles.

Pour les induits de machines à haute tension qui comportent en général par section un grand nombre de fils relativement fins, il est commode de couper le fil en longueurs exactes correspondant à une section, et de rouler chacun de ces bouts sur de petites navettes, au nombre de deux pour chaque longueur, dont on se sert alternativement pour appliquer les couches successives. De cette façon les deux

extrémités du fil qui constitue une section se trouvent à l'extérieur, au lieu que l'un des bouts reste intérieurement, au-dessous de la couche du fond, comme dans une bobine ordinaire.

Pour les machines qui n'exigent par section qu'une ou deux spires complètes, on prépare ordinairement d'avance les conducteurs de cuivre sur des mandrins séparés et on les recouvre de leur isolant, de manière

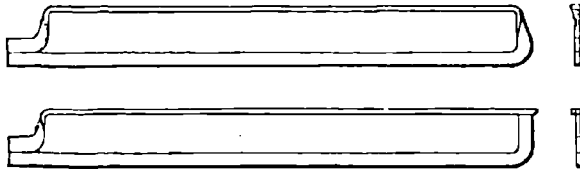


Fig. 256. — Éléments de bobinage des induits Crompton (1886).

à n'avoir plus qu'à les glisser sur le noyau. Crompton a introduit les formes représentées dans la figure 256 ; elles sont constituées par du cuivre étiré, de section à peu près rectangulaire, tordu sur lui-même d'un quart de tour à chaque extrémité, de manière à se caser facilement à l'intérieur de l'anneau. On glisse sur la surface du noyau ces conducteurs, en les isolant convenablement les uns des autres, et on les couple ensuite de manière à leur faire constituer un bobinage continu.

Dans les grandes dynamos multipolaires à anneau, avec système inducteur interne et collecteur extérieur, très employées aujourd'hui en Allemagne pour les stations centrales, le bobinage est fait de telle sorte

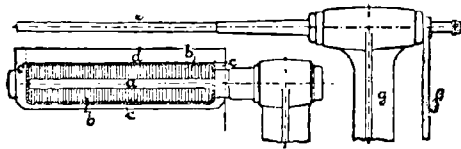


Fig. 257. — Construction d'induit en anneau multipolaire de Fritsche.

que sa partie extérieure sert en même temps de collecteur comme dans la figure 337. Le noyau est formé de segments de disques, représentés en section *b* dans la figure 257, et soutenus par des axes d'entraînement *a* qui les traversent. Après les avoir recouverts d'un isolant convenable, on glisse sur eux les conducteurs de cuivre *cd* que l'on couple de manière à en faire un enroulement en hélice continue. La matière isolante interposée dans la maison Siemens et Halske, qui a introduit ce type de machines, est un papier spécialement préparé. La

partie extérieure *d* du conducteur de cuivre est à la fois épaisse et large et sert de touche de collecteur. Les balais (que n'indique pas la figure) sont fixés sur la monture *e* en porte-à-faux au-dessus de l'induit, et effleurent la périphérie extérieure des conducteurs de cuivre de l'anneau. En *f* est un levier qui permet de relever les balais pour les mettre hors de contact.

Bobinage des tambours. — Les induits en tambour de tous types peuvent être, d'une manière générale, regardés comme des modifications de l'induit universellement connu sous le nom de bobine Siemens en navette ou en double T et à enroulement longitudinal, dont les sections ont été multipliées de manière à assurer la continuité pratique du courant. Le type en tambour a été imaginé en 1872 par von Hefner-Alteneck, de la maison Siemens et Halske, de Berlin. Dans ce système, comme dans l'anneau Gramme, les « sections » successives ou bobines élémentaires qui recouvrent le noyau sont reliées les unes aux autres d'une façon continue, la fin de l'une et le commencement de la suivante étant tous deux réunis à une touche du collecteur. Il est important de bien se rendre compte de la différence qui existe entre ce type de bobinage et le bobinage en anneau. Dans un bobinage en anneau les volts induits dans une section quelconque (à une vitesse donnée) ne dépendent que du champ magnétique créé d'un côté de l'induit ; tandis que dans un bobinage en tambour, les volts induits dans une section quelconque dépendent des deux inducteurs placés en regard, attendu que chaque section enveloppe le tambour à peu près diamétralement. Il en résulte que les induits en tambour sont moins sujets à donner des étincelles, et qu'ils ont une moins grande self-induction que les induits en anneau.

Les avantages de la forme tambour paraissent être les suivants : — (1) à dimensions égales ils demandent un peu moins de fil que les induits en anneau ; (2) ils sont moins sujets à de fausses inductions, et par suite plus indépendants de la forme des pièces polaires ; (3) ils ont moins de tendance à l'aimantation transversale que les induits en anneau. Par contre, on leur oppose jusqu'ici les inconvénients suivants : — plus grande difficulté (1) de construction ; (2) de bonne isolation, par suite du chevauchement des conducteurs les uns sur les autres ; (3) de ventilation ; (4) de réparations.

Tambour Siemens. — Dans quelques-uns des premiers types de machines Siemens, les carcasses des armatures cylindriques étaient en

bois et recouvertes circonférentiellement de fil de fer avant de recevoir l'enroulement longitudinal en fil de cuivre ; dans d'autres, le tambour était creux et tournait autour d'une âme en fer immobile ; d'autres machines enfin avaient leur bobine complètement dépourvue de fer, à l'exception de l'arbre qui l'entraînait.

Le mode de construction de l'armature, pratiqué jusqu'en 1885, est représenté par la figure 258. — Sur l'arbre sont assujettis, au moyen de goupilles, deux robustes tourteaux de bronze qui forment les bases

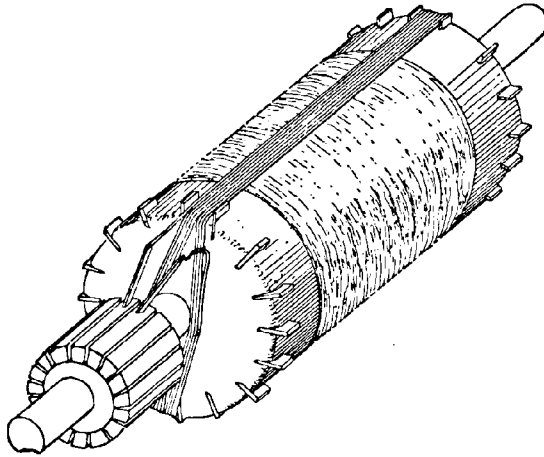


Fig. 258. — Mode d'enroulement de l'induit Siemens.

de la carcasse cylindrique. Entre ces tourteaux est roulée une feuille de tôle mince fixée sur des épaulements réservés à cet effet sur leur bord interne ; autour de cette carcasse est roulée une grande masse de fil de fer doux, qui constitue l'âme de la bobine comme dans l'anneau Gramme. Des entailles en nombre égal à celui des sections que doit avoir la bobine sont pratiquées sur les bords des faces extérieures des tourteaux en bronze ; on y loge de petites séparations en buis pour faciliter l'enroulement. Quant au bobinage même des sections, il est fait de la manière suivante : — Le fil est conduit le long du cylindre comme le montre la figure, quatre spires passant à gauche de l'arbre et quatre à droite ; de là il est renversé sur lui-même pour aboutir à la lamelle qui le relie à la seconde touche du collecteur. La section suivante part de cette même lame et est conduite de même ; mais, avant de procéder à son enroulement, on fait tourner le cylindre d'un demi-tour sur lui-même et la section diamétralement opposée à la section n° 1 est

roulée comme précédemment par-dessus les huit premières spires déjà placées. Ainsi, dans une armature en 16 sections, la section n° 9 se trouve surperposée à la section n° 1, la section n° 10 à la section n° 2, et ainsi de suite, le cylindre étant sur toute sa surface recouvert de deux couches de bobines distinctes. Ces deux couches doivent être sur toute leur longueur soigneusement isolées l'une de l'autre de manière à éviter tout contact possible entre des parties situées à des potentiels très différents. Pour faciliter l'intelligence des connexions, on a représenté le collecteur en place sur l'arbre dans

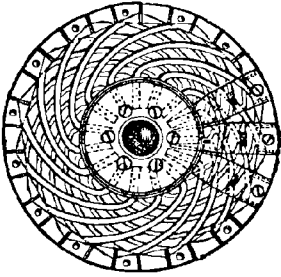


Fig. 259.

Induit à barres de Siemens.
Connexions terminales.

la figure 258 ; il n'est cependant réellement posé qu'après l'enroulement complet de toutes les sections ; les extrémités des fils sont, en attendant, respectivement tordues ensemble jusqu'à ce qu'elles puissent être soudées aux lamelles de cuivre les reliant au collecteur. Dans certaines armatures de machines destinées à l'électro-métallurgie, les couches de fil sont au nombre de quatre, et les fils reliés parallèlement par quatre ou huit à la fois, de manière à présenter une résistance moindre.

Jusqu'ici tout est simple ; mais lorsqu'on passe à la construction d'induits à barres, il surgit de nouvelles complications.

Le mode de liaison des conducteurs d'un induit à barres transversalement aux bases d'un tambour n'est pas chose aussi aisée qu'on pourrait le croire au premier abord. Supposons qu'on ait préalablement dessiné un schéma de connexions dans le genre de l'un de ceux décrits au Chapitre XII et qu'on ait dressé un tableau de bobinage indiquant l'ordre des connexions finales ; il reste encore à déterminer le moyen pratique de réaliser ces connexions finales d'une façon compatible avec les conditions de fonctionnement. Les lames de connexion doivent être bons conducteurs et suffisamment bien isolées l'une de l'autre ; elles doivent permettre des réparations et une ventilation faciles et offrir comme solidité mécanique toute sécurité. Les tambours roulés de fil présentent à leurs extrémités un enchevêtrement disgracieux de fils qui arrête toute ventilation et empêche les réparations. Dès le début, MM. Siemens imaginèrent pour leurs machines à galvanoplastie ou à très grand débit un système de spirales reliant les extrémités des barres de cuivre. Pour réunir une barre quelconque à la voisine de celle qui lui est diamétralement opposée, on employait deux

bandes de cuivre en spirales, ou plutôt une bande de cuivre divisée en deux sur presque toute sa longueur et dont les deux moitiés se recourbaient en sens inverse l'une de l'autre, comme l'indique la figure 259 ; leur jonction était mécaniquement assurée sur un bloc de bois manchonné sur l'arbre. Les extrémités de ces lames étaient fixées aux barres par une soudure à l'argent. A chaque extrémité du tambour, ces connecteurs en spirales formaient deux couches distinctes. Ces dispositions en spirales, plus ou moins modifiées, se retrouvent dans la plupart des induits modernes en tambour.

Tambour Edison. — Dans la modification apportée par Edison à l'armature en tambour, l'enroulement, bien que symétrique à un certain point de vue, présente cette singularité que le nombre des sections en est impair. Dans les premières machines, le collecteur était à sept sections, comme l'indique la figure 207, page 307, relevée dans la spécification du brevet anglais d'Edison. Dans ses dernières machines

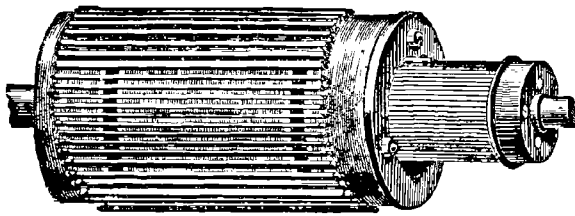


Fig. 260. — Induit de la machine Edison.

géantes de 1883, directement actionnées, le nombre des sections est de quarant-neuf. Il résulte de cette particularité de construction que, si les balais sont diamétralement opposés l'un à l'autre, l'un d'eux touche le milieu d'une lame du collecteur au moment où l'autre passe d'une lame à l'autre. L'armature de ces grandes machines d'Edison est formée de barres de cuivre massives disposées suivant les génératrices d'un noyau composé de disques de tôle séparés par du mica ou du papier. La figure 260 représente l'armature enlevée de la machine. Les extrémités des barres de cuivre sont reliées transversalement par des rondelles ou disques de cuivre isolés l'un de l'autre, et munis d'oreilles auxquelles sont fixées les barres de cuivre. Ces disques offrent beaucoup moins de résistance que de simples bandes métalliques. Le diagramme de la figure 261 permet de se mieux rendre compte de la manière dont sont établies les connexions. Elles sont faites dans l'ordre suivant : — Chacune des 49 touches du collecteur est reliée à

l'un des 49 disques correspondants situés à la partie antérieure de la bobine ; ce disque est lui-même relié, par une sorte de dent en saillie, à l'une des 98 barres de cuivre. Le courant engendré dans cette barre — par exemple dans la plus haute des trois barres représentées dans la figure 261 — est conduit par elle à l'extrémité opposée de la machine ; là, il pénètre dans l'un des disques qui y sont disposés, le traverse et revient par une barre diamétralement opposée à celle qui lui a servi de point de départ. L'extrémité antérieure de cette barre est reliée à l'une des dents, non pas du disque voisin, mais du suivant par rapport à celui par lequel nous avons commencé à indiquer les connexions ; elle rejoint par ce disque non pas la barre voisine, mais la suivante par rapport à celle considérée en premier lieu, et ainsi de

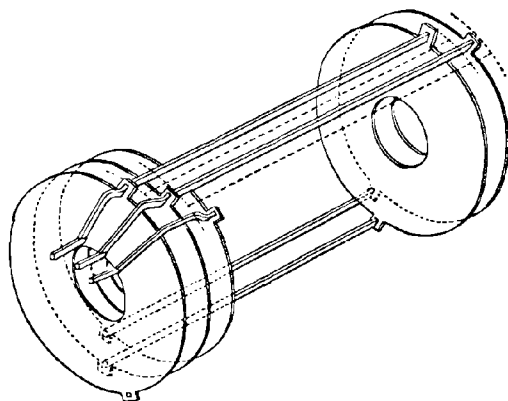


Fig. 261. — Connexions d'un induit Edison.

suite. Les deux dents saillantes de chacun des disques à la partie antérieure ne sont pas, en conséquence, diamétralement opposées l'une à l'autre ; les connexions avancent d'un quarante-neuvième de la circonférence à chacune des quarante-neuf spires. Pour simplifier le dessin, on a représenté seulement par des lignes ponctuées les disques et les barres alternés avec ceux indiqués en plein. Les deux barres représentées à la partie inférieure étant précisément les barres de retour des courants venant des barres supérieures, il doit également exister, à la partie supérieure, des barres de retour pour les courants provenant des barres (non représentées dans la figure) qui partent des segments de la moitié inférieure du collecteur. Les lignes ponctuées indiquent la position de ces barres de retour.

Mécaniquement la construction est excellente ; mais elle ne comporte pas de ventilation, et la dispersion du champ aux extrémités de l'induit est susceptible de développer des courants parasites dans la substance des disques de cuivre.

Tambour Edison-Hopkinson. — Dans les induits Edison-Hopkinson construits par Mather et Platt, la disposition d'Edison a été abandonnée en faveur d'un système de connecteurs en spirales déjà décrit pages 296 et 351. La construction de l'induit Hopkinson, telle qu'elle est pratiquée pour une machine ne comportant qu'une seule spire conductrice par section, est indiquée par la figure 262.

Le noyau, qui vient buter contre un épaulement réservé dans l'arbre, est formé d'un grand nombre de rondelles de fer, dont quelques-unes

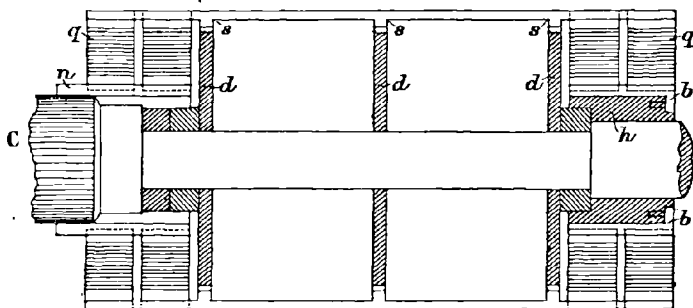


Fig. 262. — Section de l'induit en tambour d'Hopkinson.

plus épaisses, $d d$, sont montées aux extrémités et à certains intervalles sur la longueur. Elles sont serrées l'une contre l'autre par des écrous vissés du côté du collecteur C. Entre les conducteurs de cuivre sont disposées des pièces d'entraînement en saillie, $s s$, qui, convenablement isolées, s'engagent dans des entailles découpées dans les rondelles épaisses. On voit en $q q$ les systèmes de connecteurs en spirales représentés en section. Du côté du collecteur ces connecteurs se terminent à la partie inférieure par un ensemble de lames de cuivre n , qui aboutissent elles-mêmes aux touches correspondantes du collecteur. A l'autre extrémité, les spirales sont greffées dans une série de lames de cuivre b montées autour d'un manchon en bois h qui les entraîne, et sur lequel elles sont vissées par leurs oreilles terminales. Les induits, dont chaque section comporte deux spires, exigent deux couches de connexions en spirales à chaque extrémité.

Tambours Crompton et Swinburne. — M. Crompton a successivement essayé un grand nombre de modes de connexions pour tambours. En collaboration avec M. Swinburne il a réalisé, pour connecter les conducteurs d'un induit en tambour, une disposition qui permet la ventilation du noyau. Les éléments essentiels de cette construction sont indiqués par le schéma simplifié des figures 263 et 264. Il n'y a qu'une seule couche de conducteurs à l'extérieur du noyau, et ces conducteurs sont constitués par un fil de cuivre, de section rectangulaire plate, posé sur champ. Chacun de ces conducteurs successifs est ramené radialement de deux en deux jusqu'à une certaine distance

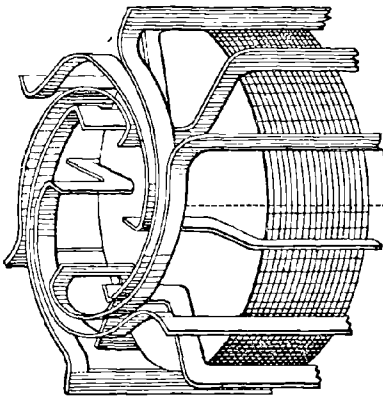


Fig. 263.

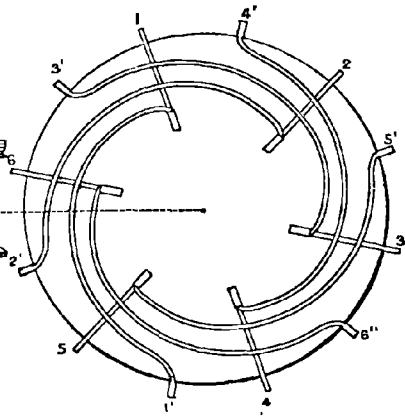


Fig. 264.

Diagramme du mode de bobinage en tambour de Crompton et Swinburne.

du centre, puis renversé vers l'extérieur parallèlement à l'axe du tambour. Les conducteurs intermédiaires dépassent un peu plus la longueur du noyau et reçoivent la même forme que les précédents. Cette disposition a pour résultat de constituer deux séries concentriques de bouts libres. Les connexions sont faites par des lames de cuivre recourbées en spirales, allant des extrémités de l'un des conducteurs de la série extérieure à l'un des conducteurs de la série rentrante, par exemple à celui qui est voisin du point diamétralement opposé au premier sur la périphérie. Dans les figures 263 et 264 qui représentent les connecteurs sur l'une des bases d'un induit simple à six sections (le collecteur à six touches situé à l'autre extrémité n'est pas indiqué), le conducteur 1 est relié de la façon indiquée au conducteur 1'. A l'autre extrémité du conducteur 1' (qu'on ne voit pas) il y aurait un connec-

teur transversal semblable à celui de l'extrémité (représentée) du conducteur 2, et l'extrémité visible de 2 est reliée à 2' ; et ainsi de suite. Le même mode de connexion à l'aide de lames en spirales peut encore être appliqué au bobinage suivant une corde plus petite, comme dans le schéma de polygone étoilé donné par Swinburne (p. 294). Cette manière d'effectuer les connexions avec des spirales de cuivre diffère de celle adoptée pour les machines Siemens à galvanoplastie (fig. 259, p. 350), par l'emploi de pièces contournées en forme de

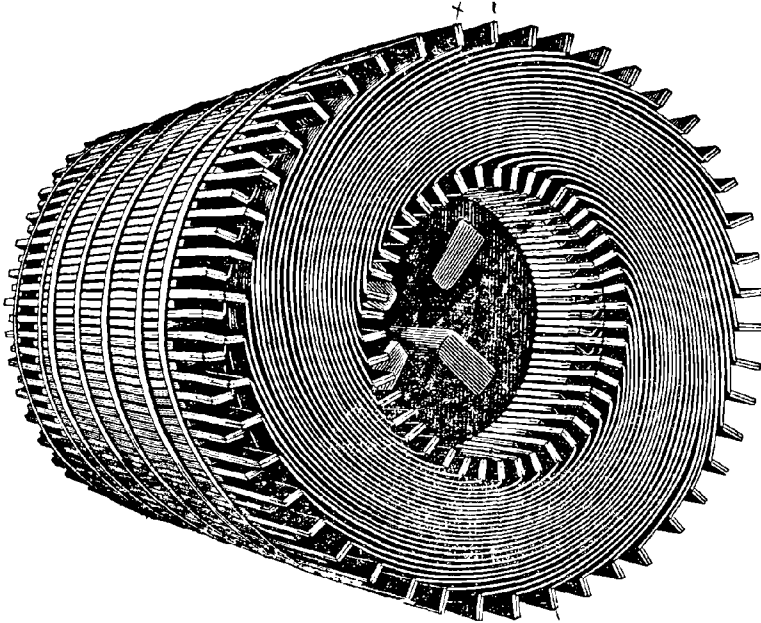


Fig. 265. — Induit en tambour de Crompton et Swinburne.

manivelle. Dans la construction actuelle des grands induits en tambour, l'application du système Crompton et Swinburne est beaucoup plus compliquée, en ce qu'il est impossible, avec un très grand nombre de conducteurs, d'arriver à loger toutes les spirales en un seul jeu. On a recours, en conséquence, à deux couches séparées de connecteurs en spirales ; les bouts libres des conducteurs en attente aux extrémités du tambour sont, eux aussi, tenus alternativement longs et courts ; les bouts longs sont reliés par une couche de spirales et les bouts courts par une autre couche. L'induit ainsi construit est représenté par la figure 265. La difficulté d'atteindre les spirales intérieures dans ce mode de construction a conduit Crompton et Kyle à

une autre idée qui consiste à renverser vers l'extérieur, et non vers l'intérieur, les connecteurs en spirales aux extrémités du tambour, dont le diamètre se trouve ainsi augmenté.

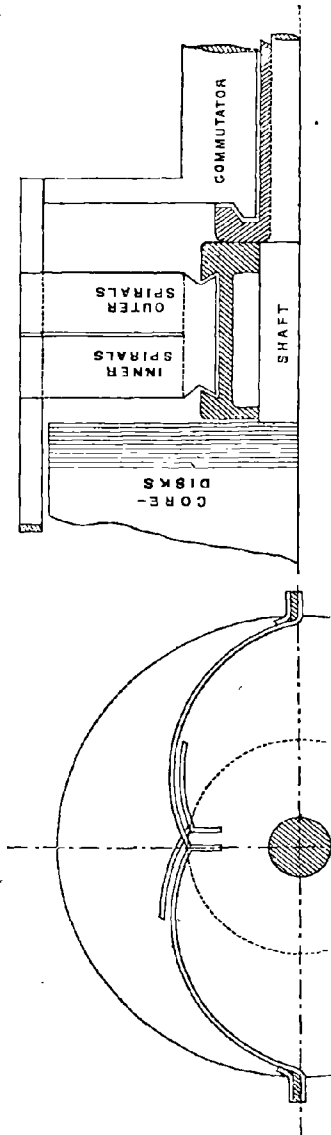


Fig. 266. — (Crompton) Bobinage en tambour de machine bipolaire pour stations centrales.

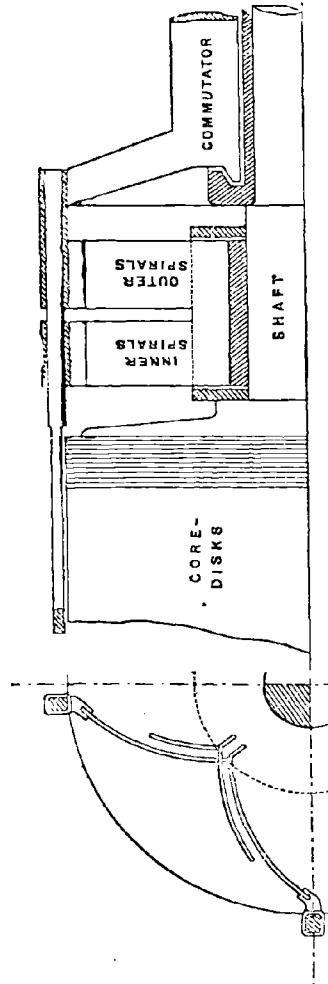


Fig. 267. — (Crompton) Bobinage en tambour pour grand débit. — Machine à 4 pôles (connexions en parallèle), 4 jeux de balais.
Core Disks = Disques de noyau. — *Inner Spirals* = Spirales internes. — *Outer Spirals* = Spirales externes.
Commutator = Collecteur. — *Shaft* = Arbre.

Les procédés employés actuellement par Crompton pour les induits en tambour sont schématiquement indiqués par les figures 266 et 267.

Dans la première de ces figures qui se réfère à une machine bipolaire les connecteurs en spirales, estampés dans une feuille de cuivre, sont mécaniquement entraînés par leur fixation à un manchon à emboîtement claveté sur l'arbre. Dans la seconde qui a trait à une machine à 4 pôles les connecteurs en spirales étant plus courts n'ont pas besoin d'être montés de la même manière. Les conducteurs sont formés de fil toronné auquel on a donné par compression une section rectangulaire.

Tambour Kapp. — Kapp se sert, aussi bien pour ses machines bipolaires que pour ses machines multipolaires, d'une méthode basée sur celle de Paris et Scott. Les connecteurs sont estampés dans une feuille de cuivre en forme d'arcs semi-circulaires ou de quadrants à dents en saillies tels qu'on les voit sur la figure 252, page 340 ; ces connecteurs peuvent être recourbés l'un en avant, l'autre en arrière, ce qui permet de les relier par toute une série de lames connectrices montées en scie, convenablement isolées, dans un équipage ou une bobine ajustée sur l'arbre. Les lames connectrices sont assemblées entre elles en nombre convenable et maintenues par des frettes dans la cannelure de cet équipage, que l'on met alors en place ; et les dents en saillie sont soudées dans des rainures pratiquées aux bouts des conducteurs de l'induit qui sont, à cet effet, maintenus alternativement longs et courts. La meilleure manière de se rendre compte de cette disposition est de fabriquer à la main quelques modèles de lames connectrices en papier ou en carton et de les placer l'une sur l'autre.

Tambour Eickemeyer. — Le mode de construction d'Eickemeyer

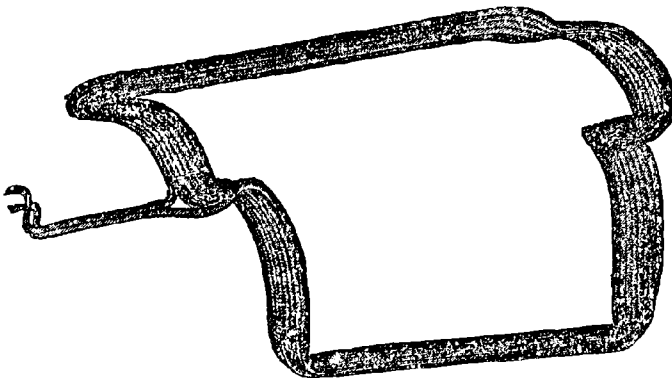


Fig. 268. — Bobine élémentaire d'induit Eickemeyer.

diffère du précédent en ce qu'il est applicable à la fois aux tambours

bobinés de fil et à ceux bobinés avec des bandes de cuivre. Ici chaque section, qu'elle comporte une ou plusieurs spires, est d'abord mise en forme sur une matrice spéciale, puis isolée séparément. La figure 268 indique la forme donnée aux sections. La partie inférieure constituera,

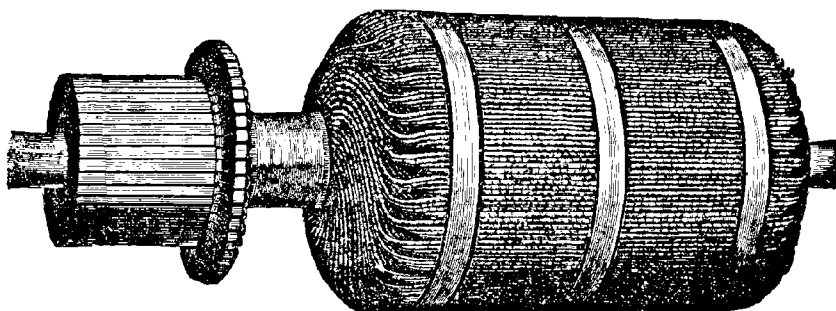


Fig. 269. — Induit Eickemeyer complet.

quand l'enroulement sera mis en place, une couche intérieure, et la partie supérieure, qui est plus longue, une couche extérieure de l'induit monté. On voit dans la figure 269 l'induit complètement terminé, avec ses frettes. Le collet réservé entre le tambour et le collecteur est nécessité par la forme des inducteurs (fig. 127, p. 197) adoptés dans cette machine. Le bobinage Eickemeyer a été également utilisé dans les nouvelles machines de la Compagnie Edison¹.

Tambour Alioth. — La figure 370 représente un induit en tambour

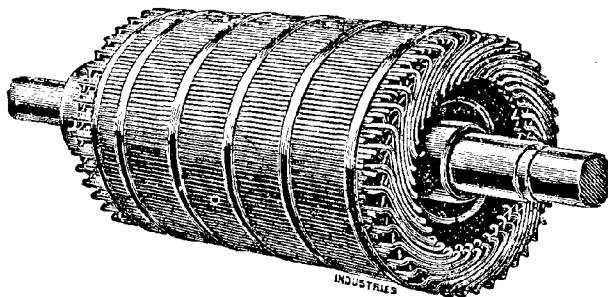


Fig. 270. — Induit en tambour d'Alioth.

d'Alioth, de Bâle, destiné à une machine à 4 pôles, et ayant à chaque extrémité quatre couches de spirales connectrices.

¹ Voir *Electrical World*, XVI, 249, 1890.

CHAPITRE XIV

COLLECTEURS, BALAIS ET PORTE-BALAIS

Les dynamos à courant continu exigent un *commutateur* (généralement appelé « *collecteur* ») et des *balais* destinés à la captation du courant. Nous avons déjà décrit (voir pp. 36 et 81) le rôle essentiel de ces organes ; et les causes de production d'étincelles sont étudiées au Chapitre IV, p. 80, et au Chapitre XVI. Nous avons maintenant à considérer l'étude et la construction de ces importants accessoires.

On peut distinguer trois types d'appareils pour la captation des courants sur les machines dynamos.

I. Les machines à courant continu à induit fermé, comme celles employées pour l'éclairage par incandescence et autres applications exigeant une différence de potentiel constante ou à peu près telle, sont munies d'un collecteur analogue à celui de Pacinotti, c'est-à-dire formé d'un grand nombre de touches parallèles, fixées à la périphérie d'un manchon isolant et présentant une surface cylindrique, contre laquelle viennent presser deux (ou dans certains cas plus de deux) balais ou jeux de balais fonctionnant par paires.

II. Les machines à courant continu à induit ouvert, pour éclairage à arc, donnant un courant constant ou sensiblement tel, comportent un collecteur formé d'un nombre relativement faible de segments, embrassant un angle d'une certaine étendue, et séparés l'un de l'autre par des intervalles d'air. On en trouvera la description au Chapitre XVII.

III. Les alternateurs à induits mobiles nécessitent une paire de bagues collectrices métalliques, pourvues chacune d'un ou de plusieurs balais, ou de toute autre disposition analogue, de manière à maintenir par glissement une connexion avec le circuit. Dans les alternateurs à inducteurs mobiles, un montage semblable s'impose pour conduire le

courant d'excitation aux bobines mobiles. Ce dernier cas est examiné à la fin du présent chapitre plus spécialement consacré aux appareils de la première des trois classes ci-dessus.

MACHINES A COURANT CONTINU

Collecteurs. — Touches. — Le nombre de touches du collecteur dépend du schéma de bobinage et du nombre de sections que comporte l'induit. La multiplication des touches diminue la tendance à la production d'étincelles (p. 83), ainsi que les ondulations du courant (p. 213). Un nombre pair de touches est préférable à un nombre impair; et, pour les induits en anneau, dont les noyaux sont généralement supportés par des étoiles à trois branches, il vaut mieux choisir pour ce nombre de touches un multiple de trois. Deux raisons pratiques s'opposent cependant à une trop grande multiplication des touches. Leur augmentation élève d'abord le prix de revient. En outre, dans les grandes machines, dont le bobinage ne comporte qu'une spire entre chaque touche du collecteur et la suivante, on ne peut en augmenter beaucoup le nombre sans dépasser le voltage voulu. Par exemple, dans la machine Edison-Hopkinson d'un débit de 1 100 ampères sous 103 volts, on n'a besoin que de 43 spires. D'autre part, on reconnaît pour les petites dynamos que, si on en augmente le nombre de touches, chacune d'elles devient tellement mince qu'un balai ayant l'épaisseur voulue pour capter le courant met en court-circuit plus de deux touches du collecteur à la fois. En outre, les touches doivent avoir une longueur proportionnée au nombre d'ampères qu'elles ont à livrer. La pratique moderne varie quelque peu à cet égard, mais on peut convenablement compter sur 3 centimètres environ par centaine d'ampères. Le mode d'attache des touches doit en laisser disponible la plus grande longueur possible. Il faut également leur donner une grande profondeur radiale pour parer à l'usure, le collecteur ayant besoin d'être tourné de temps à autre pour être maintenu cylindrique. Comme matière, la plupart des constructeurs emploient du cuivre étiré dur, en longues barres de profil convenable, coupées ensuite à la demande. Certains constructeurs américains se servent de pièces de cuivre forgé, estampées de forme, à queues inclinées pour les connexions avec les conducteurs de l'induit. Crompton, après avoir employé du bronze phosphoreux, se sert maintenant d'un alliage spécial de cuivre contenant une très petite proportion d'argent.

Isolation. — Il est indispensable d'avoir une bonne isolation entre chaque touche et ses voisines, et particulièrement entre les touches et

e tube ou manchon autour duquel elles sont montées, ainsi qu'entre les touches et les emboitements qui les maintiennent. La différence de potentiel est faible, en effet, entre deux touches voisines, mais elle est beaucoup plus considérable entre les touches et les autres parties métalliques. La substance isolante ne doit pas s'imprégner d'huile ni d'humidité; aussi doit-on proscrire l'amiante et le plâtre. Quoique excellents au point de vue mécanique, la fibre vulcanisée et le papier Willesden ne conviennent pas davantage. Le mica est la seule matière qui donne toute sécurité. Les collecteurs à intervalles d'air isolant les touches ont été employés par Ayrton et Perry, par Hochhausen, et par Siemens et Halske. Dans la machine Hochhausen le collecteur (fig. 271) était formé de touches en équerre fixées par des vis sur

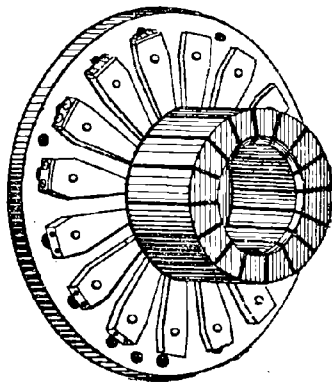


Fig. 271. — Collecteur de la machine Hochhausen.

un disque d'ardoise. L'inconvénient de l'isolation à air réside dans la difficulté de préserver les intervalles entre les touches de l'accumulation des poussières métalliques provenant de l'usure des balais.

Construction. — La figure 272 indique le mode de construction adopté par MM. Paterson et Cooper. Les touches sont maintenues à l'une de leurs extrémités par emboîtement dans une gorge conique pratiquée dans un manchon de bronze, et, à l'autre extrémité, par une rondelle extérieure emboîtée à frottement dur et serrée sur sa face dressée par une large rondelle à vis. L'isolation est assurée par des feuilles minces de mica interposées entre les touches et par des couches de mica et de fibre vulcanisée appliquées autour du manchon et des surfaces d'emboîtement. La bague emboîtée réduit dans ce cas la surface disponible pour les balais.

Dans les machines de la Compagnie Gülcher on a adopté un mode de construction représenté par les figures 273 et 274 et dont la figure 275 donne une coupe. Les dessins se rapportent à une machine à 4 pôles n'ayant que deux jeux de balais collecteurs. Ici également les touches du collecteur sont assemblées autour d'un manchon fixé sur l'arbre, mais montées de manière à laisser toute leur longueur disponible pour le contact avec les balais ; elles sont maintenues à leurs extrémités par

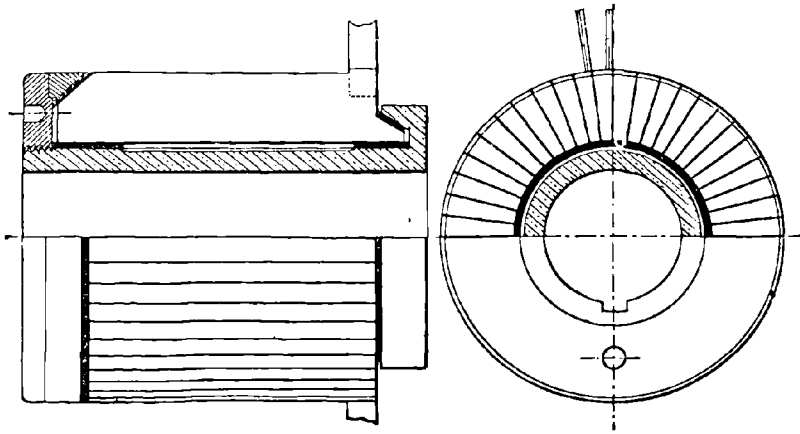


Fig. 272. — Collecteur Paterson et Cooper.

des gorges en forme de V dans lesquelles viennent s'emboîter des pièces tournées en conséquence, dont elles sont isolées.

La machine Kapp (fig. 252, p. 340) comporte une disposition tout à fait analogue, dans laquelle les gorges d'emboîtement aux extrémités des touches sont très profondes ; l'isolation terminale est assurée par trois bagues de fibre vulcanisée, l'une plate, les deux autres coniques, qui s'engagent dans les extrémités des touches une fois assemblées. Il est bon de réserver une longueur suffisante de surface isolante entre les touches et leur monture métallique ; en effet, dans le cas des isolateurs télégraphiques, on constate qu'une faute est moins à redouter quand, devant une perte possible sur une surface mal entretenue, il y a une assez longue distance à franchir, que quand cet espace est court.

Pour la construction des collecteurs on a coutume d'assembler les touches en nombre convenable, avec interposition de lames de mica, en les emboîtant provisoirement dans une bague de fer solide, ou en les forçant par pression hydraulique dans un moule annulaire en acier. On les met ensuite sur le tour pour forer la surface cylindrique intérieure.

Puis on dresse les faces extérieures en y pratiquant les gorges annu-

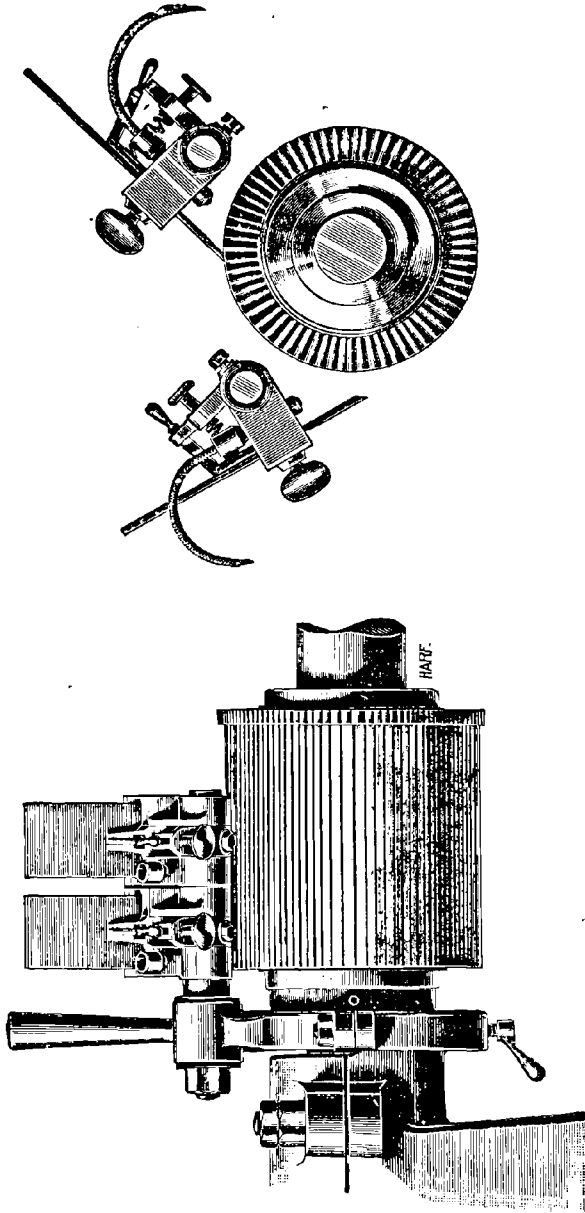


Fig. 273 et 274. --- Collecteur et porte-balais de la machine Güntcher à 4 pôles.

lares destinées à recevoir les pièces à emboîtement. On monte le tout, avec l'isolation convenable, sur le manchon, et l'on visse les pièces ter-

minales à emboîtement. On passe l'ensemble à l'étuve, et l'on serre de nouveau ces pièces terminales. Finalement on enlève la bague extérieure de montage provisoire et l'on tourne exactement la surface extérieure. Le manchon doit être solidement claveté ou autrement fixé sur l'arbre, de manière à ne permettre aucun glissement par rapport à l'induit auquel il est ultérieurement relié. Dans tous les types que nous venons de décrire, les connexions avec les conducteurs de l'induit sont établies au moyen de lames ou de fils de cuivre engagés dans une rainure pratiquée à l'un des coins de la touche ou à un appendice réservé à cet effet

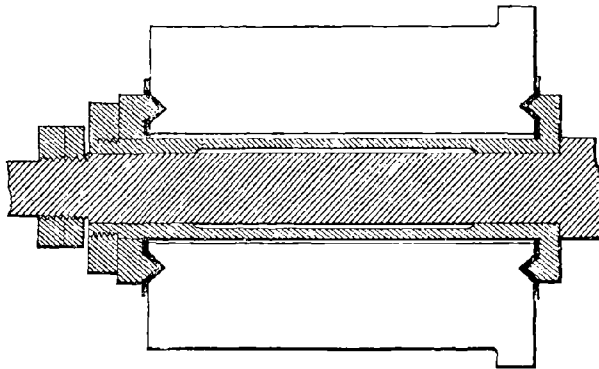


Fig. 275. — Collecteur Gülcher (Coupe).

et où ils sont solidement fixés. Cet assemblage se fait convenablement à l'aide de rivets réunissant les lames connectrices et les coins des touches, avant le montage de ces dernières; chaque rivure est en outre assurée par une soudure.

Il est important que ces lames de connexion soient solidement fixées, car elles ont à supporter, en travail, des efforts mécaniques considérables. Deux fois par tour, chacune d'elles porte un courant intense, et est soumise, grâce à une certaine dispersion du champ magnétique, à un effort d'arrachement dans un sens déterminé.

Avant de s'être bien rendu compte de cet effet, on a eu de ce chef de fréquents accidents.

Dans quelques grandes machines récentes, il n'y a pas de collecteur distinct, les balais frottent sur une partie des conducteurs mêmes de l'induit. Tel est le cas de la grande dynamo Siemens (fig. 257 et 357), de la machine multipolaire de la Compagnie Edison et de la dynamo Willson.

Balais. — Le genre de balais le plus employé pour capter les courants sur le collecteur se compose d'une certaine quantité de fils de cuivre droits, placés côte à côte, soudés ensemble à l'une de leurs extrémités et maintenus dans une gaine convenable. La multiplicité des points de contact assurée par ce mode de construction est avantageuse en ce qu'elle réduit les étincelles. On réunit souvent ainsi en un seul balai deux couches de fils, comme l'indique la figure 276 *a*.

On forme également des balais avec des bandes de cuivre élastique d'une certaine largeur, fendues de distance en distance de manière à

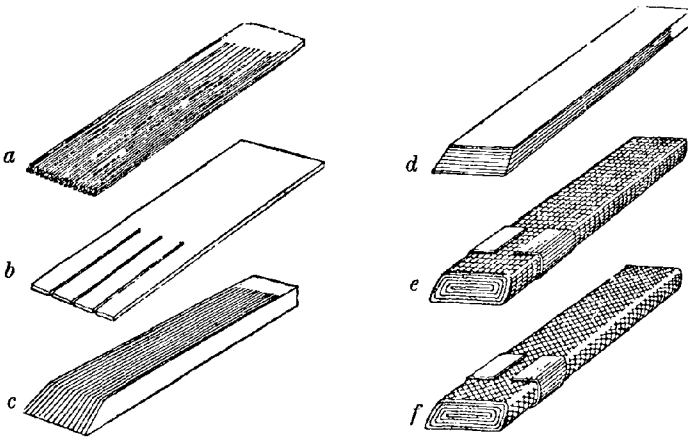


Fig. 276. — Balais divers.

leur permettre de faire contact par plusieurs points (fig. 276 *b*). Tels sont ceux employés dans les machines Brush et Thomson-Houston pour lumière à arc. Ce genre de balai est ordinairement appliqué tangentiellement à la surface du collecteur, au lieu de reposer sur elle par son extrémité, sous un certain angle, comme lorsqu'on a affaire à des sortes de balais plus épais.

Edison a employé comme balais un certain nombre de petites lames de cuivre portant de champ sur le collecteur, et soudées à plat l'une à l'autre par leur extrémité la plus éloignée du collecteur (fig. 276 *c*). Ici encore, l'objectif était de subdiviser l'étincelle au contact. Dans un certain nombre de machines Edison, on a adopté un balai mixte, formé alternativement de couches de fil comme dans la figure 276 *a*, et de bandes de cuivre refendues comme dans la figure 276 *b*.

D'autres constructeurs ont fait usage d'un grand nombre de lames de cuivre très minces superposées comme dans la figure 276 *d*, toujours

soudées par une de leurs extrémités et maintenues ensemble dans une gaine convenable.

Pendant ces dernières années les balais en toile métallique ont été à la mode ; ils étaient faits de toile métallique en cuivre roulée sur elle-même et comprimée, comme dans la figure 276 *e*. Pour éviter l'effilochage à la partie antérieure, on roule habituellement la toile obliquement, comme dans la figure 276 *f* ; l'usure est alors plus uniforme. Les balais rotatifs en forme de galets ou disques métalliques ont été d'abord employés par Holmes (voir p. 11), et également essayés par Gramme ; d'autres ont été proposés par sir W. Thomson et par M. C. F. Varley.

Le professeur G. Forbes¹ a imaginé de remplacer le balai par une tablette de charbon à grain fin, bon conducteur. Ces balais en charbon sont en effet aujourd'hui fréquemment employés tant pour les dynamos que pour les moteurs.

On a l'habitude, sauf pour les petites machines, de mettre au moins deux balais l'un à côté de l'autre, comme dans la figure 273, page 363, au lieu d'un seul balai plus large, ce qui permet d'enlever l'un ou l'autre pour le retailler et de le remettre en place sans interrompre la marche de la machine. On réalise également ainsi une usure plus uniforme du collecteur, chacun des balais pressant sa surface indépendamment de l'autre. Il n'est pas possible de fixer de règle applicable à tous les cas en ce qui concerne le nombre et la largeur des balais ; certains constructeurs admettent une largeur de 25 millimètres de balai par centaine d'ampères de débit. Il n'est pas plus facile de donner une règle générale pour leur épaisseur. Une épaisseur qui ne couvrirait que le mince filet de matière isolante entre les touches serait insuffisante ; il faut en effet que chaque section de l'induit soit mise en court-circuit pendant un instant pour que le courant puisse s'y renverser. L'épaisseur minimum du balai (ou celle de sa section oblique portant sur le collecteur) paraît devoir être d'une fois et demie environ la largeur d'une des touches du collecteur. Il n'y a aucun inconvénient à lui donner plus d'épaisseur dans les machines qui présentent une grande zone inactive aux environs du point neutre ou dont la courbe d'induction (fig. 55, p. 68) offre un sommet assez aplati. Mais, quand on se sert de balais trop épais, on constate un autre inconvénient : il se produit une perte d'énergie par échauffement dû à la différence de potentiel entre les parties du collecteur en contact respectif avec le bord d'avant et le bord d'arrière du balai. Pour réduire cet effet, on a proposé d'employer,

¹ Brevet anglais, 1288 de 1885.

au lieu d'un seul balai épais, deux balais plus minces, placés l'un devant l'autre et entre lesquels on intercale une certaine résistance. MM. Goolden and C^o se sont servis de balais en fils dont chacun était séparément oxydé, ce qui les isolait partiellement les uns des autres ; leurs extrémités d'arrière étaient seules soudées entre elles.

L'angle sous lequel les balais doivent porter sur le collecteur varie avec la construction. Comme règle, le balai, dont l'extrémité libre est dirigée dans le sens de la rotation, est placé sous un angle tel qu'il ne puisse pas accrocher le bord des touches du collecteur. La figure 277 *a*

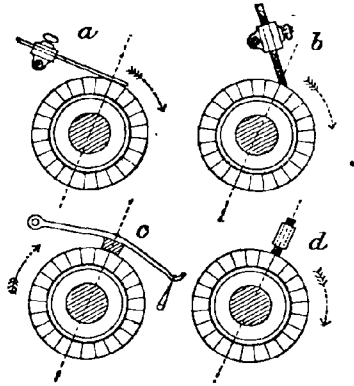


Fig. 277. — Montages de balais.

représente le cas d'un balai analogue à celui de la figure 276 *b* monté tangentiellement, comme dans les machines pour éclairage à arc. Dans la figure 277 *b* on voit un balai épais, dont l'extrémité est taillée en biseau, incliné à 45 degrés environ, comme dans la plupart des machines à potentiel constant. La figure 277 *c* montre une sorte de balai imaginée par Holroyd Smith pour l'application aux moteurs et permettant le renversement de marche. Des blocs de cuivre ou de bronze sont fixés à des leviers munis de bandes de caoutchouc pour assurer la pression de contact. La disposition de la figure 277 *d* est celle d'un balai en charbon également adaptée au renversement de marche des moteurs ; le balai, en forme de bloc rectangulaire, est pressé radialement dans une coulisse contre le collecteur.

Dans un grand nombre de cas où l'on fait usage de balais en charbon, on les ajuste de manière à ce qu'ils frottent en sens inverse du mouvement ; on obtient ainsi une plus grande pression, en marche, à l'extrémité. La figure 278 est la représentation du porte-balai à charbon étudié par M. A.-T. Snell pour les moteurs destinés aux mines.

Porte-balais et colliers. — Le mécanisme destiné à porter les balais doit remplir certaines conditions mécaniques et électriques énumérées ci-dessous.

(1). Les balais doivent être maintenus fermement et reliés à leur circuit par un bon contact métallique.

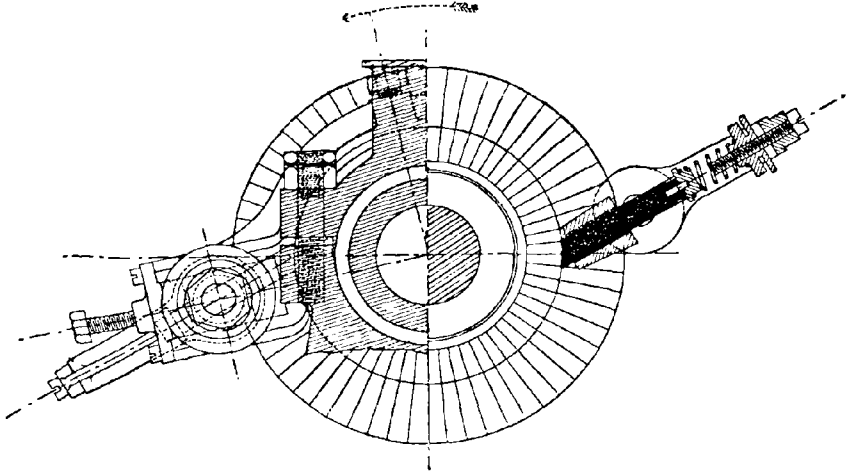


Fig. 278. — Porte-balais pour balais en charbon.

(2). Les porte-balais doivent permettre d'avancer ou de reculer les balais à volonté.

(3). Les balais doivent être montés de manière à toucher sous un angle convenable la surface du collecteur.

(4). Ils doivent porter sur le collecteur avec une pression convenable; s'ils ne sont pas assez serrés, ils sautent et donnent lieu à des étincelles; s'ils le sont trop, ils creusent des rainures dans le collecteur.

(5). Les porte-balais doivent permettre de soulever les balais.

(6). Ils doivent également permettre de maintenir les balais hors contact, au moyen d'un encliquetage mécanique.

(7). Pour toutes les machines fonctionnant au-dessus de 100 volts, des poignées isolées doivent permettre de relever et d'ajuster les balais sans risque de commotion.

(8). L'isolation des balais, ou d'un balai et de son porte-balai, doit être absolue.

On voit dans les figures 273 et 274, page 363, un spécimen typique de porte-balais; c'est celui de la machine de la Compagnie Gülcher. La machine est à 4 pôles (avec connexions transversales), de sorte que les

deux balais doivent faire contact en deux points situés à 90 degrés l'un de l'autre. Un autre type tout à fait analogue, étudié par M. W. C.

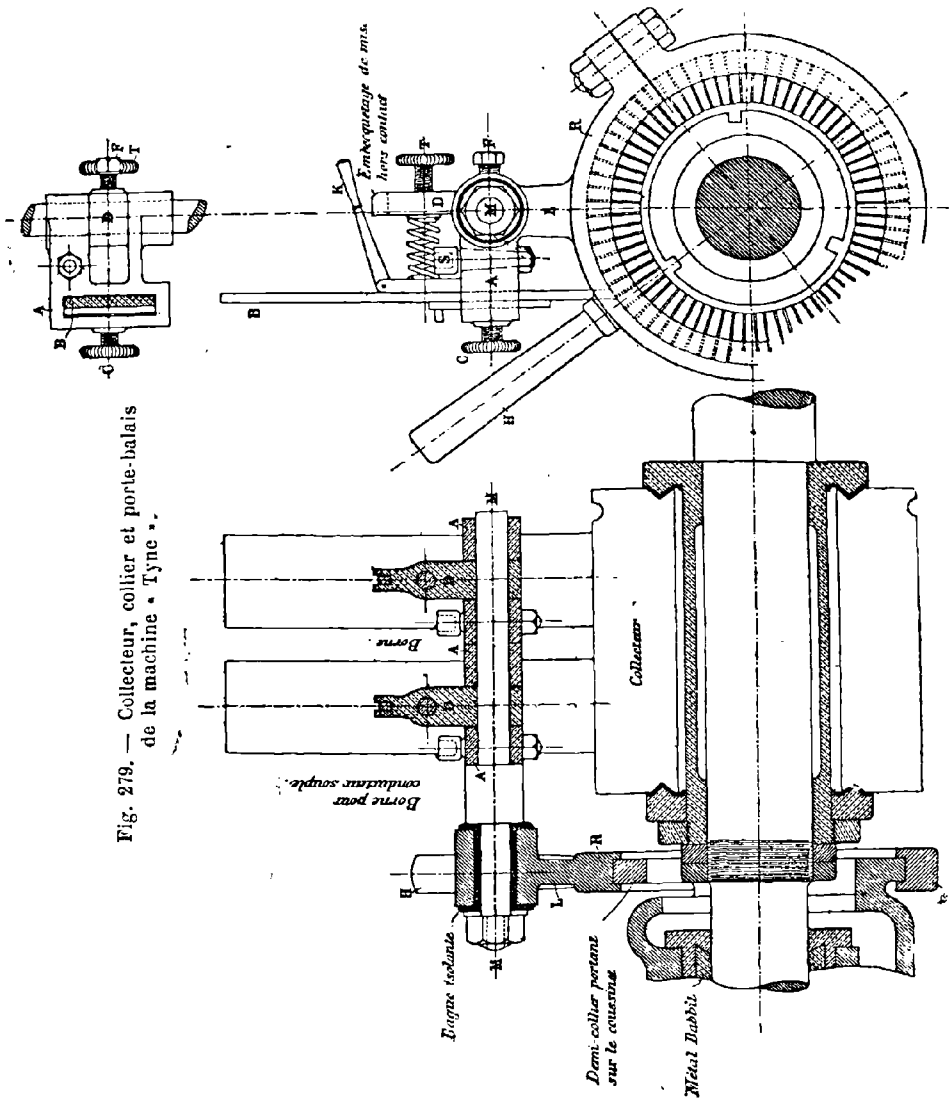


Fig. 279. — Collecteur, collier et porte-balais de la machine « Tyne ».

Mountain pour la machine « Tyne », est donné en détail dans la figure 279, qui indique également la construction du collecteur et du collier. Le collier R est formé d'un anneau de fer forgé, en deux pièces

réunies par un boulon de serrage et qui viennent s'emboîter à frottement doux dans un cercle métallique fixé au palier. Ce collier porte une poignée H permettant d'amener les balais au point neutre, et deux oreilles L (dont une seule est représentée) qui reçoivent les axes M de porte-balais. Ces derniers sont mécaniquement maintenus dans les oreilles du collier par des écrous fortement serrés ; mais ils en sont électriquement isolés par l'interposition d'un tube en matière isolante et des rondelles d'ébonite. Sur les axes M sont enfilés les porte-balais A qui s'articulent sur eux à la façon d'une charnière. Entre les parties de A faisant charnières est fixée par une vis F une pièce in-

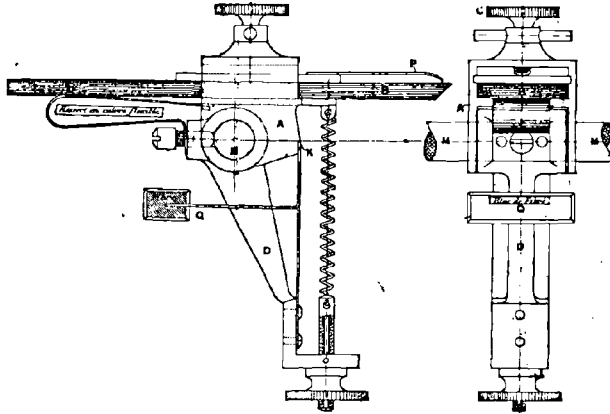


Fig. 280. — Porte-balai de la machine Kapp.

termédiaire D portant un bras en saillie. Le balai B passe à travers une mortaise pratiquée en A et dans laquelle il est serré par une vis C. Le courant arrive aux porte-balais par des conducteurs flexibles soudés dans des bornes réservées à cet effet. Le balai est pressé contre le collecteur par un ressort en boudin dont l'action peut être réglée à l'aide d'une vis qui traverse le bras D ; il peut en même temps être mis hors contact par un embecquetage K manœuvré à l'aide d'un petit levier qui, en s'abaissant, s'engage dans une entaille réservée à l'extrémité de D. Dans la figure 274, page 363, qui représente le même mécanisme dans la machine Gülcher, un des leviers de mise hors contact est rabattu dans cette entaille.

Dans le collier et les porte-balais de la machine « Phénix » le mode d'isolation est le même ; mais la pression du balai est réalisée au moyen d'un ressort en boudin roulé sur l'axe, et l'embecquetage de

mise hors circuit est constitué par une pointe qui s'engage dans une cavité réservée dans cet axe.

Dans le collier et les porte-balais de la machine Kapp bipolaire (fig. 280), le mode d'isolation est encore le même ; mais le courant est amené à une épaisse rondelle ; la pression de contact est assurée par un ressort en boudin tendu entre une oreille du porte-balai A et un bras fixe D, et l'embecquetage K de mise hors contact est constitué par un ressort droit qui s'engage dans une encoche à l'angle du porte-balai A

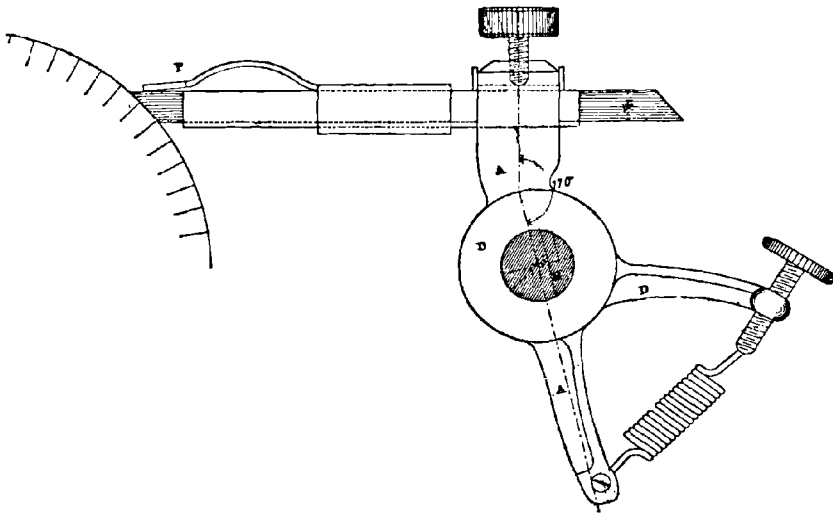


Fig. 281. — Porte-balai de la machine Edison.

et qu'on dégage en pressant sur une pièce Q en fibre dure. Une autre pièce P appuyant sur le balai le maintient dans la position voulue dans le porte-balai.

La machine Edison fournit un type moins perfectionné de porte-balai (fig. 281), sans embecquetage de mise hors contact. Pour soulever les balais on se contente de les tirer après avoir desserré la vis qui maintient le ressort de contact.

Le défaut que présente le mode d'isolation au moyen d'un tube sur l'axe de porte-balai est de permettre à cet axe de tourner. MM. Barley et Stevenson ont adopté un mode de construction plus solide, figure 282, qui consiste à aplatir l'extrémité de l'axe H et à le fixer par deux boulons côniques A sur une oreille du collier R ; l'isolation est assurée par une lame L interposée et deux douilles côniques C de fibre ou d'ébonite.

MM. Goolden and C^o ont imaginé une excellente forme de porte-balais qui permet d'avancer à volonté les balais dans le sens de la longueur

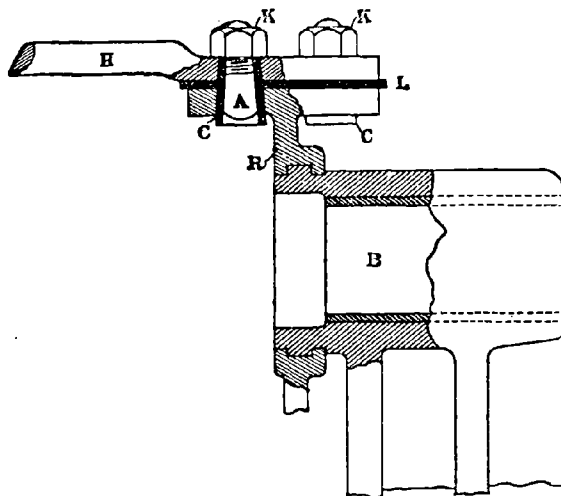


Fig. 282. — Axe isolé du porte-balai de Barley et Stevenson.

à l'aide d'une vis ; un emboquetage à came permet de les mettre hors contact.

Divers inventeurs ont essayé de simplifier la construction de ces organes ; parmi eux Parsons a proposé de substituer des poids aux ressorts pour assurer la pression.

On emploie en Allemagne sur une grande échelle une forme, aussi simple que bonne, de porte-balais introduite par Siemens et Halske.

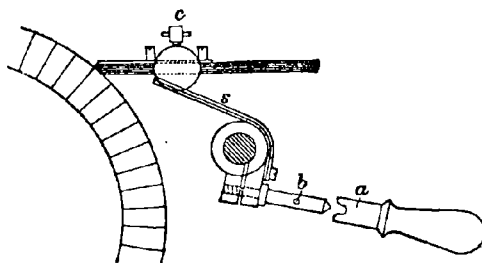


Fig. 283. — Porte-balai Siemens et Halske.

Dans ce type, figure 283, le barillet qui renferme le balai repose sur l'extrémité d'un ressort recourbé *s* formé de plusieurs épaisseurs de

feuilles de laiton écroui. Ce dernier est simplement emboîté sur l'axe de porte-balai et maintenu par une vis *b* qui permet de faire glisser le porte-balai le long de l'axe, ou de le faire tourner autour de cet axe pour donner plus ou moins de pression. L'outil *a* sert à effectuer l'un quelconque des réglages voulus. Ces porte-balais sont ceux appliqués aux grandes dynamos multipolaires de cette maison (fig. 357).

COLLECTEURS ET BALAIS POUR ALTERNATEURS

Les alternateurs ne comportent pas de commutateurs proprement dits ; les organes que nous venons d'étudier se bornent en réalité à de simples collecteurs dans la véritable acception du mot. Ils n'exigent communément qu'une paire de contacts à glissement destinés à porter les courants à l'élément mobile et à les capter sur lui. La disposition ordinaire consiste dans une paire de bagues de contact en cuivre ou en bronze, montées sur l'arbre dont elles sont isolées ; un ou plusieurs balais viennent presser sur chaque bague de contact. Dans les alternateurs à induit mobile, les deux bagues doivent être très soigneusement isolées l'une de l'autre, aussi bien que de l'arbre. Une rondelle très saillante d'ébonite doit être placée entre les deux bagues si elles sont situées du même côté de la machine, comme dans l'alternateur Blakey-Emmott (fig. 439), dans celui de Westinghouse (fig. 437), ou dans celui d'Hopkinson (fig. 440). Dans l'alternateur de Kapp (fig. 435), les bagues de contact sont montées de part et d'autre de l'induit, de sorte que non seulement il est facile d'obtenir une grande isolation, mais que tout danger de commotion accidentelle se trouve diminué. On met souvent deux balais par bague, de manière à permettre le remplacement de l'un d'eux pendant la marche. Les alternateurs Ferranti ont une disposition spéciale pour la captation des courants (fig. 450).

Pour les alternateurs dans lesquels les inducteurs constituent la partie mobile, il faut des bagues de contact et des balais pour amener le courant d'excitation. Mais, comme ce courant est faible et sous bas voltage, les dispositions des collecteurs sont simples et n'exigent pas une isolation aussi particulièrement soignée. Dans les alternateurs triphasés à marche lente construits par Brown (fig. 463), le courant d'excitation est amené par deux fils flexibles conduits, comme des courroies, par deux jeux de poulies en bronze.

CHAPITRE XV

ÉLÉMENTS MÉCANIQUES D'UN PROJET DE DYNAMO ET DE SA CONSTRUCTION

Toute machine dynamo, génératrice ou réceptrice, étant une pièce de mécanique courante, il est indispensable de se conformer dans l'étude et la construction de ses divers organes aux règles de la mécanique générale.

Nous avons examiné au Chapitre XIII les moyens mécaniques de communiquer aux conducteurs de l'induit la puissance développée sur l'arbre, et *vice versa*. L'étude des arbres, des tourillons, coussinets, paliers et poulies, est un sujet qui exige également la connaissance des principes et l'expérience de la mécanique. On peut à cet égard suivre les ouvrages spéciaux relatifs à l'art du constructeur. Sur certains points cependant les règles ordinaires de l'ingénieur cessent d'être absolument applicables ; aussi nous a-t-il semblé utile de donner les renseignements qui font l'objet du présent chapitre.

Pression sur les coussinets. — Outre les pressions ordinaires sur les coussinets, dues au poids de l'arbre et de ses annexes, ainsi qu'à la traction latérale exercée par la courroie, les machines dynamos comportent un troisième genre d'action mécanique, c'est l'effort magnétique que les inducteurs exercent réellement sur le noyau d'induit. Cette action est très considérable dans le cas des machines à circuit magnétique unique. Un exemple de la tendance du système inducteur à soulever l'induit est fourni par les machines telles que celle d'Edison-Hopkinson (fig. 364), dans laquelle l'inducteur est au-dessus de l'induit ; on trouvera des exemples de la tendance contraire dans les machines comme celles de Gramme et de Kapp où l'induit est plus haut que les inducteurs (fig. 331, 332, 333 et 336). Si l'induit est parfait-

tement centré il sera toujours soumis à un effort tendant à rendre le circuit magnétique entier plus court. On peut y obvier partiellement en le montant excentriquement, légèrement au-dessous du centre d'alésage des surfaces polaires dans les machines à induit inférieur, et un peu au-dessus dans celles à induit supérieur. Dans la machine Kapp l'effort vers le bas est en partie compensé par l'espace entre les extrémités des parties polaires laissé au-dessous de l'induit plus large qu'entre les extrémités supérieures ; ou par l'emploi de pièces polaires en fonte à la partie inférieure et de pièces polaires en fer forgé à la partie supérieure. Cette attraction magnétique peut atteindre jusqu'à quatre ou cinq fois le poids de l'induit. Ainsi, dans une dynamo construite par la Compagnie Alsacienne¹ pour une puissance de 60 kilowatts, l'attraction magnétique sur l'induit était égale à un poids qui n'était pas inférieur à 680 kilogrammes (voir fig. 290).

Action gyrostatique de l'induit. — Un autre point, qui n'a d'intérêt que dans le cas des machines employées à bord des navires ou des moteurs circulant sur une piste courbe, est l'action gyrostatique de l'induit rotatif qui tend toujours à maintenir son axe dans la même direction. Sir William Thomson qui, le premier, a attiré l'attention sur ce sujet a donné² la formule suivante pour la force gyrostatique exercée sur les coussinets :

$$F = \frac{F' k^2 \Omega \omega}{g l},$$

dans laquelle F est la force exprimée en kilogrammes ; F' le poids, en kilogrammes, de l'induit ; l la longueur, en centimètres, entre les coussinets ; g l'accélération de la pesanteur (981 centimètres par seconde) ; ω la vitesse angulaire de l'induit, en radians par seconde ; Ω la vitesse angulaire maximum de roulement du navire, également exprimée en radians par seconde ; k le rayon de gyration de l'induit, en centimètres.

Exemple. — Sur un navire roulant de 20 degrés, avec un temps périodique de 16 secondes, et une machine Siemens à courants alternatifs (fig. 426) tournant à une vitesse de 1 300 tours par minute, on avait : — $F' = 67$ kilogrammes ; $k = 21,3$ centimètres ; $l = 42,7$ centimètres. Ici $\Omega = 2\pi \times \frac{20}{360} \times 2\pi : 16 = 0,137$; et $\omega = 2\pi \frac{1\ 300}{60} = 136$. Par suite $F = 13,6$ kilogrammes sur chaque

¹ *Electrical Review*, XXV. 292, 1890.

² Voir Jamieson « Éclairage électrique à bord des navires », *Proc. Inst. Civil Engineers*, LXXXIX. 11 novembre 1884.

coussinet, agissant alternativement vers le haut et vers le bas à chaque roulement, si l'axe de la dynamo est dirigé transversalement à l'axe du navire.

Il ressort de ces considérations qu'il ne serait nullement judicieux d'employer à bord des navires des dynamos à induits en forme de volants, si la pression due au poids de l'induit n'était pas relativement beaucoup plus grande. Les machines à tambour dont les induits ont une longueur supérieure à leur diamètre sont préférables pour ce genre d'éclairage.

Collets, Portées, Tourillons. — D'après ce que nous venons de dire, on voit qu'il faut très prudemment appliquer les règles ordinaires des études mécaniques. On admet généralement des tourillons plus gros pour de grandes vitesses, par suite de la nécessité de vaincre, par une plus grande surface de refroidissement, la chaleur développée dans ces conditions d'allure. Mais on sait que ce point de départ conduit à la règle

$$l = \frac{F n}{\beta t_m},$$

dans laquelle l est la longueur en centimètres, F la force en kilogrammes (poids) exercée sur le coussinet, $\frac{n}{t_m}$ la vitesse angulaire en tours par minute, et β une constante qui, suivant les autorités, peut varier entre 12 000 et 180 000. Avec un tel écart, la règle est presque inutile comme guide pour un projet ; elle ne tient pas compte d'ailleurs du diamètre du tourillon. Pour tous les ingénieurs expérimentés le rapport entre le diamètre et la longueur d'un tourillon comporte une relation avec la vitesse. Pour de faibles vitesses, telles que 100 tours par minute, la longueur n'a pas besoin d'être supérieure au diamètre ; tandis que, pour des vitesses de 1 000 tours par minute et au-dessus, la longueur est égale à cinq ou six diamètres, et atteint parfois jusqu'à huit diamètres dans des ventilateurs à marche très rapide.

On peut tirer de là la règle approximative suivante :

$$\frac{l}{d} = 1 + 0,004 \frac{n}{t_m}.$$

Cette règle, qui est courante pour les arbres de meules, ne s'applique pas, on le sait, aux coussinets d'arbres de manivelles, où la force centrifuge a peu d'importance, mais où l'on a affaire à des chocs violents et à des efforts d'arrachement, dans des sens alternés. Elle s'applique moins exactement encore aux machines dynamos. Dans la plupart de

ces machines la puissance est transmise de la poulie à l'induit sur un petit nombre de centimètres d'arbre. Le tourillon entre ces deux parties, si la poulie est extérieure, est évidemment soumis à un effort de torsion beaucoup plus considérable que le tourillon situé à l'autre extrémité ; aussi, dans un grand nombre de dynamos, est-il plus gros et plus long que du côté du collecteur.

Voici les données fournies au professeur Perry en grande partie par les élèves du Collège technique de Finsbury, d'après les machines qu'ils ont été à même d'étudier :

TABLEAU DE DIMENSIONS DES PORTÉES

TYPES DES DYNAMOS	VITESSE ANGULAIRE (tours par minute)	DISTANCE entre les coussinets (cm)	PUISSANCE (chevaux-vapeur)	LONGUEUR l (cm)	DIAMÈTRE d (cm)	RAPPORT $\frac{l}{d}$
Brush à deux foyers (Anneau).	1 120	43,2	2	12,7	3,2	4
Edison (type 1882) (Tambour) 150 lampes.	890	137,2	15	28	7	4
« Manchester » (Anneau).	1 600	66	6	9,5	3,5	2,68
Elwell-Parker (Tambour).	1 300	76,2	10,8	15,2	4,1	3,7
Elwell-Parker (Tambour).	630	134,6	45	22,9	6,3	3,6
« Victoria » (Mordey) (Anneau discoïdal).	2 000	25,4	2	10,2	1,8	5,71
Alternateur Ferranti (Disque étoilé) (1883).	1 700	71,1	10	8,3	1,8	4,6
Kapp.	780	86,4	30	22,9	3,8	6
Brown.	500	142,2	35	13,3	3,2	4,5
Alternateur Ferranti (1889).	420	215,9	1 250	25,4	5,7	4,4
Alternateur Mordey (Champ tournant).	500	136,5	100	21,6	5,7	3,77
				24,8	5	4,88
				24,8	6,3	3,9
				144,8	35,6	4
				33	11,4	2,88
				33	10,2	3,25

Le diamètre de sécurité à donner à un tourillon pour la transmission d'un effort déterminé dépend de la charge qui tend à le faire fléchir, aussi bien que du moment de torsion résultant de la puissance à transmettre par son entremise. On calcule ordinairement le diamètre d'un arbre d'après la formule suivante, applicable lorsqu'il n'y a pas de flexion :

$$d = c \sqrt[3]{\frac{P}{\omega}}$$

dans laquelle d est exprimé en centimètres, P en chevaux-vapeur, ω en tours par minute, et $c = 7,35$ pour les arbres d'acier.

La charge latérale d'une poulie en porte-à-faux, due à la tension de la courroie, produit une flexion considérable. En prenant les rapports de largeur et de diamètre de poulies communément employées dans les ateliers de construction de dynamos, on trouvera que c doit être pris comme ayant une valeur différemment estimée de 10,5 à 14.

En outre, l'axe ou arbre d'une dynamo est soumis à une flexion résultant du poids de l'induit, de l'attraction magnétique exercée sur son noyau, et, pour celles qui sont actionnées par courroie, de la traction latérale de la poulie. En marche, il est encore exposé à des efforts de flexion si les masses qui constituent l'équipage mobile ne sont pas convenablement équilibrées. Si les coquilles des coussinets maintiennent les tourillons en ligne droite, il est évident que toutes ces actions tendront à faire fléchir l'arbre en des points déterminés. Dans les machines à disque la longueur d'arbre sujette à fléchir est plus grande que dans les machines à tambour et à anneau, dont les induits raidissent la partie centrale.

En tenant compte des moments de flexion dus au défaut d'équilibre, le professeur Perry montre que l'influence de la vitesse sur la longueur du tourillon, jusqu'ici regardée comme réelle dans la pratique, mais sans base théorique, s'explique parfaitement. D'après les résultats qu'il a trouvés, on a, pour les induits en disque,

$$\frac{l}{d} = \frac{n}{t_m} \frac{\sqrt{L}}{1600},$$

et, pour les induits en tambour ou en anneau allongé,

$$\frac{l}{d} = \frac{n}{t_m} \frac{\sqrt{L}}{5600} + 2,$$

expressions dans lesquelles L est, en centimètres, la longueur de l'arbre entre les milieux des coussinets; et $\frac{n}{t_m}$ ou ω , l et d ont les mêmes significations que précédemment.

Les tourillons, lorsqu'ils sont droits, sont ordinairement terminés par des colliers ou des épaulements en saillie, par lesquels ils portent contre les coussinets et qui limitent le jeu longitudinal. Dans certaines formes de machines on réserve intentionnellement ce jeu longitudinal pour assurer une usure plus régulière du collecteur.

Arbres. — La matière la plus convenable pour les arbres de dynamos est l'acier; on emploie généralement de l'acier Bessemer.

Dans quelques machines anglaises, et particulièrement celles de petites dimensions, ainsi que dans d'autres machines de construction américaine, les arbres sont du même diamètre sur toute leur longueur ; les portées destinées à empêcher le jeu longitudinal sont plus minces. Ce n'est pas d'une bonne construction mécanique. Un arbre doit être étudié dans tous ses détails, comme toute autre partie de la machine, selon la puissance qu'il a à fournir ou à laquelle il est soumis. On sait parfaitement, quand on fait un projet de machine, que, si un axe a à subir un effort transversal tendant à le faire fléchir entre ses points d'appui, il doit être plus fort là où le moment de flexion est le plus grand. On prend comme base de calcul le diamètre convenable des tourillons (trouvé comme on l'a vu précédemment), et, en admettant que l'arbre est à section circulaire, on calcule les diamètres des autres parties d'après la règle que le diamètre en chaque point doit être proportionnel à la racine cubique du moment de flexion en ce point¹. Il ne faut pas oublier que, si des rainures de clavetage doivent y être ultérieurement pratiquées pour la fixation de manchons ou autre supports, une augmentation de diamètre est nécessaire pour permettre ce travail sans affaiblissement de l'arbre. Les arbres des dynamos Brown, ainsi que ceux de Kapp (fig. 252) et de la machine « Victoria » de Mordey (fig. 347), sont à cet égard des pièces parfaitement étudiées.

Dans les premières les supports de l'induit font le pont sur le milieu de l'arbre et le tout est serré par un écrou contre un épaulement de l'arbre. Le collecteur est établi autour d'un autre manchon plus petit, enfilé sur une partie légèrement plus mince de l'arbre, de l'autre côté de l'épaulement central. La poulie est à l'intérieur des paliers, et non pas en porte-à-faux.

Dans les secondes le support d'induit est un long manchon de fonte qui raidit la partie médiane de l'arbre et est maintenu contre un épaulement par un écrou.

Dans les troisièmes le support d'induit est maintenu entre deux écrous. La poulie est en porte-à-faux, avec un tourillon très gros entre l'induit et elle, et un palier à cannelures du côté du collecteur.

Coussinets et Paliers. — Les coussinets de dynamos sont toujours en deux pièces, de manière à permettre de soulever l'induit de sa position normale, et communément formés de coquilles de laiton ou de bronze enchâssées dans un palier disposé à cet effet. Le collecteur qui

¹ Unwin : *Machine Design*, p. 147.

n'est pas familiarisé avec cette partie élémentaire de la machine fera bien d'étudier attentivement les dessins de paliers et coussinets de différentes machines, et notamment ceux de l'alternateur Ferranti (fig. 452). Là où l'on a besoin de longs coussinets, on emploie quelquefois de la fonte, au lieu de bronze ou de laiton. Le plus souvent on fait usage de coussinets en métal doux et de préférence encore on se sert d'un métal doux, comme celui connu sous le nom de « métal Babbitt », en guise de garniture des vides réservés dans du bronze ou de la fonte ; ce métal anti-friction est coulé dans ces cavités. On a beaucoup employé à cet usage dans ces derniers temps un alliage de ce genre appelé métal « Magnolia ».

Coussinets cannelés. — Dans aucune des machines à disque ou à anneau étroit le jeu longitudinal n'est admissible, et l'on doit recourir

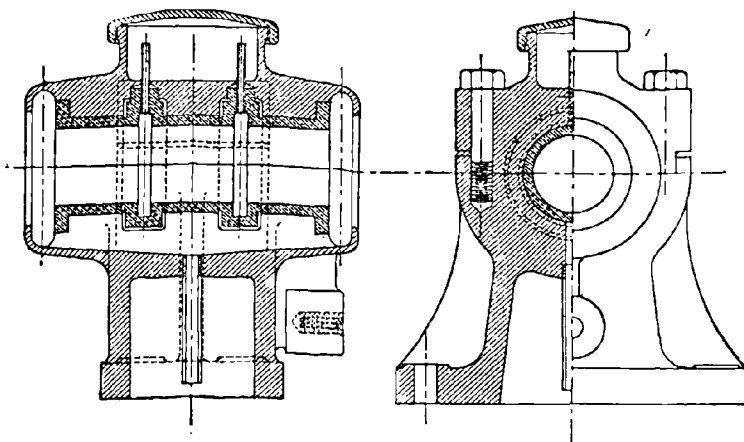


Fig. 284. — Palier graisseur de l'alternateur Kapp.

à l'emploi de coussinets cannelés semblables à ceux employés pour les arbres d'hélices de navires, avec épaulements relevés sur les tou-rillons. On peut encore les remplacer par des arbres à épaulements un peu plus hauts que d'ordinaire pour porter contre les coquilles. On peut examiner, à cet égard, les coussinets de diverses machines telles que celle de Mordey « Victoria » (fig. 347), l'alternateur Mordey (fig. 455), celui de Ferranti (fig. 452), ou celui de Kapp (fig. 435), construit par MM. Johnson et Phillips, représenté par la figure 284.

Coussinets convexes. — Partout où l'on emploie de longs coussinets il est très important qu'ils soient non seulement exactement cen-

très mais aussi parfaitement alignés. Pour leur permettre de se mettre ainsi d'eux-mêmes exactement en ligne droite, on est aujourd'hui arrivé, dans la pratique courante, à leur donner des sièges *sphériques*, c'est-à-dire à donner une forme sphérique ou sensiblement telle à la partie centrale renflée des paliers, et à garnir de métal doux cette partie sphérique du siège¹. La figure 285 représente une étude de ce genre faite par M. Ravenshaw pour les machines Goolden et C^{ie}. MM. Siemens emploient, au lieu de profil sphérique, une forme à profil oval qui est moins satisfaisante. Les coussinets de l'alternateur Westinghouse ressemblent tout à fait à celui de la figure 285 ; mais ils sont

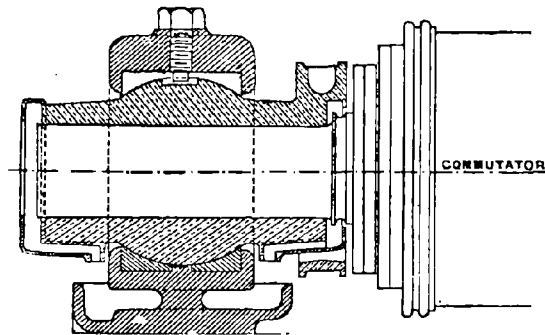


Fig. 285. — Coussinet sphérique de la machine Goolden.
Commutator = Collecteur.

adaptés à des tourillons plus longs. Les grands alternateurs Ferranti (fig. 452) ont des paliers à cannelures portés sur des sièges sphériques. — Des paliers à boulets analogues à ceux employés dans les bicycles ont été proposés par Reignier et essayés également aux États-Unis.

Graisseurs. — La lubrification des coussinets exige un approvisionnement suffisant d'huile ou de graisse, ainsi que des dispositions pour empêcher le gaspillage et la dispersion de ces matières. On fait ordinairement venir de fonte les réservoirs à huile dans le corps même des paliers ; l'huile arrive par les extrémités des coquilles. Des graisseurs à alimentation contrôlée qui fournissent l'huile goutte à goutte d'une façon visible sont sans contredit ce qu'il y a de mieux pour les machines ordinaires. Un de ces graisseurs est représenté par la figure 286. Le levier C placé à la partie supérieure ferme l'alimentation d'huile

¹ Voir un travail de M. Coleman Sellers, dans le *Journal of Franklin Institute* de 1872, ou *Engineering*, XV. 17. — Voir encore Unwin : *Machine Design*, p. 170.

quand la machine est au repos. Les deux vis molletées A et B servent à régler le débit que permet de contrôler le tube à goutte visible placé à la partie inférieure. Pour les navires il est préférable d'employer des formes spéciales évitant les projections d'huile. A cet effet on munit

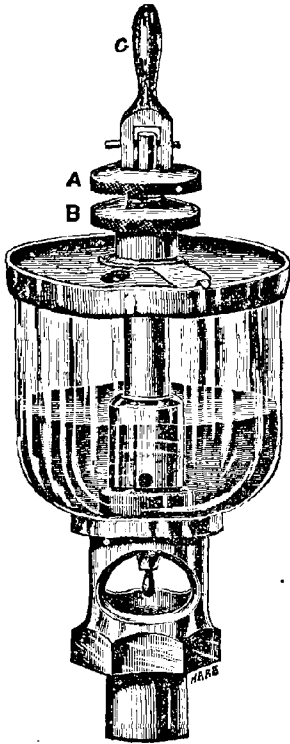


Fig. 286.
Graisseur à goutte visible.

habituellement les tourillons d'un collier destiné à recueillir l'huile et à la renvoyer vers l'intérieur sous l'action de la force centrifuge ; les bords du coussinet dépassent (comme on le voit dans la figure 285) l'extrémité du tourillon et sont pourvus d'une gorge réntrante qui reçoit l'huile et la ramène au réservoir inférieur. Pour les grandes machines, dont les coussinets supportent un poids considérable, certaines précautions spéciales sont nécessaires, comme pour le graissage des coussinets des arbres d'hélices. L'huile est alors envoyée sous pression, quelquefois même de deux sources indépendantes, pour parer à tout risque de défaut d'alimentation. Les dispositions de ce genre sont d'autant plus nécessaires pour les dynamos que leur mouvement est exclusivement un mouvement de rotation ; leurs arbres ne sont pas soumis, comme les arbres à manivelles des machines à vapeur, à des efforts latéraux alternatifs qui facilitent la pénétration de l'huile sous les tourillons. Sellers¹ a proposé, comme sauvegarde, une double lubrification. Le

graisseur ordinaire fournit l'huile au milieu du coussinet, et la coquille supérieure est munie à chacune de ses extrémités d'un petit réservoir contenant un mélange épais de suif et d'huile qui ne fond que dans le cas où le coussinet s'échauffe par suite d'un défaut dans l'alimentation régulière par l'huile. On emploie quelquefois des systèmes auto-lubrifiants ; la coquille inférieure du coussinet sert seule de réservoir à huile ; un collier appliqué sur l'arbre, ou une bague métallique tournant follement avec lui, ou même une simple rondelle de feutre entretient un graissage continu (voir la machine Gramme, fig. 331).

¹ Unwin : *Machine Design*, p. 171.

Clavettes, Rainures et Méplats. — Les clavettes destinées à fixer l'induit et la poulie sur l'arbre doivent être des clavettes fixes ou des clavettes de force, et non des clavettes cylindriques ou fourrures qui présentent moins de sécurité. Les règles pour les dimensions à donner aux clavettes peuvent se résumer de la manière suivante : l étant leur largeur, e leur épaisseur, et d le diamètre d'alésage de la pièce, toutes grandeurs exprimées en centimètres :

$$l = \frac{1}{4} d + 0,3 \text{ cm} ;$$

$$e_1 \text{ (pour clavettes en rainures)} = \frac{1}{10} d + 0,3 \text{ cm} ;$$

$$e_2 \text{ (pour clavettes sur plats)} = \frac{1}{11} d + 0,15 \text{ cm.}$$

Quand on emploie deux ou plusieurs méplats sur des côtés opposés de l'arbre, la largeur de chacun peut être moindre que celle indiquée ci-dessus. Pour de petites machines ces nombres sont inutilement élevés ; et, au-dessous de 5 chevaux-vapeur, on peut appliquer la formule de la page 377, en prenant pour la constante c la valeur 1,5 ou 2.

Poulies et Courroies. — Il est inutile de donner à cet égard des règles spéciales ; il suffit d'appliquer les règles ordinaires pour les machines courantes.

Plaques de fondation. — Dans un projet de construction on économise habituellement le poids de métal en prévoyant des pièces à noyaux et des renforcements par nervures et par flasques. Tout cela est parfait, sauf dans les cas où une partie quelconque de la plaque de fondation joue également un rôle magnétique et constitue une partie du circuit magnétique. Par exemple, dans la machine Paterson et Cooper, la plaque de fondation sert en partie de culasse à l'inducteur ; dans la machine « Manchester » de Mather et Platt (fig. 344), comme dans celle de Brown (fig. 338), la partie fonte qui passe sous l'induit doit être laissée massive. On voit un exemple d'allègement nuisible dans la figure 331 (Gramme, 1884). Il est à noter également que, dans le cas de machines à tambour ou à anneau allongé, il est bon de pouvoir retirer l'induit longitudinalement en enlevant un des paliers, qui doit être en conséquence venu de fonte séparément. Dans ce cas, pour les machines du type supérieur, il est commode que le palier mobile puisse se séparer au-dessous du niveau de la partie

inférieure de l'induit, de telle sorte que, ce palier étant enlevé, le reste du support puisse servir de repos pour l'induit pendant qu'on le retire. Tel est le cas de la machine Kapp et celui indiqué par la figure 331 (Gramme, 1884).

Accouplement¹. — Quand des machines sont actionnées sans courroie par une machine à vapeur montée sur la même plaque de fondation, on réunit fréquemment leurs arbres respectifs par un couplage. Il existe plusieurs modes d'accouplement de ce genre, tels que celui de Brotherhood, dont l'élément de connexion est le cuir ; celui de Raworth à bandes d'acier flexibles, qui permettent un certain jeu si les deux arbres ne sont pas exactement dans le prolongement l'un de l'autre ; celui de Raffard, etc. — Willans a construit un très ingénieux mode de couplage magnétique à griffes.

Montage des induits. — Les questions de fixation des induits sur les arbres et de sécurité pour les frettes ont été étudiées au Chapitre XIII, à propos de la construction des induits.

¹ Les expressions « accouplement », « couplage », sont spécialement réservées à la liaison, mécanique ou électrique, de *machines complètes* ; celles de « montage », « groupement », « groupage », à celle des *éléments d'une même machine*. (N. d. T.)

CHAPITRE XVI

ÉLÉMENTS PHYSIQUES D'UN PROJET DE DYNAMO

CALCUL DU BOBINAGE

Les symboles et notations employés dans ce chapitre ont la même signification que précédemment (voir p. 202).

Il en est des projets de dynamos comme de tout projet de machine ; l'expérience est le meilleur guide. L'étude d'une machine qui, à une allure fixée d'avance, doit fournir un nombre donné d'ampères sous un voltage également déterminé, est une affaire des plus simples pour un ingénieur déjà familiarisé avec des études de dynamos du même type général, mais de puissance différente. Quiconque a, par exemple, étudié des machines bipolaires à courant continu pour éclairage par incandescence, n'éprouvera aucune difficulté à en étudier une autre du même genre. Mais il ne lui serait pas à beaucoup près aussi aisé de passer, d'après cette expérience seule, à un projet de machine multipolaire ou de machine à courants alternatifs.

On sait en effet que le nombre de watts que peut fournir une dynamo d'un certain type, à une vitesse déterminée, est sensiblement proportionnel à son poids. Ainsi, étant donnée une dynamo qui, à 720 tours par minute, débite (sans étincelles ni échauffement anormal) 200 ampères sous 105 volts, il est connu que, avec la même carcasse de fer et en refaisant le bobinage avec de nouveau fil, de poids égal à celui précédemment employé, on pourra faire donner à la machine (à la même vitesse que précédemment) 300 ampères sous 70 volts, ou 250 ampères sous 84 volts, ou bien encore 30 ampères sous 700 volts, le produit étant dans tous les cas de 21 000 watts. Une machine de même type, mais de puissance double, comporterait sensiblement un poids double de fer et un poids double de cuivre.

De même, comme le voltage est proportionnel à la vitesse, si l'on a à étudier une nouvelle dynamo devant donner la même puissance à une vitesse de 480 tours par minute, au lieu de 720, on devra prendre une carcasse une fois et demie aussi lourde. Un constructeur qui aurait en magasin des carcasses de différentes dimensions devrait naturellement choisir celle qui se rapprocherait le plus du poids voulu et la recouvrir du bobinage convenable.

Mais aborder de prime saut l'étude d'une machine sans cette sorte de base pratique est chose toute différente. Le premier soin pour y arriver doit être d'examiner attentivement les dessins de quelques machines bien établies et de voir comment les dimensions de leurs différents éléments sont adaptées aux rôles qu'ils doivent jouer. Il sera ensuite plus facile de réaliser un nouveau type de machine applicable à un cas quelconque.

Certains calculs sont nécessaires à la détermination des dimensions convenables des différentes parties. Quelques-uns d'entre eux sont d'ordre purement électrique, d'autres d'ordre magnétique, d'autres d'ordre mécanique, d'autres enfin d'ordre absolument empirique avec l'expérience seule pour guide. — Si l'on veut construire une dynamo devant fournir, par exemple, un débit de 200 ampères sous 55 volts, les conditions de sécurité contre un échauffement anormal déterminent pratiquement le diamètre du fil à employer pour le courant fixé; il n'y a pas de calculs à faire; il suffit de se reporter à une table telle que celle de l'Appendice B, et de savoir que, pour les induits de dynamos, on a ordinairement toute sécurité avec 3,1 ampères par millimètre carré, et qu'on peut même aller au delà. Supposons qu'on s'arrête à un toron de 7 fils de 2,3 millimètres de diamètre, pouvant, en toute sécurité, porter 100 ampères (chaque conducteur ne porte, comme on sait, que la moitié du courant de l'induit). Mais, si simple que ce soit, encore faut-il se rappeler que, si l'inducteur est monté en dérivation, comme le comporte un éclairage ordinaire sous tension constante, il y aura à prévoir quelques ampères en plus des 200 nécessaires aux lampes. Comptons sur 5 ampères, ou 2 et demi p. 100, de plus comme suffisants. — Supposons ce point réglé; surgit alors la question des 55 volts. Quelles dimensions d'induit, quel bobinage, quels électro-aimants faudra-t-il adopter; et comment ces derniers devront-ils être bobinés de manière à satisfaire au problème dans les conditions d'allure convenable? Il faut encore se rappeler ici que, si l'on veut avoir 55 volts entre les conducteurs, l'induit devra en fournir davantage, soit 57 ou 58, laissant ainsi une marge pour les volts « perdus »

(p. 219). Ce point étant également fixé, quelle est alors la marche à suivre ?

Examinons l'équation fondamentale de la dynamo à courant continu (voir p. 44 et 204) :

$$E = \frac{n}{t} \frac{N\Phi}{10^8} .$$

Si l'on admet que la vitesse $\frac{n}{t}$ est fixée d'avance, cette expression indique que les volts engendrés dans l'induit dépendent du nombre N des conducteurs d'induit employés (c'est-à-dire du poids du cuivre), et du flux Φ qui pénètre l'induit (c'est-à-dire de la section droite du noyau de fer et du degré d'aimantation auquel il est poussé). Dans le cas actuel, supposons que la vitesse fixée soit de 1 140 tours par minute; dès lors $\frac{n}{t}$ (nombre de tours par seconde) = 19; et, si l'on prend 57 pour valeur de E , il s'ensuit que le produit $N\Phi$ atteint exactement 300 000 000. Mais quelles doivent être les valeurs individuelles de N et de Φ ? L'expérience indique que, dans les machines telles que celle dont il s'agit, chaque section d'induit ne doit comporter qu'une, ou au plus deux spires, que l'induit soit un anneau ou un tambour. L'expérience apprend également que, pour les machines bipolaires, un multiple de 6 convient pour le nombre des sections (et par suite pour le nombre de touches du collecteur). Il résulte encore de l'expérience que, s'il y a moins de 30 sections, on aura des ondulations et l'on pourra craindre des étincelles gênantes; et que, d'autre part, s'il y en a 150 ou davantage, on arrive à de grands frais de construction. On peut prendre 42, 48, 54, 60 ou 72, et procéder à l'étude sur l'un quelconque de ces chiffres. Il est facile, en effectuant les calculs, d'opérer sur un autre chiffre si celui choisi d'abord ne paraît pas donner toute satisfaction. S'il n'y a qu'une seule spire par section, et si l'induit est en anneau, N sera aussi le nombre de touches du collecteur; si au contraire on adopte le bobinage en tambour, N sera numériquement le double de ce nombre de touches. Mais, si N est faible, Φ sera élevé, et *vice versa*, et l'on sait que, pour assurer un fonctionnement sans étincelles, il est bon de tenir Φ élevé et N petit (p. 98). Supposons donc que l'on prenne $N = 72$, de sorte que, pour un bobinage en tambour, il y aura 36 sections et un collecteur à 36 touches. Il en résulte naturellement pour Φ la valeur $\frac{300\ 000\ 000}{72} = 4\ 166\ 666$; en chiffre rond on devra avoir un flux de 4 170 000 unités C. G. S. à travers le noyau d'induit. On sait encore par l'expérience que le degré d'indue-

tion possible pour les induits de machines de ce genre (voir p. 409) est de 12 000 à 17 000, soit en moyenne 14 500 unités. Pour recevoir le flux de 4 170 000 unités, le noyau de l'induit devra en conséquence avoir une section droite nette de 288 centimètres carrés. Mais ici encore la marge est large. Comment déterminer cette section droite ? Quelles dimensions faut-il donner aux disques de noyau et sur quelle longueur faut-il les assembler sur l'arbre ? Si l'on prend de grands disques d'épaisseur radiale considérable, il n'en faudra qu'un nombre relativement faible et l'induit sera court ; tandis que, si l'on choisit de petits disques, on aura un long induit. Deux autres considérations pèseront cependant sur la décision. On a provisoirement admis, pour les conducteurs destinés à porter le courant fixé, un toron de 7 fils de 2,3 millimètres de diamètre qui donneront avec le guipage 7,5 millimètres de diamètre pour le toron. Si l'on doit avoir 72 conducteurs semblables en une seule couche, ils occuperont, placés l'un à côté de l'autre, environ 541 millimètres. Sans intervalles laissés en plus pour les coins d'entraînement, ce chiffre implique des disques de noyau de 172 millimètres environ de diamètre extérieur. Admettons 180 millimètres avec un trou central de 105 millimètres ; la double épaisseur radiale du fer sera de 75 millimètres ; et, comme on doit avoir 288 centimètres carrés de section de fer, il en résultera pour la longueur totale du noyau 384 mm environ, ou, avec l'isolant interposé entre les disques, 400 mm ; c'est-à-dire que la longueur du noyau du tambour sera à peu près double de son diamètre. On donne habituellement aux noyaux d'induits en tambour une longueur un peu supérieure au double de leur diamètre ; mais peu importe pour l'objet actuel. Une autre considération intervient d'ailleurs encore. Si l'on a atteint un nombre de spires aussi élevé que 36, et si chacune d'elles porte 102,5 ampères, on aura comme effet total d'aimantation transversale un produit de 3 690 ampères-tours. Ce nombre sera-t-il trop élevé pour un noyau de 180 millimètres de diamètre, c'est-à-dire assez fort pour déterminer des étincelles ? L'expérience seule peut trancher la question (voir p. 421). Or elle enseigne que, dans les machines bipolaires bobinées en tambour, un noyau en disques de 180 millimètres de diamètre peut porter au moins 5 000 ampères-tours sans étincelles, de sorte que l'on est parfaitement dans les limites de bon fonctionnement. On pourrait diminuer légèrement les résistances internes en choisissant des disques de noyau un peu plus petits et allonger ainsi le noyau, ce qui économiserait un peu du fil employé au recouvrement des calottes extrêmes ; mais on ne pourrait plus alors se servir du toron de fil

choisi tout d'abord. Si l'on prenait des disques de 150 millimètres de diamètre à trou central de 50 millimètres, il en faudrait une longueur nette de 288 millimètres ou une longueur brute de 312 millimètres environ ; mais on ne pourrait plus loger à la périphérie du noyau les 72 conducteurs, à moins de leur donner une forme particulière ; ainsi on pourrait employer des lames en cuivre étiré réunies sur plats (comme dans la figure 287), chacune d'elles ayant 6,5 millimètres de largeur sur 1,5 millimètre d'épaisseur. Les trois lames juxtaposées auraient ensemble, avec leur isolant, une épaisseur de 5 millimètres à peu près, et les 72 conducteurs ainsi constitués occuperaient environ 360 millimètres à la périphérie des disques de 150 millimètres, ce qui laisserait 110 millimètres pour l'insertion des coins d'entraînement. On pourrait encore procéder autrement et bobiner, sur des disques de 216 millimètres de diamètre, au lieu du conducteur toronné, quatre fils parallèles de 3,25 millimètres de diamètre, laissant passer 25 ampères, et roulés par deux en épaisseur, ce qui en donnerait sur tout le pourtour 144 occupant environ, côte à côte, 550 millimètres avec le guipage. Si le constructeur n'avait pas en approvisionnement de disques de cette dimension, mais s'il en avait de 175 millimètres, il les emploierait probablement en choisissant le fil convenable. La différence dans le rendement final de la machine serait insignifiante.

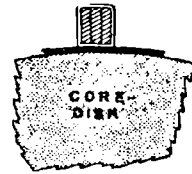


Fig. 287.
Core Disk = Disque
de noyau.

Supposons donc qu'à la suite de ces diverses considérations on ait choisi des disques de 180 millimètres, que le noyau d'induit ait 400 millimètres de long, et que l'isolation et le bobinage du cuivre, ainsi que les frettes, portent le diamètre extérieur de l'induit à 206,5 millimètres environ ; il reste maintenant à étudier les inducteurs.

Nous nous baserons comme type sur la forme de la figure 121, et nous établirons en fonte les branches horizontales. Il faudra, au moins provisoirement, admettre une valeur pour le coefficient de perte qui dans ce type est plutôt élevé ; on le supposera égal à 2. On devra en conséquence étudier l'inducteur pour qu'il fournisse un flux de 8 340 000 unités, au lieu de 4 170 000. Et, comme l'expérience indique qu'il n'est pas avantageux de pousser l'induction au delà de 7000 unités, ce nombre implique une section droite de 1191 centimètres carrés, au moins. L'expérience montre en outre qu'il est bon de faire dépasser légèrement le noyau d'induit de chaque côté de l'inducteur. On peut y arriver en taillant en biseau les bords des parties polaires, tout en

maintenant au reste sa largeur. Supposons qu'on donne aux branches de l'inducteur 49 centimètres de profondeur d'avant en arrière, et 29 centimètres d'épaisseur; quel devra être leur écartement? Cette longueur devra naturellement être telle qu'elle permette de loger entre elles le noyau en fer forgé et la bobine suffisants pour recevoir l'enroulement nécessaire à l'excitation de l'aimantation voulue. Pour déterminer la quantité de fer à employer, il faut tout d'abord calculer le nombre d'ampères-tours d'après le principe du circuit magnétique. Mais comment appliquer ce principe sans connaître la longueur de fer à mettre? On procède ordinairement par tâtonnements. On commence par un calcul préliminaire dans lequel on introduit une estimation grossière de la longueur encore indéterminée du noyau. Cela fait, on voit si, sans difficulté mécanique et sans risque d'échauffement anormal, la quantité de fil ainsi calculée peut être placée sur la longueur de fer supposée; à la suite de cette comparaison on diminue ou on augmente la longueur choisie et on refait le calcul. Mais ici surgit une autre difficulté. Si l'on suppose que l'induit n'exerce pas de réaction démagnétisante, on trouve par le calcul une quantité de fil bien inférieure à la quantité réellement nécessaire. En conséquence on calculera approximativement, en suivant la règle donnée page 275, le nombre d'ampères-tours démagnétisants, et on ajoutera 2 fois ce nombre à celui précédemment trouvé; l'inducteur devra être assez long pour recevoir ce nombre de spires supplémentaire. Dans le cas considéré, supposons que l'angle polaire soit de 145° de chaque côté; il en résulte qu'il y aura dans les entrefers à chaque instant les $\frac{145}{180}$ des 72 conducteurs, ou environ 58 des conducteurs de l'induit, et une bande de 7 conducteurs (voir fig. 71, p. 86) découverte entre les becs polaires, ce qui donne 700 ampères-tours de force démagnétisante si l'on suppose les balais situés dans le voisinage des extrémités polaires.

Maintenant le diamètre extérieur de l'induit est de 206,5 millimètres et il faut laisser 3,25 millimètres de jeu tout autour, ce qui donne comme diamètre d'alésage des surfaces polaires 213 millimètres et comme entrefer radial 16,5 millimètres. Les entrefers eux-mêmes peuvent être comptés comme ayant 273 millimètres dans le sens de la courbure et 380 millimètres d'arrière en avant. On est dès lors en mesure d'appliquer les règles qui permettent de calculer le système inducteur. On peut en conséquence s'arrêter ici dans les considérations générales; elles ont été poussées assez loin pour faire voir

la nécessité d'avoir des expressions maniables d'une exactitude suffisante.

CALCULS ÉLECTRIQUES

§ 1. **Calcul des Volts perdus dans l'induit.** — On mesure à l'aide d'un ampèremètre le nombre i_a des ampères circulant dans l'induit; on le multiplie par le nombre d'ohms (ou par la fraction d'ohm) qui représente la résistance interne de l'induit. On a pour les

$$\text{volts perdus} = r_a \times i_a.$$

Le même procédé s'appliquera au calcul des volts perdus par suite de la résistance d'une bobine quelconque en série sur l'induit. Si l'on désigne par r_m les autres résistances intérieures en circuit principal, telles qu'une bobine en série, on devra l'ajouter à r_a et l'on aura :

$$\text{volts perdus} = (r_a + r_m) \times i_a.$$

§ 2. **Calcul du Courant passant par une dérivation.** — On divise le nombre de volts aux bornes e par le nombre d'ohms r_d de résistance de la bobine en dérivation, et l'on a :

$$i_d = \frac{e}{r_d}.$$

Dans une bonne machine moderne on peut compter, pour i_d , sur 3 p. 100 environ de i (et même moins).

§ 3. **Calcul du Courant total circulant dans l'induit.** — On ajoute au nombre d'ampères i allant aux lampes le nombre d'ampères i_d qui passe dans la bobine en dérivation

$$i_a = i + i_d,$$

c'est-à-dire qu'on peut ajouter environ 3 p. 100 au courant qui alimente les conducteurs principaux.

§ 4. **Calcul du Diamètre de fil nécessaire pour l'induit.** — Etant donné qu'une double voie est offerte au courant à travers l'induit, on divisera i_a par 2 et on se référera au *Tableau Ampérage et Diamètre de fils*, Appendice B, qui fixera sur le choix du fil. Ne pas oublier que, pour de très petites machines, on peut, en toute sécurité, aller jusqu'à 6 ampères par millimètre carré de section, et, pour de grandes machines, jusqu'à 3 ampères par millimètre carré.

§ 5. **Calcul de la Force électromotrice totale engendrée dans l'induit d'une dynamo.** — On détermine le nombre de volts e sous lequel les conducteurs principaux doivent être alimentés à partir des bornes de la machine (il dépend des lampes qu'on veut employer); on ajoute à ce nombre celui des *volts perdus* précédemment calculé, ce qui donne :

$$E = e + r_a i_a$$

pour le nombre de volts que doit fournir la dynamo.

§ 6. **Calcul du nombre de Conducteurs N de l'induit.** — Ce point est une affaire d'expérience ; voir pages 360 et 387.

§ 7. **Calcul de la Force électromotrice dans l'induit.** (MACHINE A COURANT CONTINU.) — On multiplie l'un par l'autre la vitesse angulaire $\frac{n}{t}$, le nombre des conducteurs N de l'induit, et le flux magnétique Φ , et on divise le produit par 10^8 . En effet :

1 volt correspond à une variation de flux de force de 10^8 unités C. G. S. par unité de temps, ou :

1 volt = 10^8 unités C. G. S. de force électromotrice, et

$$E \text{ (volts)} = \frac{n}{t} N\Phi. 10^{-8}.$$

[Exemple : Pour une machine « Phénix » déterminée, on a $\frac{n}{t} = 23,6$; $N = 180$; $\Phi = 2\,606\,000$; — trouver E .]

CALCULS DE RENDEMENT

§ 8. **Calcul de la Puissance dissipée dans une dynamo.** — N. B. Pour calculer la puissance en chevaux-vapeur d'après le nombre de watts, il suffit de diviser ce dernier nombre par 736.

(1) *Watts dissipés dans la bobine d'induit.* — On multiplie les volts perdus dans l'induit par le nombre d'ampères qui y circulent ; on peut encore multiplier la résistance en ohms de l'induit par le carré du courant en ampères qui y passe.

(2) *Watts dissipés dans une bobine en série.* — On multiplie les volts perdus dans la bobine en série par le nombre d'ampères auxquels elle livre passage ; ou encore la résistance de cette bobine en ohms par le carré de ce nombre d'ampères.

(3) *Watts dissipés dans une bobine en dérivation.* — On multiplie le nombre des ampères qui passent dans la dérivation par le nombre de volts aux bornes de cette dérivation ; ou bien on divise le carré du nombre de volts aux bornes par la résistance en ohms de la bobine en dérivation.

(4) *Les watts dissipés par courants parasites* ne sont pas susceptibles d'un calcul direct.

(5) *Watts dissipés par hystérésis magnétique.* — Les chiffres donnés page 158 indiquent le nombre de watts dissipés par hystérésis dans le fer doux forgé convenablement divisé, quand il est soumis à une succession de cycles d'aimantation comme dans le noyau de l'induit mobile d'une dynamo.

§ 9. **Calcul du Rendement électrique.** — On multiplie l'un par l'autre le courant utile i et le nombre des volts disponibles e , ce qui donne les watts utiles. On multiplie ensuite le courant total i_a par la force électromotrice E , ce qui fournit le nombre total de watts de puissance brute. Le rendement électrique est le rapport du premier de ces deux nombres au dernier,

$$\eta = \frac{ei}{Ei_a}.$$

On peut encore diviser les watts utiles par le nombre total de watts (comprénant les watts utiles et dissipés). Le rendement électrique ne comprend pas les pertes par courants parasites, hystérésis ou frottements.

§ 10. **Calcul du Rendement commercial.** — Cette question n'entre pas dans l'étude d'un projet de dynamo ; elle fait partie des épreuves à lui faire subir. Voir Chapitre XXVIII.

CALCULS MAGNÉTIQUES

§ 11. **Calcul du Flux magnétique à travers l'induit.** — On commence par mesurer e auquel on ajoute les volts perdus, ce qui donne E . On multiplie alors ce nombre par 10^8 et on divise le tout par le produit $\frac{n}{l} N$.

$$\Phi = \frac{E \times 10^8 \times t}{n N}$$

[*Exemple* : Si pour une machine Edison-Hopkinson, $\frac{n}{l} = 12,5$; $N = 80$; $e = 105$; $r_a i_a = 3,26$; — trouver Φ .]

§ 12. **Calcul de l'Induction magnétique spécifique \mathfrak{B} dans un noyau de fer.** — Après avoir déterminé le flux magnétique Φ à travers ce noyau et la section droite S de fer réel dans le dit noyau, on divise Φ par S :

$$\mathfrak{B} = \frac{\Phi}{S}$$

[*Exemple* : Pour une machine Kapp, Φ dans l'induit = 6 730 000 ; $S = 403,4$ centimètres carrés ; — trouver \mathfrak{B} .]

[*Exemple* : Pour une machine Edison-Hopkinson, Φ dans l'induit = 10 826 000 ; $S = 840$ centimètres carrés ; — trouver \mathfrak{B} .]

§ 13. **Calcul de la Section droite de fer nécessaire pour laisser passer un flux de force donné.** — On détermine d'abord le flux total qu'il faut faire passer dans le noyau de l'induit quand la machine fonctionne à pleine charge ; appelons-le Φ . On fixe ensuite la valeur convenable à donner à l'induction magnétique spécifique \mathfrak{B} . Dans les machines à courant continu pour éclairage par incandescence, il n'est généralement pas utile de pousser cette induction au delà de $\mathfrak{B} = 17\,000$ unités. Pour les machines destinées à alimenter des arcs, on peut aller plus loin. Quant aux machines à courants alternatifs (ainsi que pour les noyaux de transformateurs) il n'y a pas à chercher, à beaucoup près, un degré d'aimantation aussi élevé : $\mathfrak{B} = 7\,000$ est suffisant. La valeur de \mathfrak{B} étant ainsi fixée, on n'a plus qu'à diviser Φ par cette valeur pour avoir la section S cherchée.

[*Exemple* : Dans une machine « Phénix » déterminée on avait fixé à 17 825 unités la valeur de \mathfrak{B} , et Φ devait être de 2 606 000 unités ; — trouver S .]

[*Exemple* : Dans un alternateur Kapp, S dans le noyau d'induit était de 103,2 centimètres carrés ; — en supposant $\mathfrak{B} = 6\,500$, calculer Φ .]

Le calcul de la section droite des inducteurs s'effectue par le même procédé ; mais il faut, comme on le verra ultérieurement, conserver une certaine marge, pour y laisser passer un plus grand flux de force (en raison des dérivations magnétiques) ; et il est bon, même avec des noyaux en fer forgé, de ne pas les pousser au même degré d'aimantation que l'induit. Si l'on a affaire à des noyaux de fonte, la section devra être à peu près double, attendu qu'on ne doit pas chercher à obtenir avec cette matière une induction de beaucoup supérieure à 8 000 unités.

§ 14. **Marge pour les Dérivations magnétiques.** — Par suite des dérivations magnétiques, le flux magnétique est différent dans les diverses parties du circuit.

[*Exemple* : Dans une machine Edison-Hopkinson on avait trouvé que, pour avoir 10 826 000 unités dans l'induit, il suffisait, pour obtenir la puissance magnétisante voulue, de développer dans le champ un flux de 14 290 320 unités, 3 464 320 unités se dérivant et ne pénétrant pas l'induit. C'est comme si, pour 132 unités dans le champ, 100 seulement étaient utilisées et 32 perdues.]

On emploie le symbole v pour ce coefficient de perte à faire entrer en ligne de compte. Sa valeur varie, suivant les dynamos, de 1,2 à 2, ou même davantage. Dans l'exemple ci-dessus $v = 1,32$. On doit prendre une latitude de v fois Φ unités dans le champ, de manière à avoir un flux de Φ unités à travers l'induit. (A comparer avec la page 177.)

§ 15. **Calcul de la Perméabilité du fer à un degré quelconque d'aimantation.** — On désigne sous le nom de *perméabilité* du fer (symbole μ) le rapport entre le flux de force passant dans le fer (ou autre substance) et celui qui passerait dans l'air (pour la même force magnétisante).

La valeur de μ est égale à 1 pour l'air, le cuivre, et toutes les substances non magnétiques. Dans le fer elle varie suivant la qualité du métal et avec le degré d'aimantation auquel il est porté, et devient de plus en plus petite au fur et à mesure que l'aimantation est plus poussée vers la saturation. Elle diffère également selon les divers échantillons d'une même sorte de fer sortant de la même forge ou de la même fonderie. Le tableau I, page 140, est extrait des données fournies par Hopkinson dans les *Phil. Trans. of Royal Society*, de 1885, pour deux sortes de fer employées par Mather et Platt dans la construction des machines Hopkinson. Les courbes correspondantes sont données pages 141 et 142 ci-dessus.

Supposons qu'on ait tiré \mathfrak{B} de Φ et de S comme précédemment, et qu'on veuille savoir quelle sera la valeur de μ pour ce degré d'aimantation ; — l'ingénieur chargé de l'étude du projet devra se reporter à ce tableau ou à ces courbes et voir quelle est la valeur de μ correspondant à la valeur de \mathfrak{B} considérée.

[*Exemple* : Dans l'induit d'une dynamo Kapp tournant à circuit ouvert, $\Phi = 6\,730\,000$; $S = 403,1$ centimètres carrés ; — trouver \mathfrak{B} ; et, d'après sa valeur, étant admis que le fer est de même qualité que celui du tableau I, page 140,

trouver μ . Trouver également \mathfrak{B} et μ quand, à pleine charge, Φ s'élève jusqu'à 7 170 000 unités C. G. S. par suite du surcroît d'action magnétisante fourni par la bobine en série.]

[*Exemple* : Dans l'inducteur (en fonte) d'une machine « Phénix », $S = 400$ centimètres carrés ; Φ dans l'induit = 2 606 000 ; v (coefficient admis pour les dérivations) = 1,4 ; — calculer $v\Phi$; puis \mathfrak{B} ; et enfin trouver μ d'après le tableau I, page 140, pour la fonte.]

CALCULS RELATIFS AU CIRCUIT MAGNÉTIQUE

Loi fondamentale du circuit magnétique.

$$\frac{\text{Force magnétomotrice}}{\text{Résistance magnétique}} = \text{Flux magnétique.}$$

Les conséquences s'en déduisent naturellement.

§ 16. **Calcul de la Force magnétomotrice nécessaire pour faire passer un flux de force donné à travers une résistance magnétique déterminée.** — On multiplie le nombre qui représente la résistance magnétique par le flux qu'on veut y faire passer. Le produit donnera la force magnétomotrice nécessaire.

Si la résistance magnétique est exprimée en unités C. G. S., la force magnétomotrice ainsi obtenue devra être divisée par 1,257 (c'est-à-dire par $\frac{4\pi}{10}$) pour donner le nombre d'ampères-tours de force magnétisante cherchée.

§ 17. **Calcul de la Résistance magnétique d'un noyau de fer.** — La résistance magnétique étant directement proportionnelle à la longueur et inversement proportionnelle à la section et à la perméabilité, on a la formule suivante :

$$\text{Résistance magnétique} = \frac{l}{\mu S} ;$$

mais on ne peut y introduire la valeur de μ avant de l'avoir calculée d'après celle de \mathfrak{B} , trouvée conformément au § 15.

[*Exemple* : Trouver la résistance magnétique, de bout en bout, d'un barreau de fer de 25 centimètres de long et d'une section droite de 25 centimètres carrés, étant donné que le flux magnétique Φ qui le pénètre est de 440 000 unités C. G. S.]

§ 18. **Calcul de la Résistance magnétique totale du circuit magnétique d'une dynamo.** — On effectue cette détermination en calculant séparément les résistances magnétiques des différentes parties du circuit et les additionnant ensemble. Il faut cependant tenir compte des dérivations magnétiques, en réservant une marge de $v\Phi$ unités pour les noyaux et la culasse des inducteurs.

Dans le cas le plus simple, le circuit magnétique comprend trois parties : (1) le fer du noyau d'induit ; (2) l'air, le cuivre, le coton, etc., dans ce qu'on nomme les entrefers ; (3) le fer de l'inducteur. On peut prendre comme égale à 1 la perméabilité des substances dans les entrefers. En conséquence, les

expressions des trois résistances en question peuvent respectivement revêtir les formes suivantes :

CIRCUIT MAGNÉTIQUE	RÉSISTANCES en unités C. G. S.
1. Induit	$\frac{l_1}{S_1 \mu_1}$
2. Entrefers.	$\frac{2l_2}{S_2 \mu_2}$
3. Noyau inducteur	$\frac{l_3}{S_3 \mu_3}$

Si le fer employé dans l'induit et dans l'inducteur est de la même qualité, et si l'on a pris S_3 égal à v fois S_1 , de sorte que les noyaux soient portés tous deux au même degré d'aimantation, μ_3 et μ_1 seront identiques. Pour les entrefers, $\mu = 1$.

S'il n'y avait pas de dérivations, la résistance totale serait simplement la somme de ces trois résistances partielles; mais les dérivations réduisent la résistance totale et forcent en même temps à augmenter Φ dans l'inducteur, et, par suite, les ampères-tours d'excitation.

§ 19. Calcul des Ampères-tours de force magnétisante nécessaires pour faire passer le flux magnétique voulu à travers la résistance du circuit magnétique. — Rappelons la règle :

Ampères-tours = Flux magnétique multiplié par résistance magnétique, divisé par $\frac{4}{10}$ de π (= 1,257).

Détaillées les trois quantités distinctes d'ampères-tours nécessaires pour les trois résistances magnétiques principales d'une dynamo ont pour expressions :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ampères-tours nécessaires pour faire} \\ \text{passer un flux } \Phi \text{ à travers le fer de} \\ \text{l'induit} \end{array} \right\} = \Phi \times \frac{l_1}{S_1 \mu_1} \times \frac{10}{4\pi};$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ampères-tours nécessaires pour faire} \\ \text{passer le flux } \Phi \text{ à travers les deux} \\ \text{entrefers.} \end{array} \right\} = \Phi \times \frac{2l_2}{S_2} \times \frac{10}{4\pi};$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ampères-tours nécessaires pour faire} \\ \text{passer le flux } v\Phi \text{ à travers le fer de} \\ \text{l'inducteur.} \end{array} \right\} = v\Phi \times \frac{l_3}{S_3 \mu_3} \times \frac{10}{4\pi};$$

et, en les additionnant, on trouve :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Nombre total d'ampères-tours néces-} \\ \text{saire.} \end{array} \right\} = \frac{10}{4\pi} \Phi \left\{ \frac{l_1}{S_1 \mu_1} + \frac{2l_2}{S_2} + \frac{vl_3}{S_3 \mu_3} \right\}.$$

[*Exemple* : Dans une machine Lahmeyer donnée, à inducteurs de fonte, les constantes étaient les suivantes : $\Phi = 2\,328\,000$; $v = 1,11$; $l_1 = 16$ centimètres ; $l_2 = 0,5$ centimètre ; $l_3 = 100$ centimètres ; $S_1 = 225$ centimètres carrés ; $S_2 = 450$ centimètres carrés ; $S_3 = 560$ centimètres carrés ; — calculer le nombre d'ampères-tours nécessaires.]

Dans quelques types de dynamos on est obligé de calculer séparément les résistances magnétiques des pièces polaires et des culasses et il faut dans certains cas laisser une marge pour les dérivation en différents points du circuit. La formule plus complète serait en conséquence :

$$Ni = \frac{10}{4\pi} \Phi \left\{ \frac{l_1}{S_1 \mu_1} + \frac{2l_2}{\mu_2} + \frac{v_3 l_3}{S_3 \mu_3} + \frac{v_4 l_4}{S_4 \mu_4} + \frac{v_5 l_5}{S_5 \mu_5} \right\}.$$

Il est bon de faire *deux fois* les calculs d'ampères-tours ; c'est-à-dire une fois (en prenant la valeur de Φ correspondant au cas où il n'y a pas de volts perdus) pour trouver le nombre d'ampères-tours à appliquer à la dérivation, quand il ne va aux lampes aucun courant ; et une seconde fois (en prenant la valeur plus élevée de Φ correspondant au maximum de E) pour trouver le nombre plus grand d'ampères-tours nécessaires quand on demande à l'induit son plein débit. On devra pourvoir à ces ampères-tours supplémentaires (dans une machine compound) au moyen d'une bobine en série, à laquelle il faudra également ajouter des spires pour compenser l'action démagnétisante de l'induit.

§ 20. **Estimation des Ampères-tours additionnels nécessaires pour compenser l'action démagnétisante du courant d'induit quand les balais sont décalés en avant.** — On compte le nombre de conducteurs à la périphérie, entre le diamètre de symétrie et le diamètre réel de commutation, et on le multiplie par le nombre i_a d'ampères passant dans l'induit. (On peut prendre pour multiplicateur approché la moitié du nombre des conducteurs compris dans l'un des espaces entre les becs des deux pièces polaires.) Après avoir multiplié par v le produit ainsi obtenu, on y ajoute le nombre d'ampères-tours trouvé suivant le dernier paragraphe. Pour les machines à anneau il faut doubler le produit. Arnoux établit que ce nombre est, pour les machines à anneau, égal à 15 p. 100 environ des ampères-tours de la dérivation ; tandis que, pour les machines à tambour, il varie de 5 à 7 p. 100 de ces ampères-tours.

EXEMPLES DE CALCULS APPLIQUÉS A DES MACHINES

A COURANT CONTINU

Comme nous l'avons fait remarquer au début de ce chapitre, il y a grand profit à se livrer à ce genre de calculs sur quelques types de machines existantes. Nous en donnerons ici deux exemples complets relatifs, l'un à une dynamo Edison-Hopkinson (voir p. 176 et 177) ; l'autre à une machine « Phénix ». Les calculs du circuit magnétique sont établis en unités C. G. S. Le troisième exemple est donné à titre d'exercice de calculs à effectuer.

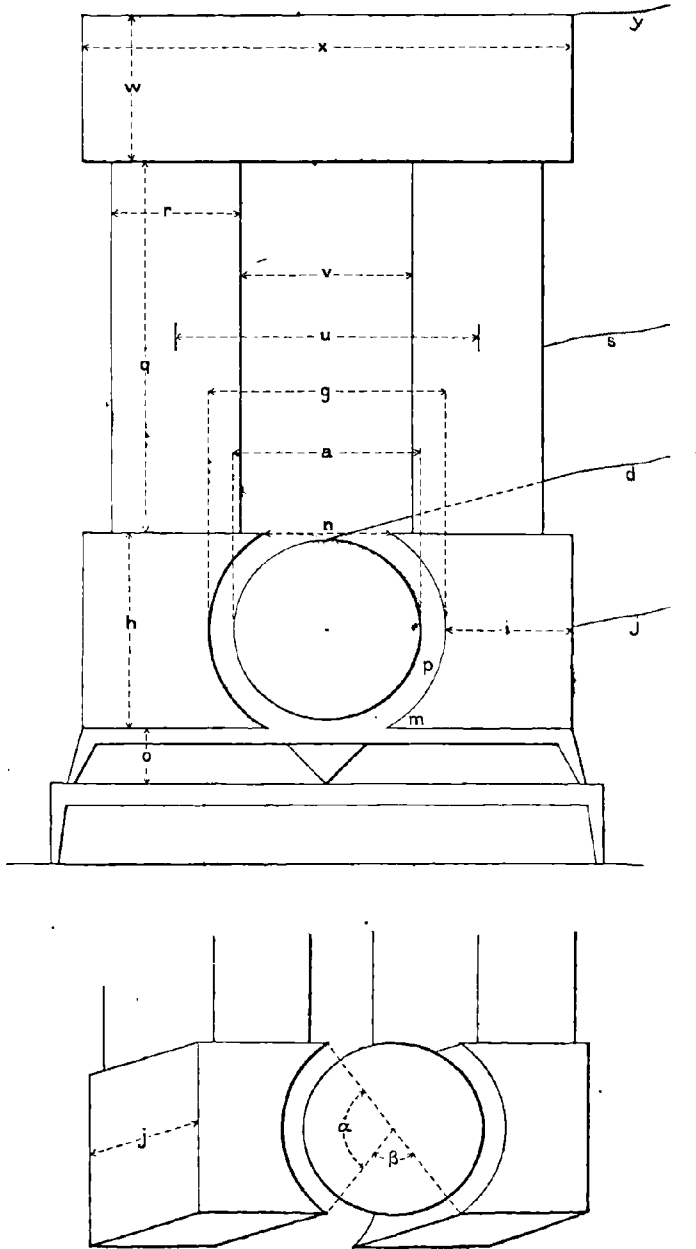


Fig. 288 et 289. — Carcasse de la dynamo Edison-Hopkinson (p. 400).

COTES DE LA DYNAMO EDISON-HOPKINSON (p. 398 et 400)

Induit.

a. Diamètre du noyau	24,50 cm.
b. — du trou central	7,62 —
c. Épaisseur du fer	8,44 —
d. Profondeur brute du noyau (parallèlement à l'axe)	50,80 —
Épaisseur totale du papier isolant les disques	3,40 —
Profondeur nette du fer (parallèlement à l'axe)	47,40 —
e. Section droite, nette, du fer par un plan axial	800,00 cm ² .
— — — — — , avec marge pour l'arbre	810,00 —
f. Diamètre de l'arbre	6,98 cm.

Pièces polaires.

g. Alésage	27,50 cm.
h. Hauteur	25,40 —
i. Largeur dans la partie la plus étroite	22,80 —
j. Profondeur (parallèlement à l'axe)	48,30 —
k. Section droite verticale	1 230,00 cm ² .
l. Surface efficace	1 500,00 —
m. Épaisseur des bords des becs	0,80 cm.
n. Largeur de l'intervalle entre les becs polaires	12,70 —
o. Distance des pièces polaires au socle	12,70 —
z. Arc sous-tendu par une cavité polaire	129°
β. — — par l'intervalle des becs polaires	51°

Entrefer direct.

ρ. Épaisseur	1,50 cm.
------------------------	----------

Inducteurs.

q. Hauteur d'une branche	45,70 cm.
r. Largeur —	22,10 —
s. Profondeur — (parallèlement à l'axe)	44,45 —
t. Section droite horizontale d'une branche	980,00 cm ² .
u. Distance d'axes des branches	38,10 cm.
v. Écartement —	16,00 —

Culasse.

w. Hauteur	23,20 cm.
x. Largeur	61,60 —
y. Profondeur (parallèlement à l'axe)	48,30 —
z. Section droite verticale	1 135,00 cm ² .

EXEMPLE 1. — DYNAMO EDISON-HOPKINSON

*Description transformée d'après le travail de J. et E. Hopkinson,
publié dans les Phil. Trans. de 1886.*

DYNAMO EN DÉRIVATION, A INDUIT EN TAMBOUR : Puissance, 33 kilowatts : 320 ampères sous 105 volts, à 750 tours par minute.

[Les formes simples de cette machine et les circonstances l'ayant fait prendre comme type d'un certain nombre de calculs intéressants relatés au cours de cet ouvrage, nous avons cru bon d'en résumer, dans un tableau d'ensemble avec figures de référence, les différentes constantes de construction. En effet, par suite d'erreurs typographiques ou d'inadvertances, les chiffres donnés tant par les mémoires originaux que par les divers auteurs qui les ont reproduits ne concordent pas toujours entre eux de l'un à l'autre, ni même dans un même travail, y compris le présent Traité. Il en résulte des différences fâcheuses dans les résultats des calculs, différences d'autant plus inextricables qu'il vient s'y joindre des conversions de mesures anglaises en mesures françaises ou réciproquement, et des formules différentes d'intégration. Nous avons cherché à en rétablir l'unité.]

Induit : Formé d'environ 1 000 disques de noyau estampés dans des feuilles de tôle douce, séparés par des feuilles de papier et maintenus entre deux disques terminaux, dont l'un vient buter contre un épaulement réservé sur l'arbre, et dont l'autre est serré par un écrou et un contre-écrou vissés sur l'arbre lui-même. Arbre en acier Bessemer, isolé avant de recevoir les disques de noyau glissés sur lui.

Le noyau est recouvert de 40 spires (c'est-à-dire qu'il y a 80 conducteurs à la périphérie), formées chacune de 16 fils de cuivre toronnés, de 1,753 mm de diamètre; les spires sont roulées sur deux couches de 20 chacune. — Collecteur à 40 touches de cuivre isolées au mica; connexions avec l'induit, établies de telle sorte que le plan de commutation est horizontal quand le circuit est ouvert. — Section droite du fil ci-dessus : 2,3 mm carrés; section totale de chaque toron de 16 fils : 38 mm carrés. — Résistance de l'induit de balai à balai 0,009947 ohm, à 13,5 degrés centigrades.

Inducteurs : Trois pièces de forge en fer martelé, à surfaces jointives soigneusement dressées, boulonnées ensemble; branches à section rectangulaire, arêtes légèrement arrondies. Socle de zinc interposé entre l'inducteur et la plaque de fondation.

Les spires magnétisantes sont directement roulées sur les branches d'inducteurs et comportent sur chaque branche 11 couches de fil de cuivre de 2,413 mm de diamètre, présentant, par suite, une section droite de 4,573 mm carrés et

faisant en tout 3 260 tours, avec une longueur totale d'environ 4 570 mètres.
Résistance (à 13,5 degrés centigrades) = 16,93 ohms.

Données pour le calcul des résistances dans le circuit magnétique.

1. *Noyau d'induit :*

l_1 est compté pour 13 centimètres;
 S_1 — — pour 810 centimètres carrés.

2. *Entrefer :*

$l_2 = 1,5$ centimètre;
 S_2 est compté pour 1 600 centimètres carrés, ce qui donne 150 centimètres carrés pour dispersion, la surface réelle de la face polaire étant de 1 500 centimètres carrés, et la surface correspondant à 129 degrés de la surface du noyau d'induit, de 1 400 centimètres carrés. Laisser tout autour pour dispersion une marge égale aux quatre cinquièmes de l'entrefer.

3. *Branches d'inducteurs :*

l_3 est au total de 91,4 centimètres;
 S_3 est compté pour 980 centimètres carrés.

4. *Culasse :*

l_4 est compté pour 49 centimètres estimés suivant des quadrants de raccordement aux angles;
 S_4 est de 1 135 centimètres carrés.

5. *Pièces polaires :*

l_5 est de 18 centimètres estimés suivant des quadrants de raccordement;
 S_5 est compté pour 1 240 centimètres carrés, moyenne entre la section de la branche et celle de la face polaire.

Le coefficient de dérivation v était admis par Hopkinson comme égal à 1,32; mais il était probablement plus voisin de 1,4.

Calculs relatifs à cette machine.

$$i = 320; \quad e = 105; \quad \frac{n}{t} = \frac{750}{60} = 12,5; \quad r_a = 0,01; \quad r_d = 16,93;$$

d'où
$$i_d = \frac{e}{r_d} = 6,21; \quad i_a = i + i_d = 326,2;$$

$$\text{volts perdus} = r_a \times i_a = 0,01 \times 326 = 3,26;$$

$$E = e + r_a i_a = 108,26 \text{ à pleine charge.}$$

$$N = 80.$$

$$\Phi = \frac{E \times 100\,000\,000 \times t}{n N} = \frac{108,26 \times 10^8}{12,5 \times 80} = 108,26 \times 10^6 = 10\,826\,000.$$

$$\text{Watts utiles} = e \times i = 105 \times 320 = 33\,600.$$

$$\text{Watts totaux} = E \times i_a = 108,26 \times 326 = 35\,293.$$

$$\text{Rendement électrique } \eta = \frac{\text{watts utiles}}{\text{watts totaux}} = 0,952, \text{ ou } 95,2 \text{ p. } 100.$$

$$\text{Watts perdus dans l'induit} = \text{volts perdus} \times \text{ampères} = 3,26 \times 326 = 1\,062,76.$$

$$\text{Watts perdus dans l'inducteur} = \text{ampères perdus} \times \text{volts} = 6 \times 105 = 630.$$

$$\text{Watts perdus par hystérésis} = 12,5 \text{ renversements par seconde dans } 80 \text{ décimètres cubes; pour une valeur de } \mathfrak{B} \text{ égale à } 13\,365, \text{ voir page } 158, = 863.$$

Pour le nombre d'ampères-tours nécessaires à l'aimantation, on a, d'après le § 49 ci-dessus :

$$Ni = \frac{10}{4\pi} \times 10\,826\,000 \times \text{résistance magnétique totale.}$$

Cette résistance magnétique totale doit être calculée d'après les 5 données partielles du circuit magnétique, comme il est indiqué page 397. On cherchera d'abord les valeurs de \mathfrak{B} dans chacune des parties séparément, suivant la dérivation et la section droite, et d'après ces valeurs on trouvera les valeurs correspondantes de μ à l'aide du tableau I, page 140.

1. Induit	$\mathfrak{B}_1 = 13\,365$; $\mu_1 = 990$
3. Branches de l'inducteur. . .	$\mathfrak{B}_3 = 14\,580$; $\mu_3 = 650$
4. Culasse	$\mathfrak{B}_4 = 12\,590$; $\mu_4 = 1\,220$
5. Pièces polaires.	$\mathfrak{B}_5 = 11\,610$; $\mu_5 = 1\,520.$

L'introduction de ces valeurs et de celles des coefficients de dérivation fait ressortir les résistances magnétiques avec les valeurs suivantes :

1. Induit	0,00001621
2. Entrefers.	0,00187500
3. Branches d'inducteurs.	0,00014348
4. Culasse.	0,00003538
5. Pièces polaires	0,00001910
Résistance magnétique totale	<u>0,00208917;</u>

d'où

$$Ni = \frac{10}{4\pi} \times 10\,826\,000 \times 0,00208917 = 17998.$$

A ce chiffre il faut ajouter les ampères-tours nécessaires pour compenser l'action démagnétisante de l'induit. Le nombre des conducteurs de l'induit entre les becs polaires est de 11 ; mais, comme le diamètre de commutation n'est pas tout à fait à l'extrémité des pôles, on prendra 9 comme bande démagnétisante. En multipliant ce nombre par la moitié du courant d'induit

(163 ampères) et par le coefficient de perte (1,32), on obtient 1 936 comme nombre de compensation, ce qui donne 20 162 pour le nombre total d'ampères-tours. En divisant ce nombre par 6,21, nombre d'ampères du courant admis dans la bobine en dérivation, on trouve 3 210 pour le nombre de spires cherché, à mettre sur l'inducteur. Le nombre réel des spires roulées sur celui-ci était de 3 260, ce qui laissait une marge pour la régulation.

EXEMPLE II. — DYNAMO « PHÉNIX » (TYPE SUPÉRIEUR)

DYNAMO COMPOUND, A INDUIT EN ANNEAU : Puissance 9 à 10 kilowatts, par 90 ampères sous 105 volts, à 1 420 tours par minute.

Induit : Formé d'environ 225 disques de noyau estampés dans des feuilles de tôle douce, séparés par des feuilles de papier, solidement maintenus entre eux par quatre boulons dûment isolés, et entraînés par deux manchons en étoiles à quatre bras, clavetés sur l'arbre. — Arbre en acier Bessemer.

Disques de noyau, diamètre extérieur . . .	26,99 centimètres.
— — — diamètre intérieur . . .	20,32 —
Diamètre de l'arbre	4,45 —
Profondeur radiale du fer	3,33 —
Longueur brute du noyau	22,86 —
Épaisseur totale du papier isolant	1,12 —
Longueur nette du fer dans le noyau	20,11 —
Section droite, nette, du fer	141,9 centimètres carrés.
Épaisseur des disques de noyau	0,889 millimètre.

Le noyau est enroulé de 36 bobines formées chacune de 5 spires de fil de cuivre carré de 3,81 millimètres carrés de section; les spires sont roulées en une seule couche. Nombre de conducteurs à la périphérie : 180; collecteur à 36 touches en cuivre fondu, isolées au mica. Section droite du fil ci-dessus : 14,5 millimètres carrés. — Résistance de l'induit de balai à balai : 0,04 ohm.

Inducteurs : Deux pièces de fonte, à joints soigneusement dressés et boulonnées ensemble; section des branches : rectangulaire, arêtes légèrement arrondies. Les deux branches et une mince culasse sont fondues en une seule pièce; la plaque de fondation, qui sert en même temps de culasse principale, constitue une pièce séparée.

Longueur d'une branche d'inducteur	22,22 cm.
Profondeur — — — parallèlement à l'arbre . . .	22,86 —
Largeur — — —	17,78 —
Longueur de la culasse	54,61 —
Profondeur — — — parallèlement à l'arbre . . .	22,86 —
Épaisseur — — —	15,24 —
Distance entre les axes des branches	34,29 —
Diamètre d'alésage des faces polaires	28,89 —
Épaisseur des pièces polaires	24,13 —
Profondeur — — — parallèlement à l'arbre . . .	22,86 —

Largeur de l'intervalle entre les becs polaires.	16,51 cm.
Épaisseur de l'entrefer	0,95 —
Largeur angulaire de chaque face polaire.	112°
Largeur angulaire de l'intervalle entre les becs polaires.	68°

Les bobines magnétisantes comportent chacune des spires en dérivation en même temps que des spires en série; ces spires sont roulées sur des carcasses rectangulaires que l'on glisse ensuite sur les branches d'électros.

L'enroulement en série comprend sur chaque bobine, 54 spires de fil de cuivre, de 5,156 millimètres de diamètre, soit de 20,870 millimètres carrés de section. La résistance du fil en série est de 0,021 ohm. Sa longueur approximative est de 46 mètres. — L'enroulement en dérivation est constitué par 1 727 spires sur chaque bobine (en tout 3 454 spires) de fil de cuivre, de 1,445 millimètre de diamètre, soit 1,645 millimètre carré de section. La résistance de cette dérivation est de 39,76 ohms; elle correspond à une longueur approximative de fil de 1 730 mètres.

Rapport du diamètre intérieur au diamètre extérieur du noyau	7,53 à 10.
Rapport de la profondeur radiale du fer au diamètre extérieur du noyau.	2,47 à 10.
Rapport de la longueur du fer du noyau au diamètre de ce noyau	8,88 à 10.
Rapport de l'épaisseur du cuivre sur l'induit à l'épais- seur du fer de son noyau.	1,00 à 8,5.
Rapport de l'épaisseur du cuivre sur l'induit au dia- mètre de son noyau	1,00 à 71.

Données pour le calcul des résistances du circuit magnétique.

1. Noyau d'induit :

l_1	compté pour 16,51 centimètres.
S_1	— — 140,8 centimètres carrés.
μ_1	— — 195.

2. Entrefer :

l_2	compté pour 0,95 centimètre.
S_2	— — 820 centimètres carrés.

3. Branches d'électro-aimants :

l_3	est au total de 44,4 centimètres.
S_3	— — de 400 centimètres carrés.

4. Culasse :

l_4	compté pour 30,48 centimètres.
S_4	— — 580,5 centimètres carrés.

5. Pièces polaires :

l_p compté pour 22,38 centimètres.

S_p — — 490 centimètres carrés, moyenne entre la section de la branche d'électro et la surface polaire.

Coefficient de perte admis = 1,4.

Calculs relatifs à cette machine.

$$i = 90 \text{ ampères.} \quad e = 105 \text{ volts.} \quad \frac{n}{t} = \frac{1\,420}{60} = 23,6.$$

$$r_d = 39,76 \text{ ohms.} \quad i_d = \frac{e}{r_d} = 2,548 \text{ ampères.}$$

$$i_a = i + i_d = 92,548 \text{ ampères ;}$$

$$E = e + (r_a + r_m) i_a = 110,7 \text{ volts ;}$$

$$\Phi = 2\,606\,000 \text{ à pleine charge ; ou } 2\,472\,000 \text{ en circuit ouvert ;}$$

$$\text{Watts utiles} = e \times i = 105 \times 90 = 9\,450 ;$$

$$\text{Watts totaux} = e \times i_a = 110,7 \times 92,5 = 10\,240 ;$$

$$\text{Rendement électrique} = \frac{\text{watts utiles}}{\text{watts totaux}} = 92,3 \text{ p. } 100 ;$$

$$\text{Watts perdus dans l'induit} = r_a i_a^2 = 342 ;$$

$$\text{Watts perdus dans la bobine en série} = r_m \times i_a^2 = 180 ;$$

$$\text{Watts perdus dans la bobine en dérivation} = e i_d = 265.$$

On remarquera que, dans l'énumération des dimensions choisies pour le calcul, la longueur nette de la trajectoire d'induction à travers l'induit a été comptée pour 16,51 centimètres, c'est-à-dire comme égale seulement à l'espace qui sépare les becs polaires. L'anneau étant très mince dans cette machine, la distribution du flux magnétique dans l'induit est assez analogue à celle représentée par la figure 48, page 61 ; la longueur réelle de trajectoire offerte au flux total confiné simplement dans l'épaisseur radiale du noyau est légèrement supérieure à la distance entre les becs polaires.

Pour trouver le nombre des ampères-tours nécessaires à l'aimantation, il suffit d'appliquer la règle du § 19, page 397 :

$$Ni = \frac{10}{4\pi} \Phi \times \text{résistance magnétique effective totale.}$$

La résistance effective totale (y compris la marge pour dérivation) est en fonction des cinq termes :

$$\left\{ \frac{16,51}{140,8 \times \mu_1} + 2 \frac{0,95}{820} + \frac{44,4 \times 1,4}{400 \times \mu_2} + \frac{30,48 \times 1,4}{580,5 \times \mu_4} + \frac{22,38}{490 \times \mu_5} \right\}.$$

On trouvera les valeurs de μ pour chacune des parties du circuit prise isolément à l'aide de tables analogues à celles de la page 140, d'après les valeurs correspondantes de \mathfrak{B} .

ÉLÉMENTS MAGNÉTIQUES		Ω	μ	RÉSISTANCE magnétique.	AMPÈRES-TOURS nécessaires.
CIRCUIT OUVERT	1. Induit	17 545	120	0,000484	1 196
	2. Entrefers	3 830	1	0,001885	4 660
	3. Branches d'électros	7 650	110	0,000901	2 227
	4. Culasse	4 960	510	0,000141	349
	5. Pièces polaires	5 843	310	0,000121	299
	Total				0,003532
PLEINE CHARGE	1. Induit	18 490	70	0,001260	3 115
	2. Entrefers	4 040	1	0,001885	4 660
	3. Branches d'électros	9 065	70	0,001576	3 896
	4. Culasse	6 280	235	0,000248	615
	5. Pièces polaires	6 980	135	0,000185	457
	Total				0,005154

Comme l'enroulement en dérivation agit seul quand la machine est en circuit ouvert, il doit fournir 8 731 ampères-tours; et l'enroulement en série doit fournir, à pleine charge, non seulement les 4 012 ampères-tours supplémentaires nécessaires à parfaire les 12 743 indiqués ci-dessus, pour compenser les volts perdus et l'accroissement d'aimantation, mais encore le nombre d'ampères-tours nécessaire pour compenser les effets de désaimantation.

L'excitation réelle de cette machine était :

Ampères-tours :

8 800	en circuit ouvert ;
2 250	ajoutés par l'enroulement en série pour compenser les volts perdus par suite de la résistance provenant de la diminution de perméabilité ;
2 550	ajoutés par l'enroulement en série pour compenser l'action démagnétisante de l'induit et la perte en volts due au décalage des balais ;
<u>13 600</u>	= Excitation réelle totale à pleine charge.

A 1 420 tours par minute la machine donne :

Ampères. . .	0	32	42	67,5	79,5	91
Volts . . .	103	104	105	105,2	105,2	104

EXEMPLE III. — DYNAMO déjà partiellement considérée pages 386 à 390.

Projet de DYNAMO COMPOUND à champ magnétique unique, AVEC INDUIT EN TAMBOUR. Débit 200 ampères sous 55 volts (puissance = 11 000 watts) à 1 140 tours par minute. — On demande de trouver l'inducteur convenable.

Induit. — Noyau formé de disques, séparés par du papier de manille verni, fixés par emboîtures radiales sur un manchon de bronze à trois ailettes. Arbre en acier Siemens. Collecteur à 36 touches. Conducteurs au nombre de 72 répartis en une seule couche sur toute la périphérie. Par suite, à pleine charge Φ doit être d'environ 4 170 000 unités, ce qui, à raison de $\mathfrak{B} = 14\,300$ unités, exige une section droite nette de 288 centimètres carrés de fer dans le noyau. Disques de noyau : diamètre extérieur 180 millimètres, diamètre intérieur 105 millimètres, et en nombre suffisant pour donner une longueur nette totale de 384 millimètres. Les disques de noyau ont 0,71 millimètre d'épaisseur, ce qui en fixe le nombre à 536 environ. Conducteur : fil toronné, formé de 7 fils de 2,33 millimètres de diamètre, réunis ensemble par un double guipage de coton légèrement enduit de vernis Scott au caoutchouc. Résistance de l'induit, de balai à balai : 0,007 ohm ; longueur approximative du fil de l'induit : 47,5 mètres.

Inducteur. — Branches horizontales en fonte très douce soigneusement recuite, la branche inférieure venue de fonte avec la plaque de fondation. Section s'élargissant à partir des becs polaires, de manière à arriver à 1 250 centimètres carrés, et, aux points les plus éloignés de l'induit, à 49 centimètres de large sur 29 de profondeur. Ces branches sont alésées pour recevoir les extrémités du noyau magnétique en fer forgé, pièce cylindrique de 38 centimètres de diamètre, tournée, à ses extrémités, à 25,5 centimètres de diamètre et montée entre les pièces polaires horizontales. La machine terminée ressemble, comme aspect général, à la figure 374 ; mais son inducteur est plus volumineux.

Pour trouver la longueur convenable de ce noyau, on fera d'abord une estimation approchée du nombre d'ampères-tours nécessaires ; puis on calculera le nombre de spires correspondant et la longueur de noyau nécessaire pour loger ce fil. On étudiera enfin sur ces bases un circuit magnétique aussi compact que possible ; et, après avoir ainsi déterminé les dimensions des divers éléments, on calculera d'une façon plus précise, comme dans l'exemple précédent, le nombre d'ampères-tours à fournir à circuit ouvert et en pleine charge.

POINTS IMPORTANTS DANS L'ÉTUDE D'UN PROJET

Vitesses périphériques. — Les vitesses périphériques habituelles paraissent varier de 12 à 15 mètres par seconde pour les induits en tambour et les anneaux longs. — Esson affirme qu'on peut, en

toute sécurité, arriver, dans les grandes machines, jusqu'à 30 mètres par seconde. Pour les anneaux courts et les induits en disque, on emploie couramment des vitesses de 15 à 25 m par seconde. Les induits Ferranti (fig. 452) de 4,50 m de diamètre ont une vitesse périphérique de 27,43 m par seconde. Les alternateurs dans lesquels le système inducteur est mobile peuvent supporter des vitesses plus élevées sans risque de se disloquer; quelques-uns d'entre eux atteignent jusqu'à 35,5 mètres par seconde.

Disques de noyaux d'induits. — On leur donne ordinairement une épaisseur de 0,6 à 1,2 millimètre, soit dans les induits en anneau, soit dans ceux en tambour.

Pour les anneaux le rapport pratiquement admis entre les diamètres extérieur et intérieur est de 10 à 8 pour les petits anneaux, et de 10 à 7 pour les grands. Dans les anneaux Brown à quatre pôles (fig. 339 à 341), ce rapport est de 10 à 7; et de 10 à 8 environ dans ses anneaux à huit pôles. Dans les machines Siemens à inducteurs internes (fig. 357), il est à peu près de 10 à 9. Dans les machines à noyaux inducteurs en fonte, on donne généralement moins de profondeur radiale au fer de l'induit que dans les machines à inducteurs en fer forgé.

Pour les tambours, le rapport ordinaire des diamètres extérieur et intérieur est de 10 à 3. Dans la machine Kapp bipolaire, ce rapport est de 7 à 4.

Limite d'Aimantation. — Il a été plusieurs fois déjà fait allusion aux limites extrêmes auxquelles la pratique a démontré qu'on pouvait avantageusement arriver pour l'aimantation. Nous rappelons dans le tableau ci-après (p. 409, en haut) les valeurs de l'induction \mathfrak{B} qu'on ne saurait guère utilement dépasser.

Diamètre du Fil pour bobinage d'induits. — Cette question sera ultérieurement étudiée sous la rubrique « échauffement admissible ». On peut remarquer ici que la pratique moderne admet de 3,1 à 4,6 ampères par millimètre carré dans les conducteurs d'induits en anneau, et va même jusqu'à 6,2 ampères par mm carré dans ceux des induits en tambour; mais dans les bobines d'inducteurs, on ne tolère guère plus de 3,1 ampères par mm carré de section. Esson¹ a dressé le tableau ci-après (p. 409, en bas) qui donne les diamètres de fil (à

¹ *Electrical Review*, XXVII, 546, 1891.

Σ EN UNITÉS C. G. S.				
TYPES DE MACHINES	DANS L'INDUIT	DANS L'ENTREFER	DANS L'INDUCTEUR	
			Fer forgé.	Fonte.
<i>Machines à potentiel constant :</i>				
Tambour bipolaire. . .	10 000 à 15 000	4 000 à 7 500	12 000 à 17 000	6 000 à 8 000
Anneau bipolaire (long)	12 000 à 16 000	2 500 à 5 000	12 000 à 17 000	6 000 à 8 000
Anneau multipolaire. . .	10 000 à 15 000	3 000 à 5 000	12 000 à 17 000	6 000 à 8 000
<i>Machines pour courant constant. . . .</i>	17 000 à 20 000	3 000 à 7 000	17 000 à 20 000	6 000 à 10 000
<i>Alternateurs :</i>				
Anneau multipolaire. . .	6 000 à 6 500	2 500 à 4 000	12 000 à 17 000	6 000 à 8 000
Tambour —	6 000 à 7 000	2 500 à 5 000	12 000 à 17 000	6 000 à 8 000
Disque sans noyau. . .	5 000	5 000	12 000	6 000

deux guipages de coton passé au vernis) à employer pour les bobinages d'induits destinés à tourner aux vitesses usuelles, en même temps que le nombre de couches de chacun d'eux qu'on peut mettre pour les courants indiqués, sans risque d'échauffement exagéré.

COURANT EN AMPÈRES	DIAMÈTRE DU FIL NU (millimètres)	NOMBRE DE COUCHES
5,0	1,220	4
7,5	1,575	3
10,0	1,905	3
20,0	2,285	2
22,5	2 × 1,905	2
25,0	3 × 1,650	3
32,5	2 × 2,030	2
37,5	3,200	1
40,0	2 × 2,285	2
50,0	2 × 2,770	2
50,0	3,760	1
60,0	4,570	1
75,0	5,155	1
90,0	6,045	1

La longueur de fil nécessaire pour donner un voltage déterminé à une vitesse fixée est inversement proportionnelle à la densité des

lignes de force ou intensité du champ magnétique. Voici quelques exemples pris sur des dynamos bipolaires en tambour : celle d'Edison-Hopkinson, à 750 tours par minute, prend 48,25 centimètres par volt ; celle de Kapp, à 780 tours par minute, 88,90 centimètres par volt ; la machine à lumière à arc de Thomson-Houston, à 900 tours par minute, 375,92 centimètres par volt.

Échauffement des bobines d'inducteurs. — Toute bobine d'inducteur est susceptible de s'échauffer, en raison de ce que le cuivre le plus pur offre quand même une certaine résistance au passage du courant. Si l'on admet que l'épaisseur de l'isolant est proportionnelle au diamètre du fil qu'il recouvre, il en résulte que le poids de cuivre nécessaire pour remplir une bobine de dimensions données sera le même, que ledit fil soit fin ou gros. De plus, pour un volume déterminé à garnir de spires, la résistance en *ohms* de la bobine variera *en raison directe du carré du nombre des spires* roulées. En effet, si une bobine revêtue de 100 spires de fil d'un diamètre donné est de nouveau enroulée avec 200 spires d'un fil de section moitié moindre, la résistance de ce nouvel enroulement sera naturellement quatre fois égale à celle du premier. En vertu du même raisonnement, la résistance d'une bobine d'un volume déterminé variera *en raison inverse du carré de la section droite* du fil employé ; et, comme cette section est proportionnelle au carré du diamètre du fil, il en résulte que la résistance de la bobine sera *inversement proportionnelle à la quatrième puissance du diamètre* du fil employé. (Voir également p. 416.)

La quantité de chaleur développée dans une bobine, pendant un temps donné est égale au produit de la résistance de cette bobine par le carré de l'intensité du courant qui y circule et le temps de passage du courant. Pour éviter toute déperdition inutile, il ne faut, en conséquence, introduire dans une bobine en circuit principal aucune résistance qui ne soit indispensable. Il est facile de démontrer que, pour une bobine *de volume donné*, l'énergie dissipée en chaleur est identique pour la même force magnétisante, quel que soit l'enroulement de la bobine, spires de gros fil en petit nombre, ou spires nombreuses de fil fin. La chaleur développée dans t secondes est i^2rt , et la force magnétisante Ni ; i étant le courant, r la résistance, t le temps de passage du courant en secondes, et N le nombre de spires. Mais r varie comme le carré de N , si le volume occupé par les spires est constant. Supposons, en effet, qu'on double le nombre des

spires et qu'on diminue de moitié la section droite du fil, chaque centimètre de fil fin présentera deux fois autant de résistance que précédemment, et il y aura deux fois autant de centimètres de fil. La résistance sera, en conséquence, quadruplée. La chaleur développée est donc proportionnelle à $i^2 N^2$, et par suite au carré de la force magnétisante. Il en résulte que, si l'on fait produire à la bobine la même force magnétisante, la dépense en chaleur sera la même, quel que soit le mode d'enroulement de cette bobine. Pour porter les inducteurs d'une dynamo au même degré d'aimantation, il faut dépenser dans le même temps la même quantité d'énergie électrique, que ces inducteurs soient montés en série ou en dérivation, si leur volume reste constant. Mais si l'on augmente le volume de la bobine (et le poids du cuivre dont elle est revêtue), on peut par là diminuer proportionnellement la perte en chaleur. Supposons, par exemple, qu'une bobine en dérivation, de résistance r , comporte N spires ; si l'on y ajoute N autres spires, la force magnétisante restera sensiblement la même, bien que le courant soit ainsi réduit à la moitié de son intensité précédente, grâce à ce que la résistance a été doublée ; mais la perte en échauffement sera réduite de moitié, attendu que $2r \times \left(\frac{1}{2}i\right)^2$ sera $\frac{1}{2}i^2r$. En fait, on doit mettre une quantité de cuivre telle que l'intérêt annuel de premier établissement soit approximativement égal au coût annuel de l'énergie électrique inévitablement dépensée en chaleur.

Nous avons supposé dans le raisonnement précédent que l'on doublait le nombre de spires sur la bobine en diminuant de moitié la section du fil de cuivre. Ceci n'est pas absolument exact, parce que l'épaisseur du guipage isolant est, relativement au diamètre du fil, plus grande pour des fils de petit diamètre que pour des fils plus gros. Dans un projet de dynamo on doit d'ailleurs se laisser guider par la question d'économie, et non par le fait accidentel d'un certain volume seulement laissé pour le bobinage. S'il n'y a pas autour des noyaux d'inducteurs assez d'espace disponible pour y loger la quantité de fil voulue au point de vue économique, on étudiera d'autres noyaux de longueur suffisante pour recevoir le fil exigé par cette considération.

S'il n'y a pas de spécification relative à la limite de température, la considération dominante pour le choix du fil de bobinage sera la puissance qu'on peut dépenser en aimantation. Si, au contraire, on doit rester dans certaines limites quant à la température, il faudra prévoir une surface de refroidissement proportionnelle à la puissance dépensée dans la bobine magnétisante. L'expérience indique que, si la tempé-

rature ne doit pas excéder 20 à 25° C. au-dessus de la température atmosphérique, il faut laisser par watt absorbé par la résistance de la bobine une marge minimum de 16,13 centimètres carrés de surface extérieure de bobine. Inversement, si une bobine ne permet qu'une certaine surface de spires, il faudra choisir un bobinage tel qu'il ne soit pas dépensé plus d'un watt pour 16,13 centimètres carrés au moins de cette surface. Kapp¹ a donné quelques règles utiles pour les calculs préliminaires relatifs à l'épaisseur de l'enroulement et au poids du fil. On peut naturellement arriver au même résultat en calculant d'abord le diamètre du fil, nu et isolé, puis le nombre de spires, le nombre de couches, et la résistance par spire. Si l_f est la longueur de fil, et D l'épaisseur de l'enroulement, exprimées toutes deux en centimètres, et x l'excitation en ampères-tours, l_b le périmètre de la bobine, également en centimètres, et F le poids du cuivre en kg, on aura :

$$x = \alpha l_f \sqrt{D}, \quad [\text{i.}]$$

expression dans laquelle α est un coefficient dépendant du diamètre du fil et de l'épaisseur de son isolant. On aura également

$$F = \beta \frac{l_b}{l_f} \sqrt{\frac{x}{1000}}, \quad [\text{ii.}]$$

ou β est un second coefficient qui varie selon le diamètre du fil. Ces deux formules sont applicables au cas où une température-limite est imposée et où l'on se donne 16,13 centimètres carrés par watt.

S'il n'est pas imposé de température-limite et qu'on admette une dépense donnée de puissance, il est plus commode de remplacer ces formules par les suivantes :

$$x = \gamma \sqrt{\frac{Fl_f D}{l_b}}; \quad [\text{iii.}]$$

$$F = \delta \frac{l_b x^2}{10^6 D}. \quad [\text{iv.}]$$

Les quatre coefficients numériques ont les valeurs suivantes :

DIAMÈTRE DU FIL. NU en millimètres.	α	β	γ	δ
1,016	130	0,225	760	0,0347
3,048	135	0,235	790	0,0365
5,080	140	0,280	835	0,0438

¹ Voir *Engineer*, avril 1890.

Pour les bobines en dérivation la longueur et, par suite, le volume ne sont dictés que par des raisons d'économie. On se donne ordinairement 23 à 27,5 mètres par volt.

Échauffement admissible et Surface de refroidissement. — Pour qu'une bobine ne soit pas surchauffée, il faut lui donner une surface suffisante proportionnelle à la quantité de chaleur que développe en elle le courant. Dans la machine Brush pour éclairage à arc, il est alloué 13 centimètres carrés de surface par watt perdu dans les inducteurs et 5,80 centimètres carrés par watt perdu dans l'induit. Dans celle de Thomson-Houston, l'induit a une surface de 10,70 centimètres carrés par watt perdu. Forbes, Esson et autres savants ont fait des recherches en ce qui concerne la relation entre la chaleur développée, la surface de rayonnement, et l'élévation résultante de la température. Forbes estime que la dispersion de la chaleur se ferait à raison de $\frac{1}{800}$ de watt¹ par centimètre carré porté à 1° C. au-dessus de la température ambiante. D'autre part, Esson trouve que, pour des surfaces formées de fil guipé de deux couches de coton verni, la dispersion est beaucoup plus rapide, et il donne $\frac{1}{355}$ de watt comme taux de rayonnement par centimètre carré et par degré centigrade. Dans les limites d'échauffement ordinaire, on peut admettre que le taux de rayonnement est proportionnel à l'excédent de la température sur celle de l'air ambiant. La différence entre la règle d'Esson et celle de Forbes provient de ce que le premier fait entrer en ligne de compte un appoint de refroidissement apporté par les carcasses de laiton des bobines et par les noyaux de fer, c'est-à-dire un refroidissement par convection, tandis que Forbes ne s'occupe que de la chaleur rayonnée par la surface seule de la bobine.

La règle d'Esson, qui semble concorder avec l'expérience de divers constructeurs, peut en conséquence se formuler ainsi :

$$\theta^{\circ} \text{ C.} = 355 \frac{P}{S},$$

¹ Le watt est l'unité de puissance; il est égal à dix millions d'ergs par seconde, ou à $\frac{1}{736}$ de cheval-vapeur. Un courant d'un ampère, en passant dans une résistance d'un ohm, dépense 1 watt à l'échauffer. Un watt équivaut à 0,24 calories (g.-d) par seconde, c'est-à-dire que la chaleur développée en t secondes, par suite d'une dépense d'énergie au taux de un watt, suffirait à échauffer de 0,24 degré C. t grammes d'eau.

θ étant l'élévation de la température, p les watts dépensés en échauffement de la bobine, et s sa surface en centimètres carrés.

Dans l'emploi de ces règles et le calcul des watts développés dans la bobine (produit de la résistance en ohms par le carré du courant en ampères), il faut se rappeler que le fil possède à chaud une résistance plus grande qu'à froid. La règle suivante permet de tenir compte de cette considération : —

Résistance à chaud quand la résistance à froid est connue. — On ajoute au nombre d'ohms connu à froid 1 p. 100 par 2,5 degrés C. d'élévation de température.

Courant maximum admissible pour une élévation de température θ fixée d'avance comme limite. —

$$\text{Courant maximum admissible} = \sqrt{\frac{\theta^{\circ}\text{C.} \times \text{centimètres carrés}}{355 \times \text{ohms (à froid)}}}$$

[*Exemple.* — Une bobine a une surface de 450 centimètres carrés et une résistance (à chaud) de 15 ohms ; — on demande quel sera le courant maximum qu'elle pourra porter d'une façon continue sans s'échauffer au delà de 46°,67 C. au-dessus de la température ambiante. — Le courant maximum sera ici de 3 ampères.]

Si l'on admet 50° C. au-dessus de l'air ambiant comme limite de sécurité pour la température, le courant maximum que pourra supporter un électro-aimant donné sera exprimé par la formule :

$$\text{Nombre maximum d'ampères admissible} = 0,374 \sqrt{\frac{s}{r}},$$

s étant en centimètres carrés la surface des bobines et r leur résistance en ohms.

D'une façon analogue on a pour des bobines en dérivation :

$$\text{Nombre de maximum de volts admissible} = 0,374 \sqrt{sr}.$$

La force magnétisante d'une bobine en dérivation, alimentée sous une tension d'un nombre donné de volts, est indépendante de sa longueur et dépend uniquement du diamètre du fil ; mais, plus le fil sera long, *moins* il y aura de perte par échauffement. Si au contraire la condition d'alimentation est un courant d'un nombre constant d'ampères, la force magnétisante d'une bobine est indépendante du diamètre du fil ; elle n'est fonction que de sa longueur ; mais, plus le diamètre du fil sera gros, *moins* il y aura de perte par échauffement.

Grâce à l'action refroidissante de la ventilation pendant la marche,

on trouve, lorsqu'on arrête une dynamo au bout d'un temps prolongé de fonctionnement, que la température de sa surface s'élève immédiatement au-dessus de celle qu'elle avait en marche ; ce phénomène tient à ce que la température provenant de l'intérieur où elle est plus élevée et arrivant à la surface par conduction n'est plus aussi rapidement dissipée. Dans les spécifications de l'Amirauté anglaise il est stipulé que, au bout d'une longue marche de six heures, aucune partie de la machine ne devra, après une minute d'arrêt, présenter une élévation de température supérieure à 11° C. au-dessus de l'air ambiant. Ce maximum est démesurément bas ; et, pour un fonctionnement ordinaire dans une chambre de machines, une élévation trois ou quatre fois aussi forte offre toutes garanties de sécurité. Kapp admet 9,7 centimètres carrés par watt perdu dans l'induit, et 16,2 centimètres carrés par watt perdu dans l'inducteur. Esson trouve que, pour des induits tournant à des vitesses ordinaires, il y aura une élévation de 35° C. si l'on alloue 7,3 centimètres carrés par watt dépensé en échauffement. La formule donnée ci-dessus pour les inducteurs conduirait, pour la même élévation de température, à une surface minimum de 9,7 centimètres carrés par watt. Esson indique la règle approximative suivante pour différentes vitesses :

$$\theta^{\circ} (C) = \frac{355 p}{s (1 + 0,0006 v)},$$

s étant exprimée en centimètres carrés, et la vitesse périphérique v , en mètres par seconde.

M. Joyce¹ a publié quelques calculs relatifs à l'échauffement plus grand des couches intérieures.

Nous donnons ci-dessous quelques règles utiles pour le calcul des enroulements de machines de même type, mais de dimensions ou de puissances différentes : —

Pour obtenir la même température-limite avec des bobines de mêmes dimensions roulées de fil de différents diamètres, il faut faire varier la section droite du fil comme le courant qu'il doit porter ; en d'autres termes, la densité de courant (ampères par centimètre carré) doit être maintenue constante.

Pour porter à la même température deux bobines de forme identique, semblables, ne différant que par les dimensions et dont les diamètres de fil sont dans le même rapport (de sorte qu'il y ait le

¹ *Journal Inst. Elect. Engineers*, XIX. 248, 1890.

même nombre de spires sur la plus grande et sur la plus petite), les courants doivent être tels que leurs carrés soient proportionnels aux cubes des dimensions linéaires.

Des noyaux de fer semblables, enroulés de longueurs de fil proportionnelles aux carrés de leurs dimensions linéaires et excités par des courants égaux, produiront des forces magnétiques égales en des points semblablement situés par rapport à eux. (Sir W. Thomson, *Phil. Trans.*, 1856, p. 287.)

Dans des machines semblables les nombres d'ampères-tours doivent être proportionnels à leurs dimensions linéaires, si ces machines doivent être portées par l'aimantation au même degré de saturation. (J. et E. Hopkinson, *Phil. Trans.*, 1886, p. 338.)

Si deux machines semblables doivent fournir la même force électromotrice, les diamètres de fil de leurs bobines doivent varier comme leurs dimensions linéaires.

Si, en modifiant les inducteurs d'une machine de puissance donnée, on laisse constantes les longueurs des diverses parties du circuit magnétique, mais qu'on en change les diverses sections correspondantes, on devra modifier la section droite du fil de nouvel enroulement proportionnellement à la périphérie de la section des noyaux.

La résistance d'une bobine, dont le volume est connu et qui est enroulée de fil de cuivre (rond) de d millimètres de diamètre, porté par son isolant à D millimètres, peut se calculer d'après la règle suivante, basée sur l'hypothèse que le bobinage des spires dans les vides laissés de l'une à l'autre permet de loger 10 p. 100 de fil de plus que si les spires étaient réellement superposées. Ce chiffre ne peut être qu'approximatif, la place occupée par les spires étant susceptible de varier avec l'épaisseur relative et la souplesse de l'enveloppe isolante, aussi bien qu'avec le diamètre du fil. Si V est, en centimètres cubes, le volume occupé, la résistance r en ohms de la bobine sera (à froid)

$$r = 0,0244 \frac{V}{D^2 d^2}.$$

Longueur et Diamètre des induits. — On a déduit de la pratique différentes règles pour le rapport entre la longueur d'un induit et son diamètre.

Dans le cas des dynamos bipolaires les dimensions ordinaires pour les induits en anneau varient de $l = \frac{1}{2} d$ à $l = \frac{3}{2} d$; $l = d$ est

fréquemment employé. Ces données se réfèrent à des mesures prises sur le noyau non recouvert de fil. — Pour les induits en tambour, on prend souvent $l = 2d$, bien qu'on rencontre également les valeurs $l = \frac{3}{2}d$ et $l = 3d$.

Section des Inducteurs. — De la comparaison entre des machines de divers constructeurs il résulte que, dans la pratique courante, on donne généralement aux noyaux d'inducteurs des machines à anneau une section droite égale à 1,66 fois celle du noyau d'induit, dans le cas où l'on a affaire à du fer forgé; et égale à 3 fois celle du noyau d'induit, si les noyaux d'inducteurs sont en fonte. — Pour les noyaux d'inducteurs des machines à tambour, les chiffres courants sont respectivement 1,25 et 2,3.

On se demande parfois quelle est la meilleure *forme* à donner à la section transversale des noyaux d'inducteurs. La réponse est facile : il suffit de se rappeler que, de toutes les lignes géométriques possibles circonscrivant une même surface, celle qui présente le plus petit périmètre est le cercle. Pour faciliter la comparaison, nous donnons ci-dessous une table indiquant les longueurs relatives de fil nécessaires pour envelopper diverses formes de sections correspondant à une même surface; l'aire de la forme circulaire simple est prise pour unité et il y est tenu compte de l'épaisseur du bobinage.

Cercle	3,54
Carré	4,0
Rectangle, 2/1	4,24
Rectangle, 3/1	4,62
Rectangle, 10/1	6,91
Oblong, un carré entre deux demi-cercles	3,76
Oblong, deux carrés entre deux demi-cercles	4,28
Deux cercles, l'un à côté de l'autre (fil croisé)	4,997
Deux cercles, — — (fil non croisé).	4,10
Trois cercles, fil roulé sur chacun séparément	6,13
Quatre cercles, — — —	7,09

Symétrie des Inducteurs. — On a vu page 200 que, avec des inducteurs bipolaires à circuit magnétique unique, le champ est dissymétrique; il est beaucoup plus fort entre les parties inférieures qu'entre les bords supérieurs des pièces polaires, si celles-ci sont conformées comme

dans la figure 120, N° 23. Il en résulte plusieurs inconvénients : — d'abord l'induit est, en bloc, énergiquement attiré vers le bas (voir p. 374) ; en second lieu, cet induit, s'il est en anneau, sera électriquement déséquilibré, en raison des champs magnétiques inégaux auxquels il est soumis aux extrémités d'un même diamètre ; en troisième lieu, les points neutres correspondant à l'absence d'étincelles ne seront pas

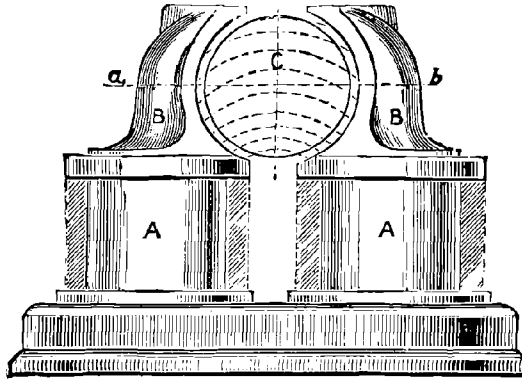


Fig. 290. — Ancien inducteur de la Compagnie Alsacienne.

aux extrémités d'un même diamètre. On voit dans la figure 290 une dynamo de 60 kilowatts de la Compagnie Alsacienne qui présentait

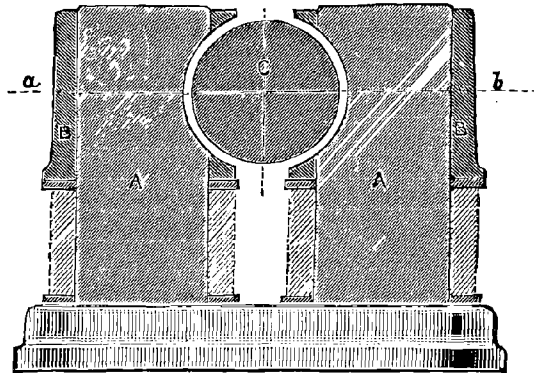


Fig. 291. — Nouvel inducteur de la Compagnie Alsacienne.

ces défauts et à laquelle on a substitué la forme plus massive représentée par la figure 291, où des revêtements polaires en fonte viennent recouvrir des noyaux de fer forgé.

Résultat de l'Élargissement de l'entrefer. — L'élargissement de l'entrefer a toujours pour effet de faire dépenser beaucoup plus d'énergie pour le maintien du champ magnétique dans cet entrefer; en d'autres termes, les inducteurs exigent plus d'ampères-tours. Il se traduit encore par d'autres résultats: — il augmente légèrement le coefficient de perte v ; — il permet de mettre plus de cuivre ou des conducteurs plus gros sur l'induit, ce qui diminue la résistance intérieure de celui-ci; et, si l'induit n'a pas été chargé au delà du point correspondant à l'absence d'étincelles, il augmente la puissance de la machine; — il a encore un autre effet qui n'est pas sans importance, c'est d'augmenter la résistance sur le trajet des forces magnéto-

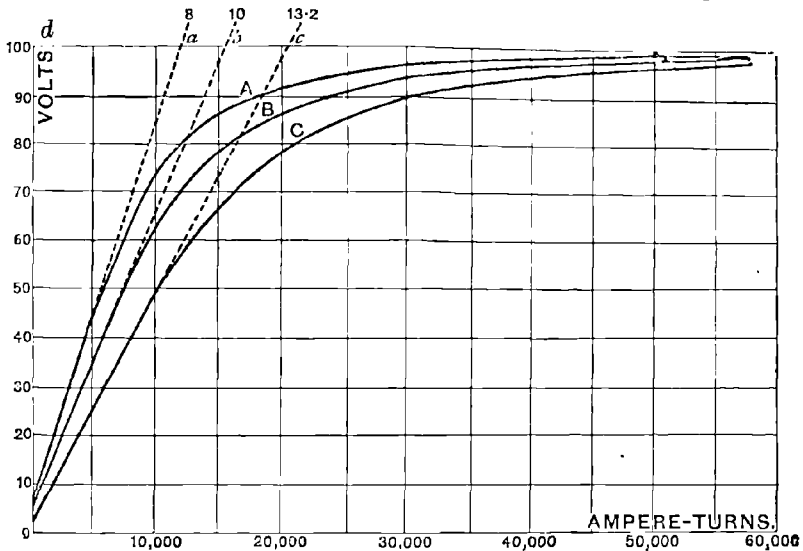


Fig. 292. — Caractéristiques correspondant à différents entrefers.

Ampere-Turns = Ampères-tours.

trices tendant à l'aimantation transversale, et de diminuer leur action préjudiciable. On peut se faire une idée du premier de ces effets en considérant les courbes relevées par Arnoux (fig. 292), qui montrent le résultat de l'élargissement d'un entrefer porté de 8 à 10, puis à 13,2 millimètres. On trouve ici que les inclinaisons initiales des caractéristiques sont données par des lignes dont les tangentes sont inversement proportionnelles aux entrefers; car les hauteurs cd , bd et ad sont proportionnelles aux nombres donnés comme largeurs des entrefers. On remarquera que, dans leur partie supérieure, les trois caractéristiques se rapprochent l'une de l'autre. Naturellement la con-

clusion que l'intensité de champ d'une dynamo est en raison inverse de l'entrefer, ne se maintient pas pour des machines portées au degré d'excitation de fonctionnement.

Interférence du Champ d'induit. — Comme on l'a vu au Chapitre IV, page 73, le courant dans l'induit tend à l'aimanter transversalement, et, si les balais sont décalés en avant (ou en arrière s'il s'agit d'un moteur), tend également à le désaimanter. On a vu, page 83, que la position du point neutre, correspondant à l'absence d'étincelles, est affectée par cette intervention; et nous avons indiqué, page 275, comment on compensait cet effet de désaimantation. Il faut maintenant pousser la question plus avant, en vue de l'établissement d'un projet de dynamo.

Examinons tout d'abord comment se comporte une machine existante.

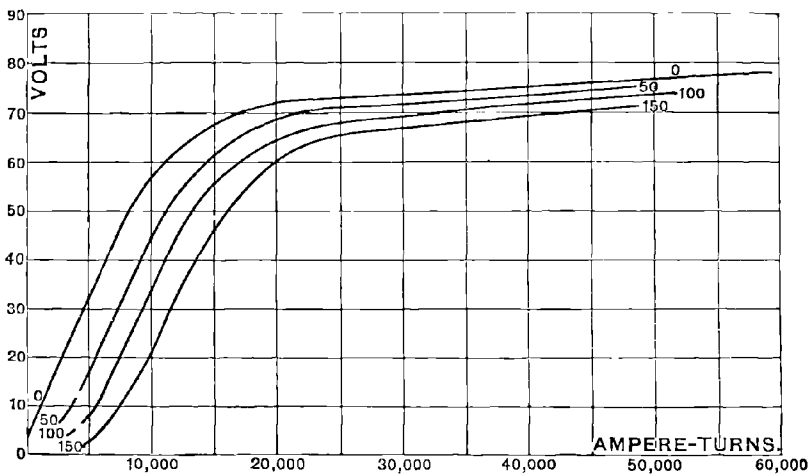


Fig. 293. — Courbes de charge d'une dynamo.

Ampere-Turns = Ampères-tours.

tante, en observant le rapport entre son voltage et son excitation, à une certaine vitesse constante, sous des conditions de charge variables. Supposons qu'on fasse varier le décalage des balais de manière à satisfaire toujours à la condition d'absence d'étincelles. Admettons qu'on ait déterminé une première courbe correspondant à un courant nul dans l'induit, puis une autre correspondant à une charge de 50 ampères, une troisième pour 100 ampères, et ainsi de

suite. On devra, dans chaque cas, faire les déterminations en commençant avec la plus haute excitation (et le plus petit angle de décalage), puis en diminuant graduellement l'excitation (et augmentant le décalage) jusqu'à ce qu'on ne puisse plus trouver pour les balais de calage sans étincelles. La machine considérée¹ était établie en vue d'un débit normal de 150 ampères sous 70 volts. On trouve dans chaque cas que, plus la charge est faible, plus on peut diminuer l'excitation des inducteurs avant d'atteindre l'état de choses pour lequel on ne peut plus trouver de point neutre. En d'autres termes, il y a toujours entre les ampères-tours sur l'induit et ceux des inducteurs une relation définie qui détermine la limite de fonctionnement sans étincelles. Il s'agit maintenant de chercher cette relation.

Quant à présent, on peut remarquer que ces courbes de charge² sont très fécondes en indications sur les spires dont doit être revêtu l'inducteur, sur le nombre d'ampères-tours constituant la part contributive de la bobine en dérivation quand le circuit est ouvert, et sur le nombre d'ampères-tours de compensation que doit ajouter la bobine en série pour maintenir le voltage.

Limite de charge et Point sans étincelles. — Deux choses limitent la puissance de la dynamo : l'échauffement des conducteurs de l'induit et les étincelles aux balais. Etant donnée une machine, si, en augmentant un peu l'entrefer et en rebobinant l'induit avec du fil de section double, on réduit de moitié sa résistance, on peut lui demander un débit double sans plus d'échauffement que précédemment, pourvu qu'elle ne donne toujours pas d'étincelles. Une machine ainsi reconstituée pour une puissance double coûtera évidemment moins cher que deux machines dans les conditions précédentes. Mais on arrive bien vite à la limite de cette augmentation de puissance par augmentation des ampères-tours sur l'induit ; on double en effet ainsi la tendance à l'aimantation transversale, on augmente le décalage, et l'on fait plus que doubler la tendance démagnétisante en doublant les ampères-tours sur l'induit. Ces effets perturbateurs peuvent être tous groupés sous la dénomination générale d'*interférence* ou intervention du courant d'induit. Ils ont été étudiés plus ou moins à

¹ Voir Arnoux, *Bull. de la Soc. Int. des Electriciens*, VI. 61, 1889.

² Pour d'autres exemples de courbes de charge, voir Esson, *Journal Inst. Electrical Engineers*, XIX. 152, 1890 ; et Kapp, *Proc. Inst. Civil Engineers*, février 1889.

fond par Hopkinson¹, et plus complètement par Swinburne² et par Esson³, dont les travaux feront surtout l'objet de cette fin de chapitre.

On a vu, page 80, que, par suite de la self-induction existant entre les sections individuelles de l'enroulement de l'induit, le renversement du courant dans ces sections, par le fait de la commutation au moment de leur passage sous les balais, exige le développement d'une force électromotrice, et qu'on arrive à ce résultat en décalant les balais (en avant dans une dynamo, et en arrière dans un moteur), de telle sorte que la section dans laquelle doit se renverser le courant passe à cet instant sous le bord du champ magnétique. Plus le courant à renverser est intense, plus doit être intense le champ nécessaire pour que ce renversement s'effectue sans étincelles. Mais le champ sous le bec « de sortie » de la pièce polaire (ou sous le bec « d'entrée » pour un moteur), dans le voisinage duquel doit s'effectuer la commutation est, ainsi qu'on l'a vu (fig. 63 et 67), affaibli par l'interférence de l'induit. Or l'aimantation transversale de l'induit a pour effet d'envoyer (voir le diagramme habituel fig. 62, p. 75), des deux côtés du noyau, des lignes de force qui tendent à passer par les espaces d'air et à revenir par la masse des pièces polaires, la plus grande force d'aimantation transversale dans les entrefers se trouvant sous les becs des pièces polaires. Cette action transversale s'oppose au flux magnétique normal à l'angle de droite en haut et à celui de gauche en bas (fig. 63), et vient l'aider aux deux autres angles. La force magnétomotrice d'aimantation transversale sous les becs polaires (étant admis que les entrefers seuls présentent une résistance magnétique appréciable) est égale à $\frac{4}{10}\pi$ fois les ampères-tours de tous les conducteurs situés dans les entrefers ou dans l'angle ψ sous-tendu par les surfaces polaires. En employant les symboles habituels, N pour le nombre des conducteurs autour de l'induit et i_a pour le courant total d'induit, on a pour le nombre total d'ampères-tours sur l'induit $\frac{1}{2}N \frac{1}{2} i_a$, sur lesquels $\frac{\psi}{180^\circ}$ sont efficaces, et dont on peut prendre la moitié comme fraction agissante, quel que soit l'endroit où

¹ *Philosophical Transactions*, 1886, pt. I, p. 331 ; et *Electrician*, XVIII, décembre 1886.

² *Journal Instit. Electrical Engineers*, XV. 540, 1886 ; et XIX. 90 et 265, 1890.

³ *Ibid.*, XIX. 118, 1890 ; et XX. 265, 1891 ; *Electrical World*, XV. 213, 1890. Voir également *Electrical Review*, série d'articles sur une Etude synthétique des dynamos, 1890.

le circuit transversal coupe un entrefer. Si l'on suppose $\psi = 120^\circ$, la force magnétomotrice transversale sous le bec sera :

$$\frac{1}{2} N \times \frac{1}{2} i_a \times \frac{1}{2} \times \frac{4}{10} \pi \times \frac{120}{180} = Ni_a \times 0,104 ;$$

c'est-à-dire qu'elle sera égale au nombre d'ampères-tours ¹ sur l'induit multiplié par 0,416. Voyons maintenant quel serait le nombre d'ampères-tours sur l'induit qui produirait dans l'entrefer une force transversale contre-balançant exactement la force magnétisante normale dans le cas actuel, de manière à neutraliser le champ sous le bec polaire. Dans ce cas un renversement sans étincelles serait impossible, et la limite de charge se trouverait ainsi déterminée. Mais la différence de potentiel magnétique dans l'entrefer (ou la fraction de force magnétomotrice qui y est dépensée) est égale au produit de la résistance magnétique de l'entrefer par le flux qui le traverse. Si l_2 est la longueur de circuit à travers l'entrefer et S_1 la surface polaire, la résistance magnétique de l'entrefer est $\frac{l_2}{S_1}$, et la différence de potentiel magnétique dans cet entrefer est $\frac{\Phi l_2}{S_1}$. Appelons maintenant l la longueur du noyau d'induit ou de la face polaire parallèlement à l'axe ; b la largeur de la face polaire mesurée le long de sa courbure, de bec à bec ; c l'épaisseur radiale du noyau ; et S_1 sa section. On peut admettre que, dans le noyau, l'aimantation est poussée jusqu'à la valeur correspondant à $\mathfrak{B} = 17\,000$. On a alors les relations suivantes :

$$\Phi = 17\,000 S_1 ; S_1 = cl ; S_2 = bl.$$

¹ Cette expression est employée ici exactement comme dans le cas d'un électroaimant quelconque. Dans les induits en tambour bipolaires, c'est la moitié du courant d'induit multiplié par la moitié du nombre de conducteurs extérieurs. Dans les machines multipolaires (à bobinage groupé en parallèle), ce nombre est égal au courant total multiplié par le nombre total de conducteurs et divisé par le carré du nombre de pôles. Dans le travail d'Esson de 1890 (*Journal I. E. E.*, XIX. 143), le terme « ampères-tours » était employé dans un sens différent ; c'était le produit du nombre total de conducteurs par le courant porté par chacun d'eux. C'est la même chose que ce qu'il a appelé, dans son travail de 1891 (*Journal I. E. E.*, XX. 266), du nom, peu heureux, de « volume du courant », mais qui aurait été mieux dénommé « circulation totale du courant d'induit ». Le nom adopté ici pour cette quantité est celui de *courant périphérique*. [L'Auteur emploie le mot de *circumflux* ; nous avons préféré le remplacer par celui de courant périphérique, l'expression « flux » s'appliquant plutôt dans notre langage à la circulation magnétique et pouvant, de ce chef, donner lieu à des méprises.] Pour les machines bipolaires le courant périphérique est égal à deux fois les ampères-tours ; pour les machines à quatre pôles, il est égal à quatre fois ce nombre, etc.

En substituant ces valeurs dans l'expression précédente, et faisant disparaître l , on a

$$\text{Potentiel magnétique dans l'entrefer} = \frac{17000 \times cl_2}{b};$$

et, en l'égalant à la force transversale, on obtient

$$\frac{Ni_a}{4} = \frac{40900 cl_2}{b}.$$

Dans certains cas, notamment en ce qui concerne les machines multipolaires, il est plus commode de considérer, non pas les ampères-tours de l'induit, mais la circulation effective de courant déterminée comme le produit du nombre des conducteurs de l'induit par le courant que laisse passer chacun d'eux *indépendamment de son sens*. Nous appellerons *courant périphérique* cette quantité que nous représenterons par le symbole I_p . Elle est égale au produit du courant total d'induit par le nombre total des conducteurs qui recouvrent cet induit, divisé par le nombre de pôles. Pour une machine bipolaire on a en conséquence comme limite de charge sur l'induit :

$$I_p = \frac{Ni_a}{2} = \frac{81800 cl_2}{b}.$$

Esson¹ donne le résultat de ses observations sur un certain nombre de machines modernes provenant de divers constructeurs ; il a trouvé pour ce coefficient numérique des valeurs réelles variant de 61 265 à 95 905 pour des machines à anneau, soit une moyenne de 85 000, qui diffère peu du chiffre théorique de 81 800 ci-dessus donné.

De ce qui précède, il résulte que la charge maximum que puisse supporter un induit, en restant dans les limites d'absence d'étincelles, est directement proportionnelle à l'épaisseur radiale du noyau et à celle de l'entrefer, mais inversement proportionnelle à la largeur de l'arc polaire. Par suite, étant donnée une machine existante dont la charge est juste à la limite de l'absence d'étincelles, si l'on veut la mettre à même de supporter une charge plus forte (d'où un poids de cuivre plus grand sur son induit), on peut y arriver soit en augmentant l'épaisseur radiale des disques de noyau, soit en augmentant l'entrefer (nécessaire ou non pour le cuivre et le jeu), ou finalement en diminuant la largeur de l'angle sous-tendant les faces

¹ *Journal Instit. Electr. Engineers*, XX. 142, 1890.

polaires. Le premier procédé équivaut au remplacement de l'induit ; le second exige un nouvel alésage des faces polaires, en même temps qu'une augmentation (peu importante) de la force magnétisante des inducteurs ; le troisième a pour effet de concentrer le flux magnétique, ce qui diminue légèrement la perméabilité et nécessite soit une vitesse un peu plus grande, soit une légère augmentation de la force magnétisante.

Le courant périphérique, ou circulation polaire de courant d'induit, admissible pour un induit de diamètre donné peut être déterminé en fonction de ce diamètre d'après l'hypothèse (pour les induits bipolaires en anneau) que $b = 1,05 d$; $c = 0,1 d$; et $l_1 = 0,05 d$.

En substituant ces valeurs dans l'expression précédente, on trouve :

$$I_p = 390 d.$$

Esson prend 400 d (centimètres) comme valeur-limite de I_p pour les anneaux, et 600 d pour les tambours. Kapp alloue 400 ampères-tours (ou 800 unités de courant périphérique dans le cas d'une machine bipolaire) par centimètre de diamètre au-dessus de 305 millimètres, comme sécurité de charge.

On est maintenant en situation d'examiner la puissance de sécurité (en watts) d'une dynamo en fonction de ses dimensions.

La puissance brute d'une dynamo (voir p. 204) est

$$P = E i_a = \frac{n}{l} \Phi N i_a \cdot 10^{-8},$$

et celle d'une machine multipolaire

$$P = \frac{n}{l} \Phi \frac{N i_a}{n_p} \cdot 10^{-8},$$

n_p étant le nombre de *paires* de pôles ; de sorte que la valeur du courant périphérique d'induit, sera $\frac{N i_a}{2 n_p}$; d'où

$$P = 2 \frac{n}{l} \Phi \times I_p \times 10^{-8}. \quad [\alpha]$$

Supposons maintenant (c'est une bonne moyenne dans la réalité) que les pièces polaires couvrent ensemble les $\frac{7}{10}$ de la circonférence (ou $2,2 \times d$), et que la valeur de \mathfrak{B} dans l'entrefer soit de 5 000 unités. Dès lors, si l est la longueur du noyau d'induit (en centimètres), la surface de fonctionnement de l'induit que pénètre ou quitte le flux de force

$= 2,2 \times d \times l$; d'où la surface d'une portion polaire quelconque $= \frac{2,2 d l}{2n_p}$, et le flux de force à travers un pôle quelconque sera 5 000 fois aussi grand; autrement dit, le flux total à travers les $2n_p$ pôles sera

$$\Phi = \frac{n_p \times 5000 \times 2,2 d \times l}{2n_p} = 5500 d \times l.$$

En substituant cette valeur dans l'équation [α], on trouve

$$P = 11000 \times d \times l \times \frac{n}{l} \times I_p \times 10^{-8}. \quad [\beta]$$

Mais, d'après Esson, on a, comme on l'a vu ci-dessus, $I_p = 400 d$ pour les anneaux ou $600 d$ pour les tambours, comme charges de sécurité; on obtiendra en conséquence par la substitution de ces valeurs¹

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour les anneaux} \quad P = d^2 l \frac{n}{l} \times 0,044 \\ \text{pour les tambours} \quad P = d^2 l \frac{n}{l} \times 0,066 \end{array} \right\} \quad [\gamma]$$

Or $d^2 l$ est proportionnel au volume du noyau d'induit. On en conclut que la puissance est proportionnelle au volume et à la vitesse, et indépendante du nombre de pôles et du mode de groupement des conducteurs sur l'induit. Kapp trouve (pour une même température superficielle) que la puissance électrique augmente comme la puissance $3 \frac{1}{2}$ du diamètre, qui est un peu supérieure au volume; cette différence est probablement attribuable à ce qu'on donne aux grands induits des vitesses périphériques un peu plus élevées.

Procédés employés pour éviter les Étincelles. — Etant admis que l'induction transversale est la cause déterminante de l'affaiblissement du champ nécessaire au renversement du courant lors de la commutation, on a imaginé divers moyens pour remédier au mal. Dans l'un on a recours à un pôle auxiliaire pour effectuer le renversement². Un autre, applicable aux inducteurs à double circuit (tels que les Nos 8

¹ Esson, avec une largeur un peu plus grande des pièces polaires, arrive à 0,048 et 0,072 comme coefficients respectifs. — Snell (*Journal I. E. E.*, XX. 197) trouve pour coefficients de ses machines, après conversion en unités C. G. S., 0,0375 et 0,056 respectivement.

² Voir Swinburne (*Journal I. E. E.*, XX. 105, 1891), et Housman (*ib.* XX. 299, 1891), qui soutient que, si $\mathfrak{E} = 7\,000$ sous la pièce polaire, le champ auxiliaire nécessaire au renversement doit être au moins $= 3\,000$ unités C. G. S.

et 21 de la figure 119), consiste à faire une profonde entaille entre les moitiés droite et gauche, de manière à étrangler le flux de force transversal. L'Auteur de cet ouvrage avait, de son côté, émis, il y a quelques années, l'idée de former les inducteurs de pièces de fer séparées par

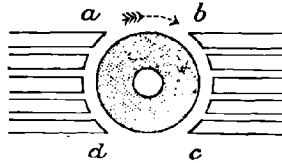


Fig. 294.

des espaces d'air, comme dans la figure 294. Suivant une autre idée émise par M. Sayers, on peut encore entailler profondément la surface polaire dans le voisinage du bec polaire, de manière à concentrer le champ et à fournir un épanouissement suffisant au renversement.

PROJETS DE MACHINES MULTIPOLAIRES

L'avantage que présente, dans l'étude qui précède, l'emploi du courant périphérique I_p de préférence aux ampères-tours réside dans ce fait que la charge-limite sans étincelles dépend, non pas du nombre total d'ampères-tours, ni de l'action de tout l'induit comme électro-aimant, mais de la circulation du courant par pôle. Comme conséquence, les résultats obtenus sont immédiatement applicables aux machines multipolaires aussi bien qu'aux machines bipolaires, ainsi que l'a fait observer Esson à qui revient la priorité de cette conception.

La formule du milieu de la page 424 peut maintenant revêtir la forme suivante

$$I_p = \frac{577 \mathfrak{B} l_2}{\psi},$$

dans laquelle \mathfrak{B} est l'intensité du champ dans l'entrefer.

Si l'on suppose déjà déterminées les valeurs limitatives de I_p et la valeur courante de \mathfrak{B} , et si l'on prend 130° pour valeur de l'angle ψ sous-tendant les faces polaires, il s'ensuit que la longueur radiale l_2 de l'entrefer ne doit pas être inférieure à $\frac{1}{28} d$ pour les anneaux et à $\frac{1}{18} d$ pour les tambours. En conséquence, si, pour faire une machine de grande puissance, tout en la maintenant à deux pôles, on augmente d ,

il faut augmenter soit l_2 soit \mathfrak{B} , ou encore diminuer ψ , ou bien réaliser une combinaison de ces procédés, ce qui, dans tous les cas, implique une dépense plus grande de puissance pour le maintien du champ dans l'entrefer. C'est là que réside l'avantage de la construction multipolaire pour les machines de grande puissance.

Considérons un type à quatre pôles tel que celui de la figure 295. Pour empêcher toute dérivation anormale de pôle à pôle, la distance entre les becs des pôles est maintenue plus grande, relativement à l'arc polaire, que dans une machine bipolaire ; et, pour conserver à \mathfrak{B} une valeur aussi élevée dans les entrefers, la section de l'anneau est

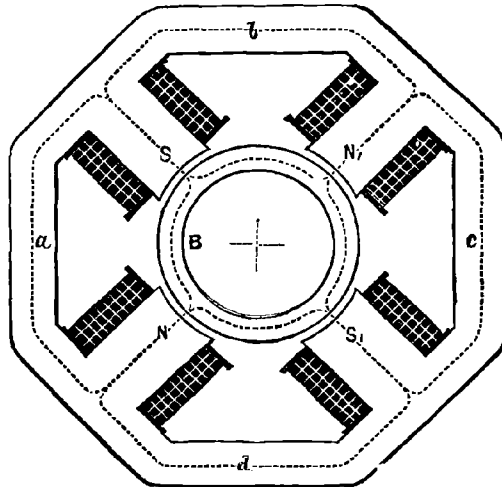


Fig. 295. — (Brown) Machine à anneau à 4 pôles.

réduite et son diamètre augmenté, ce qui donne en même temps un accroissement de surface de refroidissement. Pour les machines à tambour, on gagne encore, outre les avantages précédents, que les connexions terminales sont plus simples et la ventilation plus facile que dans les machines bipolaires. — Mais le constructeur a-t-il intérêt à substituer un type à l'autre ? Le travail des fontes est un peu plus coûteux. — Economisera-t-il du moins du cuivre ? On va voir sur un cas particulier que, au delà d'une certaine limite comme dimensions, il y a économie à cet égard. Considérons un tambour bipolaire pour lequel $d = 50$ cm ; $l = 90$ cm ; $\mathfrak{B} = 5000$ unités dans l'entrefer ; et $\psi = 130^\circ$. On n'arrivera pas à éviter ici les étincelles à moins que l'entrefer l_2 ait au moins 3,2 cm, ou environ 0,9 cm de plus qu'il ne serait

nécessaire pour le logement du cuivre et le jeu de fonctionnement. Si, pour obtenir une marche sans étincelles, on diminue l'entrefer et qu'on porte \mathfrak{B} jusqu'à 7 000, ou bien qu'on réduise ψ à 100° , on ne gagnera rien comme force magnétisante. Substituons, au contraire, au tambour précédent un tambour à quatre pôles avec les constantes $d = 84$; $l = 45$; $\mathfrak{B} = 5\,000$. Grâce à cette augmentation de diamètre, l'entrefer peut être réduit à un minimum, la force magnétisante diminuée de 30 p. 100 au moins, et le poids total de fer d'environ 40 p. 100, ce qui fera plus que compenser le travail supplémentaire sur la fonte. Esson établit que le coût d'une dynamo à quatre pôles, de puissance P à une vitesse $\frac{n}{t}$, peut être considéré comme égal à celui de deux machines bipolaires ayant chacune une puissance de $\frac{1}{2}P$ à la vitesse $2\frac{n}{t}$, et ainsi de suite. Le coût des fontes d'inducteurs, ainsi que leurs poids, sont encore réduits quand l'anneau est, comme dans les grandes machines Siemens et Halske, de dimensions telles qu'on puisse y loger l'inducteur intérieurement.

Pour les machines très puissantes, les types multipolaires sont, en conséquence, préférables aux types bipolaires, d'abord parce qu'ils fournissent leur puissance maximum sans étincelles avec le minimum de jeu, et par suite avec le poids minimum de cuivre sur les inducteurs; et en second lieu parce qu'ils se maintiennent plus froids, de sorte que, pour un volume donné de noyau et d'enroulement, il y a réellement plus de puissance développée. Snell a comparé une machine à quatre pôles, à tambour de 60 centimètres de diamètre, à une machine bipolaire, à tambour de même diamètre : l'une donnait 300 ampères sous 250 volts; l'autre 70 ampères sous 700 volts, c'est-à-dire environ les $\frac{2}{3}$ seulement de la puissance précédente. — Les machines multipolaires ont encore un autre avantage sur les machines bipolaires, en ce qu'on peut faire varier leur longueur par rapport à leur diamètre sans grand sacrifice au point de vue de l'économie. Dans le cas des induits en tambour cet avantage est très marqué. Pour les tambours bipolaires la meilleure proportion est $l = 3,3 d$; si $l = 2 d$, il y a une augmentation de 5 p. 100 dans le cuivre employé, et, si $l = \frac{3}{2} d$, l'augmentation dépasse 10 p. 100; tandis que, pour les tambours à quatre pôles, $l = \frac{1}{2} d$ correspond à la même consommation de cuivre que $l = 2 d$; et, pour un tambour à six pôles, $l = \frac{1}{4} d$ donne exactement le même résultat.

MEILLEURE ÉPAISSEUR DE L'ENTREFER

Les professeurs Ayrton et Perry ont cherché¹ la règle donnant la meilleure épaisseur de conducteurs à appliquer aux induits. En suivant les notations employées dans le reste de cet ouvrage, voici leur raisonnement : — La puissance développée par l'induit peut être mise sous la forme

$$P = E i_a = \frac{n N \Phi}{t 10^8} i_a,$$

ou, en appelant a le nombre d'ampères par centimètre carré (ou la densité du courant) dans la section droite de l'induit, b le rayon extérieur du noyau d'induit et c l'épaisseur de l'enroulement extérieur de l'induit, ce qui donne

$$N i_a = 2 a \times 2 \pi b c,$$

$$P = \frac{4 \pi b n \Phi c a}{t 10^8}.$$

Maintenant, si l'on désigne par ρ la résistance spécifique de l'enroulement d'induit en ohms-centimètres, le nombre de watts par centimètre cube (comprenant le cuivre et l'isolant) consommés en échauffement sera égal à ρa^2 ; et le nombre de watts consommés en échauffement des conducteurs extérieurs sur l'induit sera $2\pi b c l \rho a^2$; l étant la longueur des conducteurs extérieurs sur l'induit. Soient ensuite θ (en degrés centigrades) l'élévation de la température au-dessus de celle de l'air ambiant, et z le nombre de calories par seconde (réduites en watts) émises par centimètre carré de surface, pour un excès de température de 1° C. sur la température ambiante; dès lors le nombre de watts correspondant au nombre de calories par seconde émises par la surface extérieure totale de l'induit sera $z \theta 2\pi b l$. En égalant les watts développés et ceux correspondant à la chaleur émise à la surface, on a

$$2 \pi b c l \rho a^2 = z \theta 2 \pi b l,$$

$$c \rho a^2 = z \theta,$$

$$c a^2 = \frac{z \theta}{\rho}.$$

Désignons maintenant par a_1 , θ_1 , P_1 , et Φ_1 , les valeurs les plus élevées admissibles pour a , θ , P , et Φ respectivement, et par h le radical $\sqrt{\frac{z \theta_1}{\rho}}$. Cette valeur de h dans les meilleures machines modernes paraît être de 288 environ. On a $c a_1 = h \sqrt{c}$, et, en portant cette valeur dans l'expression de P_1 ,

$$P_1 = \frac{4 \pi b n}{t 10^8} \Phi_1 h \sqrt{c}.$$

¹ Voir leur Mémoire, *Phil. Mag.*, juin 1888.

Mais, d'après le principe du circuit magnétique, page 171, on a

$$\Phi = \frac{4 \pi N i}{10 \left(\frac{2(d+c)}{S_2} + \Sigma \frac{l v}{S \mu} \right)},$$

d étant le jeu entre la surface de l'enroulement de l'induit et la surface courbe de la face polaire de l'inducteur, S_2 la surface effective de la face polaire, et $\Sigma \frac{l v}{S \mu}$ la résistance magnétique des parties-fer du circuit magnétique. Supposons Φ porté à sa plus grande valeur admissible Φ_1 ; on peut dès lors écrire

$$P_1 = \frac{4 \pi b n h}{t 10^8} \sqrt{c} \frac{4 \pi N i}{10 \left(\frac{2(d+c)}{S_2} + \Sigma \frac{l v}{S \mu} \right)}.$$

La valeur de cette expression variera quand on fera varier la valeur attribuée à c , et il est facile de démontrer qu'elle passera par un maximum quand la valeur de c sera telle qu'on ait

$$\frac{2c}{S_2} = \frac{2d}{S_2} + \Sigma \frac{l v}{S \mu}.$$

En d'autres termes, la puissance continue admissible pour la machine sera maximum quand l'épaisseur du fil sur l'induit sera telle que la *résistance magnétique de l'espace occupé par l'enroulement de l'induit soit égale à la résistance magnétique du reste du circuit magnétique.*

Étant admis que pratiquement la totalité de l'entrefer entre le noyau d'induit et la pièce polaire est remplie par l'enroulement de l'induit, la règle ci-dessus revient à dire que, la construction de l'induit étant donnée, la machine doit fonctionner à un degré d'excitation tel que sa résistance magnétique totale soit portée à deux fois la valeur de celle de l'entrefer seul. Ce point n'est autre que le degré diacritique d'aimantation, la perméabilité, en bloc, du circuit magnétique, — fer et air ensemble —, étant, à ce point, réduite à la moitié de sa valeur initiale. Mais on voit d'après les recherches de Swinburne et d'Esson que, pour empêcher la production d'étincelles, il faut un entrefer plus grand que celui nécessaire au logement du cuivre et au jeu indispensable.

CHAPITRE XVII

DYNAMOS A HAUT POTENTIEL POUR COURANT CONSTANT

Dans les éclairages par foyers à arc on monte ordinairement toutes les lampes en série, par circuits comprenant jusqu'à 60 ou 80 foyers, et l'on emploie pour leur alimentation des machines dynamos donnant un courant constant, ou sensiblement tel, sous un voltage suffisamment élevé. Le courant ordinaire en vue duquel sont construites les lampes est de 10 ampères. Quelques lampes Thomson-Houston sont cependant établies pour 6, 8 ampères, et certaines lampes Ball pour 4 ampères. Ce sont là néanmoins des exceptions. D'autre part les lampes employées dans les phares ou destinées à des recherches sous-marines sont étudiées pour fonctionner avec des courants beaucoup plus intenses, allant jusqu'à 200 ampères et même davantage. — Les arcs voltaïques à courant continu ne peuvent marcher régulièrement sans être alimentés sous une tension de 40 à 45 volts par lampe. Si la tension est insuffisante, les arcs produisent un sifflement. L'arc fixe et silencieux se comporte comme s'il développait une force contre-électromotrice de 39 volts à peu près. — Quand on veut employer des lampes à arc montées en dérivation l'une par rapport à l'autre, il doit exister entre les conducteurs principaux une différence de potentiel supérieure à 45 volts, — 55 à 60 volts de préférence —, de manière à permettre l'introduction d'une résistance additionnelle destinée à régulariser le courant qui circule dans chaque lampe. — Ces résistances additionnelles ne sont pas nécessaires quand on met un certain nombre de lampes à arc en série ; ces lampes concourent mutuellement à la régularisation du courant de l'une à l'autre. La machine doit néanmoins être réglée de manière à maintenir le courant constant, à la même intensité, quel que soit le nombre de foyers intercalés dans le circuit.

Dans un éclairage par arcs en série le rôle de la dynamo est de main-

tenir les ampères constants, tandis que chaque lampe est munie d'une disposition en dérivation qui règle le mouvement des charbons de manière à maintenir, sous l'alimentation qui leur est fournie, la longueur de l'arc et les volts aux bornes de la lampe sensiblement constants.

On peut, en conséquence, admettre qu'un système de 20 arcs en série exigera une dynamo donnant un courant de 10 ampères, par exemple, sous une tension de 1000 volts environ quand toutes les lampes seront en service. Ces constantes assurent par foyer 45 volts et 5 volts de plus pour la résistance des fils d'une lampe à l'autre.

Les machines à courant constant sont également nécessaires pour les éclairages municipaux au moyen de lampes à incandescence spéciales à gros filaments de charbon (au lieu de filaments capillaires) montées en série, de telle sorte que le même courant traverse successivement un grand nombre d'entre elles.

Deprez, en 1881, a émis l'idée que, à l'aide d'un enroulement compound spécial, comportant une excitation initiale et une excitation en dérivation combinées, on pouvait construire une dynamo à courant constant sous une vitesse également constante. On sait que l'hypothèse sur laquelle s'appuyait son raisonnement, savoir la proportionnalité entre le magnétisme et la puissance d'excitation, ne se vérifie pas, sauf pour les premiers degrés d'aimantation qui présentent une grande instabilité; aussi toutes les tentatives faites pour réaliser un enroulement compound pratique en vue de ce résultat ont-elles échoué.

Grâce à cette circonstance (p. 103) que le couple mécanique d'une dynamo est proportionnel au courant, on trouve que, quand une machine à inducteurs convenablement excités est attelée directement sur une machine à vapeur qui lui est spéciale et dans laquelle la pression de la vapeur est constante, mais qui n'est pas réglée pour fonctionner à une vitesse déterminée, cette dynamo prend d'elle-même des allures qui maintiennent le courant très approximativement constant. Mais, comme ce mode de réglage est inadmissible dans les cas où la machine à vapeur doit fonctionner à vitesse constante, on a dû recourir, pour maintenir le courant constant, à d'autres procédés étudiés dans le Chapitre XXVII relatif aux Régulateurs de machines.

Pour la production de courants constants à des voltages tels que 2 000 à 3 000 volts, on a reconnu que les induits ordinaires en anneau et en tambour, constitués par une bobine fermée sur elle-même, à nombreuses sections, et munie d'un collecteur comportant un grand nombre de touches parallèles groupées très près l'une de l'autre, ne donnaient pas entière satisfaction; ce genre de commutateur est en effet suscep-

tible de livrer passage au courant d'une touche à l'autre sous des tensions élevées, et de se détériorer sous l'action de longues étincelles sillonnant sa surface, de balai à balai, par suite des variations considérables de décalage inséparables de ce mode de fonctionnement. Dans ses expériences sur la transmission de l'énergie à distance à l'aide de courants de très haute tension, Deprez a fait usage de machines Gramme à induits en fil très fin, donnant de 4 000 à 6 000 volts. Les collecteurs ont été une cause d'incessantes perturbations, par suite de la résistance insuffisante des isolants. Plus récemment, cependant, de bons résultats ont été obtenus par MM. Paterson et Cooper, ainsi que par Lahmeyer, de Francfort, dans l'emploi de hauts voltages avec des machines munies de collecteurs ordinaires à nombreux segments. Mais l'expérience en général est contraire à l'emploi d'induits de ce type. On a besoin de formes plus simples qui résistent aux conditions de ce fonctionnement spécial. Ces formes correspondent généralement à d'autres particularités de construction dans lesquelles la bobine d'induit ne constitue pas un circuit fermé sur lui-même.

DYNAMOS A CIRCUIT OUVERT

Comme on l'a vu page 38, il est possible de construire des induits dont les bobines élémentaires ou sections de l'enroulement ne sont pas reliées ensemble en un seul circuit fermé. La figure 296 en donne un type

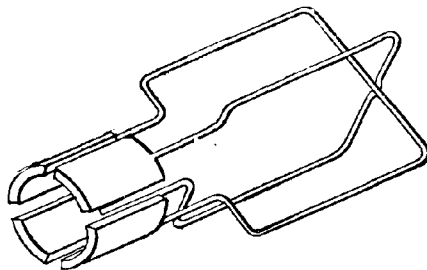


Fig. 296. — Induit élémentaire à circuit ouvert.

élémentaire. Ce diagramme (qu'on comparera utilement à celui de la figure 24, p. 33) représente un induit formé de deux spires distinctes, situées dans des plans perpendiculaires l'un à l'autre, de sorte que, quand l'une traverse la région inactive du champ, l'autre se trouve

dans la position d'action maximum. Rien n'empêche que ces deux spires soient munies chacune d'un collecteur distinct, à deux coquilles, semblable à celui de la figure 24; et qu'une seule paire de balais porte sur ces deux collecteurs. Il est toutefois naturellement plus commode de réunir ces deux collecteurs en un seul à quatre coquilles, comme dans la figure 296; et dès lors on voit de suite que, quand ce collecteur tournera entre ses deux balais, une seule des spires sera en activité à un instant quelconque, l'autre étant mise hors circuit pendant cet instant. Il serait évidemment possible de disposer un nombre quelconque de spires ou de bobines de la même façon, l'alimentation des balais étant faite uniquement par la spire ou bobine qui traverse la position d'action maximum, et toutes les autres restant pendant ce temps en circuit

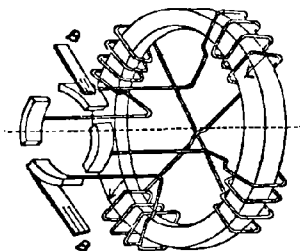


Fig. 297. — Induit en anneau à quatre sections, à circuit ouvert.

ouvert. — Un induit en anneau à plusieurs sections pourrait naturellement être monté de même, de sorte que les paires de sections eussent chacune un collecteur distinct; et la figure 297 (qu'on peut comparer à la figure 31, page 36) représente un anneau de ce genre avec les deux collecteurs ainsi séparés mais n'en formant qu'un seul à quatre coquilles.

On remarquera que chaque bobine élémentaire est reliée, à l'arrière, à celle qui lui est diamétralement opposée, et que les bouts d'avant de ces mêmes bobines arrivent au collecteur. En fait, peu importerait que, dans l'un quelconque de ces induits, les fils qui se croisent à l'arrière fussent tous reliés ensemble à leurs points de rencontre. Pour suivre plus avant ce qui se passe, nous nous référons à la figure 298. Ce diagramme représente par des flèches radiales les forces électromotrices induites dans une ou plusieurs spires tournant (sinistrorsum, comme l'indique accidentellement cette figure) dans un champ magnétique (avec pôle N à gauche dans ce cas). L'action est maximum suivant la ligne mm' du champ magnétique résultant (qui serait horizontale sans les réactions expliquées au Chapitre IV), et minimum suivant la ligne nn' .

Le lecteur se rappellera que la ligne nn' est la ligne neutre, à peu près normale à celle d'aimantation maximum, et que, pour les induits dans lesquels toutes les bobines élémentaires sont réunies en un circuit fermé, c'est en nn' que les balais devraient être calés. Mais, quand chaque bobine est indépendante des autres, on ne met pas les balais en nn' , il faut les placer en mm' ; la ligne d'action maximum coïncidant alors avec le diamètre de commutation. Cependant les

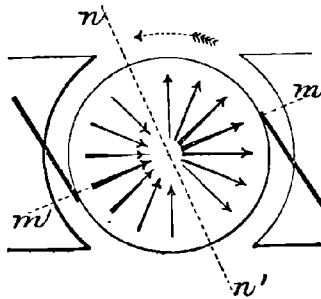


Fig. 298. — Induction des courants dans un induit à circuit ouvert.

bobines très voisines de la ligne mm' sont soumises à une induction très sensiblement aussi forte que les deux bobines qui se trouvent

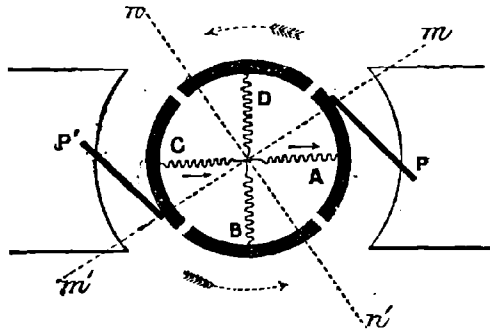


Fig. 299.

réellement dans sa direction; il en résulte naturellement que l'on pourrait capter le courant simultanément sur plus d'une bobine à la fois, soit (1) en faisant chevaucher les touches du collecteur, soit (2) en reliant aux balais qui portent sur la ligne mm' une autre paire de balais décalés en avant ou en arrière. L'examen de la figure 299 fera voir la chose plus clairement. Cette figure donne le diagramme d'un

induit de ce genre ; les spires ou bobines y sont simplement représentées par des lignes ondulées.

La ligne ondulée AC peut représenter soit une paire de bobines telles que celles de l'anneau de la figure 297, soit une seule spire ou une bobine élémentaire de tambour. Il existe une paire de coquilles de collecteur pour AC, et une autre, à angles droits, pour BD. Les bobines A et C arrivent juste à la position d'action maximum ; elles fournissent un courant aux balais PP', et ce courant croîtra naturellement un peu pour décroître ensuite. Entre temps, les bobines B et D sont inertes. Si les quatre coquilles du collecteur complexe occupent chacune juste un quart de la circonférence, il est clair que, au moment où A entre en action, son plan fait un angle de 45° avec mm' , et que, à l'instant précis où elle quitte le balai, il fait de nouveau un angle de 45° , de l'autre côté, avec mm' ; elle est en contact avec lui dans toutes les positions intermédiaires ; et il en est de même pour chaque bobine élémentaire quand elle passe sous les balais. Il y aura rupture momentanée de courant et étincelle au moment où deux segments successifs du collecteur passent sous le balai, à moins que ce balai n'en touche deux à la fois. Si l'on se rappelle que la figure 29, page 36, représente les courants alternatifs issus d'une simple spire ou d'une paire de bobines, et que la figure 30, page 36, représente les mêmes courants redressés par l'emploi d'un simple collecteur à deux coquilles,

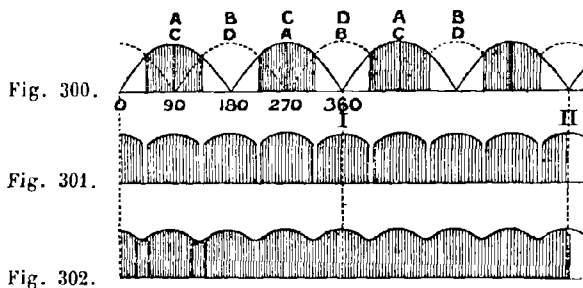


Fig. 300, 301, 302. — Courbes montrant la production des courants dans un induit en quatre sections, à circuit ouvert.

on sera à même de représenter l'effet de la nouvelle disposition ci-dessus par un diagramme analogue à celui de la figure 300. Les angles indiqués au-dessous sont comptés à partir de la ligne neutre nn' . Quand la bobine A a tourné de 90° à partir de cette position initiale, elle est dans la position d'induction maximum ; mais, comme le segment A du collecteur occupe lui-même une largeur angulaire de 90° ,

le courant sera capté de 45° à 135° . Les portions ombrées de l'espace circonscrit par la courbe montrent la discontinuité de l'effet dû aux bobines A C venant en circuit pendant deux quarts de la rotation. Dans les intervalles interviennent les bobines B et D, comme l'indiquent les courbes ponctuées. Les courants induits présenteront en conséquence une continuité approximative dépendant de la disposition du collecteur et des balais. La figure 301 représente le résultat de l'interposition d'espaces d'air entre les segments du collecteur, et l'on remarquera que les courants, tout en restant tous de même signe, sont discontinus. Si les balais cessaient ainsi de porter sur un des segments du collecteur avant de se mettre en contact avec le suivant, il y aurait inévitablement une grande production d'étincelles. La figure 302 montre le résultat du contact établi avec un des segments avant la rupture de contact avec l'autre ; le courant induit est bien continu, mais il présente des ondulations d'intensité. Pendant l'instant où les deux jeux de bobines sont simultanément en contact avec les balais, ils sont, naturellement, en parallèle l'un avec l'autre. Durant cette courte période la résistance de l'induit se trouve réduite à la moitié de celle qu'elle a quand un des jeux de bobines est hors du circuit ; mais il est nécessaire de mettre hors circuit la bobine inerte ; autrement une partie du courant de la bobine active reviendrait inutilement en arrière par la bobine inerte qui était en dérivation avec elle. Pendant l'instant où les deux jeux de bobines sont en parallèle, ils ne sont pas également actifs. La force électromotrice induite va en augmentant dans l'un et en diminuant dans l'autre ; ils ne sont également actifs que pendant un instant, — celui où ils font des angles égaux avec mm' . A tous les autres moments la force électromotrice supérieure de la bobine la plus active tend à lancer un courant inverse dans la moins active, et la force électromotrice nette avec laquelle elles envoient le courant aux balais est la moyenne de leurs deux forces électromotrices individuelles.

D'après ce que nous venons de voir, il est évident qu'on peut établir des induits à circuit ouvert soit en anneaux, soit en tambours, soit en disques. Ces induits peuvent être montés pour fonctionner dans un champ magnétique simple ou multiple, à volonté.

Les principales machines construites sur ce principe sont celle de Brush et celle de Thomson-Houston ; quelques autres rentrent cependant dans cette catégorie de dynamos à circuit ouvert.

Machine Brush. — Parmi ces machines, l'une des plus connues et des moins bien comprises est la machine Brush. La figure 303 donne

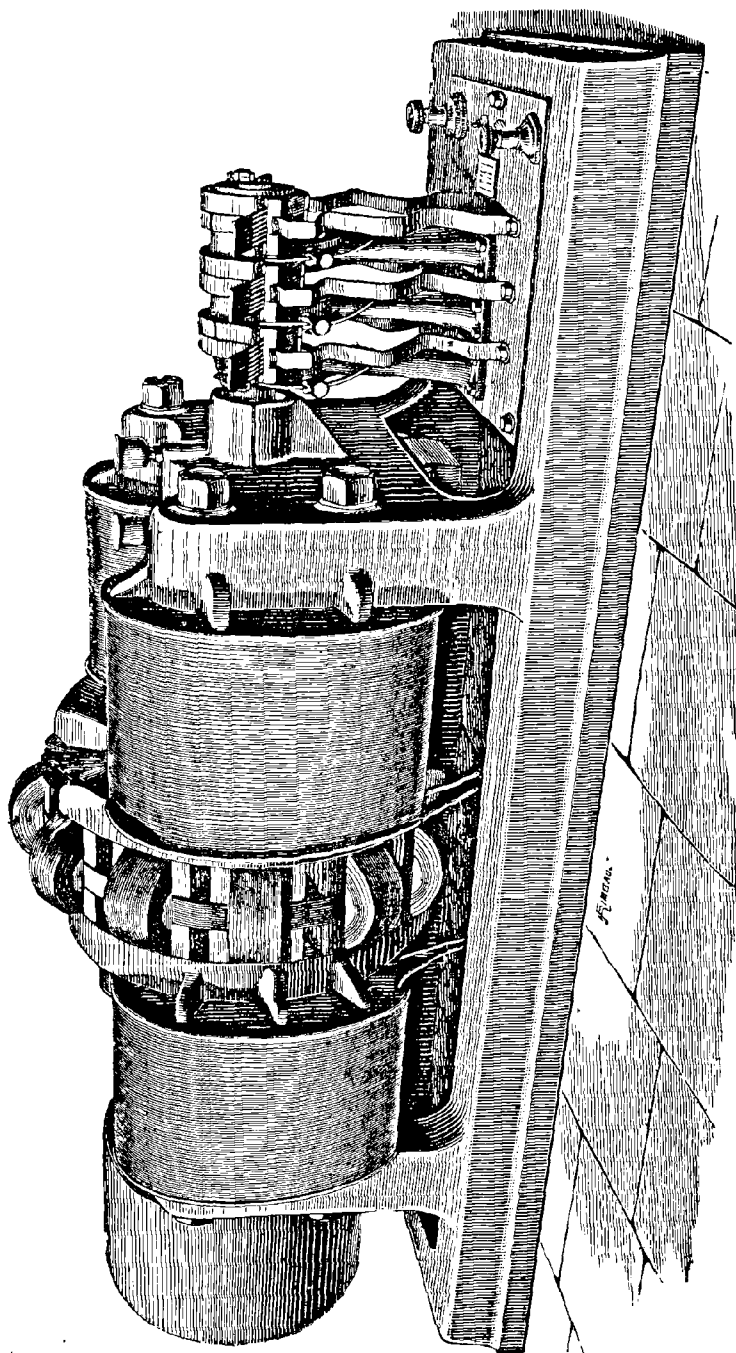


Fig. 303. — Machine Brush de 40 foyers.

une idée générale de sa forme et de la disposition de ses inducteurs. Ces derniers sont d'une très robuste construction. Les joues de leurs bobines sont isolées par de la fibre vulcanisée, enduite de vernis sur toute sa surface. Les noyaux des électro-aimants sont cependant enveloppés tout d'abord d'une mince feuille de cuivre, dont les bords sont soudés de manière à constituer un tube ou revêtement continu. L'objet de ce revêtement de cuivre est d'absorber les extra-courants induits qui, sans cela, se développeraient dans le noyau à toute variation dans le magnétisme. Par-dessus cette enveloppe de cuivre sont appliquées quatre ou cinq épaisseurs de papier très fort, saturé de vernis à la gomme-laque, destinées à assurer l'isolement du fil par rapport au fer. Quelques-unes de ces machines comportent un double enroulement : un circuit en dérivation ou « taquin » est ajouté aux bobines en série pour maintenir l'aimantation des inducteurs quand le circuit principal est ouvert. Le régulateur automatique sommairement décrit au Chapitre XXVII est employé avec les machines Brush pour éclairage à arc.

L'induit, — en forme d'anneau, non entièrement recouvert de fil, mais garni, comme l'anneau de Pacinotti, de dents en saillie entre les bobines élémentaires —, est unique dans son genre. Bien qu'il ressemble à cet égard à un anneau de Pacinotti, il en diffère plus cependant que ce dernier ne diffère des induits Siemens, Gramme, Edison, Bürgin, etc. Dans tous ces induits en effet les sections successives en sont couplées en série sur tout le pourtour du noyau et constituent en quelque sorte une bobine continue. Dans la machine Brush, au contraire, cette continuité n'existe pas. L'anneau lui-même était primitivement fait en fonte malléable. Les espaces réservés aux fils étaient rabotés ou meulés, et tous les angles et coins soigneusement abattus. Toutes les parties de fer adjacentes au fil des « bobines » sont recouvertes d'abord d'une couche d'un fort canevas saturé de vernis à la gomme-laque, et, pour les induits destinés aux grandes machines, il est encore ajouté des couches supplémentaires d'un épais papier enduit aussi de vernis à la gomme-laque. Une épaisseur de fort tissu de coton sépare en outre quelquefois l'une de l'autre les couches de fil contiguës, tant dans les bobines de l'induit que dans celles de l'inducteur. Toutes les bobines sont enroulées à la main, dans le même sens, et les bouts intérieurs de bobines diamétralement opposées sont soudés ensemble et soigneusement isolés de tout autre fil ou métal adjacent. Les bouts extérieurs libres de chaque paire de bobines sont conduits séparément le long de l'arbre, à travers la portée, et reliés à des segments diamétralement opposés du collecteur. Dans la machine « à seize foyers » l'anneau a 50 centimètres de diamètre.

Chacune des huit bobines contient environ 275 mètres de fil de 2,1 mm de diamètre. Ainsi montée la machine est capable de fournir un courant de 10 ampères. En reliant parallèlement les deux bobines de chaque paire, au lieu de les mettre en série l'une sur l'autre, on peut faire donner à la machine un courant de 20 ampères. Pour la galvanoplastie, on emploie des fils beaucoup plus gros.

A chaque paire de bobines correspond un collecteur distinct. Le type n° 7 représenté par la figure 303 comporte huit bobines sur l'induit, quatre collecteurs groupés en deux paires, et deux jeux de balais. Ce type est généralement connu sous le nom de « machine à 16 foyers », bien que, amélioré comme il l'est actuellement, il puisse alimenter de 24 à 25 foyers à arc.

Les dynamos Brush plus puissantes (machines « à 60 foyers ») ont sur l'anneau douze bobines, groupées en six paires. Elles comportent trois paires de balais et trois paires de collecteurs, chacune de ces dernières étant montée en avance d'un douzième de tour (30°) sur sa voisine. Ces machines développent l'énorme force électromotrice de 3 000 volts environ, et, grâce à de récents perfectionnements, peuvent alimenter 60 foyers, et même davantage, en un seul circuit. Primitivement elles n'en entretenaient que 40.

Les balais sont montés de manière à toucher en même temps les collecteurs de deux paires de bobines, mais jamais de deux bobines adjacentes ; les collecteurs adjacents sont toujours reliés à deux paires de

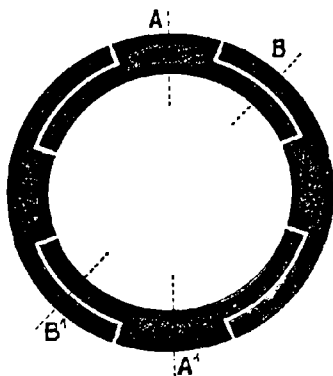


Fig. 304. — Paire de collecteurs imbriqués.

bobines situées à angles droits l'une par rapport à l'autre sur l'anneau. La continuité des courants est réalisée par le montage même, d'après lequel les deux coquilles du collecteur de chaque paire de bobines che-

vauchent sur celles du collecteur appartenant à la paire de bobines qui lui est perpendiculaire, tandis qu'une même paire de balais touche les deux collecteurs. La figure 304 indique la disposition adoptée. Chaque paire de segments chevauche sur l'autre d'une longueur angulaire de 45° . Chacune des deux paires de bobines est ainsi mise hors circuit deux fois par tour ; elle est deux fois seule en circuit, quand, par exemple, les balais sont en AA' ; et quatre fois en circuit, pendant un certain temps, avec la paire à angles droits par rapport à elle, pour la position BB' des balais. La figure 305 montre le montage du collecteur pour tous les induits Brush à huit bobines, c'est-à-dire dans les machines destinées à alimenter de 1 à 25 foyers. Il y a ici en réa-

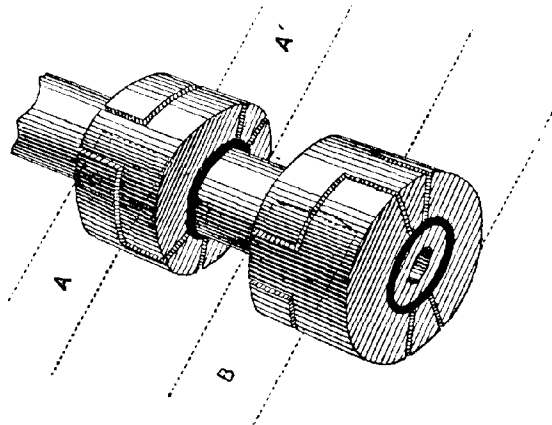


Fig. 305. — Collecteur Brush pour induit à quatre paires de bobines.

lité quatre collecteurs, correspondant aux quatre paires de bobines, groupés deux à deux ; une paire de ces collecteurs est montée en avance d'un huitième de tour (45°) par rapport à l'autre. On voit d'après cette figure que, les balais AA' (indiqués en pointillé) recevant le courant d'une seule paire de bobines, les balais BB' reçoivent au même instant le courant de deux paires de bobines qui se trouvent reliées parallèlement l'une à l'autre par le fait que leurs deux collecteurs passent sous la même paire de balais. Le diagramme donné par la figure 306 permet de se mieux rendre compte de la disposition ; il indique également le mode de connexion des balais avec le circuit. Dans cette figure, les huit bobines sont numérotées par paires, au nombre de quatre, et chaque paire est munie de son collecteur spécial auquel aboutissent les extrémités extérieures du fil de chaque bobine, les extrémités intérieures des

deux bobines étant reliées transversalement l'une à l'autre (cette disposition n'est pas visible dans le diagramme). Dans la machine réelle, la connexion est coupée pour chaque paire de bobines au moment où celle-ci passe au point d'action minimum (c'est-à-dire quand son plan

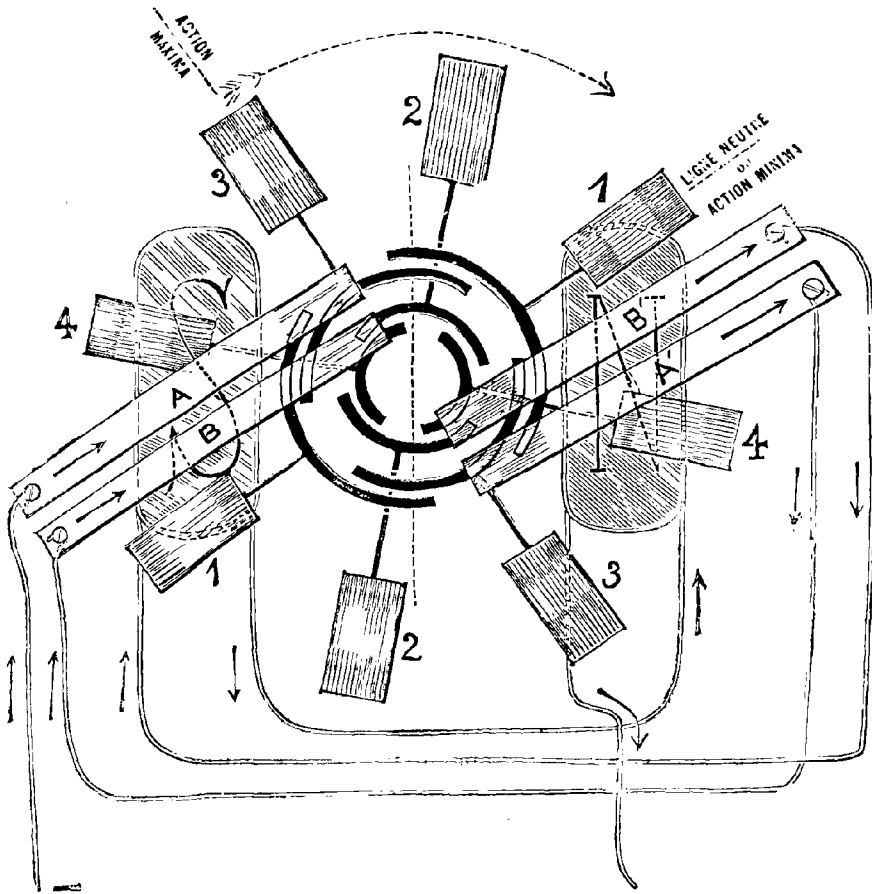


Fig. 306. — Connexions de la machine Brush.

est perpendiculaire à la direction des lignes de force du champ magnétique, et quand le flux qui la traverse est *maximum* et la variation de ce flux *minimum*). On obtient ce résultat en laissant entre les extrémités des deux moitiés du collecteur un espace d'un huitième environ de la circonférence. On voit dans la figure que les bobines 1,1, sont *hors du circuit*. Aucune des deux moitiés du collecteur correspon-

dant n'est en contact avec les balais. Dans cette position, cependant, les bobines 3, 3, à angles droits avec 1, 1, sont dans la position d'action maximum, et le courant énergiquement induit en elles s'écoule du balai marqué A (qui est, par conséquent, le balai négatif) à celui marqué A'. Ce balai est relié transversalement au balai marqué B, par lequel le courant pénètre de nouveau dans l'induit. A ce moment, les bobines 2, 2, viennent juste d'abandonner la position d'action maximum, et les bobines 4, 4, commencent à s'en approcher. Il se produit, par conséquent, un commencement d'induction partielle dans ces deux paires de bobines. Dans ces conditions, le montage est fait de telle sorte que le courant, en arrivant en B, se divise en deux parties, dont l'une traverse les bobines 2, 2, l'autre les bobines 4, 4, pour se réunir au balai B', d'où le courant pénètre dans les spires des électro-aimants qu'il excite, passe dans le circuit extérieur et revient au balai A. (Dans certaines machines, le montage est fait de telle sorte que le courant parcourt les électro-aimants en quittant le balai A' et avant d'atteindre le balai B; dans ce cas, on définit souvent la machine, inexactement il est vrai, en disant que ses bobines, dans la rotation, alimentent alternativement les électro-aimants et le circuit extérieur.) Le mouvement de l'induit amène alors les bobines 2, 2, dans la position de moindre action quand elles sont mises hors du circuit, et le même fonctionnement se renouvelle avec un léger changement seulement dans l'ordre de l'opération. On peut résumer de la manière suivante l'ordre successif des connexions pendant une demi-révolution : —

Première position : (Bobines 1, 1, hors du circuit.)

A — 3 — A'; B $\left\langle \frac{4}{2} \right\rangle$ B'; Électro-aimants — Circuit extérieur — A.

Seconde position : (Bobines 2, 2, hors du circuit.)

A $\left\langle \frac{1}{3} \right\rangle$ A'; B — 4 — B'; Électro-aimants — Circuit extérieur — A.

Troisième position : (Bobines 3, 3, hors du circuit.)

A — 1 — A'; B $\left\langle \frac{2}{4} \right\rangle$ B'; Électro-aimants — Circuit extérieur — A.

Quatrième position : (Bobines 4, 4, hors du circuit.)

A $\left\langle \frac{3}{1} \right\rangle$ A'; B — 2 — B'; Électro-aimants — Circuit extérieur — A.

On voit par là que, quelle que soit la paire de bobines dans la posi-

tion d'action maximum, elle envoie son courant directement dans le circuit ; tandis que les deux paires de bobines qui occupent les positions secondaires sont toujours reliées parallèlement, la même paire de balais touchant les collecteurs respectifs des deux ; la dernière paire de bobines est hors circuit.

Il résulte de la disposition particulière ici adoptée que, si l'on mesure les potentiels autour de l'un des collecteurs à l'aide d'un voltmètre, on obtient un résultat complètement différent de celui fourni par les autres machines. Pour un huitième de la circonférence de chaque côté du balai positif, il n'y a pas de différence sensible de potentiel. Puis vient une région pour laquelle le potentiel paraît baisser ; mais ici cette chute est due en partie à la durée plus courte de l'espace de temps pendant lequel le balai mobile, relié au voltmètre, et le balai positif fixe sont tous deux en contact avec la même partie du collecteur. On trouve ensuite une région pour laquelle le voltmètre ne donne aucune indication, c'est celle qui correspond à la position de mise hors circuit ; puis enfin, de chaque côté du balai négatif, apparaît une région où la polarité et le potentiel sont les mêmes que ceux du balai négatif. La figure 307 donne ce diagramme pour une machine Brush à six foyers, pris à l'un des collecteurs, le balai positif principal étant néanmoins maintenu (comme dans sa position ordinaire) en contact à la fois avec ce collecteur et le collecteur voisin.

D'après les considérations qui précèdent, il est évident que les quatre paires de bobines de la machine Brush constituent en réalité quatre machines séparées, dont chacune fournit des courants alternatifs à un commutateur qui les transforme en courants intermittents de même sens dans les balais, et que ces machines indépendantes sont ingénieusement reliées par paires, grâce à la disposition qui fait porter une paire de balais sur les collecteurs de deux paires de bobines ; enfin, que ces machines ainsi accouplées sont ensuite reliées en série par la connexion établie entre le balai A' et le balai B.

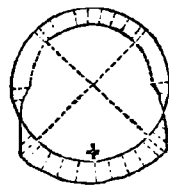


Fig. 307. — Potentiels au collecteur d'une machine Brush.

Le noyau de l'anneau Brush, dans sa conception primitive, était en fonte malléable ; des rainures y étaient réservées latéralement, de manière à obvier jusqu'à un certain point au développement de courants parasites. Les bobines sont logées dans de profondes entailles radiales. On distingue la forme de l'anneau avec ses bobines sur la figure 303, et la figure 308 montre l'anneau lui-même avec ses rainures. Les masses compactes de fer dans cette forme d'induit aujourd'hui démodée don-

naient naissance à des courants parasites dispendieux, dont le développement échauffait l'anneau et absorbait une puissance considérable. Dans les machines Brush plus récentes on se sert d'un anneau formé de feuillard de 1,5 millimètre d'épaisseur. Les figures 309 à 311

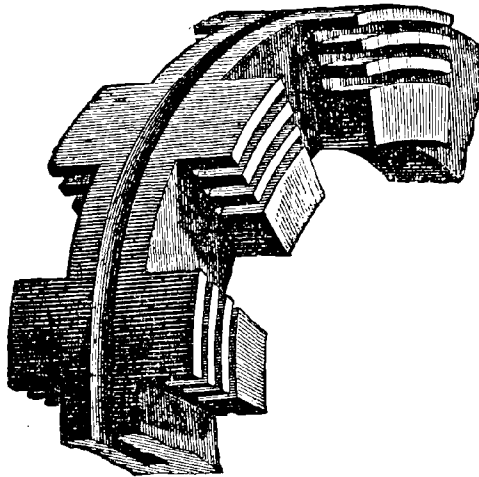


Fig. 308. — Noyau d'anneau Brush (ancien type).

indiquent sa construction, bien qu'en réalité il comporte une plus grande épaisseur de feuillard plus mince que ne le montrent les figures.

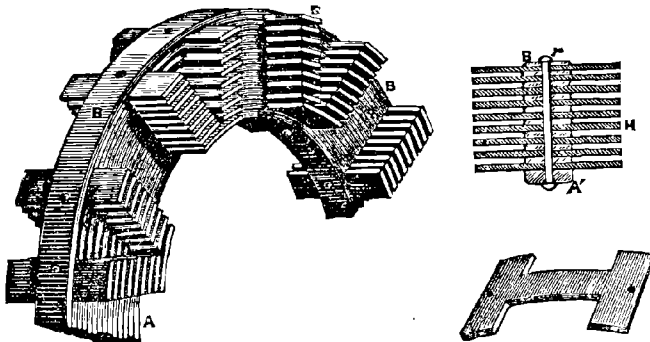


Fig. 309, 310, 311. — Noyau d'anneau Brush (nouveau type).

Le feuillard est roulé sur une carcasse circulaire A' ; des pièces transversales, en saillie, de même épaisseur et de la forme indiquée par la figure 311 (également marquées H dans les figures 309 et 310) sont insé-

rées à intervalles réguliers pour séparer les spires de feuillard ; elles aident à la ventilation et constituent des gorges entre lesquelles on roule les bobines. Dans les grands induits on compte jusqu'à 45 spires de feuillard. Le tout est maintenu par des boulons radiaux soigneusement isolés. Cette disposition procure un gain considérable au point de vue du refroidissement, et l'ancienne machine, qui autrefois alimentait 40 foyers, peut aujourd'hui, avec le nouvel anneau, en alimenter 65, à la même vitesse que précédemment. La petite machine de 16 foyers en entretient 25 avec un anneau du nouveau type, ce qui prouve à quel point cette modification a éliminé les anciennes réactions nuisibles. On peut même la faire tourner en toute sécurité à des vitesses plus élevées.

La manière la plus frappante de démontrer la grande amélioration

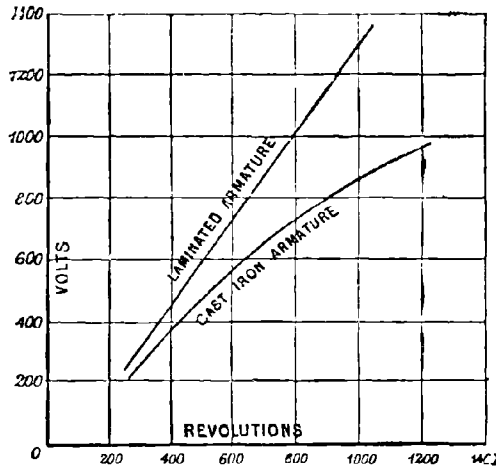


Fig. 312. — Courbes des machines Brush, ancien et nouveau types.

Revolutions = Tours (par minute).

Laminated Armature = Induit en fer lamellé.

Cast Iron Armature — Induit en fonte.

ainsi réalisée est de comparer les vitesses nécessaires au développement de forces électromotrices égales dans les deux machines. Cette expérience a été faite avec des machines identiques. Les deux induits avaient les mêmes dimensions, la même longueur et le même poids de fil ; les inducteurs étaient exactement excités de même par un courant de 10 ampères. Les résultats en sont consignés par les deux courbes de la figure 312. A 800 tours par minute, l'ancien induit de fonte

donnait environ 730 volts ; le nouvel induit lamellé en donne plus de 1000¹.

Quelques grandes machines Brush en dérivation ont été récemment construites pour les applications électro métallurgiques. La plus grande d'entre elles², avec un induit de 1,07 mètre de diamètre et à la vitesse de 405 tours par minute, donne 3 200 ampères sous 83 volts. Cette machine colossale pèse environ 10 tonnes ; le poids de cuivre sur les inducteurs est de 2 460 kilogrammes et celui du cuivre de l'induit de 725 kilogrammes. Ces chiffres correspondent à 1 kilogramme de cuivre sur l'induit par 366 watts de puissance développée, ou à 1 kilogramme de cuivre dans la machine par 83 watts fournis.

Des épreuves sérieuses sur des machines Brush, avec deux types différents d'induits, ont été faites³ en 1889 par M. Murray, de Melbourne. Elles ont établi des rendements commerciaux de 69,8 p. 100 environ pour des machines dont les lames de fer de l'induit avaient 1,27 millimètre d'épaisseur, et de 78 p. 100 à peu près pour celles dont les mêmes pièces étaient réduites à 0,5388 millimètre. Les valeurs atteintes par \mathfrak{B} étaient d'environ 4 800 unités C. G. S. dans les noyaux inducteurs et de 27 000 dans les noyaux d'induit. Les ondulations du courant étaient de 1,3 p. 100 environ.

On trouvera au Chapitre XXVII, sur les Régulateurs, la description de la disposition automatique employée pour maintenir la constance du courant.

Machine Thomson-Houston. — Cette machine qui n'est pas moins remarquable que la précédente a été imaginée par les professeurs Elihu Thomson, de Lynn, et Edwin J. Houston, de Philadelphie. Son induit sphérique est unique dans son genre ; ses inducteurs creusés en forme de coupes sont uniques parmi les inducteurs ; il en est de même de son collecteur en trois parties, comparativement aux autres collecteurs. La figure 313 donne une vue générale de cette machine représentée en coupe dans la figure 314. Comme on le voit sur ces figures, le noyau inducteur est formé de deux tubes de fonte à joues, aux extré-

¹ Ce qui est encore plus surprenant, c'est que la puissance absorbée par le fonctionnement avec l'ancien induit donnant 730 volts était de 17 chevaux-vapeur, tandis que, avec le nouvel induit, fournissant 1020 volts, elle n'était que de 16 chevaux. L'ancien induit ne pouvait tourner à plus de 800 tours par minute sans échauffement dangereux ; le nouveau pouvait atteindre une vitesse beaucoup plus élevée sans aucun danger d'échauffement ou autre.

² Voir un travail du professeur Thurston, dans le *Journal of Franklin Institute*, septembre 1886 ; ou *Electrician*, XVII. 469, 1886.

³ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XVII. 710, novembre 1889.

mités intérieures desquels des calottes creuses ou coupes sont venues de fonte avec eux. Ces calottes hémisphériques sont soigneusement tournées intérieurement pour recevoir l'induit. Sur les tubes sont enroulées les bobines C C'; après quoi ces deux parties constitutives de l'inducteur sont assemblées au moyen d'un certain nombre de barres cylindriques *b b* en fer forgé qui forment la culasse de l'inducteur et protègent en même temps ses bobines. Ce système est porté sur un bâti auquel sont également fixés les paliers de l'arbre d'induit X. L'induit, qui est plutôt sphéroïdal que sphérique, est établi de la manière sui-

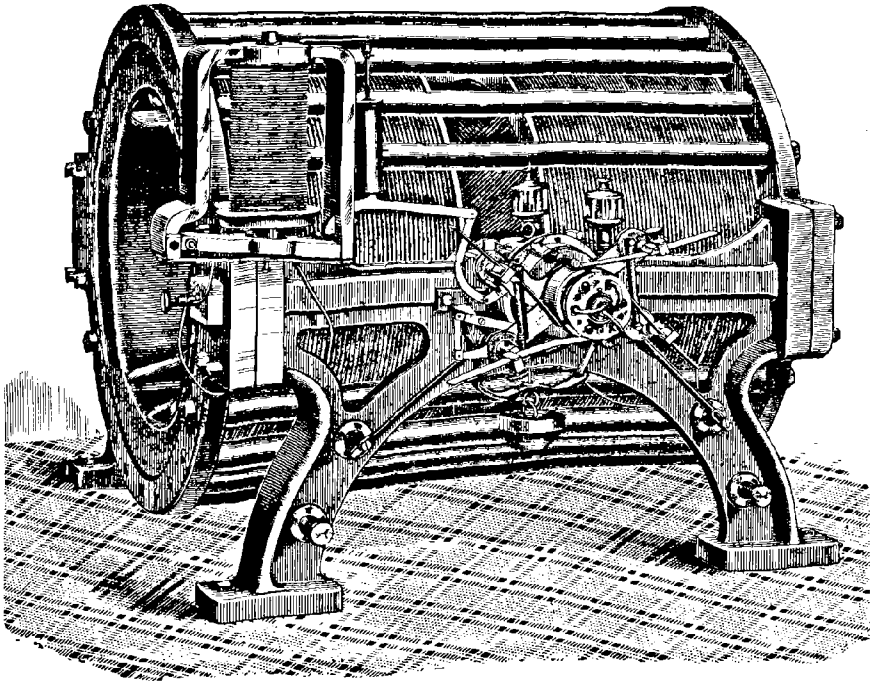


Fig. 313. — Machine Thomson-Houston.

vante : — Sur l'arbre sont clavetées deux coquilles creuses en fonte S S (fig. 315) dont l'intérieur est armé de légères nervures en fer forgé *d d*. Des chevilles de bois J J sont logées de distance en distance dans des trous spéciaux pratiqués dans la coquille de fonte ; elles sont destinées à faciliter l'enroulement. Cet enroulement lui-même est très remarquable. Il ne comporte que trois bobines élémentaires. Les bouts internes de celles-ci sont réunis (en *h*, fig. 313) et ne sont reliés à aucun autre conducteur. Les trois fils sont alors roulés sur la coquille (préa-

labement revêtue de papier verni) en trois jeux de bobines faisant entre elles des angles de 120° et disposées, par le procédé suivant, de

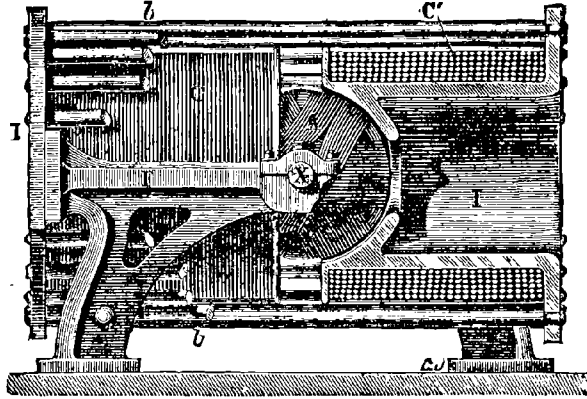


Fig. 314. — Machine Thomson-Houston (Coupe partielle).

manière à se trouver en moyenne à égale distance du noyau. En commençant par le point de jonction *h*, on roule d'abord la moitié de la

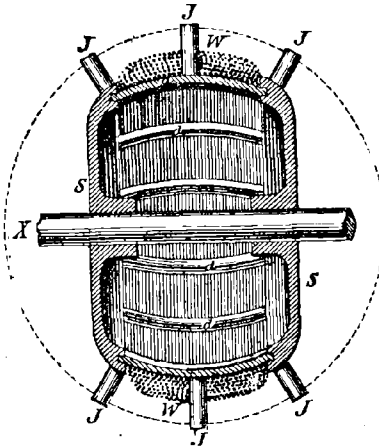


Fig. 315.

Induit Thomson-Houston (Coupe).

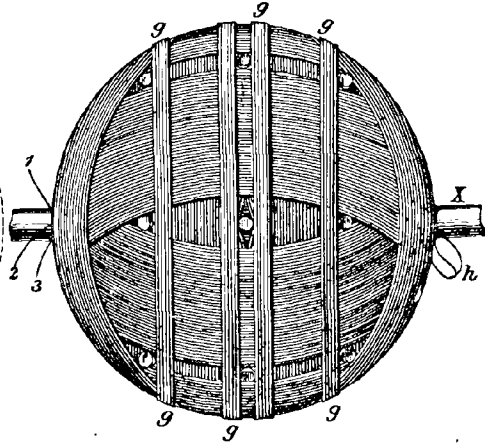


Fig. 316.

Induit Thomson-Houston terminé.

bobine n° 1. On tourne ensuite l'induit de 120° et l'on roule la moitié de la bobine n° 2. On fait après, complètement, la bobine n° 3, en partant de *h* et finissant en 3 où le bout est laissé libre. Puis on termine la bobine n° 2, et finalement on roule la seconde moitié de la bobine

n° 1. Les trois bobines se trouvent ainsi, en moyenne, équidistantes du noyau de fonte; leur chevauchement, de l'une sur l'autre, donne à la surface extérieure une forme sensiblement sphérique. Elles sont d'ailleurs maintenues en place par les frettes *g g*. Tout récemment il a été appliqué un nouvel induit, également composé de trois bobines élémentaires, mais roulées en anneau de sorte qu'elles ne chevauchent plus les unes sur les autres, ce qui facilite beaucoup le bobinage et les réparations. Les connexions des trois circuits restent les mêmes que précédemment. Quand cet induit est mis en mouvement à l'intérieur de la cavité polaire en calottes hémisphériques, des courants alternatifs sont engendrés séparément dans chacune des bobines à tour de rôle. Il reste à voir maintenant comment ces inductions alternatives sont rectifiées et combinées par le collecteur.

Dans les diagrammes qui suivent, le mouvement de rotation est repré-

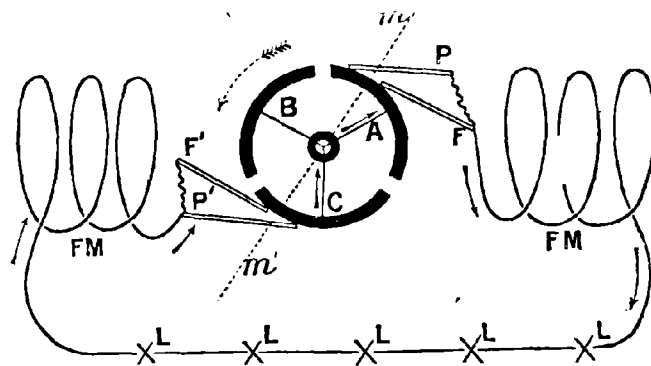


Fig. 317. — Collecteur et circuit d'une machine Thomson-Houston.

FM = Field-magnet = Inducteur.

senté sinistrorsum, vu du côté de l'arbre qui porte le collecteur; c'est en effet le cas dans la machine réelle. La figure 317 donne le diagramme du montage. Les trois bobines schématiquement représentées par les trois lignes ABC sont réunies par leurs bouts intérieurs, et chacun des bouts extérieurs en est conduit à un segment d'un collecteur en trois parties. Il y a deux balais positifs P et F, et deux négatifs P' et F'. Le courant qui part de P et F circule d'abord autour de l'un des inducteurs; il va de là au circuit extérieur des lampes et revient, par le second inducteur, en P' et F'. Le lecteur peut maintenant comparer ce diagramme à la figure 298, page 436, et remarquer que, dans cette figure, la ligne neutre *m'* divise obliquement le système mobile en deux moitiés, les courants induits allant vers l'extérieur, du centre au

collecteur, dans toutes les bobines qui s'élèvent dans la moitié de droite de ce cercle obliquement divisé ; et vers l'intérieur, du collecteur au centre, dans toutes celles qui descendent dans la moitié de gauche de la rotation. En conséquence, il y aura, pour la figure 317, courant vers l'extérieur en A, et vers l'intérieur en C ; B se trouvant pour le moment hors du circuit, à son passage par la position neutre. La continuité est assurée par le dispositif mentionné page 436, qui consiste en une seconde paire de balais $F F'$ à la suite de la paire $P P'$. Pour cette position de l'induit, A et C font des angles sensiblement égaux avec la ligne mm' d'action maximum ; par suite, les deux forces électromotrices dans ces bobines sont, pour l'instant, à peu près égales ; mais l'une va en augmentant, dans A, tandis que l'autre décroît, en C. Comme ces

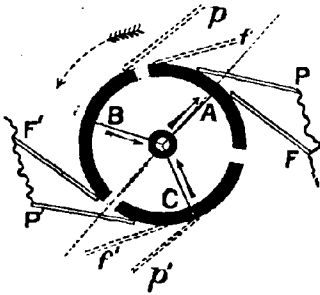


Fig. 318.

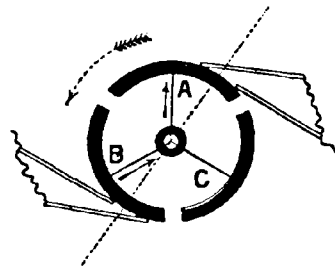


Fig. 319.

deux bobines sont alors en série l'une sur l'autre, leurs forces électromotrices individuelles s'ajoutent naturellement. — Un instant après, les choses en sont arrivées au point représenté par la figure 318, qui correspond à un avancement d'un douzième de tour. A est alors dans la position d'action maximum ; C approche beaucoup de la position neutre, mais n'est pas encore hors circuit ; B a de nouveau commencé à devenir le siège d'une force électromotrice induite et vient juste d'entrer en circuit. B et C sont en dérivation l'une par rapport à l'autre et en série avec A. — Le douzième de tour suivant amène l'état de choses indiqué par la figure 319. C est au point neutre et mise hors circuit ; A a passé le maximum d'un côté et B approche du maximum de l'autre côté, et elles sont en série l'une sur l'autre. — Un douzième de tour encore après, on arrive à la situation indiquée par la figure 320. A s'approche rapidement de la position neutre ; B est à son maximum ; C a passé la plage neutre et vient juste de rentrer en circuit par son contact avec le balai positif suivant. Encore un instant et C occupera la

place qu'avait A dans la figure 318, après achèvement d'un tiers complet de tour; puis la même série d'actions recommence, A prenant la place

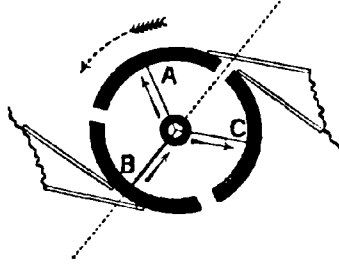
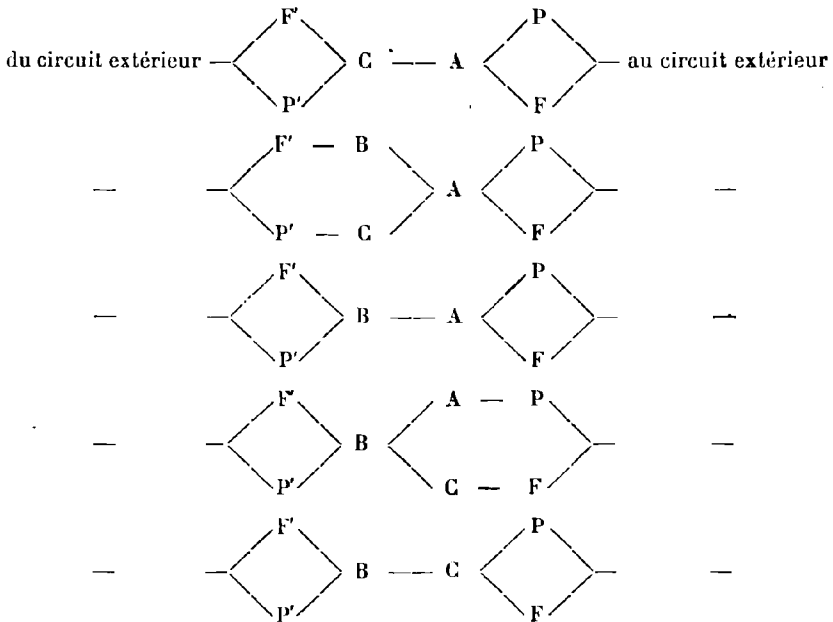


Fig. 320.

de B, et B celle de C. Le tableau suivant indique le roulement des changements qui s'opèrent pendant un tiers de tour :



et ainsi de suite.

Si la largeur des intervalles entre les segments du collecteur est égale à la largeur qui sépare les balais adjacents, chaque bobine sera mise hors circuit chaque fois qu'elle sera à plus de 60° de la position d'action maximum, et l'espace de temps pendant lequel deux bobines

quelconques seront en parallèle sera pratiquement nul. Mais, si les balais suivants FF' sont d'un angle considérable — 60° environ dans la pratique — en arrière des balais PP' , il y aura une durée considérable de mise en parallèle de deux bobines.

La régulation de cette machine au point de vue du maintien de la constance du courant est réalisée par un décalage automatique des balais. Au début l'inventeur avait adopté un mode de régulation « en avant » ; les balais étaient placés de 35° seulement en avance l'un sur l'autre et étaient simultanément décalés en avant toutes les fois que le courant dépassait l'intensité normale. On verra le résultat de cette

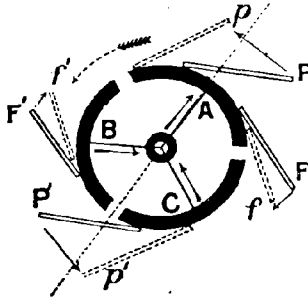
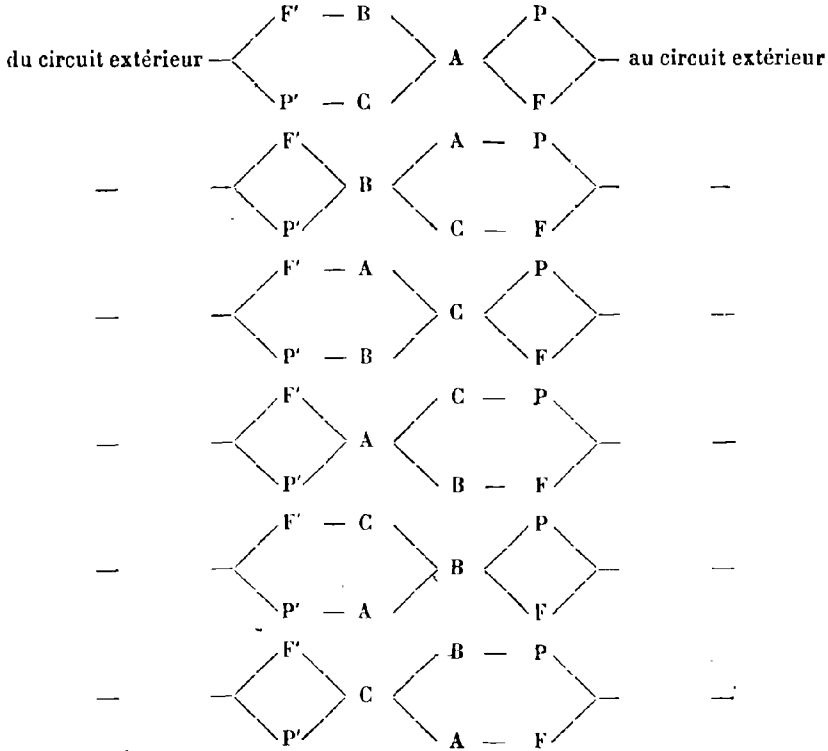


Fig. 321

disposition en examinant les lignes pointillées $p p'$ et $f f'$ de la figure 318. Il est clair que, si p restait en contact avec B après le passage de ce segment à la ligne neutre, sa force électromotrice tendrait à diminuer celle de A qui est en contact avec f . Ce mode de montage a été reconnu peu satisfaisant en pratique et abandonné. La méthode aujourd'hui employée a reçu le nom de régulation « en arrière ». Dans ce système, la paire suivante de balais $F F'$ est décalée en arrière suivant $f f'$, comme on le voit sur la figure 321, tandis que les balais principaux $P P'$ sont, en même temps, décalés en avant d'un angle égal au tiers de leur distance angulaire par rapport à $F F'$, suivant $p p'$. Si, comme on l'a vu ci-dessus, les balais sont à 60° l'un de l'autre dans les conditions normales, il y aura exactement 120° de chaque côté entre les balais positifs $P F$ et les balais négatifs $P' F'$; et, comme 120° sont exactement la longueur angulaire de chaque segment du collecteur, aucune bobine ne sera mise hors circuit, et le parallélisme subsistera entre deux bobines sous des angles de 60° ; c'est-à-dire qu'il y aura toujours deux des trois bobines en parallèle l'une avec

l'autre et en série avec la troisième. Les six périodes de changements seront les suivantes :



etc...

Supposons maintenant que le courant devienne trop intense par suite de la réduction du nombre de lampes en circuit ; les balais secondaires s'écartent. Il en résulte une diminution du temps pendant lequel l'une quelconque des bobines, en passant par la position d'action maximum, lance dans le circuit sa force électromotrice totale, en même temps que se trouve hâté le moment où elle est mise en parallèle avec une bobine relativement inerte. Pendant ces mouvements de régulation, la machine entière est momentanément mise en court-circuit six fois par tour, en raison de ce que F, en s'écartant de P pour aller autant vers P', et F', en s'écartant de P' pour aller autant vers P, arrivent à toucher à un moment le même segment du collecteur. Cette action se trouve aidée par la légère avance de P et de P' ; mais le principal objet de cette avance est de diminuer les étincelles. Si le courant est trop faible, les balais doivent être disposés de manière à se rap-

procher, ce qui réduit le temps pendant lequel les bobines les plus actives sont mises en parallèle avec les moins actives.

Dispositif de Régulation. — Ce mouvement d'avancement et de recul est réalisé par le simple mécanisme indiqué dans la figure 322. Les balais sont

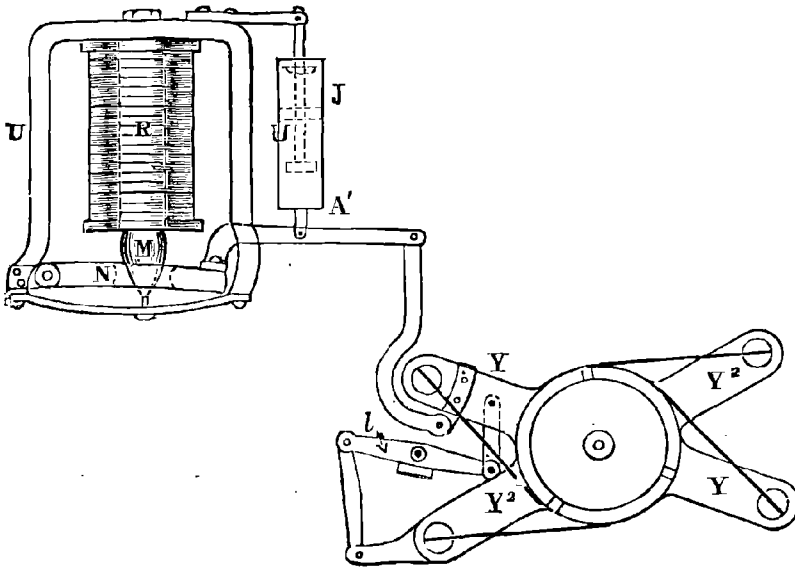


Fig. 322. — Electro-aimant et appareil de régulation du système Thomson-Houston.

fixés à des leviers YY et $Y_2 Y_2$ réunis par un troisième levier l . Le mouve-

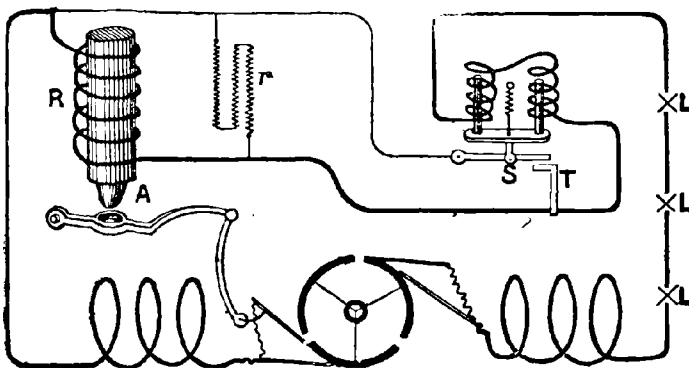


Fig. 323. — Circuits du système Thomson-Houston

ment automatique est transmis par l'électro-aimant de régulation R , dont le pôle M , de forme paraboloidale, attire son armature N suivant le courant qui

circule dans ses spires. Un amortisseur J, relié au bras A', empêche les mouvements d'être trop brusques. Les circuits qui agissent sur ce mécanisme sont d'ailleurs indiqués sur la figure 323. Normalement l'électro-aimant R est mis en court-circuit par un circuit secondaire, et n'agit que quand ce circuit est ouvert. En un point convenable du circuit principal sont intercalés deux solénoïdes dont les noyaux sont supportés par un ressort et dont la culasse actionne le levier de contact S. Si le courant devient trop intense, ce contact est rompu et l'électro-aimant régulateur R fait lever le bras A. Pendant la marche le levier S vibre constamment entre ses positions extrêmes et modifie la position des balais suivant les exigences du circuit. Une dérivation en charbon r, de haute résistance, vient en outre réduire au minimum l'effet destructeur de l'étincelle en S.

On devait s'attendre, avec trois segments seulement au collecteur, à voir les étincelles qui s'y produisent, quand ils passent sous les balais, détruire rapidement sa surface. Le professeur Thomson a attaqué de front cette difficulté. Au moyen d'un petit souffleur mécanique, fixé sur l'arbre derrière le collecteur, il envoie des jets d'air intermittents au moment précis où l'étincelle doit être virtuellement soufflée. Les trois segments du collecteur sont séparés par des intervalles ; et, en regard de chacun des balais de tête (comme on le voit dans la figure 313) est disposée une tuyère qui lance alternativement un souffle d'air trois fois par tour.

Le courant de régime pour cette dynamo est de 9,6 ou de 6,8 ampères. On en a construit cependant dont le bobinage permet de plus fortes intensités. Une des plus grandes machines alimente 63 arcs sur un même circuit, avec une force électromotrice de 3 000 volts. La machine ordinaire, maintenant 34 foyers à arc avec un courant de 9,6 ampères et sous une tension de 45 à 46 volts par arc, a une résistance intérieure de 10,5 ohms dans l'induit et de 10,5 également dans les inducteurs. L'induit a 59 centimètres de diamètre extérieur ; son fil, 2 millimètres. Le diamètre du fil des inducteurs est de 3,25 millimètres. La vitesse normale de la machine est de 850 tours par minute ; mais les dispositions spéciales de régulation automatique rendent la machine presque indépendante des irrégularités de vitesse. L'induit comporte environ 1 mètre de fil pour 0,58 volt de force électromotrice induite. Le rapport du poids du cuivre à celui du fer est très élevé dans ces dynamos, comparativement à ce qui se rencontre dans un grand nombre de machines ; il est de 1 de cuivre pour 2,25 de fer.

Le professeur E. Thomson a également étudié, en vue de la production de courants intenses sous bas potentiel, une forme de dynamo dont la structure extérieure est semblable à celle de la machine ci-

dessus décrite. Mais dans cette nouvelle machine, destinée à alimenter des lampes à incandescence montées en dérivation, l'induit sphérique est bobiné en circuit fermé à seize sections. Les inducteurs sont plus massifs, et la puissance de la machine est plus de cinq fois aussi considérable par rapport à ses dimensions. Elle est enroulée en *compound*; les bobines en série sont roulées sur une carcasse spéciale par-dessus l'induit.

AVANTAGES DES DYNAMOS A CIRCUIT OUVERT

Les deux grandes machines typiques à induit en circuit ouvert, — celle de Brush et celle de Thomson-Houston —, paraissent posséder certaines qualités qui les désignent spécialement comme machines à courant constant pour éclairage à arc. Les trois quarts de tous les foyers à arc du monde entier sont alimentés par l'une ou l'autre de ces machines. Il semblerait que les dynamos à bobine fermée, du type en anneau ou du type en tambour, sont moins aptes à la production des forces électromotrices très élevées nécessaires pour ces applications. Le collecteur, avec son grand nombre de touches parallèles isolées au mica ou au carton (qui est le complément indispensable de tout induit à circuit fermé), se détériore rapidement quand il est exposé aux étincelles et aux grandes variations de décalage inséparables du mode de fonctionnement à courant constant. Pour ce mode de distribution de l'énergie électrique, rien ne résiste mieux aux détériorations que le collecteur simplement isolé à l'air, décrit dans ce chapitre. — Comme contre-partie de ces avantages il ne faut pas méconnaître les ondulations de courant résultant du petit nombre de bobines ou de groupes de bobines dans les induits à circuit ouvert.

ONDULATIONS DU COURANT DANS LES INDUITS A BOBINE OUVERTE

Les calculs d'ondulation donnés au Chapitre IX, page 211, pour les induits à bobine fermée sont également applicables aux induits à bobine ouverte, pourvu qu'il n'y ait pas de mise de bobines hors circuit. Quand des bobines inertes sont mises hors circuit, les ondulations sont moins marquées, mais les calculs sont plus compliqués. L'existence de ces ondulations est surabondamment prouvée par l'ac-

tion des circuits de lumière à arc sur les lignes téléphoniques voisines dans lesquelles ils induisent des bourdonnements. Les courants à ondulations rapides sont affectés par la self-induction de tout électro-aimant dans le circuit ; elle tend toujours à réduire la rapidité des ondulations et à donner de la fixité au courant.

Une étude spéciale des courbes d'induction dans l'induit d'une machine Thomson-Houston pour éclairage à arc a été faite ¹ par M. Milton E. Thompson, qui a trouvé que le courant total, à pleine charge, oscillait entre 5 et 8 ampères, six fois par tour, le courant moyen étant de 6,8 ampères. Les ondulations de force électromotrice, dans chaque bobine individuelle, étaient très remarquables ; les courbes présentaient de singulières irrégularités ; elles tombaient jusqu'à près de zéro 12 fois par tour.

AUTRES MACHINES A HAUT POTENTIEL

Machine Sperry. — Comme machine pour éclairage par arcs, celle

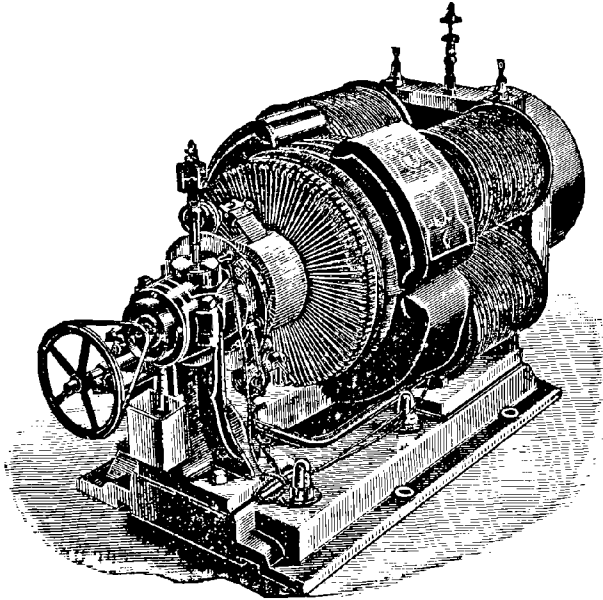


Fig. 324. — Machine Sperry pour éclairage à arc.

de Sperry avec induit Gramme, figures 324 et 325, présente un caractère

¹ *Electrical World*, XVII. 392, 1891 ; et *Electrical Review*, XXVIII. 773, 1891.

distinctif ; c'est l'emploi de pièces polaires internes et externes. L'une de ces machines, exposée à Paris en 1889, donnait 10 ampères sous 620 volts, à l'allure de 1 000 tours par minute. Son noyau d'anneau avait 268 millimètres de diamètre intérieur et 343 millimètres de diamètre extérieur, sur 139 millimètres de long. Le collecteur comportait 72 touches, et l'enroulement 72 sections de 40 spires chacune en quatre couches. Le jeu extérieur aux frettes était d'environ 4 millimètres.

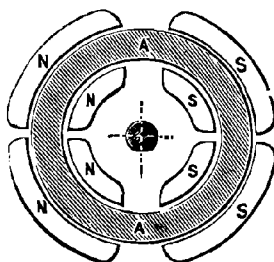


Fig. 325. — Coupe transversale d'une machine Sperry.

L'inventeur revendique comme sa propriété¹ la possibilité d'avancer les balais de la position de pleine force électromotrice jusqu'à celle de voltage nul, sans étincelles, l'action démagnétisante transversale de l'induit étant faible comparativement à la puissance des inducteurs.

Machine Wood. — Cette machine (fig. 326) est également une modification de celle de Gramme², fournissant 9,6 ampères sous 2 640 volts, à la vitesse de 875 tours par minute. Son anneau est à 120 sections de 72 spires chacune, et la section droite de son noyau est de 90 centimètres carrés. Un balai auxiliaire, monté en avance de 5 à 10 sections sur le balai collecteur, pare à la production d'étincelles ; et, pour faire varier le voltage, on a recours à un dispositif qui déplace les balais en avant. La plus importante station électrique du monde pour éclairage à arc, celle de Saint-Louis, Missouri, comprend 53 de ces dynamos, capables d'alimenter chacune 60 foyers à arc.

Machine Ball. — Pendant dix ans on a employé sur une vaste échelle aux Etats-Unis une machine à deux anneaux Gramme montés côte à côte

¹ Voir un travail d'Esson dans le *Journal Inst. Electrical Engineers*, XIX. 157, 1890.

² Voir *Electrical World*, XII. 23 avril 1888 ; XIV. 54 et 260, 1889 ; et XVII. 4, 1891.

sur un même arbre, et à circuit magnétique d'une très singulière conception. A chaque induit ne correspond qu'une seule pièce polaire, de sorte que les lignes de force qui pénètrent dans l'anneau d'un seul côté ont

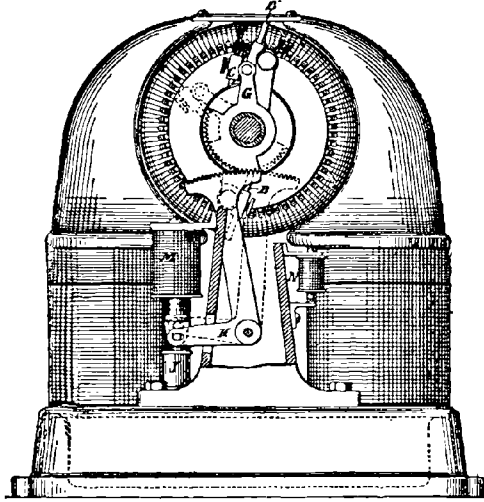


Fig. 326. — Machine Wood.

a se frayer un chemin de sortie à travers un large entrefer des plus irréguliers, ce qui a pour conséquence de donner lieu à une grande perte en dérivations magnétiques et à une déperdition considérable de force magnétisante. Les inconvénients d'un circuit magnétique mauvais ont été développés ailleurs, et nous avons cité des expériences démontrant comment, avec une disposition rationnelle pour aimanter un seul induit entre deux pièces polaires au lieu d'aimanter à demi deux induits avec une seule pièce pour chacun d'eux, un seul induit pouvait développer une force électromotrice aussi élevée que les deux ensemble. Il faut néanmoins constater que, en dépit de ces imperfections de conception, la machine Ball a donné grande satisfaction, sa construction ayant été évidemment dirigée par des ingénieurs d'une grande habileté.

Machine municipale d'Edison. — Cette dénomination a été donnée à une machine spéciale pour éclairage par lampes à incandescence en série employées par la Compagnie Edison ¹. Cette Société en construit

¹ *Electrical Review*, XXV. 209, 1889.

plusieurs types de diverses dimensions pour courants de 9, 16, 32 et 48 ampères respectivement. La plus petite d'entre elles a trois circuits dont chacun fournit un courant de trois ampères à une série indépendante de lampes, sous un voltage de 1 200 volts à 1 600 tours par minute.

Machine à Arcs « Phénix ». — M. W. B. Esson a étudié pour MM. Paterson et Cooper des dynamos à arcs¹ avec induits Gramme en anneau, et n'éprouve pas la moindre difficulté à leur faire donner depuis 800 jusqu'à 1 500 volts. Quelques-unes d'entre elles affectent la forme connue sous le nom de « type supérieur » ; mais leur bobinage en diffère un peu en raison de leur objet qui est de fournir des courants constants ; d'autres ont un double circuit magnétique. Comme l'induit est enroulé d'un grand nombre de spires de fil fin, il y en a beaucoup dans chaque section qui possède ainsi une self-induction considérable, et exige une grande force électromotrice pour le renversement de courant qui doit s'effectuer en elle dans l'opération de la commutation. Par suite, si la régulation doit s'effectuer par déplacement des balais, il est évident que, pour toutes les positions, entre les limites extrêmes de maximum et de minimum, le champ magnétique dans l'entrefer devra être le même ; et, comme le coefficient de self-induction est sensiblement constant, le champ magnétique dans l'entrefer sera également à peu près constant. En d'autres termes, le fer des inducteurs peut être réduit comme quantité, mais il doit être porté à un haut degré d'excitation, de manière à présenter une aimantation plus constante.

Machine Statter. — Un autre exemple de dynamo à courant constant, à régulateur automatique par déplacement des balais, est fourni par la machine Statter (fig. 327), dans laquelle une conformation très bien étudiée des faces polaires donne une disposition du champ magnétique grâce à laquelle la machine peut fonctionner sans étincelles. Le mécanisme qui fait mouvoir les balais consiste² en une roue dentée actionnée par l'un quelconque de deux pignons auxquels le mouvement de l'arbre est transmis par un excentrique. Un solénoïde inséré dans le circuit principal règle l'action des pignons et déplace les balais en avant ou en arrière suivant les besoins, de manière à maintenir le courant constant.

¹ *Journal Instit. Electrical Engineers*, XIX. 161, 1890.

² *La Lumière électrique*, XXX. 321, 1889 ; et Brevet anglais, 2825 de 1887.

Machine Schuyler. — Cette machine comporte un induit en tambour bobiné en huit parties et monté de telle sorte que ses bobines élémentaires sont successivement mises hors circuit aux points neutres.

Autres machines à induit ouvert. — D'autres formes de machines à induit ouvert ont été proposées par Bain, par Newton et par le Dr Hammerl. L'induit de ce dernier est formé d'un anneau Gramme bobiné en plusieurs sections, mais dont les bouts intérieurs de toutes

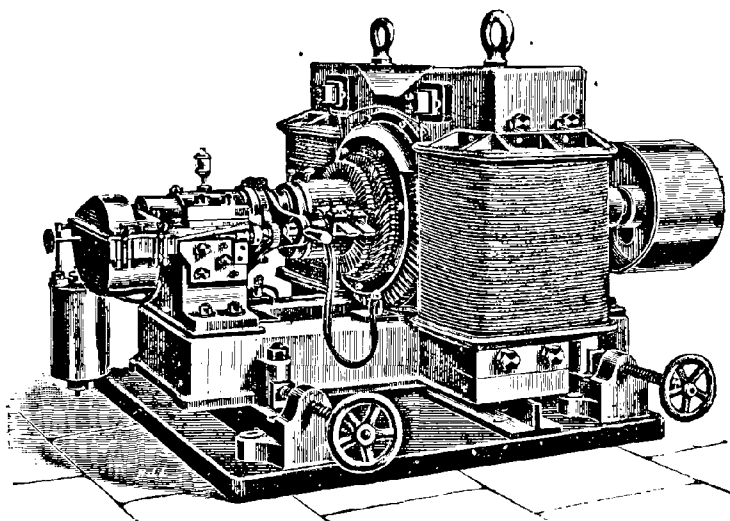


Fig. 327. — Machine Statter à courant constant.

les sections sont réunis à une jonction commune, et les bouts extérieurs amenés chacun à une touche distincte du collecteur. — Sir W. Thomson en a également imaginé d'autres types dans l'un desquels l'induit ressemble à une roue de bicyclette. — Une machine à disque ayant quelque analogie avec celle-ci a été dernièrement construite par Poleschko ; elle est décrite au Chapitre XIX.

CARACTÉRISTIQUES PLONGEANTES

On suit souvent pour la construction des dynamos destinées aux éclairages par arcs, une méthode qui, sans assurer par elle-même la constance du courant, mérite d'être décrite ici. Nous avons, page 246,

attiré l'attention sur la forme plongeante des caractéristiques de certaines machines montées en série. Il est évident que, si cet effet est suffisamment exagéré, la partie plongeante de la caractéristique correspondra au cas d'un courant approximativement constant. La caractéristique plongeante est importante en ce qu'elle contribue à la régularité de marche des lampes à arc dans le circuit. Supposons en effet qu'un foyer à arc soit monté sur une dynamo bobinée en série dans des conditions de fonctionnement telles que la caractéristique soit ascendante ; toute réduction de l'arc entraînera une diminution de résistance et une augmentation considérable de courant. Si au contraire les conditions de fonctionnement sont telles qu'elles correspondent à un point de la partie plongeante de la caractéristique, toute diminution dans la résistance du circuit ne provoquera qu'une augmentation relativement faible du courant.

Les causes qui tendent à faire fléchir la caractéristique d'une machine dynamo après le passage de ses ordonnées par une hauteur maximum sont : (1) l'effet démagnétisant du courant d'induit quand les balais sont décalés positivement ; (2) la saturation du fer du noyau d'induit avant celle des inducteurs ; (3) la dérivation de lignes de forces de l'inducteur ; (4) les dispositions de commutation spéciales à certaines machines, — par exemple aux machines à circuit ouvert ci-dessus mentionnées —, qui font varier considérablement leur force électromotrice efficace avec le calage donné aux balais ; (5) la haute résistance interne de la machine et la self-induction. Comme l'effet démagnétisant du courant d'induit est à peu près proportionnel à l'intensité de ce courant et au sinus de l'angle de calage, et

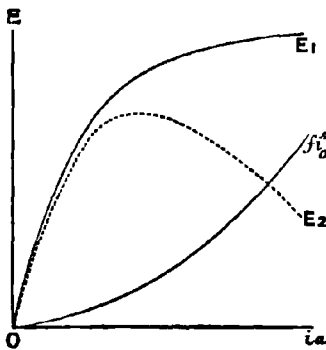


Fig. 328.

comme ce dernier est lui-même sensiblement proportionnel au courant d'induit, il en résulte que l'effet total démagnétisant est approximativement proportionnel au carré du courant d'induit. Dans la figure 328, supposons que la courbe E_1 représente la force électromotrice (à une vitesse donnée) quand les inducteurs sont excités séparément, le circuit de l'induit étant laissé ouvert ; cette courbe comprend l'effet de (2) et partiellement celui de (3) ci-dessus. On peut sur le même diagramme tracer une courbe (f_a^2) ayant des ordonnées proportionnelles à i_a^2 , et de grandeur telle qu'elle représente l'action démagnétisante du courant d'induit.

En déduisant les ordonnées de cette courbe de celles de la courbe E_1 , on obtiendra la courbe E_2 , ou caractéristique plongeante. — La difficulté avec toutes les machines de cette catégorie est la production d'étincelles aux balais, conséquence de la variabilité de l'angle de calage.

On peut jusqu'à un certain point obtenir l'effet d'une caractéristique plongeante en insérant dans le circuit extérieur une résistance de 1 à 2 ohms, ce qui vaut mieux que d'avoir une résistance intérieure trop élevée qui contribue à l'échauffement de l'induit. Mais une résistance auxiliaire de ce genre doit être bobinée sur un noyau de fer, en raison de la grande influence de la self-induction sur la fixité du courant.

RÉGULATEURS DE COURANT CONSTANT

On trouvera au Chapitre XXVII la description d'un grand nombre de dispositions applicables aux dynamos pour éclairages par arcs, et parmi elles le régulateur « à troisième balai » imaginé dans ce but par Waterhouse.

CHAPITRE XVIII

DYNAMOS COURANTES

Machines Gramme. — Depuis l'apparition de la machine Gramme, en 1871, il lui a été donné à différentes dates des formes innombrables, variant du petit type de laboratoire à aimants permanents (fig. 7)

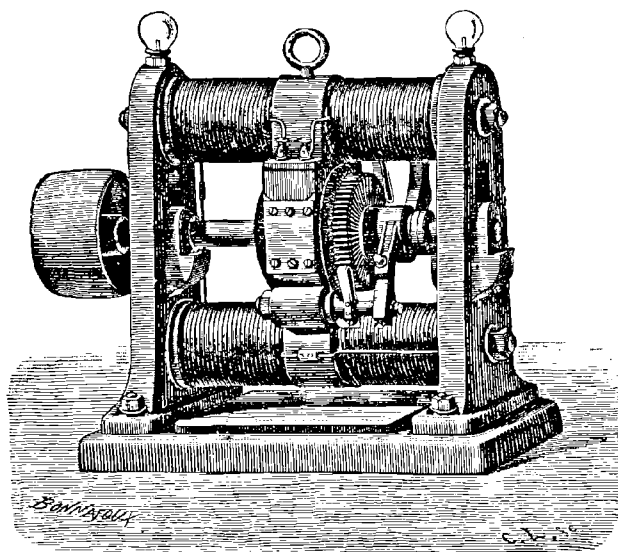


Fig. 329. — Machine Grammé, type « A ».

aux grandes machines absorbant de 30 à 40 chevaux. Ceux qui désirent des détails plus complets sur ces divers modèles pourront consulter, outre la plupart des ouvrages sur l'électricité, la première édition de

ce traité, dans laquelle un certain nombre de formes¹ en ont été décrites. Ils pourront également se reporter au traité de feu A. Niaudet, intitulé *Machines électriques à courants continus, systèmes Gramme et congénères* (1881). La figure 329 représente la machine ordinaire de Gramme, type « A », premier modèle entré dans le commerce et dont,

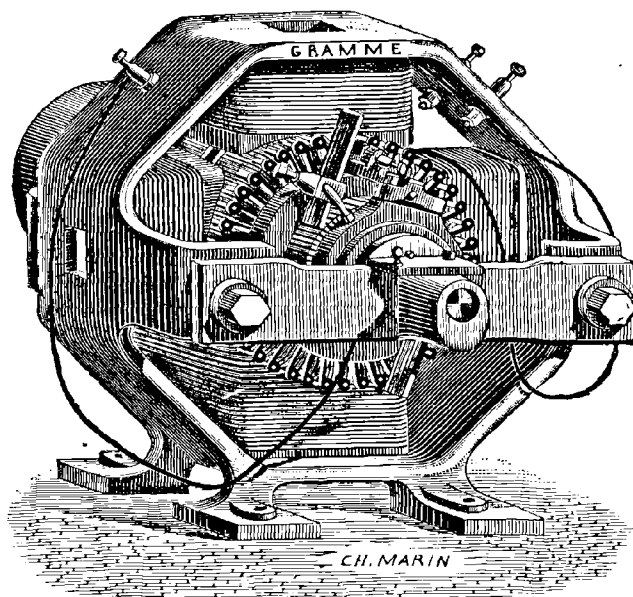


Fig. 330. — Machine Gramme à 4 pôles (1885).

à part quelques modifications destinées à en renforcer l'ensemble, l'emploi s'est constamment développé jusqu'à ce jour. Ses éléments caractéristiques sont l'induit en anneau, formé d'un noyau en fil de fer entièrement recouvert de spires de cuivre (décrit p. 329), et l'inducteur, à double circuit avec deux pôles consécutifs, un double pôle nord au-dessus et un double pôle sud au-dessous de l'induit. L'anneau représenté dans la figure 35 (p. 40) est d'une construction plus avancée,

¹ On peut citer entre autres les formes plus perfectionnées imaginées par Marcel Deprez, celles étudiées par Hochhausen, et celles construites par la Compagnie Fuller, de New-York ; M. Wood, de New-York, y a également apporté des perfectionnements de détails. D'autres modifications en ont été faites par M. Raffard, par MM. Sautter, Lemonnier et C^o, et par d'autres ingénieurs français ; le journal *Industries* du 5 novembre 1886 en a donné un résumé. On trouvera dans le même journal, VII. 285, 1889, un compte rendu plus complet du musée rétrospectif de Gramme qui figurait à l'Exposition de 1889.

mieux établi que le type original, et relié à l'arbre par un manchon de bronze à ailettes, au lieu du simple tampon de bois forcé à l'intérieur de l'anneau; les touches du collecteur sont maintenues par l'addition d'une bague isolée montée dans une gorge à leur extrémité.

Une autre forme plus récente de la machine Gramme est celle représentée par la figure 330, qui se distingue de la précédente par quatre pôles *saillants*, au lieu de pôles conséquents situés au milieu des inducteurs. Les électro-aimants de ce type sont tout ce qu'il y a de

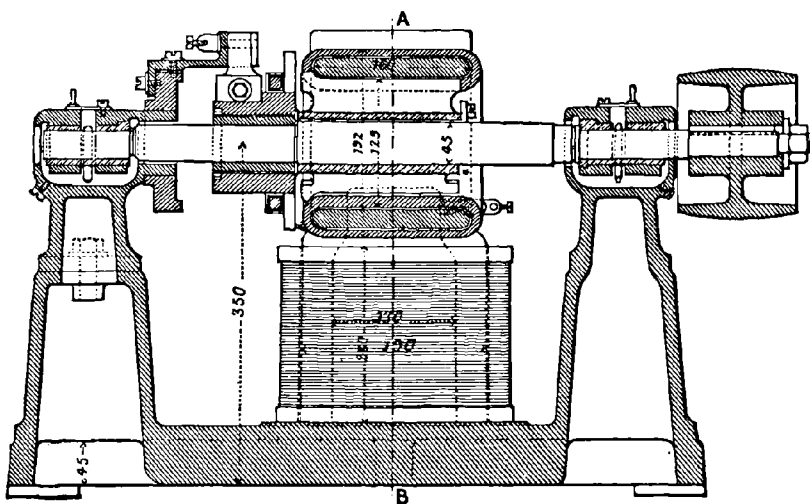
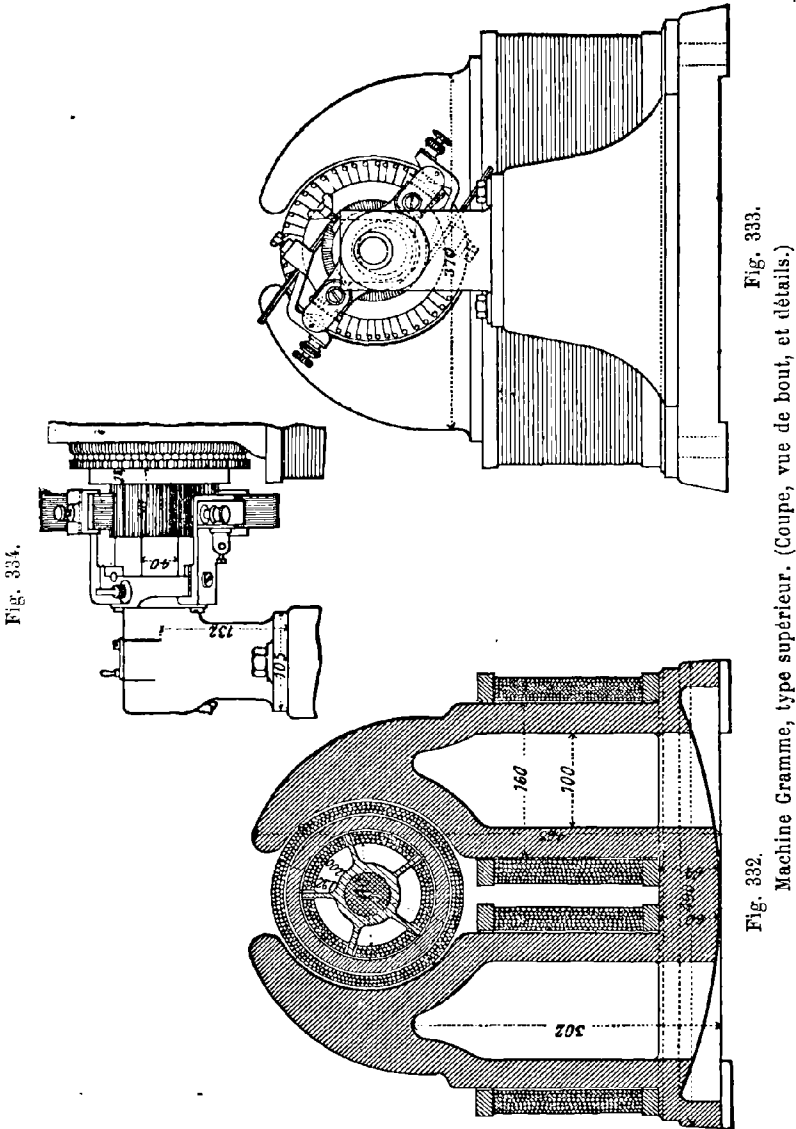


Fig. 331. — Machine Gramme (type supérieur) 1885.

plus simple : les quatre noyaux, le bâti extérieur octogonal, et l'un des deux paliers qui supportent l'arbre sont tous fondus d'une seule pièce. L'objet de cette disposition est de réaliser une machine solide, légère et portable, applicable à des éclairages temporaires. Les bobines inductrices sont enroulées chacune sur un cadre séparé, puis montées et fixées sur les noyaux. Quelques-unes de ces machines sont établies à deux pôles seulement. Elles comportent un poids de cuivre relativement moindre que les machines à pôles conséquents.

En 1885 Gramme a adopté une nouvelle forme d'électro, consistant en un fer à cheval renversé. Dans cette machine, dont les figures 331 à 334 donnent des diagrammes, la plaque de fondation, les noyaux inducteurs, les pièces polaires, et les supports de paliers sont tous venus de fonte d'une seule pièce.

Les bobines inductrices sont enroulées séparément sur des mandrins et glissées ensuite sur les noyaux entre des joues en matière isolante. L'induit



en anneau est monté sur un manchon de bronze à ailettes, claveté sur l'arbre, dont les bras s'engagent entre les spires de fil isolé et supportent le noyau,

formé lui-même de disques en tôle. Les touches du collecteur sont maintenues assemblées au moyen d'une bague de bronze extérieure dont elles sont soigneusement isolées. On en voit les détails dans les figures et on remarquera que les noyaux inducteurs sont intentionnellement fondus creux. La figure 334 indique les dispositions des porte-balais. Un de ces types, construit pour un débit de 40 ampères sous une tension de 110 volts, à la vitesse de 1 400 tours par minute, a les dimensions suivantes :

Rayon intérieur du noyau d'induit, 6,5 centimètres. Rayon extérieur, 9,15 centimètres. Profondeur du noyau, suivant l'axe, 16 centimètres. Section droite totale du noyau d'induit, 80 centimètres carrés. Entrefer direct, 0,85 centimètre. Aire estimée de chaque surface polaire, 366 centimètres carrés. Section droite de chaque noyau inducteur, 174 centimètres carrés. Longueur estimée du circuit magnétique à l'intérieur de l'inducteur, 81 centimètres. Touches du collecteur, 60. Nombre total des spires sur l'anneau, 300. Résistance de l'induit, 0,174 ohm. Résistance de la dérivation, 46 ohms.

Machines Crompton. — M. R. E. Crompton, qui a été dans ces dernières années le promoteur d'un grand nombre de perfectionnements dans la machinerie électrique, a commencé avec la forme d'induit en

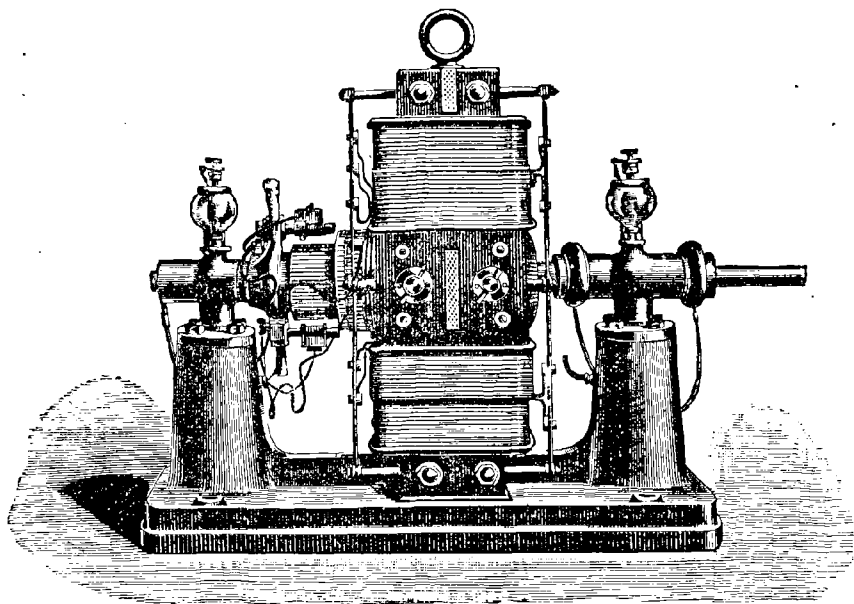


Fig. 335. — Machine Crompton (1887).

anneau de Bürgin, aujourd'hui tombée en désuétude. — Avec la collaboration de M. Kapp, il l'a ultérieurement abandonnée pour les anneaux cylindriques décrits page 334.

La figure 335 donne une vue générale de la dynamo Crompton avec ses électro-aimants verticaux à double circuit magnétique.

Les spires de l'induit sont formées, dans le type de 1887, de fil de cuivre étiré, de forme spéciale, présentant une section à peu près rectangulaire, recouvert de coton; une spire complète de ce fil correspond à chaque touche du collecteur. Les spires sont mises en forme convenable sur des mandrins, avant d'être montées sur l'anneau, puis assemblées deux à deux, de manière à présenter radialement, une fois mises en place, la plus grande dimension de leur section rectangulaire, donnant ainsi, suivant le rayon, une grande épaisseur de cuivre sur l'induit. Les deux spires sont placées côte à côte à la périphérie extérieure de l'anneau, et superposées radialement à l'intérieur. Les induits sont ordinairement munis de coins d'entraînement saillants en métal isolé, insérés à intervalles réguliers entre les fils conducteurs, rabattus après le bobinage et solidement maintenus par des frettes en acier étamé. Dans quelques machines plus récentes un circuit magnétique unique a été substitué au double circuit. Une autre amélioration utile pour les machines destinées à de grands débits consiste à diviser chaque conducteur, à l'extérieur de l'induit, en deux ou plusieurs bandes croisées l'une sur l'autre au milieu et réunies à leurs extrémités. Au lieu de ces bandes imbriquées, on emploie aujourd'hui, pour toutes les machines à grand débit, des barres rectangulaires faites d'un toron de fils comprimé. Ce mode de construction diminue considérablement les courants parasites qui se développent dans les conducteurs formés de simples barres ou tiges.

Un compte rendu complet des perfectionnements successifs¹ apportés par M. Crompton occuperait à lui seul tout un volume. Outre les améliorations d'ensemble faites avec la collaboration de M. Kapp, page 334, et un meilleur emploi du fer dans l'induit, il en a réalisé un grand nombre en collaboration avec M. Swinburne en ce qui concerne les modes d'enroulement, page 354, et les machines à conducteurs engagés dans les disques de noyau. Puis M. Crompton a trouvé qu'il était inutile d'isoler de l'arbre les disques de noyau si ceux-ci étaient isolés les uns des autres sur toute leur surface jusqu'à la périphérie. Vint ensuite la question des dents d'entraînement, et les disques plus épais, mentionnés page 334, furent abandonnés en faveur de dents en métal delta ou

¹ Voir les remarques de M. Crompton dans les *Proc. Inst. Civil Engineers*, LXXXIII. 125, 1885; *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XV. 546, 1886; et *Journal Inst. Electr. Engineers*, XIX. 239, 1890, et XX. 308. 1891.

en bronze d'aluminium, fixées dans le corps même du noyau fortement serré. Il imagina ensuite les conducteurs imbriqués et en torons comprimés, pour parer au développement des courants parasites. Finalement on lui doit l'introduction des bobinages multipolaires en série pour les induits en tambour. Le succès mérité des grandes machines à quatre pôles de MM. R. E. Crompton et C^{ie} pour stations centrales a couronné leurs efforts. La construction de quelques-uns de leurs induits à grand débit est indiquée dans les figures 266 et 267, page 356.

Machines Kapp. — *Machine bipolaire.* — M. Gisbert Kapp a étudié diverses formes de dynamos à courant continu, les unes à induits en

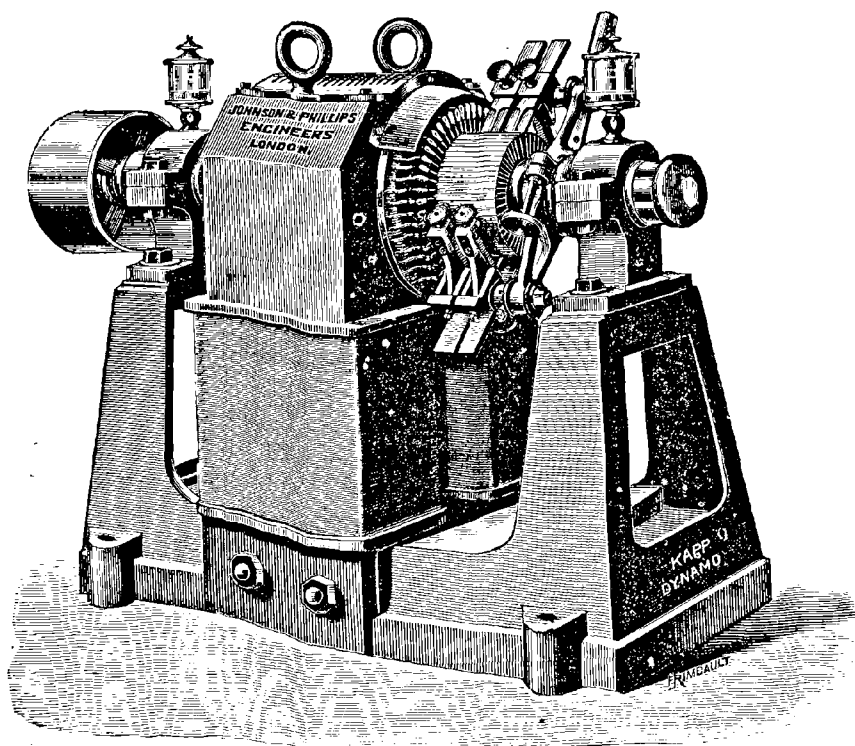


Fig. 336. — Machine Kapp, bipolaire.

anneau cylindrique, les autres, plus récentes, à induits en tambour. La construction la plus nouvelle et la mieux étudiée comme machine bipolaire est celle représentée dans la figure 336. Elle est du type

« supérieur » avec induit et arbre au sommet de l'inducteur. Ces machines sont construites par MM. W. H. Allen et C^{ie}, et par MM. Johnson et Phillips. Un des types construits par cette dernière maison (fig. 249, 252, 280), d'une puissance de 21 000 watts, par 200 ampères sous 105 volts à 780 tours par minute, présente les constantes suivantes :

Induit. — Noyau de 406 millimètres de long sur 60 millimètres d'épaisseur, monté sur un manchon de fonte à ailettes. Section de fer du noyau, y compris l'isolant entre les disques, 403 centimètres carrés. Diamètre extérieur 280 millimètres. Conducteurs de cuivre au nombre de 120, formés chacun de deux barres parallèles, de 5,3 millimètres sur 2,8 millimètres, réunies en quantité, et donnant une section droite de 29,6 millimètres carrés. Connexions faites par 120 bandes de cuivre demi-circulaires, à oreilles, de 41 millimètres de largeur sur 1,25 millimètre d'épaisseur. Résistance (à chaud) 0,025 ohm. Collecteur en 60 parties.

Inducteur. — Diamètre d'alésage 303 millimètres. Enroulement en dérivation, 11 couches de 139 spires chacune, en fil de cuivre rond de 1,65 millimètre de diamètre, guipé jusqu'à un diamètre de 2,03 millimètres, sur chaque branche, les deux branches reliées en série. Nombre total des spires en dérivation 3 058. Enroulement en série composé de 23 spires sur chaque branche, ruban de cuivre de 12,2 millimètres de large sur 3,3 millimètres d'épaisseur, les deux branches couplées en parallèle. Résistance des bobines en dérivation (à chaud) 30,8 ohms. Résistance des bobines en série (à chaud) 0,0079 ohm.

L'une des particularités de cette dynamo est le mode d'entraînement des conducteurs de l'induit. Comme on le voit sur la figure 252, à intervalles réguliers sont insérés, entre les disques de noyau, des disques plus épais munis d'ouvertures de ventilation et d'oreilles d'acier en saillie. Autour de ces oreilles sont disposés, comme coins d'entraînement, des morceaux de fibre blanche dure ; et, comme les oreilles ne sont pas montées en lignes droites, mais alternées, les conducteurs de cuivre, au lieu d'être bobinés droits, affectent une forme sinueuse. La figure 252 montre comment les disques de noyau sont perforés excentriquement et serrés par des rondelles extrêmes également perforées, de manière à ce que ces perforations placées en face les unes des autres constituent un canal de ventilation régnant sur toute la longueur du noyau. Le noyau entier s'appuie contre un épaulement de l'arbre et est maintenu par un écrou. La figure 280 donne également les détails des porte-balais et de leur collier.

Machine multipolaire à tambour. — Cette machine pour stations

centrales est à six pôles ; les sections de l'induit sont groupées en parallèle, ou, si l'on veut, en série, de manière à n'exiger que deux jeux

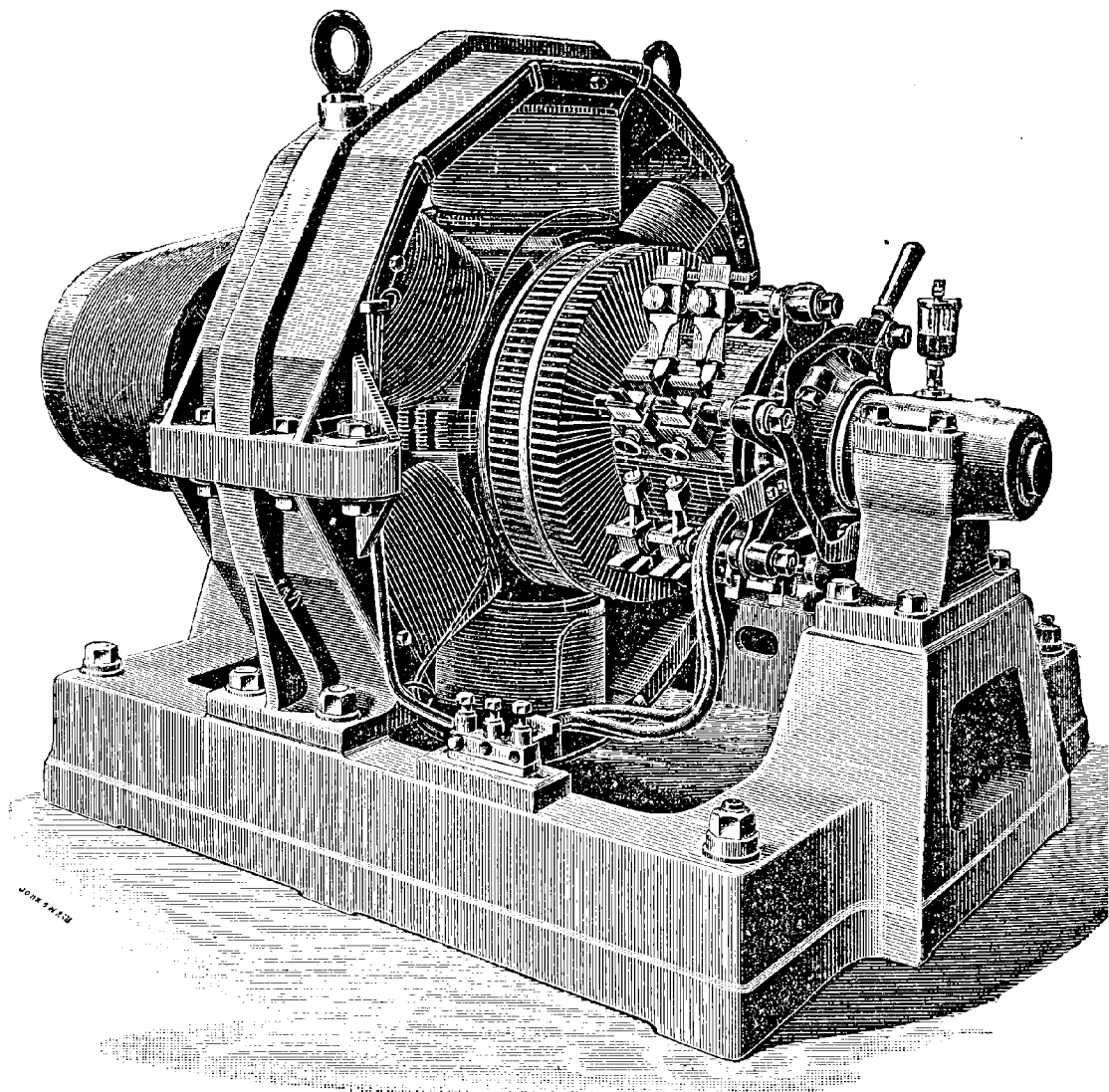


Fig. 337. — Machine Kapp, multipolaire, à tambour, pour stations centrales.

de balais. Les conducteurs de l'induit sont constitués par des câbles de fil toronné isolé. Voici les constantes de cette machine : —

Puissance. — 1 400 ampères sous 50 à 55 volts, à 460 tours par minute.

Induit. — Longueur 305 millimètres. Diamètre 610 millimètres. Nombre de conducteurs 224, reliés en groupement parallèle pour six pôles. Résistance nette de l'induit, de balai à balai, 0,00166 ohm (à chaud). Collecteur à 112 segments. Six jeux de balais à 60° les uns des autres.

Inducteur. — Noyaux circulaires de 230 millimètres de diamètre. Pièces polaires de 285,75 millimètres sur 254 millimètres. Ampères-tours d'excitation 8 000 par noyau d'électro.

Une machine encore plus grande, à huit pôles, d'une puissance de 134 kilowatts, doit figurer au « Crystal Palace ». Dans cette machine, les pièces polaires ne sont taillées en biseau qu'au bord de la surface polaire où les conducteurs approchent du pôle.

Machines Brown (*Ateliers d'Oerlikon*). — Ces excellentes machines primitivement construites dans les ateliers de construction mécanique d'Oerlikon, près de Zurich, sont de plusieurs types.

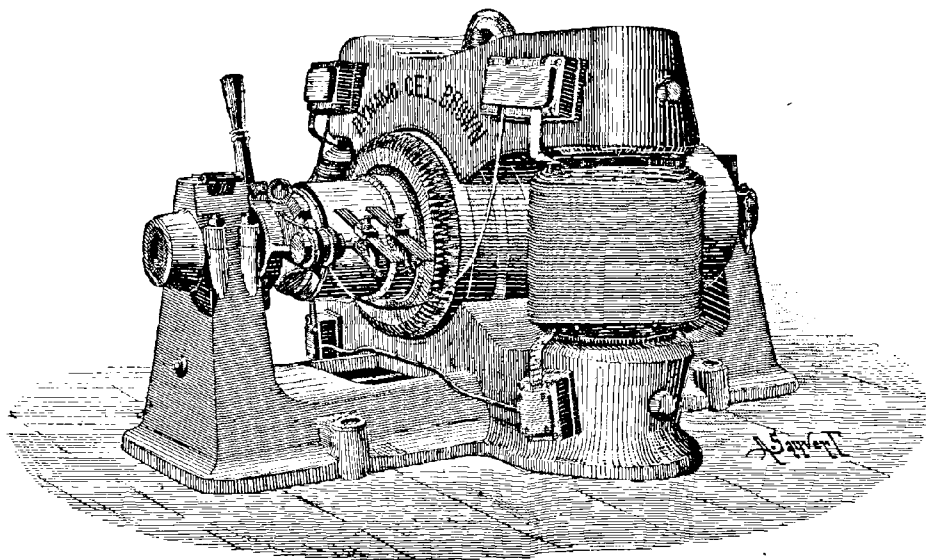


Fig. 338. — Machine Brown, bipolaire.

Dynamo pour éclairage par incandescence, de 28 kilowatts. — Puissance 400 ampères sous 70 volts = 38 chevaux-vapeur, à 400 tours par minute. — Cette machine (fig. 338) ressemble au type « Manchester » ; mais elle est encore plus massive, et est aujourd'hui établie en machine

à tambour, au lieu d'avoir un induit en anneau. Les disques de noyau d'induit sont clavetés sur un long manchon et reperçés pour le logement des conducteurs de cuivre ; ces perforations, de 12 millimètres de diamètre, arrivent à 1 millimètre de la périphérie. L'épaisseur de l'entrefer direct se trouve ainsi réduite à 2,5 millimètres.

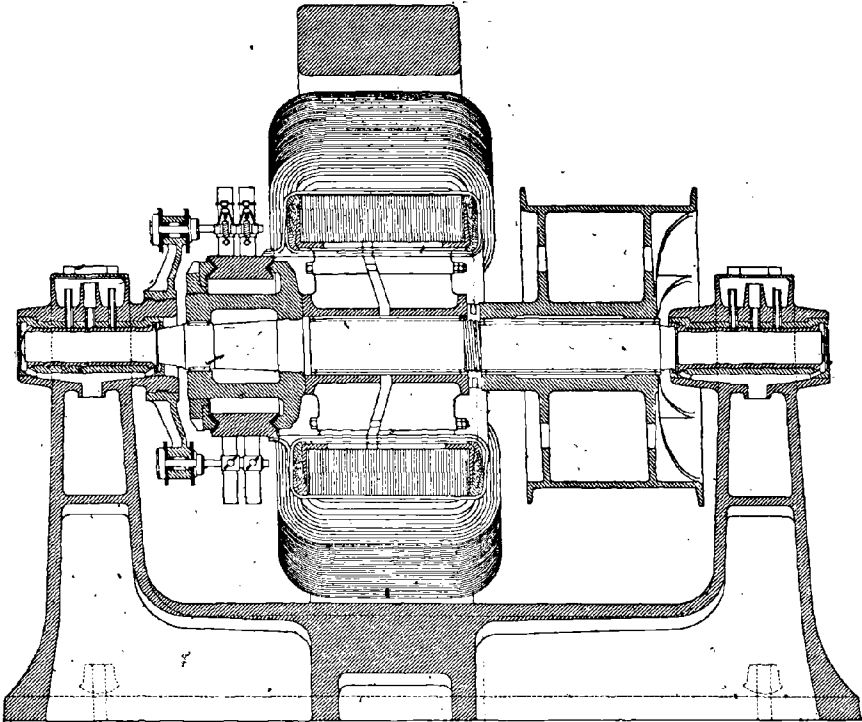


Fig. 339. — Machine Brown, à 4 pôles, pour transport d'énergie. (Coupe longitudinale.)

Ces disques d'induit, au nombre de 570, isolés au papier, ont 514 millimètres de diamètre extérieur et 220 millimètres de diamètre intérieur, sur 0,6 millimètre d'épaisseur. La section droite totale du fer dans l'induit est de 480 centimètres carrés. Le nombre des conducteurs autour de la périphérie est de 80 ; celui des touches du collecteur, de 40 ; la résistance de l'induit, de balai à balai, de 0,00525 ohm. L'inducteur, en dérivation, comporte 2 800 spires de fil de 3,2 millimètres de diamètre, de 6 ohms de résistance, plus 1 ohm environ de résistance en série pour la régulation à la vitesse et à la puissance ci-dessus. Les conducteurs logés dans les trous du noyau d'induit sont en cuivre rond de 9,2 millimètres de diamètre. Les connexions terminales sont formées de bandes de cuivre refendues en deux et recourbées en forme de spirales inverses.

Dynamô de 170 kilowatts, à anneau et à quatre pôles, pour transport d'énergie (fig. 339 à 341). — Puissance : 270 ampères sous 625 volts = 240 chevaux-vapeur, à 500 tours par minute. Ces machines, dont deux spécimens figuraient à l'Exposition de 1889, ont environ 2 mètres de haut. Elles sont à anneau, avec hobinage extérieur aux disques d'induit, la construction avec conducteurs engagés dans des trous per-

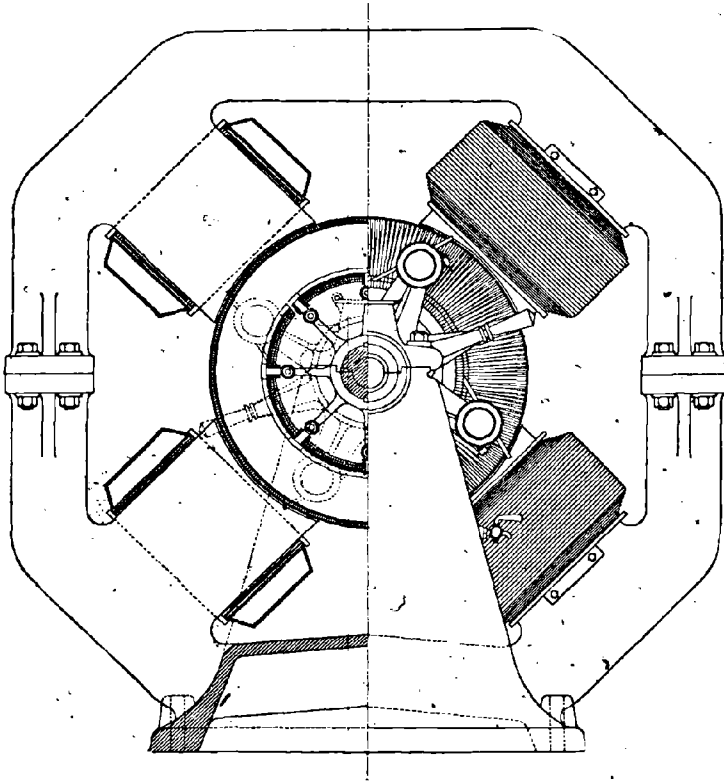


Fig. 340. — Machine Brown, à 4 pôles et à anneau, pour transport d'énergie. (Vue de bout et coupe transversale.)

forés ne convenant pas pour des machines d'un voltage supérieur, à 100 volts. Les noyaux d'inducteurs, en fonte, sont disposés radialement et réunis par une culasse octogonale très massive, dont la moitié inférieure est fondue d'une seule pièce avec la plaque de fondation et les supports de paliers.

L'induit a 96 centimètres de diamètre et 50 centimètres de profondeur suivant l'axe. Les disques d'induit, de 660 millimètres de diamètre intérieur, de

960 millimètres de diamètre extérieur et de 0,6 millimètre d'épaisseur, isolés au papier, donnent dans l'anneau une section droite de fer de 660 centimètres carrés, avec un entrefer direct de 16 millimètres. Enroulement (pour la génératrice) formé de 400 spires de câble en un toron composé de 19 fils de 1,3 millimètre de diamètre, bobiné en une seule couche extérieurement et sur deux couches intérieurement; résistance, de balai à balai, 0,025 ohm. Absence de connexions transversales. Collecteur en 200 segments. Les bobines d'électros, en série avec l'induit, sont enroulées chacune de 60 spires de lames de cuivre de 30 centimètres de large sur 1 millimètre d'épaisseur. — Voici les poids de ces divers éléments : bâti et noyaux d'électros 11 600 kilogrammes ; fer d'induit 1 430 kilogrammes ; cuivre d'induit 132 kilogrammes ; induit complet 2 420 kilogrammes ; cuivre d'électros 1 370 kilogrammes. Poids total de la machine complète 15 700 kilogrammes ou environ 16 tonnes. A 500 tours par minute elle peut fournir, en marche continue, nuit et jour, 250 chevaux-vapeur. Si on ne la fait fonctionner que de jour, on peut pousser le courant jusqu'à faire fournir à la machine 300 chevaux. Son rendement commercial à pleine charge est de 93 à 94 p. 100.

Construite comme moteur, pour la génératrice ci-dessus, la machine est à peu près identique ; les seules différences consistent en ce que l'induit comporte un peu moins de fer et 364 spires seulement, avec un collecteur à 184 segments. Ainsi modifiée, la réceptrice marche à vitesse constante, bien que la perte sur la ligne varie avec la charge. L'expérience, qui a dicté ces proportions relatives de fer et de cuivre, conduit, dans ce cas, à cette règle que, pour un moteur, l'induit doit être relativement moins puissant, et l'inducteur relativement plus puissant que pour une génératrice.

La figure 341 donne une vue d'ensemble de cette machine.

Dynamo à anneau à huit pôles pour électrometallurgie. — Pour les applications à l'industrie de l'aluminium, M. Brown a construit des machines à six et huit pôles. Celle à huit pôles est une machine de 300 chevaux, qui fonctionne à l'usine d'aluminium de Neuhausen. Elle est montée avec son arbre vertical en prolongement de l'arbre d'une turbine verticale. Après une marche continue, de jour et de nuit, à un débit moyen de 3 000 ampères, son collecteur reste poli, la machine fonctionnant sans étincelles. Le mode de connexion transversale entre les bobines élémentaires et deux points du collecteur situés à 45 degrés l'un de l'autre consiste en bandes de cuivre refendues et recourbées en sens inverse l'une de l'autre.

Machines Paterson et Cooper. — La machine « Phénix », construite par MM. Paterson et Cooper, sur les dessins de M. W. B. Esson, a éga-

lement un induit en anneau cylindrique modifié, formé d'un grand nombre de disques en tôle de Suède très mince, séparés l'un de l'autre par du papier paraffiné et fixés à deux manchons à ailettes au moyen de trois boulons passant dans des échancrures réservées à cet effet sur le bord interne des disques, comme on le voit sur la figure 244, page 334.

Aucune disposition n'est prise pour assurer la ventilation de l'induit

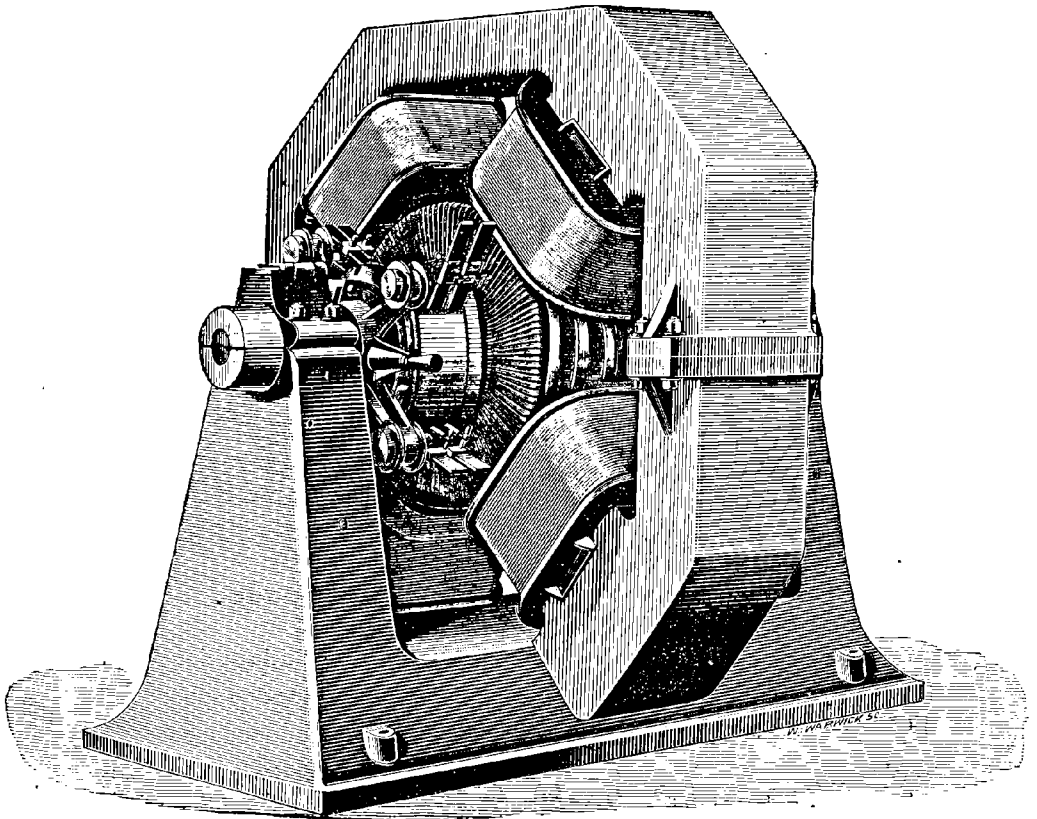


Fig. 341. — Machine Brown, à 4 pôles et à anneau, pour transport d'énergie.
(Vue d'ensemble.)

qui s'échauffe très peu. Primitivement ces machines avaient un inducteur en fer forgé à double circuit magnétique et des disques d'induit dentés. — Une machine Phénix de 65 kilowatts produite à l'Exposition d'Anvers donnait 820 watts par kilogramme de cuivre, et 1,44 volt par mètre de fil.

Les machines plus récentes sont constituées par un seul inducteur vertical en fer à cheval, formé dans certains cas d'un seul bloc de fer forgé entaillé de manière à former les deux branches et alésé, comme l'indique la figure 342. L'arbre est supporté par deux pièces de bronze fixées à cheval sur les faces verticales des parties polaires. Les noyaux d'induits ne comportent généralement pas de dents ; ils sont formés

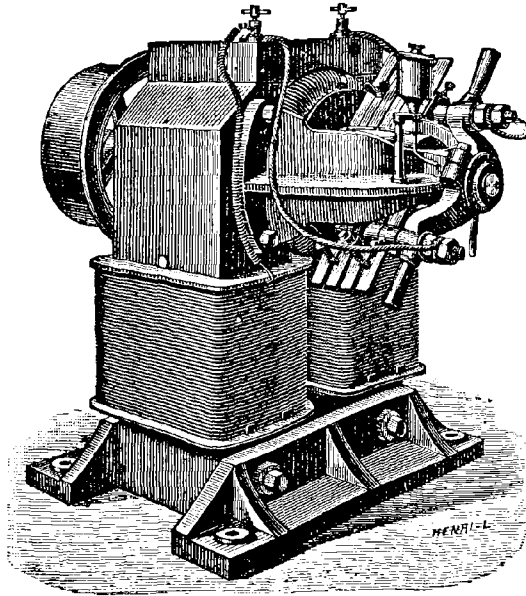


Fig. 342. — Machine « Phénix » (1887), type en fer forgé.

de rondelles pleines en vue d'éviter la dépense de taillage des dents.

Voici les détails et renseignements fournis par les constructeurs sur cette machine : —

La machine de 25 kilowatts est construite pour fournir 100 ampères sous 250 volts, à une allure de 700 tours par minute. Son poids total est de 1 420 kilogrammes ; sa puissance utile, de 17,5 watts par kilogramme de matière. Le diamètre extérieur du noyau d'induit est de 34,6 centimètres ; son diamètre intérieur, de 20 centimètres ; sa longueur, de 30 centimètres. La section droite des branches d'inducteur a 30 sur 20 centimètres. L'induit a une section nette de fer, isolant déduit, de 193 centimètres carrés ; les inducteurs, déduction faite des coins arrondis, de 612,7 centimètres carrés. La cavité polaire est alésée à 37,8 centimètres de diamètre. L'induit est enroulé de 360 tours de fil de 3,75 millimètres carrés de section, en deux couches. L'excitation est faite en dérivation ; chaque branche de l'électro contient 3 540 spires de fil de 1,55 millimètre de diamètre, et la résistance totale de la dérivation est de

83 ohms. La surface de rayonnement des deux branches d'électro est de 7 740 centimètres carrés, et la puissance dépensée en excitation, de 730 watts; la surface de refroidissement est par suite de 10,3 centimètres carrés par watt.

D'après les données ci-dessus on trouve que le flux de force total qui traverse l'induit est d'environ 6 200 000 unités C. G. S., et que l'induction spécifique utile dans l'induit est de 16 000, et, dans l'inducteur, de 10 100 unités C. G. S. La vitesse périphérique du noyau d'induit est de 770 mètres par minute, et la longueur totale de fil sur l'induit, de 285 mètres environ, soit 1,143 mètre par volt dans le circuit extérieur. A une vitesse périphérique de 915 mètres par minute (qui est une bonne moyenne pour les dynamos modernes actionnées par courroies), 965 millimètres de fil induit produiraient 1 volt. Pour les puissantes machines à grand débit, les constructeurs ont, depuis six ou sept ans, employé comme conducteur d'induit un câble toronné. Ce mode de construction, aujourd'hui adopté par presque tous les constructeurs, pare au développement des courants parasites qui se produiraient avec des barres massives.

La figure 343 représente une variante de cette machine, dans

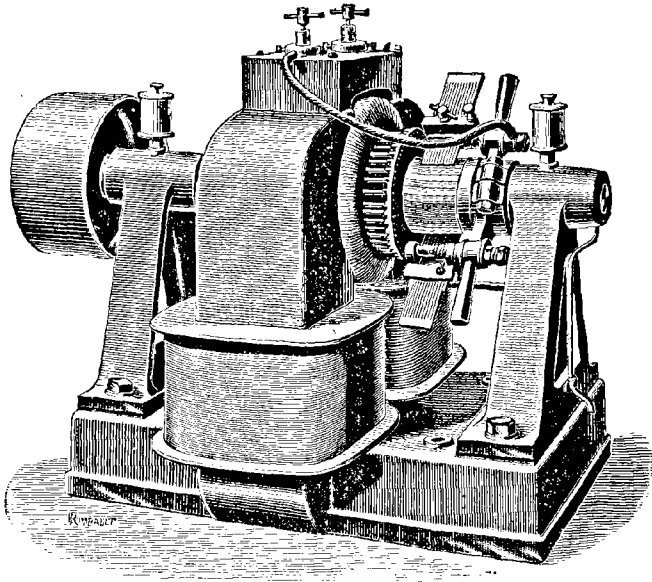


Fig. 343. — Machine • Phénix • (type 1887).

laquelle l'inducteur est fondu d'une seule pièce. Cette dernière n'est pas, à poids égal, aussi puissante que la précédente; mais on peut, à puissance égale, l'établir à meilleur compte que la machine en forgé. Aucune de ces deux machines ne comporte de joint magné-

tique. Les bobines inductrices sont enroulées sur des formes spéciales en tôle à joues de laiton, et glissées, toutes montées, sur les noyaux de l'électro. La figure 272, page 362, montre la construction du collecteur ainsi que la manière dont les segments en sont isolés électriquement et assujettis mécaniquement.

Un des types de cette machine, établi pour une puissance de 90 ampères sous 103 volts à la vitesse de 1 420 tours par minute, a fourni les données de construction et de calculs de bobinage mentionnées page 403 au Chapitre sur les *Projets de dynamos*. On remarquera combien, dans cette machine, dont l'inducteur est en fonte, la section de fer dans l'induit est faible. La même carcasse, avec un enroulement différent, composé d'un grand nombre de tours de fil fin, fournirait une bonne machine pour lumière à arc, son inducteur étant à cet effet plus hautement saturé et comportant un poids de cuivre relativement plus grand.

Dans les grandes machines « Phénix » à quatre pôles, on emploie des inducteurs en fonte ; le noyau d'induit est constitué par un enroulement de fil de fer à section carrée sur un cylindre de bronze à joues.

Les mêmes constructeurs ont établi des dynamos pour lumière à arc, donnant 10 ampères sous des tensions variant de 700 à 1 500 volts. Voici les constantes d'une machine de ce genre, de 7 kilowatts, destinée à alimenter de 12 à 15 foyers : —

Noyau d'induit : diamètre extérieur, 32,5 centimètres ; diamètre intérieur, 22,9 centimètres ; longueur axiale, 13 centimètres ; enroulé de 1872 spires de fil de 1,2 millimètre de diamètre, en 48 sections de 39 spires chacune sur trois couches. Résistance de l'induit, 3,448 ohms. Deux bobines d'inducteur de 954 spires chacune, en série, présentant une résistance totale de 4,541 ohms. Induction spécifique maximum dans l'induit 19 080 unités, et dans l'inducteur 10 800 unités.

Machine « Manchester ». — L'inducteur de cette machine très bien étudiée est représenté par les figures 344 et 345. Il ressemble aux formes primitives de Mac Tighe et de Joel ; mais ses noyaux en fer forgé sont cylindriques et les culasses de fonte sont très massives. La machine est construite par MM. Mather et Platt ; elle a été étudiée par le Dr Edouard Hopkinson. L'induit combiné par les deux frères J. et E. Hopkinson est un anneau Gramme modifié, à faible résistance et à ventilation soignée. Le collecteur est d'une dimension inusitée ; il est formé de 40 touches de laiton écroui isolées au mica. Dans ces machines

on conforme ordinairement les pièces polaires de manière à laisser un moindre jeu en face des points le plus haut et le plus bas de l'induit; cette disposition a pour effet de concentrer le champ magnétique et

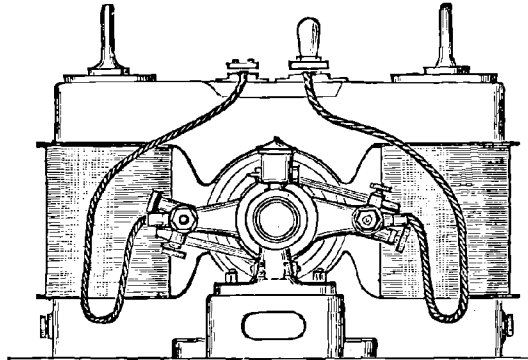


Fig. 344. — Machine Mather et Hopkinson. (Vue de bout.)

d'empêcher sa torsion sous l'action du courant d'induit. — Dans une machine de ce type, de 24 kilowatts (destinée à alimenter 300 lampes

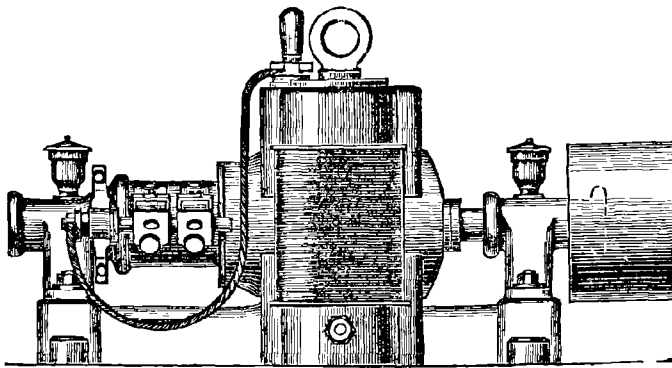


Fig. 345. — Machine Mather et Hopkinson. (Vue de profil.)

à incandescence), le noyau d'induit a 30 centimètres de long sur 30 centimètres de diamètre, avec 120 spires de fil. Les résistances respectives sont : pour l'induit, 0,023 ohm ; — pour les bobines en dérivation, 19,36 ohms ; — pour celles en série, 0,012 ohm. A une vitesse de 1 050 tours par minute, le courant est de 220 ampères ; la machine est

à peu près auto-régulatrice à 111 volts ; son rendement est de 90,9 p. 100 ¹.

Machine « Victoria » (Compagnie Brush). — La « Brush Electrical Engineering Co » a construit, à la faveur des brevets de Schuckert, Mordey, Wynne, et Sellon, une dynamo, du type à anneau plat, à laquelle a été donné le nom peu justifié de machine « Victoria ». Il en existe deux modèles, l'un à quatre, et l'autre à six pôles montés autour de l'anneau.

Le développement de la machine Victoria d'après la machine originale de Schuckert a eu pour point de départ, entre les mains des électriciens de la Compagnie Brush, la découverte d'un défaut signalé par M. Mordey ; à l'aide de sa méthode d'investigation de la distribution des potentiels autour des collecteurs, il montra qu'il y avait dans la machine un point, situé à une grande distance en avant de chaque balai, où le potentiel était le même qu'au balai, et que toutes les portions de l'induit placées entre ces points équidistants étaient inutiles, et même plus qu'inutiles, puisqu'elles n'avaient d'autre effet que de produire une force contre-électromotrice. Dans quelques-unes des premières machines Schuckert, ces portions inutiles occupaient plus de la moitié de l'induit. En réduisant les dimensions des pièces polaires, on trouva de quoi loger un inducteur à quatre pôles, et ce changement eut pour résultat de doubler, sans augmentation de vitesse, la puissance électrique du même anneau employé par Schuckert dans un champ bipolaire. L'attention s'est particulièrement portée sur la forme des pièces polaires. Dans les premières machines Schuckert, ces pièces polaires consistaient, comme on l'a vu précédemment, en des pièces creuses ou sabots en fer, qui occupaient une grande largeur angulaire sur le pourtour de l'anneau. On a longtemps employé dans les machines Gülcher des extensions polaires creuses, analogues. A la suite d'expériences prolongées, M. Mordey est arrivé à rétrécir les pièces polaires, et à ne pas leur faire couvrir plus de 30 degrés de largeur angulaire de la circonférence de l'induit, ce qui remédiait complètement aux inconvénients précédents. Comme on le voit sur la figure 346, qui représente la machine Victoria à quatre pôles de nouvelle construction, les pièces polaires, tout en embrassant l'anneau sur sa profondeur, de sa périphérie externe à son évidement interne, ne

¹ Une de ces machines est très complètement décrite dans le travail des D^{rs} J. et E. Hopkinson (*Phil. Trans.*, 1886).

sont plus tout à fait aussi étroites. On a pu arriver à ce résultat en changeant les proportions des dynamos, ce qui a réduit l'action inductive de l'induit. Les pièces polaires sont en fonte et serrées entre les noyaux inducteurs cylindriques de fer doux forgé qui reçoivent les bobines. L'induit de la machine Victoria a été plusieurs fois modifié ; son noyau actuel présente une section à peu près carrée. Il est formé de feuillard en fer au bois, roulé sur un robuste disque central ; le

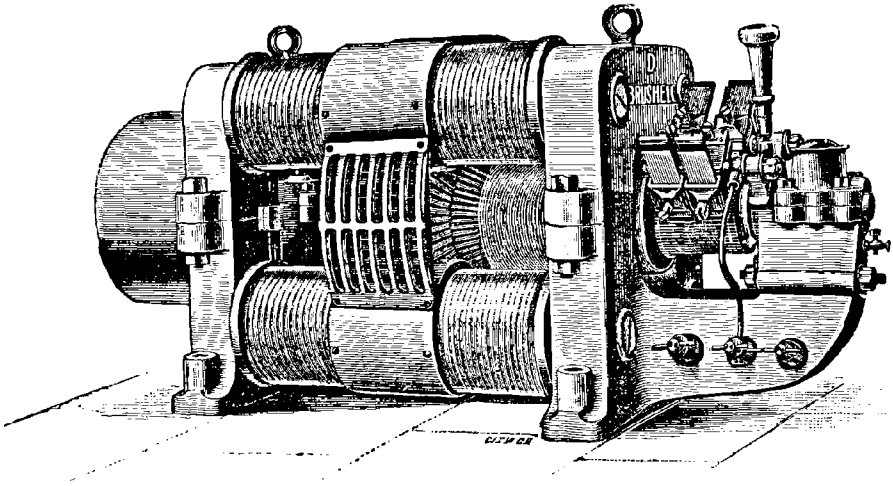


Fig. 346. — Machine « Victoria » (Schuckert-Mordey) de la
« Brush Electrical Engineering Co ».

contact entre les différentes couches de fer est prévenu par un bobinage de papier fait simultanément. On s'est spécialement attaché à empêcher la formation de circuits électriques par le boulonnage de ces noyaux ; chaque couche est soigneusement isolée de ses voisines. On a ainsi paré presque complètement au développement de courants parasites dans le noyau. Le disque qui sert de point d'appui au feuillard et quelques-unes de ses spires intérieures sont entaillés pour recevoir les bras de bronze, entre lesquels ils sont serrés de part et d'autre. La figure 347 montre cette construction et le moyen employé pour fixer l'anneau sur l'arbre à l'aide d'écrous et de contre-écrous. L'enroulement de l'induit est fait en fil de section carrée, et, comme les bobines élémentaires ne recouvrent pas toute la périphérie externe du noyau, la ventilation est très largement assurée. Le bobinage est fait d'un seul fil continu ; les croisements sont effectués à la périphérie externe. Le

jeu latéral est évité par l'emploi, à l'une des extrémités de l'arbre, d'un coussinet, profondément cannelé, à métal Babbitt. Au début, une

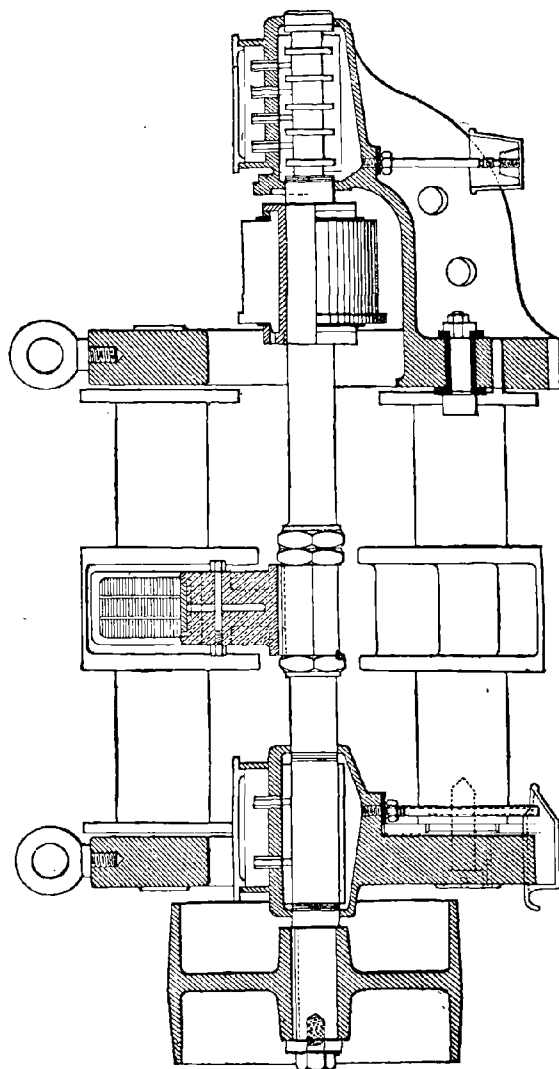


Fig. 347. — Machine « Victoria ». (Coupe en long montrant le mode de montage de l'anneau.)

machine à quatre pôles exigeait quatre babais, comme la machine Gülcher et la machine Gramme à quatre pôles. M. Mordey en réduit le nombre à deux, comme on l'a vu ci-dessus, en introduisant des con-

nexions transversales. Il ne faut plus, en conséquence, que deux balais, et ceux-ci sont disposés à 90 degrés l'un de l'autre.

La machine Victoria est ordinairement montée en compound ; les huit noyaux inducteurs ont tous des bobines en série à l'intérieur et des bobines en dérivation à l'extérieur ; les bobines en série, ou dans le circuit principal, donnent un nombre d'ampères-tours légèrement en excès sur ce qui est nécessaire, de manière à équilibrer exactement le potentiel sous toutes les charges. Voici les valeurs obtenues avec une machine « D² » bobinée pour un potentiel de 60 volts : — Circuit

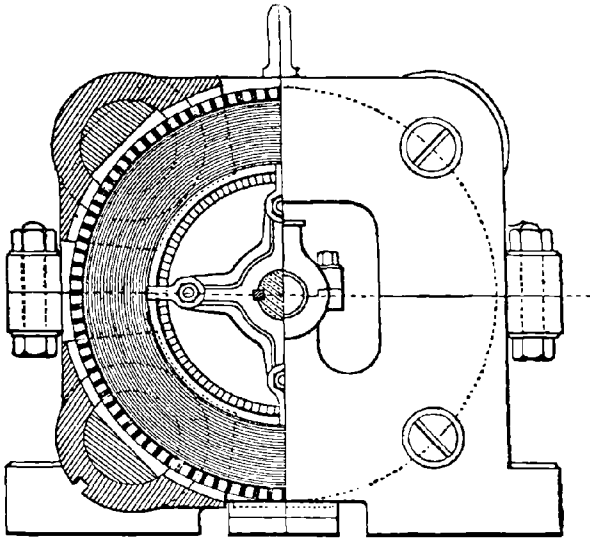


Fig. 348. — Machine « Victoria ». (Vue de bout et coupe en travers.)

ouvert, 58 volts ; 10 ampères, 58,5 volts ; 20 ampères, 59 volts ; 60 ampères, 59,7 volts ; 90 ampères, 59,9 volts ; 120 ampères, 60 volts. On voit que, pour de petites charges, le potentiel s'abaisse légèrement ; mais c'est dans ces conditions que la vitesse du moteur s'accélère ordinairement un peu dans la pratique, de sorte que la différence de potentiel entre les conducteurs principaux se maintient un peu plus constante que ne l'indiquent les chiffres. En fonctionnement courant la régulation est parfaite, parce que le surcompoundage aide à compenser la chute de potentiel dans les conducteurs principaux. L'Auteur a ouvert le circuit d'une machine Victoria alors qu'elle alimentait 101 lampes à incandescence, dont 100 à distance, et une reliée entre les bornes de la machine. Au moment où l'un des conduc-

teurs principaux fut détaché de sa borne, les 100 lampes s'éteignirent naturellement tout d'un coup. La lampe solitaire sur la machine ne broncha même pas et aucune étincelle n'apparut aux balais. La machine donnait si peu d'étincelles qu'il était impossible de dire si elle fonctionnait à circuit ouvert ou à pleine charge. Le décalage était le même pour toutes les charges. — La machine représentée par la figure 346 pèse 860 kilogrammes, et a une puissance de 18 000 watts à la vitesse de 1 000 tours par minute. Le fonctionnement de ces machines est aujourd'hui garanti dans les soumissions à un rendement commercial de 95 p. 100.

La Compagnie Brush a également construit un type plus grand de machine Victoria à six pôles alternés N. et S., montés autour de l'anneau. Chaque segment du collecteur étant relié à ceux situés à 120 et 240 degrés de distance sur son pourtour, il suffit de deux balais. On trouve une figure de cette machine dans la première édition française de cet ouvrage, page 131.

L'avantage revendiqué au début en faveur de l'anneau plat, c'est-à-dire une moindre longueur de fil laissée « inerte » à l'intérieur de l'anneau, est plus imaginaire que réel, en ce sens que la résistance totale de l'induit n'est qu'une faible fraction de la résistance d'ensemble du circuit. Il est d'ailleurs possible de donner au champ assez d'extension pour rendre actives toutes les parties du fil sans aucun autre gain, si cette extension n'amène pas d'augmentation dans le flux de force total. Les véritables raisons qui militent en faveur des induits multipolaires en anneaux plats paraissent être les suivantes : — d'abord leur excellente ventilation ; en second lieu la moindre tendance des bobines élémentaires à céder à l'action de la force centrifuge à des vitesses élevées ; enfin leur faible résistance, due à ce que les sections individuelles sont transversalement reliées en dérivation, soit aux balais, soit dans l'anneau même. On peut encore ajouter que, à vitesse périphérique égale, l'induit tournant entre quatre pôles est soumis à une induction double de celle qui agit sur lui quand il ne se meut qu'entre deux pôles, attendu qu'il coupe dans le premier cas un flux double par rapport au second.

Machine de la Compagnie Gülcher. — Dans cette machine telle qu'elle a été originairement produite, le noyau de l'anneau était constitué par un grand nombre de rondelles en tôle serrées l'une contre l'autre, tournant dans un champ créé par quatre pôles ; quatre balais captaient le courant au collecteur. Les pièces polaires étaient formées

par quatre pièces creuses, en forme de sabots, venues de fonte aux extrémités de noyaux en fer forgé et embrassant une largeur angulaire considérable de l'induit. Dans ces dernières années cette machine a été beaucoup améliorée par les ingénieurs de la « *Gülcher Electric Lighting Company* ». Ils ont suivi dans cette voie les mêmes errements que ceux qui ont guidé les perfectionnements apportés à la machine *Victoria*. Le fer de l'induit a été divisé *circulairement* et non plus radialement ; on a donné plus de puissance relative aux inducteurs ; la

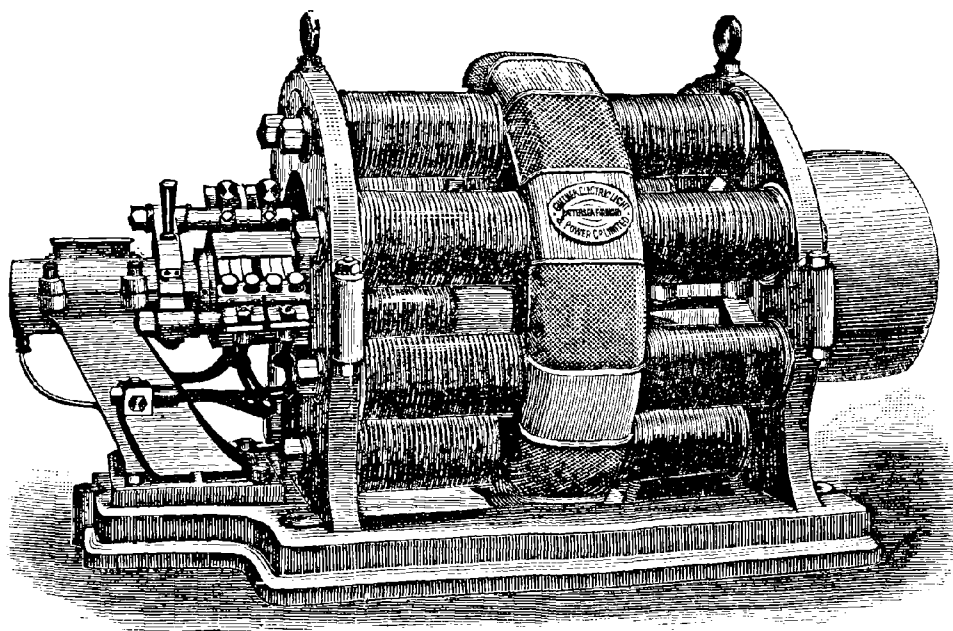


Fig. 349. — Machine Gülcher.

largeur angulaire des pièces polaires a été diminuée, et le nombre des balais réduit à deux au moyen de connexions transversales dans l'induit. La figure 349 représente un type à huit pôles, qui a été appliqué sur une grande échelle par cette Compagnie, tant pour l'éclairage que pour la galvanoplastie. Comme on le voit sur cette figure, l'induit est protégé contre la poussière par un revêtement métallique perforé. Ces machines ont été construites en toutes dimensions jusqu'à la puissance de 32 kilowatts.

Le type le plus récent de machine Gülcher est représenté dans les figures 350 et 351. La partie inférieure de la figure 350 montre une

section verticale suivant la ligne AC, tandis que la moitié supérieure donne une section oblique suivant la ligne AB de la figure 351, de manière à faire voir la section véritable des parties polaires. Les gra-

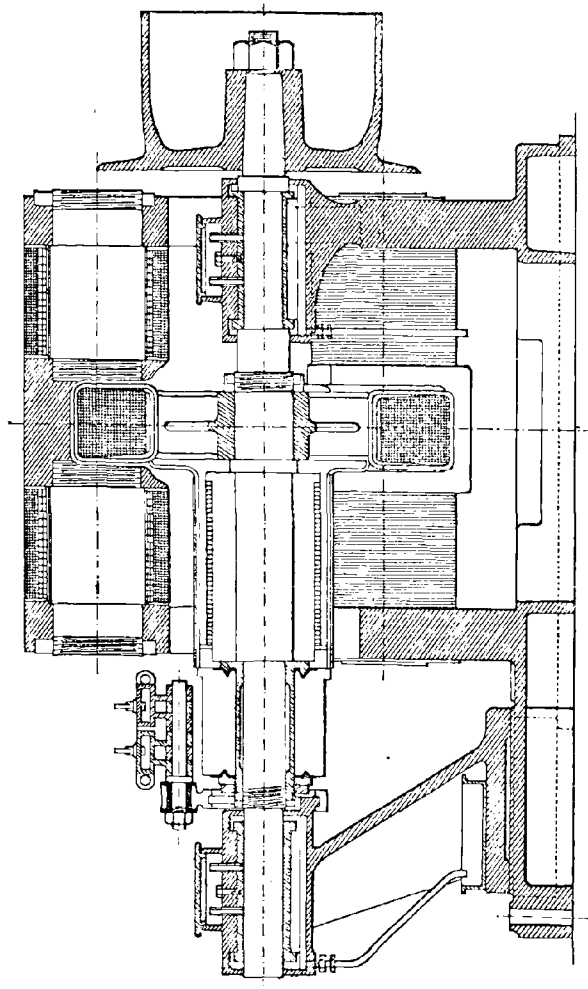


Fig. 350. — Machine Gülcher (1888). — Coupe en long.

vures se réfèrent à une machine à quatre pôles de 10 kilowatts, étudiée pour un débit de 185 ampères, sous 65 volts, à la vitesse de 900 tours par minute.

En voici les dimensions et les détails de construction : — Les flasques verticaux formant culasses et les sabots polaires sont en fonte. Les noyaux *inducteurs*, de 10 centimètres de diamètre et de 12,5 centimètres de long, sont fixés par des vis aux sabots polaires; à leurs autres extrémités ils sont soigneusement dressés et assujettis aux flasques par des boulons à embases, de manière à assurer une large surface de contact avec leurs culasses. L'*induit* est fait en fil de fer au bois à section rectangulaire, roulé sur un disque de bronze et formant un noyau de section à peu près carrée. Celui-ci est recouvert de fil de cuivre isolé, bobiné en 80 sections de quatre spires chacune; le fil, de section rectangulaire, de 3 millimètres sur 2 millimètres, est appliqué en une seule couche à l'extérieur et en deux couches à l'intérieur de l'anneau, qui, terminé, a 19,35 centimètres carrés de section et 38 centimètres de diamètre. Sa rési-

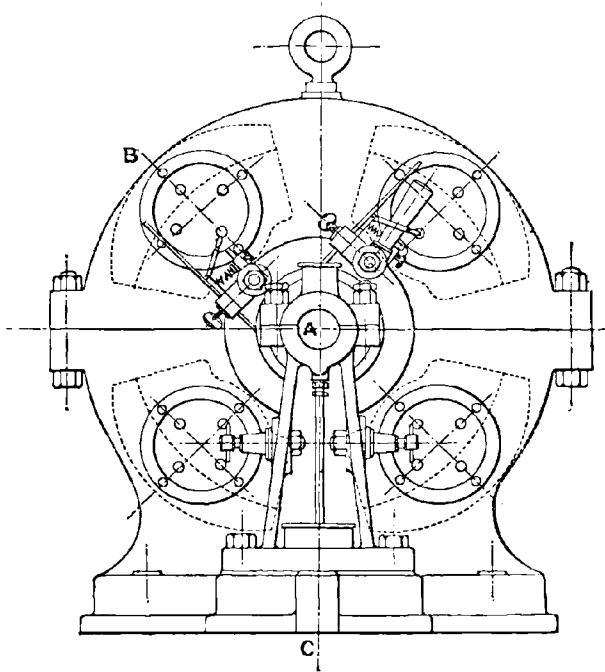


Fig. 351. — Machine Gülcher. (Vue de bout.)

stance est de 0,025 ohm, et le poids du cuivre, de 8,4 kilogrammes. Le collecteur a 80 segments, en cuivre étiré dur, isolés avec du mica de 0,75 millimètre d'épaisseur, serrés l'un contre l'autre sur une douille de bronze dont ils sont convenablement isolés. Les connexions transversales voulues entre les touches opposées du collecteur sont effectuées par une série de bagues de cuivre isolées, montées sur un manchon de bois placé entre l'induit et le collecteur. Chacune de ces bagues porte deux oreilles situées de part et d'autre et soudées aux fils qui vont des spires de l'anneau aux touches opposées du collec-

teur. La machine est montée en compound ; les *inducteurs* comportent les enroulements suivants : — Bobines en dérivation, fil de 2 millimètres de diamètre, 8 couches de 44 spires chacune sur chaque bobine ; poids total des 8 bobines en dérivation, 35 kilogrammes ; résistance totale des 8 bobines reliées en tension, 7,803 ohms. Bobines en série, fil rectangulaire, de 3,3 millimètres sur 6,6 millimètres, en deux couches de 14 spires chacune sur chaque noyau ; poids total des 8 bobines en série, 17,2 kilogrammes ; résistance totale de ces bobines en tension, 0,005 ohm.

Machine Rankin Kennedy. — Cet inventeur a donné le nom de machines « cuirassées » ou « blindées » aux types dans lesquels le fer de l'inducteur enveloppe les bobines excitatrices ¹. L'une de ces formes d'inducteur, mentionnée page 196, a quatre pôles, dont deux en saillie s'avancent directement entre les bobines excitatrices de chaque côté de l'induit, et les deux autres sont des pôles consécutifs formés au milieu des parties supérieure et inférieure du bâti en fer et alésés de manière à constituer les cavités polaires. — Un autre modèle ² de machine Kennedy, à une seule bobine excitatrice, ressemble à la figure 121.

Machines Siemens. — L'origine de ces machines remonte à MM. Siemens et Halske, de Berlin, qui en ont construit un grand nombre de modèles différents. Dans ces dernières années il s'est produit quelques divergences entre les types de Berlin et ceux adoptés par la maison Siemens frères, de Londres. Jusques il y a un an ou deux, le caractère distinctif de toutes ces machines, quel qu'en fût le type, était l'induit en tambour ; mais les machines actuelles de très grandes dimensions comportent des anneaux. Dans un certain nombre des anciens modèles Siemens, les noyaux de tambours étaient en bois recouvert circumférentiellement de fil de fer, avant le bobinage longitudinal de fil de cuivre. Dans d'autres, le noyau de fer était immobile, et le tambour creux tournait autour de lui. D'autres enfin ne comportaient comme fer dans l'induit que l'arbre d'entraînement. Dans tous les tambours modernes on emploie aujourd'hui des disques de tôle. Nous en avons donné au Chapitre XIII, pages 348 à 351, les divers modes de bobinage, et au Chapitre XII, pages 306 à 312, la théorie. L'ancien modèle horizontal de la machine Siemens est représenté

¹ Un premier type de dynamo « cuirassée » du même inventeur est décrit dans le journal « *Industries* », I. 137, 1886.

² Voir les données fournies par Jamieson en 1889 à l'« Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland », publiées par *The Electrician*, 1^{er} mars 1889.

figure 8, page 13. Il a été suivi vers 1880 par la forme verticale que représente la figure 352. Le noyau des inducteurs est constitué par des barres de fer forgé recourbées en arcs de cercle en leur milieu ; le circuit magnétique est double, avec pôles conséquents à droite et à gauche de l'induit. Les bobines sont enroulées sur des carcasses plates en tôle à joues de bronze que l'on glisse ensuite sur les noyaux.

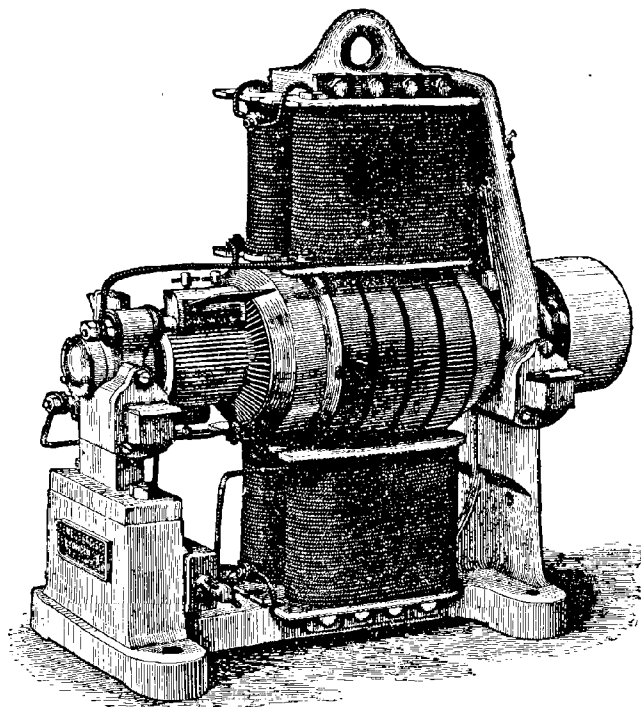


Fig. 352. — Machine Siemens (type vertical).

Dans certaines de ces machines on a pourvu à la ventilation en laissant un espace d'air entre les carcasses et les noyaux. Vers 1882 on a essayé différents modes de compoundage¹ ; dans quelques-uns les bobines en série et en dérivation étaient montées sur les mêmes noyaux ; dans d'autres, sur des branches différentes ; dans la pratique on mettait ordinairement les bobines en série extérieurement aux bobines en dérivation.

¹ Voir une série de travaux du D^r Frölich, publiés dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, mars à juin 1885.

Quelques très grandes machines du modèle vertical, mais bien améliorées dans les détails, y compris trois dynamos compound « B 13 » de 112 kilowatts, ont été mises en œuvre à l'Exposition des Inventions, à Londres, en 1885. Chacune d'elles était susceptible de fournir 450 ampères, sous une différence de potentiel de 250 volts, ce qui portait sa puissance à 112 500 watts, à la vitesse de 300 tours seulement par minute. Les induits en étaient enroulés avec du ruban de cuivre.

En 1886, MM. Siemens et Halske, après avoir essayé un certain nombre de formes intermédiaires, adoptèrent le type supérieur représenté par

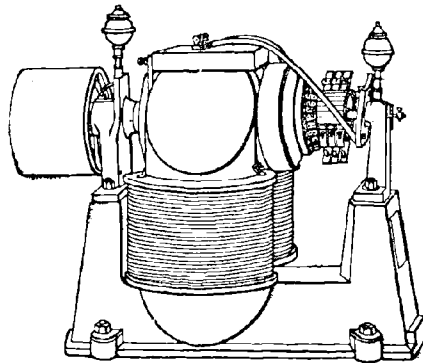


Fig. 353. — Machine Siemens (type de Berlin, 1886).

la figure 353. L'inducteur de cette machine est formé d'une seule masse compacte de fonte, sur laquelle sont glissées les bobines d'excitation. Les collecteurs de ces machines sont robustes et constitués par des touches de fer fixées par des vis à l'une de leurs extrémités seulement, de manière à être facilement remplaçables, et isolées par des intervalles d'air. Les balais sont réglables à volonté, et taillés à larges bouts obliques, de manière à toucher à la fois au moins deux lames du collecteur. La disposition du porte-balais employé dans les machines Siemens et Halske est donnée par la figure 283, page 372.

Cette maison construit des dynamos de ce type pour des puissances variant de 1,5 à 80 kilowatts ; les plus grandes ont une vitesse périphérique de 14 mètres par seconde.

La maison de Londres a construit, pour stations centrales d'éclairage, des machines à tambour beaucoup plus grandes, et notamment du type à anneau inférieur. La figure 354 représente une de ces machines, à enroulement compound, avec la bobine en série sur une seule des branches de l'inducteur. A l'Exposition navale de Londres, en 1891,

on a pu voir trois beaux spécimens de ces machines, de 180 kilowatts chacune, marchant à la faible vitesse de 350 tours par minute. L'induit a 60 centimètres de diamètre et 90 centimètres de long ; il pèse 2 440 kilogrammes ; le poids total de la machine est de 13 800 kilogrammes. Les conducteurs d'induit sont des torons de cuivre ; le collecteur à 144 segments, en cuivre étiré dur, isolés au mica, a 23 centimètres de long ; trois paires de balais captent les 1 500 ampères débités.

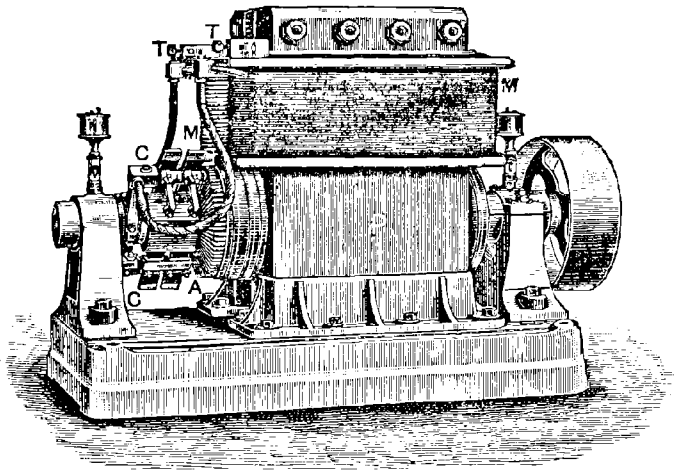


Fig. 354. — Machine Siemens (type de Londres, 1890).

Le collier de porte-balais se manœuvre par une vis de rappel qui permet de donner le calage convenable. L'induit comporte deux circuits indépendants, de 72 spires chacun, reliés ensuite parallèlement par les balais. Ceux-ci sont d'ailleurs assez épais pour porter à la fois sur trois touches consécutives du collecteur.

Vers la fin de 1886, une forme de machine multipolaire à anneau, avec inducteurs internes, fut presque simultanément produite par MM. Ganz, de Buda-Pesth, MM. Fein, de Stuttgart, et MM. Siemens et Halske, de Berlin¹. Il nous suffira de décrire les machines de cette dernière maison.

L'inducteur est, comme on le voit sur les figures 353 et 356, fixe et intérieur à l'anneau. Dans les petites machines, il est constitué par une

¹ Pour plus amples détails sur les diverses machines de ce type, voir l'*Elektrotechnische Zeitschrift* d'avril et mai 1887 ; *La Lumière électrique*, XXIV. 182, 1887 ; le *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 186, 410 et 581, 1887.

masse de fonte en forme de croix, dont le centre est traversé par l'arbre. Après avoir été garnis des bobines excitatrices, les quatre pôles sont munis d'épanouissements polaires qui arrivent très près de l'intérieur

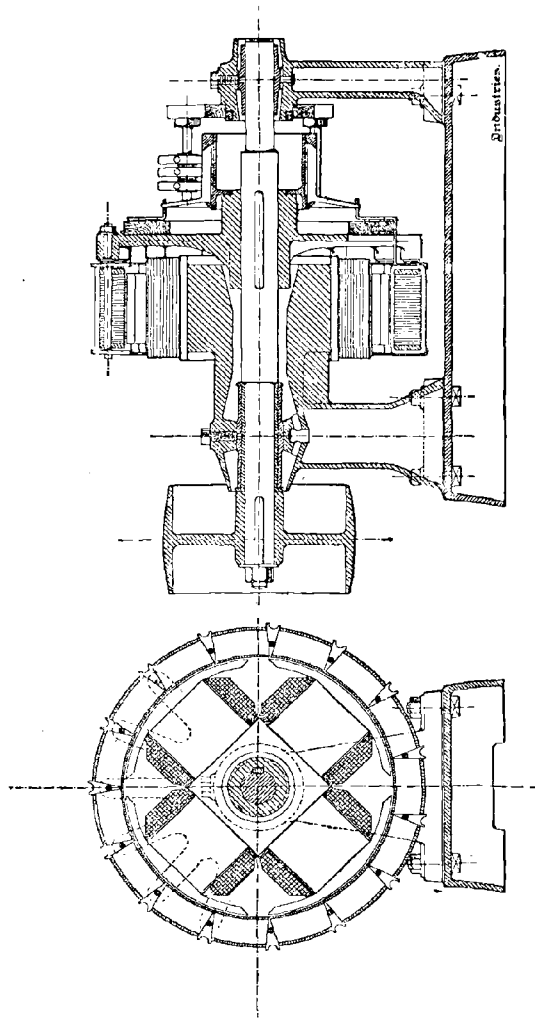


Fig. 355 et 356. — Machine Siemens et Halske, à anneau et à pôles internes.

de l'anneau. L'anneau lui-même est fait de rondelles de tôle mince, boulonnées ensemble, et supporté d'un seul côté par une étoile de bronze clavetée sur l'arbre. Une machine de ce type, pesant 1200 kilo-

grammes, et d'une puissance de 25 000 watts à 480 tours par minute, a un anneau de 20 centimètres de large et de 64 centimètres de diamètre intérieur. Les avantages de ce type de machine résident dans la facilité des réparations, la surface considérable de refroidissement de l'induit, et la suppression des frettes devenues inutiles. Dans les premières machines de ce genre le collecteur était creux et formé de fortes lames de fer isolées à l'air. Dans les machines plus grandes, il n'y a plus de collecteur spécial; les balais portent directement sur la périphérie de l'anneau lui-même.

De puissantes machines de ce type fonctionnent dans les principales stations centrales¹ d'éclairage de Berlin et autres villes d'Allemagne. Les plus importantes sont jusqu'ici celles de la station de la « Span-dauerstrasse » de Berlin. La figure 337 en donne une vue en perspective. Les dynamos sont directement attelées sur les deux extrémités de l'arbre de commande d'une énorme machine marine compound, à condensation, de la maison Kerchove et C^o, de Ghent, qui a 1,65 mètre de course, avec des cylindres de 0,75 mètre et de 1,35 mètre de diamètres respectifs, et fournit 1 180 chevaux indiqués, ou 1 000 chevaux effectifs, à la vitesse de 75 tours par minute. Chacune de ces machines peut donner 2 000 ampères sous 140 volts, à une vitesse de 60 tours seulement par minute. L'inducteur comporte 10 pôles en saillie à noyaux rectangulaires fixés sur une culasse cylindrique, soutenue elle-même par un support en forme d'U relié au palier. Toutes les bobines d'excitation sont couplées en série l'une sur l'autre, et montées en dérivation sur l'induit. Le noyau d'induit est formé de disques montés sur des bras isolés qui partent d'une étoile centrale et est ainsi en porte-à-faux au-dessus de l'inducteur. La figure 257, page 347, montre le détail de la construction. L'enroulement est, comme l'indique la figure, fait extérieurement de barres de cuivre droites, réunies par d'autres pièces recourbées qui passent à l'intérieur de l'anneau, de l'extrémité d'une barre droite au commencement de la suivante, ce qui constitue une série de spires et un enroulement sans fin. Les balais collecteurs portent sur les barres extérieures, comme on le voit sur la vue en perspective, figure 357. Le diamètre extérieur de l'induit, qui sert ainsi de collecteur, est de 2,743 mètres. Les porte-balais sont montés sur un collier en étoile, qui permet de les déplacer tous simultanément en avant ou en arrière au

¹ Voir *Die Berliner Elektrizitäts-Werke*, par Arthur Wilke, Berlin, 1891; ainsi que des articles dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, X, 479 et 563, 1889; XI, 53 1890; *La Lumière électrique*, XXXVI, 441, 1890; et l'*Electrical World*, XVII, 14, 1891.

moyen d'une vis sans fin engrenant une roue dentée figure 357. Les balais peuvent également être mis tous en même temps hors contact à l'aide d'un levier relié par des tiges de connexion à une autre pièce en étoile. Leur construction est indiquée dans la figure 283, page 372. La

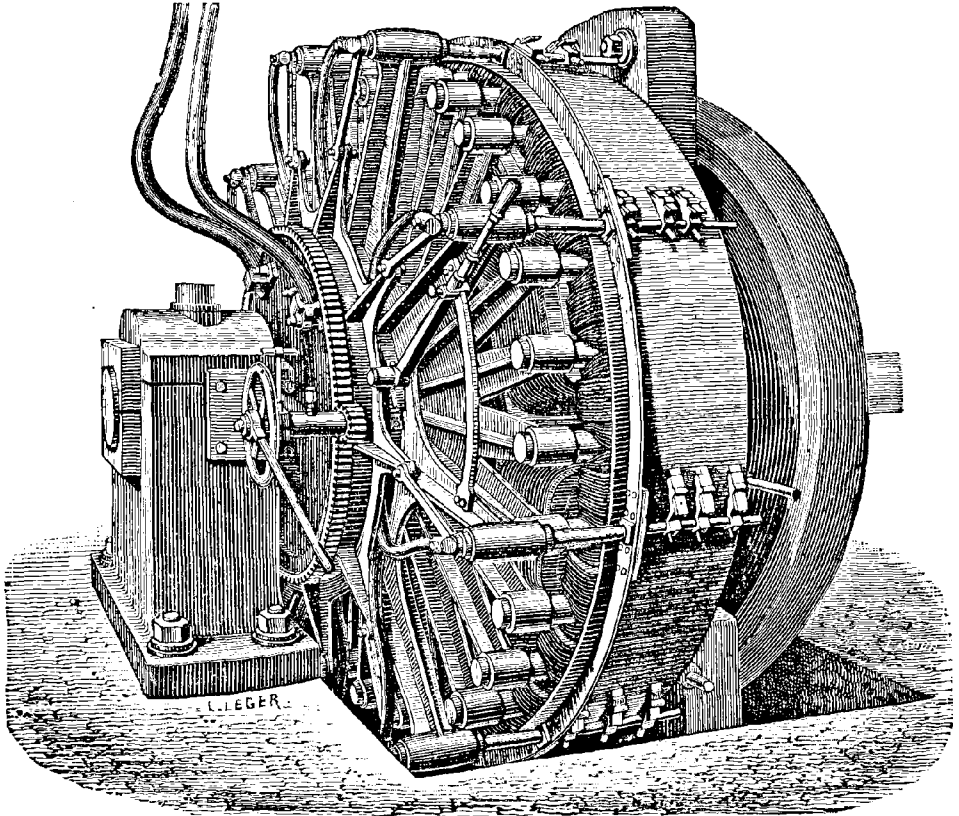


Fig. 357. — (Siemens et Halske.) Machine à pôles internes pour stations centrales.

station de la Spandauerstrasse est pourvue de quatre machines à vapeur du type ci-dessus, de 1000 chevaux, actionnant chacune deux dynamos qui alimentent ensemble 40 000 à 50 000 lampes. A la station de la « Markgrafenstrasse » se trouvent quatre dynamos simples directement attelées chacune sur une machine à vapeur de 400 chevaux. Celle de la « Mauerstrasse » comporte trois dynamos sur moteurs doubles de 1 000 chevaux, et deux sur moteurs simples de 400 chevaux chacun. Enfin, à la station nouvelle de « Schiffbaudamm », on voit six moteurs à doubles dynamos, de 1 000 chevaux chacun.

A l'exposition de Francfort, en 1891, se trouvait une machine semblable¹ actionnée directement par une machine à condensation à triple expansion, de la maison Kuhn, de Stuttgart; elle avait une puissance de 330 kilowatts, correspondant à 2 200 ampères sous 150 volts, à la vitesse de 65 tours par minute. L'inducteur de cette machine avait 10 pôles et 2,72 mètres de diamètre. Le diamètre extérieur de l'anneau était de 3,10 mètres; il était revêtu de 810 spires formées de barres de cuivre de 1 centimètre de large environ, avec isolation au papier. Il y avait dix jeux de balais, à trois par jeu; chacun de ces balais, formé de fil rectangulaire, avait 4,5 centimètres de large. L'étoile supportant l'induit en porte-à-faux était en fonte, avec 30 branches soutenant les disques de noyau par l'entremise de 30 boulons d'acier isolés. Pour la captation des courants, les cinq jeux de balais positifs sont reliés ensemble; il en est de même des cinq jeux de balais négatifs; ces courants sont amenés aux conducteurs principaux par des câbles flexibles. A la vitesse de 100 tours par minute, la machine atteint une puissance de 600 kilowatts.

Machines Edison. — En 1879, après avoir proposé comme génératrice un modèle bizarre de machine dans laquelle des bobines inductrices étaient suspendues à l'extrémité des dents d'une gigantesque fourchette oscillante, M. Edison produisit, avec l'aide de M. Upton, la machine représentée par la figure 358. Elle se compose d'un induit en tambour tournant entre de lourdes pièces polaires excitées par un électro-aimant très allongé dont les branches forment deux grandes colonnes. Le modèle « Z » de cette machine était capable d'alimenter 30 lampes Edison.

Dans les induits Edison le nombre des sections du bobinage est impair. Les premières machines comportaient sept bobines élémentaires, comme on le voit sur la figure 207, page 307, relevée sur la spécification du brevet anglais Edison. Dans sa grande « dynamo à vapeur » de 1881, le nombre des sections était de 49. L'une des conséquences de cette particularité de construction est que, si les balais sont diamétralement opposés l'un à l'autre, l'un d'eux touche le milieu d'une lame du collecteur à l'instant où l'autre passe d'une lame à l'autre. Dans les machines Edison de plus grandes dimensions l'induit est recouvert de barres de cuivre; le mode de liaison de leurs extrémités, au moyen de rondelles de cuivre, est décrit page 332. Dans les machines plus grandes,

¹ Voir la description donnée par Esson dans *l'Electrical Review*, XXIX. 342, 1891.

le système inducteur était constitué par deux ou plusieurs jeux de longues colonnes semblables à celles de la figure 358, assemblées côte à côte, au-dessus d'un induit de longueur double ou triple. Une machine Edison

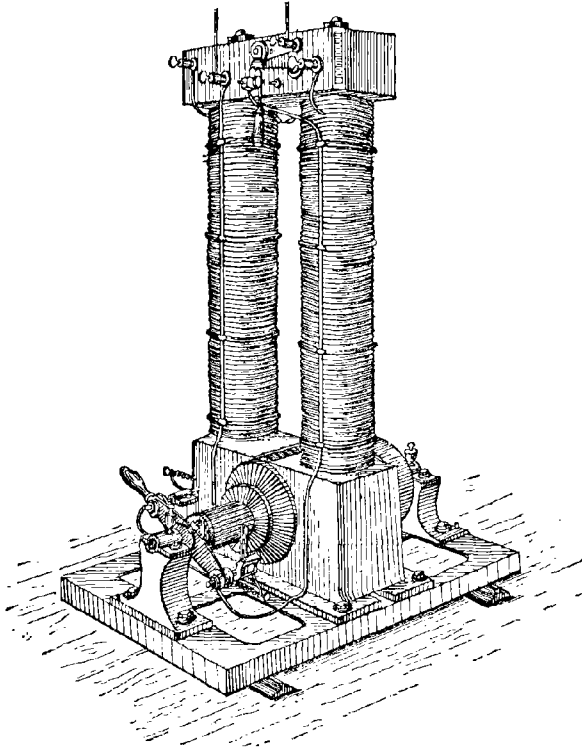


Fig. 358. — Machine Edison, type « Z » (1881).

« Z » de 60 lampes, ancien modèle, essayée par le Comité de l'Exposition de Munich, a présenté à l'épreuve un rendement qui, mesuré par le rapport de la puissance électrique extérieure à la puissance électrique totale, dépassait 87 p. 100; mais son rendement commercial, ou rapport de la puissance électrique fournie extérieurement à la puissance mécanique transmise par la courroie, n'excédait pas 58,7 p. 100. Cette infériorité était due à l'absorption d'une grande quantité d'énergie par le développement de courants parasites dans les boulons d'assemblage de l'induit et autres masses métalliques. Les « dynamos à vapeur *Jumbo* » avaient un rendement encore moindre et leur refroidissement exigeait

un ventilateur fixé sur l'arbre et absorbant 4 chevaux, qui y forçait un courant d'air.

Les efforts du D^r J. Hopkinson pour améliorer cette machine aboutirent, comme on va le voir, à une meilleure conception.

Les inducteurs de toutes les grandes machines élucubrées par Edison avant 1884 comportaient comme noyaux, ainsi qu'on l'a vu ci-dessus, un certain nombre de longues colonnes de fer destinées à recevoir les bobines. Depuis cette date, les Compagnies Edison ont adopté, des deux côtés de l'Atlantique, la disposition plus compacte d'un circuit magnétique unique avec inducteurs gros et courts. La forme ordinaire (type de 1888) de la machine Edison, telle qu'elle est employée aux

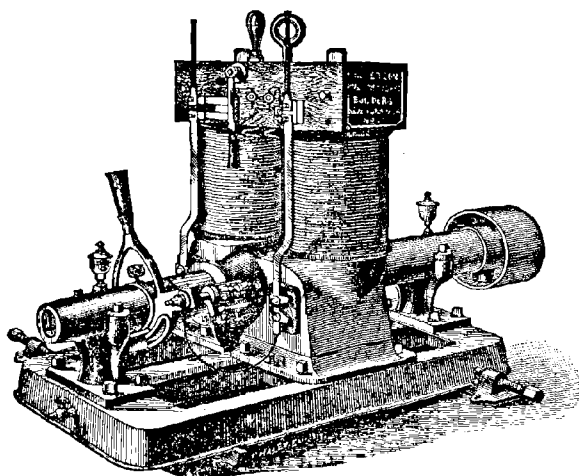


Fig. 359. — Machine Edison (type 1888).

Etats-Unis, est représentée par la figure 359. Les noyaux inducteurs sont en fonte, avec culasse massive, et supportés par une embase en zinc élevée, destinée à diminuer la dérivation magnétique par le socle. Ces machines sont montées en dérivation et établies pour l'éclairage à incandescence. Les paliers sont plus longs et la construction mécanique est à tous égards supérieure à celle des anciennes machines.

A l'Exposition universelle de Paris, en 1889, on voyait un grand nombre de machines construites par l'« Edison Machine Company », de Schenectady, et établies en une série croissante depuis une petite dynamo de 2,5 kilowatts, de 38 centimètres de haut, jusqu'à une grande de 150 kilowatts, de 2,60 mètres de haut. Cette dernière machine est

capable de fournir 1 250 ampères sous 140 volts, à la vitesse de 250 tours par minute. Son collecteur se compose de 44 touches et son induit de 82 barres de cuivre. Elle comporte deux jeux de six balais, chacun d'eux ayant 4,775 centimètres de large sur 1,575 centimètre d'épaisseur. Son poids est de 12 700 kilogrammes.

Quelques renseignements publiés en 1890 par M. Minet¹ relativement à plusieurs de ces machines montrent que les vitesses varient de 2 000 tours par minute pour celle de 2,5 kilowatts à 800 tours pour celle de 45 kilowatts. Quant aux vitesses tangentielles elles varient de 12,5 à 14 mètres par seconde. La valeur moyenne de \mathfrak{B} dans l'entrefer est de 3 200 à 4 100 unités C. G. S. Le rendement brut des plus grandes machines était d'environ 95,6 p. 100 ; le rendement électrique, de 93,8 ; et le rendement net de 89,7 p. 100 environ.

Depuis son retour d'Europe en 1889, M. Edison a étudié de plus grandes machines multipolaires directement actionnées par des machines à vapeur verticales à triple expansion. Deux dynamos de 100 kilowatts chacune² sont ainsi attelées aux deux extrémités de l'arbre à manivelle d'une machine à vapeur, exactement comme les grandes machines de Berlin. La machine à vapeur a une puissance de 300 chevaux à 170 tours par minute. Les inducteurs sont extérieurs, avec huit pôles consécutifs, et l'induit est enroulé en anneau. Les conducteurs sont formés de barres droites sur une des faces de l'anneau et reliés les uns aux autres en un bobinage continu par des pièces conformées en U à l'intérieur. Les barres droites servent en même temps de collecteur sur lequel frottent les huit jeux de balais. L'anneau comporte 944 spires, et, comme les jeux de balais sont reliés ensemble de deux en deux, il y a en réalité huit séries de 116 spires chacune reliées en parallèle. Chaque dynamo donne 666 ampères sous 150 volts. La résistance de l'induit est de 0,006 ohm ; celle des bobines inductrices, de 8,45 ohms.

Les figures 360 et 361 représentent des machines du même type, de plus petites dimensions ; chacune d'elles a une puissance de 75 kilowatts. La nouvelle station centrale de New-York sera montée avec 14 groupes de ce genre, chacun d'eux comprenant deux dynamos de 400 kilowatts l'une. Elle sera par conséquent analogue aux stations centrales européennes, et absolument différente du type général des stations américaines dont le caractère le plus particulier est l'emploi du cuir, un grand nombre de petites dynamos étant actionnées par des

¹ *La Lumière électrique*, XXXV, 401, 1890.

² Voir *Electrical Engineer* (N.-Y.), XI, 489, 1891.

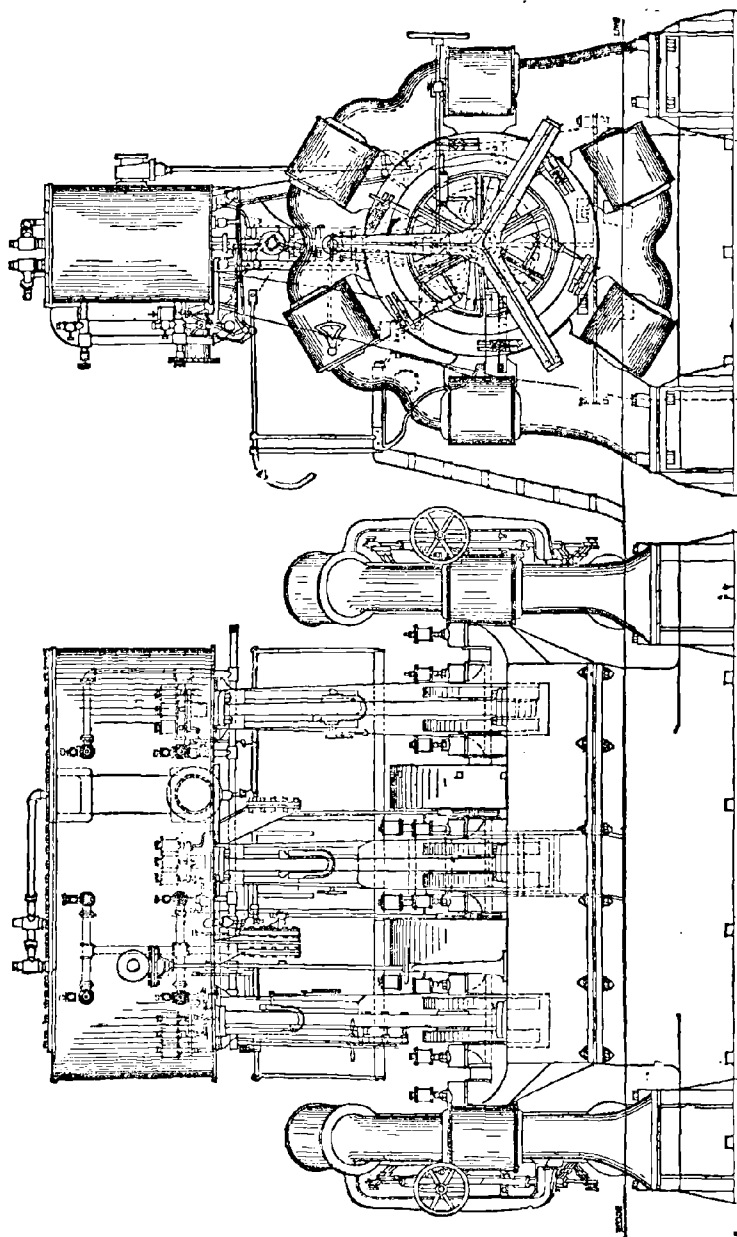


Fig. 360 et 361. — Machines multipolaires de l'Edison General Electric C^o.
Floor Line = Niveau du sol.

courroies qui reçoivent le mouvement d'un arbre et de poulies intermédiaires.

Machines Edison-Hopkinson. — La machine Edison s'est considé-

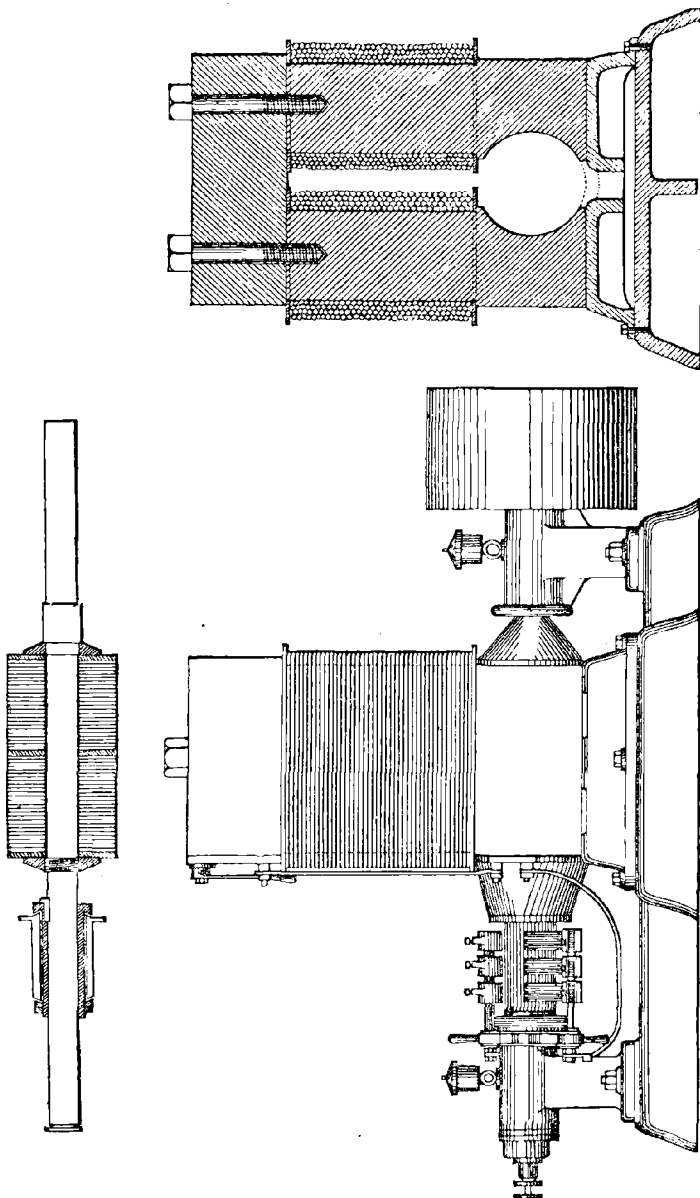


Fig. 362, 363 et 364. — Machine Edison-Hopkinson (Élévation, Coupe en travers, et Coupe de l'induit).

ramblement améliorée entre les mains du D^r John Hopkinson. Parmi les perfectionnements qu'elle a reçus, les uns portent sur l'inducteur, les

autres sur l'induit. Le Dr Hopkinson supprima tout d'abord l'emploi des inducteurs multiples qui, dans les machines originales d'Edison, types « L », « K » et « E », aboutissaient à des pièces polaires communes ; et, au lieu de recourir à deux ou trois colonnes en fer ou même davantage, individuellement recouvertes de fil, il réunit une même quantité de fer en une seule pièce massive, de section beaucoup plus grande et de longueur moindre. Chacune de ces masses de fer, de section généralement oblongue, est solidement fixée à l'une des pièces polaires, et elles sont réunies à la partie supérieure par une culasse de fer encore plus lourde. Les machines ont, par suite, un aspect plus ramassé et plus compacte que précédemment (fig. 362 à 364). Le Dr Hopkinson améliora aussi le bobinage des inducteurs en employant du fil de cuivre de section carrée, revêtu d'un ruban isolant. Ce fil se loge autour des noyaux de fer avec moins de place perdue qu'un fil rond ordinaire. Quant à l'induit, il a subi les modifications suivantes : — Dans les anciennes machines Edison le noyau était formé de disques de tôle mince, séparés par du papier, glissés sur un manchon de gaïac, assemblés par six boulons longitudinaux passant à travers des trous réservés dans les disques d'induit, et serrés par des écrous entre deux rondelles extrêmes. Ces boulons sont maintenant supprimés et les disques du noyau sont pressés entre deux grandes rondelles vissées sur un filet pratiqué sur l'arbre de la machine. Le diamètre du trou central des disques a été diminué, ce qui laisse plus de fer à l'intérieur et offre une plus grande section à l'induction magnétique. Grâce à ces perfectionnements, une machine occupant sur sol la même surface, et à peu près du même poids qu'une des anciennes dynamos « L » de 150 lampes, a été mise en état d'alimenter 250 lampes, avec un coefficient économique en même temps plus élevé. Dans la nouvelle machine de 250 lampes, l'induit a 25,4 centimètres de diamètre ; sa résistance (à froid) est de 0,02 ohm ; celle de l'inducteur, de 17 ohms. La courbe d'aimantation de la machine montre que, même à pleine charge, l'inducteur est loin d'être saturé. On remarquera que, dans l'ancien mode de construction, les boulons et les plateaux terminaux auxquels ils étaient fixés formaient un circuit dans lequel circulaient constamment des courants parasites qui absorbaient de l'énergie et, comme conséquence, développaient de la chaleur et étaient une cause de perte.

Il a été publié en 1886¹ une remarquable et très complète étude de

¹ Voir le travail des Drs J. et E. Hopkinson « *Dynamo-electric Machinery* » dans les *Philosophical Transactions* pour 1886, 1^{re} partie. Ce très remarquable travail a

ces dynamos, construites par MM. Mather et Platt. Comme il est souvent fait allusion à cette machine dans les chapitres théoriques de cet ouvrage, il est important d'en connaître tous les détails ; nous les complétons ci-après. Les figures 362, 363 et 364 permettent d'ailleurs de se faire une idée générale de son ensemble.

La machine ici décrite est établie en vue d'un débit normal de 320 ampères sous une tension de 105 volts, à la vitesse de 750 tours par minute. L'inducteur est formé de deux branches reliées par une culasse de section rectangulaire. Chaque branche, y compris sa pièce polaire, est forgée d'un seul bloc. La matière qui les constitue est du fer de ferraille martelé et recuit, dont les qualités magnétiques sont celles spécifiées au Chapitre VI. La section des branches est rectangulaire avec angles arrondis. La culasse est boulonnée sur ces montants, les joints de contact soigneusement dressés. La plaque de fondation est en fer, mais séparée des pièces polaires par l'interposition d'un socle de zinc de 12,7 centimètres de haut. Le noyau d'induit est formé de 1 000 disques environ de tôle douce recuite, très mince, isolés de l'arbre et séparés les uns des autres par du papier. Ils sont maintenus entre deux plaques terminales dont l'une porte sur un épaulement pratiqué sur l'arbre et l'autre est serrée par un écrou et un contre-écrou.

Toutes les dimensions en ont été données page 399 ; il suffira de rappeler que la section réelle des pièces polaires est de 1 500 centimètres carrés pour chacune ; leur section efficace, de 1 600 centimètres carrés ; celle des branches d'inducteur, de 980 centimètres carrés ; et celle de la culasse, de 1 135 centimètres carrés.

Voici d'ailleurs les constantes des enroulements : — bobines magnétisantes, 41 couches sur chaque branche, fil de cuivre de 2,413 millimètres de diamètre. Nombre total de spires 3 260 ; longueur totale, 4 370 mètres. — Induit, 40 spires en deux couches de 20 spires, formées de fil toronné composé de 16 brins de fil de 1,753 millimètre de diamètre. — Résistances (à 13°, 5 C.) : inducteur, 16,93 ohms ; induit, 0,009947 ohm. — Courant normal d'aimantation, 6 ampères. — Collecteur à 40 touches isolées au mica.

Des épreuves récentes faites sur des machines Edison-Hopkinson construites par MM. Mather et Platt, de Manchester, indiquent qu'elles ont un coefficient économique qui dépasse 95 p. 100, et un rendement commercial réel supérieur à 93 p. 100. Ces machines ont ordinairement, de chaque côté, de deux à cinq balais distincts, susceptibles d'être enlevés séparément, ce qui permet de les retailler sans arrêter la machine. Pour amener les points neutres du collecteur dans

été réimprimé, mais sans les planches, dans l'*Electrical Review*, XVIII. 1886. Il a été reproduit également par *The Electrician*, XVIII. 39, 63, 86, et 175, dans les numéros des 19 et 26 nov., et 3 et 31 déc. 1886, avec les figures des planches intercalées dans le texte.

les positions commodes de droite et de gauche, les connexions qui

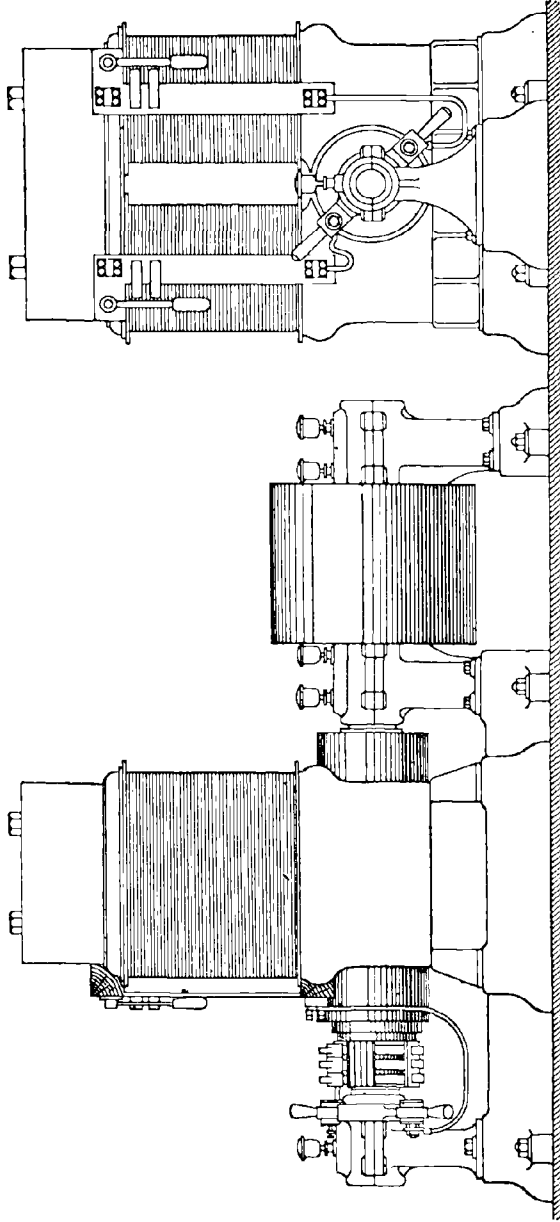


Fig. 365 et 366. — Génératrices Edison-Hopkinson du chemin de fer électrique « City and South London ».

relient les touches du collecteur aux fils de l'induit sont déviées spira-

lement de 90°. Les constructeurs de ces dynamos ont modifié dans leurs détails les enroulements des induits ¹, ce qui leur permet d'employer des barres de cuivre au lieu de torons de fils. Ils conforment les pièces polaires de manière à diminuer la torsion du champ magnétique et relient les barres de l'induit à travers ses bases au moyen de connexions en spirale sur deux couches, semblables à celles employées dans les machines Siemens pour électrométallurgie.

Les figures 365 et 366 représentent les grandes machines de 225 kilowatts construites par MM. Mather et Platt pour le « South London Electric Railway ». Elles ont une puissance maximum de 450 ampères sous 500 volts à la vitesse de 500 tours par minute. Les branches et la culasse de l'inducteur sont en fer forgé ; les masses polaires, en fonte. Les conducteurs de l'induit sont des barres de cuivre et sa résistance de balai à balai est de 0,017 ohm. Celle des bobines inductrices en dérivation est de 96 ohms ; et celle des bobines en série, de 0,015 ohm. L'enroulement compound n'est cependant pas d'une grande utilité avec des charges aussi rapidement variables que celles d'un service de chemin de fer ; avec des inducteurs aussi massifs, les changements d'aimantation ne peuvent, en effet, s'effectuer assez vite. Les poids respectifs sont : pour les inducteurs et les pièces polaires, de 8 600 kilogrammes ; pour la culasse, de 3 200 kilogrammes ; et pour l'induit, de 2 900 kilogrammes. Chaque machine complète pèse, avec sa plaque de fondation, 17 275 kilogrammes.

On a publié quelques épreuves de rendement faites sur une machine compound Edison-Hopkinson de 53 kilowatts, directement actionnée à 430 tours par minute par un moteur Willans ² : — Puissance absorbée indiquée 85,3 chevaux ; puissance électrique fournie 475 ampères sous 110 volts, ou 52,2 kilowatts, ou 70,9 chevaux ; ce qui correspond à un rendement net de 83,3 p. 100. Le rendement électrique était réellement de 96 p. 100, les pertes électriques n'étant que de 3 p. 100, tandis que celles dues aux frottements dans le moteur et la dynamo atteignaient 10 p. 100.

Machines Schuckert. — L'induit de la machine Schuckert originale était un anneau plat, dont le noyau était formé d'un grand nombre de disques en tôle mince. L'enroulement était identique à celui de la machine Gramme, et les inducteurs ressemblaient, comme aspect général, au modèle typique de Gramme. L'anneau était presque entière-

¹ Voir *Industries*, II. 549, 1887 ; et Brevet anglais, 4884 de 1886.

² *The Electrician*, XXV. 707, 1890.

ment enveloppé par de larges pièces polaires qui en recouvraient chacune à peu près la moitié. Le modèle ordinaire de cette machine est représenté par la figure 367 qui montre comment le bâti permet d'enlever l'induit. Dans ces dernières années, MM. Schuckert et C^{ie} (de Nuremberg) ont produit de nombreux types modifiés de leurs machines, en conservant néanmoins dans toutes l'induit en anneau

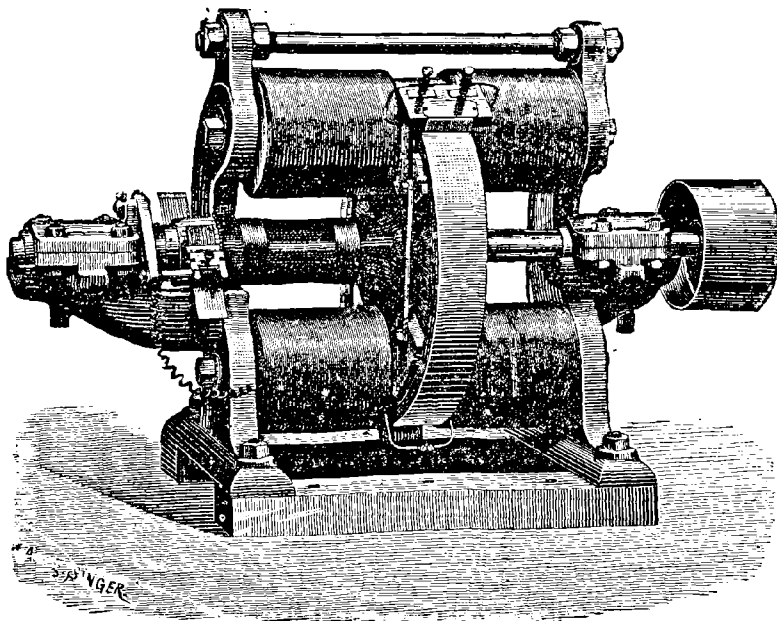


Fig. 367. — Machine Schuckert, à anneau plat.

plat. Les noyaux d'induits en sont faits aujourd'hui de feuillard isolé au papier, bobiné sur une rondelle de laiton qui lui sert de point d'appui. Les petits types seuls comportent deux pôles ; au-dessus de 12 kilowatts toutes les machines sont multipolaires. Comme dans la plupart des machines allemandes, les inducteurs sont en fonte, les touches des collecteurs isolés au papier, et leur liaison avec les fils de l'induit assurée par des vis. A l'Exposition de Francfort de 1891 on voyait un grand nombre de ces machines ¹, dont la plus belle était une grande dynamo multipolaire, à attelage direct, d'une capacité reconnue de 230 kilowatts par 1 000 ampères sous 230 volts et absorbant 320 che-

¹ Voir un article d'Esson dans l'*Electrical Review*, XXIX. 526, 1891.

vauX à la vitesse de 160 tours par minute. Cette machine dépassait de 2,40 m. environ le sol dans lequel elle était en outre engagée sur une profondeur de 90 centimètres à peu près. L'anneau avait 2,40 m. de diamètre ; il était enroulé de 1 120 spires de fil multiple tressé ; la section transversale du fer était de 680 centimètres carrés. Le collecteur avait 1,50 m. de diamètre et était formé de 500 segments reliés transversalement de manière à réduire le nombre des balais. La résistance de l'induit était de 0,006 ohm ; celle des spires inductrices, de 7,4 ohms. La machine avait 14 pôles et le bobinage de l'induit était fait en 14 groupes de 80 spires chacun, tous reliés en parallèle. Les pôles inducteurs partant d'une enveloppe extérieure en fonte, divisée horizontalement, se projettent vers l'intérieur. Un coussinet à cannelures, soutenu par un support extérieur, limite le jeu latéral. Cette machine est munie de quatre porte-balais, deux positifs et deux négatifs, portant chacun trois balais de 5 centimètres de large, ce qui donne une largeur totale de 30 centimètres pour capter 1 000 ampères. Une machine à 16 pôles, encore plus grande, fonctionne à la station centrale de Dusseldorf.

Machines Goolden. — La maison W. T. Goolden et C^e construit depuis longtemps d'excellentes dynamos. Nous avons déjà fait allusion aux calculs de M. Ravenshaw sur les dessins duquel elles ont été construites ; nous avons signalé page 381 leurs paliers à bagues mobiles ; page 372 leurs balais à vis de rappel ; et page 342 leurs coins d'entraînement en fibre.

Les grandes machines Goolden ont des induits à barres rectangulaires, formées de bandes de cuivre disposées en lames droites ou tordues ensemble, et légèrement huilées. Les petites sont bobinées de fil rond isolé à la soie. La figure 368 représente une machine de 61 kilowatts du type supérieur, actionnée directement, à raison de 460 tours par minute, par un moteur Willans, en un groupe très fréquemment employé en Angleterre dans les stations centrales. Les branches d'électros et leurs pièces polaires sont en fer forgé. L'alésage des pièces polaires est elliptique de manière à laisser un plus grand entrefer au-dessous de l'induit qu'au-dessus et à contre-balancer ainsi l'attraction magnétique. Les disques du noyau, en fer au bois, sont emboîtés sur un manchon à ailettes, en bronze. Les barres conductrices sont entraînées par 80 à 100 coins en fibre, forcés comme des clavettes à la périphérie du noyau. Elles sont reliées à leurs extrémités par des connecteurs faits de plaques de cuivre estampées en spirales. D'un bout elles sont

reliées rigidement aux segments du collecteur ; de l'autre, elles sont supportées par une bague de laiton isolée qui leur permet de se dilater longitudinalement quand elles viennent à s'échauffer. Le collecteur est

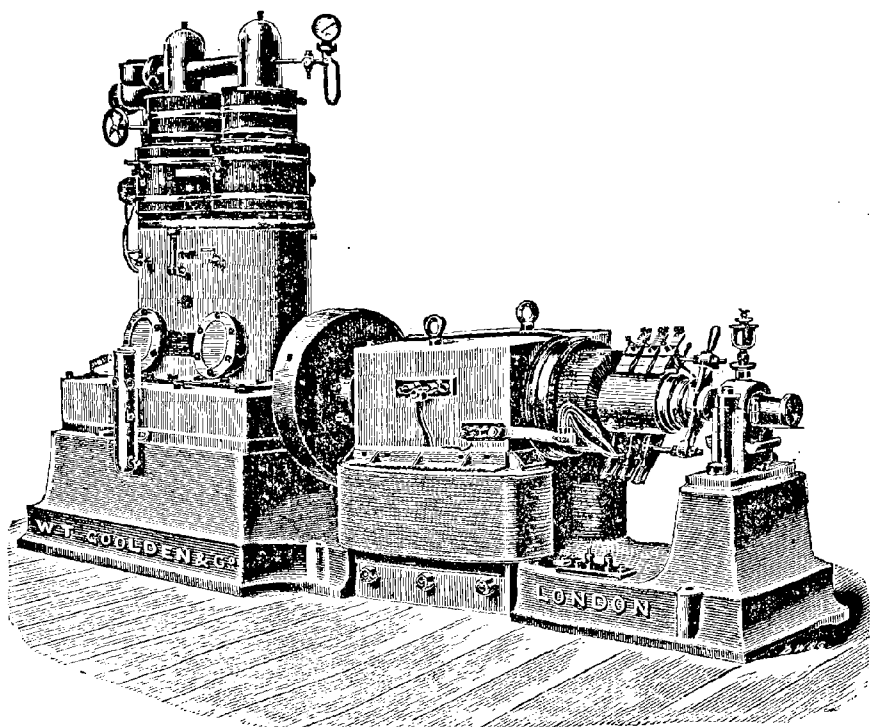


Fig. 368. — Machine Golden et Moteur Willans.

en cuivre dur étiré, isolé au mica ; il est monté sur une douille spéciale clavetée sur l'arbre. Nous donnons ci-après (p. 512) un tableau des épreuves faites sur un de ces groupes tournant à 500 tours par minute ; il indique l'origine et la grandeur des différentes pertes.

Machine Holmes. — MM. J. H. Holmes et C^{ie}, de Newcastle-sur-Tyne, ont produit une forme compacte et très bien comprise de machine Gramme, représentée par la figure 369. Elle est connue sous le nom de dynamo « Castle ». Sa culasse et ses pièces polaires sont en fonte et forées pour recevoir les noyaux cylindriques verticaux en fer forgé. Le noyau d'induit en forme d'anneau est composé de feuilles minces de tôle de fer au bois. Les lames du collecteur sont serrées

MACHINE GOULDEN ET MOTEUR WILLANS	A PLEINE CHARGE (watts)			A DEMI-CHARGE (watts)		
Puissance nette.	"	50 000	"	"	25 000	"
Perte par résistance de l'induit.	1 010	"	"	250	"	"
Perte par résistance des bobines inductrices	615	"	"	590	"	"
Perte par frottements, courants parasites et hystérésis	255	"	"	255	"	"
Perte totale dans la dynamo . .	1 880	1 880	"	1 095	1 095	"
Puissance brute	"	51 880	51 880	"	26 095	26 095
Perte dans le moteur.	"	"	5 920	"	"	5 920
Puissance totale indiquée, en watts.	"	"	57 800	"	"	32 015
Rendement commercial de la dynamo.		96,2 p. 100			95,7 p. 100	
Rendement commercial de l'en- semble.		86,5 p. 100			71,8 p. 100	

l'une contre l'autre à la presse hydraulique avant d'être emboîtées sur l'arbre. MM. Holmes se sont attachés avec beaucoup de succès à la solution du problème ayant pour objet d'obtenir une puissance constante d'une dynamo marchant à des vitesses variables¹. Ce cas se présente, comme application, dans l'éclairage des trains de chemins de fer au moyen de dynamos actionnées par l'essieu de l'une des voitures. Ils l'ont résolu à l'aide d'une combinaison spéciale de deux machines et d'un certain nombre de commutateurs automatiques. La plus grande des deux machines comporte deux circuits sur ses inducteurs, et son arbre est accouplé avec celui d'une machine plus petite qui a pour objet de lancer dans le second circuit de la première un courant de désaimantation, de manière à faire baisser son magnétisme à peu près proportionnellement à l'augmentation de sa vitesse. Ce procédé maintient le voltage sensiblement constant, bien que la vitesse du train puisse varier de 48 à 112 kilomètres à l'heure.

¹ Pour diverses solutions de ce problème, voir les Brevets anglais suivants : 342 de 1889 (Mordey); 3420 de 1889 (Sayers); et 20244 de 1889 (Holmes). — Voir également P. Hoho, dans le *Bulletin de la Société Belge d'Electriciens*, mars 1890.

Machine Laurence, Paris et Scott. — Dans les récentes machines de cette maison, l'inducteur est du type de la figure 119, N° 8, à pôles conséquents, mais plus compact et avec entailles profondes entre les moitiés droite et gauche en vue de diminuer l'aimantation transversale. Les conducteurs de l'induit sont encastrés dans de profondes et étroites rainures séparant des dents découpées sur la périphérie des

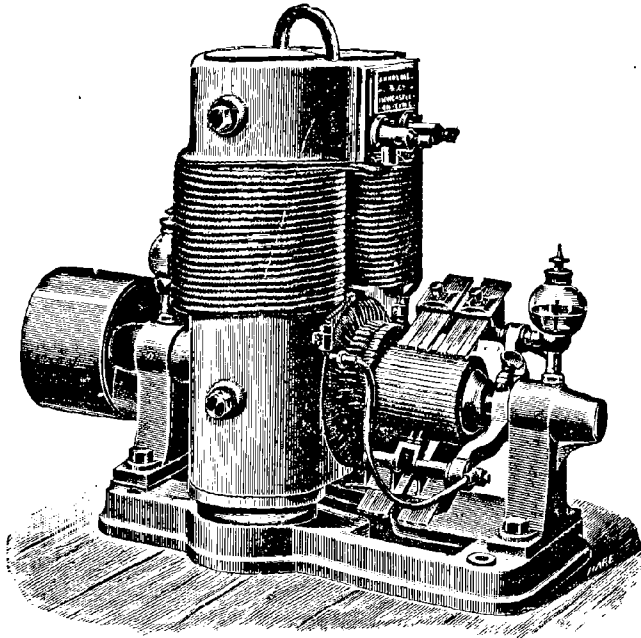


Fig. 369. — Machine Holmes.

disques de noyau. Ceux-ci sont d'ailleurs enfilés sur un arbre d'acier hexagonal. Quand les machines sont compound, les bobines en série sont ordinairement enroulées les premières et uniquement sur les branches supérieures du noyau inducteur. Dans les grandes machines, les bobines en série sont faites de feuilles de cuivre, isolées par des bandes de calicot. Les constantes données ci-après se réfèrent à une dynamo « C 6 » bobinée pour fournir 120 ampères sous 100 volts à la vitesse de 710 tours par minute. La même machine montée en dérivation seulement pourrait servir à charger des accumulateurs avec 60 ampères sous 130 volts, à la vitesse de 910 tours par minute.

Le collecteur a 52 sections, entre chacune desquelles se trouvent
DYNAMO-ÉLECTRIQUES.

deux spires complètes de conducteur. La section du fer dans le noyau d'induit est de 191,60 centimètres carrés; et celle de l'inducteur en fonte, de 632,25 centimètres carrés. L'induction magnétique, pour 100 volts à 710 tours par minute, est d'environ 21 390 unités C. G. S. Le conducteur d'induit est en fil tressé, avec isolation extrêmement soignée entre les bobinages intérieur et extérieur, aussi bien qu'entre le cuivre et le fer de l'induit.

Ampères-tours dans la dérivation = 6468.

Ampères-tours dans les bobines en série = 3360.

Le bobinage en série comprend 28 spires de feuilles de cuivre de 11,45 centimètres de large sur 0,635 millimètre d'épaisseur, sur chacune des branches supérieures d'électro-aimant.

La densité de courant dans le conducteur d'induit est, pour 120 ampères, de 4,97 ampères par millimètre carré.

Résistance des bobines en dérivation 32,4 ohms.	
Watts perdus avec 100 volts	308
Résistance des bobines en série 0,0124 ohm.	
Watts perdus avec 120 ampères	178
Résistance de l'induit 0,045 ohm.	
Watts perdus avec 120 ampères.	648
Total des watts perdus.	<u>1 134</u>
Watts dans le circuit extérieur.	12 000
Total des watts produits.	<u>13 134,</u>

d'où résulte un rendement électrique de 91,4 p. 100.

Machine « Tyne ». — Ces machines, construites par MM. Ernest Scott et C^o sur les dessins de M. Mountain, présentent comme particularités quatre pôles conséquents et un induit à connexions transversales. Les dispositions du collecteur, des porte-balais et du collier sont admirablement bien comprises. Le mode d'assemblage du collecteur est conçu de manière à éviter toute pénétration d'huile entre ses éléments.

Machine Lahmeyer. — La figure 370 représente cette machine ¹ dont le système inducteur appartient au type « cuirassé ». Elle a été soumise par le professeur Kohlrausch à des épreuves très soignées. La

¹ Voir le *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 71 et 411, 1887; ainsi que l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, IX. 89, 1888.

machine pesant 507 kilogrammes donnait 60 ampères sous 65 volts, à une vitesse de 1 250 tours par minute. La densité du courant dans l'induit était de 8,3 ampères par millimètre carré de section de cuivre. Son rendement commercial dépassait 80 p. 100. Bien que l'aimantation des inducteurs en fonte ne fût poussée qu'à 36 p. 100 de son maximum,

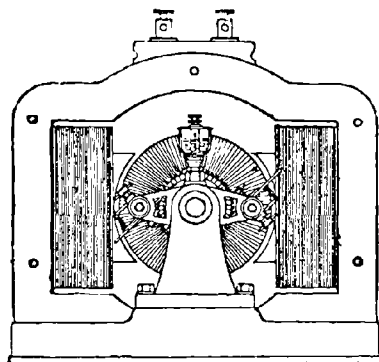


Fig. 370. — Machine Lahmeyer.

le courant d'induit manifestait une très faible tendance à la désaimantation. D'après l'inventeur, le flux magnétique perdu serait inférieur à 8 p. 100 du flux total créé. L'induit est bobiné suivant un mode imaginé par Arnold (de Riga) et, indépendamment de celui-ci, par Crompton : les conducteurs sont logés entre des dents à la périphérie du noyau, après quoi tout l'extérieur de l'induit est revêtu d'une couche mince de matière isolante, par-dessus laquelle est roulée une couche de fils de fer. — Plus récemment M. Lahmeyer a construit à Francfort¹ des machines multipolaires d'un type analogue.

Machine « Leeds ». — Cette machine (fig. 371), construite par MM. Greenwood et Batley, de Leeds, appartient au type de machine à une seule bobine excitatrice, originairement conçu par l'Auteur de cet ouvrage en 1883 (voir fig. 121, p. 196). MM. Goolden et C^o, MM. Immisch, et M. R. Kennedy l'ont également emprunté. Le noyau d'inducteur est en fer doux forgé ; les pièces polaires, dont celle du bas est venue d'une seule pièce avec le bâti, sont en fonte recuite. L'induit est roulé en anneau avec une seule couche de fil ; il est muni d'un collecteur de longueur iquisitée. Voici les dimensions et constantes des ma-

¹ Voir l'*Electrical Review*, XXIX. 404, 1891.

chines « Leeds » fournies pour la station d'éclairage de Cadogan, à Chelsea : —

Dynamo de 35 kilowatts : — Puissance, 70 ampères sous 500 volts = 47,5 chevaux, à 800 tours par minute. Section du fer dans l'induit, 542 centimètres

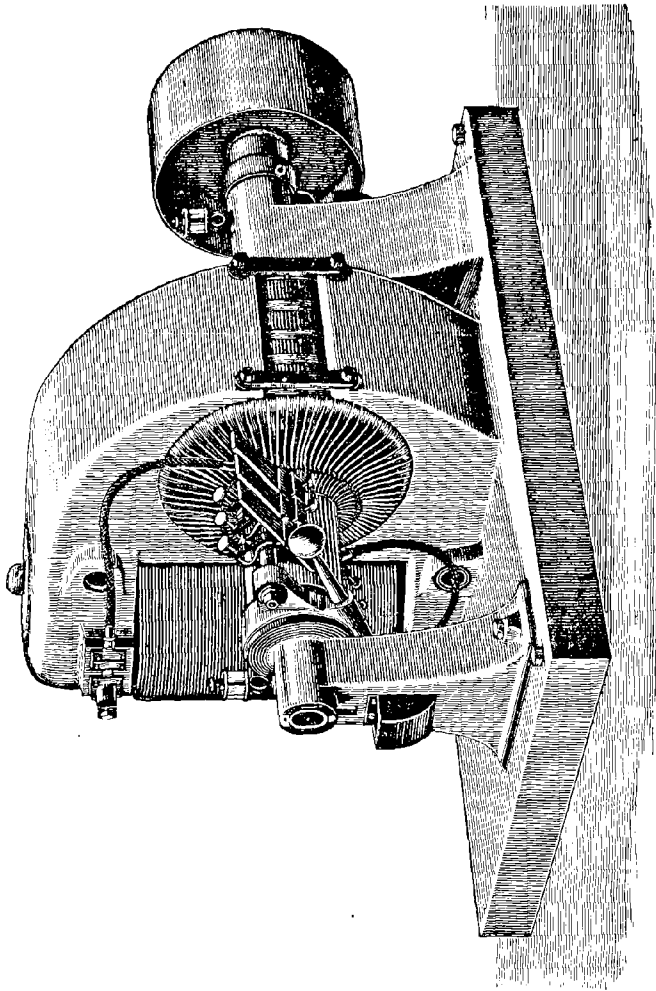


Fig. 371. — Machine « Leeds ».

carrés ; dans l'inducteur, 561 centimètres carrés. Longueur totale du circuit magnétique, 216 centimètres ; ampères-tours sur l'inducteur, 39 000. Surface de l'entrefer 2 225 centimètres carrés, sur 1,45 centimètre d'épaisseur. $\mathfrak{B} = 13\,390$ unités C. G. S. Diamètre extérieur de l'induit, 47 centimètres ; longueur, 35,5 centimètres. Vitesse périphérique, 19,8 mètres par seconde. Poids

du cuivre dans l'induit, 52 kilogrammes. Densité du courant dans l'induit, 5,81 ampères par millimètre carré de section. Nombre total des spires de l'induit, 560. Nombre de touches au collecteur, 80.

Machines Elwell-Parker. — Ces machines sont du type supérieur bipolaire, à tambour. Elles sont construites par l'« Electric Construction Corporation » qui nous a fourni les renseignements et données suivants pour une machine de 20 kilowatts : —

Puissance : 200 ampères sous 100 volts, exigeant 29 chevaux à 900 tours par minute. — *Induit* : disques de noyau, diamètre extérieur, 28,6 centimètres ; diamètre intérieur, 3,7 centimètres. Nombre de conducteurs, 104, ayant chacun 32,25 millimètres carrés de section. Résistance, 0,0154 ohm. Collecteur à 52 segments, de 15,5 centimètres de longueur. — *Inducteur* : en roulement compound ; résistance de la dérivation, 28 ohms ; résistance de l'enroulement en série, 0,0021 ohm. Les noyaux inducteurs de ces machines sont formés de plusieurs barres de fer forgé ; un chapeau en fonte mince recouvre les pièces polaires. Les disques d'induit sont enfilés directement sur l'arbre.

La substance isolante employée en majeure partie est une préparation de papier imprégné d'un vernis spécial. — La même maison a également construit de grandes machines à tambour, à quatre pôles, pour stations centrales d'éclairage.

Machine « Taunton ». — MM. Newton, de Taunton, construisent d'excellentes petites machines (fig. 372), du même type que les précé-

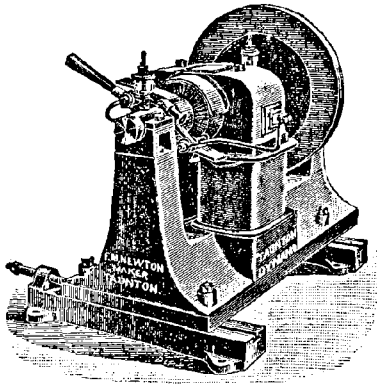


Fig. 372. — Machine « Taunton ».

entes. L'une d'entre elles examinée par l'Auteur fonctionnait sans aucune étincelle, quelle que fût sa charge.

Machines de la « General Electric Traction Company ».

Cette maison s'est spécialisée dans les machines applicables à la traction et au service des mines. La machine représentée par la figure 373

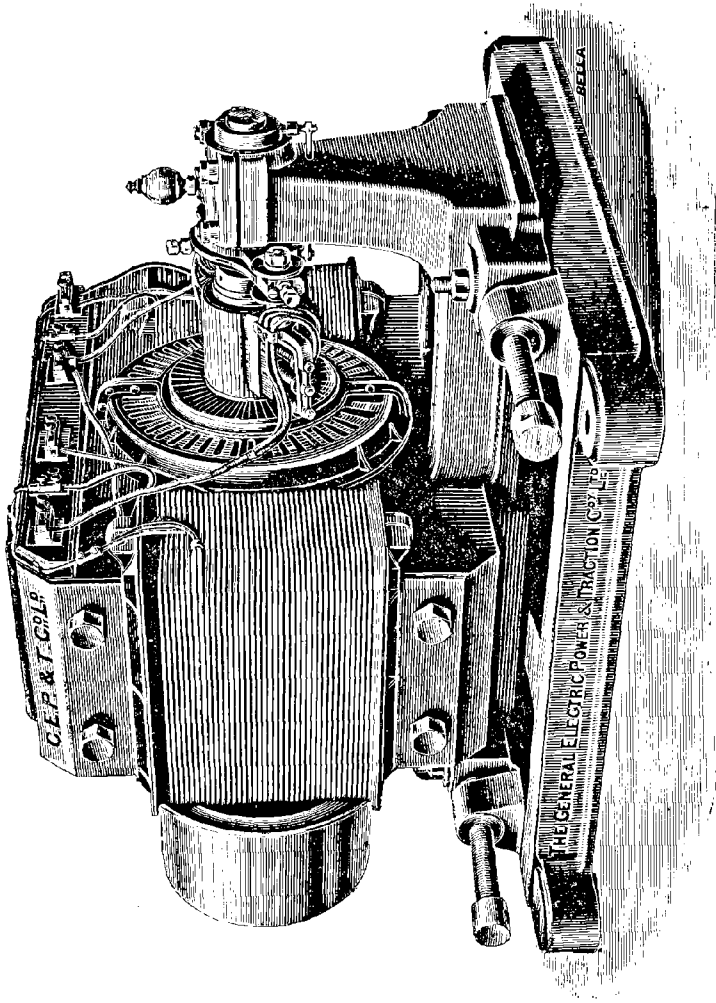


Fig. 373. — Machine de la « General Electric Traction Co ».

a été établie sur les dessins de M. A. T. Snell. Ses noyaux d'inducteurs sont en fer forgé ; les pièces polaires formant culasse, en fonte. Les balais sont en charbon ; le porte-balais est le même que celui représenté dans la figure 278 (p. 368). — Cette maison a également construit de grandes machines multipolaires du même type que celle de Brown (fig. 341, p. 479).

Autres Machines multipolaires. — Dans ces dernières années, les exploitations de stations centrales ont déterminé l'apparition de diverses autres formes de machines multipolaires.

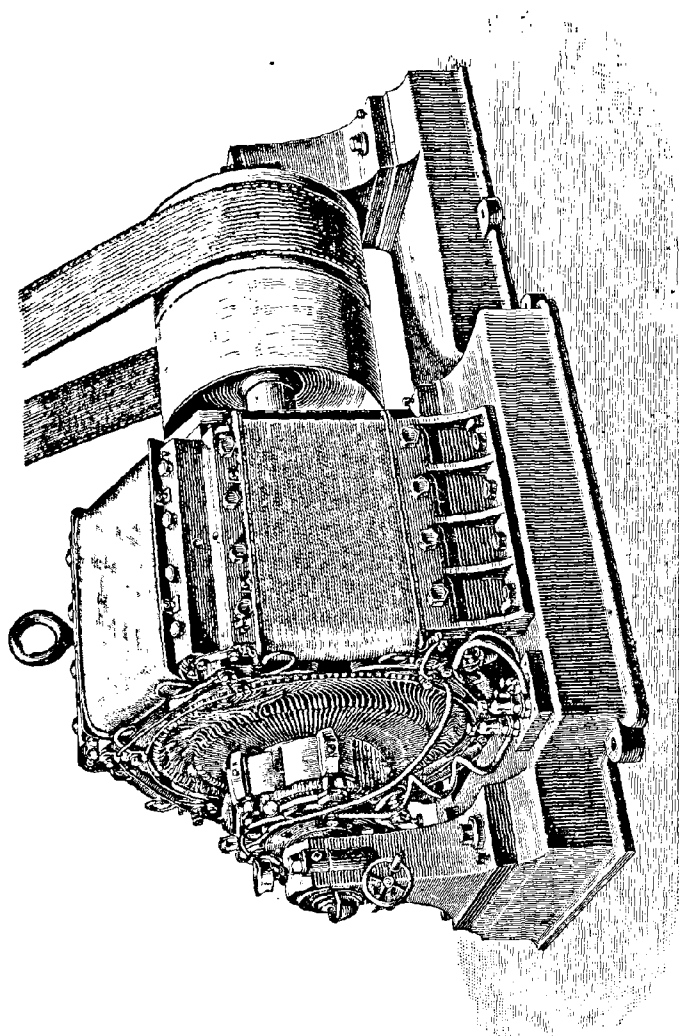


Fig. 374. — Machine Thury.

L'« Allgemeine Gesellschaft », de Berlin, a construit de grandes machines à douze pôles ¹, ainsi que des dynamos à tambour à six et quatre pôles.

¹ *Elektrotechnische Zeitschrift*, X. septembre 1889.

La « Thomson-Houston Company » a établi une grande machine à tambour à quatre pôles¹ ressemblant tout à fait à celle de Brown (fig. 341, p. 479).

De grandes machines sont aussi sorties des ateliers de MM. Latimer Clark, Muirhead et C^o, de Westminster².

MM. Alioth et C^{ie}, de Bâle, construisent également des dynamos multipolaires à tambour³.

La « Westinghouse Company » étudie aussi de grandes machines à 6 pôles.

Machine Thury. — La figure 374 représente une machine à tambour vide, à 6 pôles, de Thury, de Genève. Le mode d'enroulement en est décrit page 318, et le détail de l'inducteur en est donné page 196.

Machine Wenström. — Ce modèle, qui fit son apparition en Suède, en 1882, a ses inducteurs du type « cuirassé », avec deux pôles en saillie sur lesquels sont montées les bobines, et une enveloppe cylindrique extérieure en fer qui entoure la machine et sert en même temps de culasse. L'induit présente cette particularité que ses bobines sont logées dans des trous circulaires pratiqués au bord de la périphérie du noyau d'induit.

¹ *Electrical World*, XIV. 335, 1889.

² *Ib.*, XIII. 284, 1889.

³ *La Lumière électrique*, XXXII. 522, 1889.

CHAPITRE XIX

DYNAMOS DIVERSES

Ce chapitre comprend les dynamos à grand débit et faible voltage pour électrometallurgie, les dynamos unipolaires, les dynamos à disques et autres types divers.

MACHINES A GRAND DÉBIT ET FAIBLE VOLTAGE

POUR GALVANOPLASTIE ET ÉLECTROMÉTALLURGIE

La galvanoplastie, le clichage et le traitement électrolytique des minerais, ainsi que l'affinage des métaux, exigent des types spéciaux de dynamos. Ces machines doivent naturellement être à courant continu. En général, ces opérations demandent de très faibles forces électromotrices et des courants très intenses, attendu que la quantité de métal déposée dans le bain n'est fonction que du nombre d'ampères fournis et nullement du nombre de volts sous lesquels ils sont émis; et, bien qu'il faille quelques volts pour envoyer le courant nécessaire à travers la résistance du circuit, ce nombre est toujours très limité. La décomposition électrolytique de l'eau demande moins de deux volts. Un dépôt métallique dans un bain dont l'anode est du même métal que celui à déposer n'exige ordinairement qu'une très faible force électromotrice. En général, si l'on applique une force électromotrice trop élevée, ou si on laisse le courant prendre une trop grande densité (c'est-à-dire si l'on fournit trop d'ampères par unité de surface de la cathode), les dépôts métalliques sont rugueux ou pulvérulents. Toutes ces conditions conduisent à la construction de dynamos ne donnant que quatre ou cinq

volts au plus de force électromotrice, mais en même temps étudiées de manière à présenter une résistance intérieure extrêmement faible.

La première application d'une dynamo à la galvanoplastie est due à M. J. S. Woolrich qui, en 1842, fit breveter cette utilisation d'une machine magnéto-électrique. — Wilde fut néanmoins le premier à construire des machines réellement appropriées à cet objet quand il imagina l'emploi d'une grande dynamo dont le système inducteur était excité séparément par des courants issus d'une machine magnéto plus petite. Ses premières machines, employées pendant de longues années par MM. Elkington, avaient de petites excitatrices de l'ancien type Siemens (fig. 23), montées sur des électro-aimants de la forme indiquée par la figure 119, N° 1. Les deux induits étaient de la forme primitive, en navette, introduite par Siemens ; un courant d'eau était nécessaire pour refroidir constamment celui de la plus grande. Vers 1867, Wilde introduisit un autre type de machine auquel il est fait allusion page 12. Les bobines élémentaires de l'induit (à l'exception d'une seule destinée à l'excitation des inducteurs) étaient reliées en parallèle de la manière indiquée par la figure 431. Ces bobines induites contenaient des noyaux de fer qui donnaient en conséquence à la machine une tendance à s'échauffer. — Weston produisit une petite machine pour nickelage, dont les inducteurs avaient des noyaux d'acier, mais portaient des bobines en série sur le circuit principal ; elle était en outre munie d'un coupe-circuit automatique destiné à prévenir le renversement de l'aimantation sous l'action d'un courant inverse venant du bain. — Elmore construisit une autre machine à inducteur multipolaire et induit en disque. Le collecteur redressait simplement les courants (p. 36) sans les rendre continus. Ce principe est défectueux ; tout travail électrochimique, galvanoplastie, clichage, ou charge d'accumulateurs, entraîne en effet une abondante production d'étincelles, si les fluctuations du courant ne sont pas réduites à un minimum par l'emploi d'un induit à nombreuses bobines élémentaires avec collecteur approprié. Les plus grandes machines d'Elmore, pour l'affinage du cuivre, comportaient dix-huit inducteurs sur chaque couronne, et fournissaient un courant de 3 000 ampères sous une différence de potentiel de sept ou huit volts. Une machine de ce genre est susceptible de déposer plus de 11,340 kilogrammes de cuivre à l'heure. Les bobines inductrices sont en série avec le circuit principal. C'est là une erreur. Toutes les machines à électrolyse doivent être montées en dérivation ; autrement, elles sont sujettes à des renversements de polarité. — Gramme, en 1873, établit des types spéciaux de très faible résistance, à anneaux bobinés de cuivre en

barres, munis d'un collecteur à chaque extrémité, et donnant 1 500 ampères sous 8 volts. — Siemens et Halske entrèrent également des premiers dans la lice avec des machines à induits à barres qu'ils employèrent à leurs ateliers électrolytiques d'Oker¹. — Brush construisit aussi des machines à faible résistance pour la galvanoplastie. C'est pour ce type de machines qu'il appliqua son invention, devenue depuis si féconde, consistant à exciter les inducteurs par un double enroulement; les bobines en gros fil étaient reliées en série sur le circuit principal avec addition d'une bobine, dite « teaser » ou « taquine », en fil plus fin, — ou, en d'autres termes, d'une dérivation —, pour maintenir le magnétisme quand le circuit principal était ouvert, ce qui permettait à la machine de fournir plus ou moins de puissance sans crainte de renversement de courant. La différence de potentiel aux bornes de cette machine se maintenait bien constante. Elle variait seulement de 3,3 à 4,1 volts quand le courant passait de 300 ampères à zéro.

D'autres machines pour galvanoplastie et électrometallurgie ont été étudiées par presque tous les grands constructeurs : —

Une machine **Ellwell-Parker** pour dépôts galvaniques² donne 1 500 ampères sous 50 volts à 450 tours par minute; c'est une dynamo à 4 pôles, en tambour, montée en dérivation, avec 80 conducteurs en torons, de 1,30 centimètre carré de section chacun, sur le tambour, et un collecteur à 40 segments. L'induit a 508 millimètres de long sur 560 millimètres de diamètre, avec un collecteur de longueur peu commune. Il y a quatre jeux de balais, de cinq chacun. La longueur de conducteur actif est de 4 064 mètres. A la vitesse périphérique de 12,7 mètres par seconde, il donne un volt pour 20 centimètres de conducteur.

Une dynamo de 50 kilowatts, de **Paterson et Cooper**³, destinée à produire électrolytiquement une liqueur de blanchiment, donne 1 200 ampères sous 42 volts.

Une autre machine de 50 kilowatts, étudiée par **Hopkinson**⁴, pour l'affinage du cuivre, fournit 1 000 ampères sous 50 volts, à 400 tours par minute. — Résistance de l'induit, 0,0016 ohm; rendement commercial 93 p. 100; poids total 5 184 kilogrammes.

Une machine à galvanoplastie, pour argenture, de **Stafford et Eaves**⁵, a un seul circuit magnétique très ramassé, avec une seule bobine d'excitation et induit en anneau à dix-huit sections seulement; elle donne 150 ampères sous 6 volts à 640 tours par minute.

¹ Voir *Elektrotechnische Zeitschrift*, II, 54.

² *The Electrician*, XXI, 183, 1888.

³ *Ibid.*, XXI, 181, 1888.

⁴ *Ibid.*, XVII, 62, 1886.

⁵ *Ibid.*, XVIII, 506, 1887.

Dans ce genre de dynamos, la nécessité d'un courant intense et d'un voltage très bas crée des difficultés de construction; on ne peut en effet obtenir un voltage assez bas sans mettre très peu de spires sur l'induit, ou sans employer un champ magnétique faible, ou encore sans marcher à très lente allure. Les machines à faible vitesse sont toujours coûteuses proportionnellement à leur puissance. Celles à champ inducteur faible ont l'inconvénient de donner des étincelles. Enfin, celles qui ne comportent qu'un petit nombre de conducteurs massifs et un collecteur à peu de segments sont également sujettes à donner des étincelles et à s'échauffer sous l'action de courants parasites locaux. On doit recourir dans ce cas à un conducteur toronné, ou à plusieurs enroulements *indépendants* (voir p. 304 et 495) tous reliés en parallèle par des balais d'épaisseur spéciale.

Sayers a proposé un moyen ingénieux permettant de capter sur une machine des courants sous divers voltages. Les surfaces polaires sont divisées par de profondes entailles, comme dans la figure 375, ce qui donne sur le collecteur plusieurs points neutres auxquels on peut appliquer des balais sans production d'étincelles. Si, par exemple, la différence de potentiel entre les deux balais principaux peut être de 10 volts, un balai intermédiaire permet de la diviser en 7,5 volts pour le nickelage et 2,5 volts pour l'argenture.

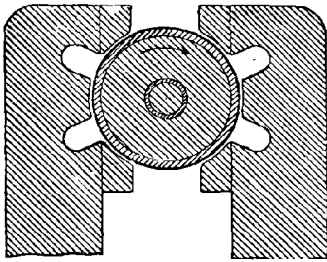


Fig. 375. — Machine Sayers pour galvanoplastie.

MM. Crompton et C^{ie} ont imaginé une manière de distribuer les conducteurs principaux entre deux paires de balais touchant des lames adjacentes du collecteur, ce qui leur permet de diminuer le nombre des sections d'induit de leurs machines à galvanoplastie. La division des conducteurs depuis la dynamo jusqu'aux cuves de dépôt ne coûte pas plus qu'un seul conducteur non subdivisé; mais ces conducteurs séparés interposent une résistance relativement élevée au passage du courant local provenant de la section mise en court-circuit.

L'industrie spéciale de l'aluminium a donné lieu au développement de plusieurs types de machines. **MM. Crompton et C^{ie}** ont construit pour cet objet une très grande machine bipolaire à tambour¹, capable de fournir 5000 ampères sous 60 volts. — **M. C. E. L. Brown**²

¹ *The Electrician*, XXI. 590, 1888; voir aussi *La Lumière électrique*, XXX. 207, 1888.

² *La Lumière électrique*, XXX. 205, 1888.

ont établi des machines à six pôles pour 6 000 ampères sous 20 volts à 180 tours par minute. Les induits comportent chacun deux bobinages séparés avec un collecteur à chaque bout, et, à chaque collecteur, 36 balais disposés en six jeux de six chacun. Le système inducteur est semblable à celui de la figure 130, mais avec 6 pôles, et fondu en une seule pièce. L'induit a 965 millimètres de diamètre et 610 millimètres de long. Les conducteurs étaient, au début, encastrés dans des trous pratiqués dans les disques du noyau ; mais, comme il en résultait des inconvénients au point de vue de l'isolation, les disques ont été remis sur le tour, les trous enlevés, et l'induit bobiné de nouveau avec les conducteurs à l'extérieur. Bien qu'il y ait autant de jeux de balais que de pôles, ce qui fait que des connexions transversales reliant les enroulements ne sont pas absolument nécessaires, on en a mis cependant pour assurer l'égalisation des courants : les segments du collecteur au même potentiel sont reliés transversalement à l'intérieur au moyen de bagues à trois oreilles saillantes. M. Brown a également construit des machines à huit pôles pour une puissance de 14 000 ampères sous 30 volts.

RENSEIGNEMENTS NUMÉRIQUES RELATIFS A L'ÉLECTROMÉTALLURGIE

Les données qui suivent sont utiles comme références relativement à la puissance électrique qu'il convient de donner à une dynamo pour qu'elle puisse effectuer un dépôt déterminé de métal :

Cuivre.

Un courant de	1	ampère	dépose	0,000326	gramme	par	seconde.
—	1	—	0,01957	—	par	minute.	
—	1	—	1,1739	—	par	heure.	
—	851,8	—	1	—	kilogramme	par	heure.

Pour déposer 100 kilogrammes de cuivre par journée de travail de 10 heures, il faudra un courant non interrompu de 8 518 ampères pendant ce temps ou 851,8 ampères-heure ; ou, si le courant va à 10 bains en série l'un sur l'autre, 851,8 ampères pendant les 10 heures, soit 85,18 ampères-heure ; mais, dans ce dernier cas, la force électromotrice de la dynamo devra être égale à dix fois ce qu'elle serait pour le même dépôt dans un seul grand bain. Si l'électrolyse de la solution de cuivre pur est faite avec des anodes en charbon, il faudra environ 1,2 volt par bain en série, ou, au plus, 15 volts pour les dix bains.

Argent.

Un courant de 1 ampère dépose 4,025 gramme par heure.
 — 248,45 — 1 kilogramme à l'heure.

Or.

Un courant de 1 ampère dépose 2,441 gramme à l'heure.
 — 409,67 — 1 kilogramme à l'heure.

Nickel.

Un courant de 1 ampère dépose 1,099 gramme à l'heure.
 — 909,92 — 1 kilogramme à l'heure.

Les renseignements suivants relatifs aux différentes tensions et aux divers courants nécessaires selon la nature et le montage des bains de dépôts électrolytiques sont également utiles comme références : —

TENSION AUX BORNES NÉCESSAIRE POUR DIFFÉRENTS
GENRES DE BAINS

	Volts.
Cuivre (bain acide)	0,5 à 1,5
— (bain au cyanure)	3 à 5
Argent	0,5 à 1
Or	0,5 à 4
Laiton	3 à 5
Fer (sur acier)	1 à 1,3
Nickel sur fer, acier, cuivre, avec anode en nickel, dépôt d'attaque avec 5 volts, s'abaissant à . . .	1,5 à 2
Nickel sur fer, acier, cuivre, avec anode en char- bon	2 à 4
Nickel sur zinc	4 à 7
Platine	5 à 6

DENSITÉ DE COURANT POUR DÉPÔT CONVENABLE

	Ampères par décimètre carré.
Cuivre pour planches :	
Dépôt adhérent de meilleure qualité . . .	0,232 à 0,620
Dépôt bon et adhérent (pour clichés) . . .	0,620 à 1,550
Bon dépôt solide	1,550 à 3,875
Dépôt solide, sablonneux sur les bords . . .	3,875 à 6,200
Dépôt sablonneux et granuleux	7,750 à 15,500
Cuivre (bain au cyanure)	0,310 à 0,464
Zinc (pour affinage)	0,310 à 0,464
Argent	0,155 à 0,464
Or	0,075 à 0,155
Laiton	0,464 à 0,542
Fer (sur acier)	0,075 à 0,232
Nickel au premier dépôt 1,395 à 1,550, tombant ensuite à	0,155 à 0,310

MACHINES UNIPOLAIRES

Les machines dans lesquelles la rotation d'un conducteur détermine une augmentation continue dans le flux de force coupé, par suite d'une disposition d'une partie du conducteur qui est amenée à glisser sur l'aimant ou autour de lui, sont connues sous le nom de machines *unipolaires*¹.

La plus ancienne machine ayant quelque droit au titre de dynamo (fig. 1, p. 6), c'est-à-dire le disque tournant de Faraday, appartenait par le fait à cette classe. Il en était de même de ses autres machines à connexions à glissement, telles, par exemple, que son cylindre de cuivre tournant par-dessus le pôle d'un aimant (fig. 3, p. 7).

¹ Cette expression sonne mal à l'oreille, puisque l'inducteur a nécessairement deux pôles. Mais elle est dérivée du terme d'« induction unipolaire » appliqué sur le Continent, à la suite du professeur W. Weber, à l'induction de courant produite par une « intersection continue des lignes de force », dont nous nous occupons en ce moment. Je n'admets pas cette expression qui donne inutilement à l'esprit une idée fautive.

Plücker¹ imagina une autre forme ; elle comprenait un aimant tournant horizontalement et muni de contacts à glissement en son milieu et à l'une ou l'autre de ses extrémités. — En 1862, M. S. A. Varley construisit un appareil unipolaire à l'aide d'un aimant tournant dans un bâti vertical et au milieu duquel était établie une connexion au mercure. — Vers 1878, le Dr Werner Siemens² réalisa une machine unipolaire dans laquelle deux cylindres de cuivre, fendus longitudinalement pour parer au développement de courants parasites, tournaient chacun autour de l'un des pôles d'un électro-aimant en forme d'U. Un second électro-aimant, disposé entre les deux cylindres mobiles, était muni de pièces polaires saillantes en forme d'arcs qui embrassaient les cylindres en dessus et en dessous. Chacun de ces cylindres tournait, en conséquence, entre deux pôles, l'un interne, l'autre externe, de polarités contraires, et, par suite, coupait les lignes de force d'une façon continue, en glissant en quelque sorte sur le pôle interne. Les courants ainsi développés avaient une très grande intensité, mais la machine ne donnait qu'une force électromotrice de quelques volts. Pour maintenir la résistance aussi faible que possible, on captait le courant au moyen d'un grand nombre de balais touchant les cylindres aux deux extrémités. Cette dynamo était employée à Oker pour effectuer le dépôt électrolytique du cuivre. — Les machines de ce type ont été dans ces dernières années l'objet d'une sollicitude toute particulière, et l'Auteur en a, lui aussi, réalisé une dans laquelle deux disques de Faraday, couplés à leurs périphéries, extérieurement à une pièce polaire fixe interne, tournent dans un champ symétriquement uniforme. — M. Willoughby Smith a montré qu'en employant un disque de fer au lieu d'un disque de cuivre on obtient un résultat bien supérieur. — Le professeur George Forbes a construit plusieurs machines de cette classe. Il commença tout d'abord par employer un disque de fer mis en mouvement entre deux flasques de polarités différentes ; le courant était capté sur sa périphérie. Il doubla ensuite les éléments de sa machine. Puis il fit un nouveau pas en avant en réunissant les deux disques en un cylindre commun, tournant à l'intérieur d'un inducteur « cuirassé » entièrement fermé sur lui-même. C'est ce qui fait préférer à ce savant inventeur la dénomination de machine « sans pôles ». Un contact à frottement, pour lequel le professeur Forbes employa successivement des balais en charbon et un faisceau de bandes élastiques de métal en feuilles, est maintenu aux

¹ *Pogg. Ann.*, LXXXVII. 352, 1852.

² *Elektrotechnische Zeitschrift*, II. 94, 1881.

deux extrémités de la périphérie. Un de ses premiers modèles de machine, à un seul disque de 457 millimètres de diamètre, était établi pour donner 3117 ampères sous 5,8 volts de différence de potentiel, à une allure de 1 500 tours par minute. Un de ses derniers types, dont l'induit est un cylindre de 228,5 millimètres de diamètre sur 203,2 millimètres de long, est étudié pour une production de 10 000 ampères sous 1 volt, à 1 000 tours par minute. La force électromotrice des machines de ce genre croît comme le carré du diamètre de l'induit.

D'autres types en ont été imaginés par E. Ferraris, E. L. Voice, Delafield, Hummel, et autres. Toutes les formes antérieures à 1885 et présentant quelque intérêt sont décrites et étudiées par Uppenborn dans le *Centralblatt für Elektrotechnik* de ladite année, page 324.

Deux difficultés semblent inhérentes à ce type de machines, savoir la captation périphérique de courants intenses et les réactions très considérables d'induit, conséquence de ces courants, qui déterminent une grande chute de potentiel¹ au fur et à mesure que le courant augmente. On ne peut parer à ce dernier inconvénient que par les procédés auxquels on a recours pour tous les autres types de dynamos, c'est-à-dire en donnant une grande puissance relative aux inducteurs et en contre-balançant les réactions par un compoundage ou un surcompoundage de la machine au moyen d'enroulements en série.

La théorie de la machine unipolaire à disque a été donnée par sir W. Thomson², qui a démontré qu'une machine de ce genre n'est pas auto-excitatrice, sauf au-dessus d'une certaine vitesse critique dépendant de la résistance du circuit. — Les plus récentes tentatives sont dues à Atkinson³, dont la machine est auto-excitatrice, et M. C. E. L. Brown a communiqué à l'Auteur des dessins et résultats d'essai d'une machine unipolaire construite dans les ateliers d'Oerlikon et formée d'un cylindre de cuivre tournant entre les bords d'un électro-aimant « cuirassé » en fonte. Cette machine, à 1 200 tours par minute, fonctionnerait sous 10 volts et présenterait une chute de potentiel à peine perceptible à un débit de 3 000 ampères.

¹ Voir quelques chiffres donnés par Hummel, dans le t. II, p. 19 du *Handbuch der Elektrotechnik* (Manuel d'Electricité) de Kittler.

² « Sur un accumulateur de courant électrique uniforme », *Phil. Mag.*, janvier 1868 ; et *Reprint of Papers*, p. 325.

³ *La Lumière électrique*, XXXV. 557, 1890.

DYNAMOS A DISQUE

Dans les machines de cette classe, les bobines élémentaires sont amenées par la rotation dans des parties différentes d'un champ magnétique tel que son intensité varie d'une région à l'autre, ou, plus généralement, que les lignes de force sont de sens différents dans les diverses régions de ce champ. La figure 17 (p. 28) est une illustration de ce principe; nous allons voir maintenant comment on le réalise dans la pratique.

Dans les machines primitives de Saxton, Clarke, et Stohrer, de simples paires de bobines étaient montées de manière à passer, comme nous venons de le dire, dans des parties du champ où l'induction magnétique se produisait en des sens différents. Une machine de ce genre donnera en conséquence des courants alternatifs à moins qu'on ne dispose sur son axe de rotation un commutateur destiné à les redresser.

La machine, depuis longtemps abandonnée, de Niaudet, qui peut être regardée comme une machine Saxton multiple, dont les bobines élémentaires d'induit étaient, comme celles de Gramme et de Siemens, groupées en un circuit continu, portait un collecteur radial au lieu du collecteur cylindrique aujourd'hui adopté. — Dans la machine de Wallace-Farmer la condition du champ de la figure 17 était très approximativement réalisée: elle portait en haut une paire de pôles disposés de telle sorte qu'un pôle N faisait face à un pôle S, et en bas une autre paire où un pôle S était opposé à un pôle N. — En 1878 von Hefner-Alteneck imagina une machine à disque dans laquelle le nombre des bobines induites était différent, à deux ou à un plus grand nombre près, de celles des inducteurs; elle comportait un commutateur à barres multiples avec des connexions transversales compliquées. — En 1881 Hopkinson et Muirhead présentèrent une dynamo à disque à bobinage ondulé. — En 1875 le professeur Pacinotti imagina¹ une forme d'induit en disque qu'il décrivit sous le nom de « volant électromagnétique transversal ». Dans cette machine, exposée à Paris en 1881, le champ magnétique était créé par deux électro-aimants opposés avec leurs pôles dissemblables en regard, formant, comme on le voit sur la figure 376, un seul circuit magnétique à deux entrefers. Dans ces deux entrefers passait un induit en disque constitué par des conducteurs

¹ *Nuovo Cimento* [3], X, septembre 1881.

radiaux disposés de manière à couper les champs magnétiques intenses ainsi formés. Les forces électromotrices induites dans ces conducteurs étaient dirigées radialement, d'un côté vers l'intérieur, et de l'autre vers l'extérieur. La disposition imaginée par Pacinotti pour relier ces conducteurs radiaux en une seule bobine fermée est représentée par la figure 232, page 324. — La dynamo à bobinage oblique d'Ayrton et Perry (1882) en présente une autre forme. — Vers

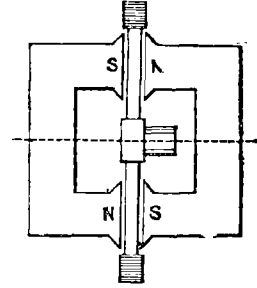


Fig. 376. — Inducteur de la machine à disque de Pacinotti.

la même époque Edison imagina encore un autre induit en disque formé de barres radiales, reliées à leurs extrémités extérieures par des cercles concentriques et à l'intérieur par des rondelles de cuivre. La figure 234, page 325, représente un modèle plus récent dû au même inventeur. — Sir W. Thomson inventa encore un type différent d'induit en disque consistant en une poulie à rayons semblable à une roue de bicyclette, avec balais collecteurs portant sur les extrémités opposées d'un même diamètre. — Bollman¹ imagina une machine multipolaire à induit complexe formé de bandes de cuivre radiales reliées en zigzags et aboutissant à un collecteur à connexions transversales. — Plus récemment des machines de cette classe ont été produites par Desroziers², Robin³, Jehl et Rupp⁴, et Sayers⁵. Dans la machine Jehl et Rupp, construite par la Compagnie française Edison, on trouve quatre paires de pôles opposés. Avec 24 kilogrammes de cuivre sur l'induit et à une allure de 735 tours par minute, cette machine donne 350 ampères sous 110 volts.

Dynamos à disque de Fritsche. — Ces machines⁶ ont comme induit un disque à enroulement ondulé multipolaire avec groupement en série. La particularité intéressante dans la construction de ces

¹ Pour les dessins et la description détaillés, voir *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 7, 1887.

² Voir *La Lumière électrique*, XXIV. 293, 294, et 517, 1887; XXIX. 401, 1888.

³ *Ibid.*, XXIV. 544, 1887.

⁴ *Ibid.*, XXIV. 313, 1887. Voir également la description et les dessins détaillés XXV. 368, 1887; et dans *The Electrician*, XIX. 94, 1887.

⁵ Brevet anglais, 717 de 1887.

⁶ Voir l'ouvrage de Fritsche, *Die Gleichstrom-Dynamomaschine*, Berlin, 1889; le Brevet anglais 13080 de 1887; *The Electrician*, XXII. 655, 1888; *Electrical Review*, XXIX. 472, 1891; et *Electrical World*, XII. 205, 1889.

machines est l'emploi de barres de fer forgé, au lieu de cuivre; comme conducteurs actifs dans le disque. Le collecteur est fixé à l'extérieur du disque; les balais portent en deux points de la périphérie.

Machine Polechko. — Ce type¹ réalise l'idée de sir W. Thomson d'une dynamo-poulie. La roue a 1 mètre de diamètre; elle est formée de rais serrés en cuivre et tourne dans un étroit entrefer qui sépare les

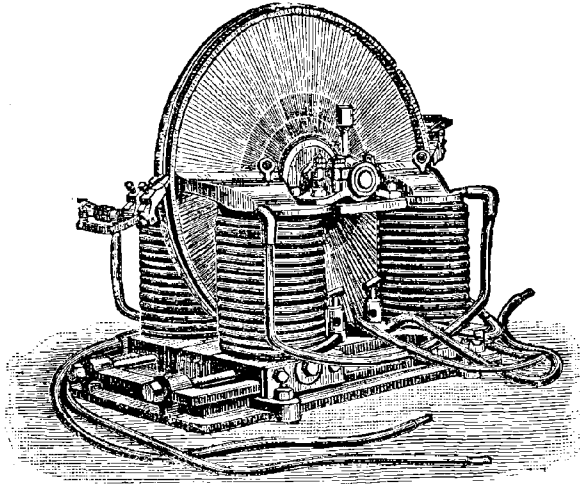


Fig. 377. — Machine à disque de Polechko.

pièces polaires de deux électro-aimants disposés de manière à créer un champ magnétique resserré très intense suivant deux rayons opposés. La figure 377 en montre la forme, ainsi que les dispositions prises pour la captation du courant à la périphérie; ce montage consiste en 320 pièces de cuivre isolées, solidement assemblées par un cercle d'acier isolé appliqué comme une frette sur la jante de la poulie. Cette machine donne, à 1 500 tours par minute, un courant de 2 000 ampères sous 25 volts; son poids total est de 1 117 kilogrammes.

¹ *Journal de la Société physico-chimique russe*, XXII. 135, 1890.

CHAPITRE XX'

MOTEURS ÉLECTRIQUES A COURANT CONTINU

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES ET HISTORIQUES

Dans le premier chapitre de cet ouvrage, nous avons défini les machines dynamo-électriques comme « des machines destinées à convertir l'énergie sous forme de travail mécanique en énergie sous forme d'énergie électrique, ou *vice versa* ». Nous n'avons jusqu'ici envisagé la machine dynamo que dans sa fonction de génératrice de courants électriques. Nous allons en étudier maintenant la fonction inverse, consistant à convertir l'énergie des courants électriques en énergie sous forme de mouvement mécanique.

Un *moteur électrique* ou, comme on l'appelait autrefois, une *machine électro-magnétique* est une machine qui effectue un travail mécanique en consommant de l'énergie électrique ; et cette définition est vraie, quelle que soit la nature de l'inducteur constituant la partie fixe de la machine, aimants permanents en acier ou électro-aimants. Par le fait, une dynamo quelconque, à courant continu ou à courants alternatifs, peut inversement servir de moteur, bien que certaines machines soient, comme nous le verrons, mieux appropriées à cet objet.

Un aimant attire, comme chacun sait, le pôle contraire d'un autre aimant et le fait tourner s'il est mobile. On sait également que tout aimant placé dans un champ magnétique tend à tourner sur lui-même et à se placer dans la direction des lignes de force.

On conçoit dès lors aisément que la découverte de l'électro-aimant, qui a donné pour la première fois un aimant dont on pouvait à volonté faire varier la puissance, ait immédiatement fait entrevoir à des esprits ingénieux la possibilité de construire une machine électro-magnétique dans laquelle un électro-aimant, placé dans un champ magnétique,

fût entraîné circulairement et maintenu ensuite en mouvement continu par la rupture ou le renversement du courant à un moment convenable. En fait, une simple spire de fil, traversée par un courant et placée dans un champ magnétique, subit une action de ce genre et est entraînée circulairement comme un aimant.

C'est exactement sur ce principe qu'a été construit le premier moteur électrique de Ritchie, bien connu sous diverses formes comme appareil de fond de tout cabinet de physique, mais qui n'est guère en réalité qu'un jouet. Joule ¹ a également imaginé plusieurs formes de moteurs électriques.

Jacobi a fait un grand pas en avant en construisant, en 1838, sa machine multipolaire représentée par la figure 378. Ce moteur, destiné

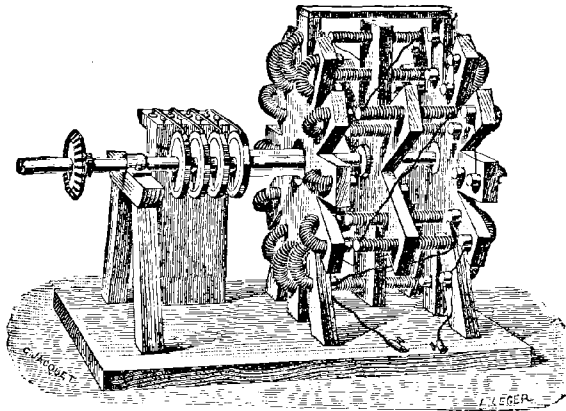


Fig. 378. — Moteur électrique de Jacobi.

par lui à son bateau électrique, était formé de deux robustes flasques en bois, sur chacun desquels était fixée en couronne une douzaine d'électro-aimants à pôles alternés. Entre ces électro-aimants était monté sur un disque de bois un autre jeu d'électro-aimants que maintenaient en mouvement l'attraction et la répulsion alternatives des pôles fixes ; le courant qui parcourait les électro-aimants mobiles était renversé régulièrement au moment où ils passaient devant les pôles des électro-aimants fixes, au moyen d'un commutateur formé, suivant la disposition adoptée par Jacobi, de quatre roues dentées en laiton, dont les dents étaient isolées l'une de l'autre par des pièces d'ivoire ou

¹ *Annals of Electricity*, II. 222, 1838 ; et IV. 203, 1839.

de bois insérées entre elles. Le moteur de Jacobi était, en réalité, un type fort avancé de dynamo, et donnerait naturellement naissance à des courants s'il était actionné par une puissance mécanique.

Un appareil rotatif, encore antérieur, mais resté, comme le moteur Ritchie, à l'état de simple jouet, était la roue de Sturgeon décrite en 1823. Cet instrument, intéressant comme le précurseur de la dynamo à disque de Faraday, est le type d'une catégorie spéciale de machines, comportant un simple contact à glissement et n'ayant pas besoin de commutateur.

On peut citer comme autre classe de moteurs ceux dans lesquels la partie mobile, au lieu de tourner sur un axe, est soumise à un mou

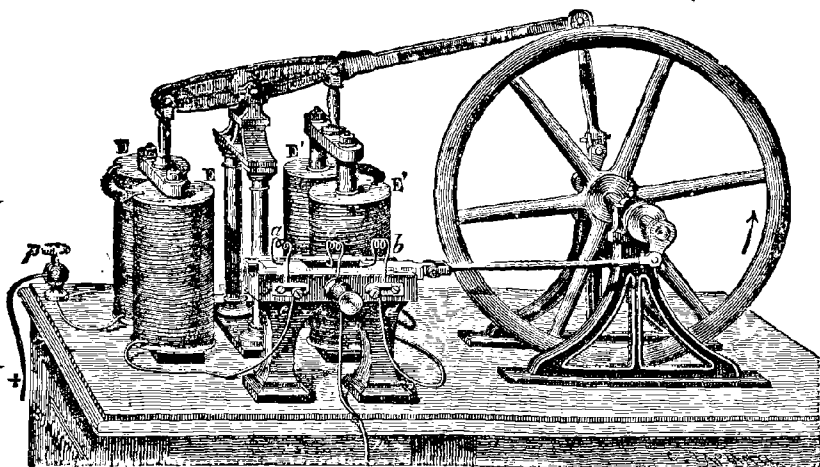


Fig. 379. — Moteur électrique de Bourbouze.

vement d'oscillation. Le professeur Henry, auquel l'enfance de l'électromagnétisme est redevable de tant d'inventions, a construit, en 1831, un moteur à balancier, oscillant alternativement d'avant en arrière sous l'action intermittente d'un électro-aimant. — Le moteur de Dal Negro (1833) appartenait également à cette catégorie ; dans ce moteur, une tige d'acier empruntait son mouvement d'oscillation à l'action des pôles d'un électro-aimant entre lesquels elle était placée et déterminait par son mouvement la rotation d'une manivelle à laquelle elle était reliée par une bielle. — Page introduisit un notable perfectionnement dans ce type de machine en employant pour électro-aimants des solénoïdes ou des bobines creuses ; des noyaux de fer alternativement attirés à l'intérieur de ces bobines prenaient un mouvement de

va-et-vient. Les moteurs de ce genre sont une admirable illustration de l'une des lois de l'électromagnétisme, formulée d'abord par Gauss et développée ensuite par Maxwell, relative à l'action d'un circuit sur un pôle magnétique, action qui tend à rendre maximum le flux de force traversant le circuit.

L'idée de Page a été ultérieurement développée par Bourbouze, qui construisit son curieux moteur (fig. 379) bien connu pour son analogie avec un ancien type de machine à vapeur à balancier. On y retrouve en effet le balancier, la manivelle, le volant, la bielle, et même l'excentrique et le tiroir ; mais, pour cylindres, on a quatre électro-aimants creux ; pour pistons, des noyaux de fer alternativement attirés et repoussés ; et pour tiroir, un commutateur, qui, en entraînant une paire de ressorts platinés sur une surface plane formée de trois lames de laiton séparées par deux bandes d'ivoire isolantes, renverse à chaque impulsion le sens des courants dans les bobines des électro-aimants. Cette machine est extrêmement ingénieuse ; mais, au point de vue du rendement, elle est bien inférieure à tous les moteurs modernes. On ne peut malheureusement pas, en effet, assimiler la conception des machines dynamo-électriques à celle des machines à vapeur.

On doit encore à M. Froment une autre classe de moteurs électriques aujourd'hui abandonnés, dans laquelle des barreaux de fer doux parallèlement disposés à la périphérie d'un tambour, suivant ses génératrices, sont attirés, l'un après l'autre, par un ou plusieurs électro-aimants déterminant ainsi la rotation continue du tambour.

Enfin, parmi les différentes classes historiques de moteurs, on peut citer un type dans lequel la partie mobile est renfermée dans un bâti en fer avec lequel elle n'est pas concentrique et dont elle s'approche successivement dans son mouvement de rotation. De petits moteurs, basés sur ce principe de « rapprochement oblique », ont été imaginés par Wheatstone et longtemps employés à faire tourner des tubes de Geissler et à effectuer d'autres expériences exigeant peu de puissance mécanique.

Plus récemment, M. Trouvé et autres ont cherché à appliquer ce principe à des moteurs de dimensions supérieures ; mais le résultat n'a pas répondu à cette conception un peu ambitieuse ; il vaudrait mieux en effet rapprocher l'armature des pièces polaires de l'électro-aimant.

Il est impossible, dans les limites de cet ouvrage, de passer en revue le dixième seulement des nombreuses découvertes et inventions, ou des intéressantes et curieuses machines qui ont marqué les diverses

étapes de la question ici envisagée. On pourrait dire comment Page, après avoir inventé sa machine en 1834, réussit à construire en 1852 un moteur d'assez grandes dimensions pour actionner une scie circulaire et un tour. La place manque pour décrire le moteur électrique de Davidson, qui, en 1842, lui permit de faire marcher une voiture à la vitesse de 6,5 kilomètres environ à l'heure, entre Édimbourg et Glasgow. Une machine de 10 chevaux a été aussi construite en 1849, à Liverpool, par Soren Hjørth¹.

D'autres inventions concernant le même sujet sont mentionnées dans les Notes historiques au début de cet ouvrage. — Mais, bien que l'invention de la bobine en navette de Siemens, en 1855, et celle de l'induit en anneau de Pacinotti, en 1864, aient fait faire deux grands pas à la question, elle ne prit un réel essor qu'après l'introduction dans le commerce de la machine Gramme en 1871. Alors seulement les ingénieurs commencèrent à comprendre comment on pouvait employer deux de ces machines, l'une comme génératrice, l'autre comme réceptrice ou moteur, à transmettre la puissance le long d'une ligne conductrice. La dynamo moderne, avec ses deux organes distincts, l'inducteur et l'induit, a remplacé tous les anciens types de moteurs.

Tous les essais antérieurs d'application des moteurs électriques n'avaient abouti à rien, pour deux raisons : d'abord, à cette époque, on ne connaissait aucun moyen économique de produire les courants électriques ; on n'admettait d'ailleurs pas encore la grande loi physique de la conservation de l'énergie, et l'on ne pouvait prévoir ses conséquences de première importance en ce qui touche la théorie des machines électriques.

Tant que les piles voltaïques ont été les seules sources pratiques de courants électriques, on n'a pu espérer une application économique des moteurs électriques : — Une pile voltaïque, dans laquelle les courants électriques sont produits par la dissolution du zinc dans l'acide sulfurique, est en effet une source d'énergie très dispendieuse. Sans parler du prix de l'acide, le zinc — qui est le véritable combustible de la pile

¹ On trouvera une excellente analyse des formes primitives du moteur électrique, tant en Europe qu'en Amérique, dans l'ouvrage de Martin et Wetzler *The Electric Motor and its Applications*, 3^e édition, 1891. Le lecteur qu'intéresse ce sujet consultera également avec fruit le travail sur *l'Electro-Magnetism as a Motive Power*, du regretté R. Hunt, dans les *Proc. Inst. Civil Engineers*, XVI, avril 1857, avec la discussion qui en a suivi l'exposé et à laquelle ont pris part le professeur W. Thomson (aujourd'hui lord Kelvin), M. (aujourd'hui sir William) Grove, le professeur Tyndall, M. Cooper, M. Smee, et M. Robert Stephenson. Il lira aussi utilement l'ouvrage de Kapp, *The Electric Transmission of Power* (*Transmission électrique de l'Énergie*, traduction française par E. Boistel).

— coûte plus de vingt fois autant que le charbon, tout en étant un combustible bien inférieur, car, tandis qu'un gramme de zinc développe une quantité de chaleur équivalente à un travail de 550 kilogrammètres environ¹, un gramme de charbon en fournit à peu près l'équivalent de 3 383 kilogrammètres.

On avait cependant constaté un fait, très décourageant en apparence, et qui, s'il eût été interprété logiquement selon le principe de la conservation de l'énergie, se fût au contraire présenté comme plein d'encouragements : — En plaçant un galvanomètre en circuit avec le moteur électrique et la pile, on observait en effet que, pendant le mouvement du moteur, la pile était impuissante à faire passer dans les fils un courant égal à celui qui les traversait quand le moteur était au repos. Plus le moteur tournait rapidement, plus le courant s'affaiblissait. Or, deux causes seulement peuvent s'opposer au passage d'un courant dans un circuit; ce ne peut être qu'une résistance d'obstruction ou bien une force contre-électromotrice. On s'arrêta tout d'abord à l'idée que le moteur en mouvement offrait au passage du courant une résistance supérieure à ce qu'elle était quand il se trouvait au repos. Mais le génie de Jacobi² lui permit de reconnaître que la diminution de courant observée était due en réalité à ce que le moteur, par le fait même de sa rotation, commençait à fonctionner comme dynamo, pour son propre compte, et tendait à développer dans le circuit un courant de sens contraire à celui qui déterminait son mouvement. Plus rapide était son allure, plus était grande la force contre-électromotrice (ou « la force électromotrice de réaction ») développée. En réalité, le principe de la conservation de l'énergie exige qu'il en soit ainsi.

En poussant plus loin l'expérience, Joule³ trouva que l'action électrique contraire était proportionnelle à la vitesse angulaire du moteur et à l'aimantation de ses inducteurs.

¹ Le calcul suivant offre un moyen commode d'envisager la question économique au point de vue de la dépense de la pile voltaïque. Si l'on suppose que le moteur électrique convertisse toute l'énergie électrique de la pile, sans aucune perte, en énergie mécanique, la quantité de zinc consommée par cheval-heure sera presque exactement de 1 kilogramme divisé par la force électromotrice en volts de l'élément employé dans la pile.

² *Mémoire sur l'application de l'électromagnétisme au mouvement des machines*, par M. H. Jacobi (Postdam, 1835). A la page 45 de ce mémoire, Jacobi fait observer que le moteur, quand il est mis en rotation par le courant de la pile, devient, par le fait même de son mouvement, un appareil magnéto-électrique capable d'engendrer un courant de sens contraire dans le circuit; et c'est à cela qu'il attribue, avec juste raison, la limite de vitesse uniforme atteinte par le moteur.

³ *Annals of Electricity*, VIII. 219, 1842; et *Scientific Papers*, p. 47.

Deux points capitaux régissent la saine intelligence du fonctionnement des moteurs électriques : (1) la traction à laquelle l'induit est soumis, (2) sa force contre-électromotrice. Le premier de ces phénomènes consiste en ce que la force réelle d'entraînement, qui détermine la rotation de l'induit, est la traction exercée par le champ magnétique sur les fils de cet induit parcourus par le courant (ou, dans le cas d'induits profondément dentés, sur les dents en saillie) ; le second consiste en ce que l'induit, en tournant, développe une force contre-électromotrice par le fait que les fils dont il est recouvert coupent, dans leur mouvement, les lignes magnétiques.

Traction déterminant le mouvement.

Nous avons donné au Chapitre V, à propos des actions mécaniques dans les induits, l'explication de la traction exercée par un champ magnétique sur un conducteur portant un courant, ainsi que les calculs relatifs à sa grandeur. Dans une génératrice, la traction agit dans un sens qui s'oppose au mouvement ; c'est en fait une contre-force ou réaction contre la force d'entraînement. Dans un moteur, cette traction est elle-même la force d'entraînement et détermine la rotation.

Force contre-électromotrice.

Il faut se souvenir ici que, partout où, dans un circuit électrique, un courant circule dans une portion du circuit, siège d'une force électromotrice, ce courant développe ou reçoit de l'énergie selon que la force électromotrice agit *dans le sens* du courant ou *en sens contraire*. Ce point est mieux précisé par l'examen de la figure 380 représentant un circuit dont font partie une dynamo et un moteur. Les deux machines tournent dextrorsum et développent, par suite, une force électromotrice dirigée vers le haut, du balai inférieur au balai supérieur. Dans les deux cas, le balai supérieur est le balai positif. Mais, dans la dynamo ou génératrice, qui fournit l'énergie au circuit, la force électromotrice est dirigée dans le même sens que le courant ; tandis que, dans le moteur qui effectue du travail mécanique et où l'énergie électrique reçue se transforme, la force électromotrice développée est de sens opposé au courant. On conçoit aisément que cette réaction électrique soit une condition essentielle du fonctionnement du moteur.

On sait que, dans le cas inverse, quand on emploie de la puissance mécanique à actionner une dynamo susceptible d'engendrer elle-même

des courants, dès que ces courants prennent naissance, c'est-à-dire dès que la machine commence à effectuer un *travail électrique*, il y a immédiatement absorption d'une puissance beaucoup plus considérable que dans le cas où il n'est effectué aucun travail électrique. En d'autres termes, une réaction s'oppose à la force mécanique appliquée à la production d'un travail électrique. Or une réaction de sens contraire à une

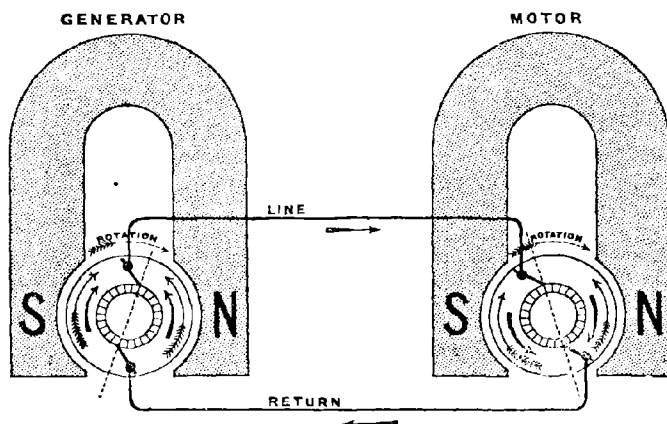


Fig. 380.

Generator = Génératrice.
Motor = Moteur ou Réceptrice.
Rotation = Sens de rotation.
Line = Ligne.
Return = Retour.

force mécanique peut s'appeler une « contre-force », et, d'un autre côté, quand on applique (par l'entremise d'une pile voltaïque, par exemple) une force électromotrice à la production d'un travail mécanique, on retrouve ici encore une réaction de sens contraire ; cette réaction, de sens contraire à une force électromotrice, est une « force contre-électromotrice ».

Rien n'est plus facile que de démontrer expérimentalement l'existence de cette force contre-électromotrice. Il suffit d'avoir à sa disposition un petit moteur à champ magnétique puissant¹, quelques éléments de pile de faible résistance intérieure et un galvanomètre. Les trois appareils étant reliés dans un même circuit, il suffit d'observer les déviations du galvanomètre quand on empêche le moteur de tourner et quand on le fait fonctionner sous des charges plus ou moins grandes.

¹ Un moteur de type courant : — Machine magnéto ou Moteur monté en Série.

Dans une expérience faite au Collège technique de Finsbury, sur un moteur Immisch à excitation indépendante, on a obtenu les chiffres suivants : —

<i>Vitesse.</i>	<i>Courant.</i>	<i>Vitesse.</i>	<i>Courant.</i>
Tours par minute.	Ampères.	Tours par minute.	Ampères.
0	20	160	7,8
50	16,2	180	6,1
100	12,2	195	5,1

Il paraît résulter de ces chiffres que, si on eût pu faire faire au moteur 261,5 tours par minute, le courant eût été réduit à zéro. Le courant de 5,1 ampères était nécessaire pour faire vaincre à l'induit les frottements, à la vitesse de 195 tours par minute.

L'existence de cette force contre-électromotrice est de la plus haute importance en ce qui concerne le fonctionnement de la machine dynamo comme moteur, car de l'existence et de la grandeur de cette force contre-électromotrice dépend le degré d'utilisation, dans un moteur donné, de l'énergie électrique qui lui est fournie sous forme de courant électrique.

En fait, cette force contre-électromotrice est un facteur absolument indispensable de la puissance du moteur, exactement au même degré que la vitesse, à laquelle, toutes choses égales d'ailleurs, elle est proportionnelle. Le lieutenant F. J. Sprague a proposé de lui donner le nom de « force électromotrice *motrice* » pour en bien préciser l'importance et la nécessité.

Dans l'étude de la dynamo comme génératrice, nous avons développé certaines considérations dont la mise en pratique a pour objet d'augmenter le rendement de ces génératrices. Il va de soi qu'une grande partie de ces considérations, telles que celles relatives à la suppression des résistances inutiles, des masses de fer dans les noyaux, etc., s'applique également aux moteurs ou réceptrices. Plus un moteur sera exempt de ces causes de pertes, meilleur sera son rendement.

Mais le rendement d'un moteur dans l'utilisation de l'énergie d'un courant ne dépend pas uniquement de son rendement propre ; il dépend encore d'un autre élément, savoir la relation entre la force électromotrice qu'il développe en tournant et la force électromotrice — ou pression électrique — sous laquelle lui est fourni le courant.

Un moteur qui, dans sa rotation, n'engendre lui-même qu'une *faible* force électromotrice ne peut pas, quelque bien conçu qu'il soit, être

un moteur économique ou à *bon rendement* quand il est alimenté par des courants sous *grande force* électromotrice. Une bonne machine à vapeur à basse pression ne « rend » pas davantage quand on lui fournit de la vapeur à haute pression, pas plus qu'une machine à haute pression, si bien construite qu'elle soit, ne peut atteindre un bon rendement quand on lui fournit la vapeur sous basse pression. Des considérations analogues s'appliquent aux dynamos employées comme moteurs. Ces machines doivent être alimentées par des courants sous force électromotrice appropriée à leur construction. Même avec un moteur parfait — ne présentant ni frottements ni résistance d'aucune espèce — on n'arriverait pas à un « bon rendement » ou à un résultat économique, si l'on n'observait la loi ci-dessus pour les conditions dans lesquelles le courant électrique doit lui être fourni.

THÉORIE ÉLÉMENTAIRE DE LA PUISSANCE FOURNIE PAR UN MOTEUR ÉLECTRIQUE

On peut démontrer mathématiquement que la manière dont un moteur parfait utilise l'énergie électrique du courant dépend du rapport entre la force contre-électromotrice développée dans l'induit de ce moteur et la force électromotrice du courant fourni par la pile qui l'alimente. — Il ne saurait exister de moteur transformant en travail utile la totalité du courant qu'il reçoit, car il est impossible de construire des machines sans résistance, et, toutes les fois qu'une résistance est opposée à un courant, une partie de l'énergie de ce courant est dépensée à échauffer le fil résistant. Soient W l'énergie électrique fournie dans un temps t à un circuit électrique par une pile ou une dynamo fonctionnant comme source d'énergie, et w la portion de cette énergie que prélève, dans le même temps t , le moteur, comme énergie utile, sur le circuit¹. Toute la portion de l'énergie fournie par le courant qui n'est pas utilisée par le moteur et transformée en travail utile est consommée en échauffement inutile des résistances. Cette perte sous forme

¹ Il est bien entendu que ce symbole w s'applique à la valeur du travail emprunté par le moteur *en tant que mesuré électriquement*. Ce travail n'apparaîtra cependant pas en totalité sous forme d'effet utile mécanique ; une partie en sera absorbée par les frottements mécaniques et une autre partie en production coûteuse de courants parasites dans les parties mobiles du moteur. La proportion dans laquelle w se manifeste sous forme de travail utile mécanique dépend du rendement *propre* du moteur, dont nous ne nous occupons pas ici. Dans tout ce qui va suivre, nous admettrons qu'il n'existe aucune cause de pertes de ce genre, c'est-à-dire que nous considérerons le moteur comme *parfait*.

de chaleur sera en conséquence égale à $W-w$, ce qui correspond à une perte de puissance égale à $P-p$, P et p étant respectivement les *watts* fournis et utilisés.

Mais, si l'on veut faire fonctionner le moteur dans les meilleures conditions d'économie, il est clair qu'il faut réduire autant que possible cette dissipation sous forme de chaleur, c'est-à-dire, en appliquant nos symboles, faire p autant que possible égal à P .

On verra mathématiquement que le rapport entre l'énergie ainsi utilisée et l'énergie totale dépensée est égal au rapport de la force contre-électromotrice du moteur à la force électromotrice totale de la pile qui l'alimente. (Afin d'éviter de compliquer les considérations générales ici développées par l'introduction, dans l'expression du rendement, de l'énergie consommée sous forme de chaleur dans les bobines d'électroaimants du moteur, nous supposons ici l'inducteur excité d'une façon indépendante.) Nous en donnerons plus loin la démonstration. — Appelons \mathcal{E} la force électromotrice totale sous laquelle la pile alimente le moteur, et E la force contre-électromotrice de ce dernier. La loi en question est exprimée par la relation suivante :

$$\frac{p}{P} = \frac{E}{\mathcal{E}}$$

Mais on peut aller plus loin. — Si l'on empêche le moteur de tourner, le courant sera, suivant la loi d'Ohm,

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Si les résistances en circuit sont constantes, le courant i , observé quand le moteur est en mouvement, sera inférieur au courant I correspondant à son état de repos. Or, d'après la loi d'Ohm, on sait que

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{R},$$

R étant la résistance totale du circuit ; par suite,

$$\frac{I - i}{I} = \frac{E}{\mathcal{E}} = \frac{p}{P},$$

d'où il résulte qu'on peut calculer le rendement avec lequel fonctionne le moteur d'après le rapport entre la diminution d'intensité du courant et l'intensité primitive. Cette loi mathématique du rendement étant formulée depuis quarante ans, il est singulier qu'elle ait été jusqu'à ces

derniers temps ignorée ou mal comprise, même dans un grand nombre d'ouvrages des plus autorisés. — On l'a généralement confondue avec une autre loi découverte par Jacobi, qui n'est nullement une loi de rendement, mais une loi de travail maximum dans un temps donné. Une machine ne fonctionne généralement pas dans les meilleures conditions d'économie quand elle marche à toute volée, en effectuant le plus de travail dans le moindre temps possible ; il en est de même d'un moteur électrique : ses meilleures conditions d'économie et de rendement ne correspondent pas au développement de sa puissance maximum. Et cependant, c'est étrange à dire, il était courant, il y a une dizaine d'années, de voir la loi de puissance maximum due à Jacobi comprise comme loi de rendement maximum. Un grand nombre d'électriciens se faisaient en conséquence cette idée fautive qu'un moteur électrique ne pouvait jamais avoir un rendement supérieur à 50 p. 100.

La véritable loi du rendement a été clairement établie par Thomson en 1851 et est reconnue dans un travail de Joule remontant à peu près à la même date. Voir également *Steam Engine* (La Machine à vapeur), de Rankine, page 546. Le professeur Anthony, autrefois attaché à l'Université Cornell, informe l'auteur qu'il a parlé de la véritable loi il y a plus de quinze ans. Jacobi paraît avoir très clairement compris que sa loi était une loi de puissance maximum, mais n'avoir pas compris qu'elle n'était pas une loi de véritable rendement économique. Dans un passage (*Annales de Chimie et de Physique*, t. XXXIV. 1852, p. 480), il dit : — « Le travail mécanique maximum, ou plutôt l'effet économique, n'est nullement compliqué par ce que M. Müller appelle les circonstances spécifiques des moteurs électro-magnétiques ». — Cependant, bien qu'il y ait là une confusion apparente entre ces deux lois différentes, Jacobi, dans une partie antérieure du même mémoire (p. 466), dit : — « En divisant la quantité de travail par la dépense (de zinc), on obtient une expression très importante dans la mécanique industrielle : c'est l'effet économique, ou ce que les anglais appellent *duty* ». Ici encore il y a une singulière confusion. La définition est parfaite ; mais l'« effet économique » n'est pas la même chose que la puissance maximum. Ainsi que nous l'avons dit, la loi de Jacobi n'est pas une loi de rendement maximum, mais une loi de puissance maximum, et c'est là que git l'erreur. — Ce singulier conflit d'idées n'est pas d'ailleurs le seul à relever dans ce mémoire ; Jacobi y parle constamment du *travail* comme le produit d'une force par une vitesse, au lieu du produit d'une force par un déplacement. Cette même confusion — assez commune chez les écrivains du Continent — se rencontre dans les commentaires de la loi de Jacobi donnés dans la *Théorie mécanique de la Chaleur* de Verdet, dans le *Lehrbuch der Physik* de Müller, et même dans le *Galvanismus* de Wiedemann. Or le produit d'une force par une vitesse n'est pas du travail, mais un travail divisé par un temps, c'est-à-dire le taux de débit d'énergie ou « la puissance ». Cette erreur étant des plus répandues, il importe de réagir contre elle pour l'empêcher

de se propager davantage. — Jacobi commet une autre erreur curieuse dans le mémoire auquel nous faisons allusion ci-dessus (p. 463), en supposant que l'intensité du courant ne peut devenir nulle que lorsque le moteur tourne à *une vitesse infinie*. Le courant est réduit à zéro, comme chacun sait, quand la force contre-électromotrice du moteur est égale à celle de l'alimentation extérieure; et, cette dernière étant finie, la vitesse du moteur, si ses électro-aimants possèdent une aimantation indépendante, n'a pas besoin non plus d'être infinie. — Cette erreur qu'on rencontre également dans Verdet paraît avoir jeté ce dernier hors de la voie de la véritable loi du rendement, et l'avoir fait retomber sur la loi de Jacobi.

Dans un mémoire publié par les *Annales des Mines* de janvier 1879, Achard établit très nettement la distinction entre la puissance maximum et le rendement d'un moteur électrique et fait ressortir comment, la première tendant vers un maximum, le second tend vers zéro. Dans le courant d'avril de la même année, sir C. W. Siemens et sir W. Thomson mirent le fait en évidence devant une Commission du Parlement anglais, sir W. Thomson montrant qu'il était possible de transmettre 21 000 chevaux à travers un fil de cuivre de 12,7 millimètres de diamètre, à 500 kilomètres de distance, à la condition d'employer une différence de potentiel de 80 000 volts. Quelques mois après, les professeurs Elihu Thomson et Houston, prenant pour point de départ les théories de sir W. Thomson et de sir W. Siemens, émirent l'idée qu'on pouvait arriver à des résultats économiques en reliant en série plusieurs dynamos à l'une des extrémités de la ligne, et plusieurs moteurs à l'autre, de manière à fonctionner avec de faibles courants sous des forces électromotrices élevées. Les avantages d'un haut voltage, tant pour la génératrice que pour le moteur, aux deux extrémités de la ligne n'ont jamais été mieux ni plus clairement exposés que par le professeur W. E. Ayrton, dans sa conférence sur la « Transmission électrique de la puissance », devant l'Association Britannique, à Sheffield, en août 1879. Il proposait d'obtenir ces hauts voltages en augmentant, non pas le magnétisme, mais la vitesse, et en excitant d'une façon indépendante la génératrice aussi bien que le moteur. L'économie réalisée quand on fait tourner le moteur à une grande vitesse, avec un rendement croissant en même temps que cette vitesse, a été également mise en relief par le Dr Werner von Siemens dans son adresse au Congrès des Physiciens en septembre 1879 (voir Werner von Siemens, *Wissenschaftlichen und Technischen Arbeiten*, t. II, p. 374).

La loi de Jacobi relative à la puissance maximum d'un moteur électrique, alimenté par des courants provenant d'une source de force électromotrice donnée, s'énonce de la manière suivante : *La puissance mécanique développée par un moteur est maximum quand ce moteur tourne à une vitesse telle que l'intensité du courant est réduite à la moitié de ce qu'elle serait si le moteur était maintenu au repos*. Ce fait implique naturellement que la force contre-électromotrice du moteur est égale à la moitié de la force électromotrice fournie par la pile ou la génératrice. Dans ces conditions, la moitié seulement

de l'énergie fournie par la source extérieure est utilisée ; l'autre moitié est dissipée en chaleur dans le circuit. Si la loi de Jacobi était réellement la loi du rendement, aucun moteur, si parfait qu'il fût par lui-même, ne pourrait convertir en travail effectif plus de 50 p.100 de l'énergie électrique qui lui est fournie.

Le docteur Siemens, à qui revient l'honneur d'avoir montré le premier la véritable signification physique d'expressions mathématiques regardées avant lui comme de pures abstractions, a démontré, il y a quelques années, qu'en pratique une dynamo employée comme moteur pouvait être utilisée de manière à rendre plus de 50 p.100 de l'énergie à elle fournie sous forme de courant. Elle peut, par le fait, travailler avec un meilleur rendement si on ne lui demande pas d'effectuer aussi rapidement un travail donné, en consommant autant de courant. En réalité, si le moteur est disposé de manière à effectuer un travail à un taux inférieur au maximum de puissance qu'il pourrait développer, c'est-à-dire s'il est actionné de manière à produire moins de kilogrammètres par tour, tout en tournant à une allure plus rapide, il aura un meilleur rendement ; en d'autres termes, tout en développant moins de puissance, il consommera encore moins de puissance électrique, et le rapport du travail utile à l'énergie consommée sera plus voisin de l'unité que précédemment. On peut encore, au lieu d'activer son allure, arriver au même résultat en renforçant ses électro-aimants.

THÉORIE DES MOTEURS

Soient h la force électromotrice dans les conducteurs qui fournissent le courant au moteur quand celui-ci est au repos, et i l'intensité du courant qui passe à un moment quelconque ; la puissance électrique totale dépensée P , ou quotient du travail électrique total par le temps, sera exprimée en watts par le produit de la totalité des volts en œuvre par la totalité des ampères, ou : —

$$\text{(Watts totaux) } P = \mathcal{E}i = \mathcal{E} \frac{\mathcal{E} - E}{R}. \quad [I.]$$

Le moteur étant alors mis en mouvement, une partie de cette puissance électrique est dépensée à produire de la puissance mécanique, et le reste se dissipe en échauffement des fils du circuit. La portion utile peut en être aussi exprimée comme le produit des volts développés par

l'induit même du moteur (sa force contre-électromotrice) multipliés par les ampères, ou : —

$$\text{(Watts utiles)} \quad p = Ei = E \frac{(\mathcal{E} - E)}{R}. \quad [\text{II.}]$$

Toute l'énergie qui n'est pas ainsi utilisée est consommée en échauffement des résistances.

On peut ainsi écrire : —

Puissance fournie = puissance utilisée + puissance dissipée en échauffement,

ou : —

$$P = p + \text{watts dissipés en échauffement.}$$

Mais, d'après la loi de Joule, la perte de puissance par échauffement déterminée par le passage du courant d'intensité i à travers une résistance R est représentée par

$$i^2 R \text{ (watts).}$$

En substituant cette valeur dans l'équation précédente, on a : —

$$P = p + i^2 R.$$

La comparaison des équations [I.] et [II.] conduit à la suivante : —

$$\frac{p}{P} = \frac{E (\mathcal{E} - E)}{\mathcal{E} (\mathcal{E} - E)};$$

ou finalement :

$$\frac{p}{P} = \frac{E}{\mathcal{E}}. \quad [\text{III.}]$$

Telle est, en réalité, la loi mathématique du rendement, si longtemps méconnue, jusqu'au jour où le D^r Siemens en montra la signification. Il n'est que juste de lui donner le nom de *Loi de Siemens*.

Le rapport $\frac{p}{P}$ étant la mesure du rendement du moteur, l'équation ci-dessus montre qu'on peut donner à ce rendement une valeur aussi voisine que l'on veut de l'unité, en réglant soit l'aimantation des inducteurs, soit la vitesse du moteur, de telle sorte que E soit très voisin de \mathcal{E} .

Mais la puissance utilisée est égale à la différence entre la puissance totale fournie et la portion qui en est dissipée en échauffement ou, algébriquement : —

$$p = \mathcal{E}i - i^2 R. \quad [\text{IV.}]$$

Pour trouver la valeur de i donnant la valeur *maximum* de p , on n'a qu'à prendre la différentielle de cette dernière et à l'égaliser à zéro¹ :

$$\frac{dp}{di} = \mathcal{E} - 2iR = 0,$$

d'où l'on tire :

$$i = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}}{R}.$$

Mais, d'après la loi d'Ohm, $\frac{\mathcal{E}}{R}$ est la valeur du courant quand le moteur est au repos. On voit immédiatement par là que, pour fournir sa puissance maximum, le moteur doit tourner à une vitesse telle que le courant soit réduit à la moitié de la valeur qu'il aurait s'il était au repos. En réalité, cette démonstration est celle de la loi de Jacobi relative au maximum de puissance. Mais du moment que

$$i = \frac{\mathcal{E} - E}{R} = \frac{1}{2} \frac{\mathcal{E}}{R},$$

on a, comme conséquence,

$$\mathcal{E} - E = \frac{1}{2} \mathcal{E},$$

¹ La démonstration peut en être faite sans calcul différentiel, quoique moins simplement, de la manière suivante : — écrivons l'équation [IV.] sous cette nouvelle forme :

$$i^2 R - \mathcal{E} i + p = 0.$$

En résolvant cette équation comme une équation ordinaire du second degré dans laquelle i est l'inconnue, on a

$$i = \frac{\mathcal{E} \pm \sqrt{\mathcal{E}^2 - 4 R p}}{2 R}.$$

Pour en déduire la valeur de i qui correspond à la valeur maximum de p , il suffit de se rappeler qu'une quantité négative ne peut avoir de racine carrée, et que, par suite, la plus grande valeur possible de p sera déterminée par la condition

$$4 R p = \mathcal{E}^2,$$

car alors le terme sous le radical s'annulera. Cette condition étant remplie, on en tire pour la valeur de i

$$i = \frac{\mathcal{E}}{2 R},$$

c'est-à-dire que i sera réduit à la moitié de sa valeur primitive.

ou

$$\frac{E}{\mathcal{E}} = \frac{1}{2},$$

d'où il résulte également

$$\frac{p}{P} = \frac{1}{2},$$

c'est-à-dire que le rendement n'est que de 50 p. 100 quand le moteur fonctionne dans les conditions de puissance maximum ou qu'il effectue son travail au taux de débit maximum.

Il n'est pas sans intérêt de rappeler ici le cas tout à fait analogue qui se présente dans le calcul des courants fournis par une pile voltaïque. Tout le monde connaît la règle qui préside au groupement d'une pile composée d'un nombre d'éléments donné ; chacun sait qu'elle fournit son courant maximum à travers une résistance extérieure donnée quand ses éléments sont groupés de telle façon que la résistance intérieure de la pile est aussi voisine que possible de la résistance extérieure. Mais cette règle, qui est vraie pour le courant maximum (et, par suite, pour le taux maximum de consommation du zinc d'une pile), n'est pas applicable quand on cherche le groupement le plus économique ; car, si la résistance extérieure et la résistance intérieure sont égales, la moitié de l'énergie du courant est dissipée en échauffement des éléments, et la moitié seulement en est utilisable dans le circuit extérieur. Si l'on cherche à réaliser la plus grande économie, il faut grouper les éléments de manière à avoir une résistance intérieure bien inférieure à la résistance extérieure. On n'aura pas, il est vrai, un courant aussi intense, et les zincs se consumeront plus lentement ; mais on utilisera une proportion beaucoup plus considérable de l'énergie, et il s'en dissipera relativement beaucoup moins en échauffement des éléments de la pile. L'économie maximum correspondra naturellement à une résistance extérieure infiniment grande relativement à la résistance intérieure. L'énergie totale du courant sera alors utilisée dans le circuit extérieur, et il n'en sera pas inutilement dépensé dans la pile ; mais il faudra un temps infiniment long pour obtenir, dans ce cas extrême, une quantité déterminée de travail. — Le même mode de raisonnement s'applique exactement aux machines dynamos employées comme génératrices, la résistance de la partie mobile du circuit correspondant à la résistance intérieure des éléments de pile. La condition de bonne économie exige que la résistance de l'induit soit très faible en comparaison de celle du circuit extérieur.

[Rien ne nous semble mieux capable de faire comprendre au lecteur les considérations précédentes que de mettre sous ses yeux les courbes suivantes empruntées, avec l'autorisation de l'auteur, au *Traité de l'Energie électrique* de M. Hospitalier.

Les courbes de la figure 381 montrent comment varient les différents

facteurs de la circulation électrique pour un élément (de pile) générateur théorique idéal, qu'il appelle élément volt-ohm ($E = 1$ volt; $R = 1$ ohm). Les courbes sont calculées dans le système électromagnétique C. G. S. pratique (volt, ohm, ampère, watt).

Les résistances extérieures ou utiles R sont portées en abscisses, les différents éléments correspondants en ordonnées. Il résulte de l'examen

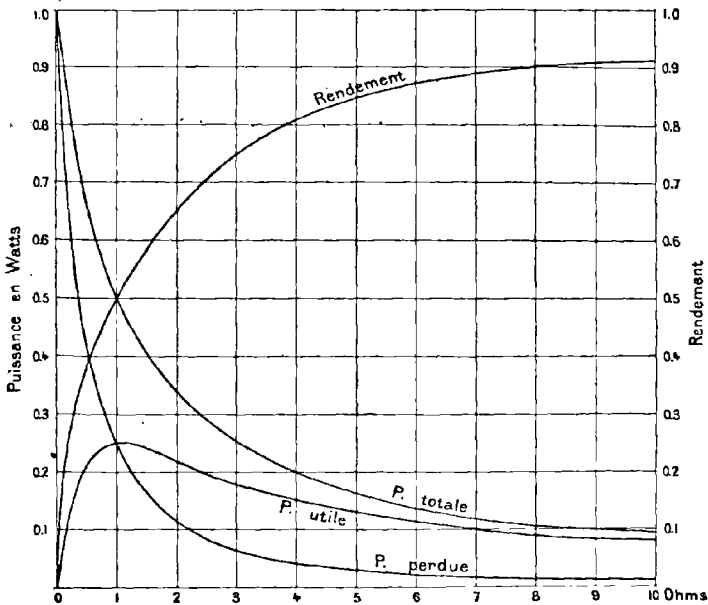


Fig. 381. — Variation des éléments de fonctionnement d'un générateur électrique (Volt-Ohm) en fonction de la résistance extérieure.

de ces courbes qu'un générateur électrique produit sa puissance utile maximum lorsque l'intensité du courant est égale à la moitié de l'intensité en court-circuit. C'est en circuit ouvert ou infini que le rendement est maximum, mais le générateur produit alors un courant nul. Sa puissance utile est nulle. Dans le cas où l'élément débite sa puissance utile maximum, la différence de potentiel utile e n'est que la moitié de la force électromotrice E .

La figure 382 se réfère au fonctionnement d'un moteur dans un transport d'énergie dont il sera question plus loin. En désignant par les indices 1 et 2 les constantes respectives des machines fonctionnant comme génératrice et réceptrice, on voit que, si l'on fait tourner la génératrice à vitesse angulaire ω_1 constante, la vitesse angulaire ω_2 du ou

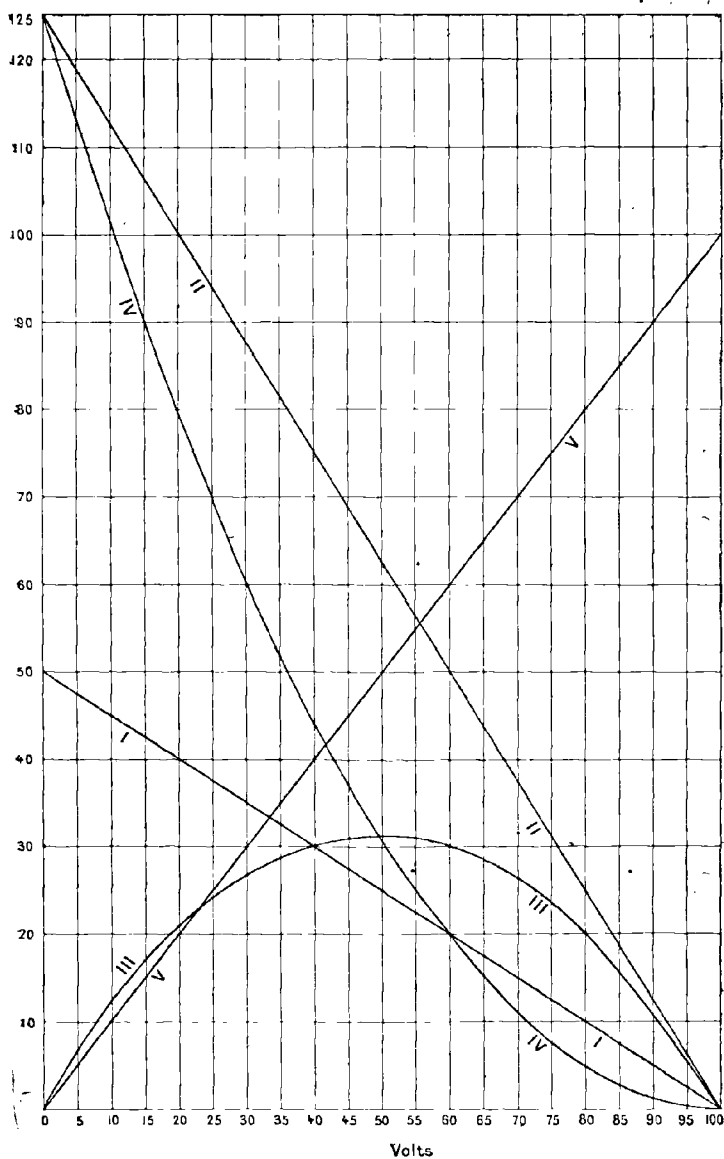


Fig. 382. — Conditions de fonctionnement d'une transmission de puissance théoriquement parfaite.

I. Intensité. — II. Puissance dépensée. — III. Puissance produite. — IV. Puissance perdue. — V. Rendement.

des moteurs croissant depuis zéro jusqu'à une valeur pour laquelle

$E = \mathcal{E}$, et si l'on porte en abscisses les valeurs de E et en ordonnées les différentes valeurs de i , $\mathcal{E}i$, Ei , et η , la puissance utile passe par un maximum correspondant à $E = \frac{\mathcal{E}}{2}$, à un rendement $\eta = 0,5$ et à une intensité égale à la moitié de celle qui traverse le circuit pour $\omega_2 = 0$. Le rendement η , nul pour $\omega_2 = 0$, va en augmentant avec ω_2 et devient égal à 1 lorsque ω_2 est tel que $E = \mathcal{E}$. La puissance utile est alors nulle, ainsi que le courant. La différence entre la puissance $\mathcal{E}i$ produite par la génératrice et la puissance recueillie sur le moteur est dépensée en échauffement dans le circuit, et a pour mesure Ri^2].

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES LOIS DES MOTEURS

Plusieurs représentations graphiques ont été imaginées pour rendre ces faits sensibles à l'œil; l'une d'elles permet, par un seul diagramme, de démontrer graphiquement à la fois la loi de puissance maximum de Jacobi, et la loi du rendement¹.

Représentons par AB , figure 383, la force électromotrice \mathcal{E} , sous laquelle est fourni le courant. Sur AB construisons un carré $ABCD$ et menons la diagonale BD . Mesurons maintenant, à partir du point B , le long de la ligne AB , la force contre-électromotrice E du moteur. La longueur de cette portion de ligne augmentera avec la vitesse du moteur. Admettons que E atteigne la valeur BF , et cherchons quelles seront l'intensité du courant et la puissance correspondantes, ainsi que la puissance développée par le moteur. Complétons d'abord la construction de la manière suivante :

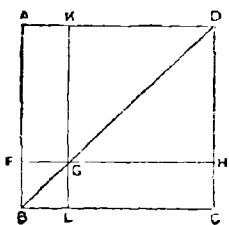


Fig. 383.

Par le point F , menons FGH parallèle à BC , et, par le point G , KGL parallèle à AB . Alors, la force électromotrice employée dans le circuit à la production du courant est $\mathcal{E} - E$, que l'on peut représenter par l'une des lignes AF , KG , GH ou LC . Or, la puissance électrique dépensée est $\mathcal{E}i$, et, puisque $i = \frac{\mathcal{E} - E}{R}$,

on peut écrire

$$\mathcal{E}i = \mathcal{E} \frac{\mathcal{E} - E}{R},$$

¹ Voir un Mémoire de l'Auteur dans le *Philosophical Magazine* de février 1883.

et la puissance restituée par le moteur est, *en watts*,

$$E \frac{\mathcal{E} - E}{R}$$

R étant constant, on peut comparer entre elles ces deux valeurs sous la forme

$$\mathcal{E} (\mathcal{E} - E)$$

et

$$E (\mathcal{E} - E).$$

Or, la surface du rectangle

$$AFHD = \mathcal{E} (\mathcal{E} - E),$$

et celle du rectangle

$$GLCH = E (\mathcal{E} - E).$$

Le rapport de ces deux surfaces sur le diagramme est le rendement d'un moteur parfait, dans la condition d'alimentation électrique sous une force électromotrice constante donnée.

Considérons la figure 384, dans laquelle ces deux surfaces sont ombrées. Cette figure représente un cas où le moteur est trop chargé et ne peut tourner que très lentement, de telle sorte que la force contre-électromotrice E est très petite comparativement à \mathcal{E} . Ici, la surface qui représente la puissance dépensée est très grande, tandis que celle représentant la puissance utile restituée par le moteur est très petite. Le rendement est naturellement très faible. Les deux tiers, et même plus, de l'énergie totale sont dissipés sous forme de chaleur.

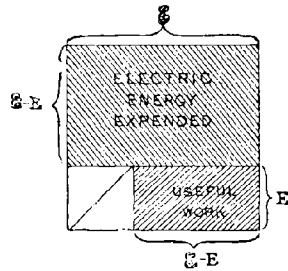


Fig. 384. — *Electric Energy Expended* = Puissance électrique dépensée. — *Useful Work* = Puissance utile.

Nous avons admis jusqu'ici que le rendement d'un moteur (fonctionnant sous force électromotrice extérieure constante) pouvait se mesurer électriquement. Mais il n'existe pas de moteur qui transforme réellement en travail mécanique utile la totalité de l'énergie électrique qu'il absorbe, une partie de cette énergie étant consommée en frottements, une autre en réactions électromagnétiques coûteuses entre les parties fixe et mobile du moteur. Ce que l'on désigne ainsi comme travail

utile est le travail réellement fourni à l'induit pour l'entraîner. Il appartient à l'ingénieur de voir, d'après son expérience, quelle est la petite fraction qu'il doit en déduire pour les frottements dans les coussinets, les courants parasites, l'hystérésis, etc. Cependant, si l'on considère le moteur comme une machine *parfaite* (dépourvue de frottements, exempte de courants parasites nuisibles, tournant sans trépidations, ne donnant pas d'étincelles aux balais-collecteurs, etc.), on peut prendre la puissance mécanique comme précisément égale à la puissance électrique réellement fournie à l'induit. Un appareil électrique « parfait » de ce genre serait, comme l'appareil thermique idéal « parfait » de Carnot, absolument réversible. Dans l'appareil thermique de Carnot on suppose que la totalité de la chaleur réellement absorbée dans le cycle d'opérations est convertie en travail utile ; et dans ce cas le rendement est le rapport de la chaleur absorbée à la chaleur totale dépensée. Ce rendement de l'appareil thermique parfait peut, comme on le sait, être exprimé en fonction de deux températures absolues, savoir : celle de la source chaude et celle de la source froide de l'appareil. L'appareil de Carnot est ainsi réversible idéalement ; c'est-à-dire capable de reconverter en chaleur le travail mécanique.

La loi mathématique du rendement d'une machine électrique parfaite représentée par la construction précédente est également un cas idéal et le rendement peut aussi être exprimé, étant données les constantes afférentes à un cas spécial, comme une fonction de deux forces électromotrices. Nous reviendrons un peu plus loin sur cette comparaison.

Loi de Puissance maximum.

Considérons maintenant la surface GLCH du diagramme (fig. 385),

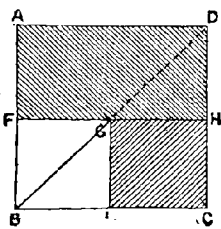


Fig. 385. — Illustration géométrique de la loi de puissance maximum de Jacobi.

qui représente la puissance utilisée dans le moteur. L'aire de cette surface variera avec la position du point G et sera maximum quand G sera équidistant de B et de D ; car, de tous les rectangles qu'on peut inscrire dans le triangle BCD, le carré est celui qui a la plus grande surface (fig. 385).

Mais si G est équidistant de B et D, le rectangle GLCH aura une surface exactement égale à la moitié de celle du rectangle AFID ; c'est-à-dire que la puissance utile sera égale à la moitié de la puissance dépensée. Quand il en est ainsi, la force contre-électromotrice réduit le

courant à la moitié de l'intensité qu'il aurait si le moteur était au repos ; c'est l'expression de la loi de Jacobi relative au rendement d'un moteur effectuant son travail dans les conditions de puissance maximum. F sera alors aussi équidistant de B et de A, ce qui montre que

$$E = \frac{1}{2} \mathcal{E}.$$

Loi du Rendement maximum.

Considérons, au contraire, ces deux rectangles quand le point G s'approche indéfiniment de D (fig. 386). On sait par la géométrie ordinaire que le rectangle GLCH est égal au rectangle AFGK. La surface du carré KGHD, qui est l'excédent de AFHD sur AFGK, doit, par suite, représenter la portion de la puissance électrique consommée à échauffer les résistances du moteur. Pour que le rendement soit maximum, la dépense en échauffement doit être minimum.

Dans la figure 383, ce coin carré, qui représente la perte sous forme de chaleur, était énorme. Dans la figure 385, il correspondait exactement à la moitié de la puissance dépensée. Dans la figure 386, il n'en est guère qu'un huitième. On peut évidemment rendre la perte en échauffement aussi petite que l'on veut ; il suffit

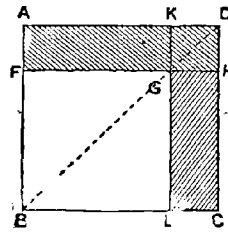


Fig. 386. — Illustration géométrique de la loi du rendement maximum.

de choisir le point F très voisin de A. Le rendement sera maximum quand cette perte sera minimum. Le rapport des surfaces GLCH et AFHD, qui représente le rendement, ne peut donc devenir égal à l'unité que quand le carré KGHD devient infiniment petit, — c'est-à-dire quand le moteur tourne assez vite pour que sa force contre-électromotrice E ne diffère de \mathcal{E} que d'une quantité infiniment petite.

Il est clair, d'ailleurs, que, si le diagramme doit représenter un rendement quelconque donné, — 90 p. 100 par exemple —, le point G doit être choisi de telle sorte que la surface GLCH = 9 dixièmes de la surface AFHD ; ou bien encore G doit être pris aux 9 dixièmes, à partir de B, de la longueur totale BD. Ceci implique que E doit être égal aux 9 dixièmes de \mathcal{E} , ou que le moteur doit tourner à une vitesse qui réduise le courant au dixième de ce qu'il serait si le moteur était au repos. Ainsi se vérifie géométriquement la loi du rendement maximum. — S'il y a perte dans la ligne, cette loi doit, comme l'ont fait remarquer le pro-

fesseur Oliver Lodge et M. G. Kapp¹, subir une modification, car, plus la force contre-électromotrice du moteur sera élevée, plus le potentiel de la ligne sera élevé ainsi que la perte par dérivation.

D'ailleurs, si le moteur n'est pas un moteur « parfait », mais un moteur dont le rendement intrinsèque, ou *rendement propre*, soit connu on peut représenter sur le diagramme la puissance mécanique réelle effectuée par le moteur en retranchant simplement du rectangle GLCH la fraction de puissance perdue en frottements, etc. De même, dans le cas où l'énergie électrique dépensée a été engendrée dans une machine dynamo-électrique dont le rendement intrinsèque est connu, la puissance mécanique totale dépensée peut être représentée par addition à la surface AFHD de la proportion consommée en frottements inutiles, etc. Pour

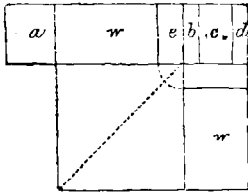


Fig. 387.

rendre le diagramme encore plus explicite, on peut diviser la surface KGHD en bandes proportionnelles aux diverses résistances du circuit; les surfaces de ces différentes bandes représenteront alors la chaleur développée en pure perte dans les parties respectives du circuit. Ces conditions sont réalisées à titre d'exemple dans la figure 387, qui représente

un transport d'énergie entre deux dynamos ayant chacune un rendement propre supposé de 80 p. 100 et une résistance de 500 ohms, à travers une ligne d'une résistance égale à 1000 ohms, la force électromotrice de la machine employée comme génératrice étant de 2 400 volts, et celle de la machine servant de réceptrice de 1 600 volts.

La surface supérieure entière représente la puissance mécanique totale consommée. Désignons-la par 100. Elle est dépensée de la manière suivante : $a = 20$, perte en frottements, etc., dans la génératrice ; $b = 6 \frac{2}{3}$, perte en chaleur dans la génératrice ; $c = 13 \frac{1}{3}$, perte en chaleur dans la ligne ; $d = 6 \frac{2}{3}$, perte en chaleur dans la réceptrice ; $e = 10 \frac{2}{3}$, perte en frottements dans la réceptrice ; $w = p = 42 \frac{2}{3}$ est le quantum recueilli en puissance mécanique utile.

Quand on tient ainsi compte des pertes mécaniques, il est évident qu'on obtient le rendement maximum pour une certaine valeur de E inférieure à \mathcal{E} . Cette question est examinée plus loin au Chapitre XXVI, à propos de la Transmission électrique de l'énergie.

On voit maintenant ce qu'il y a à faire pour obtenir un rendement donné de tant pour cent. — Supposons qu'un courant soit fourni aux

¹ Voir Kapp, *Transmission électrique de l'énergie* (1888), p. 191.

conducteurs sous 100 volts ; pour en utiliser 90 p. 100, il faut employer comme moteur une dynamo qui, en fonctionnant à sa vitesse et à sa puissance de régime, développe une force électromotrice de 90 volts.

On peut étendre la méthode graphique à deux autres cas.

Supposons que \mathcal{E} ne soit plus pris comme constante, mais qu'on se donne comme telle la puissance demandée au moteur. Dans ce cas, on peut mettre l'équation [II.], page 547, sous la forme

$$E (\mathcal{E} - E) = pR.$$

Cette équation est celle de la courbe PHQ (fig. 388), dans laquelle les valeurs de \mathcal{E} sont portées en abscisses et celles de E en ordonnées. On voit immédiatement d'après cette courbe qu'il existera une certaine valeur minimum de \mathcal{E} suffisante pour fournir au moteur la puissance demandée. L'allure de cette courbe est telle qu'elle passe par le coin H de toutes les surfaces homologues à GLCH situées au-dessous de la diagonale du carré. De toutes

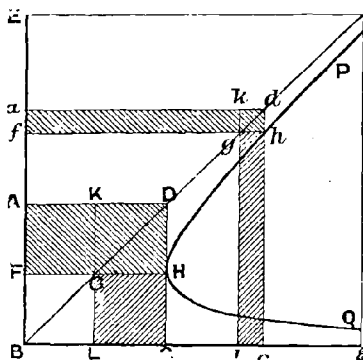


Fig. 388.

ces surfaces qui représentent la même puissance développée par le moteur, celle pour laquelle \mathcal{E} a la moindre valeur est le carré qui aboutit au sommet de la courbe et qui correspond au cas où $\mathcal{E} = 2E$. Ce résultat, qui a été mis en relief pour la première fois par le professeur Carhart¹, est l'inverse de la loi de Jacobi, et, comme elle, comporte un rendement de 50 p. 100 seulement. On obtient un rendement beaucoup meilleur quand \mathcal{E} et E sont tous deux plus élevés, comme on le voit par le carré limité par le point h .

De même, supposons que la puissance P fournie électriquement soit maintenue constante ; dans ce cas (fig. 389), l'équation [I.], page 546, peut se mettre sous la forme

$$\mathcal{E} (\mathcal{E} - E) = PR,$$

qui donne la courbe THS. Ici \mathcal{E} est minimum quand E est zéro ; toute la puissance est dissipée en échauffement ; et la puissance p du moteur est

¹ *American Journal of Science*, XXXI. 95, 1886.

maximum uniquement quand \mathcal{E} et E sont tous deux, infiniment grands. Cette observation est également due à Carhart.

Il ne nous reste plus qu'à faire ressortir un singulier contraste qui se présente entre le rendement d'une Machine Thermique parfaite et celui d'une Machine Électrique parfaite. — On a vu que l'un pouvait être exprimé en fonction de deux températures, et l'autre en fonction de deux forces électromotrices. Mais dans la machine thermique le rendement est maximum quand la différence entre les deux températures est *maximum*; tandis que dans la

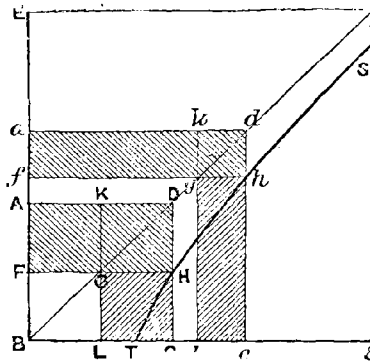


Fig. 389.

machine électrique le rendement est maximum quand la différence entre les deux forces électromotrices est *minimum*. Ces deux cas sont mis en opposition dans les figures 390 et 391 ci-dessous. La figure 390 montre le rendement d'une Machine Thermique fonctionnant entre les températures T et t

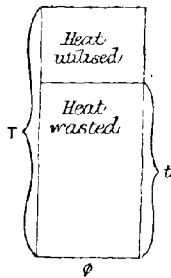


Fig. 390.

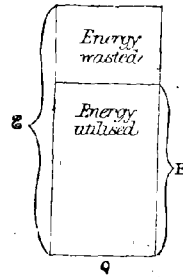


Fig. 391.

Contraste entre la Machine thermique et la Machine électrique.

Heat utilised = Chaleur utilisée
Heat wasted = Chaleur dissipée
(dans le même temps).

Energy wasted = Énergie dissipée
Energy utilised = Énergie utilisée
(dans le même temps).

(comptées à partir du zéro absolu); tandis que la figure 391 montre le rendement d'une Machine Électrique recevant un courant sous une force électro-

motrice \mathcal{E} , sa force contre-électromotrice étant E . La remarque de Joule, ici illustrée, qu'il est beaucoup plus facile de donner un bon rendement à une machine électrique qu'à une machine à vapeur quelconque, est amplement confirmée par l'expérience.

La rapide extension qu'a prise dans ces dernières années l'application des moteurs électriques, grands et petits, prouve que, là où l'énergie initiale peut être obtenue assez économiquement sur une grande échelle, soit qu'on l'emprunte à des sources naturelles, telles que les chutes ou cours d'eau, soit qu'on la demande à de puissantes machines à vapeur brûlant du charbon peu coûteux, cette énergie peut être électriquement distribuée à de petits moteurs (ne dépassant pas quelques chevaux) dans des conditions avantageuses. L'installation, l'entretien et l'alimentation de ces petits moteurs électriques sont en effet moins coûteux que l'installation, l'entretien et l'alimentation en combustible et en eau de petites machines à vapeur d'égale puissance.

VITESSE ET COUPLE MÉCANIQUE DES MOTEURS

Il existe certaines relations de la plus haute importance entre les conditions d'alimentation électrique d'un moteur et sa vitesse angulaire ainsi que le moment du couple qu'il développe.

Au Chapitre V, sur les actions et réactions mécaniques, on a vu que la puissance transmise par un arbre est le produit de deux facteurs, sa vitesse et le moment du couple qu'il développe. Si ω représente la vitesse angulaire et W le moment du couple¹, on a

$$\omega W = \text{puissance mécanique.}$$

Cette puissance peut être exprimée en watts à l'aide du coefficient convenable.

¹ $\frac{n}{t}$ étant le nombre de révolutions *par seconde*, $2\pi \frac{n}{t} = \omega$. Dès lors, si F est l'effort en kilogrammes transmis sur la courroie (ou plutôt la différence entre l'effort sur le brin de la courroie qui s'approche de la poulie d'entraînement et l'effort sur le brin qui s'en éloigne), et r le rayon de la poulie, $F r =$ le moment du couple $= W$, et alors $\omega W = 2\pi \frac{n}{t} r F =$ le nombre de kilogrammètres par seconde transmis par la courroie. — On arrive au même résultat par un autre mode de démonstration : la puissance en chevaux-vapeur est le produit de la force par la vitesse. La poulie ayant une circonférence égale à $2\pi r$, et faisant $\frac{n}{t}$ tours par seconde, sa vitesse circonférentielle est $2\pi r \frac{n}{t}$, et ce produit, multiplié par F , donne la puissance. Si F est exprimé en grammes-poids et r en centimètres, le produit $2\pi r \frac{n}{t} F$ donnera la puissance en grammes-centimètres par seconde; il faudra le diviser par $7,5 \times 10^8$ pour le transformer en chevaux-vapeur, et le multiplier par 981×10^{-7} pour le réduire en watts. Si ω est exprimé en radians par seconde et W en centimètres-dynes, leur produit donnera des ergs par seconde et il suffira de le diviser par 10^7 pour l'obtenir en watts.

Mais, si E est la force électromotrice développée par l'induit, et i le courant qui y circule, la puissance électrique dans cet induit est le produit

$$Ei = \text{puissance électrique (en watts } ^1).$$

Si ces quatre grandeurs, ω , W , E et i , se rapportent strictement à l'induit, on peut égaler les expressions électriques et mécaniques, et l'équation s'appliquera également bien à une génératrice ou à un moteur. Dans une génératrice, E et i sont de même sens, et W agit en sens contraire de ω ; autrement dit, il y a un contre-couple. Dans un moteur, W et ω sont de même sens, mais E et i sont en opposition, c'est-à-dire qu'il y a une force contre-électromotrice.

Dans l'étude de la dynamo comme génératrice, il a été admis que la puissance mécanique pouvait lui être fournie sous l'une des deux conditions types, soit de *vitesse constante* (le couple variant avec la puissance électrique), soit de *couple constant* (la vitesse variant avec la puissance). L'une de ces deux conditions étant imposée, il s'agissait de trouver des expressions algébriques pour les deux facteurs correspondants de la puissance électrique, savoir : la *force électromotrice* et le *courant*, suivant les conditions variables de résistance du circuit. Nous avons également cherché les conditions auxquelles on arrivait en supposant constant l'un des deux facteurs de la puissance électrique; et nous avons trouvé commode d'étudier les relations entre ces deux facteurs de la puissance à l'aide des courbes connues sous le nom de *caractéristiques*.

De même, en étudiant la machine dynamo comme moteur, nous admettons que l'alimentation électrique peut être réalisée de telle sorte que la puissance électrique soit fournie sous l'une des deux conditions-types, soit de *potentiel constant* (le courant variant suivant la puissance mécanique du moteur), soit de *courant constant* (le potentiel variant suivant la puissance mécanique développée).

L'une de ces conditions étant imposée, nous aurons alors à trouver des expressions algébriques pour les deux facteurs correspondants de la puissance mécanique, savoir la *vitesse* et le *couple*, sous des conditions variables de charge appliquée sur l'arbre. Nous rechercherons également les conditions résultant de l'hypothèse de l'un ou l'autre facteur

¹ Comme 1 volt = 10^8 unités C. G. S. de force électromotrice, et 1 ampère = 10^{-1} unités C. G. S. d'intensité, 1 watt (ou volt-ampère) = 10^7 unités C. G. S. de puissance = 10^7 ergs par seconde = $\frac{10^7}{981}$ grammes-centimètres par seconde.

de la puissance mécanique restant constant; en d'autres termes, nous déterminerons les conditions d'auto-régulation du moteur pour qu'il fonctionne à vitesse constante ou en développant un couple constant. En dernier lieu, il sera bon d'étudier la relation entre la vitesse et le couple mécanique à l'aide de courbes que, par analogie, nous appellerons *caractéristiques mécaniques*.

Expressions générales du Couple mécanique et de la Vitesse.

La puissance fournie à l'arbre du moteur peut être exprimée en mesures soit électriques, soit mécaniques. Dans le premier cas, c'est le produit de la force électromotrice du moteur (c'est-à-dire de sa force contre-électromotrice réagissant contre la force électromotrice d'alimentation) par le courant qui circule dans l'induit; dans le second, c'est le produit de la vitesse angulaire par le couple mécanique. On peut donc écrire

$$p = E i_a = \omega W = 2\pi \frac{n}{t} W;$$

et E (moyenne, en unités C. G. S.) = $\frac{n}{t} N\Phi$,

exactement comme pour une génératrice (voir p. 205). D'où

$$2\pi \frac{n}{t} W = \frac{n}{t} N\Phi i_a,$$

$$2\pi W = N\Phi i_a;$$

et finalement la valeur moyenne du couple sera

$$W = i_a \frac{N\Phi}{2\pi}, \quad [2]$$

ce qui montre que, si Φ est constant, le couple mécanique est simplement proportionnel au courant d'induit.

Pour tirer parti de cette expression, il faut se rappeler qu'on peut calculer i en fonction de la force électromotrice d'alimentation \mathcal{E} , mesurée aux bornes de la machine, et de la résistance intérieure du circuit dans la portion induite que nous appellerons r ; on a ainsi :

$$i_a = \frac{\mathcal{E} - E}{r};$$

d'où l'on déduit

$$W = \frac{N\Phi}{2\pi} \cdot \frac{\mathcal{E} - \frac{n}{t} N\Phi}{r}. \quad [3]$$

Il en résulte que, si la vitesse devient assez grande pour que $\frac{n}{t} N\Phi = \mathcal{E}$, il n'y a pas de couple mécanique. Par le fait, lorsque l'arbre n'éprouve aucune résistance, le moteur tourne à vide à toute vitesse, de sorte qu'il développe une force contre-électromotrice aussi voisine que possible de la force électromotrice d'alimentation. La valeur maximum de W , si l'on suppose Φ constant, est naturellement atteinte pour $\frac{n}{t} = 0$.

On peut tirer de l'expression précédente une expression de la vitesse :

$$2\pi W r = N\Phi \mathcal{E} - \frac{n}{t} N\Phi^2 ;$$

$$\frac{n}{t} = \frac{\mathcal{E}}{N\Phi} - \frac{2\pi W r}{N^2 \Phi^2} . \quad [\gamma]$$

Dans l'équation $[\alpha]$, W sera exprimé en dynes-centimètres si i_a est lui-même exprimé en unités C. G. S. de courant (voir p. 103) ; si i_a est donné en ampères, la valeur trouvée devra être divisée par 10 si l'on veut avoir W en dynes-centimètres, ou par 9 810 s'il doit être exprimé en grammes-centimètres.

Dans l'équation $[\gamma]$, pour que $\frac{n}{t}$ soit exprimé en tours par seconde, la valeur de \mathcal{E} , si elle est donnée en volts, devra être multipliée par 10^8 ; celle de r , si elle est en ohms, par 10^9 ; tandis que W devra être réduit en dynes-centimètres.

[Exemples : — (1) Dans une machine Brown à 4 pôles employée comme moteur, $N = 368$; $i_a = 275$; et elle donne 250 chevaux à 500 tours par minute. Calculer le flux de force qui doit passer à travers l'induit. — (2) On demande un moteur bipolaire devant fournir 4 chevaux dans un circuit d'éclairage à arc où le courant est maintenu à 10 ampères. Combien de volts devra-t-il développer ? Etant donné que $\Phi = 2\,000\,000$ et que la vitesse est de 15 tours par seconde, combien de conducteurs devra comporter son induit ?]

Les trois équations (α) , (β) et (γ) sont vraies, non seulement pour des moteurs, mais pour des génératrices, le symbole \mathcal{E} des formules étant, dans ce dernier cas, remplacé par e . On aura alors pour W des valeurs négatives, et ce signe indique que le couple dû à l'action du champ magnétique sur les conducteurs dans lesquels circule le courant d'induit est tel qu'il s'oppose à l'entraînement de la machine.

On remarquera que, si r seul est très petit et Φ relativement très grand, le second terme est négligeable et que la vitesse dépend alors uniquement du premier terme. Cette vitesse sera d'autant plus petite que Φ sera plus grand ; c'est simplement l'inverse du fait correspondant

que, plus le champ magnétique est puissant, moins la dynamo a besoin de tourner vite pour fournir la puissance demandée. On peut également noter que, si Φ est constant, la vitesse est proportionnelle à \mathcal{E} ; il sera constant si la condition d'alimentation est celle de potentiel constant, mais sera variable si \mathcal{E} varie. Un autre point important à noter est que, si un moteur doit développer sa puissance à faible vitesse, N devra être grand, aussi bien que Φ .

Il faut maintenant chercher comment $\frac{n}{t}$ et W sont affectés par le fait que la valeur de Φ dépend de la construction et de l'enroulement de l'inducteur du moteur, et des conditions dans lesquelles il est alimenté. Nous considérerons les quatre genres de machine suivants :

- A. *Moteur magnéto-électrique et moteur à excitation indépendante.*
- B. *Moteur en série.*
- C. *Moteur en dérivation.*
- D. *Moteur compound.*

Dans chacun de ces cas il y aura à tenir compte des conditions d'alimentation correspondant à \mathcal{E} ou i constant.

MOTEUR MAGNÉTO-ÉLECTRIQUE ET MOTEUR A EXCITATION INDÉPENDANTE

On admet ici que Φ est constant, c'est-à-dire que les réactions perturbatrices de l'induit sont négligeables. Ceci ne sera vrai que si le décalage des balais est sensiblement nul et le champ magnétique intense. Dans ces conditions les formules générales précédemment trouvées demandent une petite modification. La seule résistance intérieure est celle de l'induit r_a .

Cas (I) : \mathcal{E} constant.

Dans ce cas la formule $[\gamma]$ donne la relation cherchée. On peut en déduire la *caractéristique mécanique*, représentée par la figure 392. C'est une ligne droite qui coupe l'axe des $\frac{n}{t}$ en un point représentant, à l'échelle, la vitesse pour laquelle $\frac{n}{t} N\Phi = \mathcal{E}$; et elle est inclinée sous un angle tel que son coefficient angulaire est égal à $\frac{2\pi r_a}{N^2\Phi^2}$, ou proportionnel à la résistance intérieure. Dans le cas d'un moteur à

excitation indépendante, une augmentation du courant d'excitation, en renforçant le champ, rapprochera naturellement de l'horizontalité la droite plongeante, en même temps qu'elle diminuera la vitesse.

Si l'on cherche à faire entrer en ligne de compte les réactions de l'induit, il faut se rappeler que le courant d'induit exerce un effet de

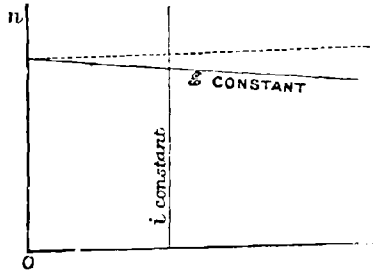


Fig. 392. — Caractéristiques mécaniques d'un Moteur magnéto-électrique.

n pour $\frac{n}{l}$.

désaimantation pour un décalage des balais en arrière, et d'aimantation pour un décalage en avant. Un décalage en arrière tendrait donc, pour ε constant, à relever la ligne oblique et à la rendre plus horizontale au fur et à mesure que le couple augmente, parce qu'il affaiblirait l'aimantation et laisserait ainsi la vitesse s'accélérer; tandis qu'un décalage en avant tendrait à en accentuer davantage l'inclinaison.

Détermination pratique du potentiel convenable pour un moteur donné.

Supposons qu'on se donne un moteur ayant un aimant d'acier et un induit déterminés, et qu'on veuille trouver le potentiel sous lequel il tournera à une certaine vitesse. On fera tourner le moteur en circuit ouvert, comme génératrice, à la vitesse donnée et on mesurera la différence de potentiel à ses bornes. Ce sera le nombre de volts ε sous lequel il devra être alimenté.

Cas (II) : i constant.

Dans ce cas, on voit, en se reportant à la formule [x], que le couple est constant, puisqu'il est indépendant de la vitesse et de la résistance intérieure. La caractéristique mécanique de la machine est, dans ces conditions, une ligne droite verticale (fig. 392).

MOTEUR EN SÉRIE

Les équations fondamentales sont les mêmes que précédemment, avec la suivante en plus :

$$r = r_a + r_s ;$$

mais on peut ici introduire avec avantage la formule approchée de la loi de l'électro-aimant (dérivée de celle de Frölich) donnée au Chapitre VI, et écrire, comme à la page 161,

$$\Phi = \bar{\Phi} \frac{i}{i + i'}$$

i' étant le courant diacritique. En portant cette valeur de Φ dans l'expression [x], page 561, du couple mécanique, et en posant par abréviation $\frac{N\bar{\Phi}}{2\pi} = Y$, on a

$$W = Y \frac{i^2}{i + i'}$$

La courbe correspondant à cette relation entre le couple et le courant est donnée par la figure 393. Pour de petites valeurs de i comparative-

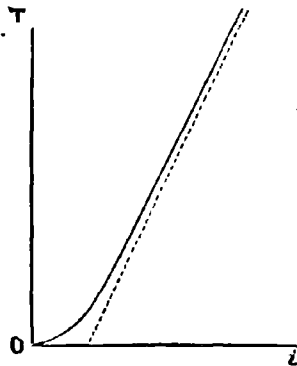


Fig. 393.

$$T = W$$

ment à i' , W varie sensiblement comme i^2 ; tandis que pour des valeurs élevées de i , au fur et à mesure qu'on approche de la saturation, W est à peu près proportionnel à i .

L'équation précédente peut encore se mettre sous la forme classique

$$i^2 - \frac{W}{Y} i - \frac{W}{Y} i' = 0$$

qui a pour racines

$$i = \frac{W}{2Y} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{4Y}{W} i'} \right).$$

Mais, d'après l'équation donnée précédemment, on a

$$\begin{aligned} \frac{n}{t} &= \frac{\mathcal{E} i}{2\pi W} - \frac{r i^2}{2\pi W}; \\ \frac{n}{t} &= \frac{\mathcal{E} i}{2\pi W} - \frac{r(i + i')}{2\pi Y}; \end{aligned}$$

ce qui donne, après substitution de la valeur de i ci-dessus,

$$\frac{n}{t} = \frac{\mathcal{E}}{4\pi Y} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Y}{W} i'} \right) - \frac{rW}{4\pi Y^2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4Y}{W} i'} \right) - \frac{r i'}{2\pi Y}.$$

Pour simplifier cette expression hyperbolique, on peut se permettre, pour de grandes valeurs de W , de négliger le second terme sous le radical, ce qui donne approximativement

$$\frac{n}{t} = \frac{\mathcal{E} - 2r i'}{4\pi Y} - \frac{rW}{4\pi Y^2}.$$

Cas (I) : \mathcal{E} constant.

Si \mathcal{E} est constant, les valeurs de $\frac{n}{t}$ sont, pour de grandes valeurs de W , comme le montre la dernière équation, égales à une certaine constante moins une quantité proportionnelle à W ; autrement dit, la caractéristique mécanique en ce point (quand les inducteurs sont fortement saturés) est, pour toute valeur élevée de W , approximativement une ligne droite, ainsi qu'on le voit sur la figure 394.

Cas (II) : i constant.

Ici, évidemment, à part les effets secondaires, l'aimantation sera constante; par suite le couple mécanique sera également constant, comme dans la figure 394. Sous une charge dépassant une certaine limite, le moteur ne démarrera pas; sous une charge moindre, il s'em-

portera jusqu'à ce que les frottements et les courants parasites comblent la différence.

Les propriétés des moteurs montés en série ont une telle importance qu'ils méritent qu'on s'y arrête pour les étudier un peu plus à fond. — On sait que, si le courant qui circule dans une dynamo en série est constant, de sorte que son aimantation soit constante, la force électromotrice qu'elle développe est presque exactement proportionnelle à sa vitesse. Il en résulte par conséquent que, si E est proportionnel à ω ,

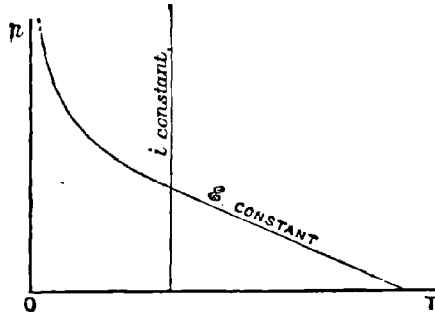


Fig. 394. — Caractéristiques mécaniques d'un Moteur en Série

$$n \text{ pour } \frac{n}{i}; T = W.$$

W sera proportionnel à i . Ce fait se vérifie de tous points par l'expérience dans le cas de moteurs en série. Ainsi, dans un treuil électrique, une machine Siemens disposée pour monter une charge de 25 kilogrammes élevait cette charge avec une vitesse de 1,08 mètre par seconde, en développant une force contre-électromotrice de 108,81 volts. La force électromotrice mise en œuvre était de 111 volts, et la résistance du circuit de 0,3 ohm. La force électromotrice efficace était donc de 2,19 volts, et le courant de 7,3 ampères. Quand on portait la résistance du circuit à 2,2 ohms, la vitesse tombait à 0,86 mètre par seconde; la force contre-électromotrice à 94,94 volts; la force électromotrice efficace, $\mathcal{E} - E$, était par suite de 16,06 volts et le courant de 7,3 ampères comme précédemment. Quand on mettait 4,8 ohms en circuit, la vitesse baissait à 0,716 mètre par seconde, et E à 76 volts. $\mathcal{E} - E$ était de 35 volts, et le courant encore de 7,3 ampères. Ainsi donc à un même effort correspond le même courant, quelle que soit la vitesse. Les chiffres donnés page 544 relativement au moteur Immisch mettent également ce point en évidence. La vitesse d'un moteur donné, monté en série, dépend uniquement de la force électromotrice de la génératrice et de la résistance du circuit.

Le fait que le couple moteur d'une réceptrice en série dépend uniquement de l'intensité du courant est avantageux dans l'application des moteurs électriques à la propulsion des voitures (telles que les tramcars) qui, au démarrage, exigent pendant quelques secondes une puissance de beaucoup supérieure à celle qui leur est nécessaire en marche courante¹. Au démarrage, il faut leur fournir un courant de grande intensité. Une disposition commode consiste à employer deux moteurs, habituellement couplés en série. Au démarrage, on les couple en parallèle à l'aide d'un commutateur. La force électromotrice se trouve ainsi doublée pour chacun d'eux, en même temps que leur résistance est réduite à moitié. Pendant quelques secondes il y a développement d'un courant très intense, — beaucoup plus fort que ne pourraient le supporter les moteurs pour un fonctionnement prolongé —, et qui fournit le supplément de couple nécessaire.

Dans le moteur en série, alimenté sous potentiel constant, E n'est pas proportionnel à la vitesse, parce que le magnétisme inducteur n'est pas constant mais s'affaiblit en même temps que E augmente, puisqu'il est à peu près proportionnel à $\mathcal{E} - E$ (s'il n'y a pas saturation). Ce moteur ne fonctionnera pas, en conséquence, à vitesse constante. Il ne marchera pas davantage à allure constante s'il est alimenté par un courant constant.

EMPLOI DE DEUX MOTEURS EN SÉRIE DANS UNE TRANSMISSION

On sait que, si deux machines en série, construites exactement de même, sont employées, — l'une comme génératrice, l'autre comme moteur —, le système est presque parfaitement auto-régulateur, la vitesse du moteur à la station réceptrice étant presque constante si celle de la dynamo à la station de départ est constante. Toute addition de charge sur le moteur, tendant à ralentir sa vitesse, détermine une augmentation de courant et rejette ainsi un travail supplémentaire proportionnel sur la génératrice qui, à son tour, emprunte plus de puissance à la machine à vapeur pour maintenir sa vitesse. Comme on l'a vu ci-dessus, le couple W_2 du moteur dépendra, dans la machine donnée, du courant seul, et de ce courant dépendra le couple mécanique W_1 à la dynamo. M. Kapp a montré d'ailleurs² comment, s'il y a

¹ Voir les remarques de E. Hopkinson, *Proc. Inst. Civil Engineers*, XCI. pt. 1.6, 1887.

² Voir Kapp, *Transmission électrique de l'Energie*, traduction française, p. 209.

une résistance sur la ligne, le système peut encore être rendu auto-régulateur par le choix, comme génératrice et comme moteur, de deux machines enroulées de telle sorte que, si l'on compare leurs caractéristiques pour les vitesses imposées, la différence entre leurs forces électromotrices pour une valeur donnée du courant soit égale à la force électromotrice nécessaire pour faire passer ce courant particulier à travers la résistance de tout le circuit. On trouvera au Chapitre XXVI, sur la transmission de la puissance, d'autres détails relatifs aux machines en série.

Feu sir C. W. Siemens¹ a, en 1880, attiré l'attention sur les singulières propriétés d'un système combiné d'une dynamo comme génératrice et d'une machine magnéto comme moteur; ce moteur appliqué, par exemple, à une locomotive qui descend une pente accélère sa vitesse et devient réellement une génératrice susceptible de reconstituer un approvisionnement d'énergie électrique. — Il a également fait remarquer comment deux trains actionnés par des moteurs électriques alimentés par une même paire de rails conducteurs tendent à régulariser mutuellement leur marche, l'un, quand il descend une rampe, transmettant de la puissance à l'autre, comme s'ils étaient « reliés par une courroie invisible ».

MOTEUR EN DÉRIVATION

Les conditions fondamentales sont les suivantes : —

$$W = i_a \frac{N\Phi}{2\pi};$$

$$i_a = i - i_d;$$

et, si l'on adopte la forme appropriée pour l'expression de la loi d'aimantation, d'après la page 161,

$$\Phi = \bar{\Phi} \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E} + \mathcal{E}'};$$

$$E = \mathcal{E} \left(1 + \frac{r_a}{r_d} \right) - r_a i.$$

¹ *Journal Soc. Teleg. Engineers*, IX, 301, 1880.

Des trois premières équations on tire :

$$W = \frac{N}{2\pi} \left(i - \frac{\mathcal{E}}{r_d} \right) \bar{\Phi} \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}$$

et, en transposant et posant, pour abrégier, $Y = \frac{N \bar{\Phi}}{2\pi}$,

$$i = \frac{W}{Y} \cdot \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}{\mathcal{E}} + \frac{\mathcal{E}}{r_d}.$$

La dernière des quatre équations ci-dessus donne :

$$\frac{n}{t} = \frac{1}{N\Phi} \left[\mathcal{E} \left(1 + \frac{r_a}{r_d} \right) - r_a i \right];$$

et, en y insérant la valeur de i , on trouve :

$$\frac{n}{t} = \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}{2\pi Y} \left[1 + 2 \frac{r_a}{r_d} - \frac{r_a W}{Y} \cdot \frac{\mathcal{E} + \mathcal{E}'}{\mathcal{E}^2} \right].$$

Cas (I) : \mathcal{E} constant.

La dernière équation montre qu'un moteur en dérivation, alimenté sous potentiel constant, aura une vitesse qui serait constante et indépendante du couple mécanique s'il n'y avait pas de résistance intérieure. Elle montre en outre que la diminution de vitesse, conséquence de cette résistance, au fur et à mesure que le couple augmente, sera d'autant moindre que le champ magnétique sera plus puissant.

A titre d'exemple, un moteur « Victoria », monté en dérivation, essayé par M. Mordey, et sur lequel on faisait varier la charge de $91,8 \times 10^7$ à $1\,357,2 \times 10^7$ dynes-centimètres, ne présentait une diminution de vitesse que de 16,25 à 15,75 tours par seconde.

Il est intéressant de comparer la capacité auto-régulatrice d'une dynamo en dérivation avec celle d'un moteur monté de même. La première, à une allure constante, développe sa puissance électrique sous potentiel à peu près constant ; le moteur, alimenté par les conducteurs sous potentiel constant, fournira sa puissance mécanique à vitesse sensiblement constante ; et dans les deux cas l'écart avec la constance absolue sera proportionnel à la résistance intérieure de l'induit et à la puissance, électrique ou mécanique, développée par la machine à l'instant considéré.

Nous avons supposé jusqu'ici que l'induit n'exerçait pas de réaction

magnétique. Or, comme on le verra, pour obtenir un fonctionnement sans étincelles, il faut décaler les balais en arrière, et, dans les moteurs, un décalage en arrière tend à désaimanter l'induit. Mais la désaimantation tend, comme on l'a vu, à augmenter la vitesse; par suite, dans le cas d'une alimentation sous tension constante, quand le moteur sera très chargé, la réaction du courant intense qui en résulte tendra à maintenir la vitesse, ce qui rendra le moteur en dérivation très sensiblement auto-régulateur. Ces réactions seront tout à l'heure étudiées en détail.

Cas (II) : i constant.

L'étude de ce cas est plus compliquée, bien que les considérations générales en soient assez simples. Si le moteur est au repos quand on y lance le courant, ce courant passera presque tout entier dans l'induit, tandis qu'il n'en passera presque pas dans la dérivation; il y aura donc très peu de magnétisme produit, et le couple sera presque nul. Dans ces conditions une machine ne démarrera pas seule, si elle a la moindre charge; mais, une fois qu'elle sera lancée, sa force contre-électromotrice fera décroître le courant dans l'induit, tandis que celui qui passe dans la dérivation augmentera. Par suite, le couple mécanique augmentera alors avec la vitesse, mais non pas indéfiniment, parce que, au fur et à

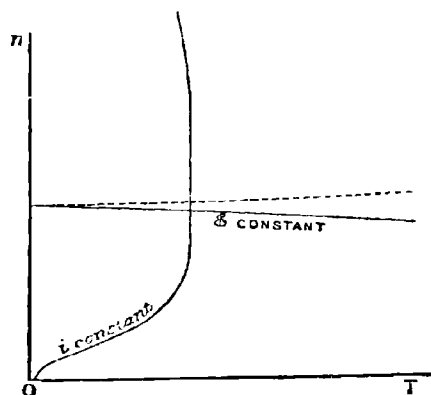


Fig. 395. — Caractéristiques mécaniques d'un Moteur en Dérivation.

mesure que le magnétisme approche de la saturation, l'accroissement de Φ ne compense plus l'affaiblissement de i_a ; et, au delà de ce point, le couple diminuera si on laisse la vitesse augmenter. Théoriquement la vitesse croîtrait jusqu'à ce que la force électromotrice propre du moteur

fût exactement égale à la différence de potentiel due à la totalité du courant constant passant par la résistance de la dérivation ; dans ces conditions il ne passera plus aucun courant dans l'induit et le couple mécanique sera nul. La figure 395, empruntée, comme les précédentes, à l'ouvrage du D^r Frölich, donne les caractéristiques correspondant à ces deux derniers cas.

RÉACTION ENTRE L'INDUIT ET LES INDUCTEURS DANS UN MOTEUR

Nous avons examiné en détail dans le Chapitre IV (p. 60 à 98) les réactions entre l'induit et les inducteurs d'une machine dynamo, mais nous avons limité notre étude à ce qui se passe quand la machine est employée comme génératrice. Dans ce cas, le courant induit dans les bobines d'armature tendait à aimanter le noyau dans une direction à peu près normale à celle de l'aimantation fournie par les électro-aimants eux-mêmes ; d'où une aimantation résultante sous un angle oblique. Cette obliquité obligeait à donner au calage des balais une certaine avance dans le sens du mouvement ; et ce décalage en avant avait pour conséquence nécessaire de donner à la polarité du courant d'induit une tendance à désaimanter partiellement les électro-aimants. En se reportant à la figure 59 (p. 73), on verra que, en quelques points que soient placés les balais, il y a tendance à la formation de pôles correspondants, et que ces pôles d'induit tendent à déterminer dans les pièces polaires en fer des électro-aimants une polarité opposée à la leur, et par suite à affaiblir ou à renforcer le champ magnétique selon le décalage.

Il en est de même dans un moteur, mais avec une différence : — un courant fourni par une source extérieure aimante l'induit et le transforme en un puissant aimant, dont les pôles seraient, comme dans la génératrice, sensiblement à angles droits avec la ligne qui joint les pièces polaires, s'il n'y avait pas, dans ce cas également, un certain décalage à donner aux balais. Supposons, comme dans la plupart des figures de cet ouvrage, que le pôle S. des électro-aimants soit à gauche, et le pôle N. à droite. Supposons de même que le courant circule dans l'induit de manière à déterminer un pôle S. au point le plus élevé et un pôle N. au point le plus bas. Ceci signifie que si l'induit est bobiné dextrorsum, le courant doit entrer par le balai supérieur et sortir par le balai inférieur, le balai supérieur étant relié au conducteur +. (A comparer avec ce qui est dit p. 62.) Dans ce cas évidemment l'induit va tourner vers la droite,

si l'on considère le point le plus haut, c'est-à-dire dans le sens des aiguilles d'une montre, attendu que le pôle S. en haut sera repoussé par le pôle S. situé à sa gauche et attiré vers le pôle N. qui est à droite. Il tournera en conséquence dextrorsum (dans un champ magnétique dextrorsum) si le courant marche de haut en bas, exactement comme l'induit d'une génératrice devra tourner de manière à envoyer un courant vers le haut. Dans les deux cas, le sens de la force électromotrice induite est le même, — de bas en haut —, avec le courant dans une dynamo, *contre* le courant dans un moteur.

Il en résulte qu'un décalage en avant tendra à transformer la force magnétisante transversale en une force tendant à accroître celle du champ magnétique, tandis qu'un décalage en arrière tendra à désaimanter l'inducteur. De plus, du moment que, avec un décalage en

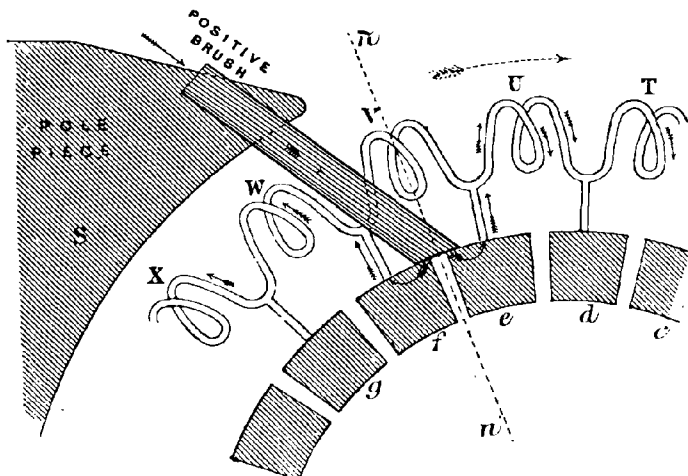


Fig. 396. — Commutation dans une section d'induit de réceptrice.

Pole piece = Pièce polaire.
Positive brush = Balai positif.

avant, la polarité de l'induit renforce celle de l'inducteur, il est possible de faire fonctionner un moteur sans recourir à aucun autre mode d'aimantation des électro-aimants; l'armature induira un pôle dans l'électro-aimant et se mettra en mouvement en vertu de sa propre attraction vers ce pôle induit. Ce principe a été de longue date appliqué à de petits moteurs; il paraît l'avoir été par Wheatstone pour la première fois.

La force magnétisante transversale aura également pour effet d'affai-

blir le champ sous les deux becs polaires d'entrée et de le renforcer sous les deux becs de sortie. Ce phénomène est inverse de celui qui se produit pour une dynamo. Dans un moteur (même sans décalage), la réaction d'aimantation transversale tend à entraîner le champ en sens *inverse* de celui de la rotation.

Nous allons voir maintenant quelles sont les conditions de production du minimum d'étincelles. Considérons (fig. 396) une bobine W s'élevant sur la gauche. Le courant qui la parcourt va en descendant du balai positif, alors qu'elle est elle-même le siège d'une force électromotrice qui tend à arrêter ou à renverser ce courant. Or on sait que la condition de non-production d'étincelles exige que, au moment où la bobine passe sous le balai et est mise en court-circuit, elle traverse un champ non seulement suffisamment intense, mais tendant à renverser le sens du courant qui la parcourt. Elle est déjà dans un champ de cette nature ; par suite, la commutation doit s'effectuer *avant* qu'elle ne sorte de ce champ magnétique. Elle doit se faire avant que la bobine n'arrive au point le plus haut. En d'autres termes, les balais doivent être décalés en arrière si l'on veut qu'il ne se produise pas d'étincelles. Dans un moteur la ligne neutre *n n'* s'inclinera donc *en arrière* sous l'épanouissement du champ magnétique. Mais comme (dans chaque cas) les courants parasites et l'hystérésis tendent tous deux à tordre légèrement le champ magnétique dans le sens de la rotation, — ce qui augmente le décalage dans une génératrice et le diminue dans un moteur —, il s'ensuit que le décalage négatif (ou en arrière) dans un moteur peut être légèrement inférieur au décalage positif (ou en avant) dans une génératrice, à égalité de courant et d'excitation¹. L'avantage au point de vue du poids d'un moteur dans lequel l'induit contribue à l'excitation de l'inducteur, ce qui réduit la puissance et le poids de ce dernier, a conduit, en 1883, les professeurs Ayrton et Perry² à préconiser la conception de faibles électro-aimants et de puissants induits fonctionnant avec un décalage en avant. Mais on voit d'après les considérations précédentes que, si l'on décale en avant les balais d'un moteur en vue d'obtenir une plus grande vitesse de rotation, le moteur donnera infailliblement des étincelles aux balais. L'idée très séduisante a priori d'employer l'induit à l'aimantation s'est révélée comme une erreur dans la pratique. Un décalage en avant donnerait

¹ Telle paraît être l'explication des différences — d'ailleurs sans importance — observées par Snell; *Journ. Inst. Electr. Engineers*, XIX. 194, 1890.

² *Journal Soc. Electr. Engineers*, XII. mai 1883.

sans aucun doute une puissance motrice plus grande, relativement au poids, qu'un décalage en arrière ; mais il serait accompagné d'une production désastreuse d'étincelles. Il n'y a qu'un moyen de concilier le minimum d'étincelles avec un rendement élevé. Ce moyen consiste à étudier et construire des moteurs dans lesquels l'induit n'amène aucune perturbation dans le champ magnétique dû aux électro-aimants. On peut y arriver en suivant exactement les principes d'étude et de construction dont la correction et la sûreté ont été reconnues dans le cas des dynamos employées comme génératrices. *Les inducteurs doivent être très puissants comparativement à l'induit.* S'il en est ainsi, il n'y aura ni perturbations, ni torsion du champ magnétique résultant, ni décalage des balais, ni étincelles. On ne doit se départir de cette règle que dans les rares cas où le minimum de poids a plus d'importance qu'un rendement élevé, et il est alors nécessaire de recourir à des moyens spéciaux, tels que pôles auxiliaires, ou conformation particulière des pièces polaires, pour éviter les étincelles qui résulteraient de l'emploi de petits ou faibles électro-aimants.

M. Mordey¹, qui a très attentivement étudié les analogies entre les dynamos et les moteurs, a observé que, à plusieurs égards, il était encore plus important de suivre pour les moteurs les règles posées pour la bonne conception des génératrices. Les courants parasites doivent être encore plus soigneusement éliminés. Les dispositions mécaniques adoptées pour transmettre à l'arbre les efforts exercés par le champ magnétique sur les fils de l'induit demandent également la plus grande attention. Voir Chapitre XIII.

Considérons les conditions qui résultent de la disposition des électro-aimants d'une génératrice et d'un moteur respectivement.

Dans l'une, l'induit est entraîné mécaniquement contre les forces magnétiques du champ qui tendent à le ramener en arrière ; dans l'autre, les forces magnétiques du champ tendent à le faire tourner, ce qui le rend apte à produire un travail mécanique. Dans un cas, il y a une réaction mécanique inverse qui tend à arrêter la machine à vapeur ; dans l'autre, il se développe une réaction électrique inverse (la force contre-électromotrice induite) qui tend à arrêter le courant². Dans les

¹ *Phil. Mag.*, Janvier 1886.

² La loi de la réaction électrique résultant, pour une génératrice, du mouvement mécanique est résumée dans la loi bien connue de Lenz, que *le courant induit est toujours tel qu'en vertu de son action électro-magnétique il tend à s'opposer au mouvement qui lui donne naissance.* Dans le cas inverse de la réaction mécanique résultant, pour un moteur, d'une alimentation en énergie électrique, il est aisé de

deux cas, on suppose que le mouvement a lieu dans le même sens — celui des aiguilles d'une montre. Dans l'un comme dans l'autre, l'effet résultant est un déplacement des lignes de force du champ ; mais, dans la génératrice, le mouvement mécanique agit comme s'il entraînait le magnétisme avec lui, tandis que dans le moteur les réactions magnétiques réciproques agissent comme pour entraîner circulairement l'induit en produisant une rotation mécanique. Pour la dynamo considérée comme génératrice, on a vu que la self-induction dans l'induit avait pour effet d'exiger un décalage positif ; pour la réceptrice, au contraire, la self-induction a pour effet de nécessiter un décalage négatif. Si les balais d'un moteur sont calés sur la ligne neutre, et si les électro-aimants sont très faibles ou ne sont pas excités, ce moteur tournera indifféremment dans un sens ou dans l'autre, selon l'impulsion qui lui sera donnée au départ. Si dans un moteur à inducteur bien excité on renverse le courant uniquement dans la *portion-induit* du circuit, le moteur changera généralement de sens de rotation ; mais il faudra aussi changer le sens de calage de ses balais, si l'on veut qu'il fonctionne sans étincelles comme précédemment. Si, au lieu de renverser le courant dans l'induit, on renverse l'aimantation des électro-aimants, on arrivera au même résultat. Si l'on opère les deux inversions simultanément, le moteur continuera à tourner comme si rien n'avait été modifié.

Les dynamos enroulées et montées pour fonctionner comme génératrices de courants continus peuvent être dans tous les cas employées comme réceptrices ou moteurs, mais avec une légère différence.

Une dynamo en série montée en génératrice pour tourner dans le sens des aiguilles d'une montre (ses balais décalés par suite en avance sur la droite) tournera, quand elle sera alimentée par un courant provenant d'une source étrangère, comme réceptrice, mais en sens inverse, c'est-à-dire à contre-balais. Pour la monter convenablement en réceptrice, il faut *ou* renverser les connexions de l'induit, *ou* renverser celles des électro-aimants (dans les deux cas, elle tournera alors dans le sens des aiguilles d'une montre), *ou bien* encore renverser les balais et les décaler en sens inverse (auquel cas elle tournera en sens inverse).

Une dynamo en dérivation montée pour fonctionner en génératrice prendra, comme réceptrice, quand elle sera alimentée par un courant extérieur, un mouvement de même sens que dans sa condition précé-

formuler une loi inverse en ces termes : *le mouvement produit est toujours tel qu'en vertu des inductions magnéto-électriques qu'il développe il tend à s'opposer au courant.*

dente. En effet, si le courant dans la portion-induit est de même sens que précédemment, celui qui circule dans la dérivation est de sens contraire, et *vice versa*.

Une dynamo compound, à double enroulement, montée pour fonctionner comme génératrice, tournera, comme réceptrice, en sens inverse, à contre-balais, si la portion-inducteur montée en série est plus puissante que la portion montée en dérivation, et dans le sens de ses balais, si l'action de la dérivation est prépondérante. Si les connexions sont telles (comme dans les dynamos à double enroulement) que les électroaimants subissent la somme des effets des bobines en série et en dérivation quand la machine est employée comme génératrice, ils recevront la différence de ces deux effets quand elle fonctionnera comme réceptrice. L'emploi d'un moteur à enroulement différentiel présente certains avantages, comme on le verra plus loin.

Les machines à courants alternatifs envisagées comme moteurs sont traitées séparément au Chapitre XXIV.

RENVERSEMENT DE MARCHE DES MOTEURS

Ainsi que nous l'avons vu précédemment, on peut renverser la marche d'un moteur en renversant simultanément le courant dans l'induit et le calage des balais. Mais on peut également effectuer le renversement du courant en faisant tourner les balais de 180 degrés. Par suite, on peut réaliser ces deux opérations en avançant simplement les balais de $180^\circ - 2\varphi$, φ étant leur angle de calage primitif. Mais, comme ils se trouveraient alors calés à contre-marche, il vaut mieux avoir recours à un second jeu de balais. Cette méthode d'inversion est celle du D^r Hopkinson. Il emploie deux paires de balais, mobiles chacune autour d'un axe commun, de telle sorte que, l'une d'entre elles étant inclinée dans un sens et l'autre en sens contraire, on puisse indifféremment et à volonté les appliquer sur le collecteur.

La figure 397 représente un inverseur de marche conçu par M. A. Reckenzaun pour les machines motrices du bateau *Electricity*. Il comporte deux paires de balais; les deux balais supérieurs sont fixés à un porte-balais commun qui tourne autour d'un axe, et peut se manœuvrer à droite ou à gauche à l'aide d'un levier; les deux balais inférieurs sont également fixés à un support. Contre chaque porte-balais vient presser un petit galet en ébonite, monté à l'extrémité d'un ressort en acier, supporté lui-même en son milieu par le levier. Cette disposition permet d'appliquer, par la manœuvre du levier, les balais d'un côté ou de l'autre, et de faire ainsi tourner le moteur dans un sens ou dans l'autre. L'inverseur de marche est naturellement une addition essentielle pour l'application industrielle des moteurs, et, si l'on peut arriver à supprimer aux balais les étincelles déterminées par leur brusque séparation du collecteur, on aura là un mode d'inversion de mouvement bien supérieur à tous les

moyens mécaniques, tels que le renvoi par un système quelconque de l'axe du moteur à un autre arbre.

Un des avantages des moteurs électriques réside en effet dans la facilité avec laquelle ils peuvent être directement attelés à l'arbre de la machine qu'ils doivent actionner; cet avantage est loin d'être sans importance.

MM. les professeurs Ayrton et Perry ont imaginé une autre forme d'inverseur de marche¹. Il se compose d'un double collier monté sur l'arbre du moteur; l'un d'entre eux, le collier intérieur, est muni d'une broche engagée dans une

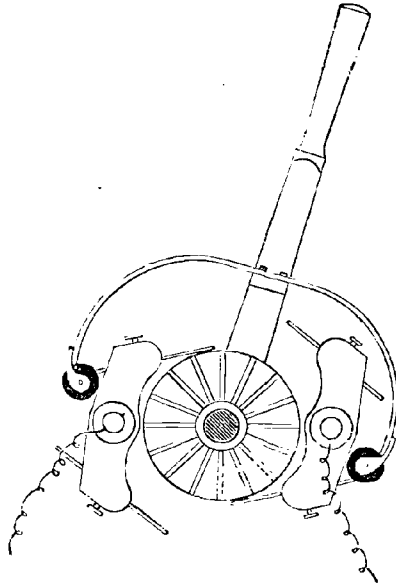


Fig. 397. — Inverseur de marche pour moteur électrique.

rainure hélicoïdale pratiquée dans l'arbre, et se meut librement le long de celui-ci. Tout déplacement qui lui est donné à l'aide du levier, à travers le collier extérieur, déplace la broche ci-dessus dans la rainure et fait tourner d'un certain angle le collier auquel elle est fixée. Ce collier, dans le moteur Ayrton et Perry, supporte les balais, dont il modifie le calage suivant le mouvement de rotation qui lui est donné dans un sens ou dans l'autre. Le moteur représenté dans la figure 223 de la première édition de cet ouvrage est muni de cet inverseur de marche, bien qu'il soit inutile pour la manœuvre d'un ventilateur auquel il est appliqué.

L'Auteur a également imaginé d'autres modes de renversement de marche pour petits moteurs; il donne une forme hélicoïdale aux segments du collecteur, ce qui lui permet de changer le calage en faisant glisser simplement les balais en avant ou en arrière, parallèlement à l'axe du moteur.

Dans le moteur Reckenzaun, le renversement de marche est constitué par deux paires de balais montées de manière à glisser sur deux guides ou dans deux

¹ Voir *L'Electricien*, n° 58, 1^{er} septembre 1883, VI. 223 et 224.

rainures ; la manœuvre d'un levier en fait avancer une paire en même temps qu'elle fait reculer l'autre.

Théoriquement, il est également possible de construire un moteur à inversion de marche à l'aide d'un simple renversement de courant dans la partie induit ; à cet effet, les pièces polaires doivent être conformées de telle sorte que, les balais étant calés sans aucune inclinaison, l'angle que fait le diamètre de commutation avec le pôle effectif dans la pièce polaire soit celui qui est nécessaire à la marche normale. Ce résultat une fois obtenu, il suffira de renverser simplement la polarité dans l'inducteur ou dans l'induit pour renverser la marche du moteur.

Si les électro-aimants d'un moteur sont assez puissants, comparativement à l'induit, pour qu'il ne soit pas besoin de décaler les balais, on peut changer le

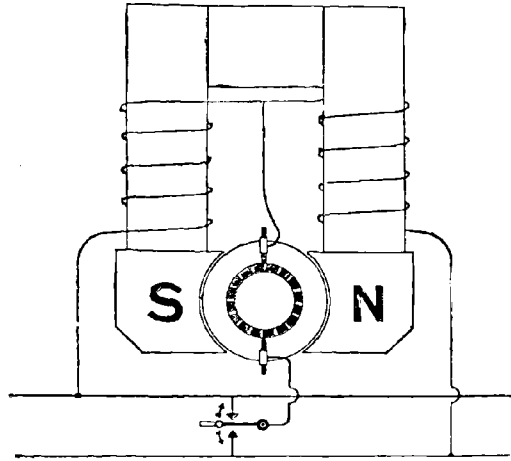


Fig. 398. — Renversement électrique de marche pour moteur.

sens de sa rotation en renversant la polarité de l'un ou l'autre de ses éléments. Dans les grands moteurs Immisch, l'inverseur de marche, qui est très ramassé, éloigne une paire de balais et en applique sur les mêmes points diamétraux une seconde paire, de polarité inverse, dans une position également inverse.

La forme des balais représentée par la figure 277 c, page 367, a été destinée par Holroyd Smith à l'application aux moteurs, en raison de ce qu'elle se prête à la rotation dans un sens ou dans l'autre. Il en est de même des balais en charbon tels que ceux de la figure 278, page 368.

L'Auteur a imaginé en 1882¹ un autre mode de renversement de marche, indiqué par la figure 398. Il consiste à relier un des balais à un point voisin du milieu des bobines inductrices, qui, tout en étant montées en dérivation sur les conducteurs principaux, n'ont pas besoin d'avoir une résistance très élevée. Pour renverser le courant dans l'induit, il suffit de faire passer, à l'aide d'un commutateur, le second balai de l'un des conducteurs sur l'autre. C'est sur ce principe qu'est basé le régulateur Maquaire (fig. 306).

¹ Brevet anglais, 5122 de 1882.

MOYENS DE GOUVERNER LES MOTEURS

Il est de la plus haute importance que les moteurs électriques soient disposés de manière à tourner à une vitesse uniforme, quel que soit l'effort qui leur est demandé. Pour actionner un tour, par exemple, et en général une machine-outil quelconque, il est essentiel que la vitesse soit régulière, et que le moteur ne « s'emballe » pas dès que l'outil vient à être éloigné de la pièce et cesse de travailler.

RÉGULATEUR INTERRUPTEUR

M. Marcel Deprez a essayé un des premiers, en 1878, de réaliser automatiquement cette régulation de vitesse ; il a adopté à cet effet une ingénieuse disposition réglant d'une façon parfaitement déterminée l'admission du courant par l'introduction d'un interrupteur à vibrations dans le circuit. Le moteur employé avait un simple commutateur à deux coquilles qui, par sa rotation même, réglait les fermetures et les ruptures du courant. Cette méthode n'est cependant pas applicable à des moteurs puissants.

RÉGULATEURS A FORCE CENTRIFUGE

Régulateurs spasmodiques. — Un autre système, également inapplicable sur une grande échelle, consiste à adapter un régulateur à force centrifuge ouvrant le circuit chaque fois que le moteur dépasse une certaine vitesse. Le moteur a dans ces conditions une marche spasmodique tantôt rapide tantôt lente. — On peut encore employer un régulateur à force centrifuge pour faire varier la résistance d'une partie du circuit ; pour actionner, par exemple, une disposition automatique dérivant des électro-aimants une partie du courant d'une dynamo en série, ou pour introduire dans les électro-aimants d'une machine montée en dérivation une résistance additionnelle proportionnelle à la vitesse.

On en voit une application dans la figure 399, où un régulateur à force centrifuge actionné par le moteur modifie le nombre des spires excitatrices de l'inducteur, augmentant ainsi le magnétisme si le moteur prend une allure trop vive, ce qui réduit, par suite, sa vitesse. Ce procédé a été suggéré par Brush et satisfait à la régulation de moteurs montés dans des circuits d'éclairage par arcs en série.

Régulateurs périodiques. — MM. les professeurs Ayrton et Perry ont également proposé plusieurs formes de régulateurs « périodiques » à force centrifuge ; dans leur système, la puissance est fournie à chaque tour pendant une partie seulement de la révolution, et la durée relative de cette alimentation par tour de la machine varie avec la vitesse. La principale difficulté avec ces régulateurs est d'éviter les étincelles.

Tous les régulateurs à force centrifuge présentent d'ailleurs un défaut encore plus radical ; ils agissent trop tard. Ils ne remplissent leur rôle

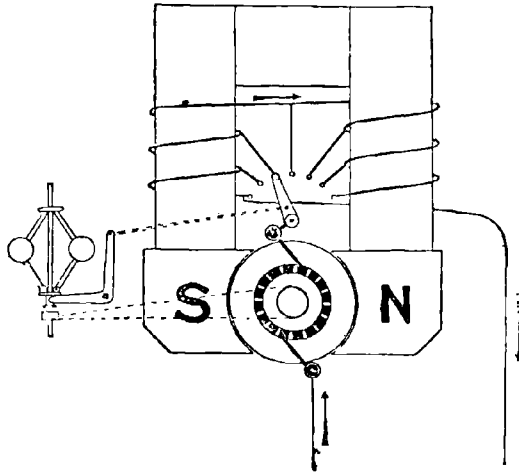


Fig. 399. — Régulateur automatique à force centrifuge.

que quand la vitesse a varié ; or un régulateur parfait ne doit pas avoir besoin d'attendre un changement de vitesse pour fonctionner.

RÉGULATEURS DYNAMOMÉTRIQUES

L'Auteur a imaginé ¹ un autre genre de régulateur auquel ne s'applique pas cette dernière objection. Il a proposé d'employer un dynamomètre monté sur l'arbre du moteur, pour actionner un appareil de régulation constitué soit par un régulateur périodique dérivant ou interrompant le courant pendant une partie de chaque révolution, soit par une résistance variable intercalée dans une portion du circuit. L'appareil dynamométrique peut être d'un type quelconque, dynamomètre à courroie (comme celui de von Hefner-Alteneck) ou dynamomètre à poulie (tel

¹ Brevet anglais, 1639 de 1883.

que celui de Morin ou de Smith). Dans cette dernière disposition, qui est la plus pratique, une poulie folle tournant sur l'arbre du moteur est reliée par un montage à ressort à une poulie fixe. Le moteur, dans sa rotation, entraîne la poulie fixe en avance sur la poulie folle, et cette avance angulaire est proportionnelle au moment du couple. Arrivée à un certain point, elle met alors en jeu le système de régulation. Le régulateur fonctionne donc ici non pas sous l'action de la vitesse du moteur, mais sous l'action de l'effort qu'il développe. Tout changement dans cet effort agit instantanément sur le régulateur dynamométrique, avant que la vitesse ait le temps de varier. Si ce régulateur est spécialement disposé à cet effet, on peut même faire dépasser au moteur sous charge la vitesse qu'il prend à vide.

RÉGULATEURS ÉLECTRIQUES

Un autre mode de régulation, qui n'exige aucun organe mobile, a encore été proposé par l'Auteur. Les électro-aimants sont ici constitués par un double jeu de pôles disposés sous des angles différents par rapport aux balais du moteur. Une paire de pôles magnétiques, ayant une certaine inclinaison, est soumise à l'action de bobines en série ; l'autre paire, ayant une inclinaison différente, est soumise à l'action de bobines en dérivation. Quand les deux groupes de bobines en série et en dérivation fonctionnent, ils donnent naturellement naissance à un pôle résultant ayant une inclinaison intermédiaire. Si l'effort demandé au moteur diminue, la vitesse de celui-ci tend à augmenter, en déterminant un accroissement de courant dans les électros dérivés et une diminution dans les électros en série ; d'où, modification dans l'inclinaison effective et obstacle à l'accélération du moteur.

En 1880, M. G. G. André a fait breveter un moteur dans lequel les électro-aimants étaient enroulés en deux circuits distincts, l'un de gros fil et l'autre de fil fin ; le courant se partageait entre eux et l'induit était relié en pont entre ces circuits, exactement comme le galvanomètre est relié en pont entre les circuits d'un pont de Wheatstone. Des moteurs réglés conformément à ce principe ont été construits, dès 1884, par le lieutenant F. J. Sprague ; ils se distinguaient par leur excellente régulation.

La méthode de régulation automatique la plus parfaite en théorie est, sans aucun doute, celle imaginée par MM. les professeurs Ayrton et Perry, et décrite dans le travail qu'ils ont publié dans le *Journal of the*

*Society of Telegraph Engineers*¹. La théorie d'auto-régulation exposée par eux demande l'étude la plus attentive. Elle est développée dans les pages suivantes ; mais il est bon de prévenir le lecteur que, pour éviter toute confusion dans l'emploi des symboles, nous n'avons pas suivi la notation de MM. les professeurs Ayrton et Perry ; les symboles employés par nous ont la même signification que dans les chapitres précédents. L'Auteur n'a pas adopté non plus la partie de la démonstration de MM. les professeurs Ayrton et Perry dans laquelle ils envisagent une portion du moteur comme faisant frein sur une autre portion. Il préfère regarder l'emploi d'un enroulement en dérivation opposé à un enroulement en série — qui est le résultat final de cette méthode de régulation — comme un simple enroulement différentiel destiné à produire un certain effet.

THÉORIE DES MOTEURS AUTO-RÉGULATEURS

Dans le chapitre consacré à l'auto-régulation des machines dynamo-électriques (p. 267 à 283), nous avons indiqué les diverses solutions du problème relatif au montage d'une machine devant, sous vitesse constante, fournir à un circuit l'énergie électrique dans la condition de potentiel constant. La solution générale du problème consistait dans l'emploi de certaines combinaisons d'électro-aimants, donnant un champ initial indépendant du courant dans le circuit principal.

On conçoit aisément qu'on puisse maintenant renverser le problème et construire des moteurs à électro-aimants combinés de telle façon qu'ils fonctionnent à une vitesse constante, quelle que soit la charge qui leur est imposée, s'ils sont alimentés dans la condition-type de distribution sous potentiel constant. Il est évident sans calculs numériques, que les enroulements doivent se faire opposition mutuelle, l'un tendant à désaimanter les électro-aimants, l'autre tendant à les aimanter. — Prenons le cas d'un moteur monté en dérivation, alimenté sous un potentiel constant \mathcal{E} , et tournant à une certaine vitesse avec une certaine charge. Si la charge est brusquement enlevée, le moteur va commencer à s'emporter ; il en résultera un accroissement de la force contre-électromotrice développée et un affaiblissement du courant dans l'induit. Mais la diminution de courant ne sera pas suffisante pour ramener la vitesse à sa valeur primitive, en raison de la résistance interne de l'induit, qui s'oppose à l'utilisation, comme travail, de toute l'énergie

¹ Tome XII, mai 1883. — Voir également un article plus récent dans le *Phil. Mag.*, 1888.

du courant d'induit. Une bobine démagnétisante de puissance convenable, roulée sur l'électro-aimant et montée en série, produira cependant l'effet voulu. Pour une diminution de charge, il pourra en effet se produire une réduction correspondante de courant, et l'augmentation de champ qui en résultera sera suffisante pour produire la force électromotrice supérieure nécessaire, sans augmentation de vitesse.

Cette combinaison peut, on le voit, être considérée à juste titre comme un enroulement différentiel.

Pour la distribution sous courant constant aucun mode d'enroulement, soit différentiel soit additionnel, ne permet de résoudre le problème, et l'on fait usage de régulateurs spéciaux.

Le tableau synoptique suivant fait ressortir parallèlement les moyens mis en œuvre pour réaliser ou obtenir l'auto-régulation des génératrices ou des moteurs :

GÉNÉRATRICE	MOTEUR
DONNÉE : <i>vitesse constante.</i>	Résultat cherché : <i>vitesse constante.</i>
Résultat cherché : <i>e constant.</i>	DONNÉE : \mathcal{E} <i>constant.</i>
$\left. \begin{array}{l} \text{Magnétisme} \\ \text{initial} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Aimants en acier.} \\ \text{Aimantation indé-} \\ \text{pendante.} \\ \text{Bobines en déri-} \\ \text{vation.} \end{array}$	$\left. \begin{array}{l} \text{Magnétisme} \\ \text{initial} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Aimants en acier.} \\ \text{Aimantation indé-} \\ \text{pendante.} \\ \text{Bobines en déri-} \\ \text{vation.} \end{array}$
+ Bobines en série régulatrices.	+ Bobines en série régulatrices.

Dans la discussion de la théorie du moteur auto-régulateur, nous suivrons la même marche générale que dans la discussion de la théorie de la génératrice auto-régulatrice, c'est-à-dire que nous chercherons une équation exprimant la condition de la constance demandée.

Donnée : \mathcal{E} *constant.*

(a) *Moteur magnéto-électrique avec bobine régulatrice en série.* — En employant la même notation que précédemment, on a pour la force contre-électromotrice développée dans l'induit : —

$$E = \frac{n}{t} N\Phi;$$

ainsi que

$$E = \mathcal{E} - (r_a + r_s) i.$$

Mais Φ se compose de deux parties : — l'une permanente Φ_1 ; l'autre

dépendant de la bobine en série et qu'on peut représenter par $qN_s i$, q ayant la même signification qu'à la page 272, et étant égal à 4π divisé par dix fois la somme des résistances magnétiques. Sa valeur dépend en conséquence de la perméabilité et, par suite, du degré de saturation du fer du circuit magnétique. Réservant ce point pour l'examiner ultérieurement, on peut écrire

$$\Phi = \Phi_1 - qN_s i.$$

Si l'on avait mis le signe $+$ au lieu du signe $-$, on aurait trouvé la solution correspondant au signe négatif, indiquant que les enroulements doivent être effectués de telle sorte que le courant dans la bobine en série circule en sens négatif ou démagnétisant. On met le signe négatif parce qu'on sait d'avance qu'il doit en être ainsi. On suppose également, quant à présent, qu'il n'existe pas de réactions d'induit. En remplaçant Φ par sa valeur dans l'équation fondamentale, on a

$$E = \frac{n}{t} (N\Phi_1 - NqN_s i);$$

et, en égalant cette valeur à celle fournie pour E par la seconde des équations précédentes, on trouve

$$\frac{n}{t} = \frac{\mathcal{E} - (r_a + r_s)i}{N\Phi_1 - NqN_s i}. \quad [\text{I.}]$$

Une expression de la vitesse étant ainsi obtenue, il faut en examiner les différents termes ou facteurs, pour voir quels sont ceux qui sont variables et ceux qui sont constants, et en déduire une relation qui rende $\frac{n}{t}$ constant. Mais il y a, tant au numérateur qu'au dénominateur, deux termes, dont le premier est une constante, tandis que le second contient la variable i . Avec un peu d'attention on voit que la fraction ne peut avoir une valeur constante sans que les deux coefficients de la variable dans les seconds termes soient entre eux dans le même rapport que les deux constantes composant les premiers termes; autrement dit, $\frac{n}{t}$ ne peut être constant que si l'on a

$$\frac{\mathcal{E}}{N\Phi_1} = \frac{r_a + r_s}{NqN_s}$$

ou

$$\frac{\mathcal{E}}{\Phi_1} = \frac{r_a + r_s}{qN_s}, \quad [\text{II.}]$$

qui est l'équation de condition demandée.

Si cette condition est remplie (et on remarquera que le nombre de spires en série nécessaire est, comme pour la génératrice auto-régulatrice, proportionnel à la résistance intérieure de la machine), la vitesse sera constante et aura pour valeur

$$\frac{n}{t} = \frac{\mathcal{E}}{N\Phi_1} = \frac{r_a + r_s}{NqN_s} \quad [\text{III.}]$$

D'après la première de ces équations, on voit que la vitesse à laquelle la machine se règle ainsi est précisément celle à laquelle cette machine actionnée comme génératrice fournirait, en circuit ouvert, une force électromotrice égale à celle sous laquelle les conducteurs l'alimentent comme moteur. Cette machine fonctionnant comme moteur sans charge prendrait naturellement une allure réduisant le courant qui passe dans son induit au minimum qu'elle peut atteindre en tournant à cette vitesse. Il est évident qu'en donnant une intensité suffisante à la partie permanente du magnétisme, on peut abaisser autant qu'on veut la vitesse critique, c'est-à-dire celle pour laquelle le moteur se règle lui-même. Plus la charge du moteur augmente, plus le courant qui passe dans son induit doit augmenter, ce qui ne peut se réaliser que si la force contre-électromotrice développée dans cet induit diminue. Comme la vitesse doit se maintenir, ce résultat est atteint par un abaissement du magnétisme provenant d'un accroissement de courant dans les bobines démagnétisantes. La quantité représentée par q , qui dépend de la perméabilité du fer, doit naturellement être prise comme une moyenne entre ses deux valeurs extrêmes correspondant au maximum de charge et à la charge nulle. Le magnétisme est maximum quand le moteur tourne à vide. Quand la charge est maximum, si le moteur fonctionne avec un rendement de 80 p. 100, par exemple, E sera les 80 p. 100 de \mathcal{E} ; c'est-à-dire que Φ sera les 80 p. 100 de Φ_1 . C'est entre ces limites d'aimantation que doit être prise la moyenne de q . On voit d'après l'équation que, si le moteur est déjà pourvu d'un enroulement donné, en série, on pourra trouver une valeur de \mathcal{E} pour laquelle la condition d'auto-régulation sera encore remplie.

Le raisonnement qui précède s'applique également, dans son entier, au cas des moteurs à excitation indépendante.

(b). *Moteur en dérivation avec bobine régulatrice en série.* — Ce cas en comprend réellement deux : celui de la dérivation simple et celui de la longue dérivation. Nous considérerons le dernier qui est le seul

employé dans la pratique. — Les équations fondamentales seront ici : —

$$E = \frac{n}{t} N \Phi,$$

$$E = \mathcal{E} - (r_a + r_s) i_a,$$

$$\mathcal{E} = r_d i_d,$$

$$\Phi = q N_d i_d - q N_s i_a.$$

On en tire successivement

$$\frac{n}{t} = \frac{E}{N q N_d i_d - N q N_s i_a},$$

$$\frac{n}{t} = \frac{\mathcal{E} - (r_a + r_s) i_a}{N q N_d i_d - N q N_s i_a},$$

$$\frac{n}{t} = \frac{r_d i_d - (r_a + r_s) i_a}{N q N_d i_d - N q N_s i_a},$$

valeur qui ne peut être constante que si les coefficients respectifs de i_d et de i_a au numérateur sont entre eux dans le même rapport que les coefficients correspondants au dénominateur, ce qui donne comme équation de condition : —

$$\frac{r_d}{N q_1 N_d} = \frac{r_a + r_s}{N q_2 N_s}.$$

Les valeurs de q sont distinguées ici par des indices différents pour la raison suivante : — Si la relation ci-dessus est réalisée, il n'y aura pratiquement aucun courant dans l'induit quand le moteur fonctionnera sans charge, et la force contre-électromotrice $\frac{n}{t} N q_1 N_d i_d$ sera égale à \mathcal{E} . Dans cet état de choses, où la bobine en dérivation travaille en plein, le magnétisme atteint son maximum, et q_1 (qui est inversement proportionnel à la résistance magnétique totale) aura sa valeur minimum. D'un autre côté, quand le moteur fonctionne sous sa charge maximum, le courant dans son induit (et par suite l'action démagnétisante des bobines régulatrices) est à son maximum, et l'aimantation sera à sa plus faible valeur de fonctionnement, tandis que q_2 sera à son maximum. Ceci étant posé, l'équation de condition peut se mettre sous la forme

$$\frac{N_d}{N_s} = \frac{r_d}{r_a + r_s} \cdot \frac{q_2}{q_1}. \quad [\text{IV. (a)}]$$

Dans la première édition de cet ouvrage il n'avait pas été tenu compte

de la saturation ; aussi les formules n'étaient-elles qu'approximatives, l'équation de condition se trouvant réduite à

$$\frac{N_d}{N_s} = \frac{r_d}{r_a + r_s}, \quad [\text{IV.}]$$

qui est l'expression de la règle d'Ayrton et Perry pour l'enroulement du moteur auto-régulateur. On peut remarquer cependant que, les résistances du circuit d'induit étant très faibles dans un moteur bien étudié, et le rendement élevé dans son ensemble, l'action démagnétisante des bobines en série n'a besoin, même à pleine charge, de réduire l'aimantation que de quelques centièmes, de sorte que q_s peut devenir très sensiblement égal à q_t . D'ailleurs, si les balais sont décalés en arrière, l'induit lui-même peut agir pour partie comme bobine démagnétisante en série et compenser ainsi la modification dans la perméabilité. Il est absolument certain que des moteurs enroulés différemment dans la proportion indiquée par l'équation [IV.] se règlent eux-mêmes très approximativement. Le lieutenant F. J. Sprague a construit d'excellents moteurs bobinés conformément à cette règle. — Ce mode d'enroulement présente une très curieuse propriété : — Supposons que, le moteur étant immobile, on y lance un courant ; les ampères-tours dus à la dérivation seront égaux à $\frac{\mathcal{E} N_d}{r_d}$, tandis que ceux dus à la bobine en série seront $\frac{\mathcal{E} N_s}{r_a + r_s}$; suivant l'équation [IV.] ces deux nombres seront égaux et de signes contraires. Il ne devrait, en conséquence, y avoir aucune excitation magnétique. Mais, s'il y a le moindre décalage des balais, la tendance magnétisante de l'induit entrera en jeu, et, s'il existe un décalage négatif considérable des balais, il aura pour effet de déterminer une aimantation de l'inducteur dans le mauvais sens, de sorte que le moteur démarrera en sens inverse. On peut remédier à cet inconvénient en mettant hors circuit ou en renversant la bobine en série, jusqu'à ce que le moteur ait atteint sa vitesse. Ce dernier mode de procéder est préférable, attendu que le couple additionnel supplémentaire du moteur en série est très avantageux pour vaincre la résistance statique au mouvement qui s'oppose au démarrage.

Il va de soi que le nombre de spires en dérivation doit théoriquement être tel que le moteur, fonctionnant comme génératrice à l'allure donnée, développe une force électromotrice égale à \mathcal{E} .

*Détermination pratique des bobinages en dérivation et en série*¹. — Il en est du bobinage compound des moteurs comme de celui des dynamos (p. 284). Des expériences simples permettent de trouver les enroulements convenables : on roule une bobine provisoire et excitée d'une façon indépendante et on ajoute à la résistance de l'induit une résistance égale à la future résistance r_s . Deux expériences sont nécessaires. On fait d'abord tourner le moteur sans aucune charge au frein, en employant la différence voulue de potentiel \mathcal{E} ; et on excite la bobine provisoire, en observant le nombre d'ampères-tours nécessaires pour ramener la vitesse à la valeur voulue $\frac{n}{t}$. Ce nombre d'ampères-tours est alors égal à $N_d i_d$, i_d étant, au point de vue économique, le courant indiqué comme devant passer dans la dérivation. On fait ensuite tourner le moteur avec toute sa charge au frein, et l'on excite de nouveau l'inducteur avec un nombre d'ampères-tours tel que la vitesse reste constante à $\frac{n}{t}$ tours, comme précédemment. A la suite de cette expérience et de la précédente on peut calculer N_s .

On ne doit pas s'attendre à trouver, pour un moteur à enroulement différentiel, un rendement aussi élevé que celui d'un moteur à bobinage non différentiel. L'énergie dépensée dans le premier cas pour l'aimantation de l'inducteur est en effet plus grande comparativement à l'aimantation produite. Si, par exemple, la bobine démagnétisante a en ampères-tours une valeur égale au quart de celle des bobines magnétisantes, la puissance nécessaire pour produire l'aimantation voulue sera supérieure de 50 p. 100, ou de moitié, à celle exigée dans le cas d'une simple aimantation directe².

CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MOTEURS A ENROULEMENT DIFFÉRENTIEL COMPOUND

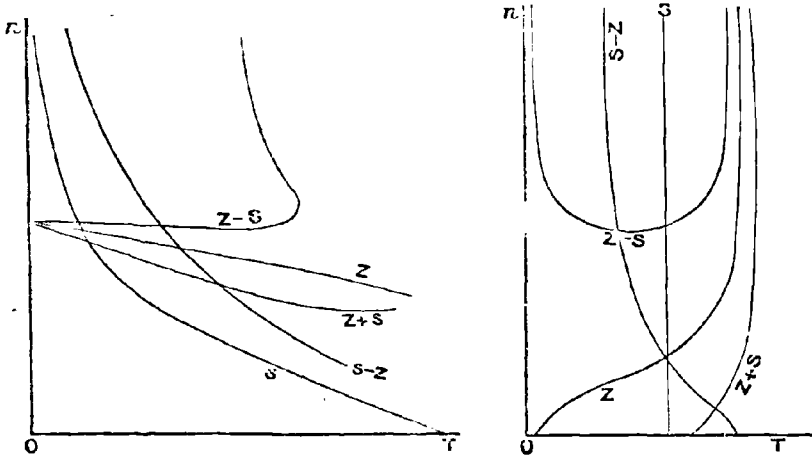
Il peut être commode de considérer ici la représentation graphique de la manière dont se règle la vitesse et le couple mécanique dans les moteurs munis d'enroulements mixtes³.

¹ Il faut remarquer que ce procédé diffère de celui indiqué par les Professeurs Ayrton et Perry dans leur mémoire sur les électromoteurs, dans le *Journal Soc. Teleg. Engineers* de mai 1883. Leur procédé est basé sur le volume de cuivre des bobines d'inducteurs que l'on suppose constant.

² Le Dr Frölich a publié dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift* de juin 1885 des observations très approfondies sur les moteurs à enroulement compound alimentés sous potentiel constant ou sous courant constant.

³ Les courbes de moteurs à bobinage mixte sont empruntées à l'ouvrage du Dr Frölich - *Die Dynamo-elektrische Maschine* - (traduction française par E. Boistel, chez Baudry et C^{ie}). — Rechniewski est arrivé à des courbes semblables; voir *Séances de la Société de Physique*, 1885, p. 197.

Les courbes pour alimentation sous potentiel constant sont représentées par la figure 400, dans laquelle les lettres S et Z , mises au lieu de N_s et de N_d , se réfèrent respectivement aux enroulements en série et en dérivation. Les formes des courbes correspondant aux bobinages mixtes diffèrent quelque peu selon les proportions relatives des deux jeux de bobines.



Caractéristiques mécaniques de moteurs, alimentés.
 Fig. 400. — Sous potentiel constant. Fig. 401 — Par courant constant.
 $S = N_s$; $Z = N_d$.

Le cas important est celui du bobinage différentiel marqué $Z - S$ (c'est-à-dire $N_d - N_s$), dans lequel un petit nombre de spires en série vient corriger l'abaissement de la courbe correspondant au bobinage en dérivation simple; on remarquera que, jusqu'à une certaine limite, la vitesse est sensiblement constante, mais qu'il existe une valeur maximum pour le couple mécanique. — Dans le cas d'alimentation par courant constant, représenté par les courbes de la figure 401, le seul enroulement qui donne une approximation de vitesse constante est l'enroulement différentiel avec bobine en dérivation à grande action et bobine en série à faible action. En effet, comme dans le cas d'une génératrice à courant constant, la variation d'aimantation doit s'effectuer sur une plage très considérable, incompatible avec une moyenne quelconque de perméabilité.

M. Picou a donné dans *La Lumière électrique*, XXIII. 114, 1887, une élégante méthode graphique pour le traitement du problème de l'auto-régulation des moteurs.

AUTRES MODES DE RÉGULATION DES MOTEURS

M. Mordey et M. C. Watson ont eu une autre idée pour obtenir l'auto-régulation des moteurs. Ils revêtent l'induit de deux enroulements aboutissant chacun à un collecteur distinct. L'un de ces enroulements — le principal — est le circuit induit ordinaire du moteur ; il est alimenté par le courant issu de la source extérieure et détermine la rotation de l'induit. L'autre, qu'on peut appeler l'enroulement d'induit de réglage, est peu considérable et placé par-dessus l'enroulement principal du moteur, ou côte à côte avec lui. Cet enroulement supplémentaire n'est pas relié aux conducteurs extérieurs ou à la source de courant, mais bien à l'enroulement inducteur, par l'entremise d'un collecteur ou commutateur spécial et de balais. On voit que cet enroulement supplémentaire d'induit, tournant dans le champ magnétique, constitue une génératrice. L'action régulatrice se produit de la façon suivante : — Lorsque, par suite d'une diminution de charge, la vitesse tend à augmenter, l'enroulement supplémentaire d'induit tend à accroître l'intensité du champ en envoyant plus de courant dans les bobines inductrices ; il en résulte un accroissement de la force contre-électromotrice du moteur qui diminue le courant reçu des conducteurs et réduit ainsi la vitesse à sa valeur normale. Inversement, une augmentation de charge, tendant à réduire la vitesse, est contre-balancée par une diminution du courant d'aimantation due à l'enroulement supplémentaire, qui abaisse la force contre-électromotrice du moteur et laisse un courant plus intense arriver par les conducteurs. On voit que ce procédé, basé sur deux actions concordantes, n'exige pas une dépense d'énergie aussi grande dans les inducteurs qu'un enroulement différentiel ; il n'est pas non plus sujet à l'objection d'un démarrage possible du moteur en sens inverse. D'autre part, il a l'inconvénient de nécessiter un collecteur de plus. Cette manière de résoudre la question a donné de très bons résultats ; mais elle a été rendue inutile, sauf dans des cas spéciaux, par le procédé plus simple ci-après décrit.

M. Mordey¹ a découvert ce fait d'une importance capitale que, si un moteur monté en simple dérivation est construit dans des conditions parfaites (c'est-à-dire si la résistance de son induit est très faible et celle de ses électros en dérivation très grande, si ses électro-aimants sont en même temps très puissants comparativement à son induit, si

¹ Voir *Phil. Mag.*, janvier 1886.

cet induit est convenablement lamellé et sectionné, de telle sorte que les courants parasites et la self-induction y soient réduits à un minimum), une dynamo en dérivation ainsi établie, alimentée par des conducteurs sous différence de potentiel constante, tourne à vitesse constante quelle que soit sa charge¹. La légère action démagnétisante de l'induit, quand les balais sont décalés négativement de manière à annihiler les étincelles, agit en réalité comme une sorte de bobine démagnétisante spéciale. Les épreuves relatées dans le tableau ci-dessous montrent une constance de vitesse à 1 1/2 p. 100 près, pour toutes les charges comprises dans les limites de fonctionnement du moteur.

POTENTIEL aux bornes (volts).	COURANT en ampères.	PUISSANCE EN CHEVAUX au frein.	TOURS par minute.	COUPLE mécanique en kgm.
68,4	44	1,1	1 125	0,70
68,4	126	7,4	1 120	4,60
68,4	165,5	10,36	1 115	6,75
68,4	180	11,14	1 110	7,30

Sous une force électromotrice moindre le même moteur se réglait presque aussi bien, mais à une vitesse moindre. On a remarqué que, surtout quand le moteur développait peu de puissance, un affaiblissement du champ augmentait sa vitesse.

Il est possible de régler les moteurs sous courant constant en les munissant d'une dérivation magnétique variable, à l'inverse de ce qui a été proposé par Trotter pour les génératrices à courant constant.

On a suggéré d'autres moyens² de réglage de la vitesse, résultant de modifications dans l'aimantation; mais il en est peu parmi eux qui soient automatiques ou auxquels on puisse se fier.

¹ Ce résultat pouvait être prévu d'après l'équation de la page 587, dans laquelle, si $r_a + r_s = 0$, la condition de régulation est $N_s = 0$.

² Voir dans l'*Electrical World*, XIII. 311, 1889, un très intéressant travail de M. F. B. Crocker, illustré de nombreuses figures.

CHAPITRE XXI

TYPES RÉCENTS DE MOTEURS A COURANT CONTINU

Presque toutes les bonnes dynamos modernes (à excitation indépendante, dérivée, ou compound) peuvent servir de moteurs lorsqu'elles sont alimentées par un courant fourni sous tension convenable ; mais il faut faire attention à la position des balais pour qu'elles fonctionnent normalement, et la machine ainsi employée doit être telle qu'elle donne par elle-même, si elle tournait comme génératrice, le voltage spécifié à la vitesse voulue. L'étude préalable des moteurs repose exactement sur les mêmes principes¹ que celle des machines génératrices ; les mêmes qualités, faible résistance intérieure, inducteurs puissants, et judicieuse élimination des courants parasites, qui font une bonne génératrice, s'appliquent également à la réalisation d'un bon moteur. — Supposons par exemple qu'il s'agisse d'un projet de moteur de 10 chevaux, devant faire 500 tours par minute sous une différence de potentiel de 200 volts entre les conducteurs. Comme 10 chevaux représentent 7360 watts, un moteur devant fournir effectivement 7360 watts devra en absorber (à 85 p.100 de rendement net) 8660. De plus, si son rendement électrique doit être de 90 p.100, par exemple, il devra développer 180 volts de force contre-électromotrice. En divisant 8660 watts par 180 volts, on trouve 48,10 ampères pour le courant qu'il absorbera à charge normale. Il suffit, en conséquence, d'étudier un projet de dynamo à inducteurs puissants, susceptible de fournir 50 ampères sous 180 volts à une allure de 500 tours par minute, pour obtenir le moteur cherché.

Snell a donné les règles suivantes comme expression de la puissance

¹ Pour la discussion d'un projet de moteur, voir un travail de Snell dans *The Electrician*, XXII. 313 et 403, 1889; et le *Journ. Inst. Electr. Engineers*, XX. 1891.

réelle en chevaux qu'on peut demander aux moteurs en toute sécurité et d'une façon continue : —

Induits en anneau, bipolaires; chevaux = $0,01 \times l d^2 \frac{n}{t}$;

Induits en tambour, bipolaires; chevaux = $0,015 \times l d^2 \frac{n}{t}$;

l étant la longueur et d le diamètre de l'induit, en centimètres, et $\frac{n}{t}$ le nombre de tours par seconde.

On pourrait supposer d'après le début de ce chapitre que toute description spéciale de moteurs est superflue. Certaines formes de machines se signalent cependant plus particulièrement comme moteurs; nous les décrivons ci-après.

Moteurs Ayrton et Perry. — Parmi les moteurs mis dans le commerce à une certaine époque se trouvent des types spéciaux produits par Ayrton et Perry et constitués par un induit extérieur fixe, en anneau, à l'intérieur duquel tourne un inducteur. On en trouvera la représentation dans les figures 221 et 222, pages 370 et 371 de la première édition française de cet ouvrage. Ces moteurs présentaient dans leur structure le défaut d'avoir un inducteur trop faible pour pouvoir fonctionner sans étincelles. Aussi, bien qu'ils fussent remarquablement compacts et commodes, ont-ils été abandonnés.

Moteurs Reckenzaun. — M. A. Reckenzaun a étudié un projet de moteur spécialement applicable aux tramcars et aux embarcations. Il évite ici l'emploi de la fonte en raison des dimensions plus grandes et du poids plus considérable qu'elle entraînerait, et les noyaux inducteurs sont formés de plaques épaisses en fer forgé, recourbées à chaud de manière à former deux électro-aimants en fer à cheval dont les extrémités des branches sont tournées vers l'intérieur. Ces extrémités sont refendues de manière à recevoir une série de pièces de fer en forme de segments circulaires qui constituent les pôles, comme on le voit sur la figure 402. Cette machine est légère comparativement à sa puissance, en même temps que compacte et robuste. Ainsi la hauteur totale d'un moteur de tramcar, d'une puissance de 8 chevaux à 800 tours par minute, n'est que de 33 centimètres; complet, il pèse 27,2 kilogrammes et est capable de développer (au frein) jusqu'à 12 chevaux pendant de courtes périodes. L'induit, du type Gramme, a

28 centimètres de long. La section du noyau d'induit est de 267 millimètres sur 35 millimètres et celle des noyaux d'inducteur de 228,6 millimètres sur 35 millimètres. Les électro-aimants sont montés en série ; chaque branche porte deux bobines (trois dans certains cas), qui peuvent être couplées parallèlement ou en série, de manière à permettre

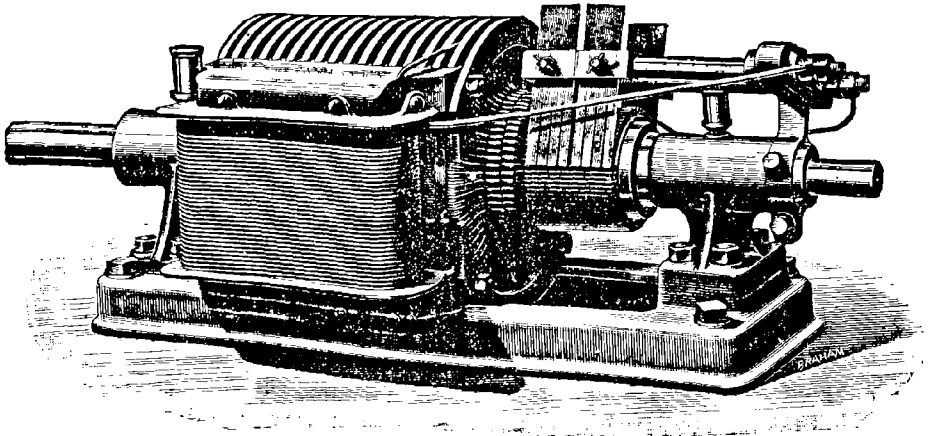


Fig. 402. — Moteur Reckenzaun.

de faire varier l'excitation, et d'obtenir à volonté les différents degrés de vitesse et de puissance nécessaires dans le fonctionnement d'un tramway, sans nécessiter l'intervention de résistances artificielles, aussi bien que d'avoir au démarrage un couple énergique, quand toutes les bobines sont couplées en série.

Moteur Immisch. — M. Moritz Immisch fabrique depuis de longues années des moteurs fort connus pour leur excellente construction mécanique, leur rendement et leur puissance spécifiques élevés. Ceux de petites dimensions ont seuls des induits en anneau ; les autres portent des induits en tambour ; et les électro-aimants sont ordinairement du type en double fer à cheval, comme l'indique la figure 403. La figure 404 représente une coupe en long de la machine, au cinquième de sa grandeur d'exécution. L'induit a 13 centimètres de diamètre. A 1400 tours par minute le moteur fournit 8 chevaux sur l'arbre, avec un rendement de 85 p. 100. Il ne pèse que 159 kilogrammes.

Le noyau d'induit est formé de disques de tôle isolés par des feuilles minces d'amianté ; aux extrémités et à certains intervalles se trouvent des disques plus épais munis de dents d'entraînement en saillie ; tous

les disques sont fermement clavetés sur l'arbre. Les enroulements sont soigneusement isolés au papier Willesden enduit de vernis au caoutchouc.

Le montage de l'induit présente certaines particularités parmi lesquelles les connexions du collecteur méritent une considération spé-

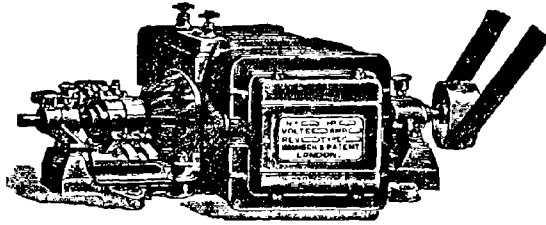


Fig. 403. — Moteur Immisch.

ciale. Les touches de ce dernier sont alternativement groupées en deux jeux, l'une à côté de l'autre, de telle sorte qu'un seul balai large, ou l'ensemble de deux balais côte à côte sur un même porte-balais, mette toujours hors circuit la bobine élémentaire de l'induit qui va de la touche du jeu d'avant à la touche voisine appartenant au jeu

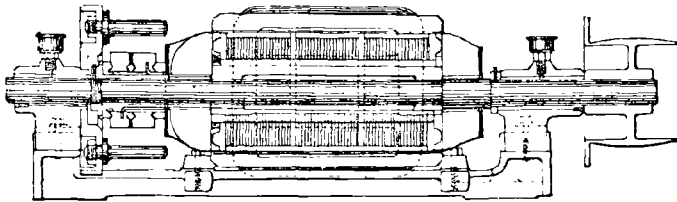


Fig. 404. — Moteur Immisch (Coupe).

d'arrière; le résultat est exactement le même que si l'on avait un collecteur ordinaire à deux paires de balais reliés entre eux, ces balais étant, pour chaque paire, écartés d'une distance égale à la largeur d'une touche. Cette mise hors circuit des bobines quand elles arrivent au point neutre a pour effet, suivant l'inventeur, de diminuer les actions d'aimantation transversale et de rendre inutile le décalage des balais qui sont, une fois pour toutes, calés sous l'angle voulu. Quelques essais au frein, faits en présence de l'Auteur sur un petit moteur d'un demi-cheval, pesant 20 kilogrammes environ (dont à peu près 3,5 kg seulement de cuivre), ont donné les résultats suivants : —

TOURS par minute.	VOLTS	AMPÈRES	PUISSANCE électrique absorbée en chevaux.	PUISSANCE fournie en chevaux	RENDEMENT
1 420	40	10,5	0,565	0,354	0,625
1 840	49	10,5	0,69	0,46	0,666
1 920	50	11	0,74	0,48	0,645
2 280	61	12	0,97	0,57	0,587

Un grand moteur de 30 chevaux, pesant 850 kilogrammes, a fourni les chiffres ci-dessous :

TOURS par minute.	VOLTS	AMPÈRES	PUISSANCE électrique absorbée en chevaux.	PUISSANCE fournie en chevaux	RENDEMENT
660	500	40	33	29,8	0,90
680	500	48	32,2	29,5	0,91
675	500	49	33	29,5	0,89

Les moteurs Immisch sont actuellement construits par la « General Electric Traction Co », dont l'ingénieur, M. A. T. Snell, a étudié un grand nombre de moteurs d'une certaine importance applicables à la traction et au service des mines ¹. Dans beaucoup de ces moteurs on emploie aujourd'hui des balais de charbon (fig. 278, p. 368). Le mode d'entraînement des noyaux d'induits des grandes machines est représenté dans la figure 251, page 338.

Moteur « Agir ». — Ce moteur, étudié par MM. Andersen et Girdlestone (et qui a obtenu le prix dans le concours institué par le journal *Industries*), est représenté par la figure 405. Il a été étudié en vue de répondre à la donnée du programme, c'est-à-dire de tourner à 250 tours par minute sous une différence de potentiel de 150 volts entre les conducteurs. Il pèse 427 kilogrammes et a donné aux épreuves les résultats suivants : —

¹ Voir les Notes de M. Snell sur l'emploi de l'électricité dans les Mines, *Proc. South Wales Institute of Engineers*, 27 juillet 1891; ainsi qu'une Conférence de l'Auteur sur l'*Electricity in Mining* publiée chez MM. Spon.

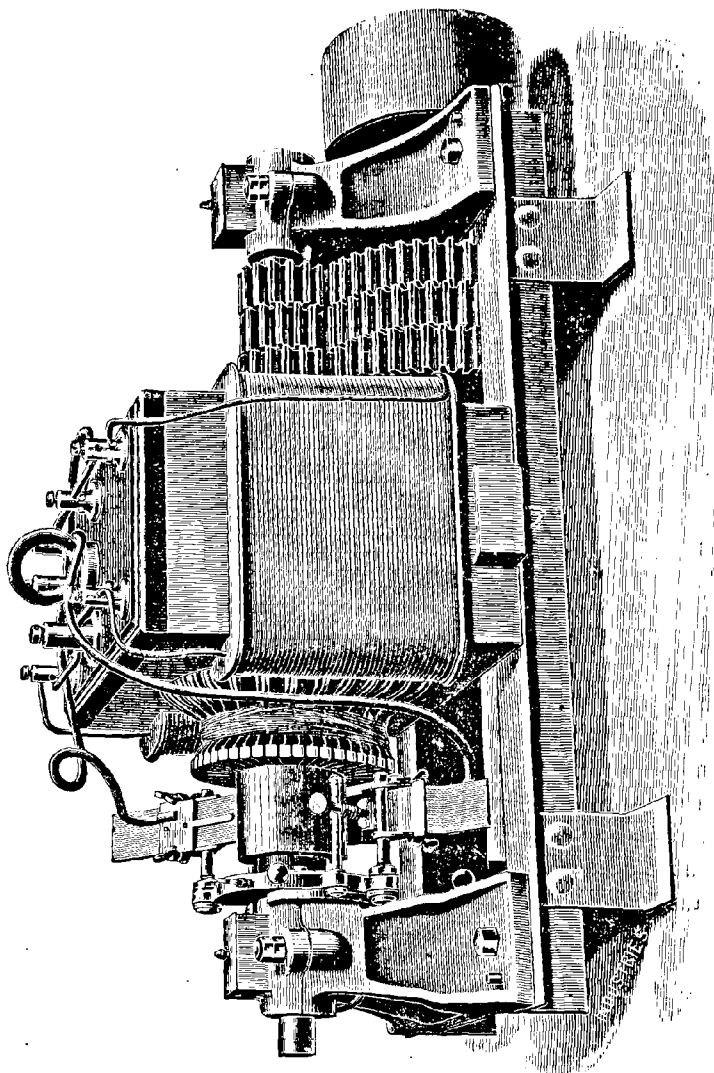


Fig. 405. — Moteur « Agir » (Andersen et Girdlestone).

Puissance électrique d'alimentation en chevaux	11,81	12,70	14,84
Nombre de tours de l'arbre par minute	248	252	285
Puissance mécanique fournie en che- vaux	7,31	9,48	10,60
Rendement net p.100.	61,90	74,70	71,40.

Moteurs Brown. — Il en est fait mention au Chapitre XXVI, et un de ces grands moteurs à 4 pôles, de 240 chevaux, est décrit page 478.

Moteurs Laurence, Paris et Scott. — Un grand nombre de maisons fournissent aujourd'hui d'une manière courante des moteurs de toutes dimensions. Les constructeurs sus-mentionnés ont bien voulu nous donner les détails suivants sur un de leurs types, monté en dérivation, prenant 10 ampères sous 100 volts entre les conducteurs, et d'une puissance effective d'un peu plus d'un cheval.

Induit bipolaire; enroulement en tambour; diamètre du noyau, 114 millimètres; longueur, 101,5 millimètres; section droite du noyau de fer, 49 centimètres carrés; nombre de touches du collecteur, 36; nombre de spires par section, 10, en fil de 1 millimètre de diamètre; nombre total de spires, 360; poids de fil sur l'induit, 1,59 kilogramme; résistance de l'induit, 1,06 ohm (à chaud). Noyaux d'*inducteurs* en fonte, de 115 centimètres carrés de section enroulement en dérivation, 7 kilogrammes de fil de 0,635 millimètre de diamètre; résistance, 140 ohms (à chaud); nombre de spires en dérivation, 4960; bobine de démarrage sur une seule des branches de l'inducteur, 560 spires de fil de 0,889 millimètre de diamètre, 1,36 kilogramme.

Moteurs Sprague. — Le lieutenant F. J. Sprague, de New-York, a produit plusieurs formes de moteurs, de conception et de construction

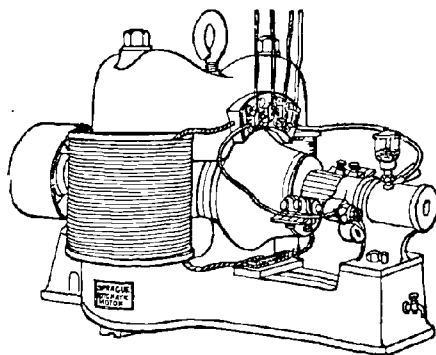


Fig. 406. — Moteur Sprague.

excellentes, qui sont employés par centaines aux Etats-Unis. L'un de ces types est représenté par la figure 406. Pour plus amples détails, le lecteur pourra se reporter aux comptes rendus publiés par la presse

technique ¹. Le mode d'enroulement adopté par Sprague pour les électro-aimants est un enroulement différentiel compound identique à celui imaginé en 1883 par Ayrton et Perry, et basé sur l'emploi d'une bobine en série avec l'induit pour désaimanter et affaiblir l'inducteur ². Sprague a en outre appliqué un grand nombre d'autres méthodes ingénieuses de régulation et de dispositions pratiques.

Moteur Goolden à l'usage des Mines. — M. Atkinson a étudié pour MM. Goolden et C^{ie} un moteur pour mines du type de la figure 121, page 196, mais avec quelques modifications spéciales en vue de son utilisation dans les mines de houille ³ ; toutes les parties mobiles en sont enfermées de manière à supprimer toute possibilité d'explosion par

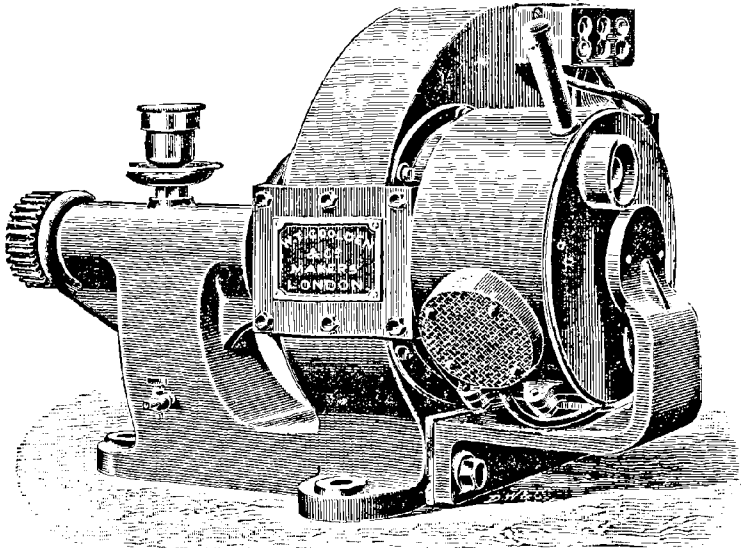


Fig. 407. — (Goolden) Moteur complètement enveloppé pour Mines.

étincelles aux balais. Comme on le voit sur la figure 407, le collecteur et les balais, en charbon, sont complètement enveloppés par une boîte métallique.

¹ *Electrical World*, octobre 1886; — Traité de Martin et Wetzler, *The Electric Motor*, p. 157-175; — *Electrical World*, XIV. 3, 1889, et XV. 370, 1890; — et *The Electrician*, XXIV. 248, 1890.

² Brevets anglais, 45768 de 1884 et 3524 de 1885.

³ Voir le travail de l'Auteur, *Electricity in Mining*, p. 38, pour les dispositions spéciales aux mines.

Moteurs pour Locomotives électriques ¹. — On a construit un grand nombre de moteurs pour la traction électrique sur tramways et chemins de fer. Pour cet objet les inventeurs se sont surtout attachés aux points suivants : induit solidement établi au point de vue mécanique, faible vitesse avec ou sans renvoi de mouvements, et construction susceptible de résister aux détériorations par l'eau, la boue, la poussière, ou par échauffement. En raison de l'énorme intensité de courant qu'il est appelé à supporter au moment du démarrage, l'induit doit être capable de résister à un couple mécanique considérable et être pratiquement à l'abri du feu aussi bien que de l'eau. Tous les équipages réducteurs de vitesse sont progressivement tombés en défaveur, l'entraînement direct à faible vitesse donnant plus de sécurité. Toutes ces conditions impliquent l'emploi de moteurs à électro-aimants relativement puissants. — Il n'y a pas lieu d'entrer ici dans un compte rendu détaillé des conditions de la locomotion électrique en général, ni de décrire les centaines de tramways ou chemins de fer électriques actuellement en exploitation. — Il nous suffira de citer la locomotive électrique du chemin de fer souterrain « City and South London », à deux moteurs de 50 chevaux étudiés par Hopkinson. Les quatorze premières locomotives de ce type, construites par MM. Mather et Platt, ont déjà fourni plus de 800 000 kilomètres et transporté plus de 7 000 000 de voyageurs. — On peut citer également les locomotives construites par Siemens, dans lesquelles les électro-aimants sont relativement extrêmement puissants et permettent à l'induit de fournir le couple voulu avec un courant relativement peu intense. — Un spécimen de moindre importance en est offert par le moteur de 20 chevaux employé sur le tramway de Bessbrook, et décrit par E. Hopkinson², qui fait 100 tours par minute, avec 100 ampères sous 220 volts. Il est monté en série ; la résistance de l'induit est de 0,112 ohm, et celle de l'inducteur de 0,113 ohm. Son rendement net dépasse 90 p. 100. Le champ magnétique en est très intense, ce qui permet d'effectuer le renversement de marche en renversant simplement le courant dans l'induit.

Moteurs à Courant constant pour circuits d'éclairage par arcs.
— L'exploitation de moteurs sur les circuits en série exige des types

¹ Comme type récent, voir le moteur à faible vitesse de Thomson-Houston décrit dans l'*Electrical World*, XVII. 93, 1891.

² *Proc. Inst. Civil Engineers*, XCI. Part. I. 1887-1888.

spéciaux. La plupart d'entre eux ont des régulateurs à force centrifuge pour régler la puissance demandée aux conducteurs. Ils sont presque tous d'origine américaine¹.

Moteurs de faible puissance. — Plusieurs constructeurs se sont spécialement adonnés à l'établissement de moteurs de faible puissance applicables à la ventilation ou autres travaux légers. En Angleterre, MM. Cuttriss, de Leeds; en France, M. Trouvé; en Allemagne, divers fabricants, et en particulier l'« Allgemeine Gesellschaft », de Berlin; aux Etats-Unis, MM. Curtis, Crocker, et Wheeler² ont tous développé avec succès ce genre de construction.

Moteurs oscillants. — Le type primitif adopté autrefois par Page, Hjorth et autres, et dans lequel était réalisé un simple mouvement de va-et-vient, au lieu d'un mouvement de rotation, a été remis au jour dans ces dernières années pour des moteurs spéciaux destinés à actionner des marteaux ou des perforateurs. En 1879, Werner von Siemens³ établit un perforateur de mines dans lequel un courant direct et un courant alternatif à périodes lentes étaient combinés de manière à produire un mouvement de va-et-vient sans aucun commutateur; cette idée a été reprise depuis par Atkinson et Van de Poele. En 1880, Marcel Deprez⁴ construisit un marteau-pilon électrique, dans lequel une sorte de piston plongeur en fer était successivement attiré vers le haut et vers le bas dans une bobine cylindrique, recouverte d'un enroulement divisé en sections dans lesquelles le courant était successivement envoyé par un commutateur.

Moteurs à Courants alternatifs. — Ces moteurs sont spécialement étudiés au Chapitre XXIV.

¹ Voir l'*Electrical World*, XV. 269, 1890; XVII. 120 et 130, 1891; ainsi que *The Electrician*, XXV. 46, 45, et 131, 1890.

² Voir *Engineering*, XLIV. 83, 1887; et l'*Electrical World*, IX. 4, 9, et 203, 1887; XIII. 309, 1889; XV. 114 et 269, 1890; XVII. 130, 191, 1891.

³ Brevet allemand 9469 de 1879. (Voir les *Travaux* de Siemens, t. II, p. 389.)

⁴ *La Lumière électrique*, IX. 44, 1883.

CHAPITRE XXII

PRINCIPES DES COURANTS ALTERNATIFS

Le courant alternatif est le résultat de renversements rapides du courant, qui s'élève et s'abaisse en une succession d'impulsions ou d'ondes. Le potentiel oscille par le fait au-dessus et au-dessous d'une ligne représentant sa valeur nulle, avec une extrême rapidité, sous l'influence d'une force électromotrice qui se renverse très rapidement. Les qualificatifs *alternatif*, *oscillatoire*, *périodique*, *ondulatoire*, et *harmonique* ont tous été employés pour définir un courant de cette nature. L'Auteur donnerait la préférence à l'expression *courants en forme de vagues* (wave-currents) comme étant à la fois plus courte en anglais et mieux appropriée. [Nous avouons ne pas voir une grande différence, sauf la brièveté, entre cette expression et celle de courants ondulatoires.] Les propriétés des courants alternatifs diffèrent quelque peu de celles des courants directs ou continus. Ils sont affectés non seulement par la résistance du circuit, mais aussi par leur propre inertie ou self-induction, qui diminue l'amplitude des ondes, retarde leur phase et en général les adoucit. En raison de ces particularités, une étude préliminaire en est nécessaire.

On a vu (p. 29) comment le rapprochement et l'éloignement répétés d'une bobine et d'un pôle d'aimant développent des forces électromotrices alternatives ; et (p. 206) comment la rotation d'une simple spire de fil dans un champ magnétique uniforme y donne naissance à un véritable courant périodiquement ondulé. On a vu également comment on peut exprimer la valeur de la force électromotrice périodique à un instant quelconque, en fonction du sinus de l'angle dont a tourné la spire. Dans le cas des machines réelles dont les champs magnétiques ne sont pas uniformes, ni les bobines de simples boucles de fil, l'élévation et l'abaissement périodiques des forces électromotrices ne suivront

pas nécessairement une simple loi de sinus. La forme des ondulations imprimées au courant dépendra de la configuration des faces polaires, ainsi que de la forme et de la largeur des bobines.

Considérons le cas d'une machine dans laquelle les champs sont créés par une double couronne de pôles opposés, de signes contraires (comme dans les machines de Wilde, Siemens, Ferranti, Mordey, etc.). Si les bobines induites et les noyaux inducteurs sont tous deux de forme circulaire et d'égal diamètre, les bobines, au fur et à mesure qu'elles approcheront des extrémités polaires des noyaux, entreront évidemment progressivement dans le champ, et le flux de force intercepté par chaque bobine pendant des déplacements égaux ira en augmentant graduellement pour atteindre un maximum quand les axes respectifs de la bobine et du noyau coïncideront, puis, à partir de ce point, en décroissant, en suivant presque une loi de sinus, sa plus grande variation se présentant quand le bord de la bobine se trouve en face de l'axe du noyau; mais, si la bobine et le noyau ont des sections extérieures rectangulaires, la plus grande variation se présentera pour chaque fil quand un des bords de la bobine passera devant un des bords de la surface polaire. Dans ce cas la force électromotrice induite n'obéira plus à la loi de sinus. Des expériences sont nécessaires pour vérifier si, dans une dynamo donnée, l'accroissement et la diminution de force électromotrice et de courant dans les bobines induites suivent cette loi de sinus. M. Joubert, pour mesurer les courants d'une machine Siemens, s'est servi de l'électromètre, et, captant le courant

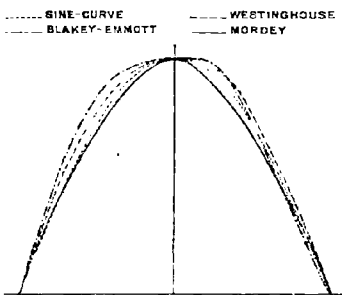


Fig. 408. — Courbes d'alternateurs.

Sine Curve = Sinusoïde.

Blakey-Emmott, — *Westinghouse*, — *Mordey* = Noms de constructeurs.

à une phase déterminée quelconque, il a trouvé très approximativement une courbe de sinus¹. Nous avons décrit une autre méthode, éga-

¹ En ce qui concerne les modifications plus récemment apportées à cette mé-

lement applicable à l'étude des machines à courant continu et due à M. Mordey.

La figure 408 donne quatre courbes pour une demi-période. L'une d'elles est une courbe de sinus ; les trois autres sont relevées sur des alternateurs réels ; on voit combien elles concordent sensiblement avec une véritable sinusoïde. Celle qui s'en rapproche le plus est celle de l'alternateur Mordey, qui se maintient presque exactement, sur tout son tracé, à l'intérieur de la courbe de sinus. Ainsi se trouve suffisamment justifiée l'hypothèse pratiquement admise que la force électromotrice induite suit une loi de sinus, de sorte qu'on peut en mettre l'expression à chaque instant sous la forme

$$E_s = D \sin \theta,$$

dans laquelle D est la valeur maximum ou l'*amplitude* atteinte par E , et θ un angle de *phase* sur un cercle imaginaire auquel elle est rapportée. — Considérons un point P tournant sur une circonférence dans le sens des aiguilles d'une montre. Si l'on prend pour unité le rayon de ce cercle, PM sera le sinus de l'angle θ mesuré à partir de 0° . Le cercle étant divisé en un nombre quelconque d'angles égaux,

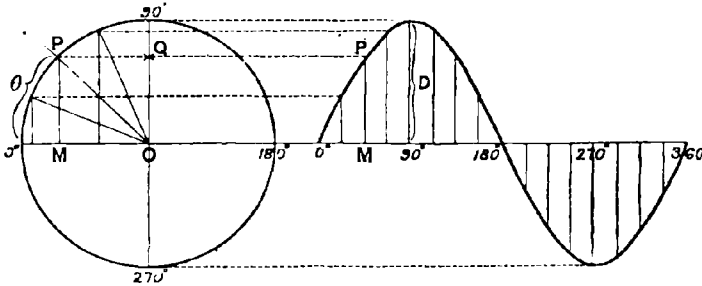


Fig. 409. — Sinusoïde.

supposons qu'on trace de même les sinus correspondant à chacun d'eux. Ces sinus étant ensuite portés en ordonnées, à égales distances les uns des autres, le long d'un axe horizontal, comme dans la figure 409, leurs extrémités supérieures donneront la courbe de sinus.

Dans cette figure 409, un tour du point P autour du cercle primitif correspond à une *période complète* ou cycle complet de variations.

thode, voir page 71, où l'on trouvera des références. Pour les recherches les plus nouvelles, voir un travail du D^r J. Linde dans l'*Elektrotechnisches Echo*, n° 20, 1891.

La valeur de la force électromotrice induite (qui varie entre $+D$ et $-D$ comme valeurs absolues maximum) peut être, à un instant quelconque, représentée soit par le sinus PM , soit par sa projection sur le diamètre vertical, ce qui donne OQ . A la rotation du point P correspond une oscillation ou mouvement de va-et-vient continu du point Q sur toute la longueur du diamètre.

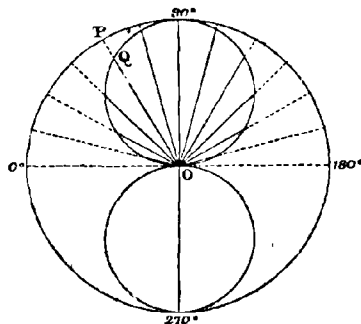


Fig. 410.

On peut encore représenter d'une autre manière des variations périodiques de ce genre, en employant un diagramme analogue à celui de Zeuner pour la distribution à tiroir dans les machines à vapeur. Soit, comme précédemment, le cercle extérieur (fig. 410) un cercle de référence le long duquel se meut le point P . Sur chacun des rayons verticaux comme diamètres décrivons un autre cercle ; les longueurs telles que OQ , découpées sur les rayons du premier cercle, représenteront les valeurs correspondantes du sinus de l'angle considéré. Si l'on faisait tourner, concentriquement avec cette figure, une carte appliquée sur elle et dans laquelle serait découpée une fente étroite suivant un rayon, l'intersection de cette fente avec les deux cercles intérieurs montrerait les variations de la force électromotrice pour les diverses positions.

Le lecteur qui voudrait approfondir l'étude graphique de ces phénomènes pourrait consulter l'excellent traité du professeur Fleming¹, ou celui de M. Blakesley², et divers travaux de M. Kapp³.

¹ Fleming, *The Alternate Current Transformer* (Le transformateur à courant alternatif), Londres, 1889.

² Blakesley, *Alternate Currents of Electricity* (Courants électriques alternatifs), Londres, 1889. (Traduction française par W. C. Rechiniewski, 1893, chez Baudry et C^{ie}).

³ Kapp, sur « Les machines à courants alternatifs », *Proc. Inst. Civil Engineers*, pt. III. 1889.

Il s'agit maintenant de montrer comment on calcule l'augmentation et la diminution du courant développé dans le circuit par cette force électromotrice périodique. — Ceux qu'effraie le calcul pourront passer directement à la solution géométrique du problème, page 613.

Étude analytique. — Pour calculer ces variations de courant il faut se rappeler que les mouvements de rotation des bobines sont supposés s'effectuer à une vitesse uniforme, et que la force électromotrice induite est proportionnelle à la variation du flux de force à travers le circuit. Pour se faire une idée complète de ce qui se passe, on doit faire entrer en ligne de compte le flux de force *induit par le circuit sur lui-même*¹.

Considérons une simple boucle de fil parcourue par un courant. Chaque partie de la boucle sera entourée d'un tourbillon de lignes magnétiques semblable à celui de la figure 13, et celles qui appartiennent au courant dans l'une des moitiés de la boucle tendront à agir sur celles appartenant à l'autre moitié de ladite boucle. Cette influence des lignes de force du champ galvanique, ou cette tendance à influencer sur les autres parties du circuit ne se manifeste cependant que quand il y a modification dans l'intensité du courant ou dans la forme du circuit. On sait que toute augmentation dans le flux de force qui pénètre un circuit (comme celle résultant, par exemple, de l'introduction d'un pôle d'aimant qu'on y enfoncerait) tend à développer un courant qui s'oppose au mouvement. Tout accroissement de l'intensité du courant dans la boucle augmentera le flux de force qui la pénètre, et cette augmentation tendra par elle-même à développer un courant en sens inverse. D'autre part toute diminution d'un courant dans un circuit

¹ Des recherches mathématiques de Neumann sur les effets de la self-induction du circuit considérée par rapport à une force électromotrice périodique ont été publiées en 1845; mais les phénomènes de self-induction avaient été antérieurement étudiés par Henry et par Faraday.

D'autres études mathématiques sur les courants électriques alternatifs ont été faites par Weber dans ses *Elektrodynamische Maasbestimmungen* (Mesures électrodynamiques), et par les auteurs suivants : —

Koosen, *Pogg. Ann.*, LXXXVII. 386, 1852.

Le Roux, *Ann. Chim. Phys.* [3], I. 463, 1857.

Clerk Maxwell, *Phil. Trans.*, 1865, p. 473.

Jamin et Richard, *Ann. Chim. Phys.* [4], XVII. 276. 1869.

Joubert, *Ann. de l'Ecole Normale Supérieure*, X. 1881; et *Journal de Physique*, S. II. t. II. 293, 1883.

Lord Rayleigh, *Phil. Mag.*, Mai 1886, p. 375.

Hopkinson, Conférence à l'*Inst. Civil Engineers* (sur l'Éclairage électrique), 1883.

Hopkinson, *Journal Soc. Telegr. Engineers*, XIII.

Hopkinson, *Proc. Roy. Soc.*, Février 1887.

On trouvera dans l'ouvrage de Fleming sur le *Transformateur de courants alternatifs*, des extraits des travaux ci-dessus les plus importants.

tend, en réduisant le flux magnétique qui le pénètre, à s'opposer à la diminution de ce courant. Un courant agit, en réalité, comme s'il était doué d'inertie et tend à maintenir constant le flux de force qu'embrasse son circuit. Cette inertie du courant dans un circuit est également connue sous le nom d'induction du circuit sur lui-même, ou, plus brièvement, de *self-induction* du circuit. — La self-induction dans un circuit, due, ainsi qu'on l'a vu, au flux de force que fait passer dans le circuit lui-même le courant qui y circule, est toujours le produit de deux facteurs. En étudiant le cas primitif de l'induction d'un courant dans une spire en mouvement dans un champ magnétique uniforme, nous avons négligé la self-induction et considéré le flux de force intercepté par la spire comme le produit de deux facteurs, savoir le flux magnétique total Φ pénétrant réellement le noyau de fer de l'induit, et le nombre N de conducteurs à sa périphérie. Avec la self-induction les deux facteurs seront différents. Le flux de force induit par le courant sur lui-même dans une boucle de fil sera proportionnel à l'intensité i de ce courant. Ce nombre sera, pour une simple boucle circulaire, également proportionnel à la surface de la boucle. Mais, pour des boucles ou spires qui ne sont pas circulaires, et pour des spires formées de plusieurs tours, aussi bien que pour des spires à l'intérieur desquelles il y a du fer, il serait nécessaire de se livrer à une étude beaucoup plus compliquée que ne le comporte cet ouvrage, si nous n'étions pas servis par une heureuse circonstance. Il suffit de dire que, pour une bobine composée d'un grand nombre de spires, le coefficient de self-induction est proportionnel au *carré* du nombre de spires. Chaque spire contribue en effet à la production d'un flux de force et concourt aussi à la variation du flux à travers le circuit.

En fait, les deux facteurs de la self-induction sont le courant i et une quantité symbolisée par la lettre L et désignée sous le nom de *coefficient de self-induction*, qui représente le flux magnétique que le circuit embrasserait ou induirait sur lui-même si le courant qui y circule avait une intensité égale à une « unité absolue ». Il en résulte immédiatement que, si un courant i circule dans un circuit dont le coefficient de self-induction est L , la self-induction totale du circuit sera égale à L fois i ; et le produit Li représentera le flux total embrassé par les circonvolutions du circuit. Il est non moins évident que, si un courant part de l'intensité 0 pour croître uniformément jusqu'à l'intensité i , la self-induction *moyenne* dans le circuit sera $\frac{1}{2} Li$.

Revenant maintenant au cas d'une bobine composée de N_1 spires

située sous un angle θ (mesuré à partir de la position initiale, comme dans la figure 133, pour laquelle elle est normale au champ), on voit qu'elle n'embrassera plus le flux total passant réellement par le circuit magnétique. Si l'on ne tient aucun compte de la self-induction, on peut écrire

$$\Phi_1 = N_1 \Phi \cos \theta, \quad [\text{I.}]$$

expression dans laquelle Φ_1 est le flux de force effectivement embrassé par le circuit.

Mais on sait que, si le circuit est parcouru par un courant i , l'intervention de la self-induction oblige à mettre l'équation sous sa forme complète

$$\Phi_1 = N_1 \Phi \cos \theta + Li. \quad [\text{II.}]$$

L'omission du terme de self-induction dans toutes les équations antérieures n'était justifiable que par les hypothèses suivantes : — d'abord, que la puissance des inducteurs surpassait assez celle de l'induit pour rendre le second terme négligeable ; en second lieu, que les équations obtenues s'appliquaient à des courants *continus*.

On sait en outre que toute variation de Φ_1 développe une force électromotrice induite qui, à un instant quelconque, a pour valeur

$$E = - \frac{d \Phi_1}{dt}, \quad [\text{III.}]$$

expression affectée du signe — pour montrer que tout accroissement de Φ_1 produira une force électromotrice inverse ou négative ; on est en effet obligé de faire dorénavant intervenir les signes des diverses quantités en jeu. Toute variation de Φ_1 , quelle qu'en soit la source, développera donc une force électromotrice. Or on ne peut modifier le nombre N_1 des bobines de l'induit ; mais on peut faire varier Φ , et, dans les alternateurs les plus récents, les dispositions sont prises pour qu'on puisse modifier, soit à la main, soit autrement, le flux Φ dans le champ ; à cet effet, les électro-aimants d'une machine à courants alternatifs sont ordinairement excités séparément par un courant constant issu d'une dynamo plus petite, appelée « excitatrice » (voir fig. 441 et 454). Pendant le fonctionnement de la machine, on ne peut davantage modifier le coefficient de self-induction de l'induit, qui dépend des dimensions de ce dernier, de sa forme, de son bobinage et de son noyau, ainsi que de la perméabilité magnétique ; mais il est possible de faire varier la self-induction du reste du circuit. Si l'on suppose que celle-ci

reste constante, les seules quantités réellement importantes en ce qui touche les variations qu'elles auront à subir, — les seules quantités dont les variations contribuent à celles de Φ_1 —, seront, en conséquence, θ et i . L'angle de position θ varie de 0 à 2π (radians); c'est-à-dire de 0° à 360° , en passant par toutes les valeurs intermédiaires, pour revenir à 0; son cosinus oscille par conséquent entre + 1 et - 1. Le courant i varie également d'une certaine valeur maximum $+i_{\max.}$ à une valeur négative égale $-i_{\max.}$ Nous négligerons toutes les variations des autres quantités, non pas que ces variations ne soient pas intéressantes, — ce qui est absolument inexact —, mais en raison de leur moindre importance pratique. On a donc

$$E = - \frac{d\Phi_1}{dt} = - \frac{d(N_1 \Phi \cos \theta + Li)}{dt}.$$

Supposons maintenant que, pour tourner de l'angle θ , la spire considérée de l'induit ait mis une petite fraction de seconde t . Si nous représentons par T le temps en secondes correspondant à un tour complet de l'induit (pour une machine bipolaire) ou le temps *périodique*, $\frac{1}{T}$ sera le nombre de tours¹ par seconde effectués par l'induit. L'angle θ sera dès lors naturellement la $\frac{t}{T}$ partie d'un tour complet, et, comme il y a 2π radians dans une circonférence, cet angle exprimé en radians sera

$$\theta = 2\pi \frac{t}{T} = \omega t,$$

$\omega = \frac{2\pi}{T}$ étant la *pulsation* (Fleming), homogène à une vitesse angulaire, et égale ici (machine bipolaire) à la vitesse angulaire.

En portant cette valeur dans l'expression de E et différentiant, on a

$$E = \frac{2\pi}{T} N_1 \Phi \sin \frac{2\pi}{T} t - L \frac{di}{dt} = \omega N_1 \Phi \sin \omega t - L \frac{di}{dt}. \quad [\text{IV.}]$$

Examinons attentivement cette équation. Elle montre que, si le circuit

¹ Dans les machines multipolaires, le nombre des périodes est supérieur à celui des tours de l'induit dans un rapport égal au nombre des pôles. Dans ce cas le symbole $\frac{1}{T}$ devra être considéré comme le nombre des *périodes*. Ce nombre de périodes a reçu le nom de *fréquence*; il est, comme on le voit, égal à $\frac{1}{T}$ c'est-à-dire au quotient du nombre de *périodes* (ou cycles complets) par le temps mis à les produire.

est ouvert, de sorte que i est nul, il n'intervient aucune self-induction. Il en est de même si le mouvement est tellement lent que le taux de variation de i soit inappréciable ; le second terme peut alors être négligé. Le signe négatif indique également que la portion de la f. é. m. due à la self-induction est en opposition avec l'autre portion.

Si l'on s'arrête un instant à considérer le cas d'un mouvement lent et qu'on néglige le terme de self-induction, on a

$$E = \frac{2 \pi}{T} N_1 \Phi \sin \theta = \omega N_1 \Phi \sin \theta,$$

qui est deux fois la valeur trouvée page 207 pour une machine à courant continu, dans laquelle les bobines élémentaires ne sont pas toutes en série, mais groupées en deux séries parallèles, et $\frac{1}{T}$ remplaçant ici $\frac{n}{t}$. En outre, comme la valeur moyenne¹ du sinus entre 0° et 90° est $\frac{2}{\pi}$, on a, pour la valeur moyenne de E ,

$$E \text{ (moyenne)} = \frac{4}{T} N_1 \Phi.$$

Il est également important de noter que, pour un mouvement de rotation lent, si la résistance du circuit est R , le courant à un instant quelconque sera

$$i = \frac{2 \pi N_1 \Phi}{T R} \sin \theta. \quad [\text{V.}]$$

Si on appelle D le produit $\frac{2 \pi}{T} N_1 \Phi$, on a pour le courant à l'instant θ

$$i = \frac{D \sin \theta}{R}. \quad [\text{VI.}]$$

Passons maintenant au cas où, le mouvement de rotation étant assez rapide, il faut tenir compte du terme de self-induction. — Bien que la self-induction donne naissance à des forces électromotrices perturbatrices et diminue la force électromotrice développée², encore ne faut-il

¹ Ou, plus exactement, $\frac{1}{\theta} \int_0^\theta \sin \theta \, d\theta = \frac{1 - \cos \theta}{\theta}$,

d'où, si $\theta = \frac{\pi}{2}$, la moyenne est $\frac{2}{\pi}$.

² « *Impressed* » des Anglais ; c'est la f. é. m. réellement produite, imprimée, par le générateur.

pas oublier que, si la force électromotrice utile à un instant quelconque est connue, la valeur instantanée correspondante du courant peut se calculer d'après elle par simple application de la loi d'Ohm. Ainsi, si E , donné par l'expression [IV.], page 610, est la force électromotrice utile, on peut écrire $E = Ri$; d'où

$$Ri = D \sin \theta - L \frac{di}{dt}.$$

On a là une équation différentielle de la forme

$$ay + \frac{b dy}{dx} = \sin cx.$$

Elle se résoud par

$$i_{\varphi} = \frac{D \cos \varphi \sin (\theta - \varphi)}{R} + Ce^{-\frac{R}{L}t}, \quad [\text{VII.}]$$

expression dans laquelle φ prend le nom de *décalage* ou *retard de phase* et a une valeur telle que

$$\text{tang } \varphi = \frac{2 \pi L}{TR} = \omega \frac{L}{R}.$$

Dans le second terme du second membre de l'équation précédente, le symbole C est une constante d'intégration, et e est employé dans son sens mathématique courant pour représenter le nombre 2,7182, base des logarithmes népériens ou hyperboliques. On peut laisser de côté ce second terme qui ne se réfère qu'aux irrégularités d'établissement du courant et s'évanouit au fur et à mesure que le temps t augmente. L'équation du courant se réduit en conséquence à la valeur suivante :

$$i_{\varphi} = \frac{D \cos \varphi \sin (\theta - \varphi)}{R}, \quad [\text{VIII.}]$$

que l'on peut comparer à la valeur que prendrait le courant s'il n'y avait pas de self-induction et que donne l'équation [VI.]. En comparant ces deux expressions, on voit que le courant suit encore une fonction de sinus; mais, au lieu d'être celle de l'angle θ , c'est celle de l'angle $(\theta - \varphi)$; c'est-à-dire que ses ondes sont *en retard* sur celles de la force électromotrice développée. L'amplitude du courant est également réduite, parce que tout se passe comme si l'amplitude de la force élec-

tromotrice développée avait passé de D à $D \cos \varphi$. En d'autres termes, la force électromotrice utile est égale à la composante de la force électromotrice développée correspondant au courant retardé.

Étude géométrique. — On peut traiter géométriquement ce problème relativement complexe à l'aide du diagramme précédemment indiqué. Il faut tout d'abord bien comprendre comment, si le courant subit des variations périodiques, le taux de ces variations (auquel sont proportionnelles les réactions de self-induction) subit également des variations périodiques, mais avec cette différence que les ondes de force électromotrice de self-induction retardent exactement d'un quart de période sur celles du courant, ou sont « en quadrature¹ » avec elles. Le taux de variation du sinus est en effet proportionnel au cosinus, et le cosinus n'est autre que le sinus déplacé d'un quart de circonférence. Par suite, quand, en employant dans des diagrammes un cercle de révolution, comme dans les figures 409 et 410, on a une ligne dans une position quelconque représentant le courant ou la force électromotrice utile qui lui donne naissance,

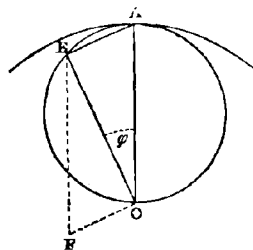


Fig. 411.

la ligne destinée à représenter la réaction de self-induction doit être menée à angles droits, — en quadrature —, avec le courant. Soit $O A$, figure 411, la valeur maximum de la force électromotrice développée. Sur $O A$ comme diamètre décrivons un cercle et sur ce cercle prenons un point E tel que l'angle $A O E = \varphi$; puis joignons $A E$ et $O E$. $A E O$ sera un angle droit, et $A E$ représentera la grandeur de la force électromotrice de self-induction si $O E$ représente le courant ou la force électromotrice utile qui le produit; le tout étant supposé tourner autour du point O , et les projections sur la ligne verticale étant considérées comme il est dit ci-dessus, page 606. On a ici deux forces électromotrices, la f. é. m. développée $O A$ et la f. é. m. de réaction $A E$ (ou $O F$ qui lui est égale), avec leur résultante ou force électromotrice utile $O E$, et un angle $E O A$, ou φ , entre elles; et la force électromotrice utile est égale à la force électromotrice développée multipliée par $\cos \varphi$. Étudions maintenant cet angle φ qui représente le retard de la force électromotrice utile (et par suite du courant) sur la force élec-

¹ Cette expression est due à M. Blakesley, *op. cit.*

aurait pu s'écrire¹

$$i_3 = \frac{D \sin (\theta - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \frac{4 \pi^2}{T^2} L^2}} = \frac{D \sin (\theta - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}, \quad [\text{IX.}]$$

forme sous laquelle la force électromotrice totale développée (et décalée) figure comme numérateur, et l'impédance comme dénominateur², au lieu d'avoir pour numérateur la composante utile de la force électromotrice, et pour dénominateur la résistance vraie.

Avant de quitter la figure 411 et le décalage, on peut noter que ce décalage est proportionnel à la fois à L et à $\frac{1}{T}$; de sorte que l'augmentation de fréquence exagérera les deux réactions d'induction, c'est-

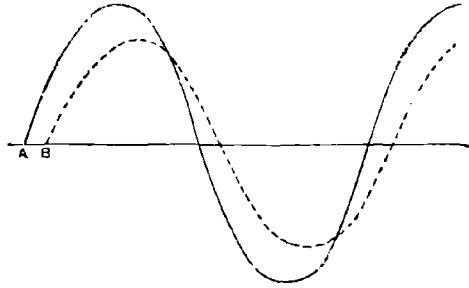


Fig. 413.

à-dire augmentera le décalage et diminuera ou fera tomber le courant. Mais une augmentation de résistance, tout en diminuant le courant, tend à diminuer le décalage. La self-induction a en conséquence pour effet de retarder l'élévation et l'abaissement du courant, de sorte qu'il atteint son maximum, non pas pour $\theta = 90^\circ$, mais pour $\theta = 90^\circ + \varphi$, et φ ne peut en aucun cas dépasser un quart de période, comme on le verra en considérant cette figure 411. De plus, les deux réactions inductrices augmenteront en même temps que la vitesse. Il y aura, par suite, moins de décalage si la machine est calculée pour fonctionner à

¹ C'est bien là la forme classique qu'elle doit prendre, et elle figurait ainsi dans les précédentes éditions de cet ouvrage. La notion complète d'une résistance apparente, formée pour partie d'une résistance réelle et pour partie d'une réaction d'induction, est cependant assez difficile à admettre. La réaction inductrice n'est pas de la nature d'une résistance, mais bien de la nature d'une force électromotrice, qui, combinée avec la force électromotrice développée, se traduit par une force électromotrice utile. [Elle se présente néanmoins homogène à une résistance et doit être admise comme telle. (N. d. T.)]

² Voir Maxwell, *Phil. Trans.*, 1865, p. 473.

faible vitesse, ou si l'on diminue sa fréquence, et si le coefficient de self-induction est faible comparativement à la résistance du circuit. On en conclut que le nombre de spires des bobines d'induit doit être maintenu aussi faible que possible, et qu'il faut donner au champ magnétique une intensité extrêmement considérable, règle également applicable aux machines à courant continu.

On peut sommer ces deux réactions inductrices, retard et affaiblissement du courant, dans un diagramme, figure 413. Soit A la courbe représentant l'élevation et l'abaissement du courant induit tel qu'il serait s'il n'y avait pas de self-induction. Du moment que la self-induction dans le circuit tend à la fois à retarder l'accroissement et la chute de la force électromotrice utile, et à l'affaiblir, elle aura pour effet de faire monter et baisser le courant suivant la courbe B, qui a une moindre amplitude et se trouve déplacée le long de l'axe des x .

On remarquera qu'un simple décalage n'absorbe aucune puissance, pas plus que la simple introduction des forces contre-électromotrices de self-induction. Si l'induction pouvait être limitée à ces deux effets, elle ne serait pas très préjudiciable ; elle aurait simplement pour résultat de faire fonctionner la dynamo comme une machine plus faible. Elle diminuerait le rendement de l'installation, mais non le rendement du fonctionnement.

Force électromotrice « virtuelle » ou « efficace ». — Les voltmètres et ampèremètres pour courants alternatifs ne donnent pas les véritables valeurs moyennes des nombres de volts et d'ampères. Ils mesurent ce qu'on appelle les volts « virtuels » ou « efficaces » et les ampères « virtuels » ou « efficaces ». Dans un voltmètre Cardew, en effet, l'échauffement du fil est fonction du carré de l'intensité du courant. Dans un électrodynamomètre, le couple mécanique dépend à chaque instant du produit des courants dans les circuits fixe et mobile ; par suite, quand on emploie l'appareil comme ampèremètre, ses indications sont fonction du carré du courant. Les lectures fournies par ces instruments, s'ils ont été calibrés sur des courants continus, ne sont donc pas de véritables moyennes, mais les racines carrées des moyennes des carrés. Or la moyenne des carrés des sinus (pris soit sur un seul quadrant, soit sur la circonférence entière) est $\frac{1}{2}$; en conséquence on obtiendra la valeur de la racine carrée du carré moyen des fonctions de sinus en multipliant leur valeur maximum par $\frac{1}{\sqrt{2}}$, ou par 0,707. Mais on a vu que la moyenne arithmétique des valeurs du sinus est 0,637. En consé-

quence un courant alternatif, s'il suit la loi sinusoïdale, produira un échauffement supérieur à celui dû à un courant continu de même intensité moyenne, dans le rapport de 0,707 à 0,637, c'est-à-dire 1,1 fois à peu près égal. Si un voltmètre Cardew est introduit dans un circuit à courants alternatifs dans lequel les volts oscillent entre les maximum + 100 et — 100 volts, il marquera 70,7 volts, bien que la moyenne arithmétique des sinus ne soit réellement que de 63,7 volts, et il faudrait 70,7 volts en courant continu pour produire la même déviation. Le terme *virtuel*¹ ou *efficace* a été adopté pour désigner ces valeurs des racines carrées des moyennes des carrés. On peut remarquer en passant que la force électromotrice efficace d'une dynamo montée pour courants alternatifs sera, en conséquence, 2,2 fois aussi élevée (comparer avec ce qui est dit page 636) que celle de la même dynamo montée en machine ordinaire à courant continu. Les équations précédemment établies subsistent d'ailleurs quelles que soient les valeurs, maximum ou efficaces, qu'on y fasse intervenir. Par exemple, on peut écrire

$$i \text{ maximum} = \frac{E \text{ maximum}}{\text{résistance}} \cos \varphi ;$$

$$i \text{ maximum} = \frac{E \text{ maximum}}{\text{impédance}} ;$$

ou

$$i \text{ efficace} = \frac{E \text{ efficace}}{\text{résistance}} \cos \varphi ;$$

$$i \text{ efficace} = \frac{E \text{ efficace}}{\text{impédance}} .$$

On peut tracer les courbes de fonctionnement soit sur les valeurs maximum, soit sur les valeurs efficaces.

Puissance moyenne. — On obtient la puissance moyenne en inté-

¹ J'adhère à l'expression *virtuel*; elle était employée avant celle d'*efficace* recommandée au Congrès de Paris en 1889 pour exprimer la racine carrée de la moyenne des carrés. Je l'adopte surtout parce que l'épithète *efficace* est déjà couramment employée en cinématique pour représenter la composante d'une force qui agit obliquement par rapport à la trajectoire, la force efficace étant égale à la force totale multipliée par le cosinus de l'angle sous lequel elle agit par rapport à la direction du mouvement.

[Malgré l'avis de l'Auteur, nous nous sommes conformé ici, comme dans tout le cours de cette traduction, à la terminologie internationale adoptée ou indiquée par les différents Congrès, et très justifiée d'ailleurs, à notre sens]. N. du T.

grant la puissance pendant une période et divisant par cette période. Son expression revêt alors l'une des formes suivantes :

$$\frac{1}{T} \int_0^T E i dt = \frac{1}{T} \int_0^T R i^2 dt = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{E^2}{R} dt.$$

Si E et i étaient toujours en concordance de phase, la puissance à un instant quelconque serait simplement le produit de leurs valeurs à cet instant; et la puissance moyenne, le produit de leurs valeurs efficaces, ou la moitié du produit de leurs valeurs maximum ¹. Mais, s'il existe entre elles un retard ou *décalage* φ , le produit à chaque instant doit être multiplié par $\cos \varphi$. De sorte que

$$\begin{aligned} \text{Puissance moyenne} &= E_{\text{eff.}} \times i_{\text{eff.}} \times \cos \varphi, \\ \text{---} \quad \text{---} &= \frac{1}{\sqrt{2}} E_{\text{max.}} \times i_{\text{max.}} \times \cos \varphi, \\ \text{---} \quad \text{---} &= i_{\text{eff.}}^2 \times R, \\ \text{---} \quad \text{---} &= \frac{E_{\text{eff.}}^2}{R}. \end{aligned}$$

Si l'on élève au carré l'expression [IX.] trouvée pour le courant, en substituant au carré du sinus sa valeur moyenne $\frac{1}{2}$, et qu'on la multiplie ensuite par R , on obtient pour la puissance moyenne (en watts)

$$P_{\text{moy.}} = \frac{2 \pi^2 N^2 \Phi^2 R}{T^2 \left(R^2 + \frac{4 \pi^2}{T^2} L^2 \right)};$$

et cette expression sera, suivant une règle algébrique bien connue, maximum par rapport à R quand R sera tel que les deux termes composant le dénominateur soient égaux, ou que la résistance soit égale à l'inductance. Dans ces conditions, le retard de phase est d'un huitième de période. Mais, bien que ce soit là la condition de rendement maximum de l'installation, la régulation est alors mauvaise. Aussi est-il

¹ Sur la mesure de la puissance moyenne des courants alternatifs, voir les mémoires du Prof. Ayrton et autres auteurs dans le *Phil. Mag.* et les *Proc. Roy. Soc.* de 1891, reproduits dans la plupart des journaux techniques; ainsi que les travaux de Swinburne et de Blakesley. La méthode de mesure de Blakesley à trois électrodynamomètres et celle d'Ayrton à trois voltmètres doivent être connues de tous ceux qui ont à prendre des mesures de puissance sur des circuits ou des machines à courants alternatifs.

préférable d'employer une machine fournissant des courants inférieurs à ceux qui produiraient un décalage aussi grand.

Exemple numérique : — Etant donné qu'une force électromotrice, de 65 volts efficaces, fournissant des courants alternatifs d'une fréquence de 50 périodes par seconde, agit sur un circuit dont la résistance est de 1,5 ohm, et le coefficient de self-induction de 0,002 *quadrant*¹; trouver le décalage, le courant et la puissance moyenne.

Pour trouver le décalage, il faut d'abord trouver l'inductance $\frac{2\pi}{T} L$, et la diviser ensuite par la résistance, ce qui donne

$$\text{tang } \varphi = \frac{2\pi L}{TR} = \frac{2 \times 3,1416 \times 50 \times 0,002}{1,5} = 0,419.$$

En se référant à une table de tangentes naturelles, on trouve que φ est de 22° 44'; d'où une table de cosinus naturels donne $\cos \varphi = 0,9223$. On peut encore calculer $\cos \varphi$ directement comme étant égal à $\frac{R}{\sqrt{R^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} L^2}}$. En

multipliant $\cos \varphi$ par 65 volts, on trouve 59,95, soit 60 volts efficaces, et, en divisant par la résistance, on obtient 40 ampères pour le courant efficace. La puissance moyenne est dès lors $65 \times 40 \times 0,9223 = 2400$ watts.

La figure 414 donne la solution géométrique du problème.

Soit OA = 65 volts efficaces la f. é. m. développée, à une échelle quelconque. Décrivons la circonférence de rayon OA et la demi-circon-

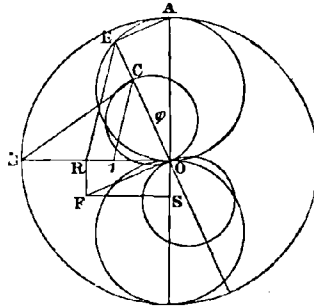


Fig. 414.

férence OEA de diamètre OA. Menons OB normalement à OA. Sur OB, prenons OR à une échelle convenable quelconque de résistance, O 1 étant égal à 1 ohm. A la même échelle, menons OS ou RF à angles droits et égales à l'inductance $\frac{2\pi}{T} L = 0,628$. Joignons OF. L'angle ROF cor-

¹ [Les Anglais donnent à l'unité de self-induction que nous appelons « quadrant » le nom de « henry ». — « Henry » soit; mais, suivant nos principes, nous n'adoptons cette expression qu'après sa ratification par un Congrès international.] N. d. T.

respond au décalage. Menons EO normale OF; elle coupe en E la demicirconférence décrite sur OA comme diamètre. EOA correspond également au décalage; par suite, EO représente la f. é. m. utile, et AE la f. é. m. transversale de self-induction $\frac{2\pi}{T} L i$. Joignons ER et, par 1, menons 1C parallèle à ER; CO représentera le courant. Comme OB n'est autre que OA qui a tourné de 90° , la surface du triangle BOC $= \frac{1}{2} OA \times OC \times \cos AOC = \frac{1}{2}$ puissance moyenne.

On est maintenant en mesure de comprendre pourquoi il est désirable que les courbes d'induction des alternateurs suivent la forme sinusoïdale et pourquoi on doit chercher à ne pas s'en écarter notablement. Suivant le théorème bien connu de Fourier, toute fonction périodique complexe à une seule valeur peut se décomposer en une série de fonctions périodiques simples différant d'amplitude et de phase, mais appartenant toutes à une série harmonique, dont les fréquences sont des multiples exacts d'une seule fréquence fondamentale.

Toute courbe ondulatoire complexe peut être regardée comme formée de sinusoïdes. — Par exemple, la courbe représentée par la figure 415 a peut être considérée comme composée des deux sinusoïdes indiquées

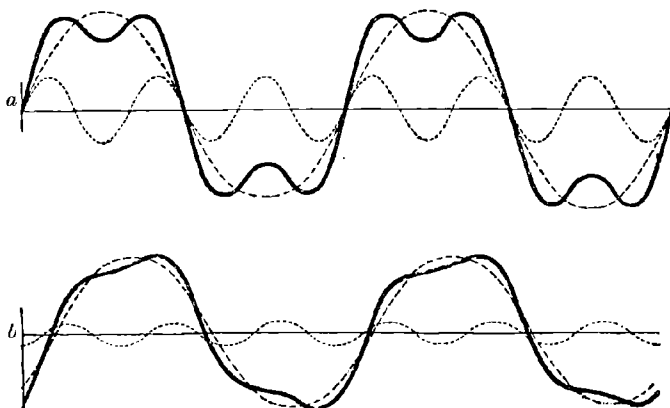


Fig. 415.

en pointillé, dont l'une a une fréquence égale à trois fois celle de l'autre. Mais, si cette courbe complexe représente la force électromotrice développée par un alternateur à pôles singulièrement conformés, quelle est la courbe de force électromotrice (ou de courant) utile quand il y a de la self-induction? L'amplitude est réduite à peu

près proportionnellement à la fréquence. Par suite la composante faiblement ondulée, qui a une fréquence trois fois égale, s'abaissera environ trois fois autant que l'ondulation fondamentale¹. Dans la figure 415 b on voit les deux ondes, modifiées par un décalage de $1/9$ de période et coupées mutuellement par l'onde fondamentale à 0,75 et par la petite onde à 0,35 de leurs amplitudes respectives; on y voit également l'onde résultante. Il est évident que la self-induction tend à adoucir les ondulations, y compris toutes les portions d'onde qui n'affectent pas la forme sinusoidale. Il en résulte que les alternateurs qui donnent des courbes d'induction de forme vraiment sinusoidale sont moins affectés que d'autres par la self-induction, se règlent mieux et donnent à l'installation un rendement plus élevé.

Relation entre les Courants alternatifs et la Capacité. — Si un condensateur est intercalé dans le circuit d'un alternateur, il sera soumis à une sorte de mouvement de va-et-vient de courant alternatif qui le chargera alternativement dans un sens et dans l'autre. La capacité de ce condensateur exerce sur le courant une action qu'on peut résumer en disant qu'elle agit comme une inductance, négative et réciproque. Si l'on désigne par C la capacité du condensateur (en farads), et par $\frac{1}{T}$ la fréquence, c'est-à-dire le quotient du nombre de périodes par le temps mis à les produire, elle agira comme une inductance (négative) de $-\frac{T}{2\pi C} = -\frac{1}{\omega C}$ quadrants. Une capacité en série dans le circuit a, en conséquence, pour effet d'accélérer la phase du courant, produisant un décalage de celui-ci en avance au lieu d'un décalage en retard. Une capacité agissant en dérivation sur le circuit, comme dans le cas où un condensateur est placé entre les deux conducteurs principaux, a pour effet d'augmenter l'intensité du courant depuis la dynamo jusqu'aux points du circuit reliés à ce condensateur, et, par suite, d'élever les potentiels efficaces de ces points, ce qui modifie le voltage du reste du circuit. Il existe, pour une fréquence, une résistance et une self-induction données, une valeur particulière de capacité qui augmente énormément le courant et le voltage par une sorte de résonance. Ces différents effets d'un condensateur ont été étudiés par divers auteurs. Fleming² en a donné une exposition très

¹ Voir les recherches d'Ayrton et Perry dans le *Journ. Inst. Electrical Engineers*, XVIII. 300, 1889.

² *Journal Inst. Electr. Engineers*, XX. 362, 1891.

claire, en même temps qu'une étude des phénomènes observés sur les conducteurs Ferranti alimentés par l'usine de Deptford.

Courant inactif. — Toutes les fois qu'il existe une grande différence de phase entre les volts et le courant (soit décalage en retard dû à de la self-induction, soit décalage en avance dû à une capacité), les watts réels sont, ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, de beaucoup inférieurs à la valeur apparente qu'on obtiendrait en multipliant simplement les uns par les autres les ampères efficaces et les volts efficaces ; car, ainsi qu'on l'a vu, ce produit doit en outre être multiplié par le cosinus du décalage (en retard ou en avance). Mais il y a deux manières d'envisager la question : le produit $E_{\text{eff.}} \times i_{\text{eff.}} \times \cos \varphi$ peut être considéré soit comme le produit des ampères efficaces par la partie réduite (ou composante utile) des volts efficaces, soit comme le produit des volts efficaces par la partie réduite des ampères efficaces. De même qu'une force quelconque peut être décomposée en deux composantes normales l'une à l'autre, de même un courant alternatif peut se décomposer en deux courants alternatifs composants dont la phase diffère d'un quart de période. Autrement dit, i peut être décomposé en deux parties, $i \cos \varphi$ concordant en phase avec les volts, et $i \sin \varphi$ en quadrature avec eux. Ces deux composantes du courant peuvent être désignées par les expressions courant *actif* (ou *de puissance*) et courant

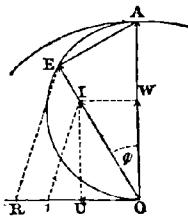


Fig. 416.

inactif. Dans la figure 416, OE représente la partie utile de la force électromotrice OA. On a vu, page 619, qu'une partie OI de OE représente le courant i . La composante OW de ce courant, en phase avec OA, est le courant actif et la composante OU, qui est en quadrature avec OA, est le courant inactif. Toutes les fois que, pour une cause quelconque, le décalage est grand, la partie inactive

du courant est grande également. Par exemple, si des transformateurs sont laissés en circuit ouvert, le courant dans le circuit primaire est (grâce à la self-induction) à peu près en quadrature avec la f. é. m., et, sans l'hystérésis ou les courants parasites dans les noyaux de fer, il serait presque absolument inactif.

Ainsi un courant de 100 ampères efficaces, décalé de $14/360$ de période sur la f. é. m., peut être décomposé en un courant actif ou de puissance de 97,03 ampères efficaces et en un courant inactif ou sans puissance de 24,2 ampères efficaces.

Courants alternatifs de haute fréquence. — Les courants de très grande fréquence, allant jusqu'à 10 000 ou 20 000 périodes par seconde, ont été étudiées par Spottiswoode¹, et plus récemment par Tesla², qui est arrivé à de très remarquables résultats. Ses alternateurs étaient à flux ondulé, l'un du type de Mordey, avec de nombreuses projections polaires de part et d'autre³; l'autre, du type à résistance magnétique variable. Avec ces fréquences extrêmement élevées, les courants s'écourent presque exclusivement le long des couches superficielles des conducteurs, au lieu de passer par toute leur section transversale; des barres droites de cuivre présentent elles-mêmes une impédance ou résistance apparente énorme.

Couple mécanique des alternateurs. — La présence d'un décalage quelconque du courant d'un alternateur conduit à un très singulier

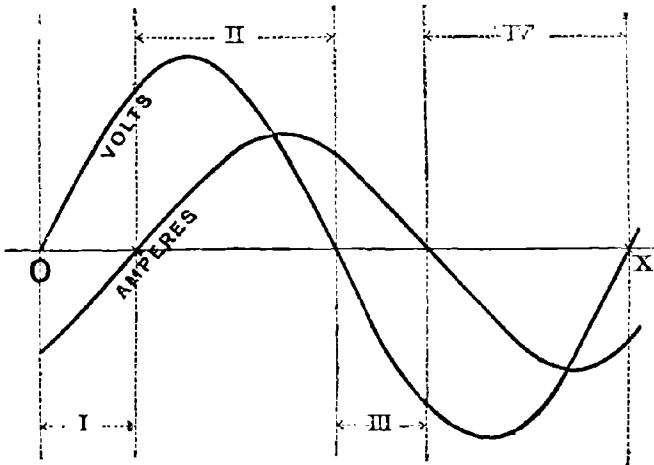


Fig. 417. — Effet d'un retard ou décalage du courant.

résultat. On a vu, page 539, que, là où les ampères circulent en concordance avec les volts, la machine fournit de l'énergie électrique et qu'il faut développer du travail mécanique pour l'actionner; mais que, si les ampères circulent à l'encontre d'une force contre-électromotrice, le circuit abandonne de l'énergie électrique qui est transformée en énergie mécanique et vient comme telle concourir à l'entraînement de la machine. Ces phénomènes correspondent respectivement l'un au cas

¹ *Proc. Roy. Soc.*, XXIII. 455.

² *American Inst. Electrical Engineers*, Mai 1891. Voir *Electrical World*, XVI. 1891, et *The Electrician*, XXVI. 549, 1891.

³ Voir *Electrical Engineer* (N. Y.), 18 mars 1891.

d'une génératrice, l'autre à celui d'un moteur. Mais considérons maintenant un alternateur dans lequel les ampères sont en retard sur les volts, comme dans le diagramme de la figure 417. Il est évident que, en conséquence de ce retard, les ampères circulent par moments à l'encontre des volts, au lieu de concorder avec eux. En réalité on peut diviser chaque période telle que OX en quatre parties, pendant deux desquelles, savoir II et IV dans la figure 417, les ampères et les volts sont de même sens, tous deux positifs ou tous deux négatifs; et pendant les deux autres desquelles, I et III, les ampères et les volts sont de sens contraires, en raison de ce que les volts ont changé de signe, tandis que les ampères, en retard, n'en ont pas encore changé. Or pendant les fractions de période II et IV, alors qu'il y a concordance de signes, la machine est dans la condition de génératrice et a besoin d'être actionnée mécaniquement, les courants développant dans l'induit un couple inverse. Mais, pendant les deux autres fractions de période I et III, où il y a opposition de signes, la machine est dans la condition de réceptrice ou moteur et tend à s'entraîner elle-même, le couple mécanique développé y concourant. Les conducteurs sont en conséquence constamment soumis à des efforts alternativement actifs et résistants, tirés puis aidant à tirer, deux fois par période. Il est clair que, s'il y a peu de décalage, l'action comme moteur sera faible, les fractions de période I et III étant courtes; tandis que, si le décalage est considérable, l'action comme moteur augmentera. Si le décalage est exactement d'un quart de période, les actions comme génératrice et comme réceptrice seront égales. De même, si une capacité détermine une avance dans la phase du courant, il se produira une action de réceptrice dans des fractions de période. — Ce phénomène peut être considéré d'une autre façon. Les forces électromotrices changent de signe juste au moment où les conducteurs passent (par exemple, suivant la figure 426, page 631) d'un champ magnétique dans un autre, où les lignes de force sont dirigées en sens contraire. Si les courants sont en phase concordante avec les forces électromotrices, ils tendront toujours à s'opposer au mouvement qui leur donne naissance. Mais, s'ils sont en retard sur elles, alors, après le passage du conducteur d'un champ à l'autre, ils concourront à aider au mouvement jusqu'à ce que les courants se soient renversés.

Mesure de la Puissance dans les circuits à courants alternatifs.
— Sur cet important sujet, voir les remarques page 618.

CHAPITRE XXIII

ALTERNATEURS

CLASSIFICATION ET GÉNÉRALITÉS

Les *alternateurs* ou machines à courants alternatifs peuvent se classer en trois catégories :

- I. Ceux à inducteurs fixes et à induit tournant ;
- II. Ceux à inducteurs tournants et à induit fixe ;
- III. Ceux à inducteurs et induit fixes, et dans lesquels on fait varier comme grandeur ou comme sens l'induction magnétique produite par les inducteurs sur l'induit, en faisant tourner des pièces de fer indépendantes (fer tournant) qui modifient la résistance magnétique.

On peut également classer les alternateurs selon qu'ils donnent de simples courants diphasés ou des courants polyphasés.

Dans tous les alternateurs la force électromotrice s'élève et s'abaisse d'une façon rapidement périodique, les ondes électriques se succédant dans le circuit, en sens différents, avec une très grande rapidité. Le temps que met le courant à effectuer un cycle alternatif complet de variation ou *période* se nomme *temps périodique* ; on le désigne par T . Le nombre de ces périodes, ou doubles renversements du courant, divisé par le temps mis à les effectuer, est appelé la *fréquence*, ou parfois encore la *périodicité* ; il est double de celui des alternativités. La fréquence pratiquement employée varie entre 40 et 100, quelquefois 150, périodes par seconde ; mais ce nombre doit être considéré comme fixe pour chaque machine qui doit ainsi fonctionner à la fréquence qui lui est propre. Le signe \sim est parfois employé, au lieu de $\frac{1}{T}$, pour indiquer la fréquence. Ainsi, 100 \sim s'entend d'une fréquence de 100 périodes par seconde, c'est-à-dire de 100 courants positifs ou

demi-périodes suivis chacun d'une demi-période négative. Le symbole $\frac{n}{t}$ employé pour le nombre de tours par seconde dans les formules des dynamos à courant continu se remplace nécessairement par le nombre de périodes par seconde $\frac{1}{T}$ dans le cas des alternateurs ; il correspond au nombre de tours ou de périodes qu'on aurait par seconde si la machine n'avait qu'une seule paire de pôles. En effet comme l'emploi des courants alternatifs exige autant de périodes que possible par seconde, et que d'autre part des considérations mécaniques s'opposent à une exagération des vitesses, on adopte généralement dans la pratique pour cette classe de machines le type multipolaire, avec un nombre considérable de pôles, de polarités alternées, symétriquement groupés autour d'un centre commun. Ce nombre de pôles symétriques varie, suivant les systèmes de machines, de 12 à 48 pôles, et même davantage.

Les induits des alternateurs peuvent être du type en anneau, en tambour, polaire, ou en disque ; mais, dans tous les cas, le mode de groupement des enroulements est différent de celui qui serait adopté pour les dynamos à courant continu. Le champ magnétique étant multipolaire, une section de l'enroulement d'induit qui passe devant un pôle N. sera le siège de courants induits en sens contraire de ceux induits dans une section qui, au même instant, passe devant un pôle S. Par conséquent, dans un anneau à courants alternatifs, les sections successives devront être enroulées ou connectées de manière à être alternativement dextrorsum et sinistrorsum. Dans les tambours à courants alternatifs, les sections ne chevauchent pas l'une sur l'autre comme dans les induits ordinaires en tambour. Elles ne chevauchent pas davantage dans les induits en disque à courants alternatifs.

INDUITS

Induits en Anneau. — Ce type a été imaginé, en 1878, presque simultanément par Gramme ¹ et par Wilde ² ; la principale différence entre les deux systèmes consistait en ce que Gramme faisait tourner son inducteur à l'intérieur d'un grand anneau fixe, tandis que Wilde faisait tourner son induit à l'intérieur d'un système de pôles d'électro-

¹ Brevet anglais, 953 de 1878.

² Brevet anglais, 1228 de 1878.

aimants convergeant vers l'intérieur (voir fig. 120, N° 28). Quand on fait usage d'induits en anneau dans ce type de machine, ces anneaux ne doivent pas être bobinés de la même façon que ceux des induits pour courant continu. Si les sections successives doivent être reliées en série l'une sur l'autre, il faut les enrôler de spires alternativement dextrorsum et sinistrorsum, comme l'indique la figure 418. Si, par contre,

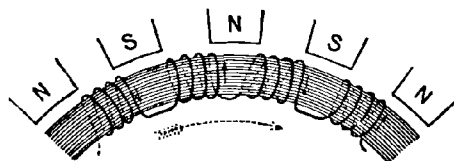


Fig. 418.

toutes les sections sont bobinées dextrorsum, par exemple, il faut les connecter comme on le voit sur la figure 419 ; la force électromotrice induite dans une bobine élémentaire passant sous un pôle nord doit en effet faire circuler autour du noyau d'induit un courant de sens

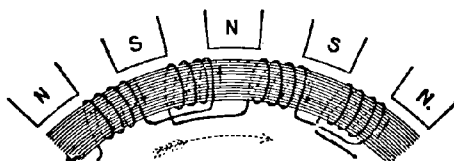


Fig. 419.

inverse de celui lancé par la force électromotrice induite dans la bobine élémentaire voisine passant sous un pôle sud.

La figure 420 représente un diagramme de l'alternateur Gramme. Les bobines élémentaires de son anneau étaient quatre fois aussi nombreuses que les pôles, et pouvaient être couplées de manière à alimenter quatre circuits séparés. On voit que les pôles, en tournant, venaient passer successivement devant les quatre sections adjacentes, de sorte que les quatre courants alternatifs engendrés différaient *de phase* entre eux. La première édition de cet ouvrage donne (fig. 240) un de ces types d'alternateurs Gramme, étudiés en vue de l'alimentation des bougies Jablochhoff et rendus auto-exciteurs par l'addition d'une petite dynamo à courant continu montée sur le même arbre. — Un autre alternateur à anneau, de M. de Méritens, était très en honneur vers 1879. — La figure 421 représente encore un autre type,

à inducteurs extérieurs, qui ressemble tout à fait à celui employé par MM. Ernest Scott et Mountain. Dans cette figure on a tracé les circuits

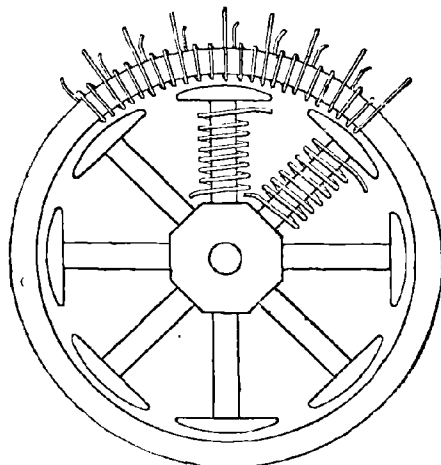


Fig. 420. — Alternateur Gramme.

magnétiques pour guider l'ingénieur chargé de l'étude dans le calcul de la puissance d'excitation. On remarquera que les fils intérieurs à l'anneau ne prennent pas une part active à l'induction et que les courants circulent en sens contraires dans les sections adjacentes.

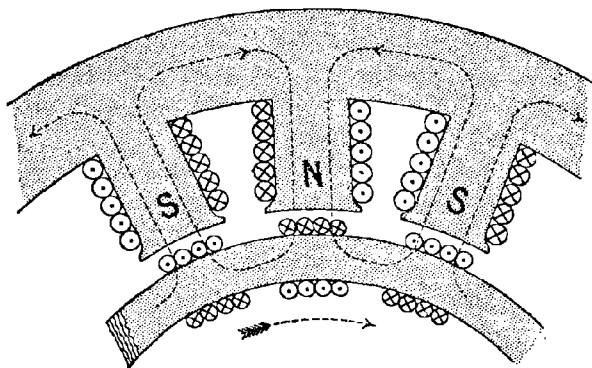


Fig. 421. — Circuits magnétiques d'alternateur.

Dans l'alternateur Kapp, figure 435, page 641, l'anneau est monté entre une double couronne de pôles d'électro-aimants. — D'autres alternateurs à anneau ont été étudiés par Kennedy qui dispose un anneau en forme

de disque entre des pôles alternativement espacés à l'intérieur d'un électro-aimant cuirassé ; et par M. Mordey qui a imaginé une forme à deux anneaux Pacinotti : l'un lamellé, comme induit ; l'autre massif, comme inducteur.

Induits en Tambour. — Un coup d'œil jété sur la figure 421 montre que, en ce qui concerne les fils actifs, ils peuvent être groupés tout

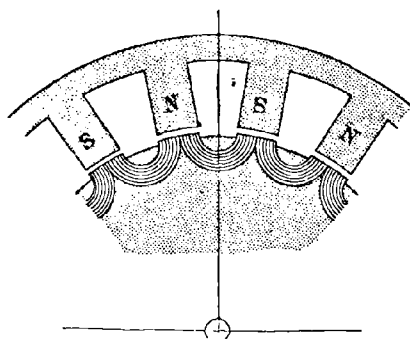


Fig. 422. — Alternateur Westinghouse.

aussi efficacement sans être roulés sur un noyau en anneau. Dans la figure 422, qui est une représentation schématique de l'alternateur

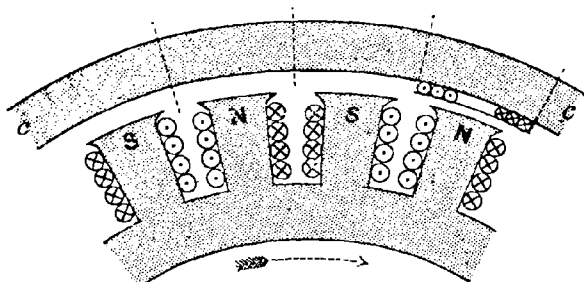


Fig. 423. — Alternateur Elwell-Parker.

Westinghouse, les enroulements reposent sur la surface extérieure d'un noyau en tambour ; les sections élémentaires de l'induit sont bobinées séparément sur des carcasses provisoires et appliquées ensuite sur la surface du noyau ; leurs extrémités sont rabattues par-dessus les disques terminaux du noyau et solidement assujetties.

Il n'y a qu'un pas de cette forme à celle de la figure 423, à électro-aimant intérieur tournant et ayant pour induit un cylindre extérieur

composé de plaques de noyau en forme de segments, sur la périphérie intérieure desquels sont fixées les bobines d'induit.

Ce type conduit de même directement à celui de la figure 424, qui indique le mode de construction de Zipernowsky, dans lequel les noyaux

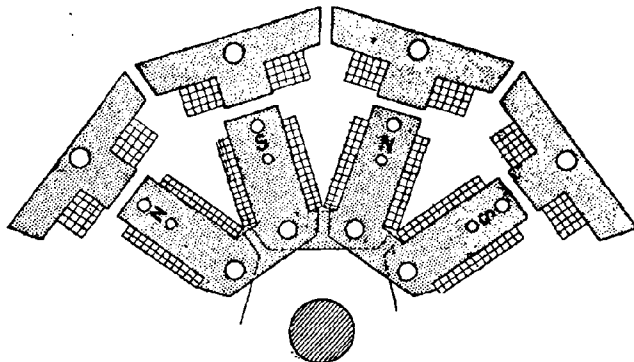


Fig. 424. — Alternateur Ganz-Zipernowsky.

inducteurs sont constitués par des pièces estampées en forme d'U, et les noyaux d'induit par des pièces en forme de T court, dont le jambage fait saillie sur la bobine qui l'entoure et qu'on peut enlever individuellement. On passe ainsi insensiblement du type en tambour au type à induit polaire ou à pôles radiaux.

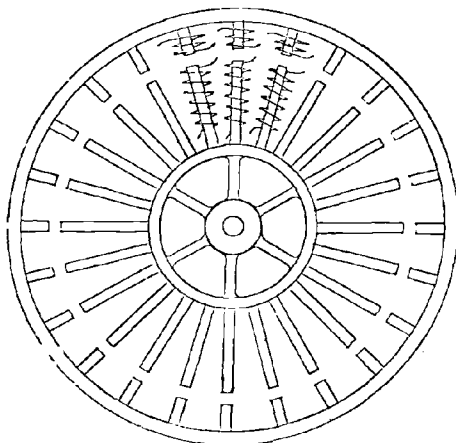


Fig. 425. — Principe des alternateurs à induit polaire.

Induits Polaires. — L'alternateur polaire typique est celui, aujourd'hui abandonné, de Lontin, dont la figure 425 donne le squelette

schématique. Dans cette machine, le système inducteur (séparément excité par un courant continu) était constitué par un jeu de pôles rayonnant tournant à l'intérieur d'une série de bobines qui formaient l'induit fixe. Ces bobines étaient enroulées sur de courts noyaux en fer massif. Cette machine avait de nombreux défauts, dont le moindre n'était pas la grande masse de fer, dans laquelle il se développait des courants intérieurs parasites tels que la machine avait une tendance très marquée à s'échauffer outre mesure. Il fallait en effet plus de puissance pour l'actionner en circuit ouvert que quand elle alimentait son nombre maximum de lampes.

Kennedy et autres ont adopté une modification de cette machine dans l'induit de laquelle ils ont introduit des noyaux en fer divisé. — L'alternateur d'Hopkinson (fig. 440, p. 649) est encore du même type, mais renversé ; les électro-aimants y sont fixes et extérieurs.

Induits en Disque. — Dans ces machines les bobines d'induit sont

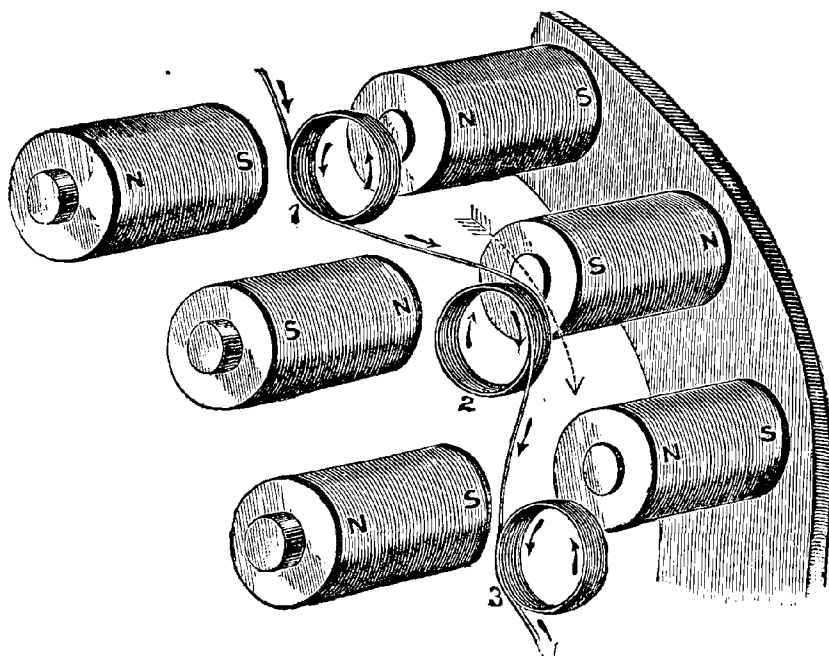


Fig. 426. — Principe des alternateurs à induit en disque.

montées à la périphérie d'un disque. Les anciennes machines de Nollet

et de Holmes, et la machine dite de l' « Alliance » (dans lesquelles le champ inducteur était créé par des aimants permanents en acier) appartenaient à cette classe. — Un type plus moderne, à électro-aimants, en a été créé par Wilde en 1867. Ces électro-aimants sont constitués par deux couronnes de bobines fixes à noyaux de fer disposés de telle sorte que leurs pôles libres sont opposés les uns aux autres et séparés par un espace suffisant pour laisser passer l'induit (fig. 426). Les pôles, dans leur ordre successif sur chaque couronne, sont alternativement de polarités N. et S. ; et à un pôle N. situé sur une des couronnes est opposé un pôle S. sur l'autre couronne. Cette disposition est commune aux machines de Wilde et de Siemens, ainsi qu'à l'alternateur Ferranti. L'inspection de la figure 426 permet d'en mieux comprendre le principe ; elle donne une vue générale du montage. Les lignes de force

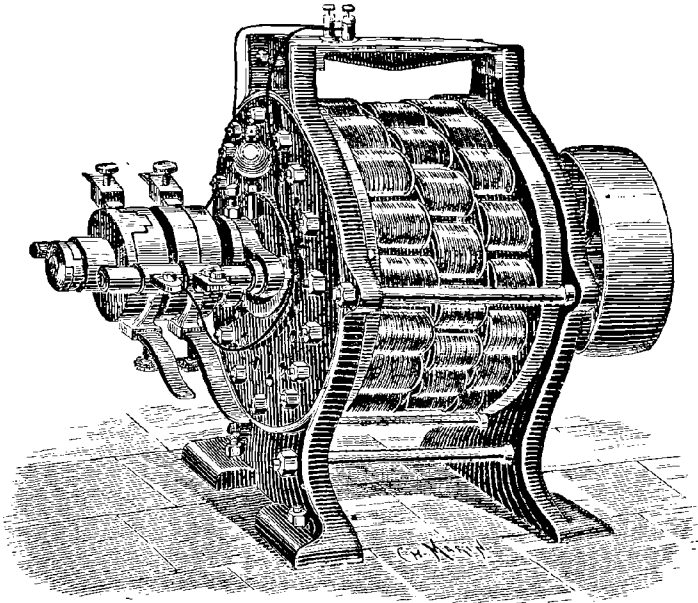


Fig. 427. — Alternateur de Wilde.

étant dirigées en sens contraires de l'une à l'autre des bobines fixes, qui sont alternativement S-N, N-S, comme on l'a vu ci-dessus, les bobines mobiles sont nécessairement parcourues par des courants alternatifs ; et, comme ces bobines d'induit sont alternativement parcourues par des courants de sens contraires, il faut naturellement les relier comme l'indiquent les figures 430, 431 ou 432, de telle sorte que

leurs actions respectives ne soient pas en opposition mutuelle. Dans la machine de Wilde, les bobines d'induit étaient garnies de noyaux de fer et on y trouvait un commutateur établi sur le principe de celui

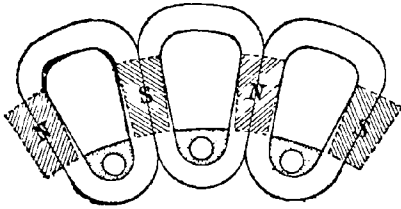


Fig. 428.

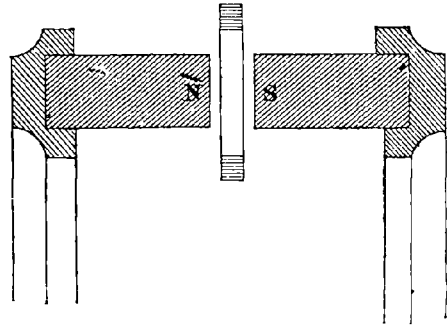


Fig. 429.

Alternateur Ferranti.

représenté par la figure 433, page 638. Wilde appliquait ordinairement ce commutateur à un petit nombre et souvent même à une seule des bobines mobiles et employait le courant ainsi obtenu à l'excita-

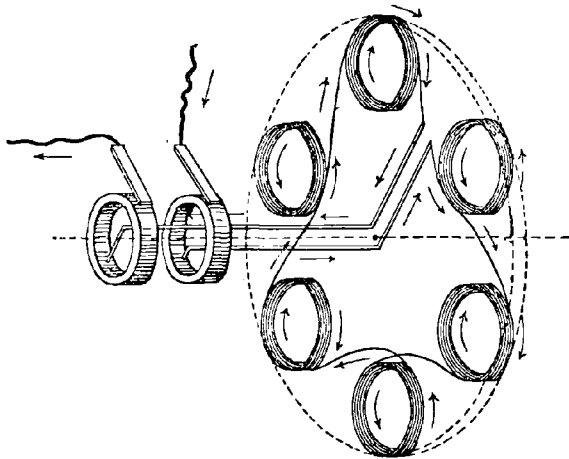


Fig. 430. — Bagues collectrices d'alternateurs.

tion des électro-aimants. Outre ce commutateur, on voit également sur la figure 427 les deux bagues collectrices à contact destinées à capter le courant principal (fig. 430).

Siemens perfectionna ce principe en 1878 en supprimant les noyaux de fer des bobines induites et réduisant en même temps considéra-

blement l'épaisseur de celles-ci, ce qui diminue ses réactions. — Ferranti se conforma aux mêmes errements dans la construction de ses alternateurs, dont les bobines de cuivre sont montées en un disque très étroit, comme on le voit sur les figures 428 et 429.

Bagues collectrices. — La captation du courant principal de l'alternateur est extrêmement simple. Dans les machines où l'induit est fixe, il suffit de simples bornes. Dans celles dont l'induit est mobile, on n'a besoin que de connexions à frottement. La figure 430 montre le procédé généralement employé pour recueillir les courants. Deux bagues métalliques continues, isolées l'une de l'autre et de l'arbre qui les porte, forment les bornes de l'ensemble des bobines induites et viennent passer chacune sous un seul balai collecteur.

Quand on a affaire à de hauts voltages, on doit disposer les deux bagues de contact de telle sorte qu'un surveillant ne puisse en aucun cas les toucher toutes deux simultanément. Il est bon également de munir chaque bague de deux balais. — Pour les alternateurs à induit immobile, il suffit d'une paire de bagues de contact analogues, mais plus petites, pour porter le courant d'excitation aux inducteurs mobiles. — On verra ci-après les dispositions adoptées par Ferranti pour capter le courant.

Couplage des Bobines induites. — Les bobines induites des alternateurs peuvent être couplées de différentes façons, suivant l'objet auquel ils sont destinés. Pour un fonctionnement à bas voltage, on peut les coupler en parallèle, comme l'indique la figure 431, de manière à réduire la résistance intérieure; tandis que, s'il s'agit d'une alimentation à grande distance de transformateurs, ou d'un transport d'énergie, conditions de fonctionnement qui exigent une force électromotrice élevée, le mode de connexion le plus usité consiste à relier en série les diverses bobines, comme l'indiquent les figures 430 et 432.

On a vu au Chapitre XII, sur la théorie du bobinage d'induit, comment un bobinage imbriqué ou un bobinage ondulé (voir fig. 201 et 202) pouvait s'appliquer à un alternateur. L'emploi d'un bobinage ondulé dans le cas actuel a été suggéré presque simultanément, en 1881, par sir William Thomson et par M. de Ferranti; mais il présente des inconvénients avec les hauts voltages, en raison de la difficulté de maintenir l'isolement entre chaque « onde » de fil et celle qui la suit; aussi ce mode de liaison a-t-il été abandonné pour être remplacé par un bobinage imbriqué, dans lequel chaque bobine peut être par elle-même bien isolée de ses voisines. — Dans certains alternateurs,

— y compris ceux de Ferranti et de Westinghouse —, les bobines sont reliées en deux circuits parallèles, au lieu d'être toutes réunies en série. Ce mode de construction a pour effet de maintenir une grande

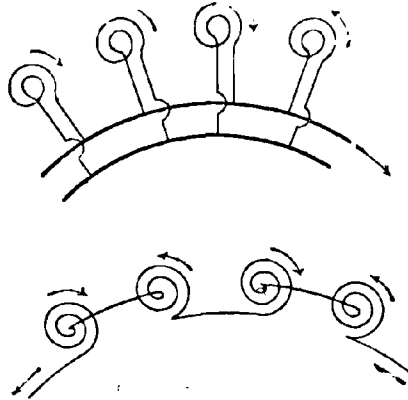


Fig. 431 et 432. — Divers modes de couplage des bobines d'induit dans les alternateurs.

distance entre les points situés à la plus grande différence de potentiel l'un par rapport à l'autre.

LARGEUR DES FACES POLAIRES ET EXTENSION DES BOBINES INDUITES .

La distance du centre d'un pôle N. à celui d'un pôle S. adjacent peut être désignée sous le nom de « pas » d'un alternateur. Il est intéressant de connaître la meilleure proportion à donner aux faces polaires et aux bobines par rapport à ce « pas ». Cette étude a été faite par Kapp¹. Elle embrasse deux questions : (1) dans quelle proportion le voltage dépend-il de la largeur relative des pôles et de l'extension des bobines ; (2) quelles sont les proportions qui donnent le meilleur rendement d'installation ? Si les pôles sont trop larges, de manière à arriver presque au contact, non seulement il se produit de fortes dérivations, mais les bobines peuvent être serrées outre mesure. Il est évident que, pour produire son effet maximum, une bobine quelconque doit être assez large pour embrasser, quand elle passe devant lui, le flux de force total émis par chaque pôle. Si sa largeur est moindre, elle contribue moins au voltage total. Si elle est plus grande, elle ne fait qu'occuper plus d'espace. Aussi ne donne-t-on habituellement à l'ouverture intérieure

¹ *Proc. Institution Civil Engineers*, XCVII. pt. III. 1889.

des bobines qu'une largeur un peu inférieure à l'épanouissement du pôle, et leur donne-t-on une largeur extérieure égale au pas de l'alternateur. En comparant les figures 421, 422 et 423, on verra que, dans les deux premières, la largeur intérieure des bobines est plutôt inférieure, et dans la troisième plutôt un peu supérieure à celle des faces polaires, tandis que la double largeur de cuivre dans les bobines est à peu près égale à l'épanouissement des pôles.

On a vu, page 204, que la force électromotrice moyenne d'une dynamo à courant continu pouvait s'exprimer sous la forme

$$E = \frac{n}{l} N \Phi \cdot 10^{-8},$$

dans laquelle $\frac{n}{l}$ est le nombre de tours par seconde, N le nombre de conducteurs à la périphérie de l'induit, et Φ le flux magnétique. On peut adapter cette expression aux alternateurs en modifiant le premier symbole et en considérant Φ comme le flux magnétique à travers un pôle quelconque, flux qu'il faudra multiplier par le nombre N_p de paires de pôles de la machine et par un coefficient k .

On a ainsi

$$E \text{ (volts)} = k N_p \frac{1}{T} N \Phi \cdot 10^{-8}.$$

Si les ondulations suivent une courbe de sinus, de telle sorte que les volts efficaces soient égaux à 1,4 fois (voir p. 617) les volts moyens, les bobines étant toutes couplées en série (au lieu d'être reliées en deux circuits parallèles), k aura la valeur 2,2. Kapp a calculé la valeur de k pour diverses largeurs de pôles et extensions de bobines et a trouvé les résultats suivants :

ÉPANOUISSEMENT POLAIRE	EXTENSION TOTALE DU CUIVRE en bout de la bobine.	k
1. Égal au pas.	Égale au pas (couvrant toute la surface) . .	1,160
2. — —	Moitié du pas (couvrant moitié de la surface).	1,635
3. Moitié du pas.	Égale au pas (couvrant toute la surface) . .	1,635
4. — —	Moitié du pas (couvrant moitié de la surface).	2,300
5. Tiers du pas.	Tiers du pas (couvrant le tiers de la surface).	2,830

S'il n'y avait pas de dispersion du champ magnétique, le n° 4 ci-dessus fournirait la meilleure proportion (c'est également celui pour lequel la valeur de k correspond le mieux à la loi de sinus). L'exten-

sion utile des fils est celle qui tiendrait juste entre les extrémités polaires. La puissance d'une machine, pour une épaisseur donnée de cuivre dans l'entrefer, est proportionnelle au nombre de ces fils par rapport à l'épanouissement de la face polaire; et par suite au produit des deux largeurs, dont la somme, s'il n'y avait pas de dispersion magnétique, serait égale au pas. En conséquence, la puissance serait maximum quand l'extension des bobines et l'épanouissement des pôles seraient égaux chacun à la moitié du pas. Mais Elibu Thomson a trouvé par l'expérience que, en raison de la torsion du champ magnétique quand la machine fonctionne, il y a avantage à donner au cuivre plus d'extension, c'est-à-dire à réduire l'ouverture des bobines à un peu moins de la moitié de l'épanouissement de la face polaire.

On a beaucoup discuté la question de présence ou d'absence de noyaux de fer dans les induits. Les noyaux de fer sont certainement inadmissibles dans les induits en disque mince; ils viendraient inévitablement buter contre les faces polaires. Par suite de la grande fréquence des alternativités, la perte par hystérésis devient en outre sérieuse dans les machines à noyaux de fer, à moins que l'induction ne soit maintenue inférieure à 7 000 unités C.G.S., et encore n'est-elle même pas négligable dans ce cas. D'autre part, il y a plus de perte par courants parasites⁴ dans le cuivre avec les machines dépourvues de noyaux de fer.

INDUCTEURS ET MODES D'EXCITATION

Dans les anciens alternateurs, le système inducteur était constitué soit par des aimants permanents en acier, soit par des électro-aimants excités par une source étrangère. — Vers 1869, on commença à faire ces machines auto-excitatrices en empruntant un faible courant à une ou plusieurs des bobines de l'induit, qui étaient à cet effet séparées des autres et dont le courant était amené à un commutateur destiné à en rectifier les alternativités et à le rendre apte à l'excitation des électro-aimants. Wilde et Holmes ont employé des commutateurs de ce genre construits dans la forme générale indiquée par la figure 433. Ils consistent en deux cylindres métalliques découpés comme des roues de rencontre, les dents de l'une s'engageant entre celles de l'autre. Ces

⁴ Voir les remarques d'Elihu Thomson dans un commentaire du travail de Kapp, *loc. cit.*

deux cylindres sont isolés l'un de l'autre ; l'un d'eux est relié à l'un des bouts du fil des bobines de l'induit appelées à servir pour l'excitation ; l'autre est en connexion avec le second bout de ce même fil. Deux balais sont disposés de manière à toucher chacun respectivement une dent de l'un des systèmes élémentaires de l'appareil. On avait déjà précédemment employé des commutateurs de ce genre pour de petits moteurs¹. — Holmes employait un système de touches parallèles

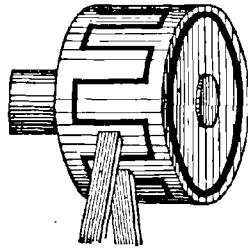


Fig. 433. — Collecteur pour alternateurs auto-excitateurs.

(comme dans le collecteur Gramme), reliées ensemble alternativement en deux jeux. — Si les électro-aimants sont enroulés de fil fin, on peut employer un commutateur de ce genre pour rectifier une fraction du courant prise sur l'ensemble des bobines induites et faire ainsi de la machine une machine virtuellement auto-excitatrice. Plus ordinairement cependant on alimente chaque alternateur à l'aide d'une petite dynamo auxiliaire à courant continu, nommée *excitatrice*.

Le courant ou le potentiel des alternateurs se règle commodément par l'introduction d'une résistance variable intercalée dans le circuit d'excitation, et manœuvrée soit à la main, soit au moyen d'un régulateur automatique quelconque (voir Chapitre XXVII). Ce mode de réglage est applicable aussi bien aux machines à excitation indépendante qu'aux machines auto-excitatrices. Dans les cas où l'on a recours à des excitatrices indépendantes, on peut régler le fonctionnement de l'alternateur en agissant (par des résistances variables, etc.) sur le circuit d'excitation de l'excitatrice.

Quand des alternateurs sont destinés à alimenter des lampes à incandescence sous potentiel constant, soit directement à bas voltage, soit par l'entremise de transformateurs à haut voltage, on les construit ordinairement avec une résistance d'induit et un coefficient de self-

¹ Voir Joule, dans les *Annals of Electricity* de Sturgeon, II, 122, 1838.

induction si faibles qu'elles seraient presque auto-régulatrices sans l'action démagnétisante des courants d'induit. Cette dernière influence peut être considérable, et son effet est tout à fait analogue à celui de la self-induction. — Pour l'alimentation de lampes en série, sous courant constant, il faut recourir à un type d'alternateur un peu différent, dont l'induit possède une self-induction considérable. On arrive à ce résultat non pas en enroulant les bobines d'induit à l'extérieur du noyau, mais en les logeant profondément dans ce noyau ou en les enroulant sur de longues plaques formant noyaux, de manière à leur donner une inertie magnétique considérable.

L'action démagnétisante des courants d'induit a été étudiée par

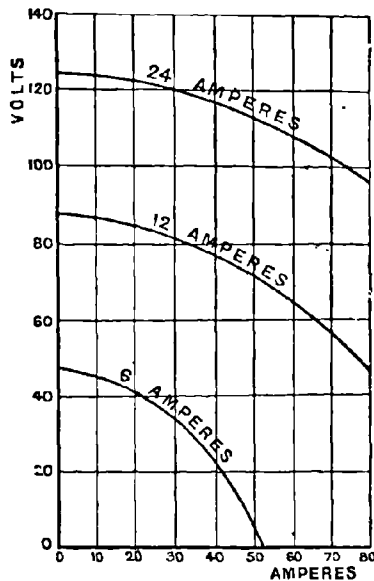


Fig. 434.

Esson¹, qui a déterminé (fig. 434) la caractéristique externe d'un alternateur excité par différents courants issus d'une source étrangère. Les trois courbes ci-dessus correspondent aux trois cas d'excitation indépendante à l'aide de courants mesurant respectivement 24, 12 et 6 ampères. L'effet du courant d'induit est plus marqué quand les inducteurs sont faiblement excités et il paraît varier *grosso modo* proportionnellement au carré de ce courant. — Dans l'alternateur

¹ Voir *Electrical Review*, XVIII. 248, mars 1886.

Mordey (p. 665) le champ magnétique est tellement puissant que la diminution de force électromotrice due à cette cause, par rapport au plein courant, est inférieure à 3 p. 100 de l'ensemble ; elle se traduit par une caractéristique très faiblement plongeante. — Swinburne⁴ à également étudié les réactions d'induit.

Kapp a donné (*loc. cit.*) quelques courbes de charge pour un alternateur. On pourra les comparer à la figure 293, page 420.

Esson a trouvé que la puissance des alternateurs pouvait être exprimée de la manière suivante en fonction des dimensions de l'induit et de sa vitesse angulaire :

$$\text{Puissance (watts)} = 0,0296 d^2 l \frac{n}{t},$$

d étant le diamètre et l la longueur, en centimètres, et $\frac{n}{t}$ le nombre de tours par seconde. Elle correspond à peu près à 40 p. 100 de la puissance d'une dynamo à courant continu de mêmes dimensions.

TYPES D'ALTERNATEURS

Alternateur Kapp. — Comme alternateur moderne à induit en anneau nous citerons celui de M. Gisbert Kapp, construit par les ateliers d'Oerlikon, ainsi que par MM. Goolden et par MM. Johnson et Phillips.

Il diffère de la plupart des autres alternateurs en ce qu'il comporte des circuits magnétiques doubles. La machine ici décrite est de 30 kilowatts, fournissant 13 ampères sous 2 000 volts, à 700 tours par minute. L'inducteur est constitué par deux couronnes portant chacune 12 pôles, alternativement N. et S. ; mais chaque pôle N. d'une couronne est opposé à un pôle N. de l'autre couronne, de sorte que les lignes de force qui pénètrent l'induit, des deux côtés sont déviées latéralement à travers le noyau. Le noyau d'induit est formé d'une bande de fer ou feuillard recuit, de 6,55 centimètres de large et de 0,063 centimètre d'épaisseur, roulée sur un robuste plateau circulaire en fonte, de 71,4 centimètres de diamètre ; les spires en sont isolées au papier. L'épaisseur radiale du noyau est de 20,3 centimètres, et la section nette du fer, de 103,2 centimètres carrés. Des coins d'entraînement en ébonite sont insérés à intervalles réguliers, et les bobines sont isolées du noyau de fer par une forte épaisseur de mica et de papier.

⁴ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XX. 173, 1891.

Une protection circulaire demi-ronde, en acajou, adoucit les angles de leur champ extérieur. Sur l'anneau sont roulées douze bobines, dont la largeur angulaire est légèrement inférieure au « pas » de la machine ;

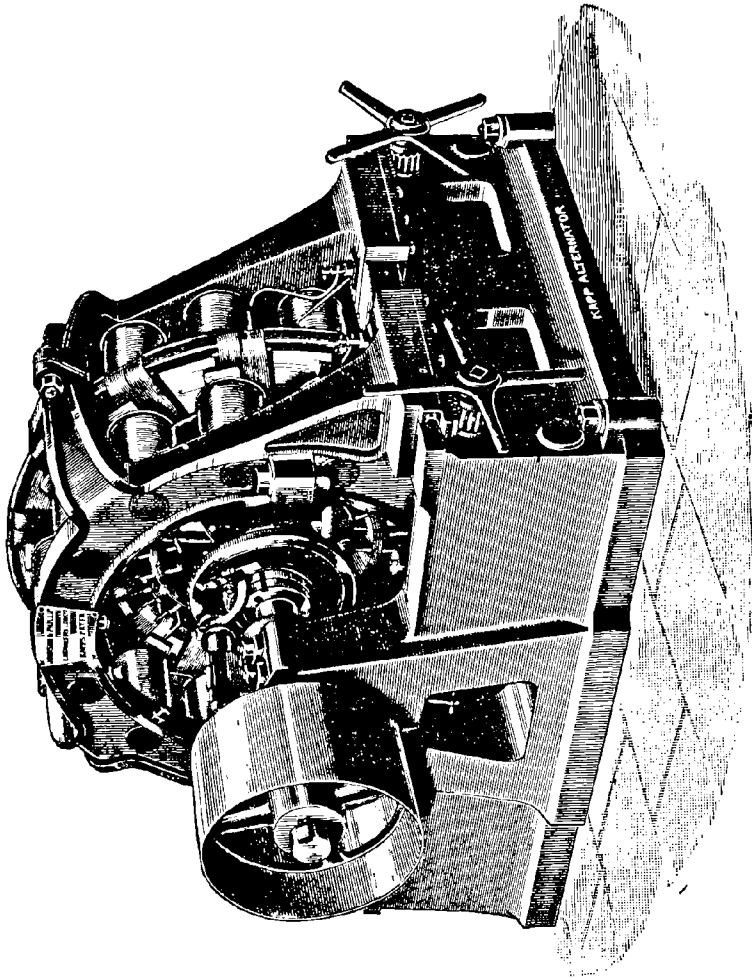


Fig. 435. — Alternateur Kapp.

elles comportent chacune à peu près 100 spires ; le nombre total de celles-ci est de 1 190. Les bouts en sont ramenés radialement à travers des bagues isolantes qui traversent le plateau de montage et connectées de manière à relier en série la totalité des 1 190 spires. La résistance (à chaud) de l'induit est de 7 ohms.

Les 24 noyaux d'électros en fer forgé ont chacun 8,9 centimètres

de diamètre et présentent une section droite de 71,25 centimètres carrés. Ils sont munis d'épanouissements polaires, de forme à peu près rectangulaire, ayant environ 184 millimètres sur 101 millimètres, ce qui correspond à une surface polaire de 187 centimètres carrés. L'épaisseur de l'entrefer polaire est d'environ 12,7 millimètres. Les flasques ou couronnes formant culasses sont en fonte.

La self-induction étant considérable dans un anneau de ce genre, il a fallu déterminer par des expériences préalables la marge par laquelle on devait y pourvoir dans l'excitation. Quand la machine tournait en court-circuit, avec ses électro-aimants excités séparément à un degré qui aurait donné à l'induit une force électromotrice de 1540 volts en circuit ouvert, le courant était dans l'induit de 25 ampères. On en a conclu que, le courant dans l'induit étant de 15 ampères, la force électromotrice de self-induction devait être de 925 volts. Par suite, comme ce nombre de volts est en quadrature avec les volts efficaces (fixés à 2100 environ), on peut supposer qu'à pleine charge de la machine la force électromotrice imprimée devra être de

$$\sqrt{925^2 + 2100^2} = 2295 \text{ volts.}$$

En appliquant la formule page 636, et supposant que $k = 2,3$, on trouve $\Phi = 1\,250\,000$ unités C.G.S. pour le flux qui doit être coupé à chacun des 12 pôles, ou 625 000 unités qui doivent passer à travers chacune des 24 faces polaires, ce qui donne $\mathfrak{B} = 6\,063$ dans le noyau induit et 8835 dans le noyau inducteur. Pour produire cette induction, il faut un courant d'excitation de 8,7 ampères environ dans les bobines inductrices, dont la résistance totale est à peu près de 11,2 ohms (à chaud). En conséquence, la puissance consommée pour la création du champ magnétique est d'environ 850 watts, soit 2,83 p. 100 de la puissance totale.

Les ateliers d'Oerlikon ont construit un autre alternateur Kapp, de 80 chevaux, fournissant, à l'allure de 600 tours par minute, 30 ampères sous 2 000 volts (efficaces), et pesant 3 550 kilogrammes. L'excitatrice est montée sur la même plaque de fondation. Le système inducteur est formé de deux couronnes contenant chacune 14 électro-aimants cylindriques en fer forgé, à expansions polaires rectangulaires. Chacune des bobines inductrices comporte 186 spires, avec une résistance totale de 1,76 ohm, demandant 21 ampères pour la pleine excitation. L'anneau porte 14 bobines de fil, guipé de trois couches de coton, de 3 milli-

mètres de diamètre, formant 80 spires en deux couches sur chacune ; la résistance totale est de 1,8 ohm.

Pour la « Metropolitan Supply Company », M. Kapp a étudié des machines encore plus puissantes donnant, à 600 tours par minute, 60 ampères sous 2 000 volts, avec les constantes suivantes : — Nombre de pôles, 20. Fréquence, 100 alternativités par seconde. — Induit ; plateau central, 106,7 centimètres de diamètre ; noyau, 7 centimètres de large sur 22,5 d'épaisseur ; enroulement, 20 bobines de 40 chacune en ruban de cuivre, reliées en une seule série, $r_a = 0,926$ ohm spires ; ou, si elles sont groupées en deux séries, $r_a = 0,2317$ ohm, auquel cas la puissance est de 120 ampères sous 1 000 volts. — Noyaux d'induc-

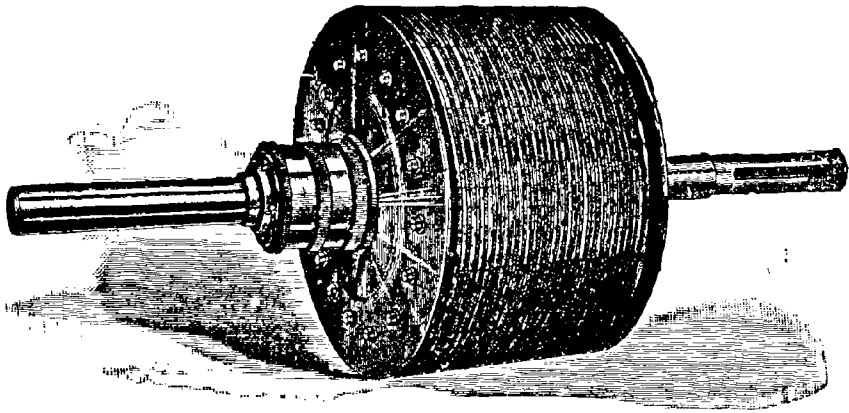


Fig. 436. — Induit de l'alternateur Westinghouse.

teurs, 21,6 centimètres de long, 11,4 centimètres de diamètre ; épanouissements polaires, 20,30 centimètres sur 8,25 centimètres ; bobines, 144 spires chacune ; résistance totale, 2,26 ohms ; courant d'excitation, 22 à 25 ampères à pleine charge.

Alternateur Westinghouse (Stanley). — L'alternateur ¹ de la Compagnie Westinghouse (fig. 437) comporte un induit en tambour, représenté par la figure 436.

La machine de 150 kilowatts présente 16 pôles radiaux convergeant vers le centre et aboutissant extérieurement à une culasse commune

¹ Pour plus amples détails et pour les épreuves, voir *Electrical World*, XI, 3 septembre 1887 ; XV. 242, 1890 ; *Electrician*, XXV. 603 et 706, 1890 ; *Electrical Review*, XXV. 233, 1889 ; Brevets anglais, 9725, 9726 et 9727 de 1887 ; *La Lumière électrique*, XXV. 643, 1887 ; XXVII. 8, 1888.

cylindrique en fonte. Le noyau d'induit, qui a 60 centimètres de diamètre et 30,5 centimètres de long, est formé de disques de tôle mince perforés en vue de la ventilation. L'enroulement est constitué par

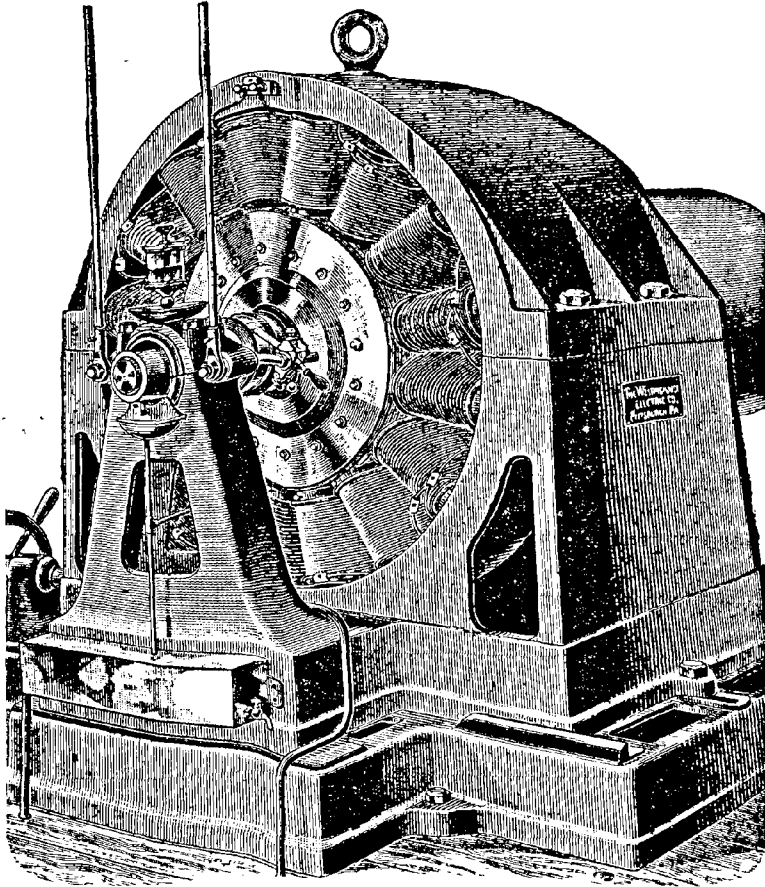


Fig. 437. — Alternateur Westinghouse.

16 bobines de forme aplatie, roulées sur des mandrins spéciaux, juxtaposées ensuite sur la périphérie du noyau, sans chevauchement, et assujetties finalement par des frettes bien isolées. Les extrémités de ces bobines plates sont rabattues sur les bases du tambour et fixées sur elles. Elles sont groupées en deux séries de huit chacune. Les frettes recouvrent presque complètement la surface extérieure de l'induit (voir fig. 436).

Cette machine pèse trois tonnes et donne 145 ampères sous 1 100 volts à la vitesse de 1 080 tours par minute. Les fusées de l'arbre sont très longues et reposent sur des coussinets à siège sphérique. Pour la facilité des réparations la moitié supérieure du système inducteur est mobile. Le courant d'excitation est de 25 à 30 ampères sous 100 volts. Le nombre des alternativités est de 8 640 par minute ou 144 par seconde. Dans les machines Westinghouse les plus récentes les bobines d'induit sont roulées sur des noyaux en disque dentés.

Alternateur Elihu Thomson. — Bien qu'elle ressemble beaucoup à l'alternateur Westinghouse, cette machine en diffère cependant par des détails importants. Les bobines d'induit, faites en fil carré, recouvrent une grande portion de la surface du noyau, et ne sont pas rabattues en franges sur les bases du tambour. Le système inducteur comporte depuis 8 pôles dans les petites machines jusqu'à 22 pôles dans les grandes. Dans les petites machines, toutes les bobines induites sont reliées en une seule série, comme dans la figure 430; dans les grandes, elles sont groupées en deux séries. Ces alternateurs se construisent sur trois types différents. Les uns sont à excitation indépendante; d'autres sont rendus auto-exciteurs par l'enroulement d'un petit nombre de spires de fil, bobinées, comme dans les machines à tambour à courant continu, sur le noyau dans les intervalles laissés par les bobines principales, et dont les extrémités sont ramenées à un collecteur spécial monté sur l'arbre; d'autres enfin sont appelés « composites » en raison de ce que l'excitation est en partie extérieure et en partie produite par le courant même de la machine, conduit à cet effet à un collecteur en dérivation. C'est cette troisième classe de machines que représente la figure 438. Une excitatrice fournit le courant à 8 des 10 pôles inducteurs; l'excitation est réglée par une résistance variable placée soit dans la dérivation, en R_1 , soit dans le circuit d'excitation, en R_2 . Les deux dernières bobines inductrices sont reliées à des balais portant sur un commutateur-redresseur C, shunté par la résistance R_3 . Le courant principal, en passant aux bagues de contact A B ou en les quittant, doit traverser ce commutateur ou la dérivation R_3 . L'excitation se compose en conséquence de deux parties, l'une initiale et constante, l'autre variable et dépendante du débit principal auquel elle est proportionnelle. Aussi cette disposition présente-t-elle les mêmes propriétés que l'enroulement compound des machines à courant continu. La résistance R_3 qui est établie en fil de maillechort et fixée au bâti de la machine permet de faire varier suivant les machines l'ex-

sous 1,000 volts, à des allures variant de 1 500 à 680 tours par minute¹.

Le professeur Elihu Thomson a imaginé une autre forme d'alternateur décrite page 674.

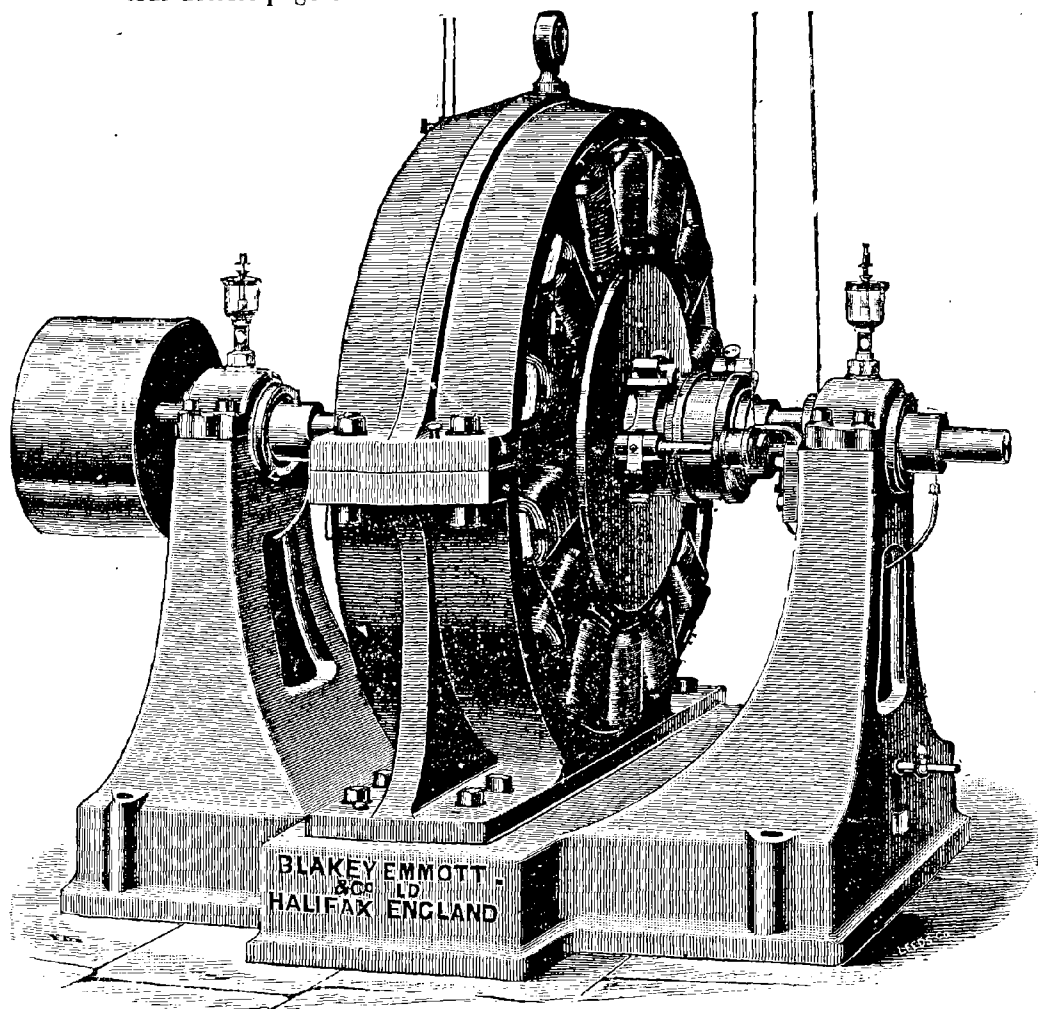


Fig. 439. — Alternateur Blakey-Emmott.

Alternateur Blakey-Emmott. — Cette machine (fig. 439) est du même type général que la précédente ; mais, tandis que les en-

¹ Voir *Electrical World*, XIII. 19, 1889; XIV. 197, 1889; et *Electrician*, XXVI. 133, 1890.

roulements des deux alternateurs ci-dessus sont imbriqués, celui de la machine Blakey-Emmott est ondulé et analogue à celui de la figure 202, page 303.

Le noyau d'induit est formé de disques très minces de tôle au bois, montés sur un manchon à ailettes en bronze, claveté sur l'arbre. L'enroulement est fait avec des bandes de fils de cuivre, de largeur égale à celle des pôles. Ces bandes sont appliquées suivant une forme sinueuse sur la surface de l'induit, les extrémités rabattues sur les bases terminales du tambour. Tous les bouts libres sont amenés à des bagues de cuivre massives servant de collecteurs. Les balais sont en charbon et donnent toute satisfaction. Les coussinets se centrent d'eux-mêmes. Le type 15 A fournit une puissance de 7,5 ampères sous 2 000 volts, soit 15 000 watts, à une vitesse de 1 200 tours par minute. Les pôles sont au nombre de dix, ce qui donne une fréquence de 100 périodes complètes par seconde. Le noyau d'induit a 43,7 centimètres de diamètre et 21,6 centimètres de long. Le nombre total des conducteurs actifs sur l'induit est de 1 140 ; le poids du cuivre, de 6,033 kilogrammes. La résistance est de 4,48 ohms, et, quand la machine marche à circuit ouvert avec toute son excitation, la force électromotrice développée est de 2 950 volts. Le poids du cuivre sur les inducteurs est de 68 kilogrammes. On trouvera la courbe d'induction de cette machine page 604. La possibilité d'enlever la moitié supérieure du système inducteur permet d'examiner aisément l'induit en position. Ces machines sont construites par MM. Blakey, Emmott et C^o, d'Halifax, en sept dimensions différentes dont les puissances varient de 12 000 à 120 000 watts.

Alternateur « Phénix ». — Cette machine, construite par MM. Paterson et Cooper sur les dessins de M. Esson¹, ressemble d'une manière générale à celles précédemment décrites ; elle est, comme elles, multipolaire et présente 12 pôles.

Les noyaux inducteurs en fer forgé sont coniques pour permettre l'insertion des bobines d'excitation et s'épanouissent ensuite en une surface polaire de section à peu près double. Ils sont supportés par une culasse annulaire en fonte, et l'épanouissement des faces polaires est égal à la moitié du « pas ». Si les noyaux avaient eu la même section sur toute leur longueur, ils auraient pu être aussi bien en fonte ; mais la haute perméabilité du fer forgé permet de réaliser une économie de cuivre qui compense et au delà le prix de la façon supplémentaire résultant de l'emploi du fer.

¹ *Journal Institution Electrical Engineers*, XX, 289, 1891.

L'induit est formé d'un noyau en disques de tôle dont les diamètres intérieur et extérieur sont à peu près dans le rapport de 5 à 7, sur lesquels sont appliquées six bobines plates de largeur égale à trois fois celle des noyaux inducteurs et espacées sur la périphérie par des intervalles égaux à la largeur du noyau inducteur qui les sépare.

Alternateur Hopkinson. — Cette machine a un inducteur multipolaire dont les épanouissements polaires dépassent les trois quarts du

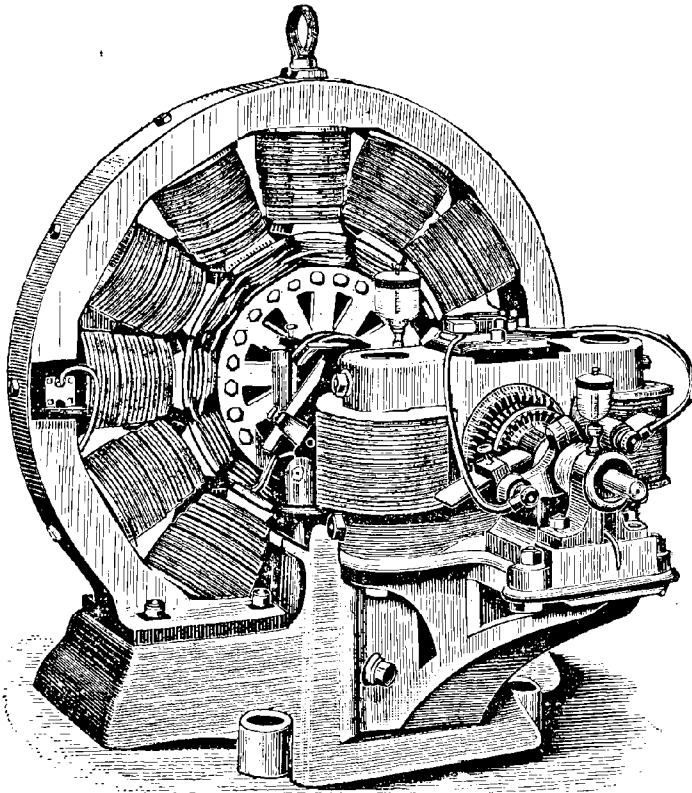


Fig. 440. — Alternateur Hopkinson.

« pas ». Les fils de l'induit ne sont pas appliqués à l'extérieur d'un tambour, mais bien enroulés sur de courts rayons polaires en fer lamellé. La machine, représentée par la figure 440, tourne à 800 tours par

minute en fournissant 30 ampères sous 1 000 volts. La résistance de l'induit est de 0,55 ohm; celle des bobines inductrices, de 2 ohms. Le courant d'excitation est de 21 ampères. On attribue à cette machine un rendement électrique de 95 p. 100. Elle est excitée par une petite dynamo « Manchester » supportée par un palier spécial et attelée sur le même arbre. Ces machines sont construites par MM. Mather et Platt.

Alternateurs Ganz-Zipernowsky. — La maison Ganz et C^{ie}, de Budapesth, construit, surtout sur les études et dessins de M. Zipernowsky, différentes formes d'alternateurs¹. Le principe général de ces machines a déjà été donné, page 630; mais certaines d'entre elles ont été établies sur d'autres bases. MM. Ganz ont exposé à Vienne, en 1883, une très grande machine, capable d'alimenter 1 200 lampes Swan de 20 bougies chacune. Les trente-six bobines inductrices étaient montées radialement sur une carcasse de fer et tournaient à l'intérieur d'un induit circulaire fixe, également composé de trente-six bobines. Le système inducteur constituait par le fait le volant de la machine à vapeur compound, à haute pression, qui actionnait la dynamo et son excitatrice. Le diamètre de cette partie mobile était de 2,5 mètres. Une des particularités caractéristiques de cette machine était que l'une quelconque des bobines, inductrices ou induites, pouvait, en cas de nécessité, être retirée latéralement. Tout le volant pouvait ainsi être démonté par un seul homme en quelques minutes. Les bobines induites étaient fixées à plat sur la périphérie intérieure d'un grand anneau en fil de fer lisse, aucun noyau ne traversant ces bobines. — A Francfort, en 1891, la Compagnie Hélios a exposé un grand alternateur Ganz², d'une puissance de 400 kilowatts, donnant 200 ampères sous 2 000 volts à la vitesse de 125 tours par minute. L'induit était formé de 40 sortes de poinçons en forme de T, analogues à ceux de la figure 424, entourés de bobines dont chacune fonctionnait sous 100 volts; l'ensemble était couplé en deux séries de 20 bobines chacune. Le système inducteur mobile avait 2,992 mètres de diamètre et 0,38 mètre de long. Le rendement électrique en est donné comme s'élevant à 95,6 p. 100, et le rendement net, à 91,5 p. 100. — La station centrale de Rome présente quatre beaux

¹ Voir *Centralblatt für Elektrotechnik*, XII. 554, 1889; *Electrical Review*, XV. 70, 1884; XVII. 115, 1885; *Electrician*, XXV. 258, 1890; *Electrical World*, XIII. 297, 1889; XVI. 73, 1890; *La Lumière électrique*, XXXI. 121, et XXXII. 159 et 582, 1889.

² Voir la description qu'en a donnée M. Esson et la figure dans *l'Electrical Review*, XXIX. 503, 1891.

spécimens de l'alternateur Ganz¹, d'une puissance de 320 kilowatts chacun, directement et individuellement actionnés, à 125 tours par minute, par des machines à vapeur compound, de 500 chevaux chacune. L'inducteur mobile a 40 pôles rayonnants en fer massif; son diamètre dépasse 2,75 mètres. Le diamètre intérieur de l'anneau servant de carcasse est d'environ 2,90 mètres; son noyau est fait en feuilles de tôle séparées par du papier, comme on l'a vu. Cet induit comporte 40 bobines, développant chacune 50 volts, toutes reliées en série et susceptibles de porter 200 ampères, le diamètre du fil étant de 6 millimètres. Les bobines inductrices sont roulées sur des formes rectangulaires en zinc refendues, d'environ 38 centimètres de haut sur 51 centimètres de large; les spires sont plus nombreuses vers l'extrémité extérieure. Les spires de l'induit, à raison de 30 par bobine, sont maintenues sur des âmes en fibre vulcanisée de 48,25 centimètres de long, sur 25,4 centimètres de large, et 5 centimètres d'épaisseur, et fixées en place sur des carcasses de bronze.

Alternateurs Siemens. — MM. Siemens et Halske ont été, dès 1878, des premiers propagateurs du courant alternatif avec leurs alternateurs imaginés par von Hefner-Alteneck, dans lesquels un induit en disque (voir fig. 426) est formé de bobines, ordinairement sans fer, roulées sur des noyaux en bois. Ces bobines sont faites de ruban de cuivre dont les couches sont isolées l'une de l'autre par des bandes de fibre vulcanisée; les connexions sont établies par des conducteurs soudés à l'argent. Dans certains types de machines les bobines induites sont montées entre des joues en maillechort perforé. Dans les cas où l'on a besoin d'une grande intensité, mais d'une faible force électromotrice, les bobines sont couplées en dérivation au lieu d'être réunies en série. On voit dans la figure 441 une petite machine à courant continu, du type vertical, analogue à celle décrite page 493, qui sert d'excitatrice et fournit le courant d'aimantation aux inducteurs fixes de l'alternateur.

Plus récemment MM. Siemens et Halske sont revenus à un type qui ressemble davantage à celui de Lontin, avec son système inducteur multipolaire mobile et son induit extérieur fixe. La figure 442 représente les principaux éléments de la grande machine, de 330 kilowatts, exposée à Francfort par cette maison, en 1891. Le système inducteur comprend 60 bobines, à noyaux lamellés, montées sur la jante d'un volant de

¹ Voir la description qu'en a donnée le Prof. Fleming dans l'*Electrician*, XXV, 317, 1890.

3,7 mètres de diamètre, tout compris, tandis que l'anneau induit a 4,6 mètres de diamètre. A 100 tours par minute, cette machine fournit 165 ampères sous 2 000 volts. Voici les données de construction de l'induit : —

Une carcasse circulaire en fonte maintient fermement assujettis les 60 segments d'un anneau formés chacun de plaques de tôle droites, découpées, à projections terminales. Avant d'être mis en place, chaque segment est roulé de 20 spires d'un conducteur en fils de cuivre toron-

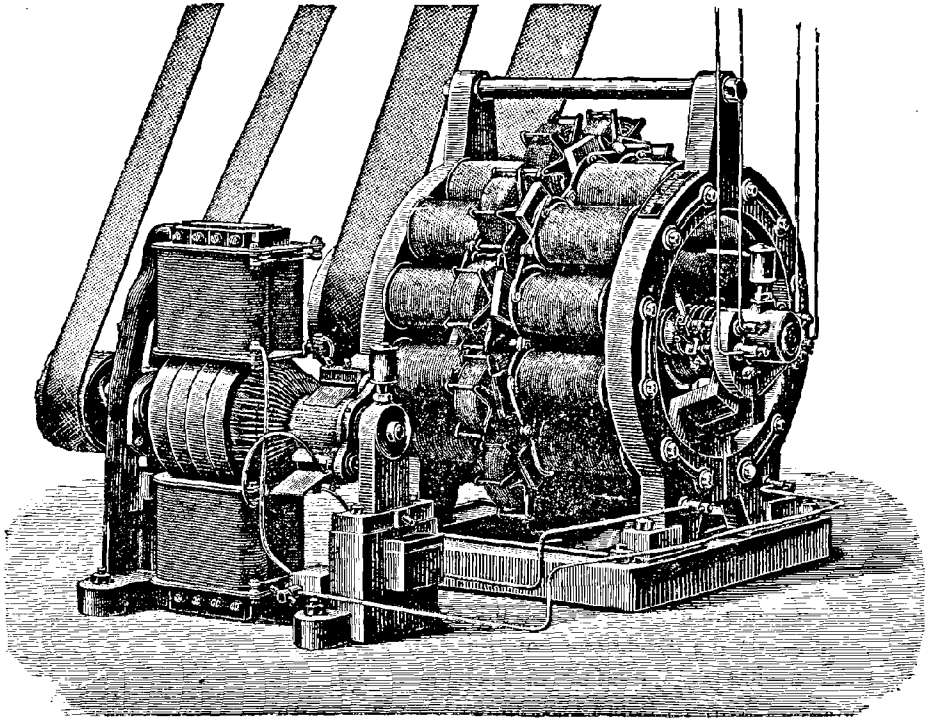


Fig. 441. — Alternateur Siemens, avec son excitatrice.

nés auquel est donnée par compression une section carrée; chacun des fils du toron est légèrement isolé par une couche de vernis. L'anneau ainsi formé a 4,6 mètres de diamètre sur 0,50 mètre de profondeur parallèle à l'arbre; les projections terminales des plaques de tôle constituent 60 dents intérieures. C'est en conséquence tout simplement un anneau lamellé de Pacinotti dont les bobines élémentaires sont roulées alternativement dextrorsum et sinistrorsum. On peut retirer indivi-

duellement l'une quelconque des sections pour la réparer. — Les

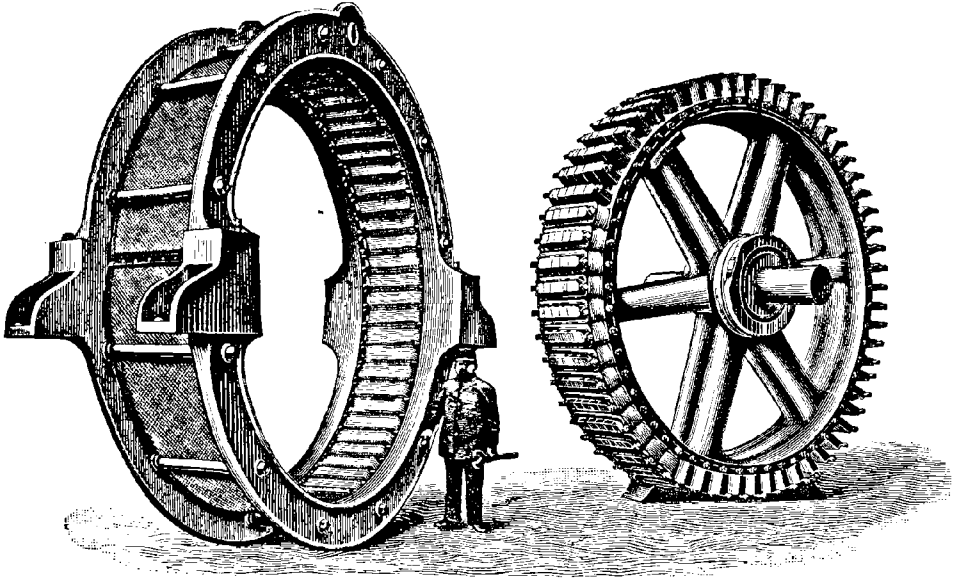


Fig. 442. — Alternateur Siemens et Halske.

noyaux inducteurs lamellés reçoivent chacun 56 spires et un courant d'excitation de 56 ampères sous 70 volts.

Alternateur Gordon. — L'alternateur Gordon a été décrit et représenté dans la première édition de cet ouvrage (fig. 120, p. 172). L'induit fixe contient deux fois autant de bobines que le système inducteur mobile ; il y a de chaque côté du disque mobile 32 bobines, soit en tout 64 bobines mobiles, tandis que chacun des flasques en comporte 64, soit en tout 128 bobines fixes. Ces dernières sont de forme allongée roulées sur un morceau de tôle de chaudière recourbé en forme de V aigu, avec des joues de maillechort perforées¹. Cette disposition des bobines en deux jeux a pour résultat de donner naissance à deux courants distincts dont la phase diffère d'un quart de période. Les éléments des induits des machines employées à Paddington ont été récemment refaits ; on a divisé le fer davantage pour réduire la

¹ Pour plus amples renseignements sur la machine Gordon, voir le « *Traité pratique d'éclairage électrique* » de Gordon, 1884, p. 162.

perte par courants parasites qui avait une certaine importance dans les machines primitivement construites.

Alternateur Elwell-Parker. — Cette machine est construite par l'« Electric Construction Corporation », de Wolverhampton. — Le système inducteur, qui est intérieur et mobile, présente une série de pôles rayonnants, fixés sur un plateau de montage en acier doux, dans lequel les noyaux inducteurs en fer doux forgé sont solidement boulonnés par l'entremise de pièces en forme de T, dont la tête qui sert de pièce polaire s'applique sur leur surface, et dont le corps passe à travers le noyau et le plateau de montage. — Le noyau d'induit est constitué par la réunion extérieure de segments d'anneau boulonnés entre deux flasques de fonte. Les bobines induites, qui sont individuellement roulées de ruban de cuivre sur des noyaux de bois, sont assujetties par des emboîtures en bois et des boulons de fer contre la périphérie intérieure des anneaux du noyau. L'extension extérieure de chaque bobine induite est égale au « pas », et sa largeur intérieure est légèrement inférieure à la largeur de la face polaire.

Voici les constantes de deux alternateurs récents d'Elwell-Parker de 30 et 50 kilowatts respectivement : —

Puissance en watts	30 000	50 000
Ampères	30	25
Volts.	1 000	2 000
Fréquence (nombre de périodes par seconde)	60	833
Nombre de tours par minute. .	600	500
Nombre de pôles	12	20
Diamètre du cercle inducteur .	91,44 cm.	115,10 cm.
Longueur des noyaux induc- teurs	17,14 —	22 —
Section d'un noyau inducteur :		
Largeur	7,62 —	5,08 —
Profondeur parallèle à l'arbre	15,24 —	25,40 —
Faces polaires : largeur	11,43 —	8,89 —
— profondeur pa- rallèle à l'arbre.	15,24 —	25,40 —
Nombre de spires sur chaque inducteur	267	344

ALTERNATEURS

655

Courant d'excitation en ampères	16 à 18	11,6 à 12,3
Résistance des bobines inductrices en ohms.	3,26	9,5
Jeu entre les pôles et les bobines induites	0,32 cm.	0,32 cm.
Jeu total entre les pôles et les anneaux formant noyau. . .	0,127 —	0,12 —
Noyau d'induit : diamètre intérieur	94	117,5 —
— — diamètre extérieur	114,3	142,9 —
— — profondeur extérieure	15,87 —	26,0 —
Nombre des bobines induites	12	20
Ouvre d'une bobine : longueur	20,32 —	32 —
— — largeur.	11,43 —	8,89 —
Largeur extérieure d'une bobine	24,46 —	18,26 —
Nombre de spires par bobine.	34	28
Largeur du ruban de cuivre	0,635 —	0,635
Épaisseur — —	0,157 —	0,124 —
Poids total du cuivre sur l'induit	27,216 kg.	52,164 kg.

Les alternateurs Elwell-Parker sont employés à la station centrale de Manchester Square, à Londres ; chacun d'eux est relié à un moteur Willans à grande vitesse, à triple expansion.

Alternateurs Ferranti. — Cette machine, telle qu'elle a été produite en 1882, était le résultat d'études simultanées, mais indépendantes, de sir W. Thomson et de M. S. Z. de Ferranti, en vue d'arriver à un enroulement continu des bobines.

Sir W. Thomson proposa tout d'abord de bobiner l'induit, en forme d'étoile, avec des bandes de cuivre passant entre les dents à jour d'une sorte de roue d'engrenage en bois. Il proposa également d'employer comme système inducteur une forme d'électro-aimant dans lequel les fils portant le courant d'excitation passaient, en zigzag, par-dessus et par-dessous des blocs de fer en saillie sur un bâti en fer.

Dans la machine construite à cette époque¹, le système inducteur consistait en deux couronnes de pôles alternés, exactement comme dans

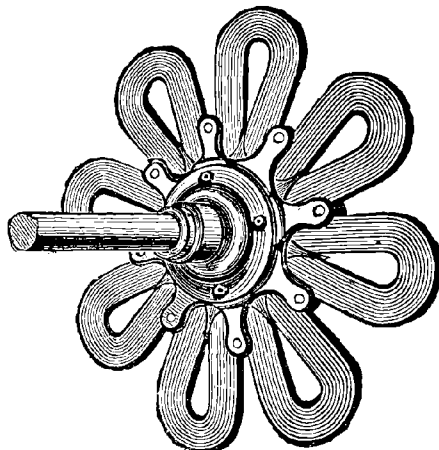


Fig. 443. — Induit Ferranti (1882).

les alternateurs de Wilde et de Siemens ; et l'induit, en une bande de cuivre repliée en forme d'étoile ondulée (fig. 443). Le zigzag comprenait

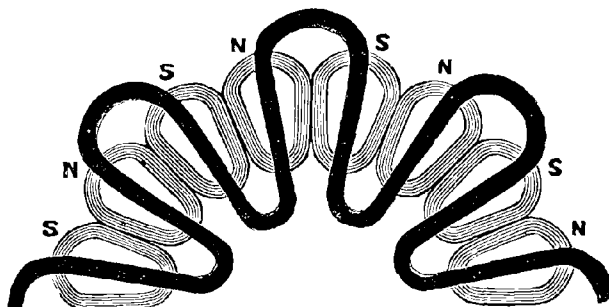


Fig. 444. — Schéma de l'ancien alternateur Ferranti.

huit boucles (comme on le voit sur la figure 444, qui ne donne que la moitié de la disposition) et l'inducteur comportait seize pôles de chaque côté ; de sorte que les parties mobiles occupaient une largeur angulaire double de celle des parties fixes. La bande de cuivre était enroulée plusieurs fois sur elle-même, avec interposition d'isolant entre ses

¹ Voir le Brevet anglais, 3702 de 1883 ; et, pour les détails plus récents, le n° 702 de 1887.

couches ; les bras de l'étoile étaient maintenus en place par des boulons isolés qui passaient à travers des flasques de laiton également étoilés sur lesquels ils reposaient. On attribuait à ce montage d'induit en zigzag une grande solidité et une grande simplicité de construction.

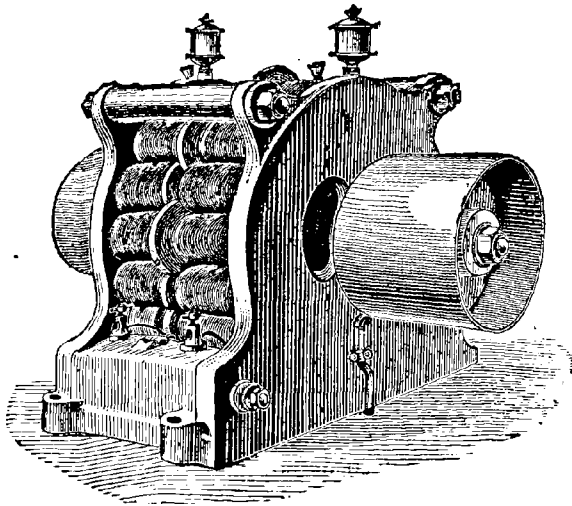


Fig. 445. — Machine Ferranti-Thomson.

Le bâti des inducteurs était fondu en deux moitiés réunies par des boulons.

Dans les derniers alternateurs de Ferranti le mode d'enroulement en zigzag a été complètement abandonné ; les bobines sont aujourd'hui roulées séparément, puis assemblées pour former un disque. Le mode de construction est expliqué par les figures suivantes. Chaque bobine est roulée sur un noyau rigide. Ces noyaux sont faits de bandes de laiton disposées en éventail, avec interposition d'amiante, solidement brasées l'une avec l'autre par un de leurs bouts, et fixées de même à un bloc de laiton percé d'un trou A (fig. 446). Le bobinage, dont le bout interne est soudé au bloc de laiton, est fait d'un ruban de cuivre légèrement plissé pour plus de rigidité et enroulé avec interposition de minces copeaux de fibre vulcanisée entre les spires. Ces bobines sont montées par paires dans des porte-bobines, représentés en D, figure 447, dans lesquels ils sont fixés, avec interposition de couches de mica et de fibre, par des boulons passant par des œils ménagés à cet effet. Les deux bobines sont, dans chaque porte-bobines, mécanique-

ment et électriquement séparées l'une de l'autre par l'interposition d'un morceau de fibre de la forme indiquée en H ; mais le porte-bobines constitue une connexion métallique entre l'œil A de l'un et l'œil A de

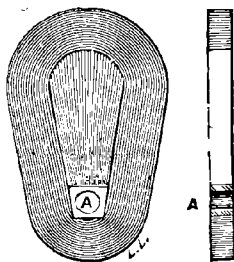


Fig. 446. — Bobine séparée de l'alternateur Ferranti.

l'autre. En conséquence, un courant allant de l'extérieur à l'intérieur de l'une des bobines circulera de l'intérieur à l'extérieur de l'autre. Le

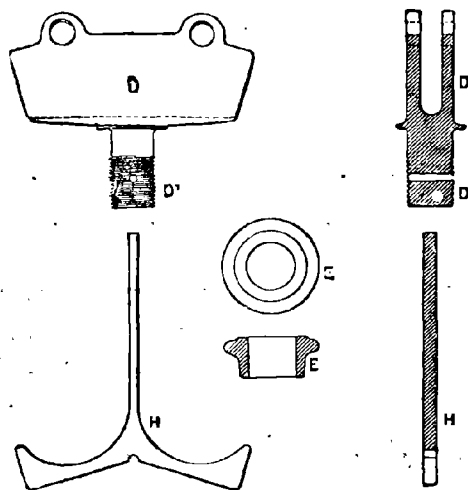


Fig. 447. — Détails de l'induit Ferranti.

Le bout extérieur de chaque bobine est relié au bout extérieur de la bobine voisine dans le porte-bobines suivant. Les porte-bobines doivent naturellement être isolés et de plus solidement assujettis au point de vue mécanique. A cet effet ils sont munis d'une queue D', de section circulaire, qui passe à travers une bague en porcelaine E et est filetée pour recevoir une embase métallique fixée ensuite par une goupille travers-

sant D'. La queue, protégée par sa bague en porcelaine, traverse la jante d'un robuste plateau circulaire servant de moyeu, dans lequel sont prati-

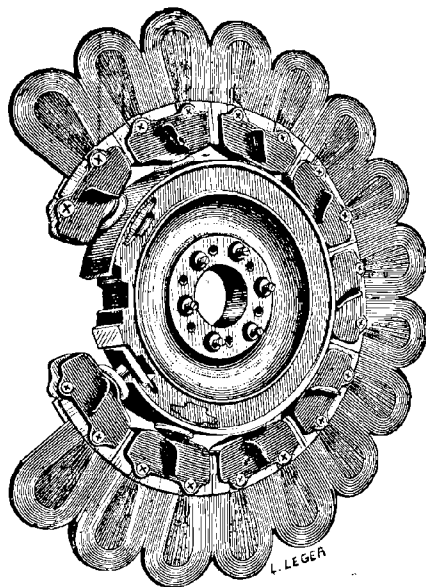


Fig. 448. — Induit Ferranti, montrant le montage des bobines et des porte-bobines.

quées des ouvertures qui reçoivent les embases métalliques, mais cepen-

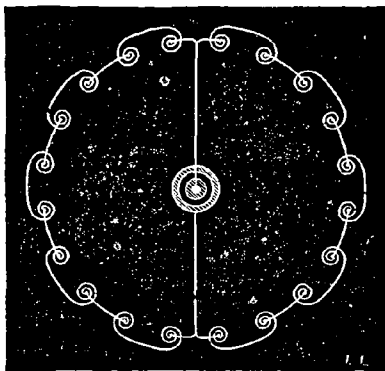


Fig. 449. — Connexions de l'induit Ferranti.

dant beaucoup plus larges qu'elles. Le vide restant est alors rempli à chaud d'un mélange de soufre fondu et de verre pulvérisé qui les fix

et les isole en même temps. Sur le côté de chaque porte-bobines une petite ailette oblique détermine une certaine ventilation. Dans toutes les grandes machines, les bobines sont reliées, comme le montre la figure 449, en deux séries groupées ensuite en dérivation. Ce groupement est effectué par le montage même des bobines, toutes celles situées sur une moitié de la circonférence étant roulées dextrorsum, et toutes celles de l'autre moitié, sinistrorsum.

Deux tiges de cuivre partent intérieurement des queues de deux des porte-bobines situés aux extrémités opposées d'un même diamètre et aboutissent aux collecteurs.

Les dispositions de ces collecteurs sont indiquées séparément dans

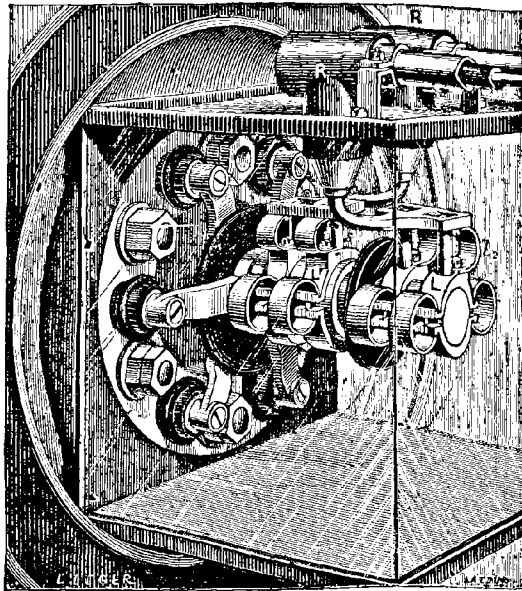


Fig. 450. — Collecteurs de l'alternateur Ferranti.

la figure 450. Ils sont montés sur l'extrémité de l'arbre de rotation. Une connexion venant des bobines induites communique avec un système métallique formé de trois bras à 120° l'un de l'autre. Ces bras traversent des bagues en ébonite pour se relier à un cylindre de cuivre qui passe lui-même à travers une grande bobine d'ébonite munie de joues épaisses en avant et en arrière. Sur l'extrémité antérieure de ce cylindre viennent porter deux collecteurs formés chacun de deux

deux demi-anneaux L, en cuivre, réunis par des ressorts en forme de C. Ces deux collecteurs sont reliés par une connexion courbe à la borne isolée R, d'où part le circuit extérieur. L'autre connexion venant des bobines induites est reliée par trois autres bras de cuivre à une enveloppe de cuivre extérieure à la bobine d'ébonite et sur laquelle pressent également deux autres collecteurs L', semblables à la première paire, mais un peu plus grands. Ces derniers communiquent avec l'autre pôle du circuit.

Les figures 451, 452 et 453 représentent deux types d'alternateurs

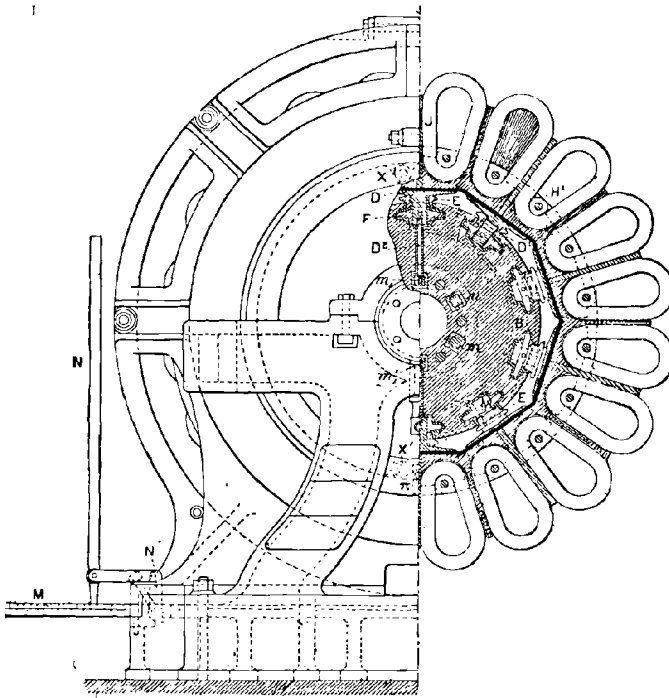


Fig. 451. — Vue de bout et coupe partielle de l'alternateur Ferranti.

Ferranti. Les figures 451 et 453 se rapportent à une machine de 300 chevaux. La première (vue de la moitié de l'induit et de la moitié du système inducteur) montre comment la connexion D^2 passe du support de bobines D à m , un boulon la réunissant à l'un des trois bras de l'appareil collecteur. On y voit également comment le système inducteur est établi en deux moitiés séparées, dont chacune peut être

écartée latéralement à l'aide d'un levier N et d'une crémaillère M, de manière à dégager complètement l'induit et à en permettre le nettoyage

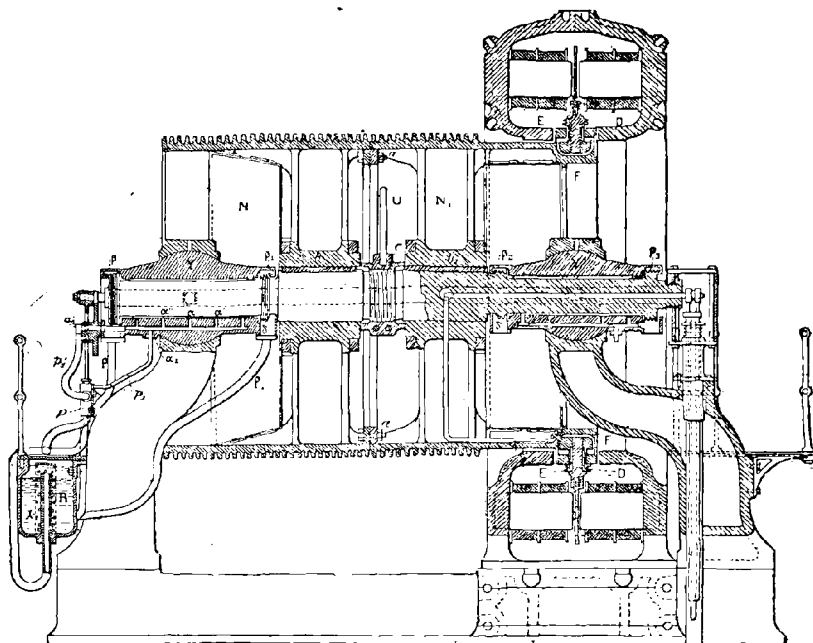


Fig. 452. — Coupe en long de l'alternateur Ferranti.

et les réparations. Cette machine fonctionne à une vitesse de 350 tours par minute ; le diamètre de son induit est de 1,65 mètre.

La figure 452 représente, à l'échelle de $\frac{1}{30}$, un des alternateurs de 1 250 chevaux installés à la station d'éclairage de Deptford. Ces machines, capables de donner 100 ampères sous 40 000 volts, à la vitesse de 120 tours par minute, sont entraînées, au moyen de cordes s'enroulant sur une poulie à gorges, par des machines du type de la marine. La poulie qui porte 27 gorges a 3 mètres de diamètre et plus de 3 mètres de large.

Elle est en deux parties N et N₁, réunies par des boulons en a, et est clavetée sur le milieu de l'arbre entre deux coussinets montés sur des paliers incurvés aux deux extrémités. Les portées ont une longueur inaccoutumée et les coussinets oscillent sur des sièges sphériques. Des bagues disposées aux extrémités extérieures de l'arbre empêchent tout jeu latéral. La position exacte de la poulie sur l'arbre s'ajuste au

moyen d'un collier central à vis *c*, manœuvré par un levier U. Cette disposition est nécessaire parce que l'induit est monté sur la jante

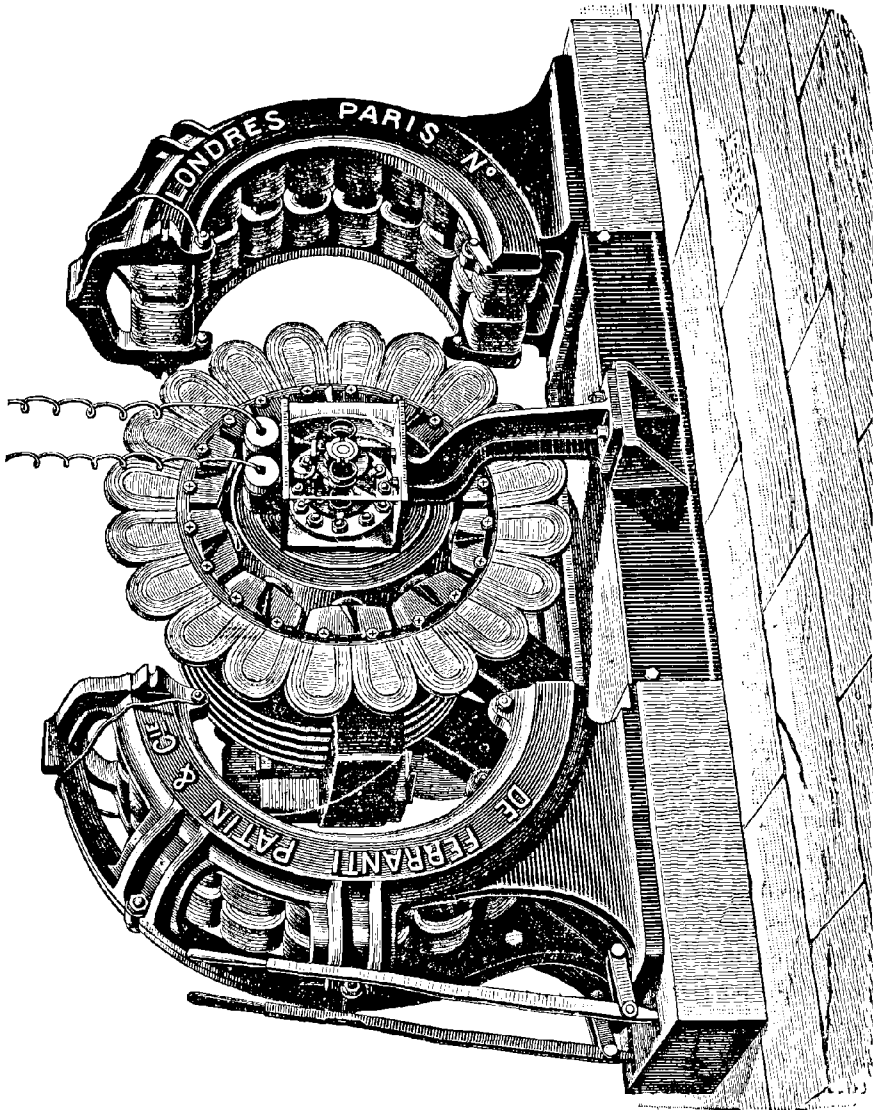


Fig. 453. — Alternateur Ferranti (Vue d'ensemble montrant la machine ouverte pour la visite de ses éléments.)

terminale F de la poulie elle-même, par-dessus le coussinet ; et, comme le jeu entre les bobines induites et les faces polaires de l'inducteur est

très faible, une usure quelconque des coussinets pourrait amener l'induit à s'approcher d'une façon dangereuse des faces polaires. On voit en D et E les supports de bobines et les bagues de porcelaine. Les pôles inducteurs sont fixés dans un grand bâti extérieur en fonte formant coquille. Chaque couronne comporte 48 pôles de polarités alternées. Leurs faces sont recouvertes par des enveloppes en ébonite mince qui les protègent contre des décharges susceptibles de se produire sous forme d'étincelles entre les bobines. Les bobines induites, également au nombre de 48, sont capables de développer chacune 420 volts environ, et porteront, sans échauffement anormal, un courant de 50 à 55 ampères. Le diamètre moyen de l'induit est de 4,5 mètres, et son épaisseur, dans la partie qui travaille, de 19 millimètres seulement. Sa vitesse périphérique est par suite de 1 780 mètres par minute. Le mode d'entraînement de l'induit oblige à faire passer les connexions en cuivre isolé à travers le palier ; elles sont, en conséquence, conduites par un canal pratiqué dans l'arbre à cet effet. Les précautions les plus minutieuses sont prises contre toute possibilité d'arrêt provenant d'échauffement des coussinets. Il y a dans ce but une double circulation d'eau et d'huile. A l'extrémité de l'arbre opposée au système collecteur, un excentrique actionne une pompe à huile *p*, qui puise l'huile, à travers un filtre, dans le réservoir R fixé à la plaque de fondation, et la distribue sous pression aux canaux de graissage *a* des coussinets d'où elle retourne au réservoir.

M. de Ferranti a établi, mais non encore monté, à Deptford, un alternateur encore plus grand. Cette machine fournira 750 ampères sous 10 000 volts, alimentant ainsi 200 000 lampes à incandescence et absorbant 10 000 chevaux à l'allure de 60 tours par minute. Le diamètre moyen de l'induit est de 15 mètres environ, avec une vitesse périphérique d'à peu près 2 440 mètres par minute. Les bobines, au nombre de 48, sont construites et connectées comme dans ses autres alternateurs ; mais elles sont supportées par la jante d'un grand volant qui pèse seule près de 200 tonnes. Le poids de l'induit complet est d'environ 225 tonnes. Les deux couronnes inductrices pèsent ensemble, avec leur bâti, à peu près 450 tonnes. La poulie induite est fixée au milieu d'un long arbre à manivelles extérieures aux coussinets, à chaque extrémité. A droite et à gauche de la machine sont montées deux machines marines compound de 5 000 chevaux chacune, qui ont environ 18,3 mètres au-dessus du sol et à peu près 24,4 mètres au-dessus de la base du système inducteur, enterré lui-même dans le sol, de manière à abaisser le niveau de l'arbre. Le système collecteur n'est pas monté à l'extré-

mité de l'arbre ; mais, à cela près, il est tout à fait semblable à ceux des autres machines plus petites.

Alternateur Parsons¹. — Cette machine bipolaire marche à la vitesse extraordinaire de 6 000 et même 8 500 tours par minute ; son induit est un simple tambour. Elle est directement attelée sur une turbine à vapeur spéciale, à grande vitesse, du même inventeur.

Alternateur Mordey. — Cette forme très particulière de machine, produite en 1888, est construite par la « Brush Electric Engineering Company », de Londres. Elle est représentée par les figures 454 à 456 et diffère essentiellement, sur plusieurs points, des formes précédentes. Bien qu'elle comporte, comme celles-ci, deux couronnes de pôles entre lesquelles est placé l'induit, tous les pôles situés d'un même côté sont de même polarité, nord, par exemple, et ceux situés de l'autre côté sont tous sud. En conséquence, il n'y a pas de renversement du champ magnétique à travers les bobines induites ; le flux de force traversant une bobine quelconque varie simplement de zéro à un maximum, pour revenir ensuite à zéro. Il résulte de cette disposition une grande simplification dans les moyens à employer pour l'excitation des inducteurs. Il n'est plus nécessaire de rouler une bobine magnétisante distincte sur chaque pôle en saillie. Il suffit d'une seule bobine enveloppant un cylindre central en fer pour aimanter l'ensemble des pôles. Il n'y a en réalité qu'un seul circuit magnétique qui se subdivise entre un certain nombre de branchements distincts. Voici comment est établi le système inducteur représenté séparément par la figure 455 : —

Un cylindre court, en fer forgé, à travers lequel passe l'arbre, constitue le noyau entouré par la bobine excitatrice. Contre les bases de ce noyau sont solidement vissées deux calottes polaires rayonnantes, portant chacune un certain nombre de bras recourbés (neuf dans les petites machines, douze dans les grandes) qui se renversent en arrière, en opposition les uns avec les autres, et ne laissant entre leurs bouts opposés qu'un écart de 17 millimètres environ. Cet intervalle est juste suffisant pour laisser passer l'induit.

Le système inducteur entier tourne avec l'arbre ; la bobine d'excitation est alimentée par un courant issu d'une petite machine indépen-

¹ Voir *Electrician*, XX, 103, 1887 ; et *Proc. Inst. Civil Engineers*, XCVII, Février 1889.

dante et qui lui est amené par les deux bagues de contact montées sur l'arbre, à droite sur la figure 455. Il n'y a aucune nécessité de faire

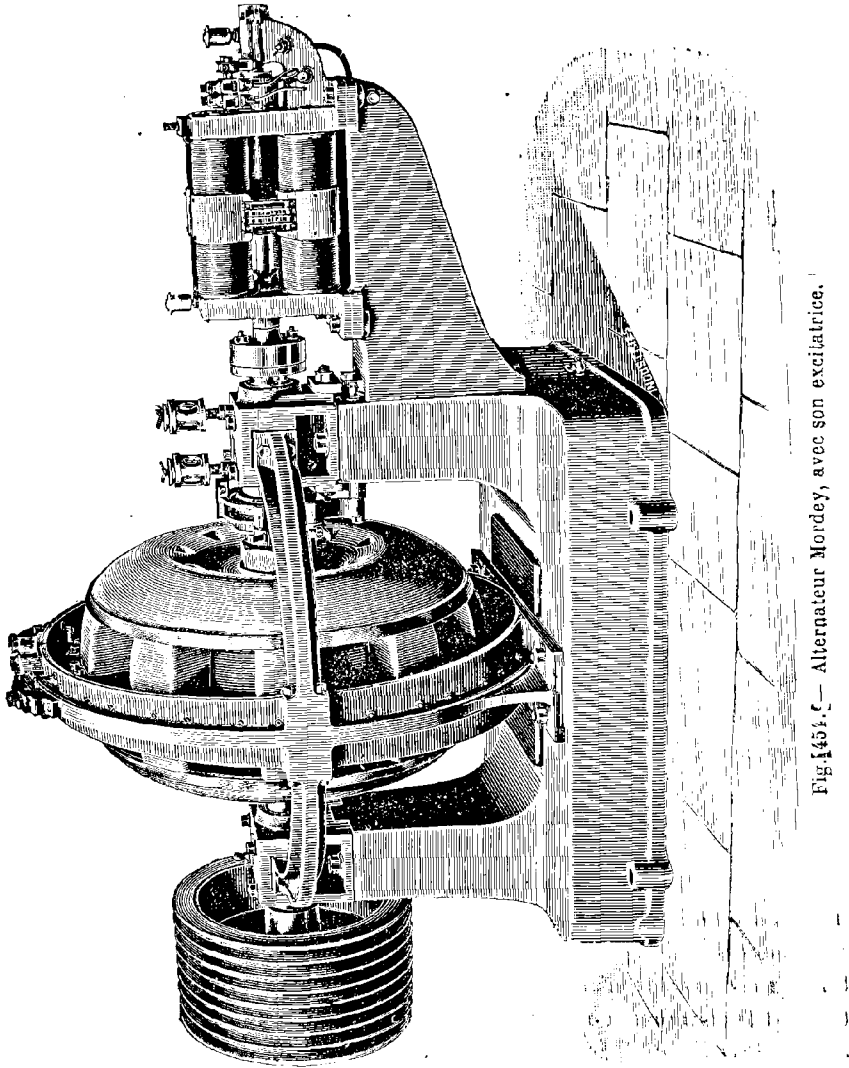


Fig. 454. — Alternateur Mordey, avec son excitatrice.

tourner la bobine excitatrice ; mais des considérations mécaniques ont conduit à faire préférer un enroulement faisant corps avec le noyau inducteur. L'induit (fig. 456), qui est fixe et debout, est formé, dans les petites machines, de 18 bômbes en ruban de cuivre étroit, de 11 mil,

limètres de large, dont les spires sont isolées les unes des autres par des bandes de fibre très mince, et roulées sur des noyaux en porcelaine. Ces bobines sont séparément fixées à leur large extrémité, par l'entremise de supports de bobines en maillechort revêtus de mica et de fibre et encastrés dans de l'ébonite, à un bâti léger, mais robuste, en bronze ; les bouts des conducteurs de chaque bobine sont conduits au dehors à travers des isolateurs en porcelaine et convenablement reliés les uns aux autres. Tous les emboitements métalliques sont extérieurs au système inducteur et disposés de telle sorte qu'on puisse, en quelques instants, enlever une bobine quelconque sans démonter aucune autre partie de la machine. Chaque bobine est munie d'une vis qui permet

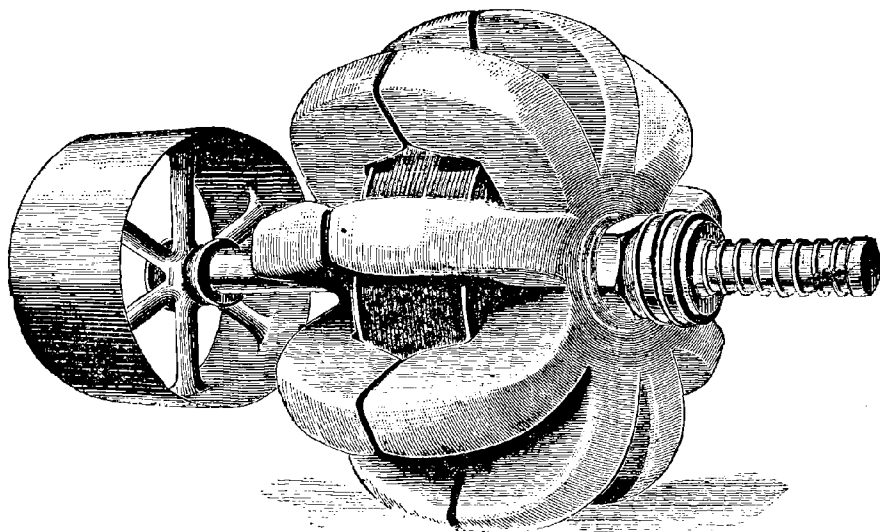


Fig. 455. — Inducteur de l'alternateur Mordey.

de la faire mouvoir radialement, de sorte que toutes les bobines sont fortement serrées par coincement les unes contre les autres. Comme l'induit est fixe, on n'a aucunement à se préoccuper de la force centrifuge, et les bobines n'ont besoin d'être supportées qu'en vue de résister à l'effort tangentiel du champ. Cette condition rend très facile l'isolement des bobines induites, ce qui est de la plus haute importance pour un fonctionnement à haut voltage. Le système inducteur mobile constitue un excellent volant qui annule les pulsations dues aux irrégularités des coups de piston de la machine à vapeur, et, comme aucune partie de l'alternateur n'est sujette à dislocation, une marche à grande

vitesse ne présente aucun des inconvénients auxquels est exposé un grand nombre d'autres types de machines. Dans la figure 454, qui donne une vue d'ensemble de la machine, les inducteurs sont presque complètement cachés par la protection extérieure qui recouvre les entrefers séparant les projections polaires et est destinée à éliminer les trop grandes perturbations de l'air par suite de la rotation des

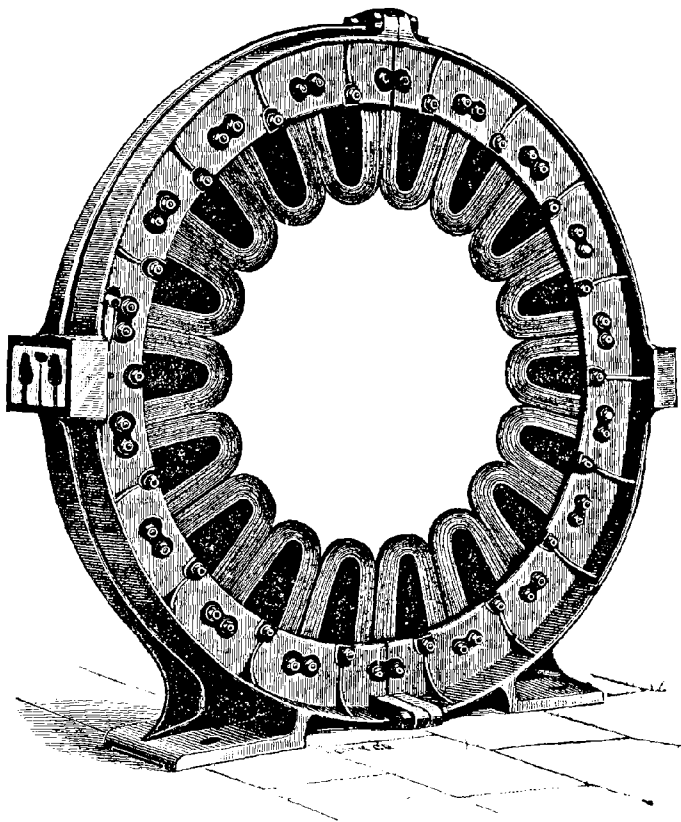


Fig. 456. — Induit de l'alternateur Mordey.

pièces polaires. Comme on le voit sur la figure 455, l'arbre porte à l'une de ses extrémités une fusée à cannelures ressemblant à celle d'une hélice de navire, et les coussinets eux-mêmes sont réglables longitudinalement, de manière à permettre de placer le système inducteur bien symétriquement par rapport à l'induit. Dans les machines les plus récentes, des bagues ajustées sur les portées empêchent tout jeu latéral ;

cette disposition prête moins à l'échauffement. L'excitatrice est une petite machine « Victoria » à quatre pôles (fig. 346), qui ne pèse que 2,5 p. 100 du poids de l'alternateur, et n'absorbe qu'un cheval pour produire l'excitation. La force électromotrice, pour une dynamo de 20 kilowatts, est de 1 volt pour 21,6 centimètres de conducteur dans la machine. La très faible résistance de l'induit et l'absence à peu près complète de réactions d'induit rendent cette machine presque auto-régulatrice. L'un des avantages de ce type de machine est la facilité que présente l'enroulement des bobines ; et la simplicité de la main-d'œuvre et du montage des parties en fer diminue le prix de revient.

Nous donnons ci-après la description d'un alternateur de ce genre de 75 kilowatts (ou 100 chevaux). — Puissance (avec l'enroulement habituel), 37,5 ampères sous 2 000 volts, à 500 tours par minute. La machine ayant 12 pôles, le nombre des périodes est de 6 000 par minute, ou de 100 par seconde. L'induit porte 24 bobines, ordinairement roulées en vue d'un couplage tout en série ; chaque bobine travaille sous 83,3 volts et a une résistance de 0,051 ohm. La résistance totale de l'induit est de 1,22 ohm ; en conséquence, à pleine charge, la perte en volts est de $37,5 \times 1,22 = 55,75$, et la perte par échauffement intérieur, de 4 715 watts. Les bobines induites sont roulées de bandes de cuivre de 9,5 millimètres de large et de 0,75 millimètre d'épaisseur ; les spires en sont isolées l'une de l'autre par un ruban isolant assez fin pour être transparent. L'entrefer polaire est de 19 millimètres. La densité de courant, à pleine charge, n'est pas inférieure à 5,415 ampères par millimètre carré. Ce chiffre, qui, pour un grand nombre de machines, impliquerait un échauffement exagéré, est assez peu élevé pour ne produire ici qu'une très douce élévation de température, grâce aux conditions exceptionnelles de ventilation. Il en résulte que dans cette machine la densité de courant n'est pas limitée par un danger d'échauffement anormal, mais par des considérations de rendement et d'abaissement de la caractéristique. Les autres pertes dans l'induit ont en effet été réduites à une quantité tout à fait négligeable par les soins donnés à tous les détails de conception et d'exécution. Il n'y a pas de perte par hystérésis en raison de l'absence de tout noyau d'induit. Les courants parasites dans le ruban sont insignifiants ; il est tellement fin qu'il n'a pas besoin d'être divisé. De plus, les supports de bobines ne pénètrent pas dans l'entrefer polaire ; ils passent simplement à travers le bord du champ. Ils sont d'ailleurs en maillechort, dont la haute résistance spécifique réduit les pertes par courants parasites à 1/16 ou 1/20 de ce qu'elles seraient si l'on employait du laiton. Le fait que la dépense

intérieure est presque entièrement limitée à la perte i^2r est confirmé par ce résultat que la machine, actionnée en circuit ouvert, mais excitée de manière à donner son plein voltage, n'absorbe que 3 chevaux, l'induit restant absolument froid.

Ce point est de la plus haute importance pour toutes les machines destinées à l'exploitation de stations centrales; la puissance dissipée constitue en effet une fraction de la puissance totale beaucoup plus grande quand les machines fonctionnent sur de faibles charges que lorsqu'elles ont toute leur charge. Et, de ce qu'une machine donne un rendement élevé à pleine charge, il ne s'ensuit nullement qu'elle ait un haut rendement sous de faibles charges pendant les heures de jour. Ce fait qui avait depuis longtemps frappé M. Mordey a été l'objet de toute son attention dans l'étude de sa machine. Les bobines inductrices sont généralement construites en vue de prendre un courant de 17,6 ampères sous 65 volts; ce qui demande 1 150 watts pour l'excitation complète. On peut calculer le rendement de la manière suivante : — Puissance nette 75 000 watts; perte dans l'induit 1 715 watts; perte dans les inducteurs 1 150 watts; puissance totale absorbée 77 865 watts; rendement 96,32 p. 100. Les constructeurs garantissent un rendement commercial de 93 p. 100. La concordance très voisine du rendement commercial et du rendement électrique est une mesure de l'excellente manière dont est conçue la machine; elle est la preuve de l'absence de frottements, d'hystérésis et de courants parasites. C'est un point très curieux à constater que, dans un grand nombre de machines, ces pertes, bien que grandes pour de faibles charges, sont non seulement proportionnellement, mais absolument moindres à pleine charge. Mais les machines qui présentent des pertes considérables à basses charges ne sont pas économiques pour l'exploitation des stations centrales.

La «Brush Electric Engineering Company» vient de terminer de grands alternateurs de 250 kilowatts, dont le rendement commercial dépasse 93 p. 100. Ils sont munis d'une pompe à huile spéciale, formée de deux roues dentées de 3,75 centimètres environ de diamètre, engrenant l'une avec l'autre, et complètement enfermées, qui puisent entre leurs dents l'huile qu'elles vont distribuer sous les portées avec une pression de 4,2 kilogrammes environ par centimètre carré. Un conduit à goutte visible permet au surveillant de s'assurer que le graissage est suffisant.

Voici quelques données sur un de ces alternateurs Mordey de 250 kilowatts récemment achevé : —

Le système inducteur a 20 paires de pôles; il fait 300 tours par minute avec 100 périodes par seconde. Le poids de l'inducteur mobile et de l'arbre est de

15 tonnes; la machine entière en pèse vingt. — Aimantation des pôles, 7 400 unités C. G. S. Largeur d'une des bobines induites, 180 millimètres ($\approx 90^\circ$); longueur efficace de chaque bobine, 266 millimètres; épaisseur de la bobine, 16 millimètres. L'excitation en circuit ouvert absorbe 2 800 watts; à pleine charge, 3 650 watts, ou moins de 1,5 p. 100 de la puissance totale. Chute en volts, à pleine charge, avec excitation constante, 4,25 p. 100; rendement électrique, y compris l'excitation, 97 p. 100; rendement commercial garanti 93 p. 100. Les connexions à glissement pour le courant d'excitation sont formées de deux bandes souples de toile métallique chargées à l'une de leurs extrémités et pendantes sur les deux bagues de contact.

On construit actuellement des alternateurs encore plus grands, de 500 kilowatts, sur les dessins de M. Mordey.

M. Mordey a étudié¹ un nombre considérable de types d'alternateurs, tous caractérisés par la combinaison des deux principes de circuit magnétique unique et d'absence de renversements de polarité dans l'induit (flux ondulé). — Quelques projets de machines de la même famille ont été brevetés par W. Main².

ALTERNATEURS A RÉSISTANCE MAGNÉTIQUE VARIABLE OU A FER TOURNANT

[Les Anglais désignent cette catégorie d'alternateurs sous le nom d'« alternateurs à inducteur ». Cette appellation, peu exacte scientifiquement, ne présente à l'esprit rien de concret et est de nature à établir une fausse distinction entre ces appareils et leurs congénères. Nous n'avons pas voulu la reproduire; mais il est difficile de leur donner un nom simple qui les définisse suffisamment. — Ils sont, ainsi qu'on l'a vu page 625, caractérisés par ce fait que l'induit et les inducteurs, autrement dit tout le système électromagnétique, y sont fixes, les alternativités et les variations de flux étant déterminées uniquement par la rotation d'une pièce de fer doux qui modifie incessamment la résistance magnétique des circuits. Bien que la variation de la résistance magnétique leur soit commune avec tous les autres, elle est le principe même, tout à fait typique, de leur fonctionnement; aussi les désignons-nous sous le nom d'alternateurs « à résistance magnétique variable », et par abréviation « à fer tournant ».

¹ Brevet anglais, 8262 de 1887.

² Brevets anglais, 15858 et 16032 de 1887. L'emploi d'inducteurs ayant plus de pièces polaires que de bobines excitatrices a été antérieurement appliqué par Holmes (Brevet anglais, 2060 de 1868), et plus récemment par J. et E. Hopkinson.

Alternateurs Mordey à fer tournant. — La figure 457 *a* représente un alternateur de ce genre dû à M. Mordey. Les bobines induites *e* sont montées sur les extrémités de pièces de fer *a* estampées en forme d'U et groupées à cheval sur le pourtour d'une seule bobine excita-

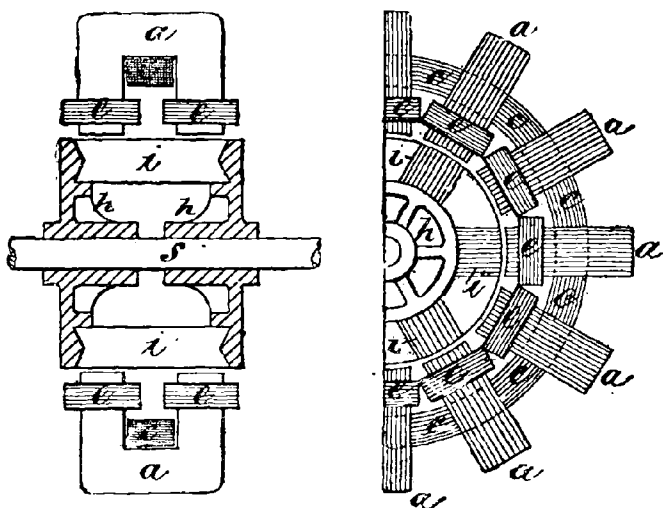


Fig. 457 *a*. — Alternateur Mordey à fer tournant (premier type).

trice *c*. D'autres groupes de plaques de tôle *i*, fixées sur un plateau central, viennent passer successivement en face des masses de fer extérieures et renforcer alternativement de un sur deux leurs circuits magnétiques ¹.

Bien que sous cette forme il n'y ait qu'un seul bobinage inducteur annulaire, le bobinage d'induit comporte un nombre considérable de bobines. Dans un brevet plus récent ², le même inventeur a mis en avant plusieurs dispositifs dans lesquels il n'emploie qu'un seul bobinage annulaire pour l'induit aussi bien que pour l'inducteur. La figure 457 *b* indique l'application de ce principe à un alternateur à fer tournant dans lequel *c* est la bobine excitatrice et *e* l'enroulement d'induit.

¹ Ce principe antérieurement suggéré par plusieurs inventeurs (voir les Notes historiques, p. 10-11) a été remis au jour par l'auteur de cet ouvrage en 1883, sous une forme décrite dans son brevet n° 1639 de 1883, et qui a servi à M. Kingdon. *L'Electrical Review*, XXII. 178, 1888, donne des dessins de cette dernière machine.

² Brevet anglais, 5162 de 1888.

Cette machine peut être considérée comme un appareil dans lequel

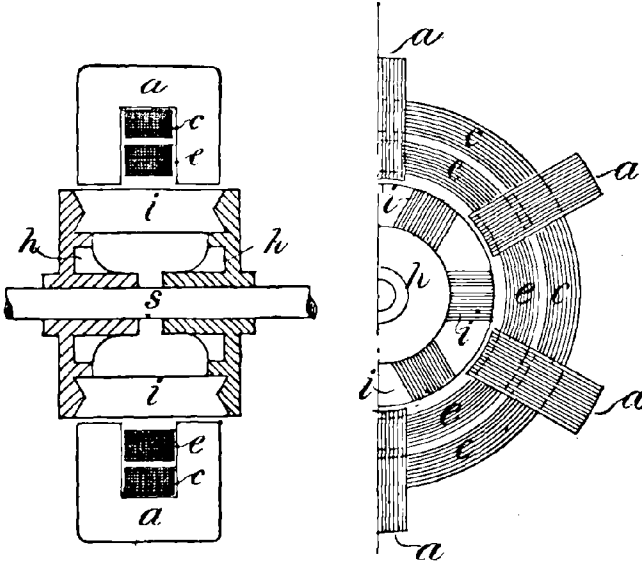


Fig. 457 b. — Alternateur Mordey à fer tournant (second type).

varie périodiquement l'induction mutuelle entre deux circuits, dont l'un est parcouru par un courant fixe.

Alternateur Kingdon à fer tournant. — La machine ci-dessus mentionnée ressemble tout à fait à une machine antérieure, imaginée

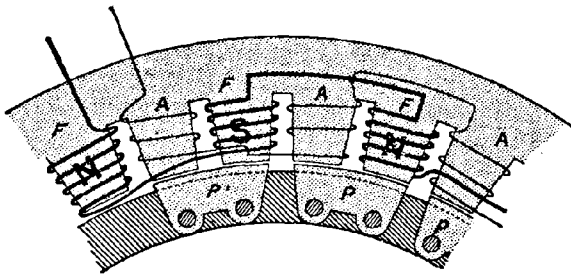


Fig. 458 — Alternateur Kingdon à fer tournant.

par M. J. A. Kingdon et qui a eu un grand succès. Dans cette dynamo (fig. 458), le principe de l'immobilité de l'induit et des inducteurs est appliqué d'une manière différente. Un anneau muni intérieurement d'un grand nombre de pôles radiaux convergents est entière-

rement formé de lames de fer doux. Les pôles A, alternés de deux en deux, sont garnis de bobines remplissant le rôle d'induit, tandis que les pôles F intermédiaires sont garnis d'autres bobines destinées à remplir le rôle d'inducteurs. Sur un plateau circulaire interne sont disposées des masses de fer lamellé P qui en tournant donnent lieu à de rapides renversements périodiques dans la polarité magnétique des

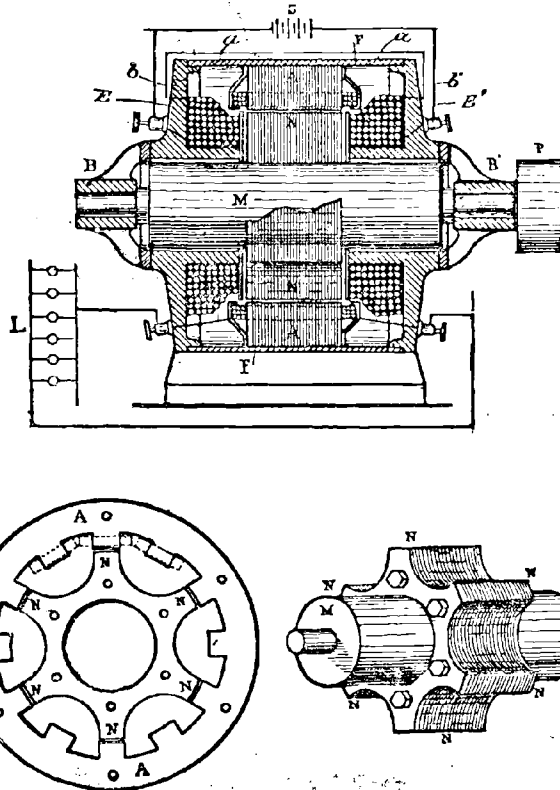


Fig. 459. — Alternateur Elihu-Thomson à fer tournant.

noyaux de la partie-induit et développement des courants alternatifs dans les bobines qui les entourent.

La machine de 50 kilowatts présente 16 bobines inductrices ou primaires, et 16 bobines induites ou secondaires. La roue mobile constituant le fer tournant porte 16 blocs P, dont chacun est assez long pour sous-tendre la largeur de deux bobines successives sur les pôles de l'anneau extérieur. Son diamètre est de 135 centimètres et sa

profondeur de 30,5 centimètres ; sa vitesse, de 350 tours par minute. Deux de ces alternateurs alimentent la station centrale de Woking. Un autre a été exposé à Francfort par MM. Woodhouse et Rawson.

Alternateur Elihu Thomson à fer tournant. — Dans cette machine également les parties mobiles sont uniquement en fer. Sur un cylindre central en fer M (fig. 459) est fixé un certain nombre de plaques estampées, de la forme indiquée en N. Extérieurement à cette partie mobile est un induit A dont le noyau est formé de disques dentés ; ces dents convergeant vers le centre sont garnies de bobines, en nombre double de celui des dents en saillie du fer tournant N. Des bobines fixes montées de chaque côté de N sont excitées séparément, de manière à produire en N un pôle nord et à donner une polarité sud aux flasques extrêmes de la machine. Il en résulte que le fer mobile devient virtuellement un électro-aimant tournant ayant une série de pôles d'une seule et même polarité et dont le circuit magnétique se complète en une succession alternative à travers les bobines induites. Sur ces données on a établi dernièrement pour stations centrales de grands alternateurs d'une puissance de 375 kilowatts. Les inducteurs sont portés par une roue de 2 mètres de diamètre. Le nombre des bobines induites est de 36.

Alternateurs Kennedy à fer tournant. — M. Rankine Kennedy a publié un grand nombre d'études ingénieuses pour des types analogues.

ALTERNATEURS A COURANT CONSTANT

On a produit aux Etats-Unis une grande variété d'alternateurs fournissant des courants d'un nombre invariable d'ampères efficaces pour les applications d'éclairage par arcs en série ; les principaux types sont ceux de Stanley¹ et de Heisler². Le principe de construction de ces machines est l'établissement d'induits doués d'une self-induction considérable. Ce résultat est atteint dans l'alternateur à courant constant de Stanley par l'emploi d'un grand nombre de spires de fil fin sur l'induit, encastrées dans de profondes rainures pratiquées dans les disques du noyau.

¹ *Electrical World*, XV. 45, et XVI. 339, 1890 ; et *The Electrician*, XXIV. 623 ; XXV. 145 ; et XXVI. 20, 1890.

² *Electrical Review*, XXV. 207, 1889.

ALTERNATEURS POLYPHASES

On a vu, page 627, que les divers circuits dans l'enroulement de l'alternateur Gramme fournissaient des courants alternatifs différant de phase de l'un à l'autre et qui devaient en conséquence être utilisés sur des circuits extérieurs distincts. Tout récemment, l'attention des électriciens s'est portée sur des alternateurs engendrant des courants de phases différentes, non pas pour l'éclairage, mais pour l'alimentation de moteurs d'une certaine catégorie (voir p. 694), demandant des courants polyphasés.

Le principe de construction de ces alternateurs polyphasés consiste à garnir leur induit de bobines réunies par groupes de deux, trois ou da-

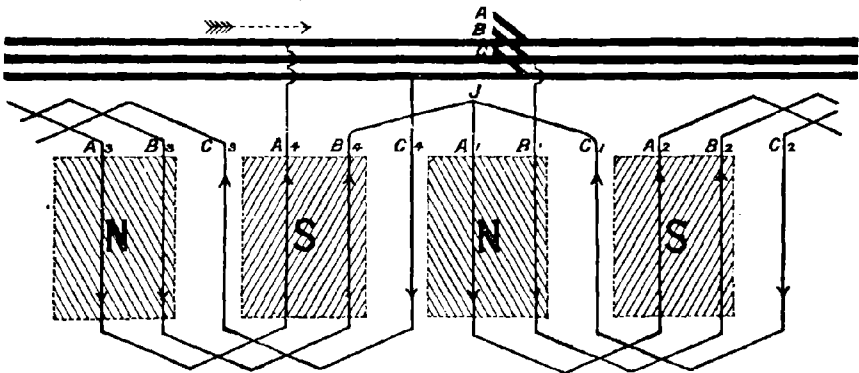


Fig. 460. — Développement d'un bobinage triphase.

vantage, qui entrent successivement en action dans chaque période. On verra plus loin, au Chapitre XXIV, sur les moteurs à courants alternatifs, différents moyens de réaliser des enroulements de ce genre. Quant à présent, il suffit de dire que, quel que soit le type d'induit, en anneau, en tambour, polaire, ou en disque, il est toujours possible de le monter pour des circuits multiples en espaçant convenablement les bobines par rapport aux inducteurs, et que ce mode de construction est également applicable avec les bobinages imbriqués et avec les bobinages ondulés. Nous ne donnerons ici qu'un exemple de bobinage triphase. La figure 460 montre trois enroulements ondulés distincts, A, B et C, également espacés l'un de l'autre, l'écart entre les conducteurs actifs successifs étant du tiers du « pas » de la machine.

En un point J ces trois enroulements ont une jonction commune, tandis que leurs trois autres extrémités sont supposées reliées à trois bagues de contact sur chacune desquelles porte un balai collecteur. Cette figure doit être comparée aux enroulements de l'alternateur ordinaire (fig. 201 et 202, p. 302 et 303). L'enroulement ainsi représenté fournirait trois courants dont les phases différeraient entre elles de 120° . Le principe du courant triphasé peut être représenté par un diagramme tel que celui de la figure 461, analogue à celui de la figure 410, page 606. Les trois lignes inclinées l'une sur l'autre de 120° sont supposées tourner, et les longueurs qui en sont découpées par les deux cercles intérieurs indiquent les diverses valeurs des forces électromotrices dans les trois circuits.

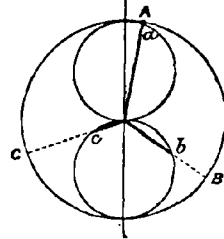


Fig. 461.

Alternateur triphase de Brown. — Cet alternateur qui a été étudié pour la fourniture des courants dans le fameux transport d'énergie entre Lauffen et Francfort, dans l'automne de 1891, a été construit par les ateliers d'Oerlikon. La figure 463 en représente la vue en per-

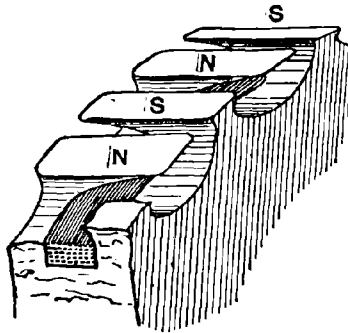


Fig. 462. — Détail schématique d'un inducteur Brown.

spective. La machine donne naissance à trois courants de 1 400 ampères chacun, sous une tension de 50 volts, en absorbant 300 chevaux, quand elle marche à 150 tours par minute. L'induit, qui est extérieur, est fixe, tandis que le système inducteur, formé de 32 pôles alternés, tourne à l'intérieur. Ce dernier est représenté séparément dans la figure 464. L'enroulement de l'induit est constitué par 96 barres de cuivre, de 29 millimètres de diamètre, montées en trois groupes de 32 cha-

cun et reliées entre elles comme dans la figure 460. Ces barres, isolées par des tubes d'amiante, sont logées dans des trous percés

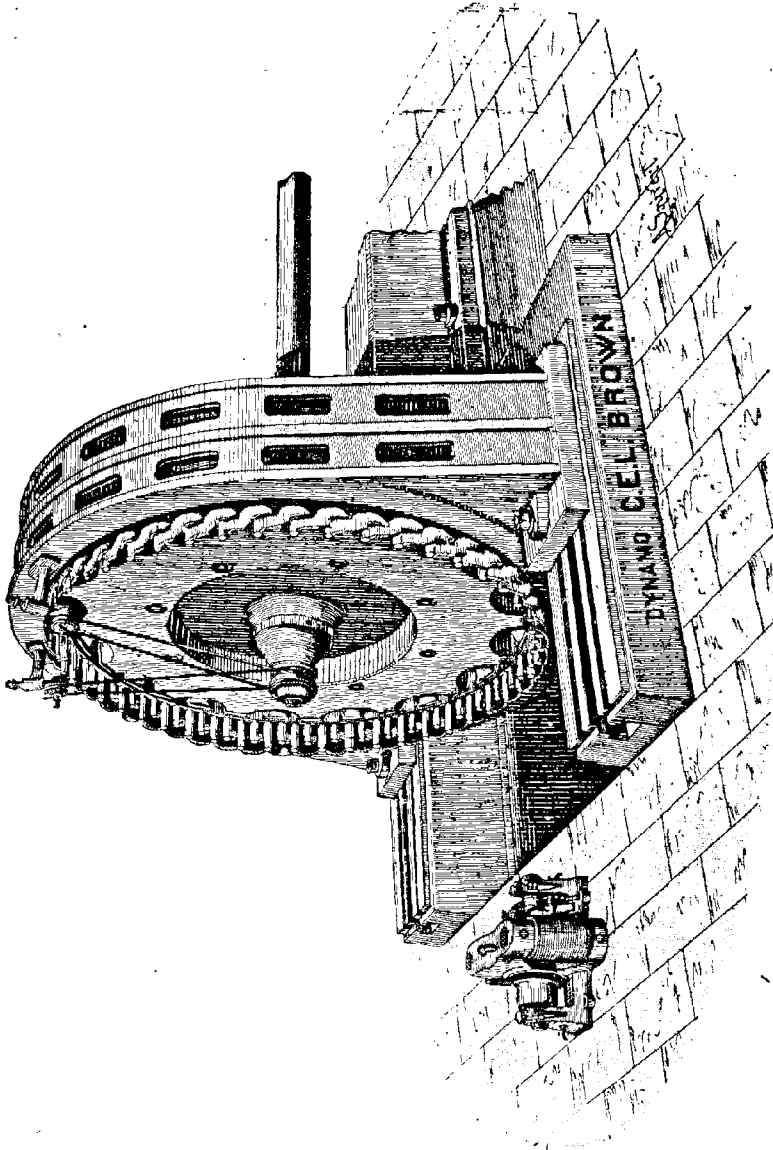


Fig. 463. — Générateur tri-phase à courants alternatifs, de Brown.

dans les disques du noyau (voir p. 382), tout près de sa périphérie intérieure. Les disques de noyau, estampés en segments, sont assem-

blés sur une robuste carcasse de fonte, qui peut se mouvoir tout d'une pièce le long de la face supérieure de la plaque de fondation, de manière à permettre le nettoyage du système inducteur ainsi découvert.

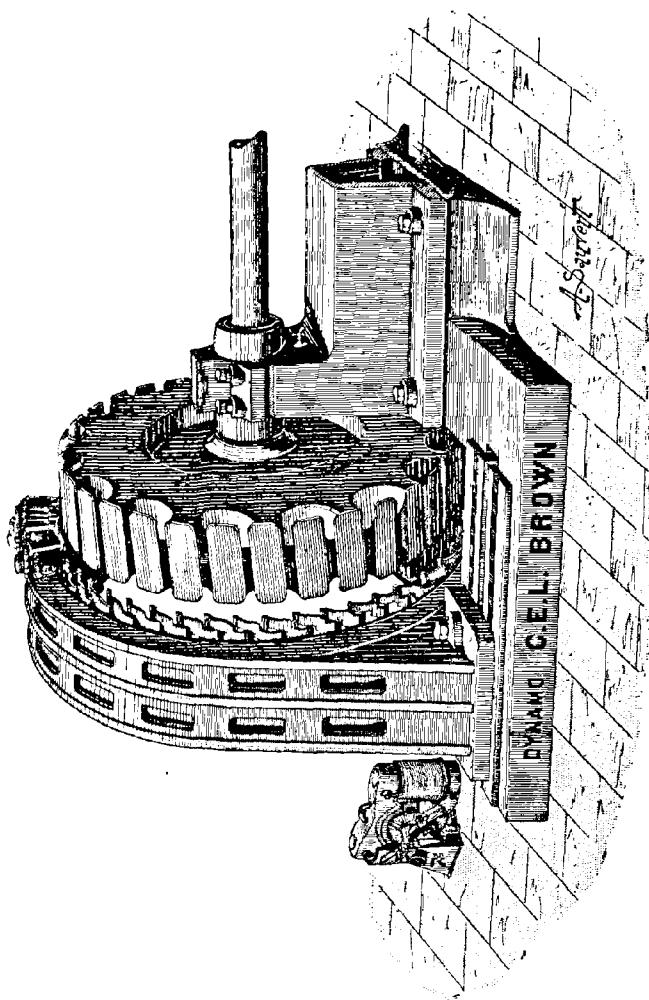


Fig. 461. — Génératrice triphase à courants alternatifs, de Brown. (Inducteur et Excitatrice.)

Ce système inducteur est lui-même d'une grande simplicité et extrêmement robuste ; il ne comporte qu'un seul circuit magnétique. La bobine inductrice est roulée à la périphérie d'une sorte de poulie en fonte sur laquelle sont boulonnés deux disques ou bandages d'acier munis chacun de 16 dents ramenées horizontalement, normalement

aux rayons suivant lesquels elles sont placées. Ces dents sont renversées l'une vers l'autre dans la direction du joint des deux disques accolés, les dents de l'un venant se loger dans l'intervalle des dents du disque opposé, de manière à donner alternativement des pôles N. entre des pôles S. par-dessus la bobine inductrice unique, comme l'indique la figure 462. Cette disposition, qui dans son ensemble ressemble à celle de Mordey, réduit à un minimum le coût de la construction et celui de l'excitation. En réalité, en circuit ouvert, on ne dépense pour l'excitation que 100 watts, soit un vingtième de 1 p. 100, ou cinq dix-millièmes, de la puissance ; à pleine charge, quand la réaction d'induit est maximum, cette dépense est encore bien inférieure à 1 p. 100.

Cette excitation est fournie par une petite dynamo d'Oerlikon. Le système inducteur est monté en porte-à-faux de manière à en permettre l'attelage sur une turbine. Le courant d'excitation est transmis à la partie mobile par des cordes métalliques flexibles entraînées par des petites poulies isolées, aux lieu et place des bagues de contact et des balais collecteurs ordinaires. A pleine vitesse et sous le voltage normal, les pertes par frottements et par hystérésis s'élèvent à 3 600 watts, soit moins de 1,7 p. 100 de la puissance maximum. La perte par résistance du bobinage d'induit est, à pleine charge, de 3 500 watts, ce qui porte la perte totale à moins de 4 p. 100, et le rendement commercial à 96 p. 100. Par suite de l'absence presque totale de courants parasites, l'échauffement est tout à fait négligeable. Le poids de la machine est de 4 tonnes 1/2. Les alternateurs de ce type fonctionnent, comme moteurs, synchroniquement, mais avec ce grand avantage sur les alternateurs biphasés ordinaires, qu'ils démarrent seuls.

COUPLAGE DES ALTERNATEURS

Les principes essentiels concernant le réglage du fonctionnement de deux ou plusieurs machines à courants alternatifs sur le même circuit ont été expérimentalement découverts par Wilde et exposés par lui dans un travail publié, dès janvier 1869, dans le *Philosophical Magazine*. Au milieu de l'activité qui s'est portée dans les années suivantes sur le développement des machines à courant continu, le travail de Wilde semble avoir été complètement oublié, et il a fallu que le docteur Hopkinson reprit de son côté, et d'une façon tout à fait indépendante, cette question dans son mémoire sur « l'Eclairage électrique » présenté en 1883

à l'*Institution of Civil Engineers*, pour attirer de nouveau l'attention sur cet important sujet. La manière de procéder du docteur Hopkinson diffère essentiellement de celle de Wilde en ce qu'il a commencé par déduire de considérations théoriques la façon dont se comportaient certaines dynamos à courants alternatifs dans des conditions données, pour contrôler ensuite pratiquement et vérifier ultérieurement, quand l'occasion s'en présentait, ses conclusions théoriques. Dans les remarques qui suivent nous nous conformerons essentiellement au mode de raisonnement qui a guidé le docteur Hopkinson.

Pour que deux ou plusieurs machines à courants alternatifs puissent utilement fonctionner ensemble, il faut, comme il est facile de le voir, que le temps périodique des alternativités de l'une d'elles soit exactement égal au temps périodique de celles de l'autre, ou tout au moins qu'il en soit un très faible multiple. On n'a jusqu'ici mis en pratique que le premier de ces deux cas. Considérons en conséquence le cas de deux machines A et B absolument identiques, tournant à la même vitesse, de sorte que le temps périodique des alternativités de force électromotrice soit le même pour chacune d'elles. Si la phase¹ de ces deux machines se trouve être exactement la même, et si elles sont reliées en série, il est évident que leurs deux forces électromotrices s'ajouteront et que les deux machines se comporteront comme une seule. Mais cette condition de marche sera instable ; et, si par une cause quelconque, telle qu'un glissement de l'une des courroies d'entraînement, l'exacte concordance de phase se trouve modifiée si peu que ce soit, l'action électrique mutuelle des deux machines *tendra* à augmenter la différence de phase, au lieu de la combattre. Dans la figure 463, supposons que les temps soient portés en abscisses suivant OX, et les forces électromotrices en ordonnées ; les courbes AAA et BBB représenteront dès lors l'allure des alternativités de force électromotrice dans les deux machines, la courbe BBB, située à droite de AAA, étant celle qui correspond à la machine dont la phase est en retard sur celle de l'autre. La courbe EEE, obtenue par l'addition des ordonnées des deux courbes précédentes, donne la force électromotrice résultante dans le circuit à un instant quelconque. Comme on l'a vu page 612, le courant aura le même temps périodique que cette dernière force électromotrice ; mais il sera *décalé* par rapport à elle. On pourra en conséquence le repré-

¹ Par phase identique, il faut entendre que le maximum de force électromotrice positive se produit *exactement au même instant* dans chaque machine. Dans tout autre cas les phases diffèrent.

senter par la ligne ponctuée *III*, dont les ordonnées représentent le courant, et non plus la force électromotrice. Mais le taux suivant lequel l'une ou l'autre des deux machines envoie sa part d'énergie dans le circuit à un instant quelconque est donné par le produit de l'ordonnée

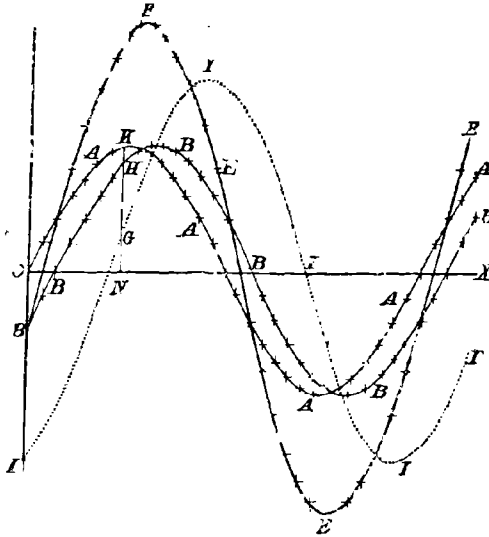


Fig. 465.

de *III* correspondant à cet instant par l'ordonnée de la force électromotrice de cette machine au même instant. Ainsi, à l'instant *N* la ma-

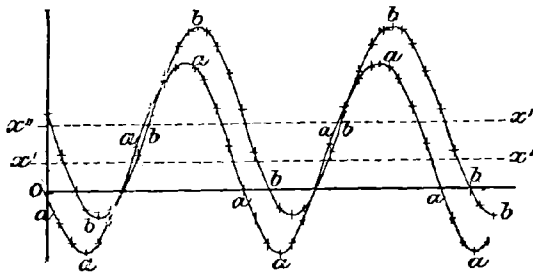


Fig. 466.

chine *A* effectue un travail au taux $NK \times NG$, et la machine *B* au taux de $NH \times NG$; autrement dit les puissances respectives développées à cet instant par chacune des machines sont $NK \times NG$ et $NH \times NG$. Si ce produit devient parfois négatif, il faut y voir cette signification que la

machine, à cet instant, *absorbe* de l'énergie sur le circuit. Le *travail total* effectué par l'une ou l'autre des machines pendant une alternativité complète de courant sera donné par la sommation des produits précédents pour l'alternativité complète, chacun de ces produits étant multiplié par l'intervalle de temps dt infiniment petit pendant lequel on peut supposer ce travail constant. La manière la plus simple de faire cette sommation est de recourir à une intégration analytique, mais on peut aussi l'effectuer graphiquement de la manière suivante. On trace un nouveau groupe de courbes pour lesquelles les abscisses sont les mêmes que précédemment, mais dont les ordonnées sont les produits de la force électromotrice et du courant de chaque machine à chaque instant.

On obtiendra comme résultat quelque chose d'analogue à la figure 466, qui a été ainsi tracée d'après la figure 465. Ici la courbe *aaa* se réfère à la machine A, et la courbe *bbb* à la machine B. On aura le travail total en mesurant la surface comprise entre chaque courbe et l'axe des abscisses, et en se rappelant que les surfaces situées *au-dessous* de l'axe des abscisses doivent être considérées comme *negatives*, et, en conséquence, arithmétiquement déduites des surfaces situées au-dessus. Un moment d'attention donné à ces deux courbes fera voir que la machine B effectue plus de travail que la machine A. En effet, la courbe *aaa* est symétrique par rapport à l'axe horizontal $x'x'$, tandis que la courbe *bbb*, tout en lui étant exactement semblable, est symétrique par rapport à l'axe plus élevé $x''x''$; par suite, la surface positive comprise entre elle et l'axe des temps est nécessairement plus grande que la surface correspondant à la courbe *aaa*. La machine *décalée* B a par conséquent plus de puissance à développer et se trouvera ainsi retardée; le décalage augmentera de ce fait, ce qui entraînera comme conséquence une diminution du courant. Mais la tendance vers un décalage de plus en plus grand est mise en évidence par les figures 467 et 468, tracées de la même manière et à la même échelle que les figures 465 et 466, à cela près que le décalage de la machine B est plus grand. Le décalage continuera en conséquence à augmenter, tandis que la force électromotrice et le courant résultants iront en diminuant, jusqu'à ce que les forces électromotrices des deux machines diffèrent, en phase, exactement d'une demi-période et se fassent, par suite, exactement équilibre l'une à l'autre. Alors la force électromotrice résultante sera constamment zéro et il ne circulera aucun courant. Les figures 465 et 467 se réduiront à la figure 469. Cet état de fonctionnement est stable; car, si une cause quelconque vient

troubler cette opposition exacte de phases, l'action électrique tend à la rétablir.

Le raisonnement ci-dessus conduit à cette autre déduction que, théoriquement, les machines reliées en parallèle fonctionneront parfaitement bien. Soient, en effet, $A a$ (fig. 470) les collecteurs de la ma-

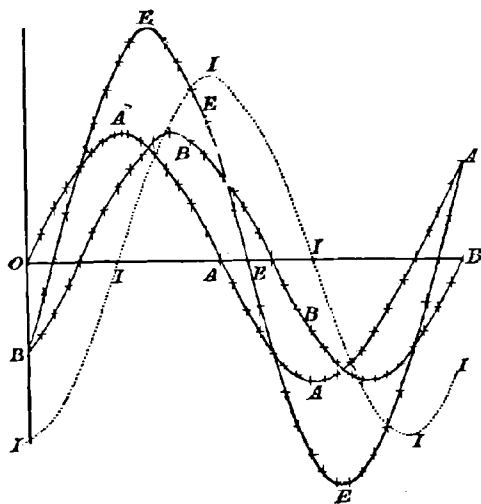


Fig. 467.

chine A, et $B b$ ceux de la machine B; si, comme on l'a vu précédemment, on relie A à B et a à b , suivant les lignes ponctuées de la figure, il n'y aura

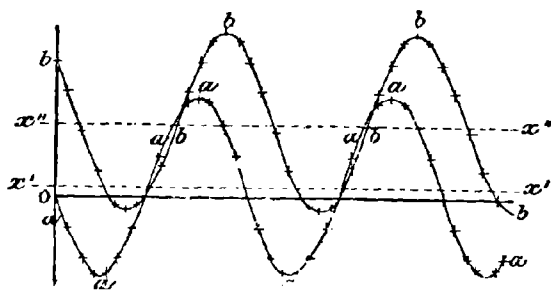


Fig. 468.

pas de courant, et une lampe à arc placée en ba ou en BA ne s'allumera pas. En effet, A et B se trouvent toutes deux simultanément à leur potentiel positif maximum, et au même instant a et b sont à leur potentiel négatif maximum. Mais c'est précisément l'état de choses

qui permet d'obtenir un courant à travers le circuit PRp , relié en P et p aux fils AB et ab . Avec cette disposition les machines fonctionnent en parallèle sur le circuit PRp .

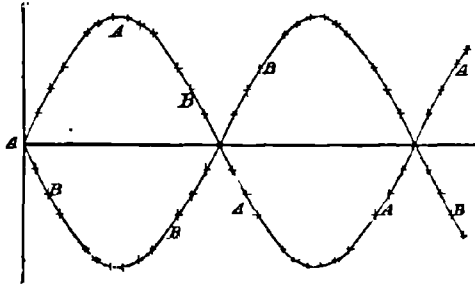


Fig. 469.

Il en résulte encore comme déduction qu'une machine à courants alternatifs peut être employée comme moteur. Dans ce cas la machine B (celle qui est décalée) est la génératrice et effectue un travail positif sur le courant, tandis que la machine A effectue un travail négatif sur le courant, c'est-à-dire qu'elle en reçoit de l'énergie, et agit, par suite, comme moteur. Comme conditions, il faut que le décalage de l'une des forces électromotrices par rapport à l'autre soit supérieur à un quart

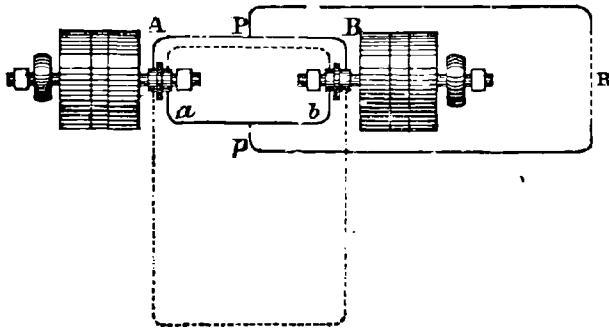


Fig. 470.

de période, le décalage du courant étant, comme à l'ordinaire, soit égal, soit inférieur à un quart de période par rapport à la force électromotrice *résultante*. On se rend aisément compte de ces faits en traçant de nouveau les courbes des figures 465 et 466 suivant les conditions qui précèdent. Les figures 471 et 472 donnent le résultat de ce nouveau tracé.

Un résultat encore plus curieux est que A peut être, comme réceptrice, actionnée par B, même si sa force électromotrice est supérieure à celle de B. On le prouve exactement de la même façon que le phéno-

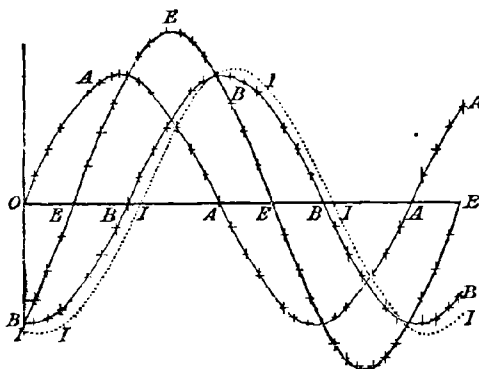


Fig. 471.

mène précédent. Nous laissons au lecteur le soin d'en trouver lui-même, à titre d'exercice, la démonstration.

Toutes les courbes données se réfèrent à une même paire de machines identiques, tournant constamment à la même vitesse, et

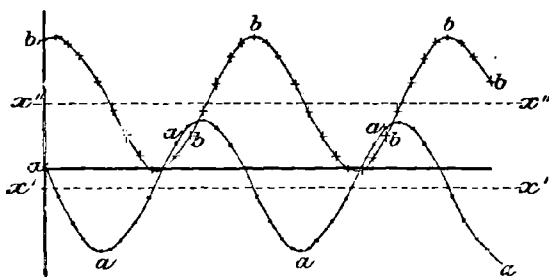


Fig. 472.

pour lesquelles le circuit extérieur présente la même résistance et la même self-induction totales. Le décalage du courant par rapport à la force électromotrice résultante est par conséquent le même dans chaque cas (voir p. 612).

Il est à peine besoin de dire que l'analyse est en parfait accord avec la géométrie, en ce qui concerne la démonstration de ces phénomènes. La méthode analytique conduit en outre à un autre résultat, plus difficile à représenter graphiquement, c'est que l'énergie dissipée en

courants parasites dans le fer, quand la machine est *en court circuit*, est *moindre* que lorsqu'elle tourne à *circuit ouvert*; il s'ensuit que la machine reste plus froide quand on lui fait produire un courant que lorsqu'on la laisse tourner à vide. Ce phénomène est depuis longtemps bien connu pour les machines à courants alternatifs; les expériences suivantes, faites par le docteur Hopkinson sur une machine de Méritens, en donnent une excellente illustration :

Puissance transmise à la machine, mesurée sur la courroie en watts.	3,1	4,8	5,6	6,5	5,4
Puissance électrique développée	0,7	3,4	4,3	5,7	3,4
Puissance perdue	2,4	1,4	1,3	0,8	2,0
Courant moyen en ampères.	7,7	38,6	51,7	73,6	151,0

On remarquera que la perte de puissance est minimum pour la charge maximum.

Les conclusions ci-dessus ont été appliquées par le docteur Hopkinson à l'épreuve expérimentale des trois grandes machines de Méritens employées aux recherches sur « l'éclairage des phares » au South Foreland.

Deux des machines étaient reliées en parallèle et mécaniquement couplées l'une avec l'autre jusqu'à ce qu'elles eussent atteint leur vitesse normale, après quoi elles étaient découplées et actionnées séparément chacune par sa courroie. La force électromotrice à circuit ouvert restait constante, les machines continuant à tourner à l'unisson, et cette force électromotrice était la même que celle d'une seule d'entre elles quand on l'éprouvait séparément. Il ne passait aucun courant par leur fil de liaison. Le circuit P R *p* (fig. 470) était alors fermé sur une lampe à arc; les machines continuaient à tourner aussi régulièrement que précédemment, bien qu'un courant considérable de 221 ampères passât par l'arc. Finalement on rompa le circuit de la lampe, les deux machines étaient mises en court-circuit l'une sur l'autre et l'on jetait à bas la courroie de l'une d'elles; elle continuait à tourner à la même allure régulière, actionnée, comme moteur, par le courant issu de l'autre machine. Ces expériences furent suivies d'autres qui confirmèrent toutes les conclusions théoriques.

Le docteur Hopkinson a fait observer que, si l'on admet comme suffisantes ses équations, qui supposent nulles toutes les actions magnétisantes et démagnétisantes dans l'induit, il en résulte que deux

alternateurs fonctionnant en parallèle auront plus de tendance à se maintenir en concordance de phase, par régulation mutuelle, quand le rapport de leur résistance intérieure à leur coefficient de self-induction sera égal à 2π fois la fréquence. Quelques électriciens ont cru voir dans cette proposition que la présence de self-induction dans l'induit était une excellente condition pour les machines à courants alternatifs, en ce qu'elle contribuait à aider leur fonctionnement en parallèle, et ils en ont conclu que les machines munies de noyaux de fer dans leurs induits étaient préférables à celles sans fer. M. Kapp¹ a même émis, à un moment, l'idée que, dans le montage des alternateurs destinés à fonctionner en dérivation, il fallait augmenter soit leur résistance d'induit, soit leur self-induction, ce qui diminuait en conséquence le rendement de l'installation. Contrairement à cette manière de voir M. Mordey² a très clairement établi la proposition que, pour un bon fonctionnement en dérivation, la résistance intérieure et la self-induction devaient être toutes deux aussi faibles que possible, et qu'il fallait parer autant que possible à toutes les réactions d'induit en employant de puissants et volumineux inducteurs. Il a construit sur ce principe fondamental deux alternateurs, capables de fournir chacun 17 à 20 ampères sous 2 000 volts à l'allure de 650 tours par minute et présentant une fréquence de 100 périodes par seconde. A l'aide de ces deux machines il a effectué un certain nombre d'expériences intéressantes, décrites dans l'important mémoire qu'il communiqua en 1889 à l'*Institution of Electrical Engineers*.

Ces deux machines, excitées chacune séparément et reliées en dérivation l'une avec l'autre, fonctionnaient parfaitement : (1) quand on commençait par les porter au même voltage et par les faire concorder en phase, avec ou sans charge de lampes en circuit ; (2) quand on les excitait à 1 000 et 2 000 volts respectivement et qu'on les amenait séparément à la concordance de phase ; (3) quand, les deux machines étant respectivement excitées à 1 000 et 2 000 volts et couplées lorsqu'elles étaient en discordance de phase, il passait de l'une à l'autre pendant un instant un courant suffisant pour déterminer la concordance de phase ; (4) quand, après les avoir séparément excitées jusqu'à 2 000 volts chacune, on les couplait en discordance de phase ; (5) quand, après les avoir fait fonctionner toutes deux en parallèle, on séparait brusquement l'une d'elles du moteur qui l'actionnait ; (6) quand,

¹ *Proc. Inst. Civil Engineers*, XCVII. 14, 1889.

² *Journal Inst. Electrical Engineers*, XVIII. 591, 1889.

après les avoir fait fonctionner parallèlement ensemble, on fermait brusquement l'admission de la vapeur dans l'une des machines motrices : l'alternateur ainsi isolé fonctionnait alors parfaitement bien comme moteur et entraînait la machine à vapeur et la transmission. Dans ces divers cas il y avait synchronisme parfait. — Le changement de phase nécessaire pour transformer une machine décalée en avance en une machine décalée en retard ¹ n'a besoin pour s'effectuer que d'un petit angle ; mais, comme dans les alternateurs du type Mordey (voir p. 665) le moment des parties mobiles est très grand, une irruption très considérable de courant pendant un instant très court suffit à amener le changement de phase nécessaire. En conséquence M. Mordey soutient que la self-induction, la résistance, et tout ce qui peut retarder, empêcher ou gêner la libre irruption du courant est préjudiciable à la mutuelle régulation prompte et efficace des deux machines. Qu'il se produise une action mécanique énergique quand on fait subitement passer un alternateur du rôle de génératrice à celui de réceptrice, et qu'on le fait changer de phase, c'est ce que met en évidence un ronflement singulier qu'il fait entendre à ce moment. Sir William Thomson a formulé l'opinion ² que le courant d'induit peut, dans les diverses relations de phases, produire des actions considérables quasi permanentes d'aimantation et de désaimantation qui influent sur la régulation mutuelle. L'expérience indique cependant que, si deux machines sont mises en mouvement entre des inducteurs très faiblement excités, leur puissance de synchronisme est pratiquement nulle, tandis que, sous une excitation intense, cette puissance de synchronisme est énorme. Ce fait singulier montre que l'aptitude au maintien du synchronisme dépend des forces dues à l'effort du champ magnétique sur le conducteur d'induit qui porte les courants. Il prouve en conséquence que *le fait essentiel dans le maintien du synchronisme est l'échange de courants entre les deux machines, cet échange développant toujours des forces qui tendent à modifier les relations de phases de manière à réduire ces courants à un minimum*. Cette proposition, qui est une simple extension de la loi générale d'action relative aux moteurs électriques (voir p. 575), est applicable non seulement aux cas où l'une des deux machines agit comme moteur, mais à ceux où les machines fonctionnent toutes deux comme génératrices. Quand on emploie deux machines comme génératrices, en parallèle, il

¹ Ces expressions se réfèrent, comme précédemment, à l'avance ou au retard de la force électromotrice par rapport au courant.

² *Journal Inst. Electrical Engineers*, XVIII. 667, 1889. (Discussion du Mémoire de M. Mordey.)

est toujours possible de régler le partage de la charge entre elles en réglant les courants d'excitation fournis à leurs inducteurs respectifs. Elles règlent d'elles-mêmes, en conformité, leurs relations de phases. On voit, par suite, clairement que la question de savoir si le rapport de la self-induction à la résistance a une certaine valeur particulière est d'une très minime importance au point de vue du synchronisme. Ce rapport est en effet pratiquement le même, que le champ soit intense ou faible, et cependant le synchronisme dépend entièrement de l'intensité du champ.

Pour plus amples détails à ce sujet, nous renvoyons le lecteur à un article du Dr. G. Schmidt, dans le *Centralblatt für Elektrotechnik*, IX. 440, 1887, qui traite des moyens d'indiquer la différence de phase dans les alternateurs et à d'autres d'Elihu Thomson, dans l'*Electrical World*, IX. 258. mai 1887, et XI. 39, janvier 1888.

CHAPITRE XXIV

MOTEURS A COURANTS ALTERNATIFS

Comme on l'a vu page 686, une génératrice ordinaire à courants alternatifs peut également servir comme moteur dans les conditions particulières suivantes de fonctionnement : — (1) il ne démarre pas seul ; il faut commencer par le lancer à sa vitesse propre et le mettre ensuite en circuit ; — (2) dès qu'il a ainsi démarré, il tourne en synchronisme absolu avec la génératrice, sous toutes les charges comprises dans les limites de son régime. Bien des tentatives ont été faites pour réaliser le démarrage automatique des moteurs à courants alternatifs. — On distingue aujourd'hui quatre classes bien spécifiées de machines de ce genre. La classification adoptée est basée sur celle de M. Hospitalier ¹.

CLASSE I. — MOTEURS SYNCHRONES

Cette classe comprend tous les alternateurs ordinaires à inducteurs soit en acier aimanté d'une façon permanente, soit excités séparément par une source indépendante quelconque, soit excités par leurs propres courants, grâce à l'intervention d'un commutateur spécial, comme dans les alternateurs auto-exciteurs de Wilde (p. 633), d'Elihu Thomson (p. 645) et de Ziperowsky (p. 650). Le caractère essentiel de ces machines réside dans ce fait que le champ magnétique reste d'une polarité invariable. Généralement les alternateurs à deux phases ne démarrent pas seuls comme moteurs ; mais les alternateurs polyphases, lorsqu'ils sont alimentés par des courants en phases convenables, démarrent seuls, pourvu que la charge initiale ne soit pas trop grande,

¹ *Société française de Physique*, 17 juillet 1891.

attendu que les successions de phases dans les bobines d'induit produisent un champ magnétique tournant qui met en mouvement le moteur, lentement d'abord, puis plus vite, jusqu'à ce que le synchronisme s'établisse complètement.

Les propriétés des alternateurs ordinaires comme moteurs synchrones ont été étudiées par Wilde ¹, Hopkinson ², Adams ³ et Mordey ⁴.

Considérons le cas typique représenté par la figure 473, dans lequel

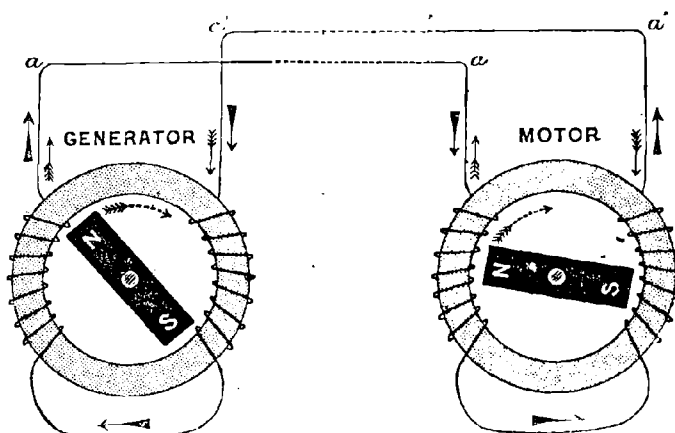


Fig. 473. -- Transport électrique par deux alternateurs diphasés.

Generator = Génératrice.

Motor = Moteur ou Réceptrice.

deux machines semblables sont employées, comme génératrice et comme réceptrice. Dans ces machines l'inducteur tourne à l'intérieur d'un induit lamellé bobiné en anneau. On suppose qu'on a lancé le moteur et qu'on l'a amené à une opposition de phase presque complète par rapport à la génératrice ; le courant est représenté comme en phase concordante avec la force électromotrice de la génératrice et en phase opposée avec celle du moteur. Deux lignes sont nécessaires, l'une pour le courant d'aller, l'autre pour le courant de retour. Si le moteur vient à retarder ou à se décaler par suite d'une augmentation de charge, il passera plus de courant, ce qui renforcera le couple mécanique.

¹ *Proc. Lit. Phil. Soc. Manchester*, décembre 1868; et *Phil. Mag.*, janvier 1869.

² *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XIII. 496, 1884.

³ *Ibid.*, XIII. 515, 1884.

Ibid., XVIII. 592, 1889.

CLASSE II. — MOTEURS A INDUCTEURS LAMELLÉS

Ainsi qu'on l'a vu, page 576, le sens de rotation d'un moteur ordinaire quelconque monté en série est le même, quel que soit le sens du courant qui l'alimente. En conséquence, un moteur de ce genre doit également fonctionner quand on l'alimente avec des courants alternatifs ¹. Mais dans ce cas il est essentiel que les inducteurs soient constitués par du fer soigneusement lamellé ; autrement ils s'échaufferaient d'une manière démesurée sous le passage de courants induits dans du fer massif. Des moteurs ainsi lamellés ont été employés avec succès sur une petite échelle. Des moteurs à inducteurs lamellés et montés en dérivation fonctionneraient également avec des courants alternatifs ; mais la self-induction considérable du circuit magnétique tend à introduire une complication de phase. M. Ll. B. Atkinson a imaginé ² plusieurs combinaisons de moteurs de ce genre pour assurer l'uniformité de fonctionnement. Dans tous les moteurs à deux phases il y a nécessairement discontinuité dans les efforts d'entraînement, attendu que, deux fois par alternativité, le courant tombe à zéro. Le résultat sur le moteur est le même que s'il y avait action simultanée d'un couple constant et d'un couple à oscillations rapides tendant à tirer sur les bobines en avant et en arrière. En outre, les renversements rapides du magnétisme dans le fer de l'inducteur tendent à déterminer une dépense inutile de puissance par hystérésis. Pour réduire autant que possible cette source de perte, Mordey ³ a proposé de faire passer le courant d'excitation à travers un commutateur monté sur l'arbre de la machine, de manière à réduire dans le moteur lui-même, au fur et à mesure qu'il s'accélère, la fréquence des alternativités, jusqu'à ce que le synchronisme soit atteint, le courant étant alors un courant direct intermittent, et le couple, maximum. Il existe un autre moyen de parer à cette perte, c'est de bannir tout fer de la machine. Un moteur ainsi constitué a une puissance relativement faible ; mais il est utilisé avec beaucoup de succès dans le compteur électrique d'Elihu Thomson.

Un autre groupe de moteurs appartenant à la même classe a pour

¹ Voir les remarques d'Alex. Siemens, *Journ. Soc. Teleg. Engineers*, XIII. 527, 1884.

² Brevets anglais, 16852 de 1888 et 7895 de 1889.

³ *The Electrician*, XXIII. 346, 1889 ; et Brevet anglais, 15555 de 1887.

principe les forces développées par la réaction des courants parasites sur le champ qui leur donne naissance. Les expériences classiques d'Elihu Thomson ¹ sur les répulsions observées dans des circuits fermés placés dans un champ magnétique alternatif l'ont conduit à proposer une forme de moteur dans lequel les circuits inducteur et induit sont complètement disjoints l'un de l'autre.

Cette machine peut être regardée comme une espèce de transformateur dans lequel la rotation est produite par une série de réactions mécaniques entre les courants dans la bobine primaire agissant comme inducteur, et dans la bobine secondaire agissant comme induit. Une bobine fermée située dans un champ magnétique de ce genre tend toujours à se mouvoir de manière à ce que le flux magnétique qui la traverse soit minimum. Si l'on prend un moteur ordinaire à anneau ou à tambour (à inducteur lamellé), que l'on supprime toute connexion entre son inducteur et son induit, qu'on l'excite par des courants alternatifs, et qu'on relie simplement les balais entre eux (de manière à fermer sur lui-même le circuit induit), en les avançant de 45° environ, le moteur démarrera seul et fonctionnera.

CLASSE III. — MOTEURS POLYPHASES A CHAMP TOURNANT

En 1885, M. Marcel Deprez mit en avant cette proposition, basée sur des considérations géométriques, qu'on pouvait produire un champ magnétique tournant en combinant à angles droits deux courants alternatifs (variant, par rapport au temps, suivant une fonction de sinus) différant en phase l'un de l'autre d'un quart de période. — En 1888, l'idée de produire un champ tournant, en employant deux courants différant en phase, conduisit, indépendamment les uns des autres, le professeur Ferraris ², de Turin, M. Nicolas Tesla ³, de New-York, et M. Borel ⁴, à la création de moteurs à champ tournant. Tesla en particulier étudia une grande variété de types établis sur ces bases, et les réalisa pratiquement. La grande importance industrielle

¹ *Electrical World*, IX, 258, mai 1887 ; et *The Electrician*, XXV, 35 et suiv., 16 mai 1890, série d'articles par le Prof. Fleming. Voir également un compte rendu résumé de ces travaux dans l'ouvrage de l'Auteur « *The Electromagnet* », p. 338.

² « Rotazioni elettrodinamiche », *Acad. de Turin*, XXIII, Mars 1888.

³ *Electrical World*, X, 281, juin 1888. XV, 250, 1890 ; XVI, 101, 1890.

⁴ *La Lumière électrique*, XXIX, 51, 1888.

qu'ont prise depuis les moteurs à champ tournant rend nécessaire une exposition minutieuse de ce principe de fonctionnement.

THÉORIE DU CHAMP TOURNANT

Nous référant à la figure 409, page 605, dans laquelle un point est supposé se mouvoir à une vitesse uniforme autour d'un cercle, appelons θ l'angle POM dont le rayon OP a tourné depuis le zéro ; dès lors, $PM = \sin \theta$, et QP ou $OM = \cos \theta$, le rayon étant pris pour unité. Le mouvement circulaire, projeté sur une ligne verticale, donnera un mouvement vertical harmonique simple, ou, s'il est projeté sur une ligne horizontale, un mouvement horizontal harmonique simple. — Tout ingénieur sait combien il est facile de transformer un mouvement rotatif en deux mouvements rectilignes à angles droits l'un par rapport à l'autre, en faisant agir une manivelle sur deux tiges qui lui sont reliées. Dans ce cas, les deux mouvements rectilignes différeront en phase d'un quart de période, car l'un sera au milieu de sa course quand l'autre sera à la fin. Inversement, il est possible de produire un mouvement circulaire en composant ensemble à angles droits deux mouvements rectilignes (harmoniques simples) différant en phase exactement d'un quart de période de manière à produire un mouvement circulaire. Si la diffé-

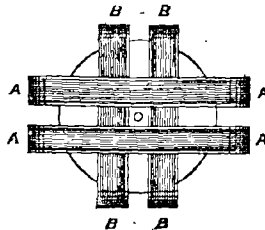


Fig. 174. — Moteur élémentaire à champ tournant.

rence de phase n'est pas exactement d'un quart de période, le mouvement résultant sera elliptique, au lieu d'être circulaire. — Quand deux courants alternatifs différant en phase exactement d'un quart de période sont lancés autour de deux bobines magnétisantes situées à angles droits l'une par rapport à l'autre, et tendant ainsi à produire deux champs magnétiques alternés distincts transversalement l'un à l'autre, leur action conjuguée se résoud en un champ magnétique tournant. Ferraris a trouvé qu'un champ magnétique ainsi constitué

déterminait la rotation non seulement d'aimants montés sur pivots, mais aussi de pièces de fer, tant massives que lamellées, ainsi que de disques et de cylindres de cuivre, l'effort exercé sur eux étant dû aux courants parasites qui s'y développent, exactement comme dans les expériences classiques d'Arago, dans lesquelles des disques de cuivre se mettaient en mouvement en présence d'un aimant tournant. La figure 474 donne l'illustration d'une forme simple de moteur Ferraris constitué par un cylindre de cuivre monté sur pivots entre deux jeux de bobines AA et BB à angles droits l'un par rapport à l'autre. Si les deux forces magnétisantes indépendantes sont des fonctions sinusoïdales, et si elles sont exactement à angles droits et diffèrent en phase exactement d'un quart de période, le couple sera uniforme. Mais, si la différence de phase n'est pas exactement d'un quart de période, ou si les bobines ne sont pas exactement à angles droits, le couple aura par période deux maximum et deux minimum, correspondant au mouvement elliptique dans la comparaison mécanique ci-dessus.

ILLUSTRATION D'UNE TRANSMISSION A CHAMP TOURNANT

La figure 473, page 692, représente le cas d'alternateurs ordinaires à deux phases. Il n'y a dans ces conditions qu'un champ oscillatoire, le magnétisme ne faisant que changer de polarité dans chaque partie de l'induit. Un alternateur de ce type a des points morts et ne peut démarrer seul.

Courants tétraphasés. — Supposons maintenant que, outre les deux bobines AA' sur chaque machine, il y en ait deux autres BB' roulées entre la première paire, et que ces dernières soient reliées entre elles par une nouvelle paire de lignes bb et b'b' (fig. 475). Il est clair qu'il va se développer en BB' un second groupe de courants alternatifs qui se trouveront exactement, comme phase, d'un quart de période en arrière de ceux engendrés dans AA'. En réalité, les deux courants seront représentés par les deux ondes de la figure 476.

La force électromotrice en A sera maximum juste quand le pôle de l'inducteur passera devant sa partie médiane, car à cet instant le taux de changement dans l'aimantation de son noyau sera maximum. Les maximum pour les bobines B correspondront au contraire aux zéros pour les bobines A et *vice versa*. Les courants dans les bobines A du moteur, tendant à tirer en avant le pôle de l'inducteur, ne seront pas encore tombés à zéro quand les courants dans les bobines B auront

déjà pris naissance, de sorte qu'il n'y aura pas de point mort. Il est facile de voir que dans le moteur il y aura un déplacement régulier du pôle résultant sur le pourtour de l'anneau. Au moment où le courant dans AA' sera maximum, celui dans BB' sera zéro, et l'action magnétisante de AA' aura pour effet de produire deux doubles pôles dans l'anneau aux extrémités opposées d'un diamètre juste au-dessous du milieu

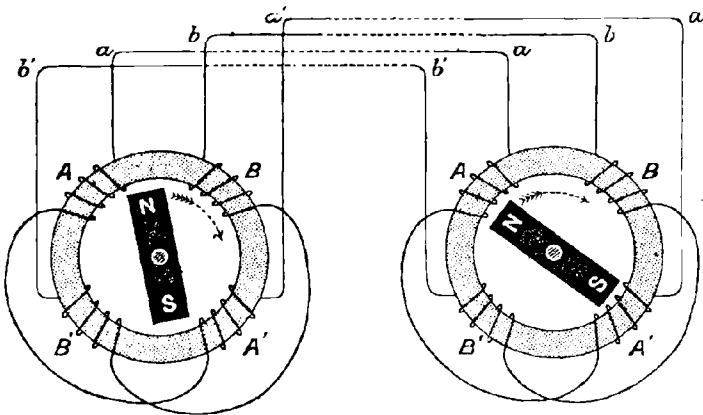


Fig. 475. — Transport électrique par alternateurs tétraphases.

des bobines BB'. Quand le courant en AA' baisse, celui en BB' se développe et va en augmentant; par suite, il déplace le pôle en avant. Quand

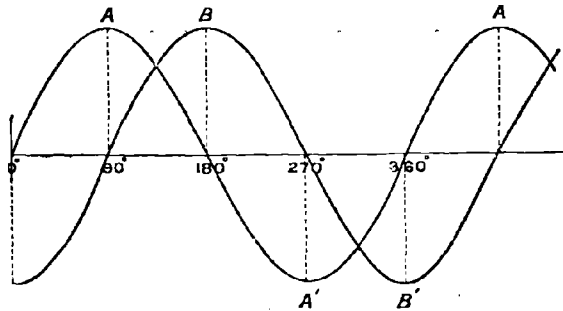


Fig. 476. — Deux courants alternatifs différant d'un quart de période.

les courants en AA' et BB' ont atteint la même valeur, A et B' agissent ensemble comme une seule bobine, tandis que A' et B agissent ensemble comme une autre bobine, les pôles résultants se trouvant alors entre B et A' sur la droite et entre B' et A sur la gauche. Quand le courant B est à son maximum, les pôles se trouvent juste sous le milieu des

bobines A. Il y a, en conséquence, production dans l'anneau du moteur d'une paire de pôles qui se déplacent sous l'action des courants issus de la génératrice, et l'inducteur du moteur essaie continuellement d'atteindre ces pôles mobiles. Le moteur démarrera seul si son électro-aimant n'est pas trop puissant, et sa vitesse ira en s'accroissant jusqu'à ce que le synchronisme soit atteint.

Du moment qu'il y a ici production réelle d'une polarité mobile dans l'anneau du moteur, il s'ensuit qu'une simple masse de fer quelconque, un cylindre par exemple, placée dans le champ tournant se mettra en mouvement, sans que ce mouvement soit nécessairement synchrone ; et un cylindre de cuivre serait entraîné circulairement par les courants

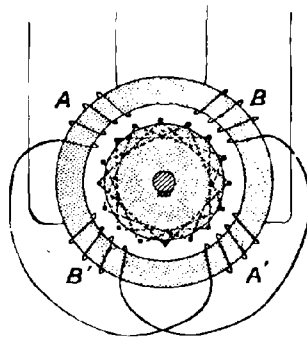


Fig. 477. — Schéma d'un moteur à champ tournant.

parasites induits en lui. Mais si on laissait ainsi ces courants parasites circuler au hasard dans la masse de cuivre, il y aurait une grande quantité de puissance dissipée par échauffement, puisque les seuls courants utiles à l'entraînement sont ceux qui s'écoulent normalement aux lignes de force et normalement à la direction du mouvement, ou, s'ils sont obliques, normalement à leur résultante suivant cette direction. Aussi est-il préférable de constituer la partie mobile par un noyau de fer entouré de bobines de fil convenablement fermées, à l'intérieur desquelles les courants induits sont confinés. Ces enroulements en circuit fermé ont été employés par Tesla et autres. Les moteurs Tesla ont obtenu un grand succès aux Etats-Unis ; le type original est un moteur de 7 chevaux pesant 154 kg et d'un rendement net supérieur à 85 p. 100. — Une forme spéciale, due à Dobrowolsky¹, consiste en un cylindre de fer à la périphérie duquel sont logés, avec ou sans isolant, de gros conducteurs

¹ *Elektrotechnische Zeitschrift*, XI. 341, 1890 ; et *Electrical World*, XV. 442, 1890.

de cuivre encastrés parallèlement à l'axe, et dont les bouts sont reliés les uns aux autres de manière à former des circuits fermés. Un simple disque de cuivre à chaque extrémité, formant avec les conducteurs une sorte de cage d'écureuil en cuivre remplie de fer, répond d'une manière parfaite au desideratum. Chaque conducteur placé à la périphérie peut encore être relié par une connexion (comme dans la figure 477) à chacun des autres conducteurs symétriquement disposés par rapport à lui. Dobrowolsky a préféré, pour le moteur employé dans le transport d'énergie de Francfort en 1891, intervertir la disposition et rendre fixes les circuits fermés de cuivre et leur noyau, en employant comme partie mobile celle correspondant à l'anneau dans la figure 478.

Il avait trois circuits distincts non fermés à l'intérieur de la machine, mais communiquant avec des résistances extérieures par des bagues de contact. De cette façon il était possible de prévenir l'énorme irruption de courant induit qui, sans cela, pouvait se produire au démarrage et qui, tout en n'étant pas préjudiciable au moteur, pouvait avoir une réaction nuisible sur d'autres éléments du système. Ces résistances extérieures pouvaient être retirées du circuit quand le moteur avait atteint sa vitesse.

Quand on emploie des combinaisons tournantes de ce genre en cuivre et fer, on peut se demander quelle est la partie de la machine qui doit être considérée comme induit, et quelle est celle qui remplit le rôle d'inducteur. Si l'on considère l'anneau comme induit, la combinaison cuivre et fer doit être regardée comme un inducteur à auto-aimantation produite par les courants parasites dans le cuivre et qui tend continuellement à atteindre les pôles tournants extérieurs, de manière à réduire à un minimum ces courants parasites et à maintenir constante sa polarité. Si, au contraire, on considère l'anneau comme équivalent à un inducteur tournant, la combinaison cuivre et fer doit alors être considérée comme un induit dans lequel des courants sont induits et qui est entraîné par la réaction de ces courants.

Jusqu'ici on a supposé que les deux circuits des bobines A et B étaient maintenus distincts, ce qui exige quatre fils. En fait, trois fils seulement sont nécessaires ; on peut en effet employer un fil de retour commun pour les fils *a* et *b*, au lieu de deux fils séparés, le courant dans ce fil de retour étant la somme algébrique des courants en *a*' et *b*' à chaque instant, et ayant par suite une valeur maximum 1,4 fois aussi grande.

Courants triphasés. — Une autre manière d'employer trois fils consiste à engendrer trois courants égaux différant en phase de 120°, ou à

60° l'un de l'autre. L'alternateur triphase de Brown, employé à Lauffen, a été décrit page 677. Des moteurs triphases ont été imaginés par Tesla et autres. La figure 478 donne une illustration du système triphase, dans lequel les anneaux sont enroulés de trois bobines toutes réunies à leurs extrémités et reliées aux trois lignes. Dans ce cas, le courant dans l'une quelconque des lignes est égal à la somme algébrique des courants qui passent dans les deux autres, et, avec la disposition indiquée, la phase des courants dans l'une quelconque des lignes est intermédiaire entre la phase des courants dans les deux bobines qui l'alimentent. Par exemple, le courant dans *a* est intermédiaire en phase

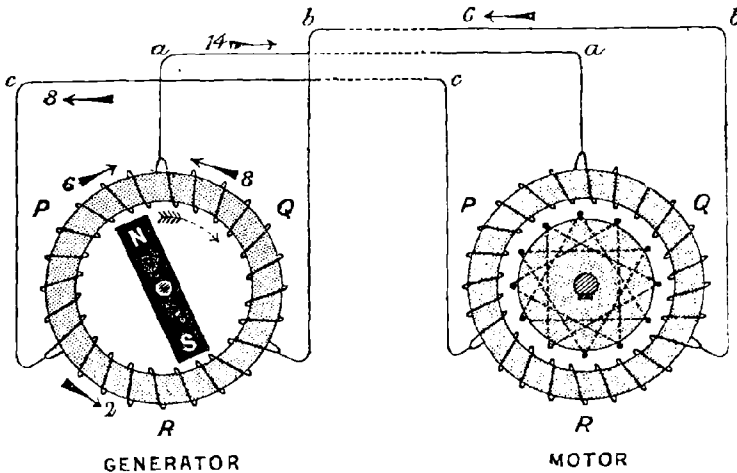


Fig. 478. — Transport électrique par alternateurs triphases.

Generator = Génératrice.

Motor = Moteur ou Réceptrice.

entre ceux des bobines P et Q de la génératrice. De même, dans le moteur le courant en P est intermédiaire en phase entre les courants en *c* et en *a*. En tournant dans la génératrice, l'inducteur détermine, comme précédemment, dans son anneau un pôle mobile ou oscillant. Il est à noter que les bobines constituent ici un circuit fermé. Il y a en réalité plusieurs modes de liaison entre trois bobines de manière à produire le champ tournant ; on peut adopter l'un des suivants : (1) chacune des trois bobines peut être reliée isolément par deux fils aux extrémités des trois bobines correspondantes du moteur, ce qui exige six lignes ; (2) trois bouts des trois bobines peuvent être reliés isolément par trois fils aux trois bouts correspondants des bobines du moteur, leurs trois autres

bouts étant réunis à une ligne commune de retour, ce qui implique quatre fils ; (3) les trois bobines a , b et c peuvent être simplement reliées à une jonction commune (fig. 479), d'où elles rayonnent, en forme d'étoile, sur leurs lignes respectives ; (4) les trois bobines peuvent être reliées, comme p , q et r dans la figure 480, en une maille ou *triangle* fermé avec les trois lignes partant de ses sommets. Dans ce cas, les

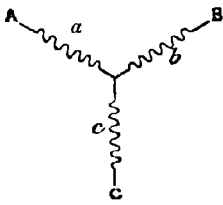


Fig. 479.
Montage en étoile.

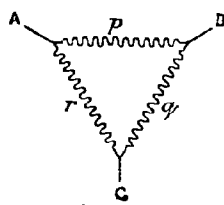


Fig. 480.
Montage en triangle.

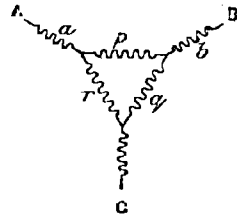


Fig. 481. — Montage
en étoile triangulaire.

phases des courants en p , q et r sont intermédiaires entre celles des trois courants dans les lignes ; (5) on peut employer six bobines comme dans la figure 481, qui montre le moyen d'obtenir un effet à six phases avec un courant triphasé, par une combinaison des dispositions en étoile et en triangle dite *étoile triangulaire* ; (6) en roulant simplement une bobine sinistrorsum, au lieu de l'enrouler dextrorsum, la phase de sa force magnétisante est renversée. Ainsi, une bobine de sens inverse, insérée en a (fig. 479), donnerait un effet qui différerait en phase de 180° par rapport à a , et serait par suite intermédiaire entre b et c . Une étoile construite avec des bobines renversées dans chaque bras permettrait ainsi d'obtenir six phases avec un courant triphasé.

La manière dont les trois courants chevauchent en phase les uns par rapport aux autres est indiquée dans la figure 482, où la différence de phase est de 120° . Trois courants entre lesquels existe une différence de phase de 60° peuvent également servir pour un fonctionnement à champ tournant, et peuvent être transformés en trois courants à différence de phase de 120° ; il suffit à cet effet d'invertir les connexions de l'une des bobines à chaque extrémité. Dobrowolsky, à qui l'on doit le nom de *courant tournant*¹ donné au système de courants alternatifs en succession périodique de phases, produisant un *champ tournant*, a fait ressortir la supériorité de la disposition triphase sur celle à quatre

¹ En allemand *Dreh-Strom* et en anglais *Rotatory Current*.

phases, en montrant que, si l'on construit pour chacune des courbes telles que celles des figures 476 et 482, la courbe résultante, cette dernière présentera moins de variations dans le cas de la combinaison à trois phases, les fluctuations des ordonnées étant de 40 p. 100 dans la résultante correspondant au courant quadriphasé, alors qu'elles ne sont

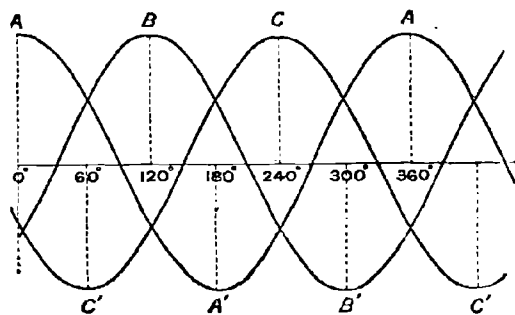


Fig. 482. — Courbes de courant triphasé.

que de 15 p. 100 pour le courant triphasé. Ceci suppose que les ondes affectent la forme sinusoïdale, ce qui n'est pas nécessairement vrai. D'ailleurs, l'addition d'ordonnées de sinus et de cosinus ne donne pas le même résultat que la construction de leur véritable résultante

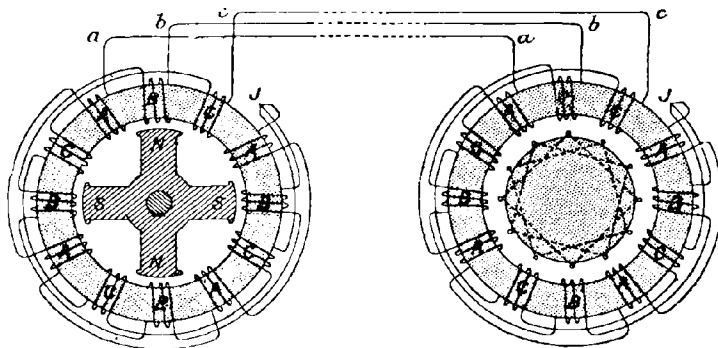


Fig. 483. — Transport par alternateurs triphasés multipolaires.

oblique, qui est leur somme vectrice, suivant la règle ordinaire de la composition des forces.

Une autre illustration du courant triphasé est fournie par la figure 483, dans laquelle les anneaux sont multipolaires, recouverts de douze bobines qui constituent quatre pôles tournants. On a dans ce cas à la

fois des bobines dextrorsum et des bobines sinistrorsum, donnant six phases de courants à 60° l'un de l'autre par période. Les connexions

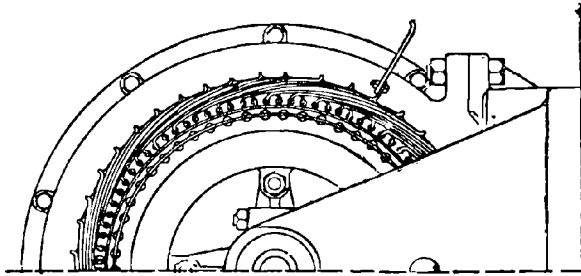


Fig. 485.
(Vue de bout.)

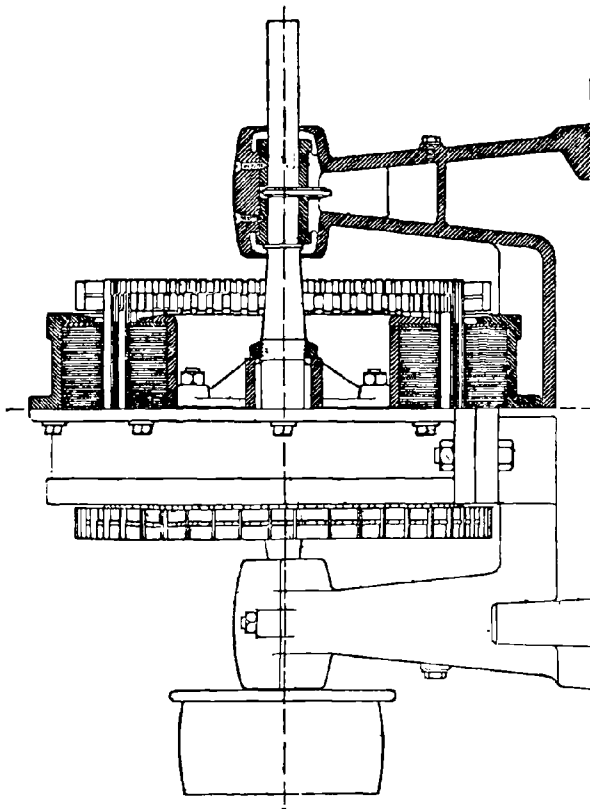


Fig. 484.
(Élévation et coupe.)

constituent une disposition étoilée, dont les trois circuits ont une jonction commune J à chaque extrémité.

Moteur triphase de Brown. — Il n'a été publié aucuns détails rela-

tivement au moteur triphase de 60 chevaux employé pour le transport d'énergie de Francfort-Lauffen et construit par l'« Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft » de Berlin, sur les dessins de Dobrowolsky¹. En l'absence de renseignements à cet égard, nous donnons ci-dessous quelques dessins relatifs à un autre moteur analogue étudié par M. C. E. L. Brown².

Ce moteur fournit 20 chevaux environ, à 1 200 tours par minute, quand il est alimenté par des courants triphasés sous 50 volts, se succédant avec une fréquence de 40 alternativités par seconde.

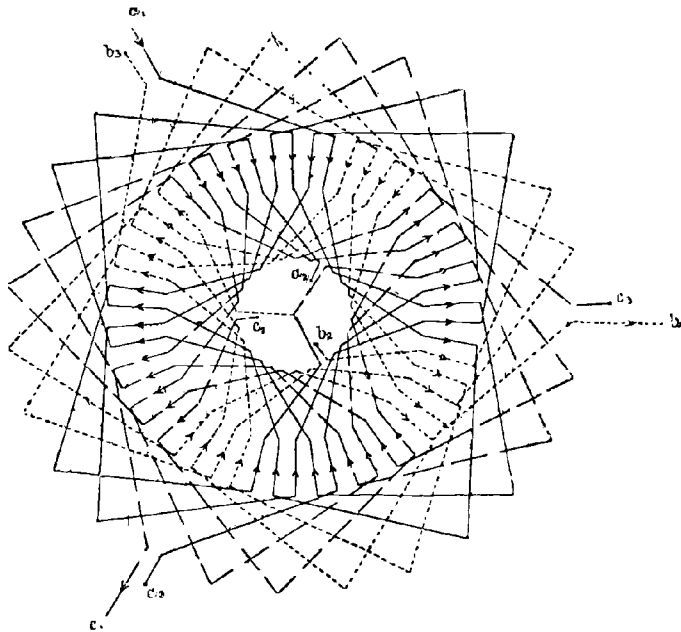


Fig. 486. — Moteur triphase de Brown : Schéma de bobinage.

La construction générale de ce moteur rappelle celle de l'alternateur triphase employé à Lauffen ; tous les conducteurs de cuivre sont formés par des barres rondes qui traversent des trous pratiqués dans les disques du noyau.

La partie fixe extérieure comporte 90 conducteurs d'environ 40 milli-

¹ Voir *Electrical Review*, XXIX. 556, 1891.

² *Elektrotechnische Zeitschrift*, XII. 657, 1891. Voir également *The Electrician*, XXVII. 657, 1891.

mètres carrés de section, reliés entre eux par des connexions terminales formées de lames de cuivre courbes, qui sous-tendent des angles un peu inférieurs à 90° pour constituer un enroulement ondulé conforme au schéma de la figure 486. Il en résulte quatre pôles tournants. La partie mobile, également composée d'un noyau à disques perforés, comprend 54 barres de cuivre de 100 millimètres carrés de section chacune. Ces dernières sont simplement réunies à leurs extrémités par des bagues de cuivre. La partie mobile comporte 95 kilogrammes de

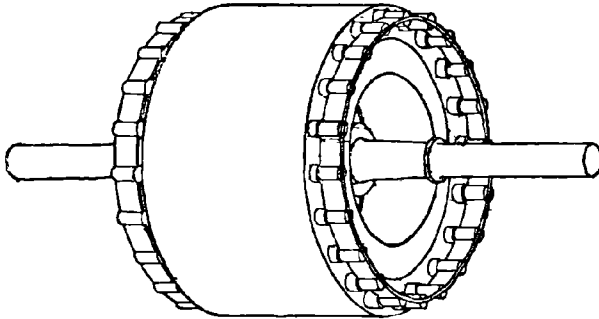


Fig. 487. — Partie mobile du moteur Brown.

cuivre et les bobines fixes 20 kilogrammes. Le poids du fer est de 70 kilogrammes pour la partie mobile, et de 100 kilogrammes pour la partie fixe. Il n'existe aucun contact à glissement de quelque nature que ce soit, et le moteur reste absolument froid pendant la marche. La différence de vitesse pour la charge nulle et la pleine charge est de 3 p. 100 environ. Le couple mécanique au démarrage dépasse 40 kilogrammètres. Le poids total du moteur est à peu près de 420 kilogrammes et son rendement commercial de 90 p. 100 environ.

Autres moteurs polyphases. — Dans un autre type de moteur triphase construit par la maison Siemens et Halske, les trois courants commencent par passer à travers des bobines sur un anneau extérieur et produisent un champ tournant; ils sont ensuite conduits, par trois balais portant sur un commutateur, à un induit mobile. — Schuckert et C^{ie}, Haselwander, Bradley et Wenström ont également construit des moteurs polyphases.

CLASSE IV. — MOTEURS A CHAMP TOURNANT
A COURANTS DIPHASÉS

Divers moyens permettent de produire un champ tournant sans qu'on soit obligé de recourir à des courants triphasés ou tétraphasés. Il y a déjà un certain nombre d'années, de Fonvielle découvrit qu'un disque de fer monté sur pivots à l'intérieur d'une bobine alimentée par des courants alternatifs se maintenait en mouvement dès qu'on l'avait lancé dans un sens ou dans l'autre.

Ferraris produisit la rotation dans son moteur en reliant une des paires de bobines au circuit d'un courant alternatif ordinaire, tandis que l'autre paire était mise en dérivation sur le circuit, avec insertion d'une bobine de réaction de manière à retarder la phase. — Borel arriva au même résultat en employant des noyaux de fer dans une paire de bobines. — Schallenberger, dans le mécanisme de son compteur, a introduit un très joli principe. Le courant alternatif est amené dans deux grandes bobines qui passent au-dessous et au-dessus du volant de fer mobile. A l'intérieur de ces bobines se trouvent deux autres bobines, entourant également le volant, fermées sur elles-mêmes, et formées de pièces de laiton estampées. Dans ces bobines sont induits des courants secondaires qui diffèrent en phase d'un peu moins d'une demi-période. Mais ces bobines secondaires ne sont pas montées parallèlement aux bobines primaires ; elles sont intentionnellement disposées sous un angle de 40° environ par rapport à elles. On a en conséquence deux courants alternatifs, différant de phase et agissant sous un certain angle. — Dans le compteur Borel-Ferranti on trouve encore un autre principe. Le volant de fer ou de cuivre monté sur pivots est placé entre deux électro-aimants en fer lamellé, munis chacun d'une seule pièce polaire longue et courbe¹. Les branches de cet électro-aimant portent des bobines pour le courant alternatif, tandis que sur leurs prolongations ou becs sont montés des enroulements de cuivre fermés, dans lesquels les flux magnétiques alternatifs développent des courants parasites. Ces courants parasites ont pour effet de s'opposer au changement de magnétisme dans le noyau,

¹ *Electrician*, XXV. 32, 1890.

avec ce résultat qu'ils retardent la propagation du pôle magnétique suivant les noyaux vers les extrémités des becs; ce phénomène se résoud en une succession alternative de pôles nord et sud se mouvant le long des pièces polaires vers leurs extrémités, où ils disparaissent.

MM. Hutin et Leblanc¹ ont proposé un mode de division d'un courant alternatif en deux autres courants alternatifs différant l'un de l'autre en phase, et utilisables dans un moteur à champ tournant. Quand le courant arrive de la ligne au moteur, il trouve un double passage, dans l'une des branches duquel est inséré un condensateur de capacité déterminée, tandis que dans l'autre branche est intercalée une bobine de self-induction. Le premier tend à accélérer² la phase du courant dans la branche où il est placé, tandis que la seconde retarde la phase dans l'autre branche, ce qui produit la différence de phase cherchée.

¹ *La Lumière électrique*, XL. 1891.

² Un condensateur agit comme une self-induction négative et réciproque. Ainsi, tandis qu'une self-induction L tend à produire un retard tel que $\tan \varphi = \omega \frac{L}{R} = \frac{2\pi}{T} \frac{L}{R}$, un condensateur de capacité C tend à produire un retard négatif, c'est-à-dire un décalage tel que $\tan \varphi = -\frac{1}{\omega C R} = -\frac{1}{\frac{2\pi}{T} C R}$. (Voir p. 621.)

[On peut par suite donner à l'expression de l'intensité efficace la forme générale

$$I_{\text{eff}} = \frac{E_{\text{eff}}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

R étant la résistance (ohmique) du circuit, et l'expression entre parenthèses ce qu'on propose d'appeler la *réactance*. S'il n'y a en jeu que de la self-induction, la parenthèse se réduit à ωL (*inductance* des Anglais), et le radical à $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ (ou *impédance*); et, s'il n'y a ni self-induction ni condensateur, l'expression entière prend la forme connue $I = \frac{E}{R}$ (N. d. E.)

CHAPITRE XXV

TRANSFORMATEURS

GÉNÉRALITÉS ET CLASSIFICATION

Pendant ces dernières années on s'est beaucoup occupé de modes de distribution de l'énergie électrique dans lesquels, en vue de réaliser une économie dans le coût des conducteurs métalliques, cette distribution est effectuée sous différence de potentiel ou tension électrique élevée produite à une station centrale et reçue en différents points par des appareils connus sous le nom de *transformateurs*, qui modifient la forme de l'énergie électrique fournie, pour la restituer sous différence de potentiel ou tension électrique moindre.

Pour bien comprendre la portée du problème, il faut se rappeler que la puissance est le produit de deux facteurs, le courant et la pression sous laquelle il est lancé, ou que, suivant notre notation,

$$\mathcal{E} i = \text{puissance électrique (en watts),}$$

\mathcal{E} étant exprimé en volts et i en ampères.

Les grandeurs de ces deux facteurs peuvent varier, mais la valeur de la puissance fournie dépend uniquement de leur produit; ainsi, la puissance fournie par un courant de 10 ampères sous une tension de 2 000 volts a exactement la même valeur que celle fournie par un courant de 400 ampères sous la pression de 50 volts; le produit ou la puissance est dans ces deux cas de 20 000 watts. Mais la perte d'énergie dans une transmission à travers une canalisation bien isolée dépend elle-même de deux facteurs, le courant et la résistance du fil, et, pour un fil donné, elle est dans un même temps proportionnelle au carré du courant. Dans l'exemple ci-dessus, le courant de 400 ampères, transmis par le même fil que celui de 10 ampères, absorberait dans le même

temps, en raison de ce qu'il est quarante fois aussi intense, seize cents fois autant d'énergie transformée en chaleur dans le fil. En d'autres termes, on peut, pour une même perte de puissance, employer au transport du courant de 10 ampères sous 2 000 volts un fil de section 1 600 fois moindre que celle du fil employé à porter le courant de 400 ampères sous 50 volts. Le coût des conducteurs de cuivre formant les lignes de transmission ou de distribution est en conséquence considérablement réduit par l'emploi de hautes tensions à la distribution de courants peu intenses.

Différents genres d'appareils connus se prêtent à la transformation des hautes tensions en basses pressions, savoir :

1. — Les *Batteries secondaires* ou *Accumulateurs*. — On charge en série un grand nombre de ces appareils sous un potentiel élevé ; la série est ensuite divisée et autrement groupée de manière à permettre la décharge sous forme de courants intenses à basse tension. Ce système ne peut s'appliquer qu'avec des courants continus, à l'exclusion des courants alternatifs ; mais il a l'avantage d'emmagasiner de l'énergie en approvisionnement.

2. — Les *Bobines d'induction*, également appelées pour cette application *Générateurs secondaires*, *Transformateurs* ou *Convertisseurs*. — Ce système correspond uniquement à l'emploi de courants alternatifs, qui, transmis sous haute tension dans les conducteurs de distribution et traversant les fils primaires de bobines d'induction, développent dans leurs fils secondaires des courants qui alimentent sous la basse tension désirée les circuits de lampes individuels.

3. — Les *Réceptrices-génératrices* ou *Moteurs-dynamos*. — Ces appareils sont ou bien deux machines distinctes : un moteur construit pour recevoir de faibles courants sous potentiel élevé qui le mettent en mouvement, et une dynamo, entraînée par le moteur et capable de donner naissance à des courants intenses sous basse tension ; ou bien des machines uniques dont l'induit porte un double enroulement, l'un en fil fin qui reçoit les courants envoyés sous haut potentiel, et l'autre en gros fil qui restitue sous bas potentiel les courants allant au circuit extérieur.

4. — Les *Transformateurs-commutateurs*. — Ces appareils sont une variété des précédents ; mais l'induit et les inducteurs y sont également immobiles ; la polarité du circuit magnétique y est modifiée par des commutateurs spéciaux.

5. — Les *Condensateurs*. — Il est théoriquement possible d'employer

des condensateurs pour transformer des courants alternatifs ; mais leur emploi à cet effet n'est pas encore entré dans la pratique.

L'étude des accumulateurs est en dehors du cadre de cet ouvrage, et nous ne ferons qu'effleurer les moteurs-générateurs. Les transformateurs à bobine d'induction pour courants alternatifs constituant une sorte de machine dynamo-électrique, nous ne les envisagerons que sous ce point de vue ; l'espace ne nous permet pas d'étudier les divers systèmes de distribution dans lesquels on les emploie ¹.

NOTES HISTORIQUES SUR LES TRANSFORMATEURS

La première bobine d'induction a été employée par Faraday ² ; elle se composait d'un anneau de fer massif, de 15,25 centimètres de diamètre et de 2,25 centimètres d'épaisseur, garni d'un fil primaire de 22 mètres de long et d'un fil secondaire de 18,25 mètres de long, ces deux fils étant roulés sur deux arcs opposés de l'anneau (fig. 491, n° 1). — De légères modifications y ont été apportées par Masson ³, qui y introduisit comme noyau un faisceau de fils de fer ; par Pohl ⁴, Wright, Callan, Henley ⁵, Dove ⁶, qui ont étudié les propriétés de différents genres de noyaux de fer et les effets résultant de l'emploi de conducteurs métalliques massifs et de tubes ; par Sinsteden ⁷, Magnus ⁸, qui ont également fait des recherches sur les effets de la forme donnée au noyau de fer ; par Stohrer ⁹, qui construisit le type vertical de bobine ; par Ritchie ¹⁰, qui suggéra l'emploi de cloisons et de divisions dans l'enroulement du circuit secondaire, là où une forte isolation était nécessaire ; par Ruhmkorff ¹¹, qui donna à la bobine à étincelles ses proportions et sa disposition classiques ; et par Varley ¹², qui, en 1836, décrivit une forme de bobine d'induction à circuit magnétique lamellé et fermé, ressemblant absolument à certaines formes modernes de transformateurs. — Diverses idées touchant l'emploi des bobines d'induction à la distribution des courants pour l'éclairage électrique ont été

¹ Ces divers genres de transformateurs ont été très heureusement classés par M. Hospitalier, avec sa netteté d'esprit et sa justesse d'expression habituelles, sous les dénominations de « Transformateurs différés » et de « Transformateurs instantanés ». Les Nos 1 et 5 appartiennent à la première classe ; les Nos 2, 3 et 4, à la seconde. L'Auteur n'a à considérer dans cet ouvrage que les seconds. [N. du T.]

² *Experimental Researches*, I, 7, 1831.

³ *Ann. Chim. Phys.*, LXVI, 5, 1837 ; et IV, 129, 1842.

⁴ *Pogg. Ann.*, XXXIV, 185, 500, 1835.

⁵ *Annals of Electricity*, V, 349, 1840 ; VII, 322, 1841.

⁶ *Pogg. Ann.*, XLIX, 72, 1840 ; LVI, 251, 1842.

⁷ *Ibid.*, LXXXV, 465, 1851 ; et XCVI, 366, 1855.

⁸ *Ibid.*, XLVIII, 95, 1839.

⁹ Voir les *Lehrs von der Elektrizität* de Wiedemann, IV, 339.

¹⁰ *Phil. Mag.*, XIV, 239, 480, 1857.

¹¹ *Comptes Rendus*, XXXVI, 649 ; et XXXVII, 801.

¹² Brevet anglais, 3059 de 1856.

suggérées par Jablochhoff¹, qui proposa de placer dans le circuit d'une machine à courants alternatifs, en différents points de ce circuit, les bobines primaires d'un certain nombre de transformateurs, dont les circuits secondaires étaient employés à alimenter des foyers du type de ses « bougies électriques »; et par sir Ch. Bright², qui suggéra de distribuer de même des courants à des lampes-tubes à vide. Jablochhoff, et plus tard Edwards et Normandy³, imaginèrent une construction spéciale de conducteurs en bandes de cuivre, réunies côte à côte, au lieu de fils ronds, sur les bobines. — Des formes plus pratiques de transformateurs ont été introduites par Fuller⁴, et par de Méritens⁵. — En 1881, Hopkinson⁶ proposa d'utiliser la self-induction d'une bobine, à noyau de fer, pour « diminuer » les courants d'un système à courants alternatifs, au lieu d'y introduire une résistance qui consomme de l'énergie. — La même année, MM. Marcel Deprez et J. Carpentier⁷ prirent un brevet très important pour un système de transport économique de l'énergie électrique à l'aide de transformateurs. A la station de départ, les courants alternatifs sous bas potentiel devaient être transformés, par une bobine d'induction, en courants sous haut potentiel, qui pouvaient dès lors être conduits économiquement à distance par des fils conducteurs longs et fins, et, arrivant à destination dans le fil fin de la bobine primaire d'un autre transformateur, y être de nouveau transformés sous bas potentiel convenable pour l'alimentation de lampes ou de moteurs. — En 1882, Gravier⁸ réalisa le moteur-dynamo comme transformateur pour courants continus, idée déjà partiellement mise en avant par sir W. Thomson⁹ et par Gramme¹⁰. Cette conception fut généralisée en 1883 par Cabanellas¹¹, et des systèmes de distribution basés sur le même principe furent proposés par Edison¹² et par Lane-Fox¹³, indépendamment l'un de l'autre. — En 1882, Gaulard et Gibbs¹⁴ remirent au jour l'emploi de la distribution par courants alternatifs au moyen de bobines d'induction. Leur premier brevet propose une bobine du type de Ruhmkorff. Leur second brevet¹⁵ établit que, dans leur invention, le courant alternatif dans le circuit primaire doit être maintenu à intensité constante, tandis qu'on fait varier la force électromotrice, suivant la demande,

¹ Brevet anglais, 1996 de 1877.

² *Ibid.*, 4212 de 1878.

³ *Ibid.*, 4611 de 1878.

⁴ *Ibid.*, 5183 de 1878.

⁵ *Ibid.*, 5257 de 1878.

⁶ *Ibid.*, 3362 de 1881.

⁷ *Ibid.*, 4128 de 1881.

⁸ *Ibid.*, 1211 de 1882.

⁹ *Rep. Brit. Ass.*, 1881.

¹⁰ *Comptes Rendus*, 23 novembre 1874.

¹¹ *La Lumière électrique*, III. 44, et IV. 206, 1883; et Brevet anglais, 2880 de 1885.

¹² Brevets anglais, 3752 et 3949 de 1882; et Brevets américains: 266793, 31 octobre 1882; 278418, 29 mai 1883; et 287516, 30 octobre 1883.

¹³ Brevet anglais, 3692 de 1883.

¹⁴ *Ibid.*, 4362 de 1882; et *La Lumière électrique*, XIV. 40, 156, 1884.

¹⁵ *Ibid.*, 2858 et 3173 de 1884.

dans les circuits secondaires. Ce mode de procéder implique la distribution en série. Dans le courant de la même année, ils remirent à l'ordre du jour la construction de bobines d'induction formées de conducteurs en lames de cuivre reliées bout à bout sur le noyau, sous le nom de « générateurs secondaires ». — En 1883, Kennedy se servit, comme transformateur, d'un anneau Gramme modifié; et en 1885, Deri et Ziperowsky¹ proposèrent l'emploi de transformateurs pour effectuer l'auto-régulation des dynamos à courants alternatifs, et renouvelèrent l'emploi de bobines d'induction à circuits magnétiques lamellés et fermés. — La même année, Ferranti² produisit des transformateurs construits avec des bandes de fer. — Kennedy³ a proposé de faire la distribution sous potentiel constant, méthode qui a été adoptée par Ziperowsky, par Ferranti, puis ultérieurement par Gaulard et Gibbs, et par Westinghouse aux Etats-Unis, et qui est sensiblement auto-régulatrice. — Des perfectionnements de détails de construction ont été apportés par Kapp⁴ et Snell, par Mordey, Westinghouse, et Statler. — Swinburne a prôné l'emploi des transformateurs à circuit ouvert comme entraînant moins de perte d'énergie pour de faibles charges. — Des perfectionnements récents dans les moteurs-générateurs sont dus à Paris et Scott⁵, à R. P. et J. S. Sellon⁶ et à J. Swinburne⁷; ce dernier a imaginé des machines recevant l'énergie d'un circuit alimenté à courant constant et la transformant dans un circuit secondaire fonctionnant sous potentiel constant.

[Quelle que soit la haute valeur historique et scientifique de cette notice, et malgré les revendications plus ou moins intéressées qui se sont produites relativement à la priorité de l'invention des transformateurs, il est juste de reconnaître que leur forme et leur application *industrielles* remontent à Gaulard et Gibbs, de même que la mise en pratique de la dynamo est attribuée à Gramme, et celle de la lampe à incandescence à Edison]. (N. du T.)

TRANSFORMATEURS A COURANTS ALTERNATIFS SYSTÈMES DE DISTRIBUTION

Ces systèmes sont au nombre de deux : — (1) *Distribution sous potentiel constant*, dans laquelle les conducteurs de distribution se subdivisent en autant de branchements qu'il y a de centres locaux à alimenter, des transformateurs placés en chacun de ces centres fournissant aux lampes le courant sous basse tension. Dans ce cas les fils primaires des transformateurs locaux sont des bobines de fil fin d'un

¹ Brevets anglais, 3379 et 5201 de 1885.

² *Ibid.*, 15251 de 1885.

³ *Electrical Review*, XII. 486, 9 juin 1883.

⁴ *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XVII. 96, 1888.

⁵ Brevet anglais, 6260 de 1884.

⁶ *Ibid.*, 3525 de 1885.

⁷ *Ibid.*, 6632 de 1887.

grand nombre de spires et sont tous montés en dérivation entre les conducteurs principaux; les bobines secondaires sont formées d'un petit nombre de spires de gros fil. — (2) *Distribution à courant constant*, dans laquelle un circuit principal unique va du primaire d'un transformateur à celui de son voisin, etc. Alors, comme les fils primaires sont en série, ils sont plus gros et forment un petit nombre de spires. — Le premier de ces systèmes convient à l'éclairage par incandescence; le second, à l'éclairage par arcs.

PRINCIPES GÉNÉRAUX

Un transformateur à courants alternatifs peut, ainsi que nous l'avons dit, être regardé comme une sorte de dynamo, dans laquelle l'induit, aussi bien que les inducteurs, sont immobiles, mais dans laquelle on fait varier l'aimantation du circuit de fer suivant des cycles rapidement répétés d'alternativités, au moyen d'une excitation indépendante à courants alternatifs. La bobine primaire du transformateur correspond à la bobine d'électro-aimant de la dynamo; la bobine secondaire, à la bobine d'induit de cette même machine.

Un grand nombre des règles de construction concernant les dynamos s'appliquent aussi exactement à la construction des transformateurs; telles sont celles relatives à l'isolement, à la division des noyaux de fer, et autres analogues. Dans tous les cas où l'on fait usage de transformateurs avec de très hauts potentiels, il faut apporter le plus grand soin à l'isolement complet et effectif de tout le fil (y compris les connexions) des bobines de haut voltage; ce fil ne doit sous aucun prétexte être roulé en couches alternées avec les spires du circuit à basse tension, pas plus que les deux fils ne doivent être toronnés en un seul câble; tout en enveloppant convenablement le noyau de fer, le fil de haute tension doit être non seulement aussi parfaitement isolé, mais encore aussi complètement séparé que possible du fil de basse tension et de toute autre œuvre métallique du transformateur.

Dans les transformateurs à courants alternatifs, quel que soit leur nom, le rôle du noyau de fer est de faire passer le flux de force magnétique (créé par le courant dans la bobine primaire) à travers les spires de la bobine secondaire. La variation du flux d'induction dû au circuit primaire à travers le circuit secondaire est la mesure de la force électromotrice créée dans ce circuit secondaire. Pour être en mesure de calculer cette variation du flux ou le taux d'intersection des lignes de force

correspondant à diverses intensités du courant primaire et à divers taux d'alternativités, il convient de connaître la variation du flux quand on lance ou qu'on cesse de faire passer une unité de courant dans les bobines primaires. Soit L_m le symbole employé pour cette quantité. Elle sera proportionnelle au nombre des spires de la bobine secondaire, attendu que chaque spire entoure le noyau de fer et coupe le flux de force; elle sera également proportionnelle au nombre des spires de la bobine primaire, parce que, toutes choses égales d'ailleurs, le magnétisme induit dans le noyau de fer est proportionnel aux ampères-tours qui l'excitent; elle sera enfin proportionnelle, pour chaque degré d'aimantation, à la perméabilité du noyau de fer.

On peut, en fait, calculer L_m d'après les principes magnétiques posés au Chapitre VI. — Supposons que le noyau de fer forme un circuit fermé de longueur l (cm), de section S (cm²), et de perméabilité μ , et désignons par N_1 et N_2 les nombres respectifs de spires des bobines primaire et secondaire. Dès lors, si le courant primaire est de 1 unité C. G. S., la force magnétomotrice qui en résultera sera $4\pi N_1$ et la résistance magnétique correspondante sera $\frac{l}{\mu S}$. En divisant la première de ces deux quantités par la seconde, on aura une expression du flux de force dans le noyau, et, en la multipliant par N_2 , on obtiendra la variation du flux dans le circuit secondaire; d'où, algébriquement,

$$L_m = 4\pi N_1 N_2 \frac{\mu S}{l}.$$

Cette quantité a reçu le nom de *coefficient d'induction mutuelle*. Si le courant dans le circuit primaire a la valeur i_1 (en unités C. G. S.), la variation du flux dans le secondaire, quand on appliquera ou qu'on fera cesser ce courant, sera $L_m i_1$. Et, si l'on connaît le taux d'accroissement et de décroissance du courant primaire à un instant quelconque, en le multipliant par L_m , on aura la force électromotrice développée à cet instant dans le circuit secondaire. Mais il est évidemment avantageux que, pour un transformateur, cette quantité soit aussi grande que possible, car il est désirable d'obtenir la force électromotrice voulue dans le secondaire avec le plus faible courant possible dans le primaire. Il y a cependant un petit conflit entre les conditions à réaliser: N_2 ne doit pas être considérable, en raison de la résistance interne et du prix de cuivre qu'il comporte; et il est clair qu'un circuit magnétique compact, pour lequel l sera petit, S grand, et le fer de bonne qualité, sera avantageux.

Dans le cas particulier (pour un fonctionnement en série) où les fils primaire et secondaire doivent porter des courants égaux, il est clair que, pour un poids total donné de cuivre, le produit $N_1 N_2$ atteindra son maximum quand les bobines auront des nombres de spires, et, par suite, des poids de cuivre égaux. Dans d'autres cas, pourvu que le diamètre des fils soit proportionnel aux courants qu'ils doivent porter, et qu'il puisse se développer des quantités de chaleur égales dans chaque bobine, l'égalité des poids de cuivre sera encore une bonne règle, bien que les nombres de spires sur les deux bobines diffèrent considérablement l'un de l'autre. On a supposé qu'il n'y avait pas de dérivations magnétiques, c'est-à-dire que tout le flux de force créé dans le noyau pénétrait dans les bobines secondaires. Cette hypothèse est très sensiblement réalisée pour les transformateurs dans lesquels le circuit magnétique est effectivement fermé sur lui-même.

L'autre point important est que le flux de force magnétique créé dans le noyau par le courant primaire passe par les spires de la bobine primaire elle-même, et qu'il y ait, par suite, dans la bobine primaire des forces électromotrices de self-induction, tendant à s'opposer aux variations de courant résultantes. Des considérations tout à fait analogues aux précédentes montrent qu'il y aura un *coefficient de self-induction*, que nous appellerons L_1 , représentant la variation, dans les spires primaires, du flux de force créé dans la bobine, quand celle-ci sera traversée par une unité de courant; et l'on peut calculer, comme précédemment, suivant les principes magnétiques, la valeur de ce coefficient qu'on trouvera être

$$L_1 = 4 \pi N_1^2 \frac{\mu S}{l}.$$

Cette expression montre que la grandeur de L_1 sera proportionnelle à la qualité du circuit magnétique; et comme (tel est le cas dans les transformateurs pour distribution sous tension constante) N_1 est lui-même très grand, L_1 sera extrêmement considérable. Ainsi qu'on va le voir, ce fait est de la plus haute importance au point de vue de l'action automatique des transformateurs.

Les forces électromotrices induites (par les variations de l'aimantation du noyau) dans le circuit secondaire ne produiront, naturellement, aucun courant si ce circuit secondaire est ouvert; mais, si le circuit secondaire est fermé, il y aura production de courants dont l'intensité dépendra à la fois des résistances et des forces contre-électromotrices (s'il y en a) dans ce circuit. Mais ces courants secondaires, en circulant

dans les spires de la bobine secondaire, exercent une action magnétisante (ou plutôt démagnétisante), dont l'effet sur le noyau dépendra non pas simplement de leur intensité, mais aussi de leur phase. Quand le transformateur travaille à pleine charge, le courant secondaire s'élève dans le sens positif, presque exactement comme le primaire s'élève dans le sens négatif, leurs phases étant presque exactement en opposition ; c'est-à-dire que, à pleine charge, le courant secondaire exercera une grande action démagnétisante. La force magnétisante totale¹ en fonctionnement est égale à $4 \pi (N_1 i_1 + N_2 i_2) 10^{-1}$, expression dans laquelle les signes convenables + et - doivent être donnés à i_1 et à i_2 suivant le sens dans lequel ces courants circulent autour du noyau. En outre, il y aura dans le circuit secondaire un coefficient de self-induction L_2 tel que

$$L_2 = 4 \pi N_2^2 \frac{\mu S}{l}.$$

Comme on le verra plus loin, il existe entre les circuits primaire et secondaire une action réciproque, due à l'induction mutuelle et qui tend à neutraliser les effets de self-induction dans les deux circuits.

Dans un transformateur bien construit il est clair que

$$L_m = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Si, cependant, tout le flux magnétique dû à l'un des circuits n'est pas embrassé par l'autre, L_m aura une valeur moindre que ne l'indique la relation ci-dessus.

On peut aisément établir d'une façon suffisamment exacte pour les besoins ordinaires la relation entre les deux forces électromotrices et les deux enroulements en disant que le rapport des deux forces électromotrices est égal à celui des enroulements, ou que

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = c.$$

Nous appellerons *coefficient de transformation* le nombre c qui représente le rapport des enroulements.

En supposant des poids égaux de cuivre sur les bobines primaire et secondaire, on aura entre les deux circuits les relations suivantes :

¹ Voir p. 171.

ÉLÉMENTS D'UN TRANSFORMATEUR	CIRCUITS		RAPPORT
	PRIMAIRE	SECONDAIRE	
Enroulements	N_1	N_2	c
Résistance	r_1	r_2	c^2
Self-induction	L_1	L_2	c^2
Force électromotrice	E_1	E_2	c
Courant	i_1	i_2	c^{-1}
Perte en échauffement	$i_1^2 r_1$	$i_2^2 r_2$	1

Ainsi

$$L_m = \frac{L_1}{c} = c L_2.$$

Il ne faut pas oublier que le symbole E est employé ci-dessus comme expression de la force électromotrice efficace, ou la racine carrée de la moyenne des carrés de la force électromotrice alternative ; la valeur réelle de E à un instant quelconque étant représentée par l'expression $E_t = D \sin \frac{2\pi}{T} t = E_{max.} \sin \omega t$, dans laquelle $D = E_{max.}$ est la valeur maximum à laquelle arrive E , soit $\frac{2\pi}{T} N \Phi$ (voir p. 611), et $\frac{1}{T}$ est le nombre de périodes par seconde. De plus, pour les courants alternatifs (voir p. 613), la loi d'Ohm doit revêtir la forme suivante :

$$i = \frac{E_{max.} \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

On est maintenant en mesure de trouver une expression plus exacte de la force électromotrice induite dans le circuit secondaire. Le flux de force magnétique induit par le circuit primaire dans le noyau (quand aucun courant ne passe dans le secondaire) est en effet Li ; et par suite

$$E_2 = -L_m \frac{di}{dt} = L_m \frac{\frac{2\pi}{T} E_{max.} \sin\left(\frac{2\pi}{T} t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{r_1^2 + \frac{4\pi^2}{T^2} L_1^2}} ;$$

ou, puisque $\frac{2\pi}{T} = \omega$, et en négligeant la phase et ne considérant que la grandeur de E ,

$$E_2 = \frac{\omega L_m}{\sqrt{r_1^2 + \omega^2 L_1^2}} E_1 ;$$

et, en posant

$$\frac{\omega L_m}{\sqrt{r_1^2 + \omega^2 L_1^2}} = k,$$

$$E_2 = k E_1.$$

En examinant l'expression de k , on voit que, si r_1 est petit comparativement à ωL_1 , comme dans le cas où la fréquence est très grande et où il y a beaucoup de fer dans le noyau, k est égal à $\frac{m L_2}{L_1}$, c'est-à-dire qu'il est la *réci-proque* de c , et égal à $\frac{N_2}{N_1}$.

En laissant de côté les différences de phase dans le raisonnement précédent, il ne faut pas s'imaginer que ces différences de phase soient faibles, elles peuvent, au contraire, être très grandes. Si, cependant, étant admis que E_1 est une fonction sinusoïdale, on se rappelle que la valeur moyenne du carré du sinus (entre 0° et 360°) est égale à $\frac{1}{2}$, on aura pour les volts primaires efficaces E_1 égal à E_{max} divisé par $\sqrt{2}$. C'est dans ce sens (c'est-à-dire en prenant la racine carrée du carré moyen comme base de comparaison) que l'on peut dire que E_2 est à E_1 dans le même rapport que N_2 est à N_1 , ou que le rapport des volts primaires aux volts secondaires est égal au rapport des enroulements primaire et secondaire. Si les deux enroulements sont convenablement faits sur le noyau, de sorte qu'il n'y ait pas de dérivation magnétique, les variations d'aimantation du noyau développeront dans les deux enroulements des forces électromotrices exactement proportionnelles aux nombres respectifs de leurs spires. Dans l'enroulement primaire, cette force électromotrice s'opposera à celle qui est fournie de l'extérieur. Si, conformément à la notation employée pour les moteurs, on appelle \mathcal{E}_1 les volts fournis aux bornes primaires, \mathcal{E}_1 sera plus grand que E_1 d'une quantité dépendant de la résistance intérieure du circuit primaire et du courant qui y circule. De même, les volts e_2 aux bornes secondaires seront inférieurs à E_2 d'une quantité dépendant de la résistance intérieure de l'enroulement et du courant secondaires. En tout cas, la puissance fournie par le secondaire sera très sensiblement égale à celle absorbée par le primaire ; la différence sera la perte due à la production de courants parasites, et la puissance dépensée pour faire traverser à l'aimantation résiduelle du fer les cycles répétés des périodes. Si $\mathcal{E}_1 i_1$ sont les watts impartis au primaire, et $e_2 i_2$ ceux fournis par le secondaire, on trouve que $e_2 i_2$ peut atteindre jusqu'à 97 p. 100 de $\mathcal{E}_1 i_1$. Un courant de 10 ampères sous 2 000 volts fourni

à un bon transformateur, dont le primaire comporte vingt fois autant de spires que sa bobine secondaire, sera très approximativement transformé par le secondaire en un courant de 200 ampères¹ sous 100 volts.

Un des points les plus difficiles à comprendre pour les commençants dans l'action des transformateurs est la manière dont, employés dans une distribution en dérivation, ils règlent d'eux-mêmes l'intensité du courant primaire qu'ils reçoivent des conducteurs principaux. Supposons qu'un transformateur, dont la bobine primaire comprend un grand nombre de spires de fil fin, reçoive des conducteurs principaux un courant de 1 ampère sous 2 000 volts par exemple, et qu'il soit muni d'une bobine secondaire capable de fournir 20 ampères sous 100 volts. Il alimenterait 40 lampes prenant chacune 1/2 ampère. Quand toutes les lampes sont en fonction, les 20 ampères passent dans le secondaire et il passe un ampère dans le primaire. Si ensuite on supprime la moitié des lampes, le secondaire ne fournit que 10 ampères, et les conducteurs principaux n'ont qu'un demi-ampère à fournir au primaire. Dans ces conditions le courant arrivant au primaire diminue en fait automatiquement dans la proportion voulue. Si l'on éteint les lampes une à une dans le circuit secondaire, le courant primaire diminue aussi peu à peu ; quand toutes les lampes sont hors circuit et que le secondaire se trouve ainsi complètement ouvert, on constate que le courant primaire a de lui-même tout à fait cessé, bien que les conducteurs principaux soient encore alimentés à pleine pression. On n'a aucunement agi sur le circuit primaire ; il offre toujours une excellente voie qui pourrait livrer passage au courant ; aucune résistance n'y a été introduite ; et cependant il n'y circule aucun courant. La cause de ce phénomène réside dans la réaction inductrice du noyau de fer. En circulant autour du noyau, les ondes du courant primaire développent des aimantations périodiques dans le fer ; mais les fluctuations périodiques de magnétisme du fer donnent nécessairement naissance à des forces électromotrices dans les bobines qui l'entourent. Si, dans un intervalle de temps élémentaire dt , le changement produit dans le flux de force magnétique pénétrant le noyau est $d\Phi$, la force électromotrice induite pendant ce court intervalle de temps dans un fil

¹ Les commençants doivent se rappeler que tout gain en intensité de courant est compensé par une diminution dans la force électromotrice ; autrement il n'y aurait pas égalité de puissance. — Un fait curieux à noter dans l'histoire des inventions est que, en 1883, l'Office des Brevets aux Etats-Unis refusa à M. Bernstein un brevet de transformateur en se basant sur ce qu'il n'était pas possible qu'il obtint du secondaire un courant plus intense que celui fourni au primaire. Le même Office de Brevets a néanmoins accordé en 1886 à Gaulard et Gibbs un brevet exactement pour le même objet.

formant N spires autour du noyau sera égale à $\frac{d\Phi}{dt}$ en unités C. G. S., ou à $\frac{d\Phi}{dt} 10^{-8}$ en volts. La force électromotrice dans la bobine secondaire sera $N_2 \frac{d\Phi}{dt}$; et il y aura naturellement aussi une autre force électromotrice induite dans le primaire, égale à $N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ en unités C. G. S. C'est cette force contre-électromotrice de self-induction dans le primaire qui empêche les courants des conducteurs principaux d'y pénétrer quand le circuit secondaire est ouvert. La variation de magnétisme dans le noyau tend toujours à développer des forces électromotrices qui s'opposent à tout changement. Elle agit dans ce sens de deux façons : s'il n'y pas de circuit secondaire, elle développe dans le primaire des forces électromotrices inverses qui empêchent le courant d'y pénétrer ; s'il existe un circuit secondaire fermé, elle y développe des courants de sens contraires à ceux du primaire.

Examinons ce qui se passe quand il n'y a pas de lampes en circuit : le circuit secondaire est complètement inerte et ne prend aucune part à l'action. La force électromotrice alternative des conducteurs principaux développe dans la bobine primaire des courants alternatifs qui, à leur tour, développent dans le noyau une aimantation alternative, et celle-ci induit finalement dans le circuit primaire des forces électromotrices alternatives qui tendent à arrêter les courants primaires. Plus la variation d'aimantation du noyau est grande, plus la force électromotrice induite est considérable.

Voyons maintenant ce qui se passe quand les lampes sont en circuit. Le secondaire est parcouru par des courants intenses, toujours presque exactement opposés en phase [décalés d'une demi-période] avec les primaires. Quand le courant primaire augmente, le courant secondaire augmente négativement, c'est-à-dire en circulant autour du noyau en sens inverse du courant primaire. La tendance magnétisante est naturellement proportionnelle à la différence entre les ampères-tours du primaire et ceux du secondaire. (Elle est, comme on l'a vu précédemment, égale à $4\pi(N_1 i_1 - N_2 i_2) 10^{-4}$, sauf les signes convenables à attribuer aux courants selon leurs sens). Si, conformément au cas ordinaire, on maintient à peu près constants les volts secondaires, il en résulte que les cycles d'aimantation, et par suite les forces magnétisantes nettes, sont à peu près les mêmes pour toutes les charges. Il semblerait en conséquence que la force électromotrice inverse tendant à s'opposer au courant primaire dût être la même pour toutes les charges ; il n'en est cependant pas ainsi, comme on sait. Il faut en chercher

l'explication dans les relations de phases : en effet, pour de faibles charges, la force contre-électromotrice dans le primaire est presque exactement opposée en phase à la force électromotrice primaire développée, tandis que, à pleine charge, elle est sensiblement en quadrature [décalée d'un quart de période] avec cette dernière. En d'autres termes, quand on met des lampes sur le secondaire et qu'il passe plus de courant secondaire, l'augmentation d'induction mutuelle qui en résulte atténue virtuellement la self-induction dans le circuit primaire, et les forces contre-électromotrices utiles dans la bobine primaire, qui dans le premier cas allaient à l'encontre du courant envoyé par les conducteurs principaux, sont moindres; il en résulte qu'il passe plus de courant dans le primaire.

Des constructions graphiques illustrant les variations de phase et la grandeur des forces électromotrices et des courants ont été données par Kapp, Blakesley, et Fleming. Si la force électromotrice développée \mathcal{E}_1 est constante, l'aimantation est naturellement portée à son degré le plus élevé quand le transformateur fonctionne à circuit ouvert. Si cependant le système est réglé ou surcompoundé de manière à maintenir une pression constante aux lampes, l'aimantation des noyaux est maximum à pleine charge. Il est bon de s'arranger de façon à avoir assez de fer dans le noyau pour que l'induction n'ait jamais besoin d'y être portée au-dessus de 6 000 à 7 000 unités C. G. S. Il est possible de fonctionner au-dessus de ces valeurs; mais alors le transformateur « chante » et le fer s'échauffe. De l'énergie est naturellement dépensée à porter le fer à un haut degré d'aimantation. La plus grande partie de ce travail est renvoyée au circuit secondaire pendant la portion suivante du cycle correspondant à la diminution d'aimantation du fer; mais une partie de cette énergie, et notamment celle dépensée à produire la portion soi-disant permanente de l'aimantation, est perdue; elle est dissipée sous forme de chaleur. Quant aux phases des diverses ondes, comme on l'a vu ci-dessus, le courant secondaire est toujours en opposition presque exacte de phase avec le courant primaire; et la force électromotrice secondaire est en opposition de phase presque exacte avec la force électromotrice primaire. Mais la différence de phase entre E_1 et i_1 varie notablement avec le travail effectué. Quand il n'y a pas de lampes en circuit et pas de courant secondaire, i_1 est faible et décalé sur E_1 très sensiblement d'un quart de période; quand on met des lampes en circuit et que i_2 croît, i_1 croît également; et le décalage entre E_1 et i_1 augmente moins. La phase d'aimantation du noyau (qui est toujours nécessairement en avance d'un quart de période

sur la phase de E_2 , est toujours très sensiblement décalée d'un quart de période en arrière de celle de E_1 .

Le mode réel de fonctionnement des transformateurs a été soigneu-

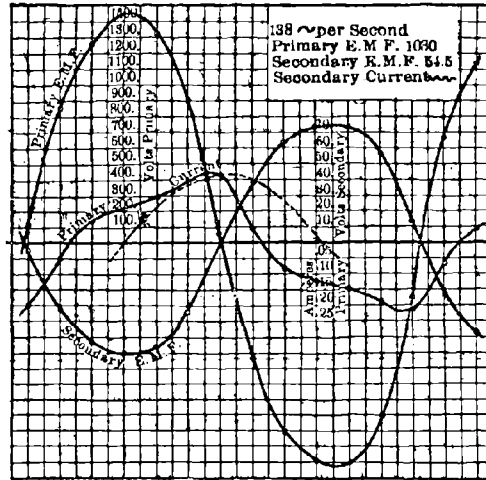


Fig. 488. — Courbes de transformateur en circuit ouvert.

~ per Second = Périodes par seconde.

Primary E. M. F. = F. é. m. primaire.

Secondary E. M. F. = F. é. m. secondaire.

Primary ou Secondary Current = Courant primaire ou secondaire.

sément étudié par le professeur H. J. Ryan², qui a réuni en courbes les formes et les phases des diverses quantités variables. Le transformateur employé était un petit type de 600 watts de capacité, construit pour ramener 1 000 volts à 50 volts ; les nombres de spires étaient de 675 sur la bobine primaire, et de 35 sur la secondaire. Le volume de fer lamellé était d'environ 2 050 centimètres cubes. La longueur moyenne du circuit magnétique était de 30,8 centimètres, et sa section moyenne, de 63,3 centimètres carrés ; la fréquence employée était de 138 périodes par seconde. Les résultats de son étude sont indiqués par les

¹ Voir les expériences du Major Cardew dans l'*Electrical Engineer*, p. 358, juillet 1887.

² *Amer. Inst. Electrical Engineers*, 1889 et 1890. Voir également l'*Electrical World*, XIV. 419, 28 décembre 1889, et XVI. 10, 25 juillet 1890 ; ainsi que *The Electrician*, XXIV. 263, et XXV. 313, 1890 ; *La Lumière électrique*, XXXV. 233, 1890. Voir également un Mémoire complémentaire de MM. Humphrey et Powell dans l'*Electrical World*, XVI. 11, 1890, et dans *The Electrician*, XXV. 280, 1890.

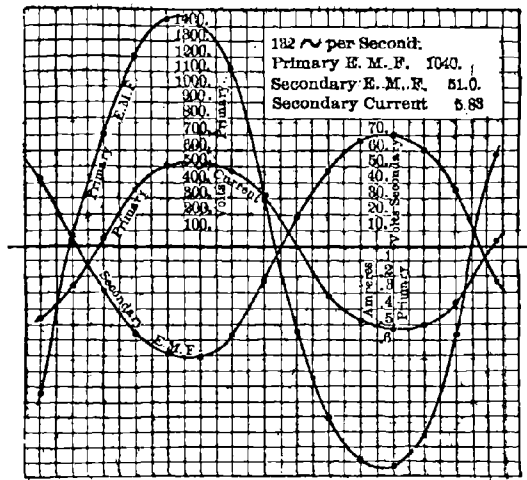


Fig. 489. — Courbes de transformateur à demi-charge.

\sim per Second = Périodes par seconde.

Primary E. M. F. = F. é. m. primaire.

Secondary E. M. F. = F. é. m. secondaire.

Primary ou Secondary Current = Courant primaire ou secondaire.

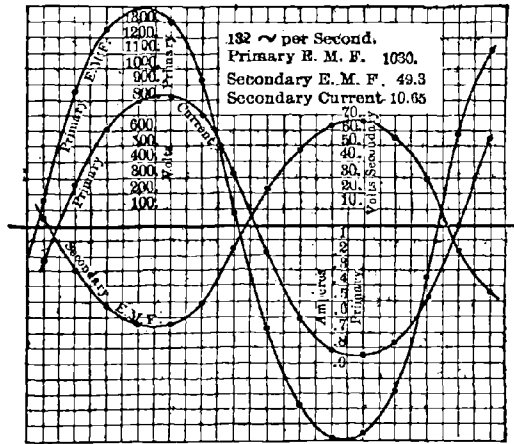


Fig. 490. — Courbes de transformateur à pleine charge.

\sim per Second = Périodes par seconde.

Primary E. M. F. = F. é. m. primaire.

Secondary E. M. F. = F. é. m. secondaire.

Primary ou Secondary Current = Courant primaire ou secondaire.

figures 488, 489 et 490. Bien que la courbe de courant primaire diffère

considérablement d'une courbe de sinus (notamment pour de faibles charges), on remarquera que la courbe des volts secondaires se rapproche beaucoup plus d'une sinusoïde; et elle est toujours en opposition presque exacte de phase avec celle des volts primaires. Le travail de Ryan renferme un grand nombre de remarques intéressantes, dont la moins importante n'est pas un passage dans lequel il fait ressortir qu'une dérivation de magnétisme non seulement diminue l'induction mutuelle, mais encore augmente la self-induction de chaque circuit, et tend par suite à déterminer un décalage dans les deux courants. Dans un second mémoire, le professeur Ryan montre que la perte d'énergie par courants parasites dans le noyau est moindre quand ce noyau est chaud que quand il est froid.

CONSTRUCTION

Tous les transformateurs sont constitués par un noyau de fer autour duquel les bobines primaire et secondaire sont enroulées de telle sorte que le noyau fasse passer le flux magnétique de l'un des systèmes de bobines à travers l'autre. — La première bobine d'induction de Faraday, n° 1 dans la figure 491, est absolument le type du principe commun de tous les transformateurs. Dans l'anneau réel de Faraday le fer n'était pas divisé. — Le n° 2 de la figure 491 est le type cylindrique de la bobine d'induction introduite par Masson et Ritchie, et perfectionnée par Ruhmkorff en vue de la production d'étincelles. — Le n° 3 représente la forme donnée par Varley au transformateur pour applications télégraphiques. Le noyau en fils de fer a reçu une grande longueur et les bouts de ces fils sont renversés de manière à constituer pratiquement un circuit magnétique fermé. — Le transformateur de Ferranti lui ressemble; mais son noyau est formé de bandes étroites de feuillard. — Gaulard et Gibbs ont utilisé la même forme dans ces derniers temps. — Le n° 4 est une forme introduite par Zipernowsky; les bobines primaire et secondaire y sont superposées, et le noyau de fer y est constitué par du fil bobiné par-dessus et rentrant à l'intérieur, de sorte que tout le cuivre s'y trouve enveloppé par le fer. Dans la gravure du n° 4, la partie antérieure est supposée enlevée de manière à laisser voir l'intérieur. M. Kapp a proposé le nom de « transformateurs en coquille » pour ce type d'appareils afin de le distinguer de ceux dont le noyau intérieur est simplement droit et sans rebroussement. —

Le n° 5, dont la forme est également due à Ziperowsky, est d'une construction analogue à celle de l'anneau Gramme. C'est un noyau annulaire en fil de fer, sur lequel sont roulées par sections les bobines de cuivre; ces sections sont alternativement reliées deux à deux et forment deux systèmes indépendants constituant l'un le primaire et l'autre le secondaire. Dans la gravure, l'une des dix sections est supposée enlevée de manière à montrer le noyau.

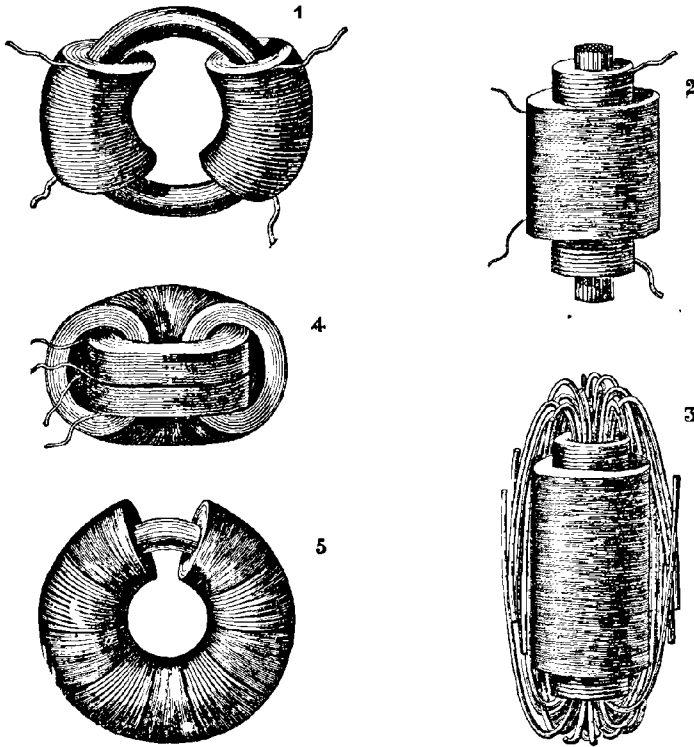


Fig. 491.

Divers types de transformateurs à courants alternatifs.

Les n°s 6, 7 et 8 de la figure 492 représentent trois modes de construction tout à fait analogues les uns aux autres et permettant l'emploi indispensable du fer en lames; les éléments en fer de ces trois types sont estampés dans des feuilles de tôle. On n'y voit pas les bobines de cuivre, mais elles consistent pour chacun d'eux en deux jeux de bobines, préalablement enroulés sur des mandrins rectangulaires dont

la forme en permet l'introduction sur les noyaux de fer. — Le n° 6, qui donne le mode de construction de Kapp et Snell (fig. 492), comporte deux séries de feuilles de tôle estampées en forme d'U, placées côte à côte, et formant deux canaux parallèles destinés à recevoir les bobines. Les portions tombées au découpage pour donner

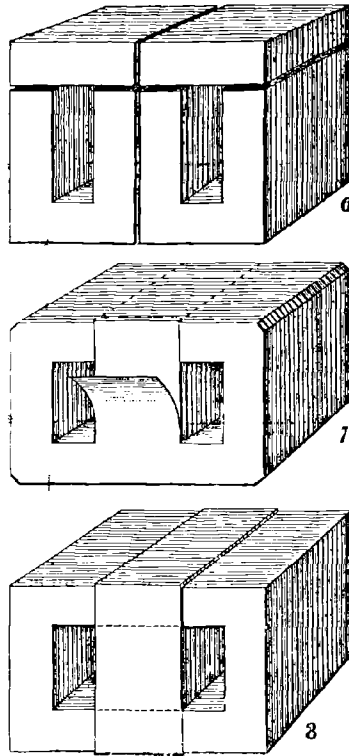


Fig. 492. — Formes de noyaux de transformateurs.

au fer la forme d'U servent à compléter les circuits magnétiques au-dessus des bobines. Elles forment en quelque sorte les couvercles des rainures pratiquées dans la tôle. — Le n° 7 est la forme adoptée par Westinghouse. Dans ce type, la tôle estampée doit être relevée de manière à permettre son insertion par-dessus les bobines, le noyau se montant feuille à feuille sur les bobines faites. — Dans la forme de Mordey, n° 8, le morceau de tôle qui tombe de l'intérieur de la pièce rectangulaire estampée se monte en croix avec la partie évidée (après avoir été recouvert d'un côté avec du papier comme isolant); les rec-

tangles extérieurs sont placés extérieurement aux bobines, et les pièces tombées glissées entre eux; ce mode de construction économise la matière et assure un bon circuit magnétique avec ample ventilation. La figure 493 montre les proportions exactes des parties tombantes et réservées dans l'estampage pour le transformateur Mordey, avec une section des bobines.

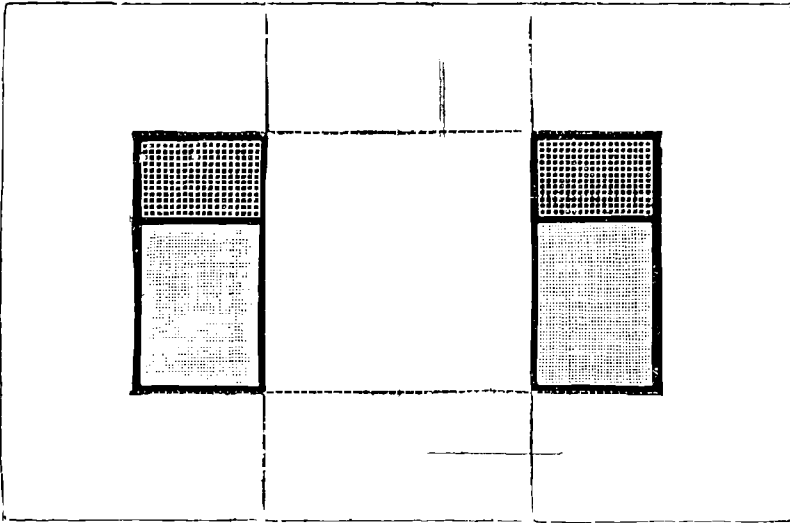


Fig. 493. — Transformateur Mordey (Coupe en travers).

La forme la plus récente de cet appareil, qui est construit par la Compagnie « Brush (Anglo-Américaine) », est représentée ci-après, figures 494 et 495.

A titre d'exemple, voici les dimensions d'un transformateur capable de transformer un courant de 1,5 ampère sous 1 000 volts en un courant de 37,5 ampères sous 40 volts. — Dimensions extérieures totales, $50,8 \times 13,25 \times 10,15$ cm; $N_1 = 300$; $N_2 = 12$; $r_1 = 10$ ohms; $r_2 = 0,014$ ohm; diamètre du fit primaire, 0,890 millimètre; bobine secondaire formée de 25 fils en parallèle, de 3,05 millimètres de diamètre; poids de cuivre dans les bobines, environ 2,268 kilogrammes dans la primaire, et 2,494 kilogrammes dans la secondaire; poids du fer employé, 22,680 kilogrammes environ; rendement 97,2 p. 100.

Dans ce modèle, les bobines P et S sont enroulées sur un cadre léger de bois dur imprégné d'ozokérite. Les lames du noyau B sont faites, en partie, de pièces découpées, analogues à celles de la figure 493, intercalées les unes dans les autres, et, en partie, d'autres pièces

découpées remplissant les interstices qui autrement resteraient entre les premières pièces superposées. Grâce à cette disposition, la dérivation magnétique est réduite à un minimum négligeable. Le tout

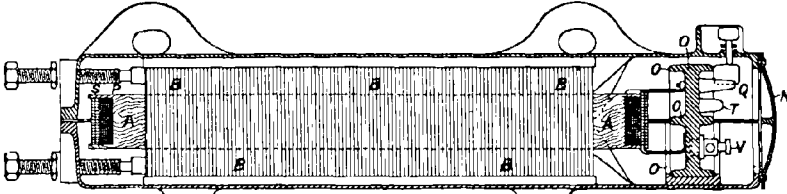


Fig. 494. — Transformateur Mordey (Coupe en long).

est maintenu par une enveloppe de fonte rendue étanche au moyen d'une protection en caoutchouc. Les connexions, l'interrupteur et les plombs de sûreté sont montés sur un bloc de porcelaine O, dans une chambre réservée à l'extrémité de la cage en fonte.

La figure 496 montre le transformateur dit « hérisson » de Swinburne¹; son noyau est formé d'un faisceau de fils de fer qui, après avoir reçu les bobines de cuivre, sont rabattus et répartis sur la surface extérieure, de manière à réduire la résistance magnétique, qui dans tous les cas est considérable, le circuit magnétique étant ouvert.

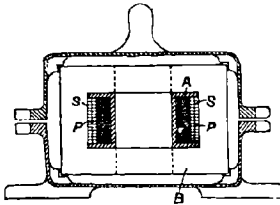


Fig. 495. — Transformateur Mordey (Coupe en travers).

Le transformateur Ferranti (fig. 497), destiné à fonctionner avec des voltages extrêmement élevés, a un noyau formé d'un grand nombre de minces bandes de fer, qui passent verticalement au milieu des bobines de cuivre, et sont repliées de chaque côté, par-dessus et par-dessous, en chevauchant les unes sur les autres, de manière à compléter le circuit magnétique. Les bobines sont faites de lames de cuivre, très soigneusement isolées et groupées en sections au moyen d'une substance

¹ *Journal Inst. Electr. Engineers*, XX. 183, 1891.

isolante. Ces bobines sont au nombre de trois : la plus interne constitue une partie de la bobine primaire, recouverte par la secondaire, extérieurement à laquelle se trouve le reste de la bobine primaire. Des feuilles d'ébonite sont interposées dans les intervalles qui séparent ces bobines, de manière à empêcher la production d'étincelles entre les bobines sous haut voltage. Des chambres de ventilations ont également réservées pour le passage de l'air dans les espaces verticaux ménagés par les feuilles d'ébonite qui enveloppent les trois piles de bobines.



Fig. 496.
Transformateur « Hérisson »
de Swinburne.

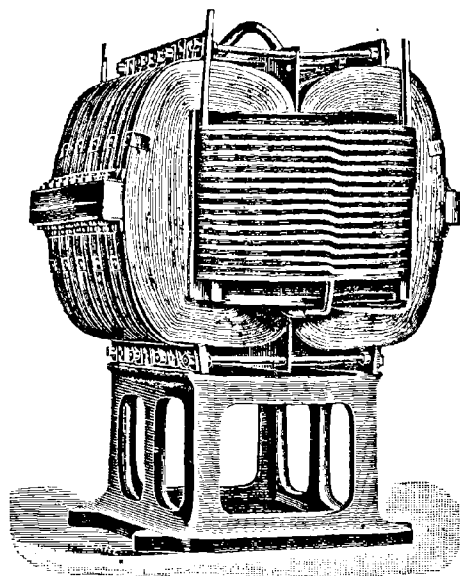


Fig. 497. — Transformateur Ferranti.

La plupart des modes de construction qui précèdent ne permettent pas d'enlever facilement les bobines du transformateur, en raison de leur enchevêtrement avec les parties en fer. — M. C. E. L. Brown a adopté un mode de construction plus facilement démontable, dans lequel les bobines sont roulées sur un tube cylindrique de substance isolante. Ce tube peut recevoir intérieurement un noyau composé de lames de fer de différentes largeurs qui le remplissent presque complètement et se replient à angles droits à ses extrémités. Le circuit magnétique est complété à l'aide de pièces de fer estampées en forme d'U, réunies en deux groupes, qu'on place l'une au-dessous, l'autre au-dessus, et qui peuvent s'enlever en bloc de manière à permettre d'atteindre les bobines. Ces transformateurs sont immergés dans de l'huile de pétrole.

Une autre construction permettant également un facile accès des bobines est celle conçue par M. Kapp. Ici, les bobines primaire et secondaire sont roulées sur des carcasses d'ébonite, qui se glissent sur un long noyau rectangulaire formé de lames de fer. D'autres assemblages de lames de noyau d'égale longueur disposées parallèlement au noyau, au-dessus et au-dessous, complètent le circuit magnétique avec quatre blocs de petites pièces découpées et réunies ensemble qui remplissent les quatre espaces aux extrémités. Le tout est monté dans un bâti solide et protégé par un couvercle extérieur en fonte fixé par des boulons.

Les transformateurs à circuit magnétique fermé présentent des avantages de divers ordres sur ceux dont le circuit magnétique est ouvert : ils exigent notamment un moindre courant d'excitation à cycle magnétique égal, de sorte qu'il y a moins d'énergie perdue dans le cuivre, et particulièrement pour de faibles charges. D'autre part, dans les transformateurs à circuit ouvert, par suite de l'action auto-démagnétisante des noyaux de fer non fermés, il y a moins de perte d'énergie par hystérésis dans le fer. M. Swinburne¹ a très énergiquement insisté sur ce point.

M. Ferranti a fait à cet égard des expériences pleines d'utiles enseignements. Un certain nombre de bandes de fer étaient placées côte à côte et recouvertes d'une bobine, les extrémités des bandes dépassant de beaucoup la bobine. Ce montage était employé comme bobine de self-induction ou d'atténuation de courant, à 100 volts, avec une fréquence de 66 périodes par seconde. Le nombre de watts dépensés par le courant servait de mesure à la puissance nécessaire pour faire passer le fer par le cycle magnétique contre-balançant les volts développés. Quand les bandes étaient simplement droites, on trouvait un courant de 22 ampères, qui donnait une puissance apparente de 2 200 watts ; mais, comme l'angle de décalage était d'environ $86^{\circ} 30'$, le véritable nombre de watts n'était que de 135,5. Les extrémités des bandes de fer étaient ensuite rabattues de manière à reproduire la disposition du « hérisson », et l'on arrivait à ce résultat que, pour faire passer le fer par le même cycle magnétique que précédemment (ou par un cycle légèrement plus grand), il ne fallait que 10,75 ampères, avec une dépense apparente de 1 075 watts et réelle de 116,9 watts. Finalement, quand les bouts des bandes étaient tout à

¹ *Proc. British Association*, 1889 (voir *The Electrician*). Voir également une série importante d'articles de M. Sydney Evershed, sur la conception des Transformateurs, dans *The Electrician*, commençant t. XXVI., p. 477.

fait ramenés sur eux-mêmes et enchevêtrés les uns dans les autres, de manière à compléter le circuit magnétique comme dans le transformateur Ferranti, le courant tombait à 0,9 ampère, ce qui indiquait un degré d'aimantation encore plus élevé obtenu avec une dépense de 90 watts apparents ou de 49,6 watts réels.

Un autre avantage considérable en faveur des transformateurs à circuit fermé est l'absence complète de dissipation d'énergie par courants parasites dans les conducteurs de cuivre, même massifs ; les lignes de force paraissent en effet se rompre instantanément contre eux, si bien qu'il n'y a jamais la moindre différence d'intensité dans le champ magnétique où se trouvent les deux côtés d'un conducteur.

Les avantages relatifs du circuit ouvert ou fermé des transformateurs ont fait l'objet d'une discussion récente à l' « Institution of Electrical Engineers »¹.

Des épreuves de rendement de transformateurs ont été données par Mordey², Ayrton³, etc., et notamment par Fleming (voir p. 736).

Pour plus amples renseignements sur les détails de construction des transformateurs, le lecteur pourra se reporter à une série d'articles de R. Kennedy, dans l'*Electrical Review*, XX, 247 et suivantes, 1887, publiés depuis en volume sous le titre d' « *Electrical Distribution by Alternating Currents and Transformers* » (*Distribution électrique par courants alternatifs et transformateurs*) ; à un article de Rechniewski, dans *La Lumière électrique*, XXVI, 95, 1887 ; au travail de M. Kapp, dans le *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XVII, 96, 1888, auquel il est fait allusion ci-dessus ; aux travaux de M. Swinburne et de M. Evershed précédemment cités ; et à l'ouvrage du Prof. Fleming intitulé « *The Alternate Current Transformer* » (*Le transformateur à courants alternatifs*), qui a été publié en une série d'articles par *The Electrician*, dans les années 1889-1891.

THÉORIE

La théorie des transformateurs peut être traitée de deux façons : — la première consiste à introduire la notion des coefficients d'induction mutuelle et de self-induction dans les équations différentielles relatives aux deux circuits ; l'autre, à considérer les forces magnétomotrices en jeu dans le noyau de fer comme le résultat de la somme algébrique des

¹ Voir *Journal Inst. Electrical Engineers*, XX, 183 à 251, 1891.

² *Ibid.*, XVIII, 609, 1890.

³ *Ibid.*, 664.

ampères-tours dans les deux circuits, et à en déduire les forces électromotrices produites par les variations de l'induction magnétique dans le noyau.

Première méthode. — Cette méthode, introduite par Maxwell ¹, consiste à trouver la force électromotrice induite dans le circuit secondaire par les variations de courant développées dans le circuit primaire. Suivant ce qui a été dit, nous écrirons comme équation différentielle pour le premier circuit

$$E_1 - L_m \frac{di_2}{dt} - L_1 \frac{di_1}{dt} - R_1 i_1 = 0, \quad (1)$$

E_1 étant la force électromotrice développée par la dynamo, qui est supposée remplir la condition $E_1 = E_{max} \sin \omega t$ (voir p. 611), et L_1 et R_1 étant le coefficient de self-induction et la résistance du circuit primaire. Si l'on admet l'hypothèse qu'un potentiel (alternatif) constant peut être maintenu aux bornes de la bobine primaire (soit par un compoundage convenable de la dynamo (voir p. 739), soit autrement), les lettres E_1 , L_1 et R_1 peuvent être considérées comme s'appliquant uniquement à la partie du circuit primaire comprise entre les bornes de la bobine primaire. De cette équation différentielle on a à déduire une valeur de $L_m \frac{di_1}{dt}$.

Pour abrégé, nous remplacerons $\frac{2\pi}{T}$ par ω , et $\frac{d^2 i}{dt^2}$ par $-\omega^2 i$, puisque i est une fonction sinusoïdale. En différentiant alors l'équation (1), on trouve :

$$\frac{dE_1}{dt} + L_m \omega^2 i_2 + L_1 \omega^2 i_1 - R_1 \frac{di_1}{dt} = 0. \quad (2)$$

Si maintenant on multiplie par R_1 cette expression pour avoir l'équation (3), et qu'on multiplie par $L_1 \omega^2$ l'équation (1) pour avoir l'équation (4) ; et qu'on ajoute enfin (3) et (4) pour obtenir (5), on trouve :

$$R_1 \frac{dE_1}{dt} + L_m \omega^2 R_1 i_2 + L_1 \omega^2 R_1 i_1 - R_1^2 \frac{di_1}{dt} = 0, \quad (3)$$

¹ *Philosophical Transactions*, CLV. pt. I, p. 459, 1865. Dans ce travail Maxwell montre que le second circuit a pour effet d'augmenter la résistance et de diminuer la self-induction apparente du premier circuit. On en trouvera les équations traitées plus à fond dans Mascart et Joubert, *Electricité et Magnétisme*, I. 593, et II. 834 ; ainsi que par Hopkinson, *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XIII. 511, 1884 ; par Ferraris *Mem. Acad. Sci.* (Turin), XXXVII. 1885 ; et par Vaschy, *Annales Télégraphiques*, 1885-86, ou *Théorie des Machines Magnéto et Dynamo-électriques*, p. 31 (Baudry et C^{ie}). L'ouvrage de Fleming donne un résumé du travail de Maxwell.

$$L_1 \omega^2 E_1 - L_1 \omega^2 L_m \frac{di_2}{dt} - L_1^2 \omega^2 \frac{di_1}{dt} - L_1 \omega^2 R_1 i_1 = 0, \quad (4)$$

$$\left(R_1^2 + L_1^2 \omega^2 \right) \frac{di_1}{dt} = R_1 \frac{dE_1}{dt} + L_1 \omega^2 E_1 + L_m \omega^2 \left(R_1 i_2 - L_1 \frac{di_2}{dt} \right). \quad (5)$$

Multipliant alors chaque terme par $\frac{L_m}{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}$, et posant les abréviations suivantes :

$$\frac{L_m \omega}{\sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}} = k,$$

$$k^2 R_1 = \rho,$$

$$k^2 L_1 = \lambda,$$

$$- \frac{k^2}{L_m} \left(\frac{R_1}{\omega^2} \cdot \frac{dE_1}{dt} + L_1 E_1 \right) = E_2 = k E_1 \sin(\omega t - \varphi),$$

où φ se rapporte à la phase de la force électromotrice, on peut écrire l'équation (5) sous la forme

$$L_m \frac{di_1}{dt} = \rho i_2 - \lambda \frac{di_2}{dt} - E_2. \quad (6)$$

L'équation différentielle pour le second circuit est

$$L_m \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 = 0; \quad (7)$$

car il n'y a pas ici d'autre force électromotrice que celles dues à l'induction mutuelle et à la self-induction. En transportant dans (7) la valeur donnée par (6), on a comme équation finale

$$(R_2 + \rho) i_2 + (L_2 - \lambda) \frac{di_2}{dt} - E_2 = 0. \quad (8)$$

On voit par là que l'effet total est équivalent à celui qui se produirait si, le circuit primaire n'existant pas, on avait introduit dans le circuit secondaire une force électromotrice égale à $k E_1$, et qu'en même temps sa résistance se fût accrue d'une quantité égale à $k^2 R_1$ et que sa self-induction eût diminué d'une quantité égale à $k^2 L_1$. L'étude de k montre en outre que, si la fréquence est suffisante et la perméabilité du noyau de fer assez grande, k devient égal à $\frac{L_m}{L_1}$, ou à la réciproque de c , rapport des enroulements primaire et secondaire. Mais

si les deux bobines ont des poids de cuivre égaux, $L_1 = c^2 L_2$, et $R_1 = c^2 R_2$; de sorte que l'effet résultant, lorsque le transformateur est en plein travail, est de rendre $\lambda = L_2$, et $\rho =$ la résistance de la bobine secondaire; autrement dit, la self-induction est annihilée, et la résistance interne de la bobine secondaire est virtuellement doublée.

Seconde méthode. — Dans cette méthode, due à Hopkinson¹, on commence par considérer la force magnétomotrice nécessaire pour faire passer un flux de Φ unités C. G. S. à travers un noyau de longueur l et de perméabilité μ . Cette force magnétomotrice est due à la somme algébrique des ampères-tours sur les deux bobines. Conformément au raisonnement de la page 171, Chapitre VI, on peut en conséquence écrire :

$$\frac{4\pi}{10} (N_1 i_1 + N_2 i_2) \cdot \frac{\mu S}{l} = \Phi; \quad (1)$$

ou, si le noyau a une section droite S , et si l'induction est de \mathfrak{B} unités C. G. S., on peut poser $\Phi = \mathfrak{B} S$; et alors la force magnétomotrice aura pour expression

$$\frac{4\pi}{10} (N_1 i_1 + N_2 i_2) = \mathfrak{B} S \frac{l}{\mu S} = \frac{\mathfrak{B}}{\mu} l = \mathcal{H}l. \quad (2)$$

Dès lors les équations des forces électromotrices développées dans les deux circuits prendront la forme

$$\left\{ \begin{aligned} E_1 &= R_1 i_1 - N_1 \frac{d\Phi}{dt} = R_1 i_1 - N_1 S \frac{d\mathfrak{B}}{dt}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0 &= (r_2 + R_2) i_2 - N_2 \frac{d\Phi}{dt} = (r_2 + R_2) i_2 - N_2 S \frac{d\mathfrak{B}}{dt}; \end{aligned} \right. \quad (4)$$

où R_2 est la résistance du circuit d'utilisation, et r_2 la résistance interne de la bobine secondaire. En multipliant (3) par N_2 et (4) par N_1 , on en déduit

$$N_2 E_1 = N_2 R_1 i_1 - N_1 (r_2 + R_2) i_2,$$

qui, avec l'équation (2), donne

$$i_1 [N_2^2 R_1 + N_1^2 (r_2 + R_2)] = N_2^2 E_1 + N_1 (r_2 + R_2) \frac{10 \mathcal{H}l}{4\pi},$$

¹ *Proc. Roy. Soc.*, février 1887.

$$i_2 [N_2^2 R_1 + N_1^2 (r_2 + R_2)] = - N_1 N_2 E_1 + N_2 R_1 \frac{10 \mathcal{H}l}{4\pi} ;$$

et

$$S \frac{d\mathcal{B}}{dt} = - \frac{(r_2 + R_2) N_1 E_1}{N_2^2 R_1 + N_1^2 (r_2 + R_2)} + \frac{10 \mathcal{H}l}{4\pi} \cdot \frac{R_1 (r_2 + R_2)}{N_2^2 R_1 + N_1^2 (r_2 + R_2)} . \quad (5)$$

Le second terme peut être négligé, en raison de la faible valeur de $\mathcal{H}l$ comparativement à $\frac{4\pi}{10} N_1 i_1$; en d'autres termes, parce que la différence entre $N_1 i_1$ et $N_2 i_2$ (qui sont l'un et l'autre très grands) est seule intéressante comme force magnétomotrice, et que celle-ci est faible si la perméabilité du fer est grande, ce qui est le cas lorsque, suivant la pratique courante, \mathcal{B} n'est pas porté au-dessus de 8 000 ou 10 000 unités C. G. S. On a alors

$$S \frac{d\mathcal{B}}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{(r_2 + R_2) N_1 E_1}{N_2^2 R_1 + N_1^2 (r_2 + R_2)} .$$

Et, si l'on se rappelle que $E_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$, il vient.

$$E_2 = - \frac{(r_2 + R_2) E_1 \frac{N_2}{N_1}}{\frac{N_2^2}{N_1^2} R_1 + r_2 + R_2} .$$

Mais la force électromotrice utile E_2 dans le circuit secondaire est égale à $(r_2 + R_2) i_2$; il en résulte que

$$i_2 = - \frac{E_1 \frac{N_2}{N_1}}{\frac{N_2^2}{N_1^2} R_1 + r_2 + R_2} . \quad (6)$$

Maintenant, si la condition d'alimentation des conducteurs principaux est telle qu'on ait un potentiel constant aux bornes du circuit primaire, on peut considérer E_1 et R_1 comme exclusivement afférents à l'état de la bobine primaire; et il est évident que le transformateur a pour effet de réduire les volts dans la proportion du rapport entre les enroulements, et d'ajouter à la résistance du circuit secondaire un terme égal à la résistance du circuit primaire réduite proportionnellement au carré du rapport des enroulements. Il en résulte également, d'après le signe — dont est affecté le second membre de

l'équation (6), que les deux courants sont exactement en opposition de phases ou décalés d'une demi-période.

Le professeur Perry¹ a fait une étude approfondie de la théorie des transformateurs qui l'a conduit à plusieurs résultats importants. Si l'on admet qu'il n'y ait pas de dérivations magnétiques et qu'il ne se produise aucune réaction magnétique dans le circuit secondaire extérieur, alors, bien que le retard du courant primaire sur le voltage primaire développé varie considérablement sous des charges différentes, le retard du courant secondaire sur le voltage primaire est néanmoins toujours voisin d'une demi-période; et, quelle que soit la *forme* de la courbe primaire des volts, la courbe résultante des ampères secondaires affecte la même forme. Mais, s'il y a la moindre dérivation de flux magnétique — même de 1,33 p. 100 seulement —, ces conclusions doivent être modifiées : le courant secondaire n'est plus exactement en opposition de phase avec le voltage primaire, tout en étant presque exactement en opposition de phase avec le courant primaire, dont le décalage dépend, entre autres causes, du coefficient de dérivation.

Le professeur Perry s'est livré dernièrement à d'autres recherches sur la théorie d'un transformateur composé d'un nombre quelconque de circuits distincts. Les résultats de cette étude n'ont pas encore été publiés.

Pour plus amples études sur les transformateurs à courants alternatifs, voir :

Ferraris : *La Lumière électrique*, XVI. 399, 1885 ; XXVII. 518, 1888 ; et *Electrical Review*, XVI. 256, 343 et suivantes, 1885 ; XXII. 221, 252, 1888.

G. Kapp : *Industries*, Avril 1887 ; et *Electrician*, 1887 ; ainsi que *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XVII. 96, 1888, avec la discussion.

G. Forbes : *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XVII. 153, 1888. ●

Rechniewski : *La Lumière électrique*, XXV. 613, 1887.

Peukert et Zickler : *Zeitschrift für Elektrotechnik*, 1886 ; *La Lumière électrique*, XXI. 276, 1886 ; et *Electrical Review*, XIX. 80, 1886.

PROGRÈS DANS LA CONSTRUCTION DES TRANSFORMATEURS A COURANTS ALTERNATIFS

La construction des transformateurs à courants alternatifs s'est beaucoup améliorée dans ces dernières années, comme le montre le tableau ci-après,

¹ *Philosophical Magazine*, août 1891.

p. 738 et 739, emprunté au journal *L'Industrie électrique*, 25 janvier 1893. — Il résume une étude très complète faite sur 11 de ces appareils par M. J. A. Fleming dans des conditions identiques de fonctionnement : potentiel efficace de 2 400 volts, fréquence de 83 à 85 (ce qui a pu modifier un peu les résultats obtenus pour quelques-uns d'entre eux, établis en vue d'un fonctionnement à une fréquence de 100).

On y voit nettement les progrès réalisés en six ans. Le rendement à pleine charge des premiers transformateurs de M. Ferranti n'atteignait pas 86 p. 100 ; il dépasse aujourd'hui 96. Le rendement à dixième de charge n'était que de 40 p. 100 ; il s'élève maintenant à 86 p. 100. Enfin la dépense à vide, facteur si important pour l'établissement du rendement journalier, représentait, en 1885, 14 p. 100 environ de la puissance utile, tandis qu'elle reste inférieure à 2 p. 100 dans les transformateurs plus récents. — Un chiffre également intéressant au point de vue de la distribution est la chute de potentiel quand, maintenant constante la différence de potentiel efficace aux bornes du primaire, on fait varier la charge depuis zéro jusqu'au maximum normal pour lequel l'appareil est construit. Cette chute est d'environ 2 p. 100 dans les transformateurs à bon rendement, tandis qu'elle atteint 3 et 4 p. 100 dans les appareils mal proportionnés.

Par contre, cette étude est la condamnation, au moins relative, des transformateurs à circuit magnétique ouvert, tels que le *hérisson* (fig. 491 [3] et 496).

TRANSFORMATEURS POUR COURANT CONSTANT

Elihu Thomson et Stanley ont imaginé, dans le but de fournir des courants alternatifs d'un nombre constant d'ampères efficaces, des transformateurs disposés de telle sorte que les deux bobines présentent des self-inductions considérables comparativement à leur mutuelle induction. Swinburne¹ a fait remarquer qu'un transformateur « hérisson » satisfaisait à cette condition si les bobines primaire et secondaire étaient roulées aux deux extrémités, au lieu d'être roulées l'une contre l'autre. Un transformateur ordinaire peut être adapté à cette utilisation par l'introduction d'une bobine de réaction dans le circuit secondaire. — Ces sortes d'appareils à courant constant ont leur emploi pour l'alimentation de lampes à arc et à incandescence en série.

EMPLOI DES TRANSFORMATEURS AU RÉGLAGE DES ALTERNATEURS

Les transformateurs fournissent pour les alternateurs un moyen d'auto-régulation analogue aux méthodes d'enroulements compound appliquées aux dynamos à courant continu. Etant admis qu'on peut

¹ *Journal Inst. Electrical Engineers*, XX. 192, 1891.

PRINCIPALES CONDITIONS DE CONSTRUCTION ET

ÉLÉMENTS	FERRANTI 5 H. P. (1885).	FERRANTI 5 H. P. (1885) rebobiné.	FERRANTI 15 H. P. (1892).
	1	2	3
Puissance nominale en kilowatts.	3,75	3,75	11,25
Fréquence du courant pendant l'essai.	81,6	81,6	81,6
Température moyenne après l'essai, en degrés C.	100	66	»
CIRCUIT PRIMAIRE			
Résistance à chaud, en ohms.	12,5	29,8	6,45
Intensité à vide, en ampères.	0,332	0,11	0,076
— à pleine charge, en ampères.	1,89	1,741	4,762
Puissance dépensée à vide, en watts.	539	235	149
— en pleine charge, en watts.	4 480	4 301	11 496
Perte dans le cuivre à pleine charge ($r_1 I_1^2$), —	45,2	90	146,4
Puissance <i>apparente</i> dépensée à vide, —	790	264	188
Facteur de puissance à vide.	0,68	0,88	0,82
— à 0,1 de la charge.	0,75	1,00	0,99
— à 0,2 —	0,90	1,00	0,99
— à 0,5 —	0,96	1,00	1,00
— à 1 —	1,00	1,00	1,00
CIRCUIT SECONDAIRE			
Résistance à chaud, en ohms.	0,0252	0,057	0,0134
Différence de potentiel aux bornes, à vide, en volts.	100,9	102,7	100,4
— — à pleine charge, —	99,1	98,4	97,0
Chute de potentiel à pleine charge, en volts.	1,8	4,3	3,4
Intensité du courant — en ampères	39,2	39,65	112,89
Puissance utile — en watts	3 880	3 902	11 120
Perte dans le cuivre ($r_2 I_2^2$), — en watts.	38,7	89,5	171
RENDEMENTS (pour 100).			
Charge 2,5 pour 100	14,6	28,8	65,5
— 5 —	25,3	44,5	79
— 10 —	40,3	61,4	88,1
— 20 —	57,2	75,6	93,4
— 30 —	66,5	81,9	95
— 40 —	72,5	85,5	95,7
— 50 —	76,4	87,7	96
— 60 —	79,1	89,0	96,2
— 70 —	81,5	89,8	96,3
— 80 —	83,1	90,2	96,4
— 90 —	84,5	90,5	96,8
— 100 —	85,5	90,8	95,5

DE FONCTIONNEMENT DES TRANSFORMATEURS

FERRANTI 15 H. P. (1892) rebobiné.	FERRANTI 20 H. P. (1892).	WESTINGHOUSE	MORDEY-BRUSH	THOMSON-HOUSTON	G. KAPP	SWINBURNE 3 kilowatts.	SWINBURNE 6 kilowatts.
4	5	6	7	8	9	10	11
11,25 82,5 »	18 82,7 37	6,5 82,5 34	6 82,9 »	4,5 82,1 39	4 82,1 »	3 82,3 63	6 83 »
3,77 0,103 4,837 229 11742 88,1 247 0,93 1,00 1,00 1,00 1,00	2,75 0,112 6,500 230 15322 116 269 0,86 1,00 1,00 1,00 0,98	5,95 0,05 2,775 95 6598 45,8 120 0,79 1,00 1,00 1,00 1,00	7,73 0,076 2,668 148 6420 55 182 0,81 0,98 1,00 1,00 1,00	19,68 0,083 1,96 116 4695 76 199 0,58 1,00 1,00 1,00 1,00	11,38 0,145 1,75 152 4207 34,5 348 0,61 0,85 0,92 1,00 1,00	24 0,756 3,163 121 3163 59 1816 0,07 0,22 0,37 0,65 0,84	7,93 1,194 3,059 151 6225 74 2866 0,053 0,25 0,44 0,71 0,86
0,0092 100,0 97,8 2,2 113,85 1135 119	0,0061 100,0 97,9 2,1 151,44 14828 138	0,0108 101,0 98,6 2,4 64,74 6384 45,3	0,0163 101,1 99,2 1,9 61,58 6109 62	0,019 99,8 96,5 3,3 45,08 4439 40	0,024 99,0 97,1 1,9 40,89 3971 42	0,054 101,9 98,6 3,3 30,33 2991 46,9	0,01542 102 99 3 60,26 5366 55
55 78 83 90,5 93,1 94,5 95,1 95,4 95,5 95,4 95,2 94,7	62,0 76,6 86,5 92,6 95,0 95,6 96,1 96,5 96,8 96,8 96,6 90,6	61,8 75,9 85,7 91,9 94,0 95,1 95,0 96,3 96,6 96,8 96,9 96,9	52,1 67,6 81,0 88,5 91,1 92,7 93,7 94,2 94,7 94,9 95,1 95,4	49,1 65,4 78,8 87,8 91,1 92,9 93,8 94,2 94,6 95,0 95,0 94,7	39,5 56,5 72,3 83,8 88,0 90,4 91,9 92,6 93,3 93,8 94,0 94,2	39,3 56,2 71,7 82,9 87,6 89,8 91,2 92,2 92,8 93,2 93,4 93,5	48,4 65,2 79 88,2 91,8 93,7 94,8 95,5 95,9 96,1 96,1 96,1

fournir à l'aide d'une excitatrice distincte une excitation initiale et constante, il reste à la compléter par une excitation variable qui, dans le cas d'une distribution sous potentiel constant, doit être proportionnelle au courant principal, ou, dans le cas d'une distribution à courant constant, proportionnelle à la résistance en circuit. Diverses combinaisons ont été proposées par Zipernowsky, Kennedy et Schallenberger.

La figure 498 représente la disposition adoptée par Zipernowsky, et donne le diagramme d'une machine à inducteur intérieur mobile à huit pôles. L'induit se compose de huit bobines fixes, parmi lesquelles sept

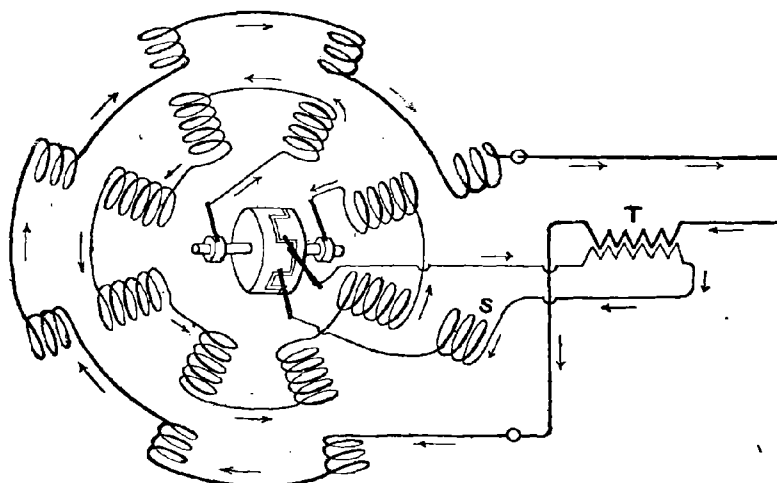


Fig. 498. — (Zipernowsky) Mode de compoundage d'une machine à courants alternatifs.

sont reliées en série pour alimenter le circuit principal, et dont la huitième S est séparée du reste et affectée à la production de l'excitation des inducteurs ; ses courants passent à cet effet à travers un commutateur convenable monté sur l'arbre de la machine. Dans le circuit principal, juste après les bornes de la machine, est intercalée la bobine primaire d'un petit transformateur T, dont la bobine secondaire est reliée au circuit excitateur. On a ainsi une excitation complémentaire toujours proportionnelle aux courants qui alimentent le circuit principal. On peut éviter l'emploi de la bobine S en y substituant la bobine secondaire d'un autre transformateur, dont le primaire est mis en dérivation entre les conducteurs.

MOTEURS-DYNAMOS

Il en existe de deux sortes : (1) les uns pour transformer un courant continu sous un voltage quelconque en un courant continu d'intensité différente sous un voltage différent ; (2) les autres pour transformer un courant continu en un courant alternatif ou *vice versa*.

TRANSFORMATEURS A COURANT CONTINU

En 1874, Gramme construisit une machine à anneau avec deux enroulements, l'un de gros fil, l'autre en fil fin, comprenant huit fois autant de spires que le premier. Chacun des enroulements était relié à un commutateur distinct. Cette machine pouvait servir à transformer un potentiel élevé en un bas potentiel ou *vice versa*. — On peut arriver, mais moins avantageusement, au même résultat en réunissant sur un même arbre les induits de deux dynamos, dont l'une fonctionne comme moteur actionnant l'autre qui remplit le rôle de génératrice ; et l'on peut leur donner des inducteurs distincts ou un inducteur commun. — En Angleterre, des transformateurs à courant continu ont été mis en œuvre avec succès par MM. Laurence, Paris et Scott, qui ont employé une machine bipolaire à bâti de fonte avec induit à deux circuits. Ce genre de machines donne lieu à très peu d'étincelles, les réactions dans les deux induits tendant à se contre-balancer mutuellement. L'inducteur est excité en dérivation par une prise sur la bobine d'induit à bas potentiel. — Swinburne a étudié un grand nombre de combinaisons possibles, dont une ayant pour objet de transformer une distribution à courant constant en une distribution sous potentiel constant. — A la station centrale de Chelsea on emploie plusieurs moteurs-dynamos. Ils ont été décrits en détail par le major général Webber² et comprennent divers types construits les uns par Laurence et Scott, les autres par Elwell-Parker.

Nous donnons ci-dessous quelques constantes relatives à un transformateur à courant continu d'Elwell-Parker, ressemblant tout à fait à une dynamo ordinaire à tambour, mais muni d'un collecteur à chacune des extrémités de son induit.

¹ Voir *Electrician*, XIX. 517, octobre 1887; et *Electrical Review*, XXII. 4, 1888.

² *Journal Inst. Electrical Engineers*, XX. 63 à 69, 1891, où l'on trouvera des dessins et des données relatifs à trois machines.

TRANSFORMATEUR ELWELL-PARKER A COURANT CONTINU	PRIMAIRE	SECONDAIRE
Volts.	1 000	110
Ampères	40	360
Résistance du bobinage d'induit (ohms).	0,427	0,0032
Conducteurs autour de l'induit	648	72
Segments au collecteur.	462	36

Vitesse angulaire : 500 tours par minute.
Inducteurs : en dérivation, 3 080 spires ; résistance, 8,5 ohms.
Noyau d'induit : diamètre des disques, 41,5 cm ; section nette du fer, 2 100 centimètres carrés.
Rendement de la double transformation : à pleine charge, 83 p. 100 ; à demi-charge, 75 p. 100.

Un système un peu différent de transformation de courants continus a été suggéré par Cabanellas¹ et breveté par Edison². Dans ce système, ni l'induit ni l'inducteur ne sont mobiles ; mais un commutateur rotatif fait continuellement tourner la polarité magnétique d'un induit à double enroulement. — Dans une modification ultérieure de cette idée, due à Jehl et Rupp, une masse de fer, qui complète le circuit magnétique, tourne à l'intérieur de l'anneau à double enroulement³.

On a proposé d'employer un moteur-dynamo pour compenser la chute de potentiel sur de longs conducteurs par l'intercalation dans le conducteur principal, à une certaine distance, d'un moteur en série actionnant un induit mis en dérivation entre les conducteurs. Lahmeyer⁴ a donné à cette disposition le nom de « dynamo à longue portée » (Fernleitungen-dynamo).

Une autre combinaison, utile avec les systèmes de distribution à trois et à cinq fils, est celle formée d'un système qui comprend un certain nombre d'induits ou d'enroulements sur le même arbre, reliés en dérivation sur les différentes paires de conducteurs. Si le potentiel vient à baisser sur une paire quelconque de conducteurs, l'induit correspondant entre en jeu et vient alimenter cette paire de conducteurs,

¹ Voir *La Nature*, p. 43, 1882.

² Brevet anglais, 3949 de 1882 ; et *Electrician*, XIX. 479, 1887.

³ *Electrician*, XIX. 514, 1887 ; XX. 7, 1887 ; et Brevet anglais, 2130 de 1887.

⁴ *Centralblatt für Elektrotechnik*, XI. 402, 1889.

actionné par les autres induits fonctionnant comme moteurs. Cette disposition a reçu le nom de « dynamo de compensation » (Ausgleichungs-dynamo).

Pour plus amples renseignements sur les modes de transformation des courants continus, nous renvoyons le lecteur à des articles d'Elihu Thomson, dans l'*Electrical World*, X. 108, 1887; de R. P. Sellon, dans *The Electrician*, XX. 633, 1888; et de Rechniewski, dans *La Lumière électrique*, XXV. 416, 1887.

THÉORIE DES TRANSFORMATEURS A COURANT CONTINU

Soit \mathcal{E} le potentiel aux bornes de l'élément primaire ou moteur, et e celui aux bornes de l'élément secondaire ou générateur. Soient i_1 , r_1 , et N_1 , les constantes respectives : courant d'induit, résistance d'induit et nombre de conducteurs d'induit de l'élément primaire; et i_2 , r_2 , et N_2 , les constantes correspondantes de l'élément secondaire. Les deux forces électromotrices induites seront, en unités C. G. S. :

$$E_1 = \frac{n}{l} N_1 \Phi \quad \text{et} \quad E_2 = \frac{n}{l} N_2 \Phi;$$

et

$$E_1 = \mathcal{E} - r_1 i_1 \quad \text{et} \quad E_2 = e + r_2 i_2.$$

Désignons maintenant par c la quantité $\frac{N_1}{N_2}$ (c'est-à-dire le *coefficient de transformation*); nous aurons :

$$c e = \mathcal{E} - r_1 i_1 - c r_2 i_2.$$

Mais, si l'on suppose négligeable la perte par courants parasites et par hystérésis, la puissance appliquée à l'induit et celle qu'il produit sont égales, ou $E_1 i_1 = E_2 i_2$; d'où $i_2 = c i_1$, de sorte que l'équation précédente devient

$$e = \frac{\mathcal{E}}{c} - \left(r_2 + \frac{r_1}{c^2} \right) i_2.$$

On voit ainsi que tout se passe dans le circuit secondaire comme si le potentiel était réduit par rapport à celui des conducteurs principaux proportionnellement aux nombres respectifs de spires des induits; et comme s'il était ajouté à la résistance intérieure du circuit secondaire une résistance égale à celle de l'enroulement primaire divisée par le

carré du coefficient de transformation. Le rapport de transformation est indépendant de la vitesse et de l'aimantation, bien que ces deux quantités dépendent inversement l'une de l'autre. Si l'élément dynamo (ou secondaire) est monté en compound, la vitesse peut être très sensiblement constante pour toutes les charges ; mais c'est un minime avantage, puisque la vitesse se règle toujours d'elle-même suivant la demande. Si la génératrice qui alimente le système à la station de départ est convenablement surcompoundée, elle maintiendra le voltage aux lampes constant, malgré l'interposition du transformateur. Les objections à l'emploi de machines rotatives comme transformateurs tombent presque complètement devant ces considérations que ces machines fonctionnent sans étincelles (grâce à l'équilibre des self-inductions des deux enroulements), et avec très peu de frottement dans les coussinets, par suite de ce que les éléments mobiles, actifs et passifs, sont tous deux concentrés dans un même organe tournant.

TRANSFORMATEURS DE COURANTS ALTERNATIFS EN COURANTS CONTINUS OU RÉCIPROQUEMENT

La transformation d'un courant alternatif en un courant continu, ou *vice versa*, exige la combinaison d'un alternateur avec une machine à

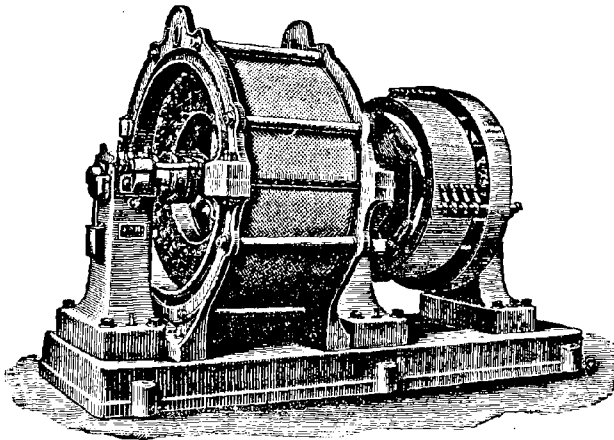


Fig. 499. — Transformateur de courants alternatifs en courant continu.

courant continu, fonctionnant l'un comme génératrice, l'autre comme moteur. Elle peut être réalisée à l'aide de deux machines distinctes

accouplées, comme l'indique la figure 499, qui représente un système d'alternateur combiné avec une dynamo à courant continu à pôles intérieurs, tous deux du type Siemens, et destiné à transformer 2 000 volts alternatifs en 150 volts continus, pour la charge d'accumulateurs, etc.

Mais il n'est pas nécessaire pour cela d'accoupler deux machines distinctes. Considérons l'induit d'une machine ordinaire quelconque, soit, par exemple, d'une machine bipolaire à anneau. Si, indépendamment de son collecteur ordinaire, on y ajoute deux, trois ou quatre bagues de contact distinctes, respectivement reliées à deux, trois ou quatre points situés symétriquement autour de l'anneau¹, une machine ainsi montée pourra être employée à fournir ou recevoir des courants alternatifs à deux, trois ou quatre phases, un seul et même enroulement servant pour les deux genres de courants. Des machines multipolaires sont préférables pour cet objet, en raison de ce qu'elles donnent, sans exagération de vitesse d'entraînement, une plus grande fréquence que les machines bipolaires. Des machines multiplex ainsi conçues ont été exposées à Francfort, en 1891, par Schuckert, Haselwander, et Dobrowolsky.

¹ Une machine de ce genre, type « E » de Gramme à deux bagues de contact supplémentaires ajoutées par le D^r R. M. Walmsley, a été pendant quelques années employée au Collège technique de Finsbury. [La maison Gebrud Fraaz, de Wunsiedel (Allemagne), construit dans cet ordre d'idées des machines de démonstration et de laboratoires.]

CHAPITRE XXVI

TRANSMISSION ÉLECTRIQUE DE L'ÉNERGIE

PRINCIPE

Dans tous les problèmes relatifs à la transmission électrique de la puissance, à courte ou à grande distance, il est capital de se rappeler que l'on a deux facteurs à considérer, le *courant* et la *pression* (ou *potentiel*) sous laquelle est transmis ce courant. Dans la distribution ordinaire de l'énergie électrique par stations centrales dans les villes, qu'il s'agisse de courants continus ou de courants alternatifs, on adopte habituellement le système de distribution sous *potentiel constant*, le courant variant seul suivant les besoins. Mais, pour des éclairages en série, on peut avoir à se conformer à la condition inverse de *courant* maintenu *constant*, avec variation de la pression proportionnellement au nombre de lampes en circuit. Il est essentiel de se bien pénétrer de cette distinction quand on attaque le problème de la transmission à distance, bien qu'en fait, on puisse fournir électriquement de la puissance sans se conformer à l'une ou l'autre des précédentes conditions d'alimentation. Nous avons vu (p. 545) comment on avait été conduit à reconnaître que le secret du succès pour la transmission à grande distance résidait dans l'application de hauts voltages, en raison de ce qu'ils permettent l'emploi de faibles courants, et, par suite, de fils conducteurs à petite section. Il n'est pas inutile cependant de reproduire sommairement les conditions du problème de l'économie d'un transport d'énergie.

Il s'agit tout d'abord de déterminer la relation existant entre le potentiel sous lequel le courant est fourni au moteur et la perte, sous forme de chaleur, dans le circuit.

Soit ΣR la somme de toutes les résistances en circuit; d'après la loi

de Joule, la puissance perdue en échauffement sera (en watts) $i^2 \Sigma R$, si i est exprimé en ampères et R en ohms ; et, comme $i = \frac{\mathcal{E} - E}{\Sigma R}$, on peut écrire

$$\text{Puissance perdue en échauffement} = \frac{(\mathcal{E} - E)^2}{\Sigma R}.$$

Supposons maintenant que, sans changer les résistances en circuit, on puisse augmenter \mathcal{E} , ainsi que E , tout en laissant à $\mathcal{E} - E$ la même valeur que précédemment, de telle sorte que le courant reste le même ; il est évident que la perte sous forme de chaleur sera exactement la même qu'avant. Mais qu'advient-il de la puissance transmise ? Soient \mathcal{E}' et E' les deux nouvelles valeurs respectives considérées. La puissance électrique dépensée sera

$$P = \mathcal{E}' i,$$

et la puissance utile développée,

$$p' = E' i.$$

C'est-à-dire que, sans une plus grande perte en échauffement, il sera, dans le même temps, transmis une plus grande quantité d'énergie et effectué plus de travail. Le rendement est également plus grand, car

$$\frac{p'}{P} = \frac{E'}{\mathcal{E}'},$$

et ce rapport est plus voisin de l'unité que $\frac{E}{\mathcal{E}}$, attendu que \mathcal{E} et E ont reçu tous deux un incrément arithmétique égal. — Comme exemple, supposons que \mathcal{E} soit de 100 volts, E de 90 volts, et que la somme des résistances soit égale à 1 ohm. La puissance fournie sera de 1 000 watts ; celle utilisée, de 900 watts ; la perte en échauffement, de 100 watts ; et le rendement électrique, de 90 p. 100. Supposons maintenant qu'on augmente les voltages de telle sorte que \mathcal{E} soit de 1 000 volts, et E de 990 volts. Le courant sera toujours de 10 ampères ; mais la puissance fournie sera de 10 000 watts, dont 9 900 seront utilisés, et 100 perdus sous forme de chaleur. On a donc 10 fois autant de puissance transmise, avec la même perte en chaleur que précédemment, et le rendement s'est élevé de 90 à 99 p. 100. On voit clairement par

là qu'il y a économie à fonctionner à haut voltage. On ne saurait attribuer trop d'importance à ce point.

Mais comment obtiendra-t-on cette force électromotrice plus élevée ? — On peut y arriver de quatre manières. [i] Le moyen le plus simple consiste à faire tourner la génératrice et la réceptrice à des vitesses plus grandes. Il n'y a d'autre objection à cette manière de procéder que des considérations mécaniques de tendance à l'échauffement des coussinets et de détériorations par la force centrifuge. [ii] Un second moyen consiste à enrouler les deux induits d'un grand nombre de bobines de fil composées elles-mêmes d'un grand nombre de spires. Ce procédé a cependant l'inconvénient d'introduire de grandes résistances dans le circuit. Ce fait peut néanmoins ne pas avoir grande importance, si le circuit a déjà par lui-même une haute résistance, comme, par exemple, celle d'un grand nombre de kilomètres de fil à travers lesquels la puissance doit être transmise. Dans ce cas, en doublant la force électromotrice on ne doublera pas la résistance. Mais, même dans le cas où la résistance de la ligne est insignifiante, on réalise une économie en augmentant la force électromotrice. En effet, ainsi qu'on peut le déduire des équations, quand $\mathcal{E} - E$ est maintenu constant, si l'on double la force électromotrice, on augmente le rendement, alors même que la résistance de la ligne est très faible comparativement à celle des machines, et on le double si la résistance de la ligne est très grande par rapport à celle des machines. En fait il est encore avantageux de consentir à cette résistance supplémentaire qu'on ne peut éviter si l'on cherche à réaliser une force électromotrice élevée en employant des bobines comportant un grand nombre de spires de fil fin. [iii] Un troisième moyen, auquel ne s'applique aucune de ces objections, est d'augmenter le champ magnétique en recourant à des inducteurs plus puissants. [iv] On peut enfin grouper plusieurs machines en série l'une sur l'autre de manière à ajouter leurs forces électromotrices individuelles.

Les avantages qui résultent, dans le cas de la transmission électrique de l'énergie, de l'emploi de forces électromotrices très élevées dans les deux machines peut également se déduire du diagramme.

Supposons que la figure 386, de la page 555, représente le cas où \mathcal{E} est égal à 100 volts et E égal à 80 volts. Supposons maintenant que les résistances du circuit restent les mêmes quand \mathcal{E} est porté à 200 volts et E à 180 volts. (On peut réaliser cette condition en augmentant la vitesse ou l'aimantation tant de la génératrice que de la réceptrice dans les proportions voulues). $\mathcal{E} - E$ est encore de 20 volts, et le courant sera le même que précédemment. La figure 500 correspond à cette con-

dition. Le carré KGHD qui représente la perte en échauffement a la même surface que précédemment ; mais la puissance dissipée est deux fois aussi grande, et la puissance utile est plus de deux fois égale à ce qu'elle était avant. Un haut voltage réalise en conséquence, non pas seulement le transport d'une plus grande quantité de puissance, mais aussi un rendement de transmission plus élevé. Le rendement du système dans le cas de la figure 386 était de 80 p. 100 ; dans celui de la figure 500, il est de 90 p. 100 (les dynamos étant supposées « parfaites ») ; et, pour une dépense double de puissance initiale, la puissance recueillie s'est élevée à 2,25 fois ce qu'elle était dans le premier cas.

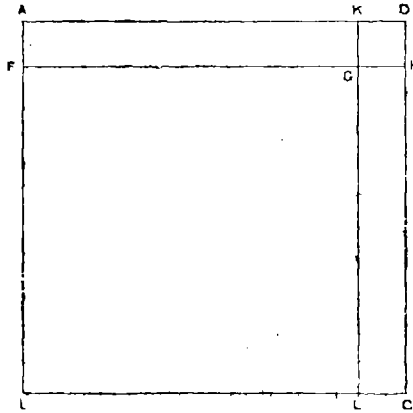


Fig. 500.

Lors de l'essai que fit M. Marcel Deprez pour réaliser ces conditions, dans le transport d'énergie de Miesbach à Munich, en 1882, sur une double ligne de fil télégraphique et une distance de 55 kilomètres, il eut recours à des forces électromotrices élevées. Les machines étaient deux machines Gramme ordinaires, à inducteurs montés en série, semblables l'une à l'autre ; mais leurs bobines ordinaires de faible résistance avaient été remplacées par des bobines formées d'un très grand nombre de spires de fil fin. La résistance de chaque machine était de 470 ohms, tandis que celle de la ligne était de 950 ohms¹. La génératrice tournait à 2 400 tours par minute ; la réceptrice, à 1 400 tours. La différence de potentiel aux bornes de la génératrice était de 2 400 volts ; et aux bornes de la réceptrice, de 1 600 volts. Suivant le professeur

¹ Ces chiffres et ceux qui suivent sont donnés sur l'autorité du professeur von Beetz, président de l'Exposition de Munich.

von Beetz, président de l'Exposition de Munich, où furent faits les essais, le rendement mécanique réel trouvé a été de 32 p. 100. — Dans les expériences plus récentes de Deprez, en 1886, entre Creil et Paris¹, les différences de potentiels étaient respectivement de 6004 et de 5456 volts; et, suivant M. Maurice Lévy, le rendement mécanique, mesuré au dynamomètre, fut trouvé égal à 44,81 p. 100; la distance était d'environ 58 kilomètres. — M. Deprez a posé comme règle que, dans le cas de deux machines identiques employées comme génératrice et comme réceptrice, on obtenait le rendement $\frac{p}{P}$ en comparant les vitesses aux deux stations d'arrivée et de départ, ou que

$$\frac{p}{P} = \frac{n_2}{n_1},$$

$\frac{n_1}{t}$ étant la vitesse angulaire de la génératrice, et $\frac{n_2}{t}$ celle de la réceptrice. Mais il y a lieu d'objecter à cette formule que les forces électromotrices ne sont proportionnelles aux vitesses que si les champs magnétiques des deux machines ont également la même intensité, et que si le courant est identique dans les deux machines. Tel n'est pas le cas s'il y a une dérivation quelconque le long de la ligne. En outre, même si le courant qui passe dans l'induit et l'inducteur de la génératrice qui crée le courant et dans ceux du moteur qui l'utilise est absolument identique, les intensités des champs magnétiques des deux machines ne sont pas égales, quand bien même la construction des deux machines serait tout à fait identique: la réaction entre l'induit et l'inducteur dans la dynamo employée comme moteur est en effet différente de celle existant dans la machine qui fait office de génératrice.

Dans une autre expérience, M. Fontaine², avec plusieurs machines Gramme accouplées en série à chaque extrémité d'une ligne dont la résistance était de 100 ohms, réussit à transporter une puissance de 50 chevaux avec un rendement commercial de 52 p. 100. Cette expérience réalisait l'idée émise en 1879 par Elihu Thomson relativement à l'emploi économique de plusieurs machines en série. M. Fontaine mit en œuvre sept machines de construction identique, ressemblant à celle de la figure 331, pesant chacune 1 200 kilogrammes, et d'une puissance de 16 kilowatts. Quatre d'entre elles étaient groupées en série à l'extré-

¹ *Electrician*, XVII. 318, 1886.

² *L'Electricien*, X. 707, 1886. — Voir aussi G. Kapp « Transmission électrique de l'énergie », traduction française, p. 384 et suiv.

mité génératrice de la ligne, et actionnées, à une vitesse de 1 298 tours par minute, par une machine à vapeur de 113 chevaux indiqués. Des essais au frein faits au poste de départ constatèrent une puissance effective de 95,88 chevaux. Les trois autres machines fonctionnaient comme moteurs; leur puissance, mesurée au frein, était de 49,98 chevaux, à 1120 tours par minute. Le courant était de 9,34 ampères; il en résultait un rendement net de 52 p. 100. La résistance des machines était d'environ 11,5 ohms pour chacune. La différence de potentiel était de 5 996 volts au poste générateur et de 5 062 volts au poste récepteur.

RENDEMENT D'UN TRANSPORT D'ÉNERGIE

Il est facile de démontrer que, avec deux machines montées en série, le rendement électrique d'un transport, quand il n'y a pas de pertes, est le rapport des forces électromotrices développées dans les induits des deux machines. Pour le démontrer, nous considérerons séparément les rendements des trois parties du système. Si l'on désigne par E_1 la force électromotrice développée dans la génératrice, par E_2 celle du moteur, et par r_1 et r_2 leurs résistances intérieures respectives, on aura

$$\text{Rendement de la génératrice. } \gamma_1 = \frac{E_1 i - r_1 i^2}{E_1 i};$$

$$\text{Rendement de la ligne. . . } \gamma_2 = \frac{E_2 i + r_2 i^2}{E_1 i - r_1 i^2};$$

$$\text{Rendement de la réceptrice. } \gamma_3 = \frac{E_2 i}{E_2 i + r_2 i^2};$$

et, comme rendement final de l'ensemble du système,

$$\gamma = \gamma_1 \times \gamma_2 \times \gamma_3 = \frac{E_2}{E_1}.$$

Si les machines sont montées en dérivation ou en compound, ou s'il y a une perte sur la ligne, les courants dans les induits ne seront plus les mêmes pour les deux machines. Si alors on désigne par i_1 et i_2 les courants respectifs dans leurs induits, on aura dans ce cas pour le rendement électrique du transport

$$\gamma = \frac{E_2 i_2}{E_1 i_1}.$$

Comme exemple, on peut se référer aux expériences¹ faites en 1887 avec deux dynamos Brown à courant continu (fig. 341), entre Kriegstetten et Soleure, sur une ligne de 9,23 ohms de résistance. Dans une expérience, les valeurs relevées étaient : $E_1 = 1231,6$; $E_2 = 988,6$; $i_1 = 14,204$; $i_2 = 14,77$. Les puissances effectives mesurées aux deux extrémités de la ligne indiquèrent un rendement mécanique net de 74,7 p. 100. Dans ce cas le rendement net des génératrices était de 88,8 p. 100 ; celui des moteurs, de 88,1 p. 100 ; tandis que celui de la ligne était de 95,4 p. 100.

Un autre exemple² de transmission à courant continu est fourni par l'installation de Steyermühle (Tyrol), où deux machines Brown bipolaires à anneaux Gramme sont employées à transporter 80 chevaux environ à une distance de 600 mètres à travers une double ligne de fil de cuivre. Voici les détails relatifs aux machines : — *Génératrice*, 67 ampères sous 1 000 volts aux bornes, à 575 tours par minute. Nombre de spires sur l'induit 504, en 126 sections de 4 spires chacune. Diamètre des noyaux d'induit, 70 centimètres. Diamètre des noyaux d'inducteurs, 40 centimètres. Inducteurs montés en série, de 374 spires chacun. La *réceptrice* n'en diffère qu'en ce qu'elle a 456 spires sur l'induit, en 114 sections de 4 spires chacune, et qu'en ce que les noyaux d'inducteurs ont 38,1 centimètres de diamètre. Des mesures prises au frein ont donné pour la génératrice une puissance absorbée de 98 chevaux, et pour le moteur une puissance fournie de 79 chevaux, ce qui représente un rendement commercial de 86 p. 100.

Voici un simple problème relatif à la transmission électrique : — Supposons qu'on veuille faire fonctionner un moteur de manière à lui faire développer un certain nombre de chevaux, et que le fil convenable pour porter le courant ne puisse pas supporter plus d'un certain nombre d'ampères, sans risque de s'échauffer outre mesure. On désire savoir quelle force électromotrice devra pouvoir fournir ce moteur, et quelle est celle qu'il faudra appliquer à l'extrémité du fil du côté de la génératrice. — Soient P la puissance en chevaux à transporter, et i le courant maximum (en ampères) que le fil peut supporter ; la loi bien connue de la puissance fournie par un courant donnera

$$\frac{Ei}{736} = P \text{ (chevaux),}$$

d'où

$$E \text{ (volts)} = \frac{736 P}{i},$$

¹ Voir H. F. Weber, dans le *Schweiz. Bauzeitung*, XI. Nos 1 et 2, 1888 ; et *Journ. Soc. Electr. Engineers*, XVII. 337, 1888.

² *Elektrotechnische Zeitschrift*, XI. 11, 1890.

qui donne l'expression de la force électromotrice (en volts) que la machine doit être susceptible de développer, en tournant à la vitesse qui lui est assignée pour son fonctionnement comme réceptrice. La force électromotrice primaire \mathcal{E} doit d'ailleurs être telle que,

$$\frac{\mathcal{E} - E}{\Sigma R} = i,$$

ΣR étant la somme des résistances en circuit. On en tire

$$\mathcal{E} = E + i \Sigma R,$$

qui donne la force électromotrice primaire cherchée.

APPLICATION DES MÉTHODES GRAPHIQUES AUX PROBLÈMES RELATIFS AUX MOTEURS

Parmi les problèmes traités ci-dessous, les deux premiers se réfèrent à des moteurs en série et sont dus au D^r E. Hopkinson et à M. Alexandre Siemens¹.

Etant donné un système de distribution dans lequel les conducteurs principaux fournissent l'énergie électrique sous potentiel constant \mathcal{E} , on demande de construire un moteur qui, sous une charge déterminée, fasse n tours par minute.

Les courants étant, comme d'habitude, pris comme abscisses dans la figure 501, et les forces électromotrices comme ordonnées, traçons OM représentant le potentiel \mathcal{E} des conducteurs principaux en volts. Les constructeurs de dynamos savent par l'expérience quelle est la fraction de la puissance électrique fournie à une machine du type qu'ils construisent nécessaire au maintien du champ magnétique. Prenons sur OM un point N tel que $\frac{NM}{OM}$ représente cette fraction. On sait également quelle fraction de la puissance ainsi absorbée par l'induit et convertie en puissance mécanique est dépensée en frottements dans les coussinets et aux balais. Prenons le point R tel que $\frac{NR}{ON}$ représente la fraction ainsi dissipée. Sur Ox prenons OH tel que la surface OHR'R

¹ *Journal of the Society of Arts*, avril 1883.

représente la puissance réelle du moteur mécanique en watts. Si, par exemple, le moteur doit fournir 1 cheval, la surface $OHR'R$ devra être équivalente à 736 watts. Dès lors OH représentera le courant, en ampères, et HP la force contre-électromotrice, en volts, que le moteur doit développer. Le moteur devra, en conséquence, être tel que, tournant à n tours par minute, sa caractéristique passe par P .

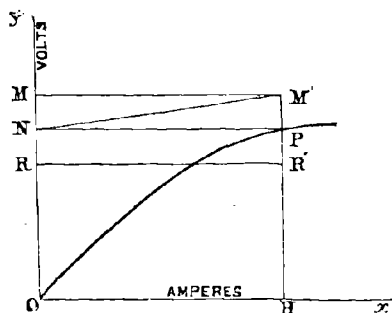


Fig. 501.

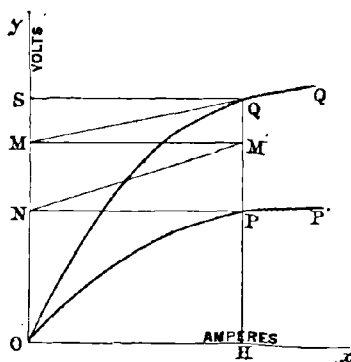


Fig. 502.

Le coefficient économique sera naturellement égal à $\frac{HP}{HM'}$, et le rendement net à $\frac{HR'}{HM}$. La puissance dépensée en excitation est mesurée par la surface NPM' et la tangente de l'angle PNM' représente la résistance de l'induit et des électro-aimants dans le cas d'un moteur en série.

Il est aisé de résoudre des problèmes analogues pour un moteur monté en dérivation, ainsi que pour le cas d'une distribution à courant constant.

Étant donné un moteur exigeant un certain courant et une certaine force électromotrice pour développer sa puissance normale, on demande de construire une génératrice correspondante, la distance entre les machines étant représentée par une résistance électrique de R ohms.

Soient OPP' (fig. 502) la caractéristique du moteur tournant à la vitesse voulue ; PH les volts, et OH le courant correspondant. Menons PN horizontalement, et traçons, à partir de N , NM' sous un angle tel que sa tangente représente la somme des résistances du moteur et de la

ligne. MH représentera alors la différence de potentiel entre les bornes de la génératrice. Prolongeons ensuite HM' jusqu'en Q , de telle sorte que $\frac{HM'}{HQ}$ représente le coefficient économique de la machine du type qui doit servir comme génératrice. La génératrice cherchée sera celle qui, à l'allure convenable, aura une caractéristique passant par O et par Q ; et la tangente de l'angle $M'MQ$ représentera la résistance de l'induit et de l'inducteur de cette génératrice.

Un autre mode graphique de comparaison entre la puissance et le rendement d'un moteur a été proposé par M. Gisbert Kapp. Les vitesses étant portées en abscisses, les chevaux électriques absorbés, ou le nombre de watts divisé par 736, sont portés en ordonnées. La figure 503 donne le résultat de ce tracé dans la courbe AA , dont la

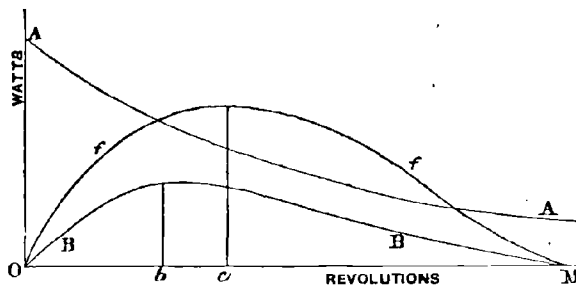


Fig. 503.

Revolutions = Nombre de tours (par minute).

forme varie avec le type du moteur, monté en série dans le cas actuel. On trace alors une seconde courbe BB , dont les ordonnées sont ici les chevaux mécaniques relevés à différentes vitesses. Dans les deux cas on fait varier la vitesse en chargeant plus ou moins un frein dynamométrique. Pour une forte charge, la vitesse est faible et la force électromotrice appliquée très élevée. Sans charge on obtient une certaine vitesse maximum OM sous laquelle (par suite de la force contre-électromotrice développée) il passe très peu de courant. Entre ces deux extrêmes il y aura un point b , correspondant à une certaine vitesse Ob , pour laquelle la puissance sera maximum. Si l'on divise alors les valeurs de la puissance mécanique B par celles de la puissance électrique A dépensée à la vitesse correspondante, ces quotients seront naturellement les rendements commerciaux pour différentes vitesses. Ces valeurs sont réunies à une échelle arbitraire, en une courbe ff qui

montre que le rendement maximum est atteint à la vitesse correspondant au point c .

REPRÉSENTATION GRAPHIQUE D'UN TRANSPORT D'ÉNERGIE

On doit à von Hefner-Alteneck un mode ingénieux de représentation graphique des quantités de puissance dépensée à la station génératrice et utilisée à la station réceptrice :

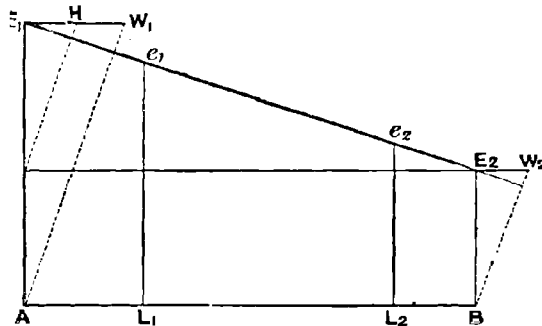


Fig. 504.

Soient (fig. 504) les perpendiculaires AE_1 et BE_2 les forces électromotrices respectives des machines génératrice et réceptrice, et les longueurs horizontales AL_1 , L_1L_2 et L_2B les résistances respectives de la machine située en A, de la ligne (y compris le fil de retour) et de la machine située en B. Joignons E_1 et E_2 ; la tangente de l'inclinaison de cette ligne représentera le courant de circulation. De A et de B menons les perpendiculaires à cette ligne oblique, et prolongeons-les jusqu'aux points W_1 et W_2 , de niveau avec E_1 et E_2 . Les longueurs des lignes E_1W_1 et E_2W_2 représenteront respectivement les puissances transmises et reçues. En effet, par construction, chacune d'elles est proportionnelle à la force électromotrice respective et à l'inclinaison de E_1E_2 . La puissance perdue en échauffement peut, à la même échelle, être représentée par la longueur de la ligne E_1H .

Pour étude plus approfondie de la solution géométrique du problème relatif au transport électrique de l'énergie, voir un travail de Reignier, dans *La Lumière électrique*, XXIII. 352, 1887.

ÉCONOMIE D'UN TRANSPORT D'ÉNERGIE

Comme on l'a déjà vu, l'économie d'un transport d'énergie dépend du voltage sous lequel la puissance est transmise et de la résistance de la ligne. Alors se pose la question de savoir quelle valeur peut atteindre cette dernière pour que l'économie du système soit maximum. Si l'on réduit la perte par échauffement, en employant comme ligne un gros fil de cuivre, l'intérêt du coût de premier établissement de la ligne arrive à contre-balancer, et au delà, l'économie de puissance absorbée. — En 1881, sir W. Thomson a donné la solution de l'une des formes du problème, dans l'hypothèse (1) que le voltage est fixé d'avance, (2) qu'il en est de même de la puissance à transporter. Dans ces conditions, la dépense annuelle totale en puissance absorbée par la résistance de la ligne et le montant de l'intérêt annuel du cuivre employé (y compris l'isolement et la pose) seront minimum quand ces deux facteurs annuels seront égaux l'un à l'autre. Une application erronée de cette loi de Thomson à des cas autres que ceux pour lesquels elle est vraie a donné lieu à de nombreuses confusions. — En 1886, les professeurs Ayrton et Perry¹ ont étudié divers autres cas et sont arrivés à plusieurs conclusions importantes. Si une quantité donnée de puissance doit être fournie par un moteur à l'une des extrémités d'une ligne, sous un certain voltage de la génératrice à l'autre extrémité de la ligne, on réalisera la plus grande économie dans le transport, non pas en maintenant constante la densité de courant, mais en la diminuant proportionnellement à la longueur de la ligne dont on doit faire usage. Plus est faible le voltage qu'on peut demander à la génératrice, plus doit être réduite la densité de courant sur la ligne pour réaliser le rendement maximum. — Plus récemment, M. Kapp² a, dans ses Conférences, donné une solution plus générale, dans laquelle il fait entrer en ligne de compte le voltage et le coût des machines, aussi bien que le prix de la ligne. On suppose que l'on connaisse le coût annuel de la puissance génératrice à la station de départ, ainsi que celui de l'installation par cheval. Parmi les données cherchées, telles que la puissance primaire en chevaux, le rendement total, le voltage au moteur, le prix annuel de la puissance développée, et le courant de travail, ce dernier est le plus important à calculer, car

¹ *Journal Soc. Electr. Engineers*, XV, 120, 1886.

² *Journal Soc. of Arts*, XXXIX, 10 juillet 1891.

il permet de trouver les autres éléments. Cet élément calculé, il arrive à cette conclusion que, en aucune circonstance, il ne sera économique de perdre plus de la moitié de la puissance totale sur la ligne.

Le professeur G. Forbes a donné, dans ses Conférences¹ de 1885 sur la « Distribution de l'électricité », une série de tables utiles, indiquant les frais d'addition d'une tonne supplémentaire de cuivre, et montrant ainsi la part de capital de premier établissement qui est proportionnelle au courant.

Le secret de l'économie dans tout transport à longue distance réside, comme on l'a vu, dans l'emploi d'un voltage élevé. Mais on a reconnu dans la pratique que les machines à courant continu ne se prêtaient pas avantageusement à des voltages allant jusqu'à 3 000 et 4 000 volts, en raison de ce que l'isolement de leurs collecteurs ne résiste pas à ces tensions. Le couplage même de plusieurs machines en série, tout en diminuant le voltage pour chacune d'elles, ne met pas à l'abri du risque de rupture de l'isolant. De là la supériorité des appareils à courants alternatifs qui n'exigent pas de commutateurs. D'ailleurs, quand on veut arriver à des voltages dépassant 10 000 volts, il est préférable d'employer des alternateurs et des moteurs à bas voltage, et d'intercaler dans le circuit des transformateurs qui élèvent le voltage à l'extrémité de la ligne voisine de la génératrice et d'autres qui le réduisent à l'extrémité réceptrice (comme l'ont proposé, dès 1881, MM. Deprez et Carpentier), attendu qu'il est beaucoup plus facile d'isoler parfaitement les bobines fixes d'un transformateur que les éléments mobiles d'une machine rotative quelconque. Quant à la question de savoir s'il vaut mieux, pour des transports à grande distance, employer le système alternatif ordinaire diphase, ou l'un des systèmes plus modernes à trois ou quatre phases, c'est encore un point indécis.

EXEMPLES DE TRANSPORTS D'ÉNERGIE.

SCHAFFOUSE. — Comme exemple de transport à distance moyenne par courant continu, on peut citer l'installation de Schaffouse faite par les ateliers d'Oerlikon, près Zurich, dans laquelle 500 chevaux effectifs sont fournis électriquement à des meules, avec un rendement net de 78 p. 100, la puissance

¹ *Journal Soc. of Arts*, 1885.

initiale étant empruntée à des turbines montées sur la rivière à une distance de 685 mètres et transmise par deux génératrices (dynamos à six pôles, surcompoundées, étudiées par C. E. L. Brown), qui donnent chacune 330 ampères sous 624 volts. Les réceptrices, du même type, portent des inducteurs relativement plus puissants que ceux des génératrices, et fonctionnent à une vitesse qui ne varie pas de plus de 3 p. 100 entre les limites de charge nulle et de pleine charge. La durée des collecteurs est garantie pour 20 000 heures de fonctionnement.

LAUFFEN-FRANCFORT. — Comme exemple de transport à longue distance sous un voltage extra-élevé, nous citerons l'installation expérimentale établie dans l'été de 1891, entre Lauffen et Francfort, distants de 175 kilomètres. A Lauffen était montée dans la rivière Neckar une turbine spéciale à basse pression, actionnant l'alternateur triphase de Brown, décrit page 677, capable de fournir (à pleine puissance) trois courants alternatifs de 1 400 ampères environ chacun sous 50 volts. Ces courants étaient convertis, à l'aide de transformateurs spéciaux, en trois courants plus faibles sous 12 500 ou 25 000 volts. Trois fils de cuivre, de 4 millimètres de diamètre chacun, étaient posés jusqu'à Francfort sur des poteaux élevés, et, portés par environ 10 000 isolateurs en porcelaine à gardes d'huile assurant leur haut isolement. A Francfort les courants étaient reçus dans des transformateurs réducteurs et ramenés à la basse pression de 60 volts à peu près pour l'alimentation de lampes ou de moteurs triphases. Des épreuves¹ ont été faites par un jury à la tête duquel était le professeur H. F. Weber.

[Depuis l'apparition de cette édition en Angleterre, il a été publié dans les divers journaux techniques² des résultats des essais officiels faits sur ce transport d'énergie de Lauffen à Francfort et des mesures y relatives qui y ont été prises. Nous extrayons de ces données, fournies par la direction de l'Exposition de Francfort sous la signature de M. le professeur H. F. Weber, de Zurich, qui a dirigé les expériences, les renseignements suivants.

Ces résultats portent sur 17 expériences de dix minutes chacune, diversement réparties sur les cinq journées des 11, 12, 13, 14 et 15 octobre 1891. Nous les résumons en donnant, pour chacune des grandeurs mesurées ou calculées, le maximum et le minimum trouvés, avec la moyenne qui en résulte.

¹ Au moment où ces feuilles sont sous presse, il nous parvient un renseignement non officiel sur ces épreuves qui ne sont pas encore publiées. Il en résulterait que sous la pression énorme de 30 000 volts, les watts fournis à Lauffen atteignaient le chiffre de 80 500, et que la puissance effectivement reçue et utilisée à Francfort était de 58 000 watts; ce qui donnerait un magnifique rendement de 72,15 p. 100.

² Voir « *L'Industrie électrique* » du 25 juin 1892, p. 267; et « *Bulletin de la Société industrielle de Mulhouse* », Séance du 29 juin 1892, p. 8 et 9.

EXPÉRIENCES LAUFFEN-FRANCFORT. — JOURNÉES DES 11-15 OCTOBRE 1891

Puissance de la chute d'eau : 300 chevaux environ.

Distance Lauffen-Francfort : 175 kilomètres.

	MAXIMUM	MINIMUM	MOYENNES
1. Turbine : Puissance fournie, <i>chevaux</i>	197,4	78,2	140,1
2. Dynamo : Puissance fournie, <i>chevaux</i>	184,8	66,4	127,5
3. — : Tension mesurée entre l'un des trois conducteurs et la terre volts	56,1	50,0	54,1
4. — : Rendement	0,935	0,845	0,903
5. Transformateur primaire : Puissance fournie <i>chevaux</i>	177,6	61,4	124,4
6. — — : Tension à la sortie, entre l'un des trois conducteurs et la terre volts	8 980	8 000	8 644
7. — — : Rendement	0,961	0,925	0,949
8. Ligne : Perte <i>chevaux</i>	25,5	3,4	12,66
9. Transformateur secondaire : Puissance reçue <i>chevaux</i>	152,4	58,0	108,7
10. — — : Puissance fournie. <i>chevaux</i>	145,8	53,5	102,9
11. — — : Tension mesurée entre l'un des trois conducteurs et la terre volts	69,9	60,5	65,0
12. — — : Rendement	0,957	0,922	0,944
13. Rendement du transport, entre les bornes de la dynamo et le lieu de consommation	0,830	0,778	0,810
14. — — entre l'arbre de la turbine et le lieu de consommation	0,753	0,685	0,733

Il est à remarquer que les chiffres de la ligne 14, qui donnent le rendement final, entre l'arbre de la turbine à Lauffen et le lieu de consommation du courant, ne doivent pas être considérés comme s'appliquant à un transport de puissance mécanique, mais seulement à une transformation d'énergie mécanique en énergie électrique, effectuée à travers une ligne de 175 kilomètres de longueur. Pour un transport de puissance proprement dit, il aurait fallu ajouter les résultats relatifs à un moteur établi à Francfort, tandis que, pendant les essais du 11 au 15 octobre, le courant amené à Francfort servait simplement à alimenter des lampes. Les résultats définitifs du transport de puissance mécanique ne sont donc pas encore connus, et l'absence de communications à cet égard depuis plus d'une année fait craindre que le rendement du moteur triphase employé n'ait pas été ce qu'on espérait.

Les tensions (lignes 3 et 11) ont été mesurées directement ; ce sont les moyennes des trois tensions ayant existé entre les conducteurs du courant triphasé et la terre. Les chiffres de la ligne 6 ont été, par le calcul, déduits de ceux de la tension primaire et du rapport de 1 : 160 des enroulements inducteur et induit du transformateur ; ces chiffres peuvent donc être aussi considérés comme ceux des tensions entre l'un des trois fils de ligne et la terre.

Pour obtenir la différence de tension entre deux quelconques des trois fils de ligne, il faut multiplier les chiffres de la ligne 6 par $\sqrt{3} = 1,732$, ce qui donne pour valeur moyenne $8\ 660 \times 1,732 = 15\ 000$ volts.

Après la fermeture de l'Exposition, d'autres expérimentateurs ont dû pousser la tension jusqu'à 30 000 volts. On espère trouver les résultats de cet essai dans le Rapport officiel de l'Exposition, mais rien n'en a encore transpiré jusqu'ici, pas plus que sur la question précédemment laissée en suspens.

CHAPITRE XXVII

RÉGULATEURS POUR DYNAMOS

On est obligé de recourir à des moyens de gouverner le fonctionnement des dynamos, non pas seulement pour maintenir la tension à un nombre constant de volts, ou le courant à un certain nombre déterminé d'ampères, mais également pour d'autres objets, comme de permettre d'élever le voltage d'une dynamo quelconque, de manière à lui faire alimenter certains points éloignés d'un réseau de distribution.

La puissance d'une dynamo dépend de trois éléments intrinsèques, savoir [i] sa vitesse angulaire $\frac{n}{t}$, [ii] le nombre N des conducteurs de son induit, et [iii] le flux magnétique Φ qui pénètre cet induit; et de deux éléments externes, savoir [iv] la résistance du circuit et [v] les forces contre-électromotrices en circuit. Il est, par suite, évident que l'action sur l'un quelconque de ces cinq éléments peut donner lieu à un mode de réglage du fonctionnement de la machine.

L'introduction de résistances dans le circuit principal est toujours une source de pertes et peut être écarté comme mode anti-économique de régulation, uniquement applicable à titre d'expérience. L'introduction de forces contre-électromotrices dans le circuit extérieur est généralement impraticable. Il n'y a donc à considérer que les trois modes d'action sur les éléments intrinsèques de la machine.

Le réglage de la vitesse est nécessairement limité aux cas où chaque dynamo est actionnée par une machine distincte; et dans ces conditions on doit recourir à un régulateur spécial pour remplacer le régulateur ordinaire à force centrifuge de la machine motrice.

On ne peut s'arrêter à l'idée de modifier le nombre de conducteurs que comporte un induit mobile pendant que celui-ci fonctionne. Il est cepen-

dant possible d'en modifier le nombre *actif* par une disposition permettant de déplacer les balais en avant de manière à ce qu'ils captent le courant, non pas au point où le potentiel est le plus élevé, mais en un autre point. Ce mode de procéder utilise virtuellement un certain nombre de spires de l'induit, celles entre le point neutre et le point sur lequel les balais sont avancés, à produire des forces contre-électromotrices internes.

La modification du flux magnétique est le procédé de réglage presque *uniquement employé* ; et on peut le réaliser de deux façons absolument distinctes. Comme le flux dépend de l'excitation (ou des ampères-tours) et de la résistance du circuit magnétique, on peut le faire varier en agissant soit sur l'un soit sur l'autre de ces éléments. L'excitation peut être modifiée de diverses manières : (*a*) à la main, à l'aide de rhéostats et de commutateurs placés dans le circuit d'excitation, ou (*b*) automatiquement au moyen de régulateurs spéciaux substitués à l'action de la main, ou (*c*) par l'emploi d'enroulements compound. De son côté le circuit magnétique est aussi susceptible d'être modifié de plusieurs façons, comme : (*d*) par un mouvement des pièces polaires que l'on rapproche plus ou moins de l'induit, (*e*) par l'ouverture ou la fermeture de tout autre entrefer dans le circuit magnétique, (*f*) par un *avancement longitudinal plus ou moins grand* de l'induit entre les pièces polaires, (*g*) par la dérivation d'une partie des lignes de force, c'est-à-dire par l'application d'une dérivation magnétique entre les branches d'électros qui diminue leur action sur l'induit. Tous ces expédients magnétiques ont été tentés¹, mais avec peu de succès, sauf pour les petites machines.

RÉGULATEURS A MAIN

Ils se composent de séries de contacts à glissement permettant à l'opérateur d'effectuer une des manœuvres suivantes : — (1) intercaler une résistance dans le circuit exciteur d'une dynamo en dérivation, ou l'en retirer (voir le Régulateur d'Edison, fig. 179, p. 269); (2) intercaler des résistances en dérivation sur les bobines magnétisantes d'une dynamo en série, ou les enlever; (3) retrancher plus ou moins de spires excitatrices grâce à leur groupement sectionné sur les inducteurs.

¹ Comme exemple de (*d*) voir la méthode de Firth (*Industries*, IX. 161), dans laquelle les masses polaires se ramènent en arrière à l'aide de vis; et de (*g*), une dérivation magnétique appliquée par Desroziers (*La Lumière électrique*, XXIV. 394). D'autres procédés magnétiques ont été employés par Goolden et Trotter, Langley, P. Müller, Lontin et Diehl.

RÉGULATEURS AUTOMATIQUES

RÉGULATEURS DE PRESSION CONSTANTE
OU DE COURANT CONSTANT

Dans tous les régulateurs automatiques il existe un organe qui doit agir comme le cerveau de l'appareil, veillant en quelque sorte sur toutes les variations et mettant en action le mécanisme destiné à prévenir ces variations. Cet organe de surveillance est ordinairement une sorte d'électro-aimant, souvent une bobine à plongeur mobile. Quand ce sont les volts qui doivent être maintenus constants, la bobine de réglage est enroulée comme une bobine de voltmètre, c'est-à-dire de fil fin, de haute résistance, et montée en dérivation. Quand au contraire on veut maintenir les ampères constants, l'enroulement de la bobine doit être fait comme celui d'un ampèremètre, soit en gros fil, de faible résistance, et intercalé dans le circuit principal. On règle habituellement les alternateurs en agissant sur le circuit de leurs excitatrices ; le courant qui traverse la bobine régulatrice est dérivé des conducteurs principaux à travers un petit transformateur.

Régulateur Goolden. — Les régulateurs automatiques sont de deux espèces : dans les uns le mouvement est donné mécaniquement au régulateur, le réglage seul étant électrique ; dans les autres le mouvement, ainsi que le réglage, sont effectués électriquement. Le régulateur Goolden, figure 505, appartient à la première de ces deux classes. Cet appareil comporte une série de contacts à glissement reliés aux fils respectifs d'un cadre de résistance ou rhéostat¹ qu'on voit au bas de la figure. La pièce de contact est actionnée par une vis verticale qui reçoit elle-même son mouvement, dans un sens ou dans l'autre, suivant les besoins, d'un double volant denté, manchonné sur l'arbre vertical et dont la double denture peut engrener avec un pignon maintenu en rotation par une petite poulie entraînée lentement par le moteur mécanique. L'élément actif, — le cerveau de l'appareil —, est la bobine creuse garnie de fil, qu'on voit à droite, avec son noyau de fer plongeant. Quand le courant qui circule dans cette bobine a son intensité normale, le plongeur est attiré juste assez pour ne laisser embrayer aucune des

¹ Pour la construction de ces rhéostats, le choix des fils, etc., voir Herrick, *Electrical World*, XV. 240, 1890; et Ayrton et Mather, *Phys. Society*, 1891.

deux dents avec le pignon. Si le courant dans la bobine s'affaiblit, le plongeur se soulève et fait embrayer avec le pignon le volant

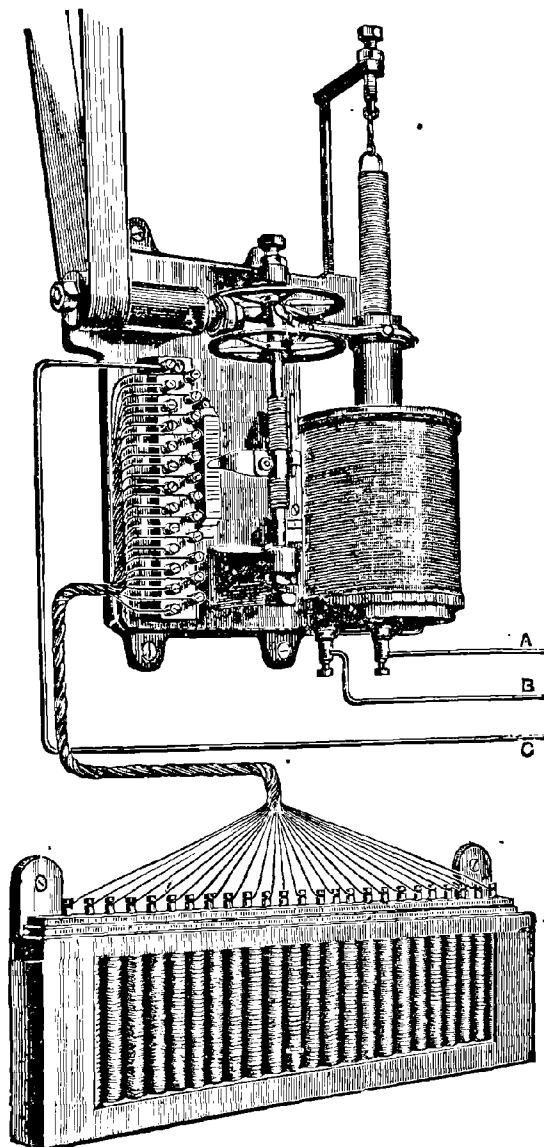


Fig. 535. — Régulateur automatique Gooden.

inférieur qui entre immédiatement en rotation et met en mouvement

le contact à glissement de manière à augmenter l'excitation de la dynamo, et à ramener à sa valeur normale le courant qui parcourt la bobine. Les fils A et B partant de la bobine qui gouverne le système vont au circuit qu'il s'agit de maintenir dans une condition constante, tandis que le circuit exciteur de la dynamo est relié au fil C et à la pièce de contact.

Régulateur Maquaire. — Ce régulateur offre un exemple de la seconde classe de ces appareils dans laquelle les mécanismes de régulation et de mouvement sont tous deux électriques. L'organe régisseur G se compose d'un électro-aimant, dont l'armature est fixée à un ressort et équilibrée de telle sorte que, quand le courant passant dans l'électro-aimant, c'est-à-dire celui du circuit principal d'une série de foyers L, L..., dans la figure 506, est normal, la languette par laquelle elle se termine se trouve hors de contact avec deux vis de butée. La dynamo A

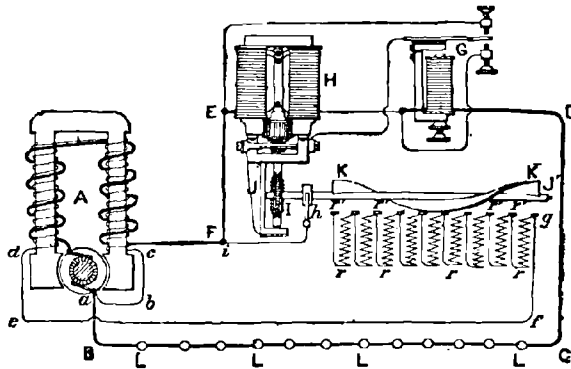


Fig. 506. — Régulateur automatique Maquaire.

a deux bobinages d'excitation, l'un dans le circuit principal ou des lampes ; l'autre dans un circuit dérivé *a b c d e f g h i*, dans lequel sont intercalées les bobines *r r...* d'un rhéostat.

Les prises sur ce rhéostat sont effectuées par la rotation d'un arbre *JJ'*, auquel est fixée une pièce de contact sinueuse *KK*. Le mécanisme qui fait tourner l'arbre *JJ'* est un petit moteur électrique dont les électro-aimants *H* sont dans le circuit principal. Une disposition expliquée page 579 permet de faire tourner l'induit du moteur dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'on le met en dérivation sur l'un ou l'autre des électro-aimants du moteur, dont l'un des balais est relié aux bobines magnéti-

santes à mi-chemin des deux branches, et l'autre à la languette de l'électro-aimant régisseur G. Il résulte de là que, si le courant principal devient trop faible, la languette s'élève, et, en prenant contact avec la butée supérieure, fait tourner l'induit du moteur de manière à modifier la résistance en circuit et à augmenter l'excitation de la dynamo.

Régulateur Brush. — On trouve ici un type plus simple de régulateur purement électrique. Une dynamo en série est amenée à fournir un courant constant par l'introduction d'une dérivation, de résistance variable, entre les extrémités de ses inducteurs ; la résistance de la dérivation est automatiquement réglée par un électro-aimant gouverneur dont les bobines font partie du circuit principal. Le diagramme ci-dessous montre l'ensemble du système (fig. 507). La dynamo D envoie sou

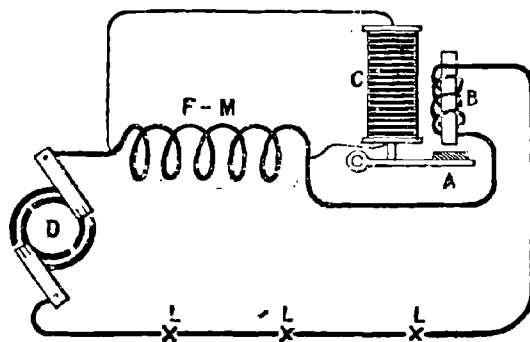


Fig. 507. — Régulateur automatique Brush.

courant dans le circuit qui part du collecteur (comme l'indique la figure) par le balai supérieur, parcourt les inducteurs FM et le circuit des lampes LL, pour revenir au balai négatif. Supposons maintenant qu'on éteigne un certain nombre de lampes par des interrupteurs qui les mettent en court-circuit ; la résistance du circuit étant ainsi diminuée, le courant aura immédiatement une tendance à prendre une intensité supérieure à sa valeur normale, à moins que la force électromotrice de la dynamo ne soit aussitôt réduite dans une proportion correspondante. Tel est l'objet du solénoïde B en circuit. Quand il est parcouru par le courant normal, il attire son armature A avec une certaine force juste suffisante à la maintenir dans sa position neutre. Si le courant augmente, l'armature est attirée vers le haut et fait agir un levier qui comprime une colonne de disques en charbon dur C, montée en dérivation sur les inducteurs. Ces disques, lorsqu'ils sont

pressés les uns contre les autres, conduisent bien le courant ; mais quand leur compression diminue, leur contact imparfait interrompt partiellement le circuit dérivé et augmente sa résistance. Quand A s'élève et comprime C , le courant est plus ou moins dérivé des électroaimants dont l'action se trouve ainsi réglée. Ce régulateur maintient le courant constant, même malgré des variations de vitesse dues au moteur.

Régulateur Thomson-Houston. — Cet appareil, décrit page 436, agit en déplaçant les balais de manière à mettre en jeu des forces contre-électromotrices, et est purement électrique.

Régulateur Statter. — Décrit page 462, il décale les balais par un mouvement mécaniquement solidaire de la rotation de la dynamo, mais il est commandé électriquement.

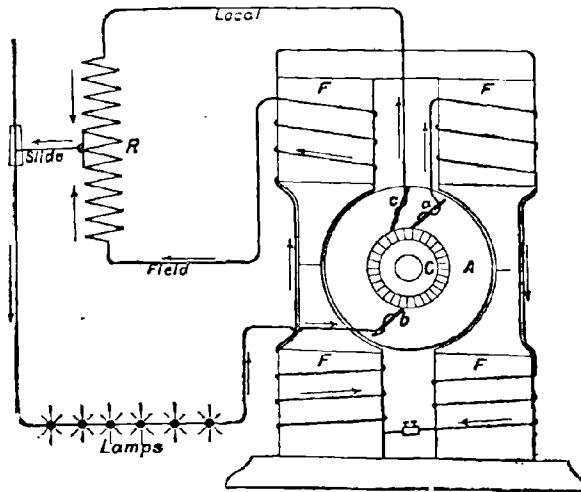


Fig. 508. — Réglage Waterhouse par troisième balai.

Local = Circuit local. — *Slide* = Curseur.
Field = Inducteur. — *Lamps* = Lampes (en série).

Régulateur Waterhouse. — Dans ce cas, le circuit excitateur de la dynamo reçoit et conduit une fraction variable d'un courant qui alimente des lampes à arc en série, comme dans la figure 508 ; l'autre fraction de ce courant passe par un circuit local qui, partant d'un troisième balai, rejoint le circuit des lampes en un certain point d'une résistance intermédiaire. Dans la figure 508, le balai positif est marqué a ,

et se raccorde, à travers les bobines d'excitation avec la résistance R , où aboutit également le fil local venant du troisième balai c .

L'action dépend de la réaction d'induit qui modifie le point de potentiel maximum au collecteur. Si, par le fait de la suppression d'une ou de plusieurs lampes, le courant dans l'induit vient à augmenter, la position de potentiel maximum se déplace de a vers c , et il passe plus de courant par la branche locale, et moins par la branche excitatrice, ce qui diminue l'excitation. Une étude spéciale de ce mode de régulation a été faite par Caldwell ¹, qui a montré qu'il était également applicable à la régulation de pression constante.

Régulateur Wood. — Ce système comporte aussi l'emploi d'un balai pilote, mais avec deux circuits d'excitation enroulés différemment et un dispositif électro-mécanique fixé à la dynamo, figure 509, page 461, pour le déplacement des balais. Dans le régulateur de la figure 509 la bobine dirigeante N actionne un noyau dont le mouvement ouvre ou ferme un circuit de dérivation monté sur un électro-aimant M qui fait mouvoir le collier auquel sont fixés les deux balais. Quand toutes les lampes sont en circuit et la dynamo pleinement

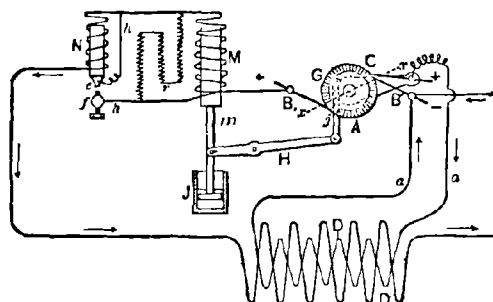


Fig. 509. — Régulateur Wood.

excitée, le balai pilote C est tout proche de B , de sorte qu'il ne passe presque aucun courant par le circuit de désaimantation aa . Si alors des lampes sont mises hors circuit, ce qui porte momentanément le courant au-dessus de sa valeur normale, le noyau dirigeant remonte et rompt le contact en ef ; M déplace alors en avant le balai-pilote C , de manière à renforcer le courant démagnétisant, ce qui diminue l'excitation. La résistance r réduit au minimum l'étincelle en ef .

¹ *The Electrician*, XXII. 217, 1888; et remarques du professeur Nichols, *ib.* 441, 1889.

Régulateur Henrion. — La figure 510 représente un autre régulateur électro-mécanique. Le plongeur de l'électro-aimant directeur A, en se déplaçant au-dessus ou au-dessous de sa position normale, agit sur

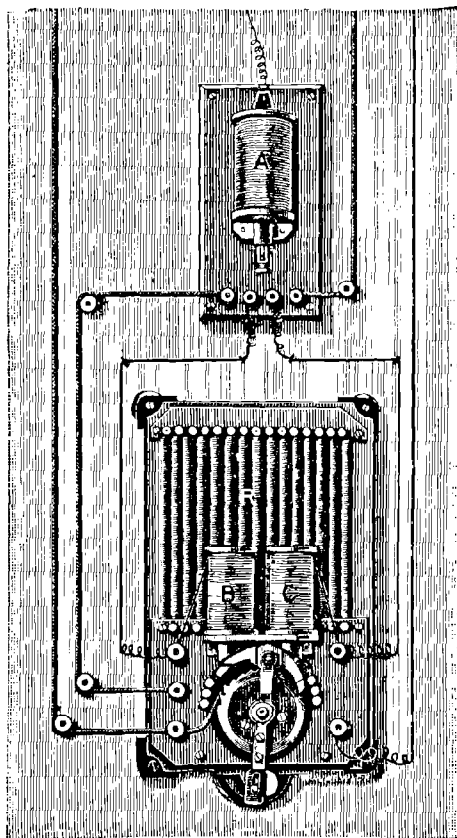


Fig. 510. — Régulateur Henrion.

le mécanisme en mettant en court-circuit l'un ou l'autre des électro-aimants B et C, intercalés tous deux dans le circuit principal. Au-dessous d'eux se trouve un levier oscillant, pivotant autour d'un axe muni d'une roue à rochet; le levier porte lui-même un double rochet en fer. Si l'un des électro-aimants B ou C est mis hors circuit par l'électro-aimant directeur, le rochet correspondant s'abaisse et vient engrener les dents de la roue qui fait mouvoir un bras de contact sur des plots communiquant avec les fils d'un rhéostat.

Régulateur Ravenshaw et Trotter. — On trouve ici un exemple intéressant de l'emploi d'une dérivation magnétique à la production d'un courant constant. Dans la disposition en question, le flux de force à travers le noyau d'induit est réduit dans la proportion voulue par une dérivation des lignes de force qui, de leur trajectoire habituelle, sont amenées à suivre une trajectoire de résistance magnétique moindre, et ce sans état instable, attendu que l'inducteur est saturé à son point

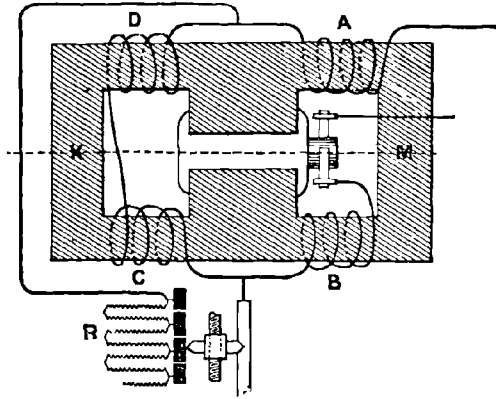


Fig. 511. — Dérivation ou Shunt magnétique de Ravenshaw et Trotter.

ordinaire. La disposition consistant à employer une armature mobile en fer a été remplacée par celle due à Trotter, dans laquelle, l'armature étant maintenue fixe, on en fait varier l'effet en l'entourant d'une bobine contre-magnétisante. Le type d'électro-aimant à double circuit magnétique se prête facilement à cette combinaison, l'une des moitiés de la machine étant maintenue saturée comme un électro-aimant de puissance constante, tandis que l'autre agit comme armature. Dans la figure 511 l'électro-aimant actif est la moitié de droite M, avec ses bobines magnétisantes A et B; l'armature est la moitié de gauche K, avec les bobines C et D. Ces quatre bobines sont connectées de la manière ordinaire, de façon à donner des pôles consécutifs aux pièces polaires; mais un jeu de résistances de réglage R est monté en dérivation sur les bobines C et D. Quand la résistance R est faible, les bobines C et D reçoivent très peu de courant, et, par suite, la presque totalité du flux magnétique engendré dans l'électro-aimant passe par l'armature K au lieu de traverser l'induit. L'introduction de résistances en R détermine au contraire l'excitation d'une aimantation opposée par

les bobines C et D et fait dévier de l'armature un certain flux de force qui pénètre l'induit. Les résistances en R sont graduées et munies de pièces de contact sur lesquelles glisse un curseur actionné par un appareil dirigeant, comme dans la figure 505. On a reconnu la nécessité¹ de découper un entrefer dans le circuit magnétique de l'armature, de manière à empêcher les aimantations descendantes de se produire trop brusquement.

Régulateur Sperry. — Dans cet appareil, le déplacement des balais est effectué par un mouvement mécanique pris sur l'arbre de la dynamo ; mais il est déterminé par une action électrique. Il est représenté dans la figure 324, page 459.

M. Reignier² a attiré l'attention sur une solution du problème de la régulation exacte pour courant constant, dans laquelle on fait varier automatiquement le nombre des bobines livrant passage au courant.

RÉGULATEURS ÉLECTRIQUES POUR MACHINES A VAPEUR

Aucun régulateur à force centrifuge fixé à la machine à vapeur ne peut maintenir réellement constante la vitesse de la machine dynamo ; il n'agit pas, en effet, tant que cette vitesse n'est pas devenue un peu supérieure ou un peu inférieure à sa valeur normale. Peu de régulateurs mécaniques maintiennent la vitesse dans la limite de 5 p. 100 de sa valeur de régime, sous des changements brusques de charge. De là l'idée qui sert de base à tous les régulateurs électriques, que l'admission de la vapeur venant de la chaudière à la machine doit obéir au courant électrique lui-même, la vitesse de la machine à vapeur variant à la demande du circuit électrique. Cette commande s'impose absolument toutes les fois que la charge est exposée à des variations subites, comme dans le cas des génératrices alimentant des tramways électriques. De nombreuses idées plus ou moins pratiques ont été émises à cet égard par Lane-Fox, Andrews, Richardson et autres.

Régulateur Richardson³. — Ce régulateur s'applique au maintien

¹ Voir un travail de A. P. Trotter dans *The Electrician*, XIX. 374, 1887. Un dessin du régulateur lui-même est donné dans *l'Electrical Review*, XIX. 289, 17 septembre 1886.

² *La Lumière électrique*, XXVI. 420, 1887.

³ Brevet anglais, 288 de 1881.

soit d'un courant constant, soit d'une différence de potentiel constante. Dans le premier cas, ses bobines sont intercalées dans le circuit principal, et faites de gros fil; dans le second, elles sont en fil fin et montées en dérivation sur le circuit principal. On en voit les dispositions sur la figure 512.

La valve d'admission de la vapeur dans la machine est une valve équilibrée E à double entrée; sa tige située au-dessus est actionnée par un plongeur P, qui est pressé vers le bas par le bras le plus court d'un levier L, relié à son tour à un long axe vertical muni d'un poids C à son extrémité inférieure et portant à sa partie supérieure le noyau de fer B, enveloppé par le solénoïde A. Un ressort S fait équilibre à la légère pression de bas en haut exercée par la vapeur sur la valve. Quand le courant passe dans le solénoïde A, il soulève le noyau B à une certaine hauteur et laisse pénétrer dans la machine une quantité de vapeur suffisante pour lui donner l'allure nécessaire au maintien du courant. Si la résistance du circuit vient à augmenter par suite de l'introduction de nouvelles lampes en série, le noyau B descend un peu et laisse entrer ainsi plus de vapeur jusqu'à ce que l'allure de la machine se soit accélérée et ait pris la valeur actuellement nécessaire. Pour plus de sûreté, on ajoute

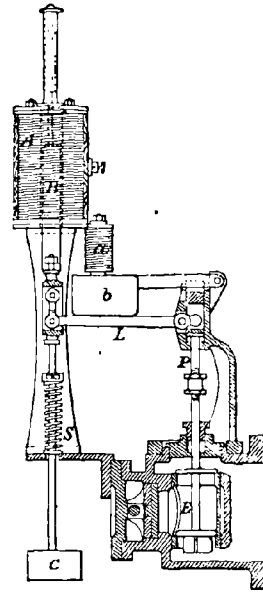


Fig. 512. — Régulateur électrique Richardson.

un électro-aimant distinct *a* qui, lorsqu'il agit, soulève le bloc de fer pesant *b*. Si, par une cause quelconque, le circuit se trouve rompu, le bloc *b* descend immédiatement et coupe l'introduction de la vapeur. — Dans quelques expériences faites à Lincoln en 1883, en présence de l'Auteur, sur une machine Brush de 16 foyers munie d'un régulateur Richardson, on a obtenu les résultats suivants : dix-sept lampes à arc étant allumées, on en éteignit brusquement six ; en quatre secondes la vitesse du moteur tomba de 138 à 107 tours par minute, et le courant qui était de 10,2 ampères avait repris exactement la même valeur. Les dix-sept lampes étant de nouveau allumées, on les mit toutes en court-circuit, en laissant le courant uniquement sur le régulateur et les inducteurs de la dynamo ; la machine s'accéléra en moins d'un coup de piston, et en 14 secondes sa vitesse était retombée à 24 tours, la

machine se trainant juste à la vitesse suffisante pour maintenir en charge les électro-aimants. Dans une autre expérience le circuit des dix-sept lampes fut brusquement rompu, la machine ayant une allure de 140 tours. En cinquante-cinq secondes elle était arrêtée, l'admission de la vapeur ayant été coupée en moins d'un quart de seconde. Aucun régulateur à force centrifuge n'aurait aussi instantanément fermé la vapeur; il n'aurait pas agi tant que la machine n'aurait pas commencé à s'emballer. Avec le régulateur électrique la vapeur était coupée même avant que l'emballement eût pu se manifester. A toutes les vitesses comprises entre 25 et 146 tours par minute et avec un nombre quelconque de lampes allumées, depuis zéro jusqu'à dix-sept, le courant était pratiquement maintenu constant de la façon la plus effective. — Un autre régulateur du même genre appliqué à un système de lampes à incandescence alimentées sous 92 volts donna une constance de potentiel à 1 p. 100 près, bien qu'on fit varier le nombre des lampes de 91 à 31, et la pression dans la chaudière de 2,25 à 3,85 kilogrammes par centimètre carré. Il maintenait également une différence de potentiel absolument constante avec une seule lampe allumée, bien qu'on fit intentionnellement varier de 2,18 à 3,85 kilogrammes par centimètre carré la pression dans la chaudière.

Régulateur Willans¹. — Cet appareil a été appliqué avec grand succès à Victoria Station (à Londres) et ailleurs. Il a cela de commun avec le régulateur Richardson qu'il met en œuvre l'attraction exercée par un solénoïde sur un noyau de fer pour actionner une soupape équilibrée; mais cette action est indirecte, en ce sens que le noyau du solénoïde agit sur la petite valve qui règle un piston hydraulique, celui-ci régissant à son tour la grande soupape à vapeur. L'ensemble du système est représenté par la figure 513, où T est le grand cylindre à soupape d'aspiration. La tige de piston de ce dernier passe en dessous et est directement reliée au piston du relais hydraulique. La solénoïde A attire son noyau B suspendu à un ressort. La position de B détermine celle du levier X qui est relié en un point à la tige de la valve d'aspiration, et en un autre point à celui de la petite valve de réglage. S'il y a chute de potentiel entre les conducteurs principaux, il circule moins de courant autour de A; B s'élève et son oreille saillante soulève le levier X, qui laisse alors pénétrer plus d'eau au-dessus du piston de réglage;

¹ Voir Brevets anglais, 1184, 5291 et 5945 de 1883; ainsi qu'un travail de P. W. Willans dans les *Proc. Inst. Civil Engineers*, LXXXI, pt. III. 1884-1885.

celui-ci s'abaisse en conséquence, entraîne avec force vers le bas la valve d'aspiration et augmente l'admission de vapeur pour l'entraîne-

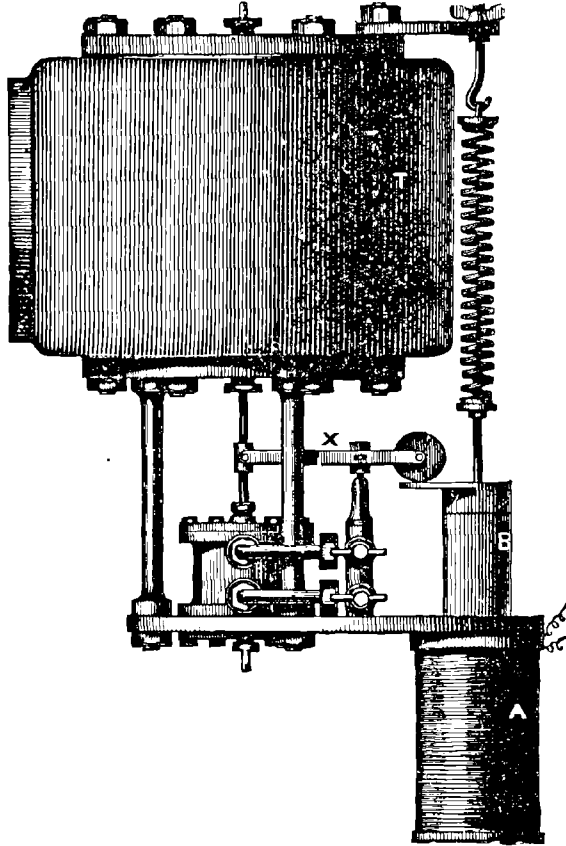


Fig. 513. — Régulateur Willans.

ment de la machine. Un solénoïde relativement faible, excité par un courant de 0,3 ampère seulement et n'absorbant guère que 32 watts de puissance, peut ainsi appliquer sur la valve de vapeur une force d'un grand nombre de kilogrammes et règle aisément une machine de 60 chevaux.

Régulateur Jamieson. — Il consiste en un disque de cuivre tournant entre les pôles d'un petit électro-aimant en circuit et actionnant une valve d'admission à l'aide d'un ressort et d'une transmission par cônes. Il est représenté dans les précédentes éditions anglaises de cet ouvrage.

Un des grands avantages du régulateur électrique est qu'il règle la consommation de vapeur suivant les exigences réelles du circuit électrique et prévient les accidents tant à la dynamo qu'à la machine à vapeur.

RÉGLAGE DYNAMOMÉTRIQUE

Il existe un autre mode de réglage des dynamos trop important pour être passé sous silence. — La puissance transmise par un arbre est le produit de deux facteurs, sa vitesse et le couple mécanique qu'il exerce. Si ω est la vitesse angulaire et W le couple mécanique, on a

$$\omega W = \text{puissance mécanique dans l'induit.}$$

Mais on peut mesurer électriquement la puissance d'une dynamo en faisant le produit de sa force électromotrice par le courant qu'elle envoie dans le circuit. Si l'on désigne par E cette force électromotrice et par i ce courant, on a

$$Ei = \text{puissance électrique (brute) dans l'induit.}$$

Dans une bonne dynamo, la puissance électrique, sans être égale à la puissance mécanique, dépasse 95 p. 100 de cette dernière. On sait en outre que, toutes autres choses égales d'ailleurs, la force électromotrice E d'une dynamo est proportionnelle à sa vitesse de rotation. Il en résulte immédiatement que *le couple mécanique est proportionnel au courant i* . On en tire de suite cette conclusion qu'une dynamo peut être actionnée de manière à donner un courant constant à la condition d'être entraînée par une machine à vapeur gouvernée *non pas par un régulateur à force centrifuge destiné à maintenir sa vitesse constante, mais par un régulateur dynamométrique maintenant un couple mécanique constant*. Un bon dynamomètre de transmission tel que celui de Morin, ou l'une des formes plus récentes, comme celles étudiées par Ayrton et Perry, ou mieux encore celui du Rév. F. J. Smith¹, peut être adapté en vue d'actionner une soupape équilibrée, et satisferrait à la condition de réglage ci-dessus demandée.

Le professeur E. Thomson a suggéré l'emploi d'un appareil dynamométrique pour régler une machine dynamo à courant constant par un déplacement des balais. Une description de ce régulateur a été donnée dans la seconde édition anglaise de cet ouvrage.

¹ Voir son excellent petit livre sur les « *Work-measuring Machines* » (Appareils pour la mesure de la puissance), publié par MM. E. et F. N. Spon (Londres).

RÉGLAGE PAR PRESSION DE LA VAPEUR

On a remarqué ci-dessus que la puissance électrique et la puissance mécanique sont chacune le produit de deux facteurs. Mais dans une machine à vapeur ordinaire, la puissance est également fonction de deux facteurs, la vitesse du piston et la pression de la vapeur, la vitesse angulaire de l'arbre étant proportionnelle à la première, et le couple mécanique transmis, à la seconde. Par suite, la condition de maintien d'un courant constant sera remplie si la pression reste constante. Si les soupapes sont telles qu'elles admettent une quantité déterminée de vapeur par coup de piston et si la pression dans la chaudière est réellement maintenue la même, la pression moyenne derrière le piston devra être constante. Dans la pratique ce résultat n'est jamais atteint par suite des frottements de la vapeur dans les tuyaux de vapeur et les orifices des soupapes. Les frottements intérieurs dans la machine jouent le même rôle, au point de vue de l'obstacle à une auto-régulation absolue, que la résistance électrique intérieure dans la dynamo. On ne peut arriver qu'à une approximation ¹. Dans une expérience faite par M. Pollard avec une machine Gramme, le courant a donné sur un galvanomètre des déviations variant seulement de 59 à 54°, alors qu'on intercalait dans le circuit des résistances supplémentaires qui faisaient passer la vitesse de 436 à 726 tours par minute.

Théoriquement, par conséquent, un courant constant doit être une des conditions les plus faciles à réaliser avec une machine en série. Avec des chaudières suffisantes, une pression de vapeur toujours identique, une admission de quantités égales de vapeur à chaque coup de piston quelle que soit la vitesse, et en laissant d'ailleurs de côté tout régulateur, on *devra* obtenir comme résultat un courant constant. — Il n'est pas possible de satisfaire de même à la condition de maintien d'une différence de potentiel constante, à moins d'employer une dynamo en dérivation dans des conditions aussi peu économiques que peu pratiques. — Mais, dans le cas où l'on cherche à obtenir un fonctionnement sous courant constant, on peut aller plus loin dans la voie de sa réalisation. La manière usuelle de maintenir constante la pression de la vapeur consiste à placer sur la chaudière un manomètre qui

¹ Voir Edmunds dans le *Journal Soc. Teleg. Engineers*, XVII. 697, 1888; et *The Electrician*, XXII. 349, 422, 1889.

indique au chauffeur quand il doit remettre du combustible et quand il doit laisser tomber son feu. Supposons qu'on laisse de côté le manomètre, qu'en son lieu et place on dispose à côté du foyer un ampèremètre, et que le chauffeur pousse ou laisse tomber son feu selon les exigences du système électrique de distribution. Existe-t-il une raison valable quelconque pour que cette manière de diriger le fonctionnement ne soit pas pratiquement efficace, au moins dans le cas d'une machine dynamo en série pour courant constant ?

Finalement, pour rendre le système vraiment automatique, on conçoit qu'on puisse appliquer un mode mécanique de chauffage, sous le contrôle de l'ampèremètre ou du voltmètre, de manière à faire l'alimentation en combustible suivant le nombre de lampes allumées.

CHAPITRE XXVIII

ÉPREUVES DES MACHINES GÉNÉRATRICES ET RÉCEPTRICES

Les épreuves à faire subir aux machines dynamos sont de deux sortes : les unes sont relatives à leur conception et à leur construction ; les autres, à leur fonctionnement. Les premières comprennent des épreuves de résistance des diverses bobines et connexions, ainsi que d'isolement des parties actives. Les autres embrassent les épreuves de rendement sous des charges variables, et celles de puissance pour des vitesses et des conditions de marche différentes.

ÉPREUVES DE CONSTRUCTION

Résistance électrique. — La résistance des diverses parties des bobines d'induits, des bobines d'électro-aimants et des diverses connexions peut se prendre de la manière ordinaire, à l'aide du Pont de Wheatstone ou par l'une des méthodes galvanométriques connues. Le seul point délicat est la difficulté de mesurer des résistances aussi faibles que celles des inducts et des bobines en série qui ne sont souvent que de très petites fractions d'ohm. Dans ce cas, la meilleure méthode à suivre paraît être la suivante : — On lance à l'aide de quelques éléments d'accumulateurs un fort courant dans l'induit ou la bobine dont on veut mesurer la résistance, en intercalant un ampèremètre dans le circuit. Pendant le passage du courant, on mesure, au moyen d'un voltmètre sensible, la chute de potentiel entre les deux extrémités de la bobine. D'après la loi d'Ohm, le quotient du nombre de volts, équivalent à la chute de potentiel, par le nombre d'ampères du courant donnera la résistance en ohms. On peut arriver à une exactitude encore plus grande en insérant dans le circuit, comme l'a suggéré Lord Rayleigh, une bande épaisse de maille-

chort, de résistance connue, et en comparant la chute de potentiel entre les deux extrémités de la bande avec la chute de potentiel dans la bobine. Le rapport entre ces deux chutes de potentiel est égal au rapport des résistances respectives de la bobine et de la bande.

Il faut bien se garder d'oublier que la résistance interne d'une dynamo est *à chaud*, après une marche de quelques heures, notablement plus élevée que sa résistance à froid. Les mesures de résistance doivent en conséquence être prises avant et après fonctionnement.

Résistance magnétique. — La perfection du circuit magnétique peut être vérifiée de deux façons. Si la conception ou la construction du circuit magnétique est telle qu'il puisse y avoir lieu à des dérivations, il est intéressant de déterminer la proportion de ces dérivations. — On peut mesurer la quotité de cette perte en plaçant des bobines d'exploration au-dessus des différentes parties du circuit magnétique, ainsi que l'ont fait les docteurs J. et E. Hopkinson. Ils font passer une simple spire de fil autour de la carcasse des inducteurs en différents points et la relie à un galvanomètre convenable. L'impulsion donnée à l'aiguille du galvanomètre quand on ouvre ou qu'on ferme subitement le circuit de la bobine magnétisante fournit une mesure du flux de force à travers la bobine d'exploration. L'autre manière de reconnaître la perfection du circuit magnétique consiste à relier les bornes de la machine par une résistance convenable connue, et à faire tourner la dynamo à faible vitesse, en augmentant graduellement son allure jusqu'à ce qu'elle s'excite elle-même. (Cette méthode est naturellement inapplicable à un grand nombre de machines à courants alternatifs.) La moindre vitesse d'auto-excitation donne, toutes choses égales d'ailleurs, une mesure de la qualité du circuit magnétique.

Résistance d'isolement. — Pour vérifier la résistance d'isolement entre les bobines d'une dynamo et ses noyaux métalliques, on employait autrefois un pont de Wheatstone et une paire de petits éléments de pile. Les résultats étaient considérés comme satisfaisants si l'épreuve indiquait au moins un million d'ohms. Mais toutes les épreuves de ce genre sont trompeuses en ce qu'elles ne fournissent pas la moindre certitude quant à l'éventualité de rupture de l'isolant sous les tensions électriques de fonctionnement. Il ne faut pas oublier en effet que la tension électrique à laquelle le diélectrique est exposé et qui tend à le percer varie comme le carré du nombre de volts auxquels il est sou-

mis. Le seul mode rationnel de procéder, en ce qui concerne l'isolement, consiste à appliquer un voltage élevé, comme 2 000 à 4 000 volts, et à voir si l'isolant y résiste sans être percé. Le mieux à cet effet est de recourir à un petit transformateur à courants alternatifs fournissant le voltage voulu. — Tous les dynamos, moteurs et transformateurs destinés à fonctionner à haut voltage doivent être éprouvés au double du nombre de volts correspondant à leur fonctionnement normal. — Toutes les épreuves doivent être faites à chaud, après une marche de quelques heures.

ÉPREUVES DE FONCTIONNEMENT ET DE RENDEMENT

L'épreuve du rendement et de la puissance d'une machine, soit comme génératrice, soit comme réceptrice, est une question beaucoup plus délicate qui exige à la fois des mesures électriques et dynamométriques.

Dans le cas de la dynamo considérée comme génératrice, il faut mesurer (*a*) la puissance mécanique en chevaux absorbée, et (*b*) la puissance électrique développée.

Dans le cas d'une dynamo fonctionnant comme moteur et produisant du travail, il y a à mesurer (*a*) la puissance électrique absorbée, et (*b*) la puissance mécanique en chevaux développée.

Mesure de la puissance mécanique. — Il existe quatre méthodes générales pour mesurer la puissance mécanique : —

(*a*). *Méthode graphique.* — Consistant à prendre un diagramme sur la machine à vapeur qui fournit la puissance.

(*b*). *Méthode du frein.* — Consistant à absorber la puissance développée par la machine à l'aide d'un frein à friction tel que ceux de Prony, Poncelet, Appold, Raffard, ou Froude.

(*c*). *Méthode dynamométrique.* — Comportant la mesure sur un dynamomètre de transmission ou sur un wattmètre, tels que ceux de Morin, Hefner-Alteneck, Ayrton et Perry, ou F. J. Smith, de la puissance mécanique réelle à l'arbre ou à la courroie.

(*d*). *Méthode d'équilibre.* — Consistant à équilibrer sur pivots la dynamo elle-même ou le moteur et à en faire leur propre wattmètre.

A ces quatre méthodes il convient d'en ajouter une cinquième, savoir la

(*e*). *Méthode électrique.* — Elle consiste à faire actionner par une

réceptrice la génératrice qui l'alimente, à mesurer électriquement la puissance fournie par l'une ou absorbée par l'autre, et à prendre ensuite, mécaniquement ou électriquement, la différence.

(a). *Méthode graphique.* — L'opération qui consiste à prendre un diagramme indicateur du travail d'une machine à vapeur est trop connue des ingénieurs pour qu'il soit besoin de rien autre que de la mentionner en passant. Cette méthode n'est cependant pas toujours applicable; dans bien des cas, en effet, la machine à vapeur a à conduire d'autres outils et de lourdes transmissions pour ces outils. En pareil cas, il n'y a d'autre moyen que de prendre deux séries de diagrammes indicateurs, l'une correspondant à l'état de fonctionnement de la machine électrique, l'autre à sa condition de repos, sa courroie étant mise à bas; on admet que la différence représente la puissance en chevaux absorbée par ladite machine.

(b). *Méthode du frein.* — Le frein à friction de Prony est bien connu des ingénieurs; mais on ne peut en dire autant de formes plus récentes de dynamomètres à friction. Plusieurs améliorations de détail ont été successivement apportées au type primitif par Poncelet, Appold et Deprez.

Dans la méthode de Prony on mesure la puissance en serrant deux mâchoires en bois contre une poulie montée sur l'arbre; le couple exercé sur les deux mâchoires étant mesuré directement à l'aide de poids suspendus à l'extrémité d'un levier d'un moment suffisant pour empêcher la rotation. Si l'on appelle F le poids qui, à une distance l du centre, fait équilibre à la tendance au mouvement de rotation, la force de friction f multipliée par le rayon r de la poulie sera égale à F multiplié par l .

Ce qui peut s'écrire

$$W (\text{couple}) = f r = F l,$$

d'où il suit que

$$f = \frac{F l}{r}.$$

Si n est le nombre de révolutions effectuées en t secondes, $2\pi \frac{n}{t}$ est, en radians par seconde, la vitesse angulaire à laquelle est affecté le symbole ω , et $2\pi \frac{n}{t} r$ est la vitesse tangentielle v à la circonférence. Or la puissance est le produit de la force agissant à la circonférence par la vitesse à cette circonférence, ou

$$P = f v = \frac{F l}{r} \cdot 2\pi \frac{n}{t} r = 2\pi \frac{n}{t} l F.$$

Si F est exprimé en kilogrammes-poids, et l en mètres, on a, en se rappelant que 75 kilogrammètres par seconde égalent un cheval-vapeur,

$$P \text{ (en chevaux-vapeur) absorbée} = \frac{2 \pi n l F}{75 l};$$

si F est exprimé en grammes-poids, et l en centimètres, il faudra diviser le produit ci-dessus par $7,5 \times 10^6$ pour le réduire en chevaux-vapeur.

Les dernières améliorations apportées au frein de Prony ont une grande importance. — Poncelet a ajouté une tige rigide à angles droits avec le levier, et attaché les poids à l'extrémité inférieure de celle-ci. — Appold a substitué aux mâchoires en bois une bande d'acier qui donne un frottement mieux réparti et a par suite une moindre tendance à la trépidation. — M. Raffard ¹ a remplacé ces organes par une courroie de largeur variable offrant ainsi un coefficient variable de friction, suivant la partie qui embrasse la poulie. — D'autres modifications du même genre ont été depuis apportées au dynamomètre à friction par MM. le professeur James Thomson, le professeur Unwin, M. Carpentier, et les professeurs Ayrton et Perry. — La friction d'une roue de turbine a été également employée comme frein dynamométrique par feu W. Froude.

Tous ces freins dynamométriques mesurant la puissance en la détruisant, on voit que, s'ils se prêtent admirablement à la mesure de la puissance fournie par un moteur, ils ne sauraient s'appliquer, si ce n'est indirectement, à la mesure de celle fournie à une machine dynamo. Il faut, pour opérer avec ces machines, une certaine expérience si l'on veut obtenir des résultats auxquels on puisse se fier; mais avec les formes plus modernes d'appareils, tels que celles de Poncelet et de Raffard, on arrive facilement à d'excellents résultats. Tout le secret consiste à maintenir les surfaces de friction bien lubrifiées, par une abondante alimentation en eau de savon.

(c). *Méthode dynamométrique.* — Nous avons précédemment appelé le frein de Prony un frein dynamométrique; mais un véritable dynamomètre destiné à mesurer la puissance transmise ne doit pas détruire

Pour plus amples renseignements sur ces appareils, nous renverrons le lecteur aux sources suivantes : *Mechanics of Engineering* de Weisbach; *Dictionary of Engineering* de Spon, article « Dynamometer »; *Work-measuring Machines* de Smith; une série d'articles de M. Gisbert Kapp dans *The Electrician*, 1883-1884; *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1877, p. 237 (M. Froude); *Rep. Brit. Assoc.*, 1883 (Prof. Unwin); *Journ. Soc. Telegr. Eng. and Electr.*, XLIX. t. XII. 346 (Prof. Ayrton et Perry).

la puissance qu'il mesure. Les dynamomètres de transmission peuvent se diviser en deux catégories étroitement liées entre elles et comprenant, d'une part, ceux qui mesurent la puissance transmise par l'entremise d'une courroie, et, d'autre part, ceux qui mesurent la puissance transmise par l'entremise d'un arbre.

Dans le cas d'une transmission par courroie, la force réelle qui agit est la différence de tension ou de traction entre les deux brins de la courroie. Si F' est la traction sur le brin mou de la courroie avant qu'elle ne passe sur la poulie de commande, et F la traction sur le brin tendu quand elle quitte cette poulie $F - F'$ représente la traction nette à la circonférence, et $(F - F') r$ est le couple mécanique W . D'ailleurs, si n est le nombre de tours effectués en t secondes, la vitesse angulaire ω est égale à $2\pi \frac{n}{t}$ radians par seconde, et l'on a pour expression de la puissance

$$P = \omega W = fv = 2\pi \frac{n}{t} r (F - F').$$

Comme précédemment, si F et F' sont exprimés en kilogrammes-poids et r en mètres, l'expression doit être divisée par 75, pour fournir des chevaux-vapeur ; ou par $7,5 \times 10^6$ si les quantités ci-dessus sont exprimées en grammes-poids et en centimètres.

M. von Hefner-Alteneck a imaginé un dynamomètre qui peut s'appliquer à une courroie de transmission et qui mesure effectivement la différence $F - F'$ dans les brins tendu et mou de la courroie ; ce dynamomètre est généralement connu sous le nom de dynamomètre Siemens¹. — On en doit d'autres types à sir F. J. Bramwell, W. P. Tatham², W. Froude, T. A. Edison, et autres. Presque tous ces appareils introduisent des poulies additionnelles dans le système de transmission, ce qui augmente les frottements.

Les dynamomètres de transmission qui mesurent la puissance transmise par l'entremise d'un arbre sont beaucoup plus satisfaisants. Presque tous les appareils de cette catégorie comportent une poulie fixe clavetée sur l'arbre, et à côté d'elle une poulie folle qui lui est reliée par un système quelconque de ressort disposé de telle façon que l'allongement ou la tension du ressort mesure l'avance angulaire de l'une des poulies

¹ L'une des formes du dynamomètre Siemens a été décrite par le D^r Hopkinson, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1879. Schröter (*Bayerisches Industrie-und Gewerbeblatt*, 1883) en a décrit un type plus récent.

² *Journ. Franklin Institute*, novembre 1886.

sur l'autre ; cette avance angulaire est proportionnelle au couple transmis. A cette catégorie appartient le dynamomètre bien connu de Morin, dans lequel le déplacement de la poulie folle agit contre une lame droite en ressort reliée en son milieu à l'arbre d'entraînement. L'appareil Morin a reçu diverses modifications dues à MM. Easton et Anderson, Heinrichs¹, Ayrton et Perry², Murray³ et le Rév. F. J. Smith du « Millard Engineering Laboratory » d'Oxford. Le dynamomètre de M. Smith a été complètement décrit, avec figure à l'appui, dans la première édition de cet ouvrage, pp. 404 et 405.

(d). *Méthode d'équilibre.* — M. Smith a imaginé la méthode de mesure suivante qu'il a appliquée lors d'épreuves faites par lui sur quelques petits moteurs Trouvé à l'Exposition de Paris en 1881. Avec les petits

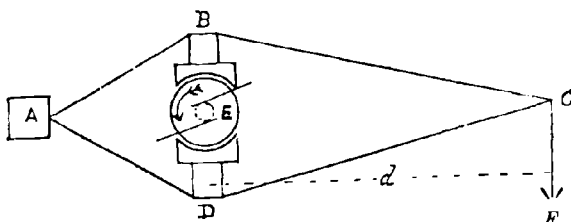


Fig. 514. — Méthode de Smith pour les essais de moteurs.

moteurs on se heurte en effet à cette difficulté, que l'application des moyens ordinaires à la mesure de leur puissance introduit des frottements étrangers dans une proportion relativement considérable. Pour remédier à cet inconvénient, M. Smith monte l'arbre du moteur à essayer, avec son induit, entre deux pivots, ou deux roues à friction, en équilibrant avec le plus grand soin les électro-aimants et le bâti à l'aide de poids. Dans la figure 514, BD représente les électro-aimants et le bâti du moteur dûment équilibrés ; E est l'induit. Quand on y lance le courant, celui-ci tend à tourner dans un sens, et les électro-aimants dans l'autre, la réaction angulaire étant naturellement égale à l'action angulaire. Si la réaction qui tend à entraîner les électro-aimants est balancée par l'application d'une force F (celle d'un ressort antagoniste par exemple) au point C du système ABCD, le moment Fd de cette force

¹ Voir dans l'*Engineering*, 2 mai 1884, et dans l'*Electrical Review*, 26 avril 1884, un excellent compte rendu d'une série d'épreuves faites avec beaucoup de soin et d'habileté par MM. Alabaster, Gatehouse et C^{ie} pour le compte de M. Heinrichs.

² *Journ. Soc. Teleg. Eng. and Electr.*, XII. 163, 1883.

³ *Ibid.*, XVIII. 1889.

mesure le couple mécanique, exactement comme dans le frein de Prony. Le moteur devient ainsi, comme on le voit, son propre dynamomètre, le frottement magnétique, si l'on peut s'exprimer ainsi, entrant l'induit et les électro-aimants se substituant au frottement mécanique entre la poulie et les mâchoires du frein. — Une modification de la méthode d'équilibre, due à Herman Müller, consiste à suspendre, par son arbre, la dynamo dans un cadre, à la façon d'un pendule, et à évaluer la puissance absorbée par son déplacement de la ligne verticale.

M. Deprez et le professeur C. F. Brackett ont proposé d'appliquer cette méthode de balance dynamométrique aux machines dynamos en mouvement. M. le professeur Brackett monte la machine dans une sorte de châssis équilibré sur des pivots situés suivant son axe de rotation et mesure l'effort de réaction angulaire ou le couple mécanique entre les inducteurs et l'induit ; en multipliant ensuite cet effort par la vitesse angulaire $2\pi \frac{n}{t}$, il obtient la puissance transmise à l'induit.

Ces diverses méthodes dynamométriques exigent toutes l'emploi d'un indicateur de vitesse pour compter le nombre de tours par seconde $\frac{n}{t}$ qui entre comme facteur dans le calcul de la puissance en chevaux. On ne saurait prendre trop de précautions pour éviter, surtout dans l'essai des *petites* machines, d'introduire, en appliquant les compte-tours, des frottements inutiles. Une connexion souple, telle qu'un petit fragment de ressort en boudin, entre l'arbre de la machine et l'axe du velocimètre, est un utile intermédiaire à cet effet. Le nombre de tours *par seconde* $\frac{n}{t}$ étant connu, la vitesse angulaire $\omega = 2\pi \frac{n}{t}$ se calcule aisément. Il ne reste plus qu'à multiplier cette dernière par le couple mécanique $W = Fr$ pour avoir la puissance P . Et, si W est exprimé en kilogrammètres,

$$P \text{ (en chevaux-vapeur)} = \frac{2\pi n Fr}{75 t} = \frac{W\omega}{75}$$

(e). *Méthodes électriques.* — Ce mode moderne d'épreuves comporte plusieurs variétés qui impliquent l'emploi de deux, et même dans certains cas de trois, machines. Les docteurs J. et E. Hopkinson¹ proposent d'employer deux machines semblables, l'une comme génératrice, l'autre comme réceptrice, reliées entre elles tant électrique-

¹ *Phil. Trans.*, II. 347, 1886. Voir également *Electrician*, XVI. 347, 1886; et *Electrical Review*, XVIII. 207 et 230, 1886.

ment que mécaniquement. On mesure électriquement la puissance fournie par la première et celle absorbée par la seconde. On fait servir la puissance mécanique du moteur à l'entraînement de la génératrice et l'on mesure mécaniquement, à l'aide d'un dynamomètre, le petit supplément de puissance nécessaire à l'actionner et fourni par une machine à vapeur. Lord Rayleigh ¹, le capitaine Cardew ², dont la méthode date de 1885, M. Menges ³, M. Ravenshaw ⁴, M. Swinburne, et M. Kapp ⁵ ont proposé des modifications à ce mode d'opérer, en vue d'éliminer toute mesure mécanique.

Toutes ces méthodes sont de beaucoup plus précises que les procédés mécaniques rudimentaires de dates plus anciennes, et chacune d'elles a ses avantages ; mais celle d'Hopkinson exige deux machines semblables, et celle de Cardew trois machines, dont l'une doit être assez puissante pour actionner les deux autres. Dans la méthode de Swinburne la perte de puissance due à la résistance des conducteurs est calculée, et cette fraction, déduite de la perte totale de puissance dans la machine, donne la « puissance dissipée », composée des pertes dues aux courants parasites, aux frottements et à l'hystérésis magnétique, qui sont ainsi mesurées en bloc. On détermine cette puissance dissipée en employant la machine comme moteur, ses inducteurs étant excités d'une façon indépendante, de manière à donner à l'induit la même induction magnétique qu'à pleine charge, et la force électromotrice qui lui est appliquée étant telle qu'elle le fait tourner à sa vitesse normale. Il suffit d'une petite dynamo génératrice pour fournir le courant nécessaire. Quand les dispositions sont prises de telle sorte que la machine à essayer tourne à son allure normale, la puissance employée à l'actionner (que l'on mesure électriquement en relevant les volts sur l'induit et les ampères qui y circulent, et en multipliant les deux nombres l'un par l'autre) est égale à la puissance dissipée à pleine charge.

Un exemple fera mieux comprendre la manière de procéder. Supposons qu'on ait à essayer une grande machine de 50 kilowatts, montée en dérivation, donnant 500 ampères sous 100 volts à l'allure de 720 tours par minute, et qu'on ait $r_a = 0,006$ ohm, et $r_d = 12$ ohms ; les ampères perdus seront de $\frac{100}{12} = 8,5$; le courant total, de 508,5, soit 508 ampères ; les volts perdus,

¹ *Electrical Review*, XVIII. 242, 1886.

² *Ibid.*, XIX. 464, 1886 ; et *Electrician*, XVII. 410, 1886 ; et XXI. 275, 1887.

³ *Electrician*, XVI. 371, 1886.

⁴ *Electrical Review*, XIX. 424 et 437, 1886.

⁵ *Ibid.*, XXI. 181 et 215, 1887.

de $508 \times 0,006 = 3$ volts; d'où $E = 103$ volts. On aura ainsi : Watts perdus dans l'induit $= 508 \times 508 \times 0,006 = 1\,548$; Watts perdus dans la dérivation $= 100 \times 100 : 12 = 833$. Si l'on dispose alors d'une petite dynamo, de deux chevaux par exemple, pour fournir un courant sous 103 volts, et qu'avec elle on fasse tourner la grande machine à l'essai, comme réceptrice, sans autre charge que ses propres frottements, son hystérésis et ses courants parasites, elle tournera à moins de 720 tours, puisque, avec un courant aussi faible, son induit ne produit aucune action démagnétisante qui puisse activer son allure. On ajoutera en conséquence un peu de résistance jusqu'à ce qu'elle atteigne sa vitesse. En mesurant alors le courant qu'elle prend et en le multipliant par E , on aura la puissance dissipée. Admettons qu'elle prenne 9 ampères; la puissance dissipée sera de $103 \times 9 = 927$ watts. — On peut dès lors déterminer immédiatement les rendements. Les pertes actuellement connues sont $1548 + 833 + 927 = 3308$. En les ajoutant à la puissance nette, 50 000 watts, on a la puissance brute 53 308 watts, d'où l'on tire : —

$$\text{Rendement brut} = \frac{52\,381}{53\,308} = 98,3 \text{ pour } 100,$$

$$\text{Rendement électrique} = \frac{50\,000}{51\,381} = 95,5 \quad —$$

$$\text{Rendement net} = \frac{50\,000}{53\,308} = 93,8 \quad —$$

ANALYSE DES DIFFÉRENTES PERTES

Aucune distinction n'a été faite, dans ce qui précède, entre les trois sources de pertes qui contribuent à constituer la puissance dissipée, savoir les frottements, les courants parasites et l'hystérésis. Il est cependant possible de séparer la perte par courants parasites des deux autres causes, en faisant des expériences à diverses vitesses¹, attendu que la perte par courants parasites augmente proportionnellement au carré de la vitesse, tandis que les autres pertes sont sensiblement simplement proportionnelles à cette vitesse. La puissance ainsi dissipée est fournie à l'induit par un moteur et mesurée électriquement. — En 1891, une méthode de détermination séparée de ces différentes pertes a été publiée, indépendamment l'un de l'autre, par Kapp² et par Housman³. C'est au mémoire de ce dernier que sont empruntées les figures 515 et 516 qui indiquent la méthode adoptée par ces deux ingénieurs. La voici : — le champ magnétique est excité d'une façon indépendante à

¹ *Journ. Inst. Electrical Engineers*, XVIII. 620, 1889.

² *The Electrician*, XXVI. 699, 1891.

³ *Ibid.*, XXVI. 700, 1891; et *Journ. Inst. Electrical Engineers*, XX. 298, 1891.

une valeur constante. On mesure alors les courants nécessaires pour faire tourner l'induit comme réceptrice sans aucune charge à différentes vitesses, en employant divers voltages. Les résultats obtenus, réunis en une courbe, donnent une ligne droite AB (fig. 515), coupant l'axe des y (courants) au-dessus de l'origine. Une ligne horizontale AD, menée par A, divise les ordonnées, telles que CB, en deux parties,

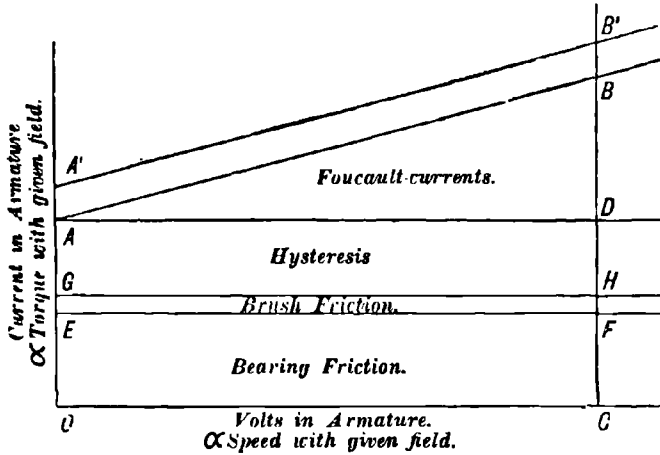


Fig. 515. — Analyse des pertes dans une dynamo.

Current in Armature and Torque with given field
 = Courant dans l'induit et Couple pour un champ donné.
Foucault Currents = Courants parasites.
Brush Friction = Frottements aux balais.
Bearing Friction = Frottements dans les coussinets.
Volts in Armature and Speed with given field = Volts dans l'induit et Vitesse pour un champ donné.

l'une CD, qui représente les pertes proportionnelles à la vitesse; et l'autre DB, qui représente celles qui sont proportionnelles au carré de la vitesse. Pour séparer les frottements des coussinets et des balais, il faut accoupler directement l'induit avec une autre machine semblable, tournant dans ses électro-aimants non excités; l'augmentation de courant nécessaire pour l'actionner donnera une mesure de la perte par frottements, et sur les résultats obtenus on pourra construire les lignes EF et GH.

En faisant une seconde série d'observations avec un champ magnétique d'intensité différente, on obtiendra une seconde ligne A'B', qui sera au-dessus ou au-dessous de AB, suivant que la modification du champ aura augmenté ou diminué les pertes totales. La perte minimum totale se rencontre ordinairement avec une excitation donnant,

pour l'induit, une valeur de \mathfrak{B} voisine de 15 000 ou 16 000 unités ; en effet, lorsqu'on pousse plus loin l'excitation, non seulement l'hystérésis devient beaucoup plus considérable, mais les courants parasites développés dans l'arbre et la poulie par les dérivations magnétiques prennent plus d'importance. Si la courbe AB se redresse pour les valeurs plus élevées, on en conclut que les courants parasites dans l'induit

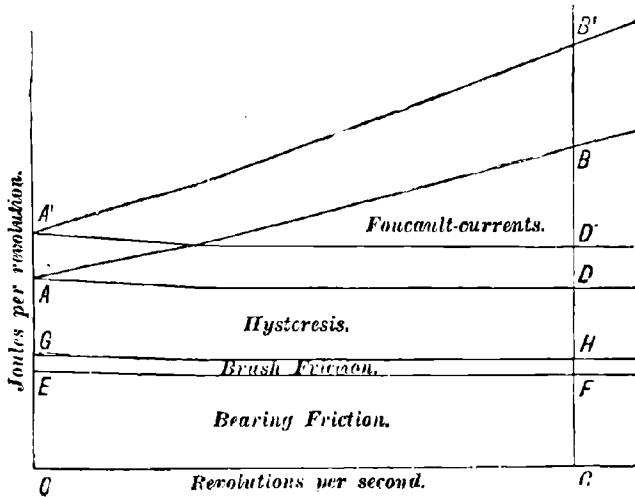


Fig. 516. — Analyse des pertes dans une dynamo.

Joules per revolution = Joules par tour.

Foucault currents = Courants parasites.

Brush Friction = Frottements aux balais.

Bearing Friction = Frottements dans les coussinets.

Revolutions per second = Tours par seconde.

produisent une désaimantation perceptible. — Dans la figure 516 les valeurs trouvées ont été transformées, de grandeurs électriques en grandeurs mécaniques, de manière à permettre l'emploi d'une seule échelle pour des expériences correspondant à différents degrés d'excitation.

M. Kapp a communiqué à l'Auteur une méthode d'épreuve qui permet de déterminer électriquement le rendement net ou commercial avec une précision beaucoup plus grande que celle que l'on peut atteindre avec un dynamomètre mécanique quelconque. Elle exige deux machines de puissance à peu près égale, devant fonctionner l'une comme génératrice, autre comme réceptrice, avec une petite machine auxiliaire de voltage normal, à laquelle les deux autres sont reliées en parallèle ou dérivation. Si l'on désigne par A la machine à essayer, et par B son acolyte, on pourra appeler C la petite dynamo. Les induits

de A et de B sont couplés mécaniquement, et le champ magnétique de B est affaibli à l'aide d'un rhéostat, de telle sorte qu'il puisse fonctionner comme moteur. C donne le courant nécessaire à produire l'excitation et à parfaire la différence entre les courants dans A et dans B. Si l'on intercale un ampèremètre entre l'un des balais de A et l'un des balais de B, pour mesurer le courant passant de l'un à l'autre, et qu'on prenne les deux lectures quand le courant venant de C est amené d'abord aux bornes de A, puis à celles de B, les volts étant les mêmes dans les deux cas, le rapport des deux courants est le rendement de la combinaison des deux machines, et la racine carrée du rapport des deux lectures donne le rendement de l'une quelconque d'entre elles.

Une disposition très étudiée de cônes pour changements de vitesses, destinés aux épreuves des dynamos, due au professeur Ayrton, est décrite dans le journal *Industries* du 22 juin 1888.

Pour plus de détails relativement aux épreuves des dynamos, nous renvoyons le lecteur familiarisé avec la langue anglaise aux sources suivantes : *Report of Committee of Franklin Institution*, 1878 ; — *Crystal Palace Exhibition*, 1882, Rapport du lieutenant F. J. Sprague, Commissaire des États-Unis ; — au Discours d'inauguration du professeur W. G. Adams dans le *Journal Soc. Electr. Engin. and Electr.*, 1884 ; — Thèse de M. J. W. Howell sur des épreuves faites au *Stevens Institute*, réimprimée en un volume sur *l'Éclairage électrique par incandescence*, publié à New-York, 1883, par MM. Van Nostrand ; — *Rapport officiel sur l'Exposition électrique de Munich*, 1882 ; — Épreuves faites par MM. Alabaster, Gatehouse et C^{ie}, reproduites dans *l'Engineering*, 2 mai 1884, et dans *l'Electrical Review*, 26 avril 1884 ; — *Report of Jurors, Cincinnati Industrial Exposition 1883* ; — Discours d'inauguration du prof. W. G. Adams, *Journal of Society of Telegraph-Engineers and Electricians*, XIV. 4, 1885 ; — Rapports de l'Exposition d'électricité de Philadelphie, 1884, publiés dans le *Journal of the Franklin Institution*, 1885 ; — Épreuves de dynamos pour éclairage à arc à l'Exposition de Melbourne, par K. L. Murray, *Journal Institution Electrical Engineers*, XVIII. 1889 ; — Épreuves de dynamos (Desroziers, Edison, Gramme, etc.) à l'Exposition universelle de Paris de 1889, par A. Minet, *La lumière électrique*, XXXV. Janvier 1889 ; — Épreuves sur l'alternateur à arcs de Stanley, par Duncan et Hassen, *The Electrician*, XXVI. Janvier 1891 ; — Épreuves d'une dynamo Goolden et d'un moteur Willans, avec analyse des pertes, *ib.*, XXVI. 36, 1890 ; — Épreuves d'une dynamo Wenström, avec analyse des pertes, par Duncan, *Electrical Review*, XXVI. 116, janvier 1890 ; — Mémoires sur les Causes de pertes, par Hummel, dans *l'Elektrotechnische Zeitschrift*, VIII. 1887, et XII. 1891. — A l'Exposition de Francfort de 1891, il a été fait des épreuves très soignées d'un grand nombre de machines dans des conditions très favorables. Aucun des résultats de ces essais n'avait encore reçu de consécration officielle au moment où cet ouvrage a paru.

CHAPITRE XXIX

CONDUITE DES DYNAMOS

Ce chapitre est consacré à trois points importants de pratique courante : (1) Le couplage de deux ou plusieurs dynamos ; (2) Des instructions générales sur l'emploi et la conduite des dynamos ; (3) Les accidents qui peuvent arriver aux dynamos.

COUPLAGE DE DEUX OU DE PLUSIEURS DYNAMOS EN UN MÊME CIRCUIT

Il est parfois nécessaire de coupler deux ou plusieurs dynamos de manière à leur permettre de fournir à un circuit une plus grande quantité de puissance électrique qu'on n'en pourrait obtenir de l'une d'entre elles séparément. Ainsi il peut arriver que deux machines, dont ni l'une ni l'autre ne pourrait fournir avec sécurité un courant de plus de 1 000 ampères, soient appelées à fournir ensemble 2 000 ampères ; ou encore que deux machines, pouvant fonctionner chacune sous 60 volts, doivent développer 120 volts. Si simples que paraissent ces problèmes, leur solution n'est pas aussi facile qu'on pourrait le croire ; elle dépend en effet de la construction des machines, et particulièrement du mode d'excitation de leurs inducteurs, et de la possibilité de les accoupler sans que leur fonctionnement mutuel en souffre. Il peut arriver en effet, et il arrive que, si le couplage n'est pas correct, une machine absorbe de l'énergie de l'autre et fonctionne comme réceptrice, au lieu de concourir au développement d'une plus grande puissance dans le circuit.

Couplage en série. — Des dynamos montées en série peuvent être

groupées l'une sur l'autre en série en vue de doubler la force électromotrice. Ainsi deux machines Brush, fournissant chacune 10 ampères, et capables d'alimenter chacune 6 lampes à arc, peuvent être groupées en un seul circuit avec 12 lampes à arc en série. La seule précaution à prendre est de veiller à ce que la borne + de l'une des machines soit reliée à la borne — de l'autre, exactement comme pour des éléments de pile montés en tension. — Les dynamos montées en dérivation peuvent également être groupées en série ; ce groupement n'est bon toutefois que si les deux bobines en dérivation sont elles-mêmes couplées en série l'une avec l'autre, de manière à constituer une seule longue dérivation à travers le circuit. — Des machines compound peuvent être groupées en série l'une sur l'autre, à la condition que les éléments en dérivation des deux machines soient reliés en une seule dérivation, qui peut ne s'étendre qu'aux deux induits (courte dérivation double), ou être montée sur le circuit extérieur (longue dérivation double), ou encore former une combinaison de longue et courte dérivation. — Les mêmes considérations s'appliquent à plus de deux machines. — Le groupement des machines à courants alternatifs a été examiné au Chapitre XXIII.

Couplage en dérivation. — Deux dynamos montées en série ne peuvent pas être couplées en parallèle dans un circuit sans une légère modification de montage, autrement il y a interférence dans leur fonctionnement. Supposons en effet que l'allure de l'une se ralentisse un peu, de telle sorte que la force électromotrice de celle-ci soit inférieure à celle de l'autre avec laquelle elle est groupée en dérivation ; la machine dont la force électromotrice est la plus élevée enverra un courant à contresens dans l'autre machine, dont la polarité des inducteurs sera renversée et qu'elle actionnera comme réceptrice. Pour obvier à cet inconvénient, Gramme a conseillé de coupler les deux machines en parallèle aussi bien aux bornes qu'aux balais. C'est ce qu'indique la figure 517.

Les bornes T_1 , T_2 de l'une des machines sont respectivement reliées aux bornes T_1 , T_2 de l'autre, et un troisième fil relie B_1 et B_2 . Si les deux machines développent exactement la même puissance, il ne passera aucun courant par le fil B_1 , B_2 . Si l'une ou l'autre d'entre elles vient à défaillir, une partie du courant issu de l'autre passera par B_1 , B_2 et contribuera au maintien de l'excitation des inducteurs de la machine la plus faible. Cette disposition prévient en effet les renversements.

Le groupage en parallèle de machines montées en dérivation ne présente pas grande difficulté ; il se pratique journellement sur une grande

échelle dans les stations centrales d'éclairage. La principale précaution à prendre est la suivante : toutes les fois qu'une machine supplémentaire doit être mise en circuit, il faut que ses inducteurs soient excités et qu'elle tourne à pleine vitesse avant que la connexion de son induit avec les conducteurs principaux soit établie ; autrement le courant de

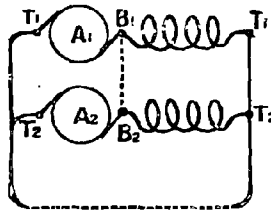


Fig. 517. — Couplage en parallèle de deux machines en série.

ceux-ci y pénètre à contresens et son action se trouve en opposition avec la puissance mécanique qui l'actionne¹.

Une autre manière de grouper en dérivation deux machines en série consiste à les faire exciter l'une par l'autre ; ce procédé égalise la puissance entre les deux machines.

Couplage des machines compound en circuit parallèle. — Le fonctionnement de machines compound en parallèle présente une certaine difficulté ; en effet, si, pour une raison quelconque, le courant issu de l'une des machines vient à augmenter, l'exaltation du champ qui en résulte, par suite de l'accroissement du courant dans les bobines en série, élève la force électromotrice de cette machine, qui alors non seulement contribue dans une trop forte proportion à la puissance d'ensemble, mais encore envoie un courant de sens inverse dans la machine à laquelle elle est reliée ; et celle-ci, en raison de sa force électromotrice réduite, devient alors un simple élément du circuit extérieur de la génératrice la plus puissante. Une action de ce genre peut sans aucun doute se produire ; et, si elle était inévitable, elle rendrait l'emploi des machines compound impraticable dans bien des circonstances où leurs qualités d'auto-régulation sont un précieux avantage. M. Mordey a, le premier, fait observer qu'on pouvait surmonter la difficulté en groupant les machines en parallèle, de telle sorte que non seulement les

¹ Voir Burstyn, dans le *Zeitschrift für angewandten Elektricitätslehre*, 1881, p. 339, ainsi que Schellen (2^e édition), p. 717 ; Ledebœr, dans *La Lumière électrique*, XXVI. 210, 1887 ; Meylan, dans *La Lumière électrique*, XXVI. 379, 1887 ; et Feussner, dans le *Zeitschrift für Elektrotechnik*, 108, 1887. Voir également le procédé spécial suggéré par S. S. Wheeler, Brevet américain N^o 335048 de 1886.

bobines en dérivation de leurs inducteurs soient en circuit parallèle, mais que leurs bobines en série soient également en dérivation l'une par rapport à l'autre ; en d'autres termes, en reliant les balais aussi bien que les bornes, exactement comme l'a fait Gramme pour les machines montées en série. Ce mode de connexions est représenté par le diagramme ci-dessous (fig. 518).

A_1, A_2 sont les induits de deux machines compound, T_1, T_1 et T_2, T_2 les bornes ; le fil B_1, B_2 agissant en conjonction avec le conducteur T_1, T_2 sur

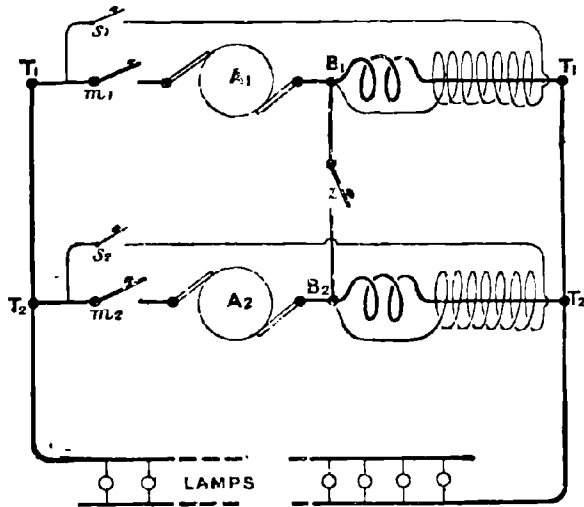


Fig. 518. — Couplage en parallèle de deux machines compound.
Lamps = Lampes.

la gauche met les induits en parallèle. Quand des machines compound sont ainsi couplées¹, elles fonctionnent d'une manière tout à fait satisfaisante, et exercent l'une sur l'autre une action importante de réglage mutuel. Rien n'oblige à employer un manchonnage à griffes ou tout autre mode d'accouplement mécanique effectif, l'entraînement ordinaire par courroie est parfaitement suffisant, même quand les courroies ont des glissements différents, ce qui peut arriver si elles ne sont pas de même épaisseur ou de nature identique.

Ce réglage mutuel s'étend aussi au cas où il existe de légères différences dans les dimensions des poulies entraînant ou entraînés, quand

¹ La méthode proposée par M. Ledebor dans *La Lumière électrique*, XXVI. 210, 1887, est pratiquement identique à celle ci-dessus décrite.

une même machine à vapeur ou un moteur quelconque actionne deux ou la totalité des machines, aussi bien qu'au cas où des machines séparées sont employées à actionner des dynamos distinctes. Bien entendu on ne doit pas indûment exagérer cette propriété de réglage mutuel au point de s'y fier pour remédier à des inégalités de nature sérieuse.

La *raison d'être* de ce réglage est très simple. Si nous prenons le cas de deux machines compound exactement semblables, reliées comme ci-dessus, il est évident que, les inducteurs en dérivation, aussi bien que ceux en série, étant semblables et respectivement en circuits parallèles, l'intensité du champ magnétique dans les deux dynamos sera identique. A la même vitesse leurs forces électromotrices seront donc égales; elles absorberont la même puissance et en développeront autant l'une que l'autre. Mais si, pour une cause quelconque, l'une d'elles se met à retarder sur l'autre en vitesse, sa force électromotrice diminue un peu et elle absorbe proportionnellement moins de puissance. La puissance étant ainsi inégalement distribuée entre elles, la machine à allure ralentie tend à s'emballer, tandis que celle qui va le plus vite tend à se ralentir. De cette façon les deux dynamos exercent l'une sur l'autre un réglage réciproque continu qui se résume par une égale distribution de la puissance entre elles.

Cette concordance de réactions n'existe pas seulement pour des machines compound semblables; on la constate également avec des machines de dimensions, de puissance et de vitesse différentes.

Ainsi de grandes et puissantes machines peuvent être exploitées en circuit parallèle avec des machines plus petites de puissances diverses, et chacune d'elles fournit sa part contributive à la puissance totale.

Dans ce cas cependant il est nécessaire de prendre une précaution de plus. Non seulement les diverses dynamos doivent être reliées ensemble et au circuit extérieur, de la manière précédemment indiquée; mais il faut donner aux résistances des bobines en série des diverses machines ainsi groupées une valeur relative telle que, avec la résistance variable du circuit extérieur, la chute de potentiel dans toutes les bobines en série puisse être la même. C'est ce qui se réalise quand les résistances respectives des diverses bobines en série sont inversement proportionnelles à la totalité (ou à une fraction quelconque de la totalité) du courant que doit engendrer chacune des dynamos.

Quand les résistances des inducteurs en série des dynamos reliées en parallèle sont ainsi inversement proportionnelles à leurs courants respectifs, elles fonctionnent d'une façon satisfaisante en circuit parallèle et possèdent la qualité désirée de réglage, quelles que soient les éventua-

lités de la pratique dans des conditions ordinaires de soin et d'expérience.

L'étude du sujet qui nous occupe ne saurait naturellement embrasser le détail de toutes les actions en jeu dans le fonctionnement de dynamos compound groupées parallèlement. Un examen plus approfondi révèle la nécessité théorique de réaliser des caractéristiques exactement semblables pour toutes les machines ainsi groupées. Pratiquement cependant on reconnaîtra généralement comme suffisantes les précautions ci-dessus.

On a proposé un mode de connexion des machines différent du précédent. Il est très analogue à celui employé, comme on l'a vu ci-dessus, avec les machines Gramme et qui consiste à faire servir le courant de l'une des machines, A, à l'excitation des inducteurs d'une seconde machine B, pendant que le courant de B aimante de son côté les électroaimants de A. C'est un procédé parfaitement praticable. Avec des machines compound, les bobines en série ont seules besoin d'être groupées en conséquence. Mais cette disposition est sujette à certaines objections. Elle ne peut être employée que si les dynamos sont des reproductions exactes l'une de l'autre ; elle est par suite sans intérêt quand on désire utiliser sur un même circuit des machines de dimensions et de vitesses différentes. Il y a une autre objection, c'est que, avec cette méthode, il est toujours nécessaire d'avoir au moins deux machines en marche, alors même qu'une seule est suffisante ou plus que suffisante pour les exigences du moment. Dans ce cas, si l'on veut se servir d'une seule machine, il faut recourir à une disposition de commutateurs, toujours plus ou moins satisfaisante, vu qu'il n'est guère possible d'effectuer le changement nécessaire pendant la marche des machines, sans interrompre si peu que ce soit le courant extérieur, éventualité qu'il faut soigneusement éviter, même momentanément, en exploitation courante. De plus, un accident survenant à une machine met hors de service, non seulement ladite machine, mais aussi celle dont l'excitation magnétique lui est subordonnée.

Le procédé suggéré par M. Mordey paraît plus satisfaisant et peut être employé dans une station d'éclairage ou dans toute exploitation où les exigences variables du circuit doivent permettre de mettre en service des machines supplémentaires quand la consommation augmente, ou de les en retirer quand la demande de courant diminue. Pour effectuer ces mutations il faut se conformer aux dispositions et à l'ordre

d'opérations ci-après. — Chacune des dynamos doit être munie (voir fig. 318) d'un interrupteur s intercalé dans le circuit dérivé; elles doivent être également pourvues chacune d'un interrupteur m en circuit principal, intercalé entre l'induit et le point de raccordement du circuit dérivé, de manière à permettre l'interruption du courant dans l'induit sans rupture du circuit dérivé. Le fil de connexion reliant les balais et qui doit être au moins aussi gros que les conducteurs principaux doit aussi porter un interrupteur z . Supposons alors que la dynamo A_1 fonctionne seule; ses deux interrupteurs s , m , seront fermés. Si alors on veut mettre en circuit la machine A_2 , il faudra opérer dans l'ordre suivant : — porter d'abord A_2 à sa vitesse de régime, puis fermer s et ensuite z ; son excitation magnétique sera ainsi complète; finalement fermer m . Quand on veut mettre A_2 hors circuit, l'ordre des opérations précédentes doit être exactement renversé : — ouvrir d'abord m ; puis z ; ensuite s ; finalement ralentir doucement l'allure de la machine. — Il est bon d'installer une combinaison spéciale d'interrupteurs effectuant dans l'ordre voulu ces opérations successives.

Ainsi que nous l'avons déjà dit, le couplage des alternateurs a été spécialement étudié au Chapitre XXIII.

INSTRUCTIONS GÉNÉRALES POUR L'EMPLOI DES DYNAMOS

Emplacement. — L'endroit choisi doit être sec, à l'abri de la poussière, et autant que possible exposé à un courant d'air froid. Il doit comporter assez de place pour abriter une courroie de longueur convenable, à moins que la dynamo ne soit directement attelée sur le moteur.

Fondations. — Il est de la plus haute importance d'assurer de bonnes fondations à toute dynamo; et, si celle-ci est actionnée directement, sans être montée sur le même bâti que son moteur, il faut prévoir une fondation assez large pour recevoir les deux machines.

On peut employer à cet effet la pierre ou le béton, ou même la brique hourdée au ciment, et recouverte d'une grande pierre épaisse. Pour les petites machines, les boulons de fondation peuvent être scellés au soufre ou au plomb coulé dans des trous pratiqués dans la pierre; mais pour les grandes machines, les boulons doivent être assez longs pour traverser les fondations de part en part; ils sont alors assujettis à l'aide de rondelles en fer et de clavettes ou d'écrous. Si des trous profonds ont été

pratiqués dans le massif pour les boulons de fondation, il est bon de les remplir avec du ciment délayé clair, après la mise en place des boulons.

Glissières. — Toutes les dynamos actionnées par courroies doivent être pourvues d'un système tendeur destiné à rattraper l'allongement des courroies. Si la machine ne comporte pas de glissières sous son bâti et des vis de serrage, on peut recourir à l'emploi d'un galet tendeur ; mais ce procédé est moins satisfaisant que le précédent. Dans tous les cas, le socle de la dynamo doit être bien de niveau, et son arbre soigneusement dégauchi par rapport à la poulie d'entraînement.

Avant la mise en marche. — Bien inspecter la dynamo avant de la mettre en marche pour la première fois. Enlever les chapeaux des paliers et nettoyer les coussinets ainsi que les portées. Les remettre en place, mais ne pas trop serrer les vis. S'assurer que les graisseurs sont bien remplis et que l'écoulement de la matière lubrifiante se fait convenablement. Employer des burettes en cuivre. Faire tourner l'induit à la main pour s'assurer que rien n'accroche, et qu'aucun fil n'est détaché ou qu'aucun fragment n'en adhère à l'induit. Nettoyer le collecteur avec de la toile d'émeri aussi fine que possible, et veiller soigneusement à ce qu'aucune poussière ou poudre de cuivre ne reste entre ses touches. Une brosse dure, en soies de porc, bien sèche est utile pour cet objet. Contrôler le bon fonctionnement des porte-balais et le bon ordre des embecquetages de mise hors contact, s'il en existe. Vérifier l'ajustement des balais (c'est-à-dire leur taille en biseau convenable) ; certains constructeurs fournissent un outil spécial pour cette taille sous l'angle voulu. Régler les balais, d'abord en les serrant très fermement dans les porte-balais, de manière à ce qu'ils saillissent de la longueur voulue. (À cet effet un grand nombre de constructeurs garnissent les porte-balais, d'un guide tel que P, fig. 280.) Les régler en second lieu de façon à les faire porter avec une pression modérée mais bien assurée sur le collecteur. Veiller enfin, à ce que, ainsi réglés, ils occupent exactement les positions convenables. Dans les machines bipolaires, les balais doivent porter sur deux touches diamétralement opposées du collecteur. Dans les machines à quatre pôles, ils doivent être en contact avec des touches espacées d'un quart de la circonférence. (Les constructeurs marquent ordinairement au pointeau deux touches du collecteur de manière à repérer ces positions.) Ces divers réglages étant ainsi contrôlés, mettre les balais hors contact jusqu'à ce que la machine soit en marche. Toutes les fois qu'une dynamo est individuellement

actionnée par une machine, il est bon de n'appliquer les balais qu'après démarrage et de les soulever avant arrêt, pour éviter leur détérioration par suite d'une marche éventuelle de la machine à contresens. Mais le courant doit toujours être interrompu avant la mise des balais hors contact ; autrement des étincelles nuisibles détérioreraient le collecteur.

Les balais étant ajustés et les graisseurs remplis, vérifier l'exactitude des connexions et serrer leurs vis à fond.

Mise en marche. — On commence alors à tourner avec les balais hors contact et l'interrupteur principal ouvert, uniquement pour voir si tout est mécaniquement en bon ordre et si les paliers ne chauffent pas. On abaisse ensuite les balais. Si la machine est montée en dérivation, elle s'excitera immédiatement elle-même, bien que l'interrupteur général soit encore ouvert.

Si elle doit alimenter des lampes à incandescence, ne fermer sous aucun prétexte l'interrupteur général jusqu'à ce qu'on se soit assuré du voltage exact qu'elle fournit, sous peine de brûler toutes les lampes. Si la vitesse est trop grande, le voltage peut en effet être excessif. Une lampe témoin ou un voltmètre indiquera si tout est en bon ordre électrique. Avant de fermer l'interrupteur principal, bien examiner les balais pour voir s'il ne s'y produit pas d'étincelles. S'il y en a la moindre apparence, décaler les balais en avant ou en arrière jusqu'à ce qu'elles disparaissent complètement. Jusque-là, ne pas fermer l'interrupteur général et ne pas mettre les lampes en circuit.

Surveillance journalière. — Outre le graissage quotidien, il faut veiller aux balais et voir s'ils n'ont pas besoin d'être avancés ou retailés. Le collecteur ne doit pas être huilé, mais seulement essuyé avec un chiffon gras ou un morceau de cotonnade (*non pas* des déchets) enduit de vaseline. (Cette réserve ne s'applique pas aux machines pour arcs, à collecteurs spéciaux avec grands espaces d'air, comme ceux des machines Thomson-Houston, qu'on peut huiler librement.) Si la dynamo reçoit son mouvement d'une transmission pesante, de telle sorte qu'elle ne risque pas de tourner à contresens au démarrage ou à l'arrêt, il n'y a aucun inconvénient à laisser les balais constamment en contact avec le collecteur. Un grand nombre de dynamos donneront des étincelles à pleine charge, à moins qu'on n'avance leurs balais au delà du point pour lequel elles n'en donnaient pas en circuit ouvert. La marche sans étincelles est un point essentiel si l'on veut que le collecteur four-

nisse un long service. Le surveillant ne saurait trop profondément se pénétrer de la nécessité d'un soin minutieux à cet égard. La surface du collecteur d'une machine moderne bien étudiée acquerra promptement, s'il est convenablement soigné, un poli d'un beau brun. Il pourra, par contre, être perdu en quelques heures entre des mains inexpérimentées ou négligentes. Si les balais sont trop serrés, il se rayera et se creusera de sillons. S'ils appuyent trop peu ou si des vibrations les font sauter, ou s'il s'y produit des étincelles, le collecteur se mangera sur les bords de quelques touches et prendra du faux-rond. Le seul remède en pareil cas est de le tourner avec soin ou de le remettre bien au rond à la lime ; mais cette éventualité doit se présenter très rarement.

ACCIDENTS DES DYNAMOS ¹

Les quatre cinquièmes au moins des mécomptes et accidents qui surviennent avec les dynamos sont dus à des causes plus imputables à l'ingénieur-mécanicien qu'à l'électricien. D'un autre côté, un grand nombre des défauts mécaniques qui se manifestent dans les machines auraient pu être évités si l'ingénieur avait eu une connaissance plus complète des conditions électriques et magnétiques qui régissent le fonctionnement de ces machines. Il n'arrive plus souvent, de nos jours, que des induits se disloquent. Ce genre d'accident s'est rarement présenté depuis que de bons ingénieurs ont pris en mains la construction des dynamos. Les points auxquels l'ingénieur ordinaire a le plus de difficulté à se faire sont, d'une part, le fait que c'est sur les conducteurs de cuivre bien plus que sur les noyaux de fer que s'exercent la traction et l'effort du champ magnétique, et, d'autre part, la nécessité d'assurer partout un bon isolement. Tous les isolants étant mécaniquement mauvais, il risque, en cherchant la solidité mécanique, d'employer les matières isolantes dans des proportions qui nuisent à leurs qualités. À défaut de connaissances électriques suffisantes il peut appliquer les isolants d'une manière erronée et aboutir à une dynamo qui ne résiste pas aux dures conditions de son fonctionnement effectif.

Combustion des Induits. — Des bobines d'induit s'échauffent parfois

¹ Voir un article de l'Auteur dans *The Electrician*, XX. 82, 1887 ; voir aussi des articles dans *l'Elektrotechnische Zeitschrift*, XI. 186, 1890 ; et dans *l'Electrical World*, XIV. 99, 184, et XVIII. 383, 1891.

isolément jusqu'au rouge et brûlent leur isolant. D'autres fois un induit entier est surchauffé et se carbonise complètement. Ce dernier accident se présente plus fréquemment pour les induits des moteurs que pour ceux des dynamos. En effet, si, par accident, un courant excessif est demandé à une dynamo, le couple exercé sur son induit devient généralement tel qu'il fait tomber la courroie ou qu'il arrache la machine motrice. Avec un moteur, au contraire, si son induit est calé au point de ne pouvoir tourner, il continue à livrer passage à un énorme courant si l'alimentation n'est pas immédiatement coupée. La combustion d'une seule section ou bobine de l'enroulement est due parfois à un court-circuit qui s'établit au collecteur entre deux touches contiguës ; mais plus souvent à un court-circuit dans l'induit lui-même. Dans les induits en tambour et dans les formes d'induits en anneau dont les connexions sont faites de telle façon que les enroulements se croisent les uns sur les autres, cet accident peut résulter de la disparition de l'isolant par suite de frottements. Dans les anciens induits en tambour, les courts-circuits étaient fréquents, par suite du chevauchement de bobines, à des potentiels très différents, sur les calottes des induits. Le court-circuit entre un fil imparfaitement isolé et le noyau de fer sur lequel il est appliqué est également une cause fréquente de dérangement. Ce n'est pas qu'un seul contact de cette nature puisse par lui-même avoir d'inconvénient ; mais, un défaut de ce genre préexistant, s'il vient à se déclarer une faute en un point quelconque du circuit d'utilisation, il se produit immédiatement une dérivation sérieuse à la terre. Ainsi le danger de commotions pour les personnes touchant fortuitement un point quelconque du circuit est plus grand s'il existe un défaut unique dans la dynamo. Certaines maisons — surtout les maisons américaines¹ — prescrivent l'isolement du bâti même de la dynamo par rapport au sol. C'est une précaution ridicule (an absurdity) pour les machines en général, excepté pour celles qui fonctionnent à haut voltage. L'expérience de l'Auteur le conduit, au contraire, à recommander que le socle de la dynamo soit en parfait contact avec la terre. Dans ces conditions, en effet, le danger d'accident pour les surveillants, — qui est considérable dans le cas de machines à voltage élevé isolées de leurs fondations —, est réduit à un minimum. Un contact entre un conduc-

¹ Les paratonnerres appliqués sur un grand nombre de dynamos aux Etats-Unis sont eux-mêmes une erreur. Si le socle de la dynamo est en bon contact avec la terre, point n'est besoin de paratonnerre sur la dynamo. Pour être efficaces les paratonnerres doivent être établis extérieurement à la salle des machines, là où y pénètre le circuit aérien.

teur d'induit et le noyau de fer peut provenir du desserrage des tôles de fer qui par frottement se font jour à travers les couches d'isolant. Si l'isolant est hygrométrique et prend de l'humidité, il peut se rompre quand la machine fonctionne. Quelquefois les induits sont détruits par suite de la carbonisation de la matière isolante due à l'échauffement, non pas des conducteurs, mais du noyau de fer. Tel est le cas si le noyau n'est pas suffisamment divisé, ou bien si l'isolement entre les disques de noyau est défectueux. La combustion des frettes, qui se présente accidentellement, est due à ce qu'on ne s'est pas conformé aux exigences électriques. Le mica seul, en bandes, sous les frettes est insuffisant, à cause de sa tendance à se réduire lentement en poudre. Il doit être placé entre des bandes d'une autre substance isolante, telle que de la fibre vulcanisée, qui lui sert de matelas mécanique.

Comme toutes les pièces mécaniques en mouvement, les dynamos sont exposées à un échauffement des coussinets, si l'on n'apporte pas le soin convenable à leur graissage et si ceux-ci ne sont pas maintenus en bon état de propreté.

Rupture des Connecteurs. — Ce genre d'accident, rupture des pièces qui relient les conducteurs d'induit aux touches du collecteur, paraît dû à des causes tant mécaniques qu'électriques. Ces pièces de connexion traversent une zone partielle du champ magnétique et portent en même temps des courants intenses qui sont renversés deux fois par tour. Elles sont par suite successivement soumises, dans leur rotation, à des efforts latéraux dont la répétition incessante finit par les rompre. Le moyen de prévenir cet accident consiste à leur donner une grande résistance mécanique, ou à les constituer par un toron, ou à s'arranger de façon à ce qu'elles soient en dehors de l'épanouissement du champ.

Disjonctions dans l'Induit. — Il se produit parfois une disjonction aux points où les conducteurs d'induit ou les bobines élémentaires sont couplés ou reliés au collecteur. Cet accident se manifeste [i] par des étincelles que ne peut empêcher un décalage des balais ni en avant ni en arrière, [ii] par l'aspect que prennent une ou plusieurs touches du collecteur qui semblent brûlées sur les bords. Un moyen¹ de localiser

¹ Un autre procédé, applicable uniquement aux induits en tambour, est dû à Loomis (*Electrical Engineer*, New-York, décembre 1891) et consiste à soulever l'induit à la main et à le faire tourner lentement en opposition avec le couple mécanique qui agit sur lui pendant qu'il est alimenté par un courant provenant d'une

ce genre de faute consiste à faire tourner les machines à circuit ouvert, c'est-à-dire avec les balais portant sur le collecteur, mais sans lampes en circuit. Au bout de quelques minutes de marche on arrête la machine et l'on tâte si quelques-uns des connecteurs sont chauds ; cet échauffement indique une disconnexion partielle. Si une bobine entière est chaude, c'est l'indice, non pas d'une disjonction, mais d'un court-circuit.

Faux-rond du Collecteur. — Il peut arriver que l'une des touches du collecteur se brûle ou se détruise de manière à se trouver en contre-bas des autres, ou que deux touches consécutives soient ainsi endommagées, ce qui constitue un méplat sur la surface cylindrique. Diverses idées ont été émises pour expliquer l'origine des méplats. Si l'une des touches se trouve être en cuivre accidentellement plus doux que le reste, elle peut s'user plus vite ; mais cette éventualité est peu probable. Une disjonction partielle dans l'induit au point relié à la touche considérée du collecteur donnera naissance, à chaque demi-révolution, à une étincelle qui piquera cette touche. On a vu également se produire des méplats suivant la longueur de la touche par suite d'une paille existant en un point.

Une autre cause indubitable de ces accidents réside dans un entraînement mécanique trop faible ou défectueux. Si un induit, fixé par un manchon à trois ailettes, est monté sur un arbre faible qui fléchit, il est possible qu'il se produise des vibrations périodiques sous lesquelles les balais sautent et donnent des étincelles en des points déterminés autour du collecteur. Avec des induits bien construits, bien équilibrés et tournant sans vibrations, la formation de ces méplats n'est pas à craindre si la pression des balais est suffisante. Toutes les fois qu'une touche du collecteur présente des traces de combustion sur ses bords, il faut immédiatement chercher à prévenir la formation d'un méplat. A l'aide d'une lime fine, on adoucira la surface du collecteur dans le voisinage du point menacé. Au besoin, on tournera légèrement le collecteur. On emploiera à cet effet un crochet étroit de manière à ne pas trop tirer sur le cuivre ; on polira la surface avec de la toile d'émeri très fine et on s'assurera qu'en aucun point la lame fine de mica n'a été rabattue sur le bord de l'une quelconque des touches.

source extérieure. S'il se présente une position pour laquelle la rotation à la main soit plus facile, il est clair que dans cette position la disjonction arrête une partie du courant, de sorte qu'on peut immédiatement trouver la faute en suivant les connecteurs venant des touches du collecteur qui sont à cet instant en contact avec les balais.

Fautes dans les Bobines inductrices. — Des accidents se présentent quelquefois dans les bobines des électro-aimants. Ils peuvent se manifester sous deux formes, des disjonctions et des courts-circuits. S'il y a disconnexion, la machine ne s'excitera généralement pas. Pour s'en assurer, on détachera les connexions terminales de la bobine suspecte et on l'essaiera. Un élément Leclanché et un simple galvanoscope, ou, à défaut de ce dernier, une sonnerie électrique ordinaire, suffiront pour montrer s'il y a ou non discontinuité du fil. Si les carcasses des bobines sont flexibles ou si leurs bords ne sont pas assemblés, leurs vibrations peuvent amener la rupture des premières spires, en un point au-dessous de la surface qu'on ne peut atteindre qu'en dévidant la bobine. Un court-circuit entre deux quelconques des spires a pour effet de laisser froide la partie ainsi mise en court-circuit, tandis que les autres spires sont chaudes. Dans une bobine en dérivation, la mise en court-circuit d'une partie des spires détermine un échauffement dangereux du reste. Un court-circuit peut se produire entre les bâtis ou les noyaux et les bobines ; on le constatera également à l'aide d'une sonnerie ou d'un galvanoscope, comme précédemment. S'il existe un unique défaut par contact de ce genre entre des bobines et la masse métallique des électro-aimants, la moindre faute en un autre point, — induit, collecteur, balais, bornes ou circuit —, peut déterminer un grave accident. L'Auteur s'est trouvé une fois en présence d'une double faute curieuse qui échappa quelque temps à toutes les investigations. Dans une petite dynamo Brush pour éclairage à arc, deux fautes distinctes se trouvaient aux vis fixant le support de fer qui maintient le collier d'une des paires de balais ; il en résultait que, sur les quatre paires de bobines composant l'induit, deux étaient en court-circuit.

Accidents des Alternateurs. — Les alternateurs sont exposés à des accidents particuliers. Ils présentent parfois des pulsations régulières dont les intervalles concordent exactement avec les révolutions de l'induit. Ce phénomène ne peut être dû qu'à un double défaut d'équilibre. Si l'une des paires de pôles de l'inducteur est plus faible que les autres et si l'une des bobines de l'induit est défectueuse, la concordance de position entre ces deux éléments, qui se produit une fois par tour, peut déterminer un affaiblissement momentané du courant. Les alternateurs sont généralement construits en vue de voltages élevés et sont en conséquence exposés à des défauts d'isolation qui ne se rencontrent pas dans les machines à faible tension. Si les deux bagues collectrices sont montées côte à côte sur l'arbre, une étincelle, ou plutôt un arc,

peut jaillir de l'une à l'autre, à moins qu'elles ne soient séparées par une large rondelle d'ébonite faisant une forte saillie entre elles. Les efforts d'arrachement sur les bobines induites, particuliers aux courants alternatifs (voir p. 624), sont cause d'un grand nombre d'accidents dans cette classe de machines.

Causes obscures d'accidents. — Il arrive quelquefois qu'une dynamo ne donne aucun courant. En semblable occurrence, les premiers soupçons doivent se porter sur un accident de connexions dans les circuits. On examinera donc toutes les bornes et vis de serrage. Le vernissage du dessous d'une tête de vis, qui ne doit pas être vernie, peut être la cause occasionnelle du mal. Il peut encore provenir d'un peu de poussière interposée entre les balais et leurs gaines, ou entre le porte-balais et son axe. Une machine en dérivation ne s'excitera pas si son circuit principal est en court-circuit ; et une machine en série, si ce circuit est ouvert. Si aucun des expédients mis en œuvre n'aboutit à faire exciter la machine, on essaiera de renverser les connexions qui conduisent le courant des balais aux bobines excitatrices.

Bien des accidents proviennent d'un graissage trop abondant, ou d'écoulement de l'huile des paliers sur le collecteur, ou de sa projection dans l'induit. L'huile est susceptible de détériorer les matières isolantes en attaquant le vernis et en facilitant l'adhérence de la poussière et de la limaille de cuivre provenant des balais. De même, si l'huile arrive au collecteur, elle se carbonise sous les balais et forme entre les touches un mince filet charbonneux tendant à faciliter un court-circuit. Cet inconvénient est moins à redouter avec le mica employé comme isolant qu'avec l'amiante ou le papier. On a constaté que les balais s'usent et s'échauffent inégalement ; le balai positif s'use plus vite que le balai négatif. Mais ce fait est sans importance. S'il entre de la soudure dans la confection des balais, il faut avoir bien soin qu'une partie soudée ne vienne jamais en contact avec le collecteur ; elle détermine des étincelles éclatantes.

Trépidation et Bruit. — Une trépidation excessive ne peut être due qu'à un défaut d'équilibre dans la construction de l'induit. Une trépidation d'un caractère qui peut cependant être désastreuse pour la dynamo, en ce qu'elle fatigue ses conducteurs, qu'elle réduit en poussière les isolants et amène des ressauts des balais et des étincelles, est susceptible de se produire, même dans une machine à induit bien équilibré, si elle n'est pas solidement assujettie sur des fondations

convenables. Les machines à courant continu doivent dans la pratique tourner silencieusement ; la courroie doit faire beaucoup plus de bruit qu'une partie quelconque de la dynamo. Les alternateurs sont généralement assez bruyants, par suite de ce que les bobines de tous les induits en disque frappent l'air entre les pôles. Si les noyaux de fer de la partie induite sont soumis à un cycle d'aimantation trop rigoureux, ils produisent un ronflement bruyant, auquel on ne peut remédier qu'en faisant fonctionner la machine à un moindre degré d'excitation, ce défaut étant inhérent à la conception de la machine. L'Auteur a rencontré un jour un cas remarquable d'alternateur qui rendait un son perçant et soutenu ressemblant à un véritable hurlement. Ce bruit avait pour cause une coïncidence accidentelle entre le nombre des alternativités et la période de vibrations naturelle de quelques-unes des parties de la masse métallique. On y remédia en modifiant les éléments-fer de manière à déplacer le centre autour duquel ces parties pouvaient vibrer.

APPENDICES

APPENDICE A

UNITÉS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

Les principales unités employées dans la pratique par les électriciens, suivant convention internationale, sont :

L'*ampère*, unité de courant ou d'intensité ;

Le *volt*, unité de force électromotrice ou de différence de potentiel ;

L'*ohm*, unité de résistance électrique.

Ces trois unités pratiques ont pour point de départ certaines unités abstraites, déduites, par des raisonnements mathématiques et des lois prouvées par l'expérience, des trois unités fondamentales :

Le *centimètre*, adopté comme unité de longueur ;

Le *gramme*, adopté comme unité de masse ;

La *seconde*, adoptée comme unité de temps.

Le système d'« unités absolues » dérivé de ces trois dernières unités est désigné sous le nom de « système *centimètre-gramme-seconde* » ou par abréviation, « système C. G. S. »¹ ; cette dénomination a pour but de le distinguer d'autres systèmes antérieurs, basés sur d'autres unités fondamentales.

Tout système de mesures a pour base des faits ou des lois d'expérience. On ne peut mesurer un courant électrique que par les effets qu'il produit. Or un courant électrique peut : (1) produire le dépôt de métaux extraits de leurs combinaisons chimiques ; (2) échauffer un fil qu'il parcourt ; (3) attirer (ou repousser) un courant parallèle voisin ; (4) déterminer l'accumulation d'une charge électrique qui peut repousser (ou attirer) une charge voisine d'électricité ; (5) produire dans son voisinage un champ magnétique, c'est-à-dire exercer une force sur le pôle d'un aimant placé auprès de lui, comme, par exemple, dans

¹ Nous renvoyons le lecteur désireux d'étudier plus à fond le système d'unités C. G. S. au travail du Professeur Everett « *Units and Physical Constants* » (*Unités et Constantes physiques*, traduction française par J. Raynaud).

les galvanomètres. On pouvait choisir l'un quelconque de ces effets comme base d'un système d'unités de mesures, et ils ont tous en effet été proposés par une autorité ou par une autre. En fait, c'est le dernier de ces phénomènes qui a servi de base au système aujourd'hui adopté par convention internationale et appelé, en raison de son origine, *système électro-magnétique*; et cette préférence est justifiée d'abord parce qu'il relie les unités électriques et magnétiques, et en second lieu parce qu'il est intimement lié aux unités mécaniques, ce qui permet de calculer aisément les valeurs mécaniques des quantités électriques.

Prenant donc comme point de départ le fait expérimental qu'un courant électrique passant dans un fil peut exercer une force sur le pôle d'un aimant placé auprès de lui, il reste à en définir les conditions avec la plus grande précision. — On trouve expérimentalement que la force exercée sur un pôle magnétique par le courant n'est pas uniquement fonction de l'intensité de ce courant; cette force est proportionnelle (toutes choses égales d'ailleurs) (1) à la longueur du fil conducteur, (2) à l'inverse du carré de la distance entre un élément du fil et le pôle, (3) à l'intensité du pôle magnétique. Pour préciser l'action en question il faut en conséquence prendre (1) un fil d'une unité de longueur, (2) recourbé en un arc de rayon égal à une unité, de telle sorte que chaque élément du fil se trouve à une unité de distance du pôle, et (3) prendre un pôle magnétique d'une unité d'intensité. Ces conditions étant remplies, si l'on fait passer dans le fil un courant d'intensité telle qu'il agisse sur le pôle avec une unité de force, le courant ayant cette intensité pourra être pris comme terme de comparaison; en effet un courant deux fois aussi intense exercerait sur le pôle, dans les mêmes conditions, une force égale à deux unités, et ainsi de suite. Mais, pour être précis, il faut encore définir ce qu'on entend par « unité de force » et par « pôle magnétique d'une unité d'intensité ». A cet effet, on recourra de nouveau aux faits d'expérience et on choisira ceux qui permettent le mieux d'arriver à établir un système rationnel d'unités.

On mesure une force par l'un des effets qu'elle produit, tels, par exemple, que les suivants : elle peut (1) élever une masse donnée en opposition avec l'attraction terrestre; (2) allonger un ressort; (3) imprimer un mouvement à une masse donnée, ou le modifier en l'accélérant dans un sens ou dans l'autre. Le premier de ces effets, qu'il semblerait le plus naturel de choisir, a été rejeté parce que l'action de la pesanteur varie aux différents points de la terre; le second, parce qu'il entraînerait des complications délicates en ce qui concerne les propriétés élastiques des ressorts. Aussi a-t-on choisi le troisième, et, pour préciser la définition, il faut se rappeler ce fait acquis par l'expérience que l'accélération de mouvement imprimée par une force à la masse d'un corps est proportionnelle (1) à cette force, (2) au temps pendant lequel elle est appliquée, et (3) à l'inverse de la masse sur laquelle elle agit. Si donc on pouvait obtenir une force qui, agissant pendant une seconde sur la masse d'un gramme, augmentât la vitesse de cette masse d'un centimètre par seconde ou qui, en d'autres termes, lui imprimât une accélération d'un centimètre par seconde par seconde, cette force réaliserait une *unité de force*. Cette unité a reçu le nom de « *dynes* ». On peut remarquer que l'attraction de la terre ou l'action de la pesanteur sur la masse d'un gramme est suffisante pour lui imprimer une accélération d'environ 981 centimètres par seconde par seconde

(sous la latitude de Paris); il en résulte que l'action de la pesanteur sur un gramme-masse (communément appelée le poids d'un gramme) est égale (à Paris) à 981 dynes. L'action de la pesanteur sur un kilogramme-masse (communément appelée le poids d'un kilogramme) est (à Paris) de 981 000 dynes. Un gramme-masse pèserait au pôle 983,41 dynes, et à l'Equateur 978,4 dynes seulement. Une dyne est une force égale à Paris à la 981^e partie d'un gramme-poids, soit environ un milligramme. — Quant à l'unité d'intensité de pôle magnétique ou unité de-magnétisme, un pôle magnétique peut : (1) porter un morceau de fer; (2) repousser (ou attirer) un autre pôle magnétique à une certaine distance. Le premier de ces deux effets a été rejeté comme base d'une définition d'unité parce que la charge que peut porter un pôle d'aimant ne dépend pas seulement de l'intensité du magnétisme à ce pôle, mais aussi de la forme et de la qualité du morceau de fer soulevé. Pour préciser la définition à laquelle le second effet sert de base, il faut se rappeler ce fait d'expérience que la répulsion d'un pôle magnétique par un autre est proportionnelle (1) au produit des intensités des deux pôles, (2) à l'inverse du carré de la distance qui les sépare. En conséquence, si l'on choisit deux pôles égaux et semblables, d'une intensité telle que, placés à une unité de distance l'un de l'autre, ils se repoussent avec une force égale à une unité, ces deux pôles posséderont chacun la quantité de magnétisme qu'on appellera *unité de quantité de magnétisme*.

Réunissant maintenant ces conceptions, on peut les grouper systématiquement pour en former les unités du système C. G. S.

L'unité absolue C. G. S. de force (ou *dyne*) est la force qui, agissant sur la masse d'un gramme, lui imprime une accélération d'un centimètre par seconde par seconde.

L'unité absolue C. G. S. de magnétisme, ou *unité de pôle magnétique*, est le magnétisme ou le pôle magnétique qui, à la distance d'un centimètre (dans l'air), repousse un pôle semblable et d'égale intensité avec la force d'une dyne.

L'unité absolue C. G. S. de courant ou *d'intensité* est le courant dont le circuit, recourbé en un arc de cercle d'un centimètre de rayon et d'un centimètre de longueur, exerce une force d'une dyne sur une unité de pôle magnétique placée en son centre.

La condition impliquée par la dernière définition est difficile à réaliser pratiquement et il est plus aisé de constituer un cercle complet d'un centimètre de rayon qu'un arc de cercle d'un centimètre de longueur seulement sur un rayon égal. Si le rayon a plus d'un centimètre et s'il existe plus d'une spire de fil, comme dans la plupart des galvanomètres de tangentes, il est indispensable de recourir à une formule. Si r représente le rayon en centimètres, la longueur de la circonférence, également en centimètres, sera $2\pi r$. Désignons alors par N le nombre de spires de fil dont se compose la bobine et par i l'intensité du courant en unités absolues C. G. S.; la formule reliant ces quantités avec la force (en dynes) exercée par le courant sur une unité de pôle située en son centre est :

$$\frac{2\pi r N i}{r^2} = f,$$

d'où

$$\frac{2\pi N i}{r} = f.$$

Dans le cas du galvanomètre de tangentes, la force, au lieu d'être mesurée directement, est déterminée d'une façon indirecte, d'après la connaissance de la valeur (au point d'observation) de la composante horizontale du champ magnétique dû au magnétisme terrestre, ordinairement représentée par le symbole H , et par la mesure de la tangente de la déviation produite sur une aiguille aimantée suspendue au centre de la bobine, alors que celle-ci est placée parallèlement au méridien magnétique. On a alors $f = H \times \text{tang } \delta$, d'où

$$\frac{2\pi Ni}{r} = H \text{ tang } \delta.$$

Il résulte de là que, si N , r , H , et la tangente de l'angle de déviation sont connus, l'intensité du courant sera déterminée par le calcul de la valeur de i tirée de l'expression ci-dessus :

$$i = \frac{rH}{2\pi N} \text{ tang } \delta.$$

(H peut d'ailleurs être pris comme ayant les valeurs respectives suivantes dans les principales villes du monde : — Paris 0,188 ; Bombay 0,33 ; Boston 0,17 ; Berlin 0,178 ; Cleveland et Chicago 0,184 ; Glasgow 0,17 ; Halifax, N. S., 0,159 ; Londres 0,18 ; Montréal 0,147 ; Mexico 0,31 ; New-York 0,184 ; Niagara 0,167 ; Nouvelle-Orléans (la) 0,82 ; Philadelphie 0,194 ; Rome 0,24 ; San Francisco 0,255 ; Washington 0,20).

Mais le courant assez intense pour satisfaire à la définition précédente est beaucoup trop considérable comme terme de comparaison pour tous les courants employés en télégraphie (première application de l'électricité ayant exigé la création d'unités de mesures), puisqu'il est à peu près égal en grandeur au courant d'un circuit de foyer à arc. En conséquence, l'unité pratique de courant a été fixée au dixième de l'unité absolue et a reçu le nom d'« ampère » ; une unité absolue C. G. S. de courant est ainsi égale à dix ampères. Il en résulte que l'équation ci-dessus, si i est cherché en ampères, doit être modifiée de la façon suivante :

$$i = \frac{10 r H}{2 \pi N} \text{ tang } \delta.$$

L'intensité de courant se mesure à l'aide d'un ampèremètre.

On peut en outre noter qu'un courant d'intensité égale à un ampère précipite dans un bain électrolytique 1,174 gramme de cuivre à l'heure, et 4,024 grammes d'argent à l'heure dans un bain d'argent.

En Angleterre, le comité du « Board of Trade », dans son rapport de 1891, tout en adoptant comme définition abstraite de l'ampère celle donnée ci-dessus, a ajouté aussi comme définition secondaire ou d'application qu'un courant invariable qui, en passant à travers une solution de nitrate d'argent dans l'eau (conforme à la spécification indiquée dans ce rapport), précipite l'argent au taux de 0,001118 gramme par seconde, peut être considéré comme un courant de 1 ampère. Il a ajouté qu'un courant alternatif d'un ampère désignait un courant tel que la racine carrée de la moyenne des carrés de son intensité en ampères à chaque instant était égale à une unité pratique. C'est la gran-

leur désignée au cours de cet ouvrage (voir p. 616) sous le nom d'« ampère virtuel » ou « ampère efficace ».

Les autres unités électriques ont également besoin d'être définies. — La *force électromotrice* d'une pile ou d'une dynamo n'est, sous un autre nom, que la vertu qu'elles possèdent d'envoyer un courant électrique dans un circuit. Elle est également désignée quelquefois sous le nom de « pression » ou « tension » électrique. Comme base de définition de l'unité de force électromotrice, on aurait pu choisir l'un quelconque des faits expérimentaux suivants. La force électromotrice est proportionnelle : (1) au courant qu'elle développe dans un circuit de résistance donnée ; (2) à la quantité d'électricité qu'elle accumule sous forme de charge dans un condensateur de capacité donnée ; (3) conformément à la conception anglaise, au nombre de lignes de force magnétique coupées par seconde par un conducteur se mouvant dans un champ magnétique, [ou, suivant notre conception, à la variation du flux magnétique par rapport au temps à travers un circuit fermé]. Le premier de ces faits d'observation serait utilisable si l'unité de résistance était donnée, mais il vaut mieux le réserver comme base de définition de cette dernière unité plutôt que de l'appliquer à définir l'unité de force électromotrice ; le second sert à définir l'unité de capacité ; c'est le troisième qui a été choisi pour la définition de l'unité de force électromotrice, et il convient parfaitement à cet objet, comme étant le principe même de la machine dynamo. On doit évidemment prendre comme ayant une valeur égale à une unité la force électromotrice produite par le mouvement d'un conducteur coupant normalement une ligne de force magnétique par seconde. Mais cette définition implique la définition préalable de l'unité de ligne de force magnétique. La voici : — Les lignes magnétiques appelées lignes de force représentent par leur sens celui de la force magnétique résultante dans l'espace à travers lequel elles passent ; cet espace, qui est celui où se manifestent des forces magnétiques, et les lignes de force elles-mêmes constituent ce qu'on appelle un « champ » magnétique. Pour arriver à faire représenter aux lignes de force numériquement, aussi bien qu'en simple direction, l'intensité des forces magnétiques, on a adopté le procédé suivant. L'expérience montrant, comme on s'en souvient, que l'attraction (ou la répulsion) à laquelle est soumis un pôle magnétique placé dans un champ magnétique est proportionnelle à l'intensité de ce champ, on trace par centimètre carré un nombre de lignes égal à celui des dynes de force exercées sur une unité de pôle. Si l'on trouve par exemple en un point quelconque que l'attraction magnétique sur un pôle d'une unité est égale à 40 dynes, on tracera ou on supposera tracées 40 lignes magnétiques toutes réunies dans l'espace d'un centimètre carré de section. Comme la composante horizontale du magnétisme terrestre à Paris est seulement de 0,188 (dyne sur une unité de pôle), il s'ensuit qu'il n'est développé sous son influence que 18,8 lignes dans une surface de 100 centimètres carrés orientée verticalement est-ouest. — Revenant à la définition de la force électromotrice, on voit que, si le conducteur mobile ne coupe par seconde qu'une seule ligne magnétique, la force électromotrice engendrée aura pour valeur une unité, dans le système absolu de mesures C. G. S. [Dans notre langage scientifique nous disons que l'unité C. G. S. de *flux de force* est le flux traversant une surface de 1 centimètre carré lorsque l'intensité du champ est de 1 unité C. G. S.] Mais cette

unité serait extrêmement petite, beaucoup trop faible pour la pratique courante. Mesurée en unités C. G. S., la force électromotrice d'un seul élément Daniell serait représentée par le nombre énorme de 110 000 000 unités C. G. S. et un étalon de Latimer-Clark par 143 500 000 unités C. G. S. Aussi a-t-on adopté comme unité pratique une force électromotrice égale à cent millions de fois l'unité absolue C. G. S., et l'on a donné à cette unité pratique le nom de « volt ». On définira en conséquence « un volt » comme étant la force électromotrice qui serait engendrée par un conducteur coupant par seconde et normalement cent millions (10^8) lignes de force magnétique [ou interceptant un flux de force de 10^8 unités C. G. S.]. La force électromotrice d'un élément Daniell est ainsi d'environ 1,1 volt; et celle de l'étalon de Clark, de 1,435 volt. Le « Board of Trade » accepte ce chiffre comme étant, à 1 p. 100 près, la vraie valeur du volt. Les instruments adaptés à la mesure des volts s'appellent *voltmètres*.

Pour les forces électromotrices alternatives, l'unité légalement reconnue par le « Board of Trade » est celle désignée dans cet ouvrage sous le nom de « volt efficace » (voir p. 616).

Nous arrivons maintenant à l'unité de *résistance* électrique. On trouve expérimentalement que le courant lancé dans un circuit sous l'action d'une force électromotrice constante donnée dépend de la résistance offerte par le circuit au passage de l'électricité, ce courant étant d'autant plus faible que la résistance est plus élevée, conformément à la fameuse loi découverte par le docteur Ohm.

En fait la loi d'Ohm établit que le courant est directement proportionnel à la force électromotrice en vertu de laquelle il circule, et inversement proportionnel à la résistance du circuit. L'adoption des symboles E pour le nombre d'unités de force électromotrice, R pour le nombre d'unités de résistance du circuit, et i pour le courant qui en résulte, permet d'écrire la loi d'Ohm sous la forme :

$$i = \frac{E}{R};$$

c'est-à-dire qu'on calculera le courant résultant en divisant le nombre d'unités de force électromotrice par le nombre d'unités de résistance. La loi d'Ohm peut encore revêtir la forme suivante qui est utile quand on veut calculer la force électromotrice nécessaire pour faire passer un courant déterminé à travers une résistance donnée :

$$E = Ri.$$

Supposons maintenant qu'on dispose d'une force électromotrice égale à une unité absolue C. G. S., et qu'on désire lui faire produire un courant d'une unité d'intensité, définie comme précédemment dans ce même système absolu; il faudra donner à la résistance du circuit une valeur déterminée; et cette valeur sera extrêmement petite, autrement une force électromotrice aussi minime ne pourrait maintenir un courant aussi intense. Cette très faible rési-

stance devra néanmoins être prise comme unité dans le système absolu C. G. S., car la loi d'Ohm sera numériquement satisfaite si

$$\frac{\text{une unité de force électromotrice}}{\text{une unité de résistance}} = \text{une unité de courant.}$$

Mais, comme on a déjà des unités pratiques de force électromotrice et de courant, on a également besoin d'une unité pratique correspondante de résistance. Un peu de réflexion suffit à montrer que cette unité pratique devra être égale à mille millions d'unités absolues, car la loi d'Ohm sera de nouveau satisfaite si

$$\frac{\text{cent millions d'unités C. G. S. de force électromotrice}}{\text{mille millions d'unités C. G. S. de résistance}} = \text{un dixième d'unité C. G. S. de courant.}$$

On a donné à cette unité pratique de résistance le nom d' « *ohm* », et bien des recherches ont été effectuées en vue de déterminer sa représentation matérielle. Le Comité de l' « Association Britannique » a établi des bobines-étalons de fil qui ont été longtemps acceptées comme représentant exactement l'ohm ; mais on a reconnu depuis que leur résistance est un peu trop faible. Le Congrès international tenu à Paris en 1882 a fixé la valeur de l'ohm comme étant une résistance égale à celle d'une colonne de mercure d'un millimètre carré de section et de 106 centimètres de long (à la température de la glace fondante). D'après des mesures prises avec le plus grand soin par Lord Rayleigh, la véritable valeur de l'ohm correspondrait à une longueur de la colonne mercurielle ci-dessus de 106,3 et non pas 106 cm de long. Le Rapport du Comité du « Board of Trade » adopte cette valeur plus exacte et base sur elle la définition légale de l'ohm pour la Grande-Bretagne.

[Ce raffinement de précision, qui sera peut-être encore dépassé au fur et à mesure que les méthodes et appareils de détermination se perfectionneront, n'a pas encore reçu de consécration internationale officielle, et l'ohm *légal* reste jusqu'à nouvel ordre en France l'ohm *légal* international défini comme ci-dessus, ce nom de « *légal* » servant à le différencier de l'ancien ohm B. A. (British Association).]

Dans la pratique on mesure les résistances des fils et des circuits en les comparant à certaines « bobines de résistance » étalons, souvent disposées en séries de multiples ou sous-multiples sous forme de « boîtes de résistances » ; les instruments spéciaux employés pour ces comparaisons sont de deux genres, les galvanomètres différentiels et le pont de Wheatstone. Pour plus amples renseignements, nous renvoyons le lecteur aux ouvrages sur les épreuves électriques [et à l'excellent livre de M. Hospitalier, *Traité élémentaire de l'Energie électrique*].

On peut se faire une idée grossière mais concrète de la résistance appelée « *ohm* » en se rappelant qu'un kilomètre de fil télégraphique ordinaire de 4 millimètres de diamètre présente une résistance de 10 ohms environ.

Une autre unité est nécessaire dans les applications électriques ; c'est celle

de *puissance*, pour exprimer celle absorbée par une résistance électrique quelconque.

Pour mesurer le taux du travail effectué par un courant dans un fil, une lampe, ou tout autre appareil alimenté par de l'énergie électrique, il faut mesurer à la fois le nombre d'*ampères* du courant qui y circule, et le nombre de *volts* de la force électromotrice agissant réellement dans cette portion du circuit ; ces deux nombres étant déterminés, on les multipliera l'un par l'autre. De même que les ingénieurs-mécaniciens expriment en « kilogrammètres par seconde » la puissance mécanique fournie ou dépensée, l'électricien exprime en « volts-ampères » la puissance électrique. Le nom plus commode de « *watt* » a été donné à l'unité de puissance électrique. Le calcul indique qu'un « *watt* » ou « volt-ampère » est égal à un sept cent trente-sixième de cheval-vapeur.

Comme exemple de calcul de puissance électrique, on peut prendre le suivant : — On veut savoir la puissance dépensée pour entretenir une certaine lampe à arc. Le voltmètre indique une tension électrique de 57 volts entre les bornes de la lampe, et l'ampèremètre un courant de 10,5 ampères qui la traverse. Le produit est de 598,5 watts. En le divisant par 736 pour avoir sa valeur en chevaux-vapeur, on trouve 0,813, soit un peu plus de huit dixièmes de cheval.

On a donné à 1 000 watts le nom de *kilowatt*. Un kilowatt est un peu plus de 1 1/3 cheval. Comme unité pratique d'énergie électrique, la quantité légale officiellement admise comme unité pour la fourniture au public est la quantité de puissance fournie en une heure par une puissance de 1 000 watts ; autrement dit le *kilowatt-heure*.

L'unité de self-induction, désignée sous les divers noms de *secohm*, *quad* ou *quadrant*, et *henry*, est une unité dérivée d'origine récente. Toutes les fois qu'un courant varie d'intensité, il donne naissance, s'il parcourt une bobine, à des lignes de force en nombre variable [autrement dit à une variation de flux], qui agissent par induction sur les spires du conducteur et y développent une force électromotrice induite tendant à s'opposer aux changements dans la valeur de ce courant. Le symbole ordinairement employé pour le coefficient de self-induction est la lettre *L* ; il signifie que, si on lance ou on arrête brusquement une unité de courant dans le circuit en question, le nombre résultant de lignes magnétiques coupées [ou le flux de force intercepté] par les spires du circuit aura la valeur *L*. L'unité pratique correspondant au volt, à l'ohm, etc., a été prise comme égale à 10^9 unités C. G. S. ; on l'appelle *quadrant*. En d'autres termes, on dira qu'une bobine a pour coefficient de self-induction un *quadrant* (ou *secohm* ou *henry*) si, un courant d'une unité étant lancé dans cette bobine, la variation du flux de force résultant à travers cette bobine même est équivalente à une variation de 10^9 unités C. G. S. de flux de force à travers une spire unique. Si on représente par $\frac{di}{dt}$ la variation infiniment petite d'un courant correspondant à un intervalle de temps infiniment petit *dt*, la force électromotrice résultante de self-induction qui s'oppose à cette variation sera :

$$= -L \frac{di}{dt}.$$

Pour une forme et un volume donnés de bobine, le coefficient de self-induc-

tion est proportionnel au carré du nombre de ses spires. La présence d'un noyau de fer augmente considérablement les effets de self-induction ; mais elle fait du coefficient de self-induction une quantité variable par suite des variations dans la perméabilité du fer. On a appelé *sechommètre* l'instrument imaginé par Ayrton et Perry pour la mesure des coefficients de self-induction.

Pour plus amples détails, nous renvoyons le lecteur aux traités théoriques d'électricité. Il consultera utilement aussi un remarquable article de M. Kennedy dans l'*Electrical World*, XVI. 452, 1890.

APPENDICE B

FILS

Il a été donné, page 409, quelques renseignements relatifs aux dimensions de fils que la pratique indique comme convenables pour le bobinage des dynamos, selon les courants qu'elles doivent fournir. On trouvera d'autres indications à cet égard dans les descriptions détaillées de machines citées au cours de cet ouvrage. Nous avons d'ailleurs donné, page 412, des formules pour le calcul des poids de fil exigés par les bobines d'électro-aimants. D'un autre côté, la question d'échauffement au point de vue du courant que peuvent porter les conducteurs a été traitée avec quelques détails au Chapitre XV.

Nous n'y ajouterons que peu de chose d'après les renseignements fournis par les fabricants de fils.

L'isolement habituel des fils ronds de diamètre supérieur à 1,625 millimètre est formé d'un double guipage de coton qui en augmente le diamètre de 0,25 à 0,50 millimètre, soit, en moyenne, de 0,35 millimètre. Pour de plus faibles dimensions, 0,60 à 1,22 millimètre de diamètre, le double guipage de coton augmente le diamètre de 0,3 millimètre. Le fil carré est ordinairement recouvert de deux couches de coton qui lui donnent une surépaisseur de 0,50 millimètre ; ce coton est quelquefois tressé. Le fil carré lamellé, c'est-à-dire formé par la juxtaposition d'un certain nombre de bandes minces, est communément recouvert d'une tresse qui augmente son épaisseur de la même quantité. Depuis que les fils toronnés sont entrés dans la pratique pour l'enroulement des inductifs, on a adopté pour eux divers modes d'isolation ; on emploie notamment un câble de 37 fils, de 1,83 millimètre de diamètre chacun, guipés séparément d'une seule couche de coton, le tout étant ensuite revêtu d'un double guipage de coton qui en augmente le diamètre de 0,40 millimètre, ou d'une tresse qui porte cette surépaisseur à 0,50 millimètre. Pour le bobinage des fils de transformateurs à haut voltage on donne souvent une beaucoup plus grande épaisseur au guipage de coton en vue d'une immersion ultérieure dans l'huile. Ainsi, un fil de 0,609 millimètre de diamètre est recouvert de coton d'une épaisseur qui augmente son diamètre d'un millimètre, ce qui double à peu près le poids du fil.

Le tableau ci-annexé est très utile pour le bobinage des électro-aimants; il indique l'échauffement probable et la plus grande épaisseur de fil admissible suivant le nombre d'ampères du courant. Il est bon de se rappeler que 330 ampères par centimètre carré sont une densité ordinaire de courant pour les électro-aimants, tandis que les induits mobiles peuvent supporter 500 ampères et même davantage par centimètre carré.

[Ce tableau ayant été établi en Angleterre où la conductibilité des fils électriques n'est pas couramment égale à celle des fils français, les données qu'il fournit peuvent être considérées comme absolument pratiques, déduction faite de l'érouissage qui peut résulter de la manipulation, flexion, etc., des fils.

Pour tout ce qui concerne les qualités du cuivre et la construction des lignes pour éclairage, transport d'énergie, etc., on consultera avec fruit l'important ouvrage de MM. Lazare Weiller et Henri Vivarez, *Lignes et Transmissions électriques.*]

DIAMÈTRE DES FILS ET AMPÉRAGE

SPÉCIFICATION DU FIL		DENSITÉ DE COURANT (AMPÉRAGE) ADMISSIBLE, ÉCHAUFFEMENT PROBABLE ET ÉPAISSEUR ADMISSIBLE														
Nature.	NU	Diamètre en mm.	Section en mm ² .	Nombre de tours par cm. courant.	155 AMPÈRES PAR CM ²			310 AMPÈRES PAR CM ²			465 AMPÈRES PAR CM ²			620 AMPÈRES PAR CM ²		
					Intensité (ampères) A	Température (degrés C.) C	Épaisseur (cm.) E	Intensité (ampères) A	Température (degrés C.) C	Épaisseur (cm.) E	Intensité (ampères) A	Température (degrés C.) C	Épaisseur (cm.) E	Intensité (ampères) A	Température (degrés C.) C	Épaisseur (cm.) E
Fil unique		0,7	0,3848	9,47	0,616	0,50	11,43	1,232	2,02	2,86	1,85	4,54	1,27	2,46	8,08	0,714
—		0,9	0,6362	7,96	1,018	0,71	9,90	2,036	2,86	2,48	3,05	6,44	1,10	4,07	11,46	0,618
—		1,0	0,7854	7,38	1,26	0,85	9,14	2,52	3,40	2,28	3,78	7,65	1,015	5,04	13,60	0,571
—		1,2	1,1310	6,43	1,81	1,01	8,38	3,62	4,06	2,09	5,43	9,14	0,931	7,24	16,26	0,523
—		1,4	1,5394	5,69	2,4	1,18	8,12	4,8	4,75	2,03	7,2	10,69	0,902	9,6	19,01	0,507
—		1,6	2,0106	5,11	3,2	1,42	7,62	6,4	5,70	1,90	9,6	12,84	0,846	12,8	22,83	0,476
—		1,8	2,5447	4,64	4,0	1,61	7,36	8,0	6,44	1,84	12,0	14,50	0,818	16,0	25,78	0,460
—		2,0	3,1416	4,24	5,0	1,85	7,11	10,0	7,40	1,78	15,0	16,65	0,790	20,0	29,60	0,444
—		2,3	4,1548	3,76	6,6	2,38	6,85	13,2	9,53	1,71	19,8	21,44	0,761	26,4	38,13	0,428
—		2,6	5,3093	3,38	8,5	2,51	6,60	17,0	10,04	1,65	25,5	22,60	0,733	34,0	40,18	0,412
—		2,9	6,6052	3,07	10,5	2,81	6,35	21,0	11,26	1,59	31,5	25,34	0,705	42,0	45,06	0,397
—		3,2	8,0425	2,81	12,8	3,15	6,09	25,6	12,60	1,52	38,4	28,35	0,676	51,2	50,40	0,380
—		3,8	11,3442	2,40	16,3	3,61	6,09	32,6	14,44	1,52	48,9	32,50	0,676	65,2	57,78	0,380

—	4,0	12,5664	2,29	20,1	4,04	5,84	40,2	16,16	1,46	60,3	36,39	0,649	80,4	64,70	0,365
—	4,4	15,2053	2,10	24,3	4,47	5,84	48,6	17,50	1,46	72,9	40,29	0,649	97,2	74,63	0,365
7 × 0,7	2,43	2,6936	4,69	4,312	1,44	10,16	8,624	5,75	2,54	12,936	12,96	1,129	16,248	23,00	0,635
7 × 0,9	2,74	4,4534	3,64	7,126	1,92	9,40	14,252	7,76	2,35	21,378	17,28	1,044	28,504	31,04	0,587
7 × 1,2	3,66	7,9170	2,73	12,67	2,74	8,64	25,34	10,97	2,16	35,01	24,70	0,960	50,68	43,88	0,540
7 × 1,6	4,88	14,0742	2,05	22,4	4,09	8,13	44,80	16,37	2,03	67,2	36,85	0,903	89,6	65,48	0,507
7 × 1,8	5,49	17,8129	1,82	28,0	4,32	7,87	56,0	17,31	1,97	84,0	38,95	0,874	102,0	69,24	0,492
7 × 2,0	6,40	21,9912	1,64	35,0	4,84	6,86	70,0	19,37	1,71	105,0	43,60	0,762	140,0	77,48	0,427
7 × 2,3	7,01	29,0836	1,42	46,2	5,51	5,08	92,4	22,04	1,27	138,6	49,59	0,564	184,8	88,16	0,317
7 × 2,6	7,92	37,1651	1,26	59,5	6,33	4,83	119,0	25,33	1,21	178,5	57,00	0,536	238,0	104,32	0,302

Les chiffres inscrits dans les colonnes **A** indiquent le nombre d'ampères portés par le fil.

Les chiffres inscrits dans les colonnes **C** indiquent le nombre de degrés centigrades dont s'échaufferait la bobine si elle ne comportait qu'une seule couche de fil. — Ils sont calculés d'après la règle d'Esson de la page 413.

Les chiffres inscrits dans les colonnes **E** indiquent les profondeurs en centimètres sur lesquelles les fils peuvent être roulés pour 1 watt de perte par centimètre carré de surface de rayonnement, la surface extérieure de rayonnement de la bobine étant seule prise en considération.

La règle pour le calcul d'un fil toronné à 7 brins est la suivante : Diamètre du toron = 1,134 fois le diamètre d'un fil rond équivalent.

Les chiffres donnés sous la rubrique « Nombre de tours par centimètre courant » sont calculés pour des fils guipés de coton avec l'épaisseur moyenne de guipure employée pour les différents diamètres, soit 0,3356 mm de diamètre en plus pour les fils ronds (à partir de 0,7 mm de diamètre), et 0,598 mm pour les fils en torons ou carrés.

La résistance (en ohms) d'une bobine de fil de cuivre, de volume **V** en centimètres cubes, dont le diamètre est de d mm nu et de D mm guipé, peut se calculer approximativement d'après la règle de la page 416.

SUPPLÉMENT

Le choix un peu exclusif des machines dynamo-électriques citées au cours de cet ouvrage, comme présentant un intérêt d'ordre quelconque, mécanique, magnétique ou électrique, ne donne pas, à notre sens, une idée suffisamment exacte de l'état de la question sur le Continent et des progrès réalisés chaque jour. C'est pour combler cette lacune que, avec l'autorisation de l'Auteur, nous ajoutons ce supplément. Nous y avons respecté la classification originale et ne nous sommes laissé guider dans l'énumération des machines que par l'ordre alphabétique des dénominations sous lesquelles elles sont connues. Ainsi complété, ce livre prend un caractère industriel plus général, en même temps que plus actuel, un certain nombre des machines ou appareils décrits étant postérieurs à l'apparition de l'édition anglaise.

On y trouvera en outre quelques applications des méthodes électriques d'épreuves sommairement indiquées par l'Auteur page 786, aussi bien que des données utiles sur la manière dont, pour être complets, doivent être présentés les tableaux qui résument ces essais.

TYPES RÉCENTS DE DYNAMOS CONTINENTALES

MACHINES A COURANT CONTINU

DYNAMO A HAUT POTENTIEL

Machine de la C^{ie} de l'Industrie électrique. — La C^{ie} de l'Industrie électrique (ancienne maison Cuénod et Sautter), de Genève, qui exploite les brevets de M. Thury, son ingénieur en chef, construit, entre autres machines intéressantes, des dynamos à haut potentiel et à induit fermé pour transport d'énergie par courant continu. L'un de ses types, à axe horizontal, destiné à une commande directe par turbine, est calculé pour absorber 198 chevaux, à la vitesse angulaire de 275 tours par minute.

La machine, auto-excitatrice, de la forme ordinaire des machines Thury (fig. 374), comporte six pôles. Les noyaux d'inducteurs et leurs pièces polaires sont en fer forgé. L'alésage est de 1,100 m sur 0,375 m de profondeur axiale. Les bobines inductrices sont montées en série. — La carcasse du système inducteur est isolée du bâti par plusieurs épaisseurs de mica et le bâti lui-même est supporté par des isolateurs en porcelaine, à double cloche, scellés dans une fondation en briques vitrifiées assemblées au bitume.

L'induit est en anneau allongé, à bobinage Gramme ordinaire. Les tôles constitutives de son noyau sont supportées par dix bras de bronze. Le bobinage est fait en câbles souples bien isolés au coton gomme-laqué, revêtu lui-même d'une toile également gomme-laquée.

Le collecteur, qui a 0,750 m de diamètre, comporte 442 sections isolées au mica. Le courant est recueilli par six tiges portant chacune trois balais en charbon spécial, de résistance relativement élevée.

A une vitesse angulaire inférieure à celle ci-dessus indiquée, la machine fournit 40 ampères sous 3 300 volts, soit 132 kilowatts, avec un

rendement industriel qui, d'après les renseignements fournis par les constructeurs, atteindrait 94 p. 100 à pleine charge. — C'est un des rares types de dynamo à circuit fermé à potentiel aussi élevé.

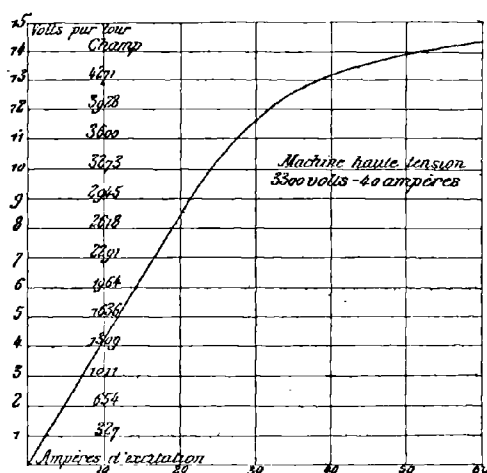


Fig. 519. — Caractéristique d'une machine à haut potentiel (Courant continu), de la Compagnie de l'Industrie électrique.

La figure 519 donne la caractéristique à blanc de cette machine ; on en constatera la remarquable tension.

DYNAMOS COURANTES

Machine Brown-Heilmann multipolaire. — La Société J.-J. Heilmann et C^{ie}, concessionnaire en France de l'exploitation des brevets Brown, fait construire, dans les ateliers de MM. Weyher et Richemond, des machines multipolaires dont l'aspect général et la structure ne diffèrent pas sensiblement de celles représentées par les figures 339 à 341. Toute la carcasse magnétique inductrice, y compris les noyaux des bobines, est coulée en fonte d'acier et rapportée sur le bâti. Ces noyaux sont cylindriques, ce qui réduit la longueur du fil employé pour leur excitation. Les pièces polaires, de forme rectangulaire, y sont fixées par des boulons. Les bobines elles-mêmes sont roulées sur une carcasse en fer dont la section s'ajoute à celle du noyau.

L'induit est en tambour creux, avec connecteurs assurant une ventilation intérieure qui rejette en même temps les poussières métalliques

pouvant provenir du collecteur. L'entraînement des conducteurs est assuré par des clavettes non métalliques.

Les quatre jeux de balais peuvent être réduits à deux par des connexions internes.

L'arbre repose sur trois paliers, sans porte-à-fanx. Le bâti est évidé de manière à prévenir les dérivations magnétiques.

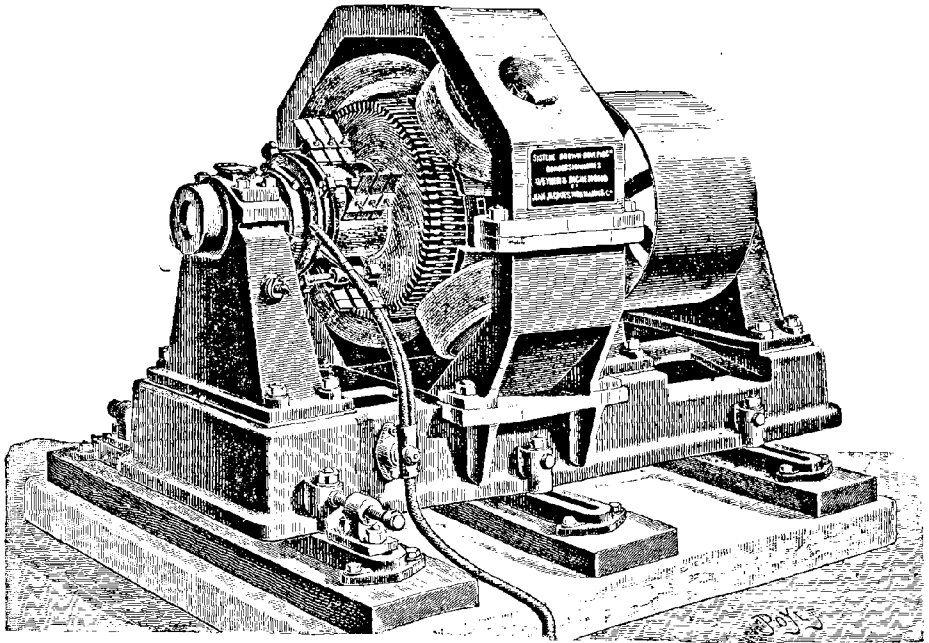


Fig. 520. — Machine multipolaire Brown-Heilmann.

Établies pour des vitesses angulaires moyennes de 320 à 350 tours par minute, et des puissances variant de 144 kilowatts (1 200 ampères sous 120 volts) à 270 kilowatts (1 500 ampères sous 180 volts), ces machines auraient un rendement industriel de 94 p. 100, les 6 p. 100 de perte se décomposant ainsi :

Pertes par frottements, hystérésis et courants parasites	3	p. 100
Pertes dans le cuivre induit	2	—
Pertes dans le cuivre inducteur	1	—

Le rendement électrique, sous charge, serait de 96,5 à 98 p. 100 selon la charge.

Machines Cail-Helmer. — *Machines bipolaires.* — Les machines bipolaires (fig. 521), étudiées par M. Helmer et construites par les anciens Etablissements Cail, ne présentent électriquement aucun caractère bien particulier.

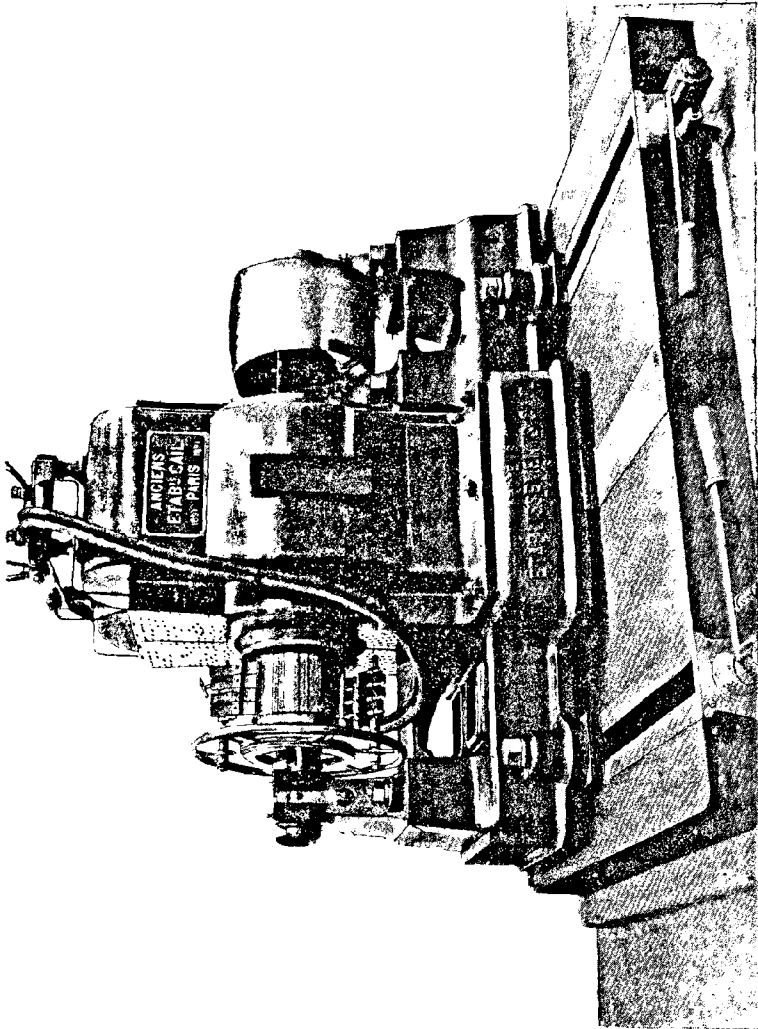


Fig. 521. — Machine bipolaire Cail-Helmer.

Toute la carcasse magnétique est coulée d'une seule pièce en acier extra-doux « Robert », sur les qualités magnétiques duquel les constructeurs ont bien voulu nous fournir les renseignements relatés ci-après, page 873.

Pour obtenir dans ces machines, outre un bon rendement, une grande sensibilité de régulation, en vue des applications où la vitesse peut varier très notablement, on a systématiquement adopté de faibles inductions. C'est ainsi que cette induction ne dépasse pas dans les induits 9 000 à 11 000 unités C.G.S., et dans les inducteurs, 8 000 à 9 000. Indépendamment d'une grande élasticité de fonctionnement, on trouve encore ici l'avantage d'avoir de très faibles pertes par hystérésis; et, les tôles d'induit n'ayant que 0,3 mm d'épaisseur, la perte par courants parasites y est également extrêmement réduite.

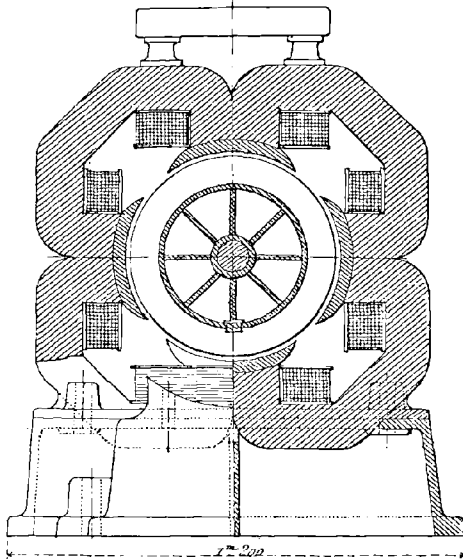


Fig. 522. — Machine tétrapolaire Cail-Helmer (Coupe transversale).

Les enroulements des fils inducteurs étant aussi rapprochés que possible de l'induit, les espaces interpolaires très grands et les inductions faibles, le coefficient de dérivation de flux est peu élevé. L'induit est en tambour, et le peu de développement des pièces polaires lui assure un bon refroidissement, sans qu'il soit besoin, autrement que pour des coups de collier momentanés, d'utiliser le ventilateur d'induit qui parfois est adjoint à la machine.

Au point de vue mécanique, l'existence indéfinie de l'arbre est assurée par une douille en acier clavetée sur la portée du côté de la poulie et tournant dans le coussinet en bronze dur du palier. On n'a, par suite, jamais à remplacer l'arbre en cas de grippement accidentel, et la perte

par frottements est très réduite en raison de la grande surface présentée.

Un système spécial de rails tendeurs permet d'obtenir sans tâtonnements la tension convenable des courroies : — chaque tête de vis de tendeur est commandée au moyen d'un levier par l'entremise d'un encliquetage à double direction. Les deux leviers de commande étant accouplés, on obtient sur les deux glissières des déplacements rigoureusement égaux.

Voici les principales constantes relatives à quelques-uns de ces types bipolaires à tambour :

CONSTANTES	TYPES			
	C ₅	C ₆	C ₉	C ₁₃
Puissance utile, en kilowatts.	6,6	8,25	19,8	59,4
Différence de potentiel aux bornes, en volts.	110	110	110	110
Courant extérieur, en ampères.	60	75	180	540
Vitesse angulaire, en tours par minute	1 340	1 200	860	440
Vitesse périphérique, en centimètres par seconde	1 350	1 370	1 303	1 026
Nombre de spires à la périphérie de l'induit	216	192	128	120
Flux utile, en unités C. G. S	2 343 000	3 000 000	6 000 000	13 640 000
Induction dans l'induit, en unités C. G. S.	9 200	9 430	10 660	9 150
Perte de puissance dans le fil induit, en watts.	326	392	720	2 380
Perte de puissance dans le fil inducteur, en watts	390	418	682	1 497
Perte de puissance par hystérésis en watts	64	87	147	291
Perte de puissance mécanique et par courants parasites, en watts	284	307	630	2 070
Perte de puissance totale, en watts.	1 064	1 204	2 179	6 238
Rendement électrique.	0,902	0,914	0,935	0,940
— industriel	0,862	0,873	0,902	0,906
Densité de courant dans l'induit, en ampères par mm carré	5,68	4,96	4,76	3,6
Densité de courant dans l'inducteur, en ampères par mm carré	2,54	2,21	1,372	1,083
Excitation à pleine charge, en ampères-tours	8 800	12 000	20 600	32 000

Machines multipolaires. — Pour les stations centrales et les transports d'énergie, la Société Cail construit des machines multipolaires à anneau (fig. 522 à 525) dans lesquelles les inductions sont beaucoup plus

élevées que dans les machines bipolaires (14 000 à 17 000 unités C.G.S. dans le fer de l'induit).

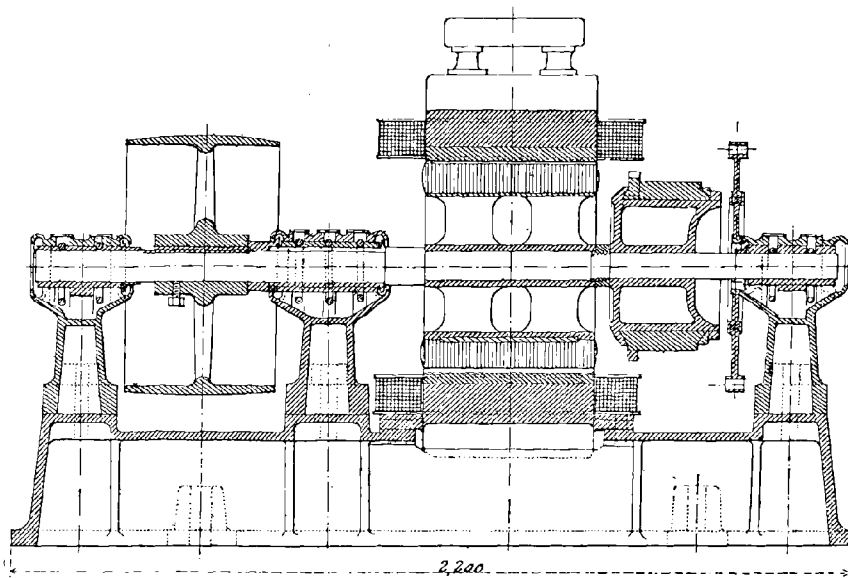


Fig. 523. — Machine tétrapolaire Cail-Helmer (Coupe longitudinale).

Le tableau suivant donne les constantes de deux de ces machines à anneau, de même puissance (60 kilowatts), mais d'allures différentes :

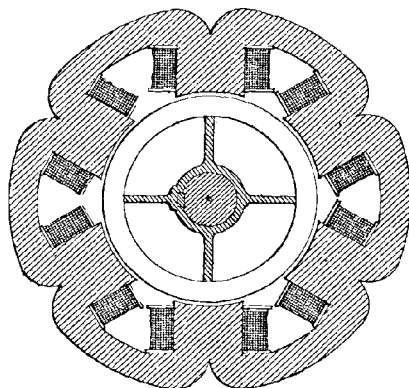


Fig. 524. — Machine hexapolaire Cail-Helmer (Coupe transversale).

l'une tétrapolaire, dont les figures 522 et 523 représentent la coupe transversale de la carcasse magnétique et une coupe longitudinale totale ;

l'autre hexapolaire, représentée par les figures 524 (coupe transversale de la carcasse magnétique) et 525 (vue d'ensemble de la dynamo attelée sur son moteur), page 830.

CONSTANTES	MACHINES	
	TÉTAPOLAIRE	HEXAPOLAIRE
Nombre de pôles	4	6
Puissance utile, en kilowatts.	60	60
Vitesse angulaire, en tours par minute.	510	230
Vitesse périphérique, en centimètres par seconde.	1 510	1 156
Différence de potentiel aux bornes, en volts.	120	120
Courant extérieur, en ampères.	500	500
Spires à la périphérie de l'anneau	210	360
Flux utile par circuit magnétique, en unités C. G. S.	6 964 000	8 988 400
Induction dans l'induit, en unités C. G. S.	14 750	16 280
Perte dans le fil induit, en watts	2 060	2 330
— inducteur, en watts	1 380	2 415
— par hystérésis, en watts.	855	1 264
— par courants parasites et frottements, en watts.	1 920	1 800
Perte totale, en watts	6 215	7 809
Rendement électrique	0,946	0,927
— industriel	0,916	0,885
Densité de courant, fil induit, en ampères par mm ²	3,975	3,4
Densité de courant, fil inducteur, en ampères par mm ²	1,196	1,265
Excitation en ampères-tours, à pleine charge, par circuit magnétique	14 130	17 880

Machine Reignier et Parrot. — Indépendamment des machines Helmer, la société Cail vient d'entreprendre la construction de la machine Reignier et Parrot fondée sur les propriétés des conducteurs *bimétalliques*¹ employés dans les induits. En attendant que l'expérience soit venue consacrer les qualités de cette machine, une dynamo d'essai, de 32 kilowatts, aurait donné une utilisation spécifique de 42,5 watts par kilogramme de poids total.

Machine Desroziers. — Cette machine, dont un simple schéma de bobinage, sans explications, est reproduit page 326, figure 235, mérite une certaine attention. C'est en effet un des rares types à disque pour courant continu, et parmi ceux-ci un des rares qui aient pris rang dans les dynamos courantes.

¹ Voir *Le Génie Civil*, 30 juillet 1892, et *Comptes rendus*, 8 août 1892.

L'aspect seul de cette machine dénote la préoccupation qui a guidé l'auteur dans sa conception. Il rappelle les premiers alternateurs de Siemens, et il est facile de voir que l'esprit de M. Desroziers qui avait été à même d'apprécier le mérite et la valeur de ces machines sans fer, a été hanté par l'idée d'appliquer le même principe à la construction d'une machine à courant continu. Elle est d'ailleurs uniquement caractérisée par son induit dont l'étude laborieuse demande quelques détails.

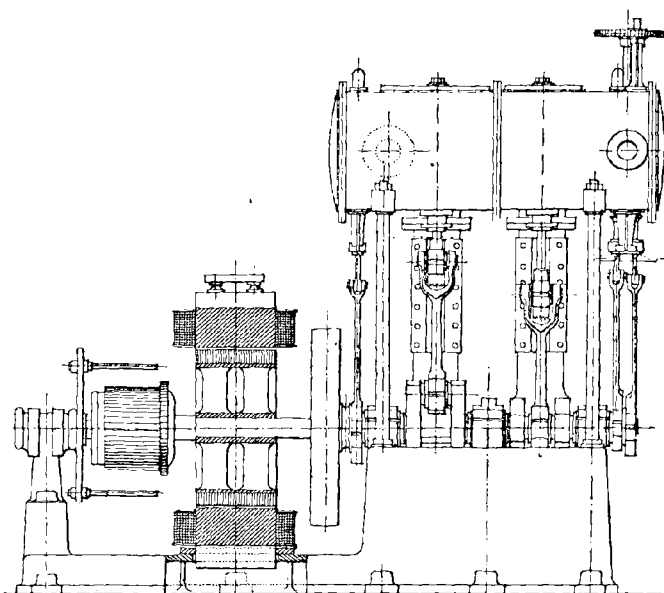


Fig. 525. — Dynamo hexapolaire à vapeur Cail-Helmer (Coupe longitudinale).

Considérons, comme dans la figure 235, une circonférence divisée en trente-deux parties égales (fig. 526). Traçons la corde 1-12 et remplaçons-la par la corde en zigzag ABCDE, qui comprend deux développantes de cercle AB et CD, ainsi que deux parties radiales CB et DE correspondant respectivement aux divisions 7 et 12. Cette ligne en zigzag constitue un élément de l'induit. Comme les développantes de cercle, en raison de leur direction, coupent très peu le flux magnétique, la force électromotrice induite dans un élément de fil ABCDE sera presque exclusivement due à l'intersection du flux par les deux rayons CB et DE. Si l'on joignait B à E par une courbe différant peu d'un arc de cercle ayant son centre en O, on obtiendrait un quadrilatère BCED dans lequel se développerait la même force électromotrice que dans la ligne en zigzag.

En reproduisant cette ligne brisée pour la corde 12-23, puis pour la corde 23-2, on obtiendra trois éléments successifs qui conduisent du point 1 au point 2. Un système ternaire analogue partant de 2 conduira au point 3, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un dernier système de trois éléments partant de 32 ramène au point 1 et ferme le circuit. Cette disposition repose sur le principe du bobinage en polygone étoilé dans le cas d'une machine à douze pôles, c'est-à-dire à six champs magnétiques.

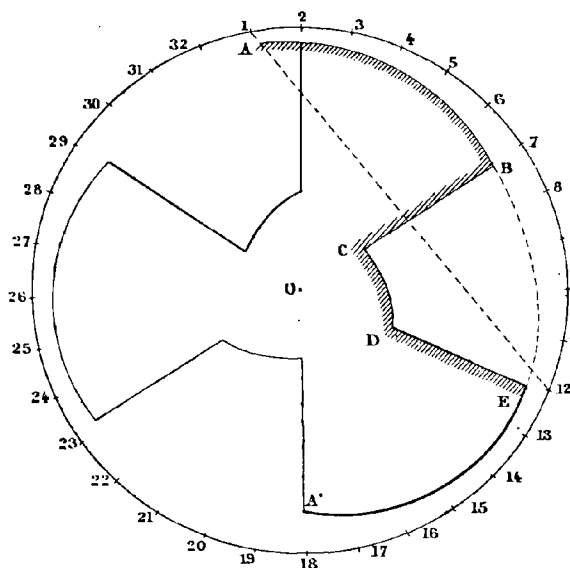


Fig. 526.

Principe du bobinage Desroziers.

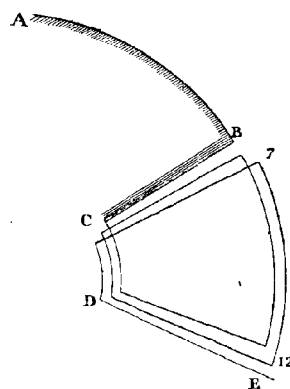


Fig. 527.

Pour effectuer l'enroulement, on fait usage de deux plateaux en carton percés de trous correspondant aux extrémités des éléments radiaux. L'un de ces plateaux reçoit tous les éléments impairs, c'est-à-dire correspondant aux cordes 1-12, 23-2, etc., dont l'origine est désignée par un nombre impair ; les éléments radiaux sont placés sur une face et les éléments curvilignes sur l'autre face. Le second plateau reçoit d'une façon analogue tous les éléments pairs, tels que 12-23, 2-13, etc. On accole dos à dos ces deux plateaux en intercalant entre eux un disque perforé, en maillechort, sur lequel on les fixe ; on fait ensuite entre les bouts de fil correspondants les soudures nécessaires à la réalisation d'un seul circuit. Le disque de maillechort est relié à l'arbre de la machine par un moyeu. Quant aux plateaux de carton, on les évide en

les découpant au tour, de manière à ne laisser que les couronnes placées sous les fils curvilignes.

La disposition schématique que représente la figure 526 est complétée dans la pratique par la juxtaposition d'un certain nombre de spires semblables, dont l'enroulement multiple constitue une sorte de bobine élémentaire (fig. 527). On multiplie ainsi le nombre des brins radiaux, ce qui augmente la force électromotrice de la machine.

Il s'agit maintenant d'établir les connexions de cet induit et du collecteur. Pour plus de clarté, considérons le schéma de la figure 528, dans lequel l'enroulement est représenté, d'une part par des zigzags

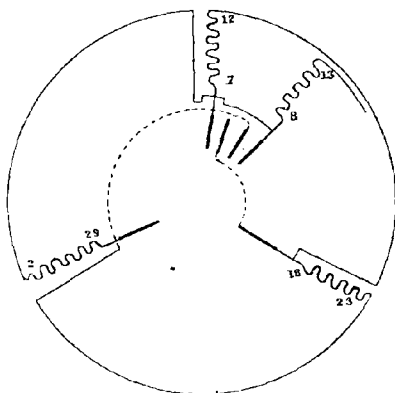


Fig. 528. — Principe schématique des connexions au collecteur.
Machine Desroziers.

radiaux, tels que 7-12 figurant la bobine BCDE, et, d'autre part, par des raccords brisés, tels que 12-18, représentant la jonction de deux bobines consécutives 7-12 et 18-23.

Partant de la bobine 7-12, en suivant l'enroulement, on rencontre la bobine 18-23, puis la bobine 29-2, puis la bobine 8-13 (c'est intentionnellement, pour éviter la confusion des lignes, que la distance angulaire réelle des deux bobines 7-12 et 8-13 est augmentée dans la figure 528). Si l'on fait correspondre une touche de collecteur à chacune des trente-deux bobines et qu'on joigne chaque touche à l'origine de la bobine correspondante, il est clair que, au moment où un des balais portera à la fois sur les deux touches consécutives correspondant aux bobines 7-12 et 8-13, le système des trois bobines 7-12, 18-23 et 29-2 se trouvera mis en court-circuit et distrait du reste de l'induit. Il est évidemment bien préférable que la fermeture en court-circuit n'ait lieu que sur la bobine 7-12. On peut arriver à ce résultat en intercalant deux nouvelles touches

de collecteur entre celles qui correspondent aux bobines 7-12 et 8-13, et reliant respectivement ces deux lames à celles qui correspondent aux bobines 18-23 et 29-2, au moyen des arcs connecteurs métalliques indiqués en pointillé sur le schéma. On est ainsi conduit à tripler le nombre primitif des lames du collecteur, et chacune des bobines se trouvera reliée à trois lames faisant entre elles des angles de 120° .

Pour faciliter et régulariser les connexions entre l'origine de chaque bobine et les trois lames correspondantes du collecteur, on fait usage d'un connecteur. Cet appareil se compose d'un cylindre en bois sur

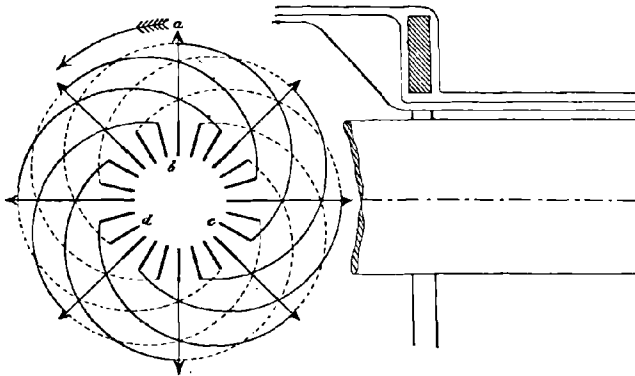


Fig. 529. — Schéma des connexions au collecteur.
Machine Desroziers.

lequel est monté un plateau circulaire également en bois (fig. 529). Les fils ab , qui doivent aller radialement au collecteur, traversent simplement le plateau ; les fils ac , qui doivent dessiner les développantes de cercle à droite de ab , décrivent des courbes sur la face antérieure du plateau et se redressent ensuite pour aller aux lames correspondantes du collecteur ; enfin les fils ad , qui doivent dessiner des développantes de cercle de sens contraire aux précédentes, traversent le plateau et décrivent ces courbes sur la face postérieure avant d'aller aux lames collectrices. Cette disposition permet d'éviter les croisements de fils.

Finalement l'ossature de l'induit se compose du disque de maillechort, convenablement découpé, afin d'éviter les courants de Foucault ; cette ossature rigide, qui porte les fils de l'induit, est clavetée sur l'arbre ; on monte également sur cet arbre le connecteur et le collecteur, puis on assemble le tout.

La faible masse de cet induit permet de lui donner une vitesse

angulaire correspondant à une vitesse périphérique de 33 mètres par seconde et même davantage.

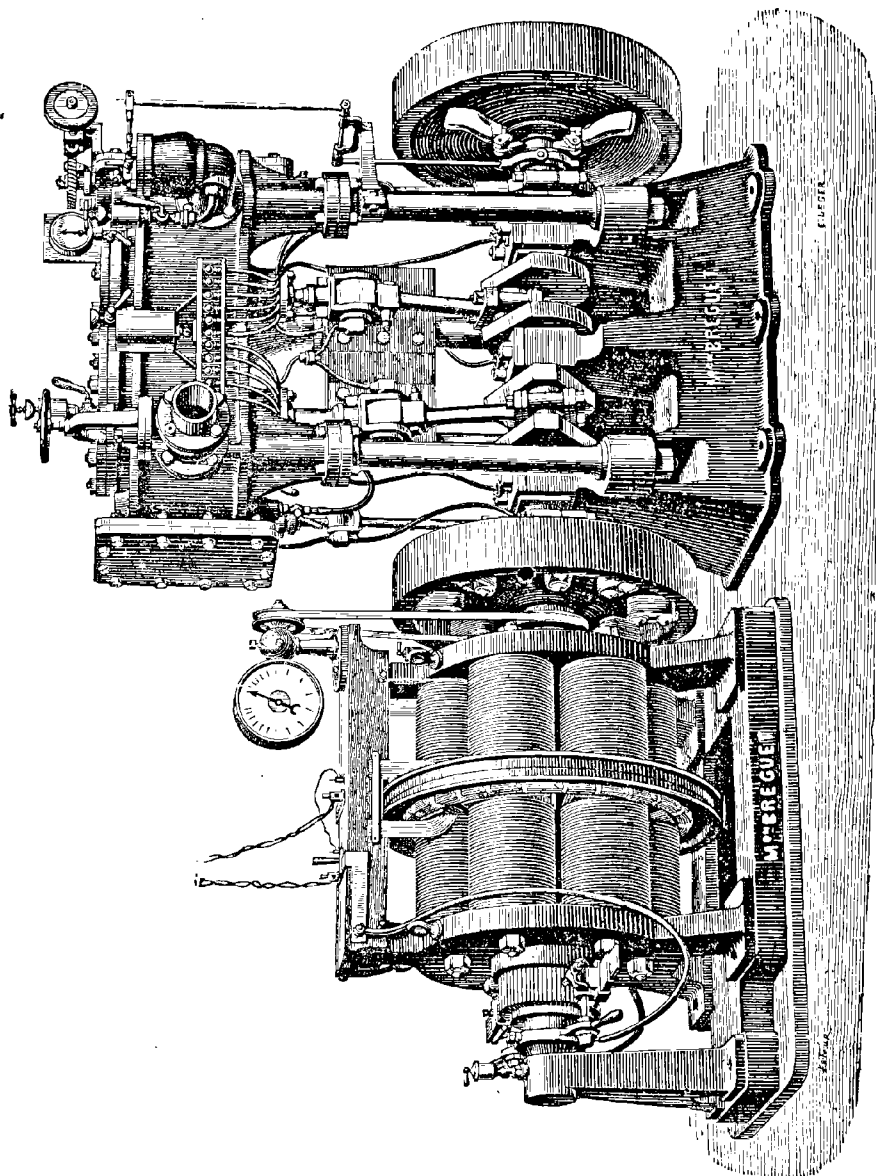


Fig. 530. — Dynamo à vapeur Desroziers-Breguet.

Dans cette machine il est nécessaire que le nombre $2p$ des champs magnétiques inducteurs, le nombre N des sommets du polygone régu-

lier (fig. 526) qui sert de base au schéma de l'induit, et le nombre n des divisions de ce polygone qui doivent être comprises entre les deux rayons CB et DE d'une spire élémentaire soient liés par une relation d'un certain genre, pour que l'on puisse obtenir un bobinage en polygone étoilé. M. Desroziers adopte pour ses machines la formule suivante, qu'il est facile de justifier par des considérations arithmétiques :

$$N = 2 (np \pm 1).$$

Pour une machine à six champs $p = 3$, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, $n = 5$, et

$$N = 2 (15 + 1) = 32.$$

Types divers. — Les machines Desroziers, construites par la maison Breguet, sont établies soit en vue d'une commande par courroie, à vitesses angulaires courantes, soit en vue d'un accouplement direct, à vitesses réduites. La figure 530 représente une de ces dernières, à six champs magnétiques, directement attelée sur son moteur par un accouplement élastique, système Raffard.

Machine marine. — L'un des plus grands spécimens de ce type est une machine construite pour la Marine et qui, à l'allure de 150 tours par minute, fournit une puissance électrique utilisable de 150 000 watts, par 1 000 ampères sous 150 volts.

Les dimensions d'encombrement en sont de :

Longueur (suivant l'arbre)	2,725 m.
Largeur	2,360 —
Hauteur	2,500 —

Le poids total, qui atteint 14 600 kilogrammes, se décompose ainsi :

Induit complet monté sur l'arbre	2 400 kg.
Système inducteur (électros et flasques)	9 700 —
Plaque de fondation, chaises et paliers	2 500 —

Ces chiffres montrent la légèreté relative de la masse en mouvement.

Si l'importance de l'entrefer et l'absence de fer dans l'induit de cette machine diminuent l'induction et, par suite, le rendement spécifiques, les réactions d'induit en sont, par contre, notablement réduites, ce qui se traduit par un fonctionnement sans étincelles aux balais sous des régimes très variables tels que charge d'accumulateurs sous 120 à 150 volts, éclairage direct sous 120 à 125 volts, et alimentation de perceuses électriques et de foyers à arc sous 70 à 80 volts.

Le tableau ci-dessous résume les résultats officiels des essais de cette machine :

COURANT EN AMPÈRES	ALLURE NORMALE : 150 tours par minute.		ALLURE RÉDUITE : 95 tours par minute.
	Différence de potentiel aux bornes :		
	150 volts	125 volts	80 volts
	Rendement industriel :		
1 000	0,902	0,907	0,884
800	0,906	0,903	0,890
600	0,887	0,900	0,897
400	0,850	0,876	0,879
200	0,790	0,800	0,806

Épreuves. — Il n'est pas d'ailleurs sans intérêt d'indiquer ici la méthode suivie par la Marine pour le calcul de ces rendements :

Sur un ensemble de trois machines, deux sont mécaniquement reliées bout à bout par des plateaux d'accouplement. L'une d'elles fonctionne comme génératrice ; à sa vitesse de régime, on mesure la différence de potentiel e_1 à ses bornes, le courant I dans le circuit extérieur, et le courant i fourni aux inducteurs par une excitatrice spéciale.

La seconde dynamo fonctionne comme réceptrice. — A cet effet, elle est montée en série sur la précédente et reçoit, par suite, le courant I . Mais, dans ces conditions, la différence de potentiel produite à ses bornes par la génératrice est insuffisante pour lui fournir la puissance nécessaire au fonctionnement normal de cette génératrice.

La troisième dynamo est donc attelée à une machine à vapeur et également reliée en série aux deux premières. Tout le système est en conséquence parcouru par le même courant, et cette dernière machine fournit aux bornes de la réceptrice l'appoint suffisant pour établir la différence de potentiel e_2 assurant la vitesse de régime de la première génératrice.

Dans ces conditions, les machines essayées étant supposées semblables, et quelle que soit l'origine de la puissance initiale, la première génératrice reçoit de la réceptrice, par l'entremise de l'arbre qui les relie toutes deux, la puissance totale P_1 qui l'actionne ; et, si l'on désigne par η son rendement industriel, la puissance $e_1 I$ mesurée à ses bornes est égale à ηP_1 . D'autre part, les deux machines ayant *par hypothèse* des rendements égaux, cette même puissance totale P_1 est égale à $\eta e_2 I$; on

a donc comme première approximation, en laissant de côté l'excitation de la première génératrice et la faible perte par les fils qui la relie à la réceptrice,

$$\frac{e_1 I}{\gamma} = \tau_1 e_2 I,$$

d'où l'on tire:

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{e_1}{e_2}}.$$

Mais il faut tenir compte des deux termes ci-dessus négligés, et, si l'on appelle p la puissance τ_1^2 correspondante, on a comme seconde approximation :

$$\eta_{\text{net}} = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance dépensée}} = \frac{e_1 I}{\frac{e_1 I}{\gamma} + p},$$

et, en remplaçant γ par sa première valeur approchée $\sqrt{\frac{e_1}{e_2}}$,

$$\eta_{\text{net}} = \frac{e_1 I}{I \frac{e_1}{\sqrt{\frac{e_1}{e_2}}} + p} = \frac{e_1 I}{I \sqrt{e_1 e_2} + p} = \frac{e_1}{\sqrt{e_1 e_2} + \frac{p}{I}}.$$

Cette méthode d'épreuve a, comme on l'a vu, le grand avantage d'exclure toute mesure mécanique et de ne faire intervenir que des mesures électriques faciles, relevées sur les mêmes appareils ; mais elle a l'inconvénient de procéder par approximations successives et de partir d'une hypothèse qui n'est nullement prouvée, l'identité de rendement des deux machines fonctionnant soit comme génératrice soit comme réceptrice.

Machine Gramme multipolaire. — Ce nouveau type (fig. 531), dit « modèle de 1892 », a été étudié par M. Gramme en vue des stations centrales d'éclairage, des grandes usines électrolytiques et des transports importants de force motrice. La vitesse angulaire modérée de ces machines qui, selon leur puissance, varie de 350 tours par minute pour celles de 85 chevaux à 75 tours pour celles de 700 chevaux, permet de les accoupler directement, sans courroie ni transmission intermédiaire, à une machine à vapeur.

Malgré le peu de fer dans les inducteurs par lequel elles se signalent comme leurs devancières, leur rendement électrique est annoncé comme variant, selon la puissance, entre 94 et 96,5 p. 100, correspondant,

d'après des essais officiels, à un rendement industriel de 88 à 90,7 p. 100.

Dans toutes ces machines, les pièces polaires sont en acier doux et montées sur un bâti en fonte. L'arbre est supporté, soit par un seul

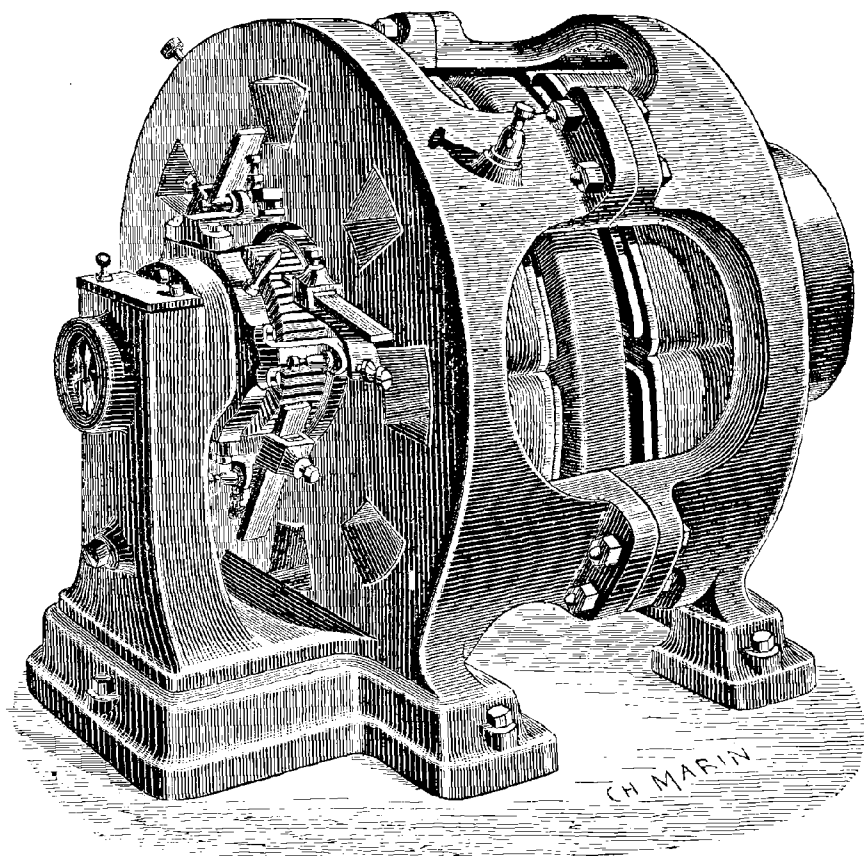


Fig. 531. — Machine Gramme multipolaire, pour stations centrales.

palier très allongé, soit par deux paliers, de sorte que, suivant les circonstances, l'induit est ou en porte-à-faux, ou soutenu à ses deux extrémités. Les poulies ou manchons d'accouplement sont également en porte-à-faux; mais les précautions nécessaires sont prises pour éviter tout travail de l'arbre à la flexion.

Le graissage, par bagues mobiles, est identique à celui des autres machines Gramme.

Les balais, qui portent sur un collecteur en cuivre pur laminé, sont fixés sur deux colliers isolés qui permettent le calage individuel de chaque balai ou leur réglage d'ensemble à l'aide d'une vis sans fin.

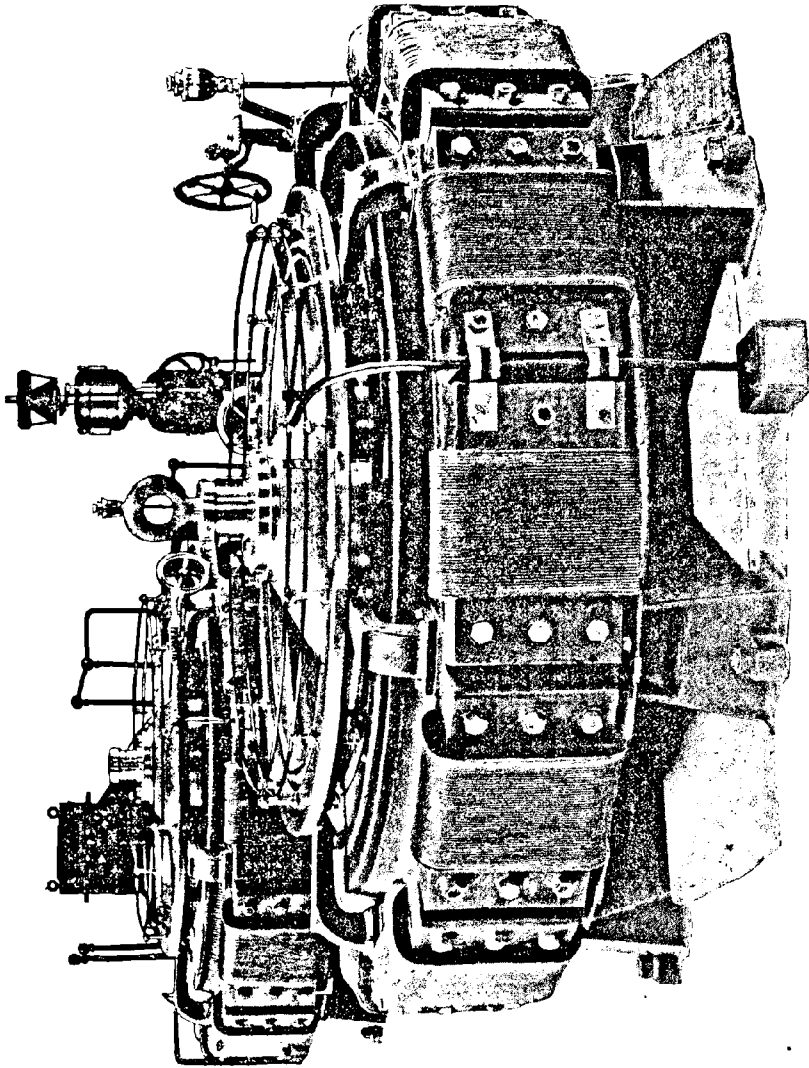


Fig. 532. — Machine de 168 kilowatts, à 45 tours par minute, de la Compagnie de L'Industrie électrique. (Chemin de fer du Salève).

Machine octogonale de la C^{ie} de L'Industrie électrique. — La situation particulière de cette Société dans un pays où il existe de nombreuses et puissantes forces naturelles l'a conduite à envisager, dans la construction de ses machines, les diverses éventualités susceptibles de

se présenter pour l'utilisation de ces forces. C'est ainsi qu'elle a été amenée à établir des dynamos à très faible vitesse angulaire pour les cas d'une commande directe par turbine avec peu de hauteur de chute.

La machine ici représentée (fig. 532) est le type de 1 000 chevaux à 180 tours par minute. Montée à axe vertical et commandée directement par une turbine qui ne lui donne que le quart de sa vitesse normale, soit 45 tours, elle fournit encore 280 ampères sous 600 volts, soit 168 kilowatts ou 228 chevaux. Son poids total est de 18 tonnes; elle est utilisée au chemin de fer du Salève.

En voici les principaux éléments de construction :

Système inducteur à 12 pôles (forme Thury). Noyaux en fer forgé. Pièces polaires en fonte. Poids du cuivre sur les inducteurs : 1 450 kilogrammes, en fil de 7,5 mm de diamètre. — Excitation séparée absorbant 4 500 watts, par 45 ampères sous 100 volts. — Alésage 2,500 mètres. — Induction magnétique dans l'entrefer, 4 500 unités C. G. S.

Induit. — Noyau en tôle feuilletée. Tambour creux en forme de cloche, à enroulement multipolaire Thury. Bobinage en 451 sections d'un seul tour chacune, le conducteur étant composé de 4 fils parallèles de 3,3 mm de diamètre. Poids du fil sur l'induit : 178 kilogrammes.

Collecteur à 451 touches en cuivre étiré, isolées au mica. Diamètre 1,800 m. Courant recueilli par 12 tiges munies chacune de 4 contacts en charbon cuivré extérieurement.

Machines d'Oerlikon. — Les ateliers d'Oerlikon, près Zurich (Suisse), construisent, comme l'indique cet ouvrage, un grand nombre des machines Brown qui y sont décrites. Nous ne nous arrêterons ici parmi ses machines à courant continu que sur un type de « Dynamo à vapeur » tétrapolaire, ensemble très compact particulièrement destiné à l'éclairage des navires, dans lesquels, outre le peu de place disponible, il faut soustraire la boussole à toute action magnétique autre que celle de la terre. A ce double effet, l'inducteur tétrapolaire est venu de fonte, d'une seule pièce avec le bâti de la machine à vapeur, et enveloppe complètement l'induit. Indépendamment du montage en compound, le fonctionnement sous différence de potentiel constante, quelle que soit la charge, est assuré par un calage des balais solidaire de l'action du régulateur de la machine placé à l'extrémité de l'arbre commun.

La figure 533 représente une machine de 12 kilowatts environ, fournissant 180 ampères sous 65 volts. La puissance de la machine à vapeur

est, à 480 tours par minute, de 18,5 chevaux effectifs, ce qui correspond à un rendement commercial de 86 p. 100 pour l'ensemble du système.

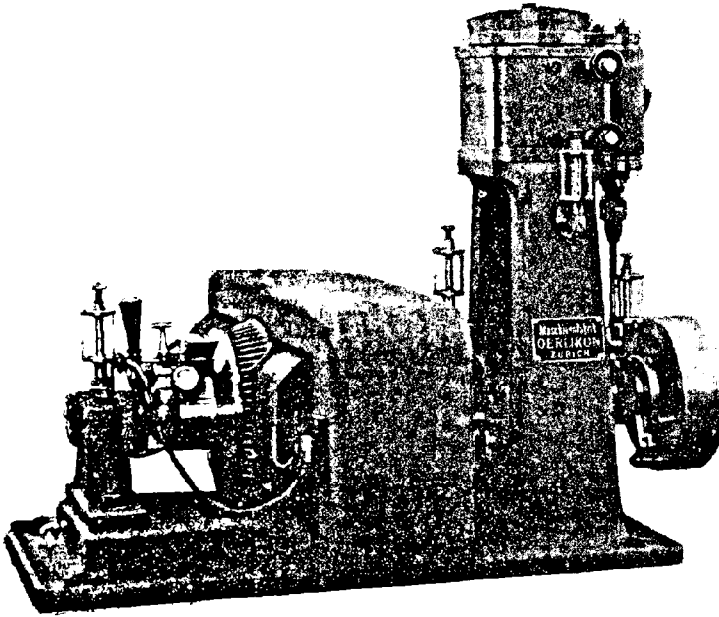


Fig. 533. — Dynamo multipolaire à vapeur d'Oerlikon.

Nous en donnons les dimensions principales :

Diamètre de l'induit	450 mm.
Profondeur de l'induit suivant l'axe	300 —
Largeur maximum des inducteurs	1 280 —
Longueur axiale totale de l'ensemble	1 520 —
Hauteur maximum de la machine à vapeur	1 400 —
Poids de l'ensemble	2 500 kg.

Machines Rechniewski. — On a vu que les avantages des induits dentés sur les induits lisses résidaient dans une réduction considérable de l'entrefer et dans la sécurité d'entraînement des fils qui, encastrés entre les dents, ne peuvent se déplacer à la surface de l'induit. Mais les figures 73 à 78 montrent par contre le développement des courants parasites qui résultent de l'emploi de ces induits avec des inducteurs massifs. C'est pour obvier à cet inconvénient que Rechniewski a eu le premier l'idée, très élémentaire en apparence, d'allier la division des noyaux inducteurs à celle des noyaux induits.

La figure 534 indique comment il est possible de réduire les chutes

de tôle en découpant, par poinçonnage, dans un même rectangle de tôle,

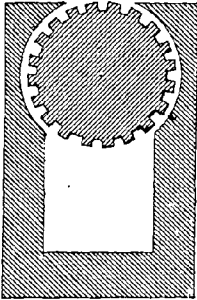


Fig. 534. — Poinçonnage des tôles de la machine bipolaire Rechniewski.

un disque denté pour le noyau d'induit et un feuillet en forme d'U pour le noyau inducteur des machines bipolaires. La juxtaposition de ces derniers feuillets, isolés les uns des autres, et leur assemblage par des boulons traversant leur masse suffit pour constituer d'un seul coup l'inducteur, avec sa culasse, son noyau et ses pièces polaires. Cette disposition, l'absence de tout joint magnétique et le libre choix de fer de toute première qualité qui se trouve couramment dans

les tôles permettent de réaliser une importante réduction dans le fil de l'induit, ce qui en diminue les réactions aussi bien que la résistance,

et de constituer des machines légères à grand rendement spécifique.

Ces machines, construites par la Société « L'Éclairage électrique »,

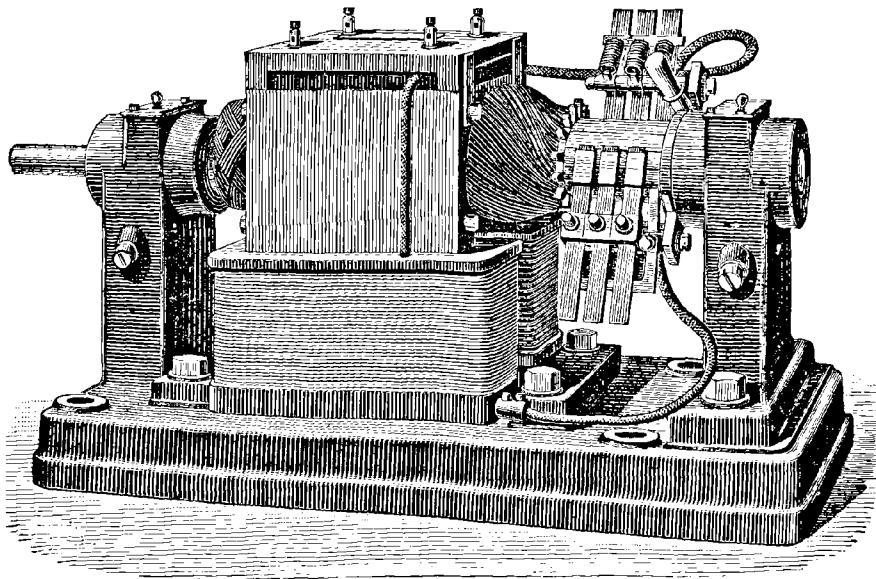


Fig. 535. — Machine bipolaire Rechniewski.

s'établissent, soit bipolaires, à tambour (fig. 535), soit multipolaires, à anneau (fig. 536), sur un grand nombre de types variant de 400 à 200 000 watts et au delà. Elles ont fourni dans des essais officiels les résultats ci-dessous consignés :

Essai fait par la Marine sur un groupe de deux machines Rechiniewski de 30 000 à 40 000 watts. — Le mode d'épreuve, analogue à celui de la page 836, consistait dans l'accouplement rigide des deux machines essayées, fonctionnant, l'une comme réceptrice recevant d'une

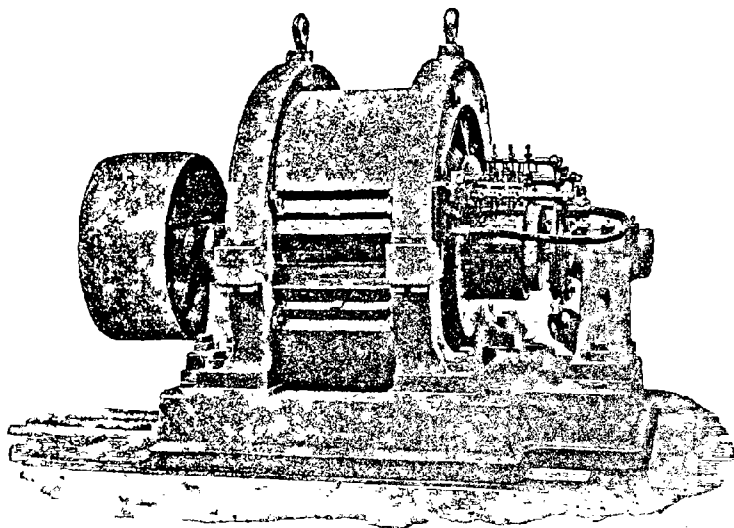


Fig. 536. — Machine multipolaire Rechiniewski.

machine auxiliaire une puissance P_1 (watts), et l'autre comme génératrice recevant de la précédente, par le manchon d'accouplement, la puissance $\gamma_1 P_1$ (γ_1 étant le rendement industriel de la réceptrice).

Le circuit de la machine mécaniquement conduite (génératrice) est fermé sur des résistances. On mesure la puissance P_2 (watts) qu'elle fournit, et l'on a $P_2 = \gamma_1 \gamma_2 P_1$.

Le rendement total est donc $\gamma_1 \gamma_2 = \frac{P_2}{P_1}$.

Les deux machines étant identiques et dans des conditions de fonctionnement sensiblement les mêmes, *on admet*, comme précédemment (p. 836), que leurs rendements sont sensiblement égaux.

On a alors

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \quad \text{et} \quad \gamma^2 = \frac{P_2}{P_1},$$

d'où

$$\gamma = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}.$$

Vitesse angulaire (en tours par minute).	RÉCEPTRICE							GÉNÉRATRICE							RENDEMENTS	
	Différence de potentiel (en volts).	Courant dans l'induit et dans l'excitation (en ampères).	Courant d'excitation (en ampères).	Puissance fournie à la réceptrice (en watts).	Puissance perdue dans le rhéostat d'excitation (en watts).	Puissance utile fournie à la réceptrice (en watts).	Différence de potentiel (en volts).	Courant dans l'induit (en ampères).	Courant d'excitation (en ampères).	Puissance disponible aux bornes de la génératrice (en watts).	Puissance perdue dans le rhéostat d'excitation (en watts).	Puissance totale rendue par la génératrice (en watts).	Rendement, abstraction faite des pertes dans les rhéostats d'excitation.	Rendement, y compris les pertes dans les rhéostats d'excitation.		
576	175	193	5,2	33 775	395	33 777	117	252,8	4,23	29 577	255	29 832	0,936	0,945		
582	176,5	208	5,2	36 712	395	36 314	120	253	4,80	30 860	255	30 615	0,909	0,918		
558	170	210	5,2	35 700	395	35 305	119,5	248	5,10	29 636	255	29 889	0,911	0,920		
586	177	215,5	5,2	38 143	398	37 745	122	251	4,95	30 622	255	30 877	0,896	0,903		
616	183	206,5	5,2	37 789	398	37 391	119,5	253	4,95	30 233	255	30 488	0,894	0,903		
590	177,5	222	5,2	39 405	398	39 007	125	256	4,95	32 000	255	32 260	0,902	0,910		
586	176,5	209	5,2	36 888	398	36 490	123	254	4,93	31 242	255	31 497	0,920	0,928		
592	178,5	212	5,2	37 842	398	37 444	125,8	247	4,93	31 072	255	31 327	0,920	0,915		

Puissance moyenne absorbée par les rhéostats d'excitation :
 Réceptrice : $p = 76 \times 5,2 = 395$ watts.
 Génératrice : $p' = 52 \times 4,9 = 255$ —

Le tableau ci-contre donne le détail des mesures prises et des calculs qui en résultent.

D'autres essais, faits pour une installation particulière (Olympia), ont porté sur un ensemble dit « dynamo à vapeur », consistant en un attelage direct de machine Rechniewski sur un moteur à vapeur Willans. En voici les résultats :

Moteur Willans de 135 chevaux indiqués.
 Machine Rechniewski, à 8 pôles, de 80 kilowatts à 380 tours par minute.
 Durée de l'essai : 8 heures.
 Puissance mécanique moyenne indiquée : 128 chevaux = 94 208 watts.
 Puissance électrique moyenne fournie : 102 — = 75 072 —
 Rendement de l'ensemble : 0,7968.
 Vapeur consommée par cheval-heure { indiqué . . . 9,600 kg.
 { électrique . . . 12,000 —

Machines de la Société Alsacienne, de Belfort. — Nous retrouvons dans les machines construites par cette Société les types de MM. Siemens et Halske, de Berlin, dont elle a la construction en France. Les dynamos *bipolaires* sont tout à fait analogues à celles des figures 291 et 353. Les collecteurs sont isolés à l'air (voir page 494), ce qui permet d'une part leur graissage à l'huile, et d'autre part l'emploi indifférent du cuivre, du bronze ou de l'acier pour les touches à jour. Dans ces conditions, ils sont établis en deux parties : l'une composée du nombre voulu de barres en bronze fixées à demeure ; l'autre, d'un nombre égal de touches en acier, vissées aux barres fixes, et sur lesquelles reposent les balais. Grâce à cette disposition, la durée du collecteur est considérablement augmentée, et le démontage et le remplacement éventuel des touches se font rapidement et avec une extrême facilité. Les paliers sont ajustés sur leurs supports par un joint cylindrique, de sorte qu'ils viennent toujours se centrer exactement d'eux-mêmes, sans nécessiter aucun repérage ni réglage. Voici le résultat d'un essai de rendement fait récemment sur l'une de ces machines :

Vitesse normale angulaire, en tours par minute. . .	450
A. — Puissance utile, en kilowatts.	25
B. — Pertes électriques, en watts :	
Excitation des inducteurs.	550
Perte dans l'induit.	915
C. — Pertes mécaniques et magnétiques, en watts :	
Frottements, courants parasites, hystérésis. . . .	780
Rendement électrique : $\frac{A}{A+B} = 94,5$ p. 100.	
Rendement commercial : $\frac{A}{A+B+C} = 91,7$ p. 100.	

Les types *multipolaires* sont également ceux des figures 120 n° 30, et 342, à inducteurs mobiles et à induit fixe, dans lesquels les circuits magnétiques sont très courts et les électro-aimants présentent à l'induit la presque totalité de leur surface polaire, ce qui réduit le courant

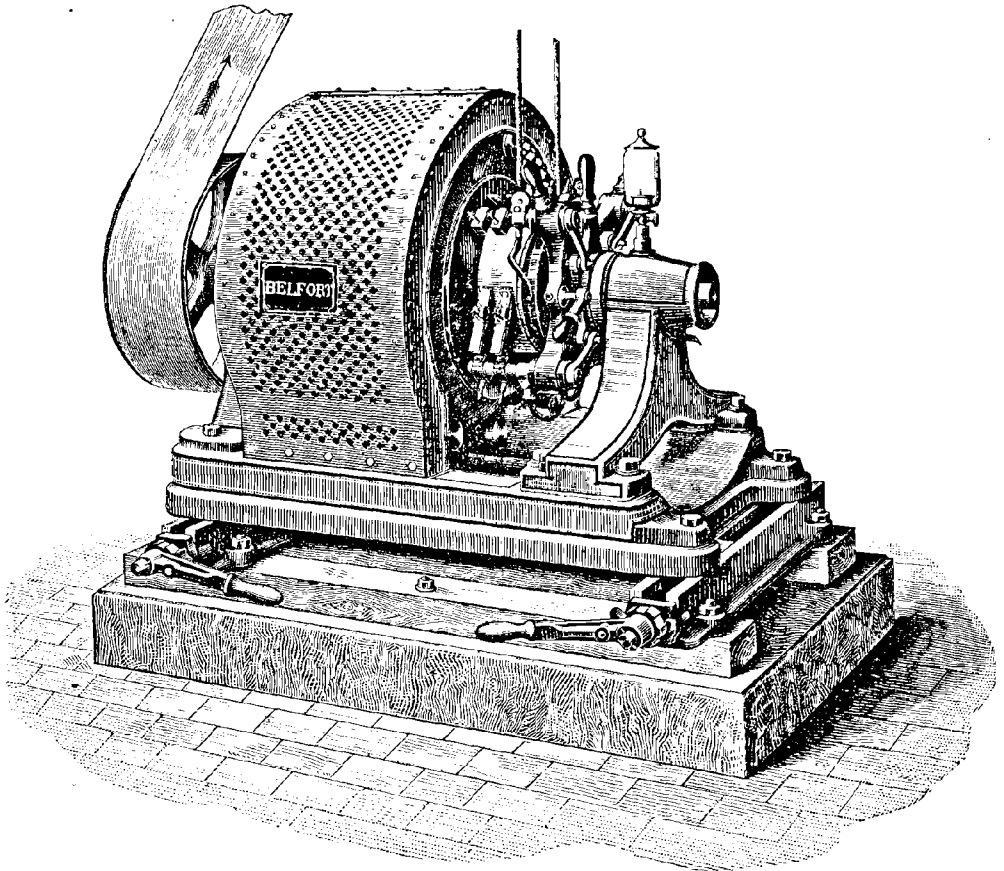


Fig. 537. — Machine « à collecteur », de la Société Alsacienne.

nécessaire à la production du magnétisme. D'autre part, ces électros ayant une très grande section de fer et assurant un champ magnétique extrêmement puissant, il en résulte qu'il suffit, pour obtenir une tension donnée, d'enrouler sur l'induit un fil conducteur de faible longueur, d'où faible résistance et faible absorption de puissance.

Pour les machines à haute tension, le collecteur habituel a été maintenu (fig. 537) ; mais dans les machines à basse tension, dites « sans

collecteur », les balais portent, comme on l'a vu pages 497 et 532, et figure 337, directement sur le fil de l'induit, en quelque sorte dénudé à la périphérie extérieure (fig. 538).

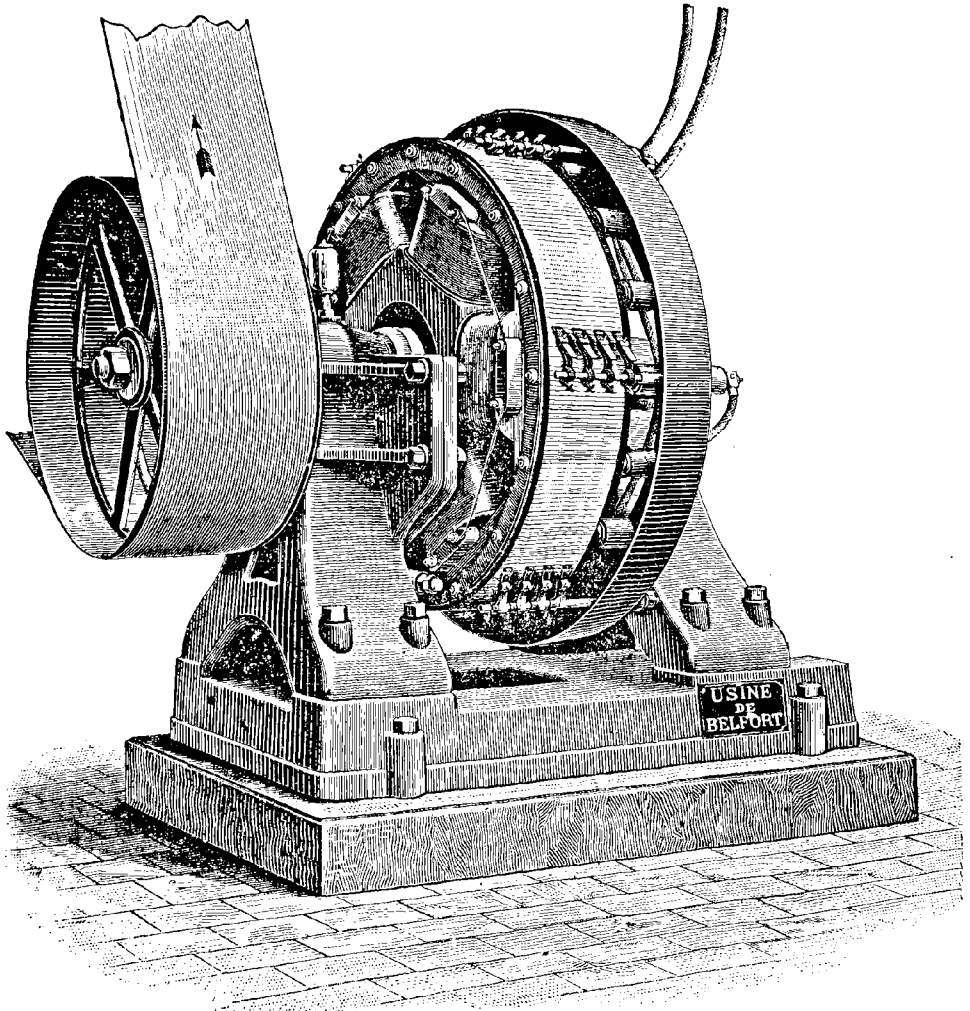


Fig. 538. — Machine dite « sans collecteur », de la Société Alsacienne.

Les figures 537 et 538 représentent les machines de ces types établies pour fonctionner par courroies.

Voici quelques résultats d'essais de ces machines, de puissance et vitesse angulaire différentes :

Vitesse angulaire normale, en tours par minute.	300	430	60
A. — Puissance utile, en kilowatts :			
200 ampères sous 80 volts	46	»	»
1 500 — — 130 —	»	200	»
750 — — 500 —	»	»	375
B — Pertes électriques, en watts :			
Excitation des inducteurs	495	3 073	9 350
Perte dans le fil induit.	640	5 300	7 750
C. — Pertes mécaniques et magnétiques, en watts :			
Frottements, courants parasites, hystérésis.	590	5 980	8 650
Rendement électrique : $\frac{A}{A + B} =$	0,938	0,959	0,956
Rendement commercial : $\frac{A}{A + B + C} =$	0,90	0,93	0,935

Les grandes machines de ce type sont identiques à celle de la figure 357.

DYNAMOS DIVERSES

Machine de « L'Industrie électrique » pour électrolyse. — Cette machine, utilisée à la fabrication du chlorate de potasse dans l'usine de Vallorbes (Suisse), procède du même principe que celle de la figure 532, étant appelée à alimenter un certain nombre de bains en série montés à quelque distance de son point de fonctionnement. Commandée directement par une turbine verticale, elle est également à axe vertical. Elle absorbe environ 660 chevaux à la vitesse angulaire normale de 400 tours par minute.

Son *inducteur* Thury est à huit pôles; noyaux en fer forgé, pièces polaires en fonte; alésage 1,400 mètre; profondeur axiale 750 millimètres. La machine est auto-excitatrice et montée en dérivation.

L'*induit*, en forme de tambour en cloche, est à bobinage multipolaire Thury. Les conducteurs qui le constituent sont en fils fins toronnés en câble, de manière à réduire les courants parasites.

Le collecteur, de 600 millimètres de diamètre, comprend 164 touches isolées au mica et à la fibre. Le courant est recueilli par 8 tiges portant chacune 20 charbons trapézoïdaux, cuivrés extérieurement.

La machine fournit 1 500 ampères sous 300 volts, à 400 tours par minute, avec un rendement industriel accusé de 93 p. 100.

Cette machine fonctionnant d'une façon absolument continue, une aération énergique lui est assurée par un ventilateur disposé à l'intérieur de l'induit.

Machine unipolaire de « L'Industrie électrique » pour électrométallurgie. — Cette machine (fig. 539) est également à axe vertical. Elle absorbe 300 chevaux environ, à la vitesse angulaire de 350 tours par minute.

Inducteurs. — Toute la carcasse en est en fonte. Elle forme deux circuits magnétiques complets, excités chacun par un enroulement spécial formé de rubans de cuivre séparés par des couches d'air pour en faciliter la ventilation. Cette carcasse est très massive, de manière à créer

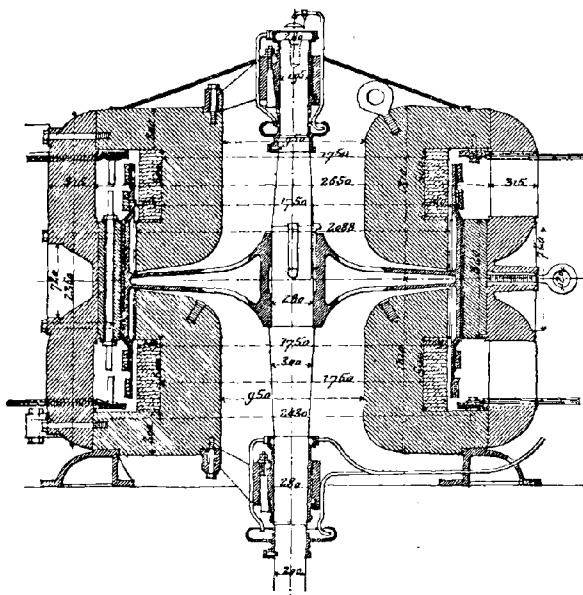


Fig. 539. — Machine unipolaire, pour Électrométallurgie, de la Compagnie de L'Industrie électrique.

un champ magnétique aussi puissant que possible, sans dépasser de sages limites pour le flux d'induction, dont la moyenne est, dans l'entrefer, de 8000 unités C. G. S.

L'alésage est de 1,450 mètre.

Induit. — L'induit est constitué par un tambour en fonte très mince, soutenu par son milieu. A la périphérie sont disposés 84 conducteurs ou barres de cuivre de 44 millimètres de largeur sur 3 millimètres d'épaisseur. Ces 84 conducteurs sont reliés en 4 groupes de 21 barres parallèles, produisant chacun 7,5 volts environ. Reliés en série, les 4 groupes peuvent ainsi donner 30 volts.

Le courant est recueilli sur huit cercles parallèles continus au moyen de 36 balais par cercle.

L'excitation indépendante absorbe 56 ampères sous 65 volts.

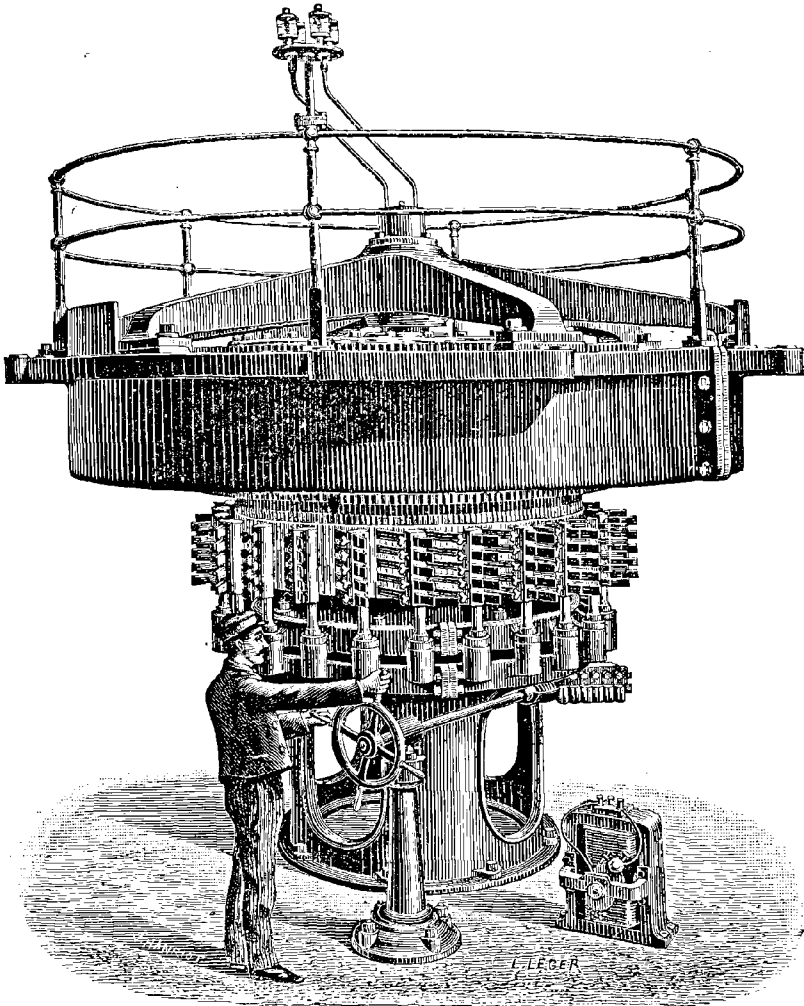


Fig. 540. — Machine multipolaire d'Oerlikon, pour Électrométallurgie.

Le poids de la machine est de 30 tonnes, et sa puissance, de 202 500 watts, par 6 750 ampères sous 30 volts, avec un rendement industriel accusé de 92 p. 100.

Elle est, comme la précédente, disposée pour marche non interrompue.

Machine d'Oerlikon pour électrométallurgie. — Cette machine (fig. 540), destinée à la production électrométallurgique de l'aluminium se signale par ses dimensions inusitées et son débit peu commun en exploitation continue. Son *induit*, monté verticalement, est directement relié à l'arbre, également vertical, de la turbine qui l'actionne. Le système mobile entier pèse 12 tonnes et fait 150 tours par minute. Cet induit, bobiné en tambour, comporte comme conducteurs des câbles de cuivre soigneusement isolés et logés dans des perforations pratiquées vers la périphérie du noyau. Des connecteurs en cuivre nu relient les conducteurs entre eux. Sur le collecteur, placé immédiatement au-dessous et mesurant 1 700 millimètres de diamètre sur 400 millimètres de haut, portent 120 balais qui recueillent un courant de 7 600 ampères sous 55 volts de différence de potentiel. Un volant latéral, actionnant une vis tangente, permet le déplacement rapide et facile du porte-balais général.

L'*inducteur* est constitué par une couronne de fonte à 24 pôles, qui repose sur la charpente en fer du bâtiment et porte le palier qui reçoit l'extrémité supérieure de l'arbre de rotation.

La machine est auto-excitatrice (la petite machine à droite sur la figure en est indépendante et ne sert qu'à montrer, à l'échelle, les deux extrêmes de la construction d'Oerlikon en machines dynamos) et fonctionne absolument sans étincelles (sauf réglage des balais), quelles que soient les variations considérables de charge que comporte sa marche.

En voici les principales dimensions :

Diamètre extérieur de la couronne inductrice.	3 520 mm.
Hauteur libre au-dessous de celle-ci.	2 270 —
Hauteur totale de la machine	3 800 —
Poids total	34 750 kg.

ALTERNATEURS

Alternateurs Cail-Helmer. — *Alternateur à flux renversé.* — L'induit fixe de cette machine comporte douze ensembles, pôles et bobines, répartis, par l'entremise de boulons et de traverses, à l'intérieur d'une couronne C fixée sur le bâti de la machine (fig. 541 et 542).

L'inducteur mobile comprend douze ensembles correspondants, fixés par des boulons sur un tambour à joues constitué par deux pièces identiques L, clavetées sur l'arbre et serrées l'une contre l'autre par les écrous M.

Toute la partie magnétique est constituée par des feuilles de tôle rectangulaires, en fer extra-doux, de 0,35 millimètre d'épaisseur, courbées en forme d'U et séparées par du papier. L'emploi de tôles rectangulaires présente le grand avantage de n'exiger aucun outillage spécial et de ne donner que des déchets de tour insignifiants. Ces tôles sont en outre recuites après avoir été façonnées.

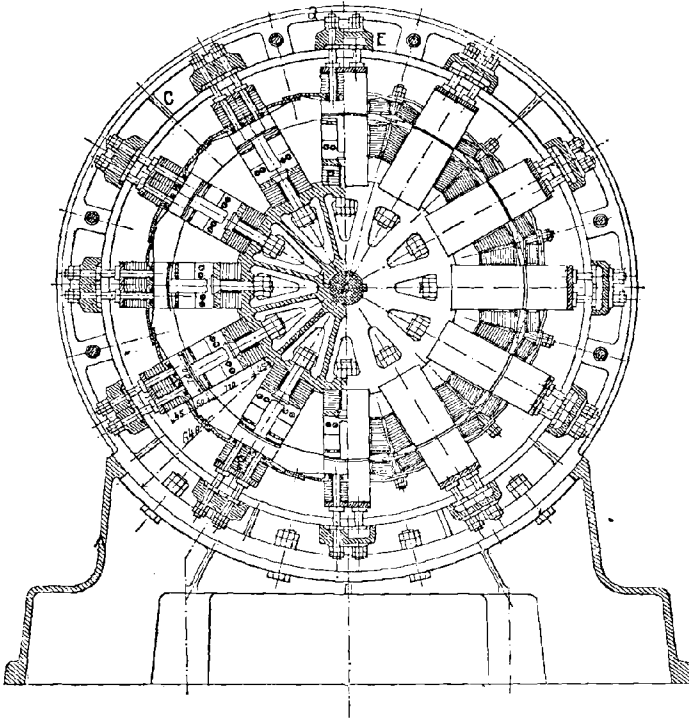


Fig. 541. — Alternateur Cail-Helmer (Coupe transversale).

On a cherché à prévenir le plus possible le développement de courants parasites dans les parties qui maintiennent les tôles, en les évidant et les plaçant dans les endroits les moins affectés par les variations de flux. La fréquence étant peu élevée (60 périodes par seconde), les tôles étant très douces et minces, les pertes dans le fer par hystérésis et courants parasites sont extrêmement réduites.

Pour permettre de remplacer rapidement un ensemble, s'il y a lieu, le bâti est muni d'une rainure en queue d'aronde dans laquelle on introduit une plaque sur laquelle le palier correspondant peut glisser après

avoir été déboulonné. La course est assez grande pour que le tambour puisse sortir complètement des couronnes qui supportent l'induit.

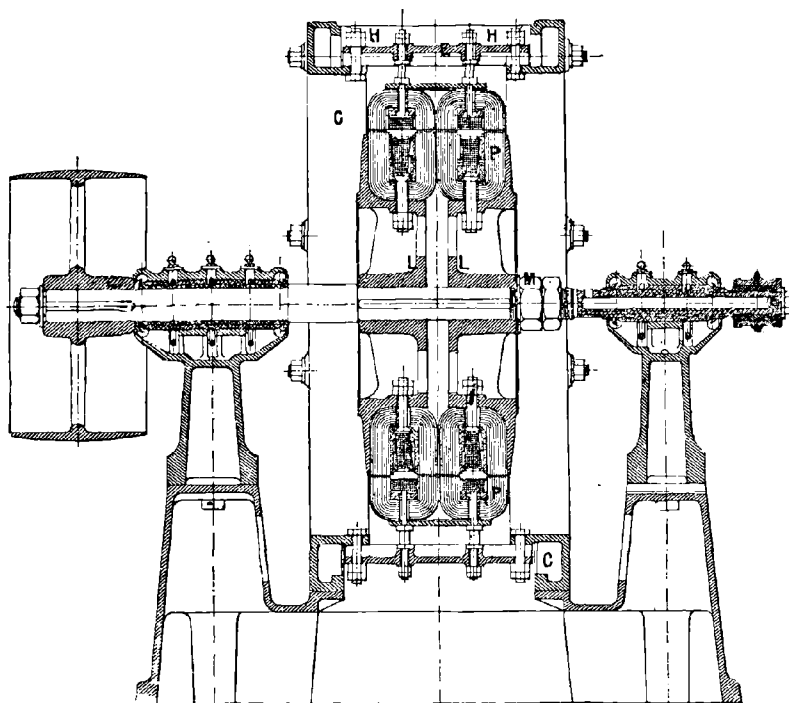


Fig. 542. — Alternateur Cail-Helmer (Coupe longitudinale).

Voici les principales constantes relatives à un alternateur de ce type de 30 kilowatts à 600 tours par minute :

Puissance utile, en kilowatts.	30
Différence de potentiel efficace, en volts.	2 000
Intensité efficace, en ampères.	17,6
Vitesse angulaire, en tours par minute.	600
Nombre de pôles inducteurs	12
Fréquence, en périodes par seconde.	60
Induction maximum dans le fer, en unités C. G. S.	6 300
Poids du fil induit, en kilogrammes.	52
— inducteur, en kilogrammes.	100
Poids du fer induit, en kilogrammes.	168
— inducteur, en kilogrammes.	252

La figure 543 donne en perspective la vue d'un petit alternateur

d'essai de ce système, dans lequel 5 pièces polaires étaient montées suivant une génératrice du tambour. La multiplicité des bornes à la

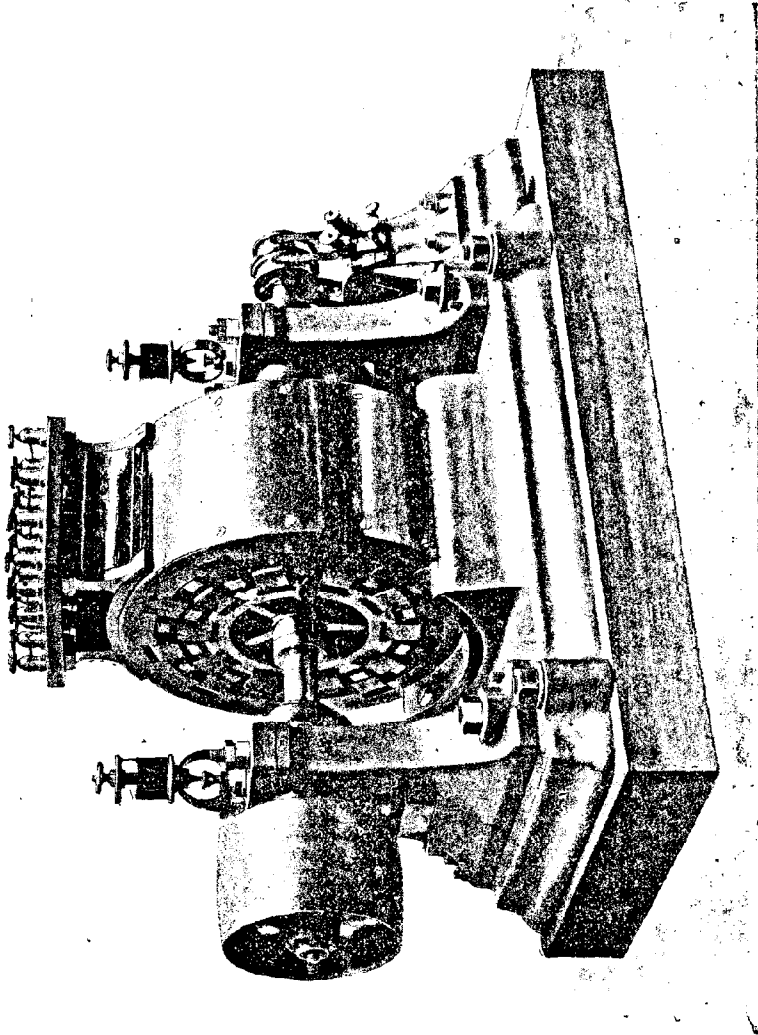


Fig. 543. — Petit Alternateur d'essai Cail-Helmer.

partie supérieure avait pour objet de permettre, à titre d'expériences, divers groupages des bobines.

Avec ce petit modèle, on obtient 1 400 watts utiles à la vitesse angulaire de 2 000 tours par minute, en perdant environ 10,5 p. 100 dans l'excitation.

Alternateur-Volant. — Pour les stations centrales, la Société Cail a transformé l'alternateur Helmer en *alternateur-volant*, dont l'ordre

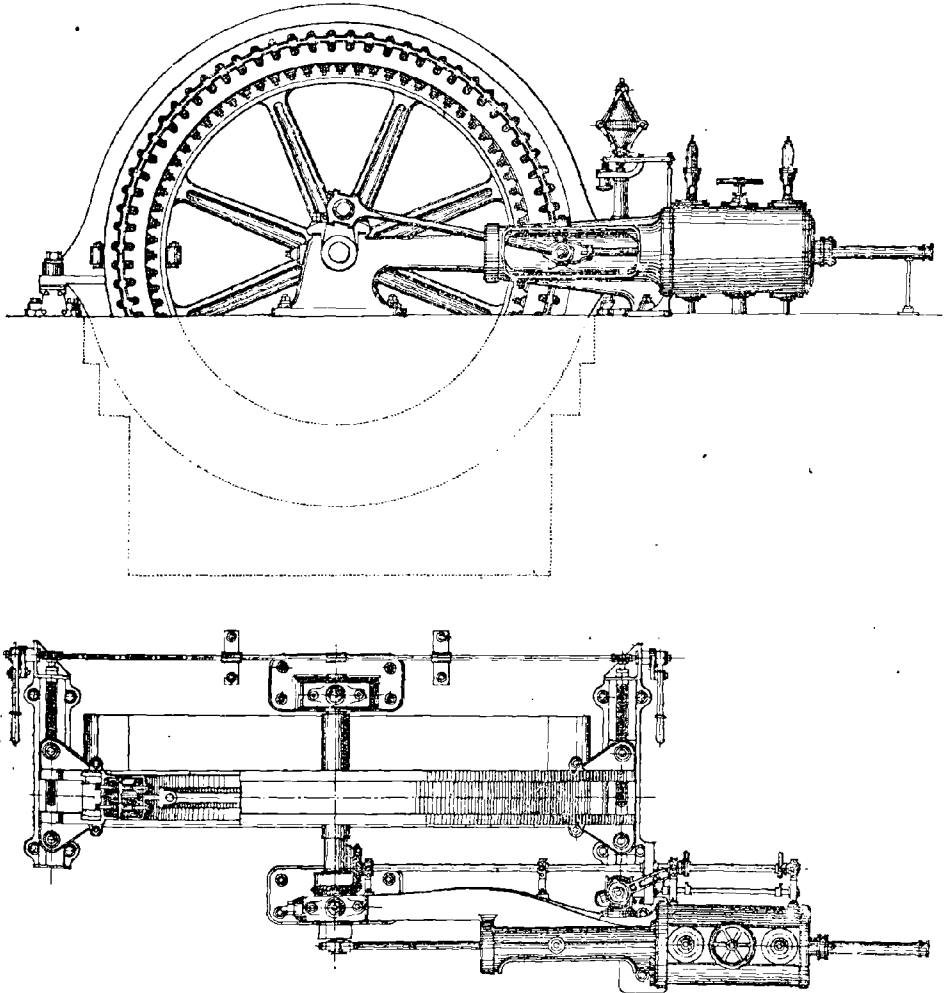


Fig. 544 et 545. — Alternateur-Volant Cail-Helmer (Élévation et Plan).

alphabétique nous fournira l'occasion d'indiquer un peu plus loin les avantages (p. 869).

Les figures 544 et 545 représentent, en élévation et en plan, un de ces alternateurs-volants Cail-Helmer, d'une puissance de 60 kilowatts, accouplé à une machine Sulzer.

Le principe en est identique à celui des alternateurs de plus faible puissance ci-dessus décrits. Les éléments inducteurs sont fixés à la périphérie du volant de la machine à vapeur ; les éléments induits sont disposés à l'intérieur d'un tambour fixe reposant sur des glissières. Deux vis de rappel commandées par des cliquets et vis sans fin permettent de déplacer aisément l'induit sur ces glissières pour en faciliter la visite et l'entretien.

Voici les principales données relatives à cette machine :

Puissance, en watts	60 000
Différence de potentiel, en volts	2 400
Intensité, en ampères	25
Vitesse angulaire, en tours par minute	90
Fréquence, en périodes par seconde.	60

Cet alternateur-volant se construit pour toutes autres puissances supérieures.

Alternateur à résistance magnétique variable. — La Société Cail construit également, sous le nom d' « alternateurs à flux ondulé » des alternateurs de ce type. Comme contre-partie des avantages de sécurité que présentent ces machines, leur puissance spécifique est inférieure à celle des alternateurs à flux renversé, les variations de flux étant beaucoup moins grandes, pour des forces magnétomotrices égales, par suite

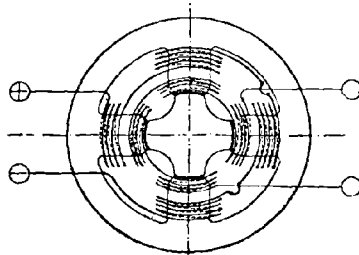


Fig. 546. — Alternateur Cail-Helmer, à résistance magnétique variable.

du magnétisme rémanent. On remédie cependant, dans une très large mesure, à cette infériorité en adoptant la disposition de la figure 546, c'est-à-dire en plaçant les bobines induites aux extrémités des pièces fixes, très près de la partie tournante, les variations de flux étant maximum en ces points. Le fil inducteur est enroulé en arrière.

Un petit alternateur d'essai de ce système, tournant à la vitesse angulaire de 1 800 tours par minute, a fourni une puissance de 1 200 watts.

L'induction moyenne maximum dans le fer était de 6 200 unités C. G. S., la perte dans le circuit d'excitation, de 12 p. 100.

Alternateur de haute fréquence. — Les alternateurs ci-dessus, dits à « flux ondulé », se prêtent remarquablement à la production des hautes fréquences. M. Helmer, qui a étudié ces différentes machines pour la Société Cail, a résolu cette question au moyen d'un dispositif simple et

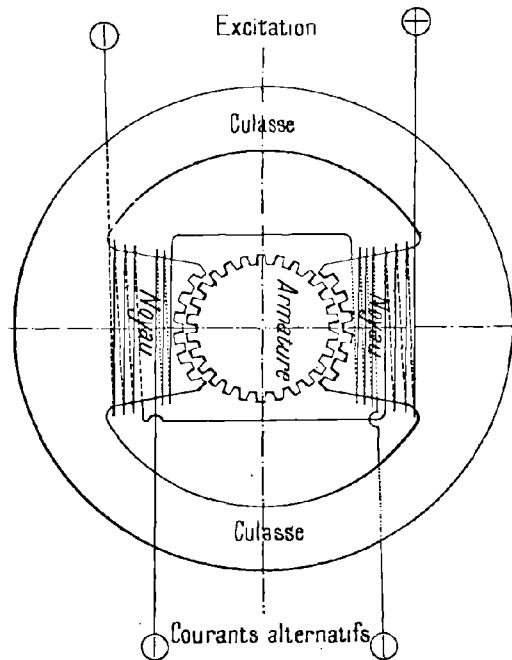


Fig. 547. — Alternateur Cail-Helmer, de haute fréquence.

ingénieux, en employant des tambours mobiles très finement dentés tournant à l'intérieur de pièces polaires munies d'une denture identique. On obtient des courants plus ou moins décalés par un simple décalage de position des dentures des différentes pièces polaires.

La figure 547 représente un alternateur ordinaire de haute fréquence; les figures 548 et 549, un générateur et une réceptrice à courants triphasés.

Transformateur Cail-Helmer à résistance magnétique variable. — Ce transformateur a un circuit magnétique très peu résistant. — Il

se compose de deux plaques de fonte P P' (fig. 550) entre lesquelles

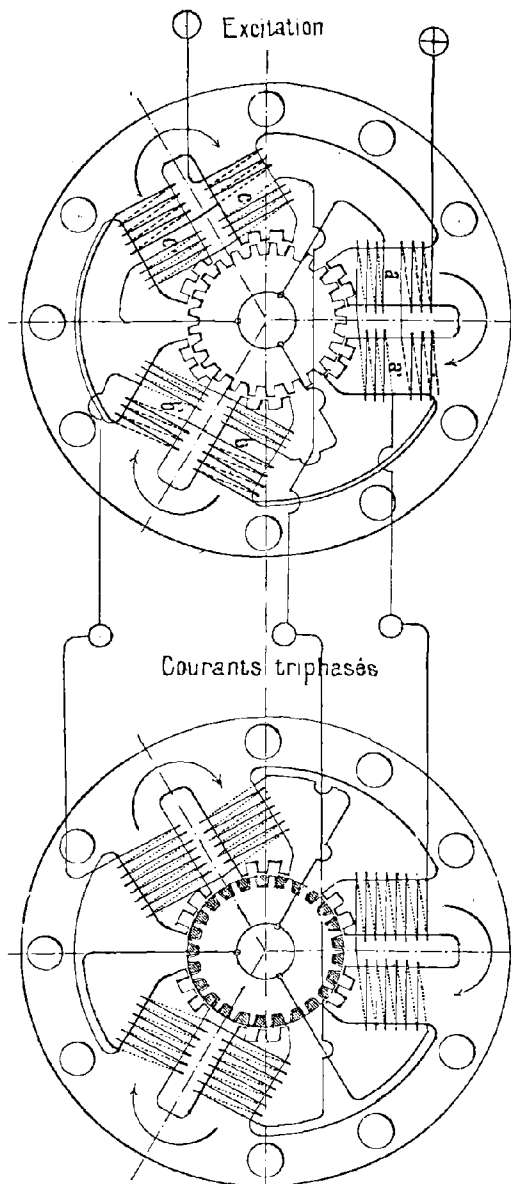


Fig. 548 et 549. — Alternateur et Moteur polyphases Cail-Helmer.

sont fortement serrées par des boulons *b* des tôles de fer doux empi-

lées les unes sur les autres, découpées intérieurement de façon à recevoir les bobines primaires et secondaires f , et alésées au centre de manière à permettre l'introduction, à frottement doux, du cylindre A' en tôles de fer doux, monté sur une tige centrale t . Ce cylindre est échancré symétriquement en V V (fig. 551); il peut pivoter dans le trou central de la plaque P' de façon à modifier la résistance magnétique, d'un minimum représenté par la figure 551 à un maximum

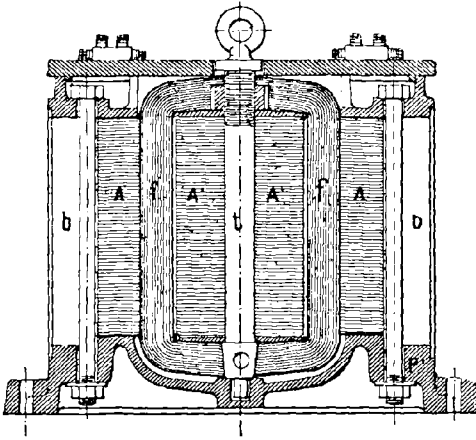


Fig. 550. — Coupe verticale.

Transformateur Cail-Helmer à résistance magnétique variable.

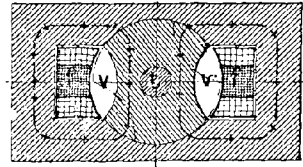


Fig. 551. — Coupe horizontale.

correspondant à une rotation de 90° du cylindre A' autour de son axe t .

Cette simple disposition permet, en changeant de temps à autre, soit à différentes heures d'éclairage plus ou moins chargées, le calage du cylindre A' , de faire travailler les transformateurs d'une station dans les meilleures conditions de rendement moyen.

On fonctionne avec une résistance magnétique d'autant plus grande qu'on s'éloigne davantage de la pleine charge, de façon à atténuer l'importance des pertes par hystérésis lorsque la charge moyenne baisse.

Le démontage s'effectue très rapidement : par une simple traction sur l'anneau C , on enlève le tambour de tôles avec l'ensemble des bobines.

Le tableau suivant donne les principales constantes relatives à un transformateur de ce type, de 10 kilowatts :

Puissance en kilowatts.	40
Section active totale du circuit magnétique, en dehors du cylindre central, en cm ²	245
Longueur du circuit magnétique, en cm.	88
Poids total du fer, en kg.	208
Fréquence, en périodes par seconde.	60

Primaire :

Différence de potentiel efficace aux bornes, en volts.	2 000
Nombre de spires.	545
Densité de courant, en ampères par mm ²	1,28

Secondaire :

Différence de potentiel efficace aux bornes, en volts	410
Nombre de spires.	30
Poids de cuivre, en kg.	24
Densité de courant, en ampères par mm ²	1,6
Induction maximum, en unités C. G. S.	5 630

Alternateur Labour. — Cette machine (fig. 552) n'est autre qu'un alternateur de l'ancien type Siemens rajeuni par la Société « L'Éclairage électrique » qui le construit, et francisé sous le nom de machine Labour. Il diffère de son devancier par l'emploi de carcasses en ébonite pour les bobines induites, solidement maintenues à la base entre deux disques de bronze fixés sur l'arbre, et à la partie supérieure entre deux couronnes de même métal. Cette disposition réduit les courants parasites qui entraînent une dépense inutile d'énergie et un grand échauffement de l'induit; elle assure en même temps un excellent isolement des bobines induites.

Le système inducteur est resté identique à celui de Siemens.

L'excitatrice, du type Gramme à 4 pôles, fait corps avec l'alternateur; les deux induits sont calés sur le même arbre.

Les inducteurs de cette excitatrice, le palier antérieur et la culasse antérieure de l'alternateur sont montés sur une même plaque de fondation et peuvent être amenés en avant au moyen d'une vis et d'un volant, ce qui facilite l'inspection et le nettoyage des deux induits.

Transformateurs. — Ces alternateurs fonctionnent sur des transformateurs primitivement élaborés en vue de cette alimentation spéciale des foyers Jablochkoff appliquée en grand à l'Exposition de 1889. Ces transformateurs sont constitués par des feuilles de tôle très douce isolées et découpées, avec le moins possible de chutes perdues, d'une façon tout

à fait analogue aux inducteurs des machines Rehniewski. Le vide entre les bobines est rempli par la majeure partie de ces chutes, dont le poinçonnage a été étudié de manière à présenter une grande surface de joint magnétique, et, par suite, une très faible résistance. Pour faciliter le refroidissement, les feuilles de tôle ont des dimensions inégales et sont montées en désaffleurement étagé les unes par rapport aux autres ; un petit espace vide est en outre réservé entre le fer et les

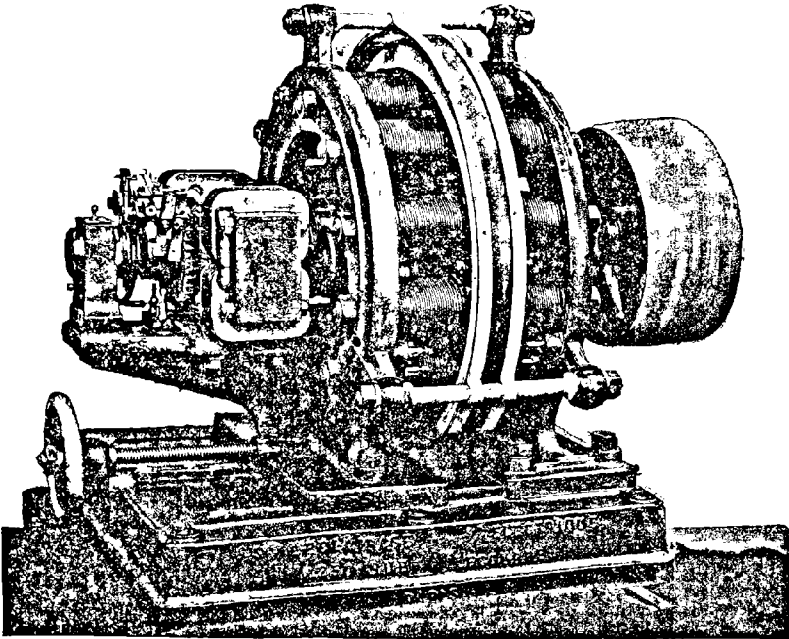


Fig. 552. — Alternateur Labour.

bobines secondaires et primaires. Enfin les pièces de serrage, en fonte, servant à maintenir le tout, sont caloriquement isolées par des plaques de bois.

Différents essais faits sur un ensemble de ce genre, de 20 000 watts, ont donné les résultats suivants :

Excitatrice :

Résistance des inducteurs à 20° C., en ohms.	8,08
Résistance de l'induit entre balais, à 20° C., en ohms.	0,42
Température après 3 heures de marche (température extérieure, 15° C.), en degrés C.	20°

Différence de potentiel à pleine charge, en volts.	43
Courant à pleine charge, en ampères.	29
Différence de potentiel aux bornes du rhéostat en série, en volts.	25
Rendement électrique	0,85
Vitesse angulaire, en tours par minute	800

Alternateur :

Résistance des inducteurs à 45° C., en ohms	1,52
Résistance de l'induit à 45° C., en ohms.	11
Température après 3 heures de marche (température extérieure, 15° C.), en degrés C.	49°
Différence de potentiel aux bornes, en volts.	2 000
Intensité à pleine charge, en ampères	10
Rendement électrique	0,90
Vitesse angulaire, en tours par minute.	800
Fréquence, en périodes par seconde.	80

Transformateur :

Résistance du circuit primaire à 46° C., en ohms.	2,363
Résistance du circuit secondaire à 46° C., en ohms.	0,00573
Rapport de transformation.	1:22
Chute de potentiel dans le secondaire à pleine charge, en volts.	1,15
Perte par hystérésis, en watts.	250
Rendement	0,9650

Ensemble :

Rendement	0,90
---------------------	------

Alternateurs Thury de la C^{ie} de L'Industrie électrique. — La disposition ici adoptée est analogue à celle de M. Helmer. La variation du flux magnétique n'y est produite que dans l'entrefer.

Ce type d'alternateur est appliqué à la station centrale del Parco, exploitée par la Société piémontaise d'électricité de Turin. Ces machines absorbent une puissance de 375 chevaux-vapeur (soit 276 kilowatts) et donnent, à 315 tours par minute, un courant de 125 ampères sous une différence de potentiel de 2 000 volts, soit 250 kilowatts, avec un rendement de 90, 5 p. 100. Le schéma en est donné par la figure 553.

Comme pour la machine Helmer, cette disposition permet d'obtenir une très grande fréquence et de répéter les expériences de Tesla. La C^{ie} de L'Industrie électrique a en effet construit sur ce principe un petit

alternateur de 20 ampères sous 100 volts avec 5 000 périodes par seconde pour M. le professeur H. F. Weber, de Zurich.

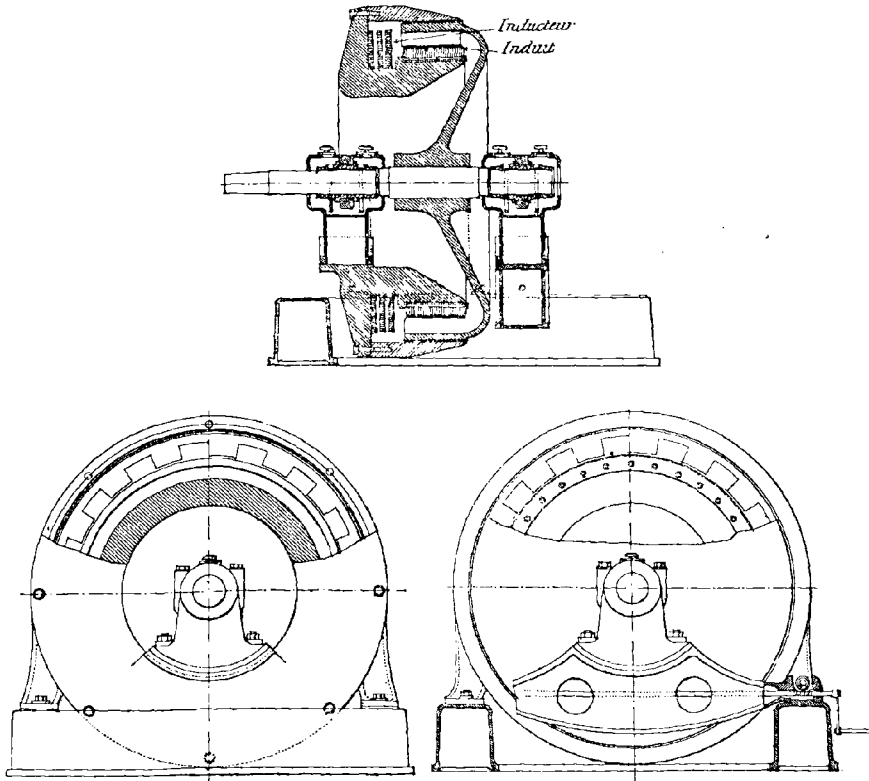


Fig. 553. — Alternateur Thury, à induit et inducteurs fixes.

Alternateurs simples et Transformateurs d'Oerlikon. — Ainsi qu'on l'a vu page 640, les Ateliers d'Oerlikon construisent comme alternateurs simples ceux de M. Gisbert Kapp. Leurs transformateurs (fig. 554) fonctionnant sur ces alternateurs rappellent ceux décrits page 729. Nous les mentionnons surtout pour en donner (fig. 555) les courbes de rendement et de perte de charge dont peu de spécimens ont encore été reproduits pour des transformateurs.

Cette figure, afférente à un transformateur de 20 kilowatts, donne les courbes en question, non seulement depuis zéro jusqu'à la pleine charge, mais encore prolongées jusqu'à une surcharge de 15 p. 100. Elle indique également les puissances respectivement absorbées par

hystérésis et courants de Foucault dans le fer, par courants de Fou-

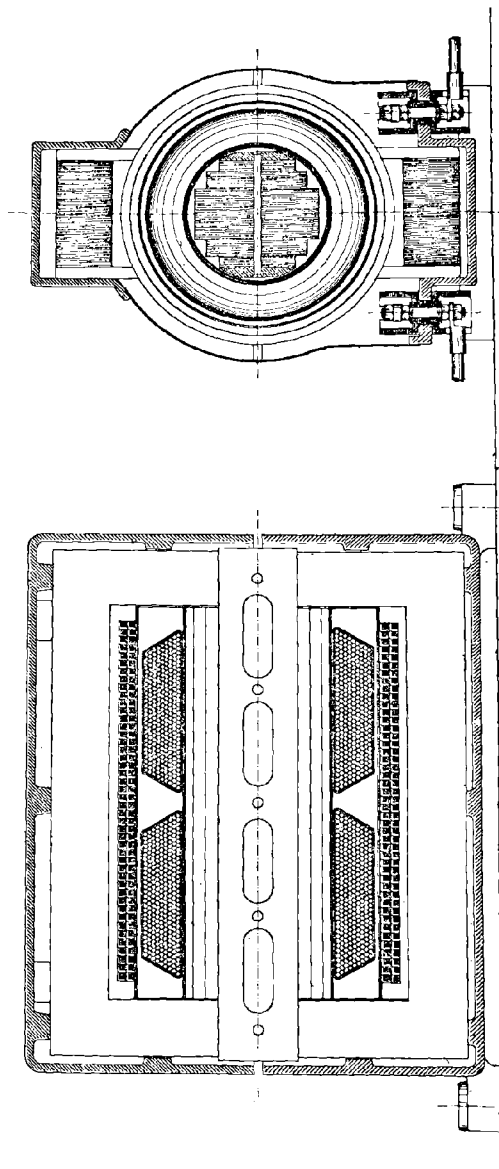


Fig. 554. — Transformateur de 20 kilowatts, d'Oerlikon.

cault dans le cuivre, et par circulation des courants primaire et secondaire. A ces différents titres, elle est très intéressante.

Alternateur polyphase d'Oerlikon. — Cette génératrice (fig. 556) de 100 chevaux, à haute tension (analogue à celle de Brown, p. 677 à 680), comporte un induit fixe annulaire à 18 pôles convergents intérieurement, formés de disques de tôle découpée. Ces pôles radiaux reçoivent les bobines, montées séparément et soigneusement isolées de manière à supporter une tension pouvant atteindre 5 000 volts. L'inducteur mobile affecte la forme connue d'une roue en acier fondu, à 12 pôles, qui, entre ses deux moitiés, enveloppe complètement la bobine d'excitation placée au centre. Des noyaux de fer lamellé forment les

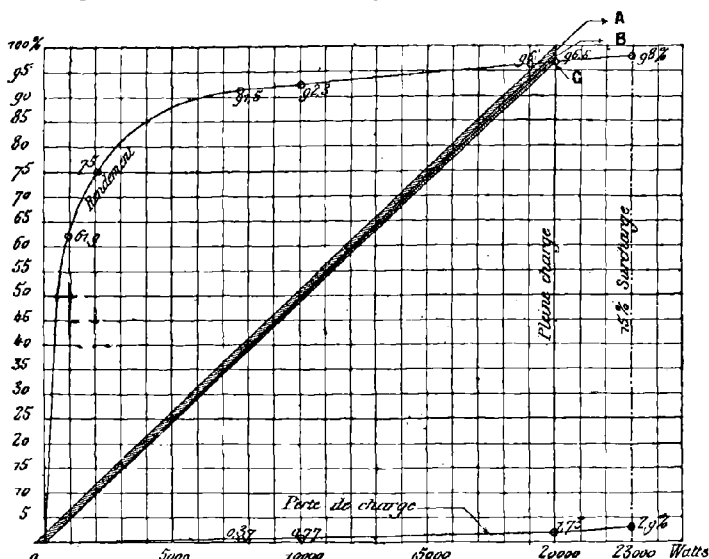


Fig. 555. — Rendement et Perte de charge d'un Transformateur de 20 kilowatts d'Oerlikon.

A. Hystérésis et Courants parasites dans le fer; — B. Courants parasites dans le cuivre; C. Puissance absorbée par les courants primaire et secondaire.

portions extérieures extrêmes des rayons polaires; ils sont engagés de fonte dans le reste de la pièce d'acier. On évite ainsi un trop grand échauffement de ceux-ci. Sur l'arbre de la roue inductrice est fixée une petite excitatrice appropriée.

Une machine de ce type fournit à Pergine (Tyrol méridional) un courant triphasé sous 2 000 volts, pour distribution de lumière et de travail mécanique. Attelée directement, par un accouplement élastique, à une turbine, elle marche à la vitesse angulaire de 600 tours par minute.

En voici les principales dimensions :

Alésage de l'induit	830 mm.
Profondeur axiale de l'induit	300 —
DYNAMO-ÉLECTRIQUES.	55

Diamètre extérieur de la machine	1 200 mm.
Longueur axiale maximum	1 860 —
Hauteur maximum	1 500 —
Poids (sans l'accouplement)	3 120 kg.

Les mêmes ateliers construisent des transformateurs polyphasés applicables à ces alternateurs.

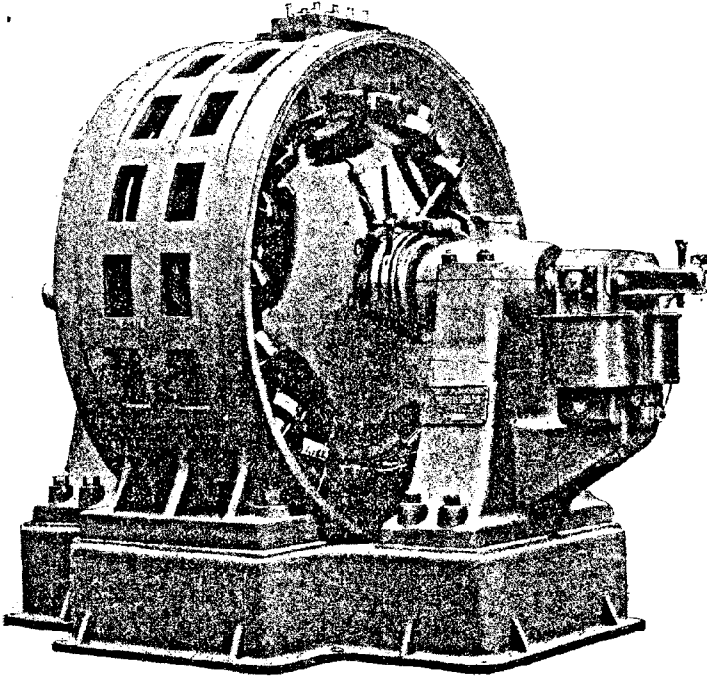


Fig. 556. — Alternateur d'Oerlikon, à courant triphasé.

Moteurs à courants alternatifs d'Oerlikon. — *Moteur de 3 chevaux à champ tournant* (fig. 557). — Il appartient au groupe des moteurs asynchrones d'Oerlikon. Son inducteur est un anneau Gramme tétrapolaire, à fil noyé dans des évidements, avec la disposition connue pour la réception de 3 courants alternatifs décalés d'un tiers de période, sous une tension de 190 volts, aboutissant à trois bornes isolées fixées au bâti. La partie mobile est constituée par un cylindre en fer, formé d'un assemblage de tôles perforées à la périphérie, dans les trous desquelles sont engagées de fortes barres de cuivre isolées, reliées elles-mêmes des deux côtés, soit par des anneaux de cuivre en un induit effectivement fermé, soit par un bobinage polyphase convenable en un

induit tétrapolaire. Ce moteur, sans collecteur ni bague de contact, comme ses similaires, démarre sous une charge correspondant à 5 chevaux environ à l'aide d'une simple bobine de réaction ou de

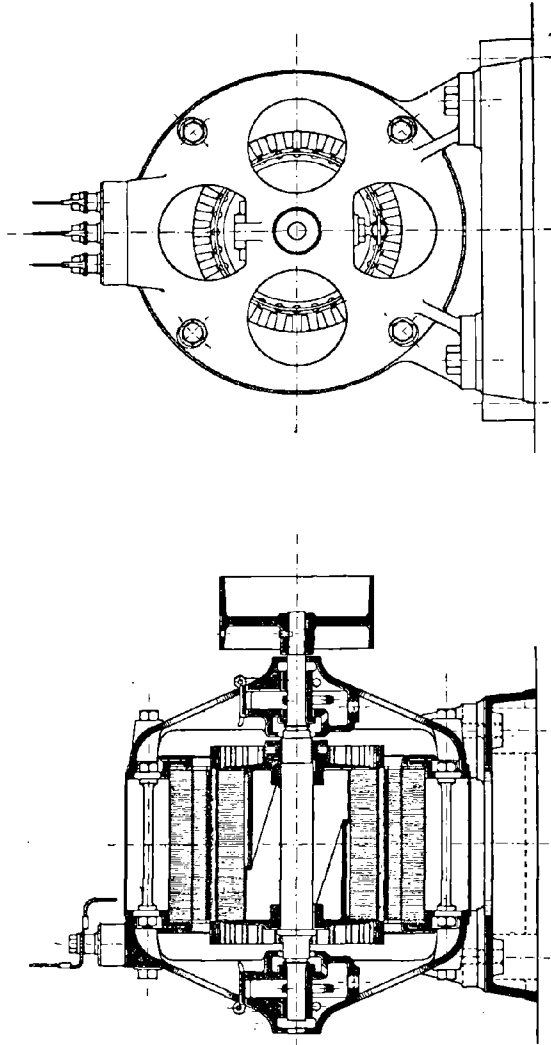


Fig. 557. — Moteur d'Oerlikon, à courants triphasés.

résistance. Sa vitesse de rotation ne diminue que de 2 p. 100, de la marche à vide à son fonctionnement à pleine charge. Il réunit également de la façon la plus satisfaisante les avantages d'un moteur asynchrone à ceux d'une marche presque synchrone avec un rendement de

72 p. 100. Pour 50 cycles par seconde du courant d'alimentation, il fait 1 400 tours par minute. Son induit fermé a un diamètre de 200 millimètres sur une profondeur de 180 millimètres.

Diamètre maximum du bâti	380 mm.
Longueur maximum suivant l'axe.	520 —
Poids total	150 kg.
Poulie : diamètre	160 mm.
— : largeur.	100 —

Moteur à courants alternatifs simples (fig. 558). — Tout à fait semblable, comme forme et comme construction, au précédent, il n'en

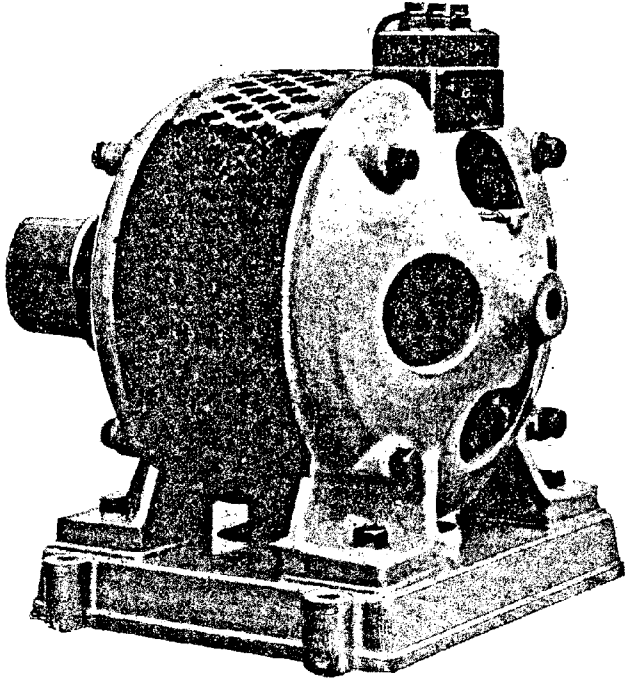


Fig. 558. — Moteur d'Oerlikon, à courants alternatifs.

diffère que par le couplage de l'enroulement de l'inducteur fixe. En partageant ce bobinage en deux parties, l'une de phase principale et l'autre de phase de secours, on obtient, par simple interposition de résistance, un démarrage du moteur sous charge ; et, en réunissant ensuite les deux bobinages en un seul, on atteint le rendement relativement élevé de 70 p. 100 pour un moteur de 2 chevaux.

Ses dimensions de fer sont les mêmes que celles du moteur polyphase de 3 chevaux ci-dessus décrit. A 65 cycles par seconde dans le circuit d'alimentation et sous une différence de potentiel de 190 volts, il fait 1 780 tours par minute et absorbe 2 100 watts.

Poids.	150 kg.
Poulie : diamètre	140 mm.
— : largeur.	80 —

Alternateurs Patin. — La renaissance des courants alternatifs donne lieu en ce moment à un nouvel élan dans la construction des *dynamovolants*, dont l'un des premiers types a été celui de Gordon (voir p. 653).

On a déjà vu l'intérêt que présente pour les stations centrales l'attelage direct des dynamos sur les machines qui les actionnent. Il supprime les courroies ou cordes de transmission avec les défauts qui leur sont inhérents : encombrement et danger, échauffement des paliers (par trop de tension) ou glissements et fluctuations de la lumière (par trop de mous), surveillance et entretien coûteux, pertes de puissance, etc. — D'autre part les machines à courant continu directement attelées sur les moteurs exigent des vitesses qui obligent à recourir à des machines à vapeur spéciales, sur la consommation et l'usure desquelles l'expérience n'est pas encore suffisamment faite. — Enfin, pour les machines à haute tension, la difficulté d'isolement de l'induit vient s'ajouter aux difficultés mécaniques; aussi a-t-on eu l'idée plus rationnelle de faire tourner les inducteurs au lieu des induits; mais leur grande masse à mettre en mouvement nécessite une construction beaucoup plus robuste et une dépense de vapeur beaucoup plus considérable. Les alternateurs, avec le concours des transformateurs et la ressource des courants polyphasés, semblent quant à présent le seul moyen de parer aux inconvénients d'ordre électrique ci-dessus signalés, et les alternateurs-volants donnent une solution très heureuse du problème mécanique de la question, en ce que la masse même des inducteurs y est utilisée pour servir directement de volant au moteur. — De là la faveur dont ils jouissent actuellement, leur constitution les rendant applicables à toutes les machines à faible vitesse des anciens types connus et longuement expérimentés.

Ancien associé en France et disciple de M. de Ferranti, M. Patin, suivi par M. Helmer, a remis en vigueur ce principe, et il est facile de reconnaître dans ses alternateurs la machine Ferranti renversée dans ce but. Les bobines induites, construites exactement sur les mêmes données,

sont disposées horizontalement dans un étroit entrefer qui sépare les deux anneaux concentriques d'inducteurs rayonnants, solidaires l'un de l'autre et clavetés sur l'arbre du moteur auquel ils servent de volant

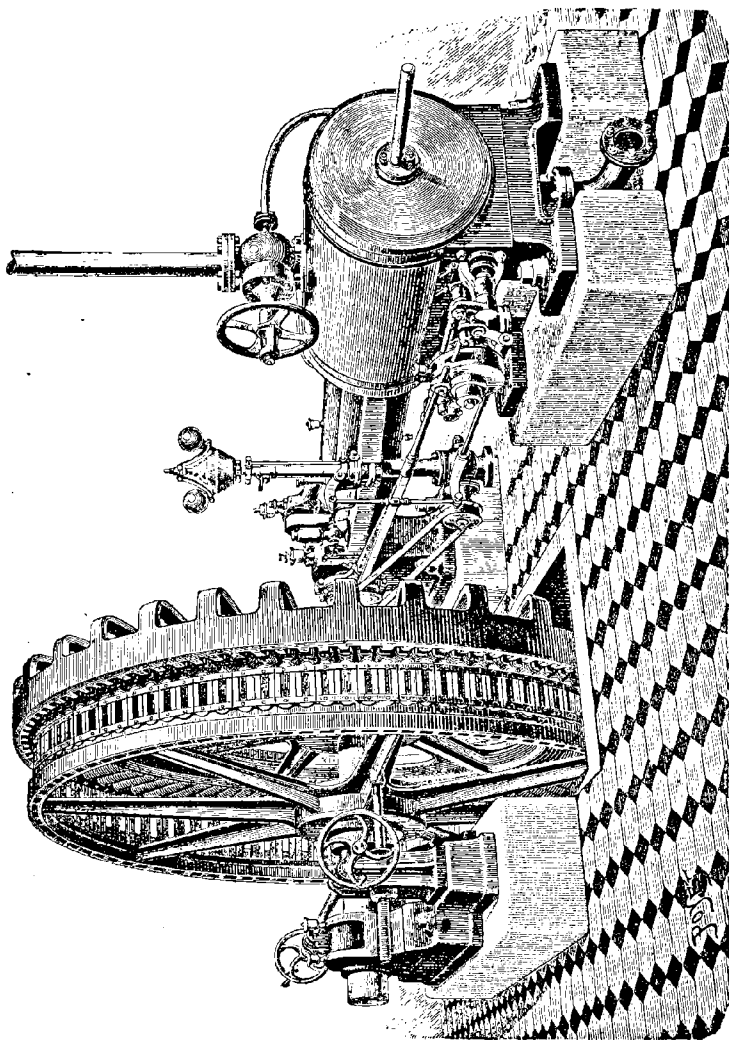


Fig. 559. — Alternateur-Volant de M. Patin.

(fig. 559). Deux manivelles situées près du palier permettent de faire avancer l'induit en dehors du système inducteur, de le visiter et d'y effectuer aisément et rapidement le remplacement éventuel des bobines qui sont complètement indépendantes les unes des autres.

Ces alternateurs, qui jusqu'à 50 kilowatts sont établis de manière à pouvoir être actionnés par courroies, se construisent en dynamos-volants jusqu'à la puissance de 1 920 kilowatts, ou 2 600 chevaux! Ils peuvent également bien s'atteler sur turbines à axe horizontal ou vertical.

Moteurs Patin à courants alternatifs. — Comme complément de son alternateur, M. O. Patin construit aussi des transformateurs analogues à ceux de M. de Ferranti, et des moteurs dits « Patin-Levasseur » qui présenteraient les avantages suivants : (a) de démarrer sous charge, (b) d'être asynchrones, (c) de fonctionner sans bruit ni trépidations, (d) de marcher à une vitesse réglable à volonté, et dans un sens ou dans l'autre, avec point d'arrêt, par la simple manœuvre d'une ma-

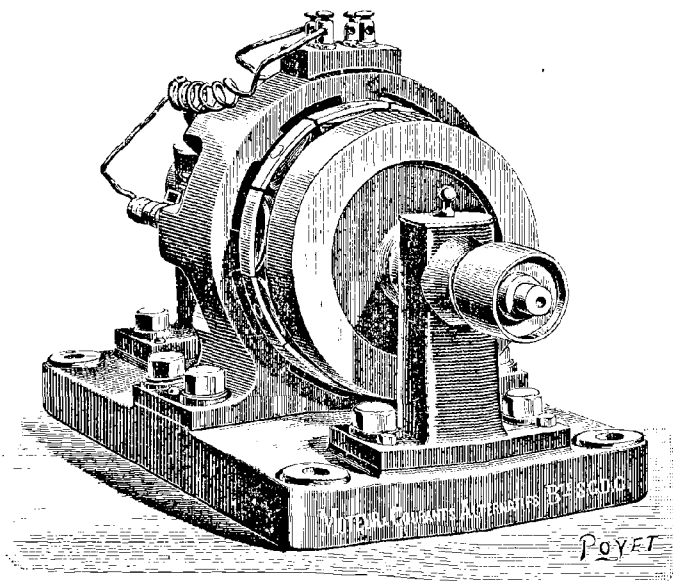


Fig. 560. — Moteur Patin-Levasseur à courants alternatifs.

nette, (e) de fonctionner également comme moteurs à courant continu. La figure 560 en donne une vue en perspective.

Alternateurs Zipernowsky-Creusot. — MM. Schneider et C^{ie}, du Creusot, concessionnaires en France de la construction des machines et appareils Ganz-Zipernowsky, établissent les alternateurs dont le schéma et des détails de construction ont été donnés pages 630, 650 et 740. La

figure 561 en donne la vue en perspective. Leur puissance varie de 10 à 360 kilowatts. La différence de potentiel aux bornes est de 2 000 à 5 000 volts suivant les types. Le nombre des périodes est invariablement de 2 500 par minute, soit 41,66 par seconde.

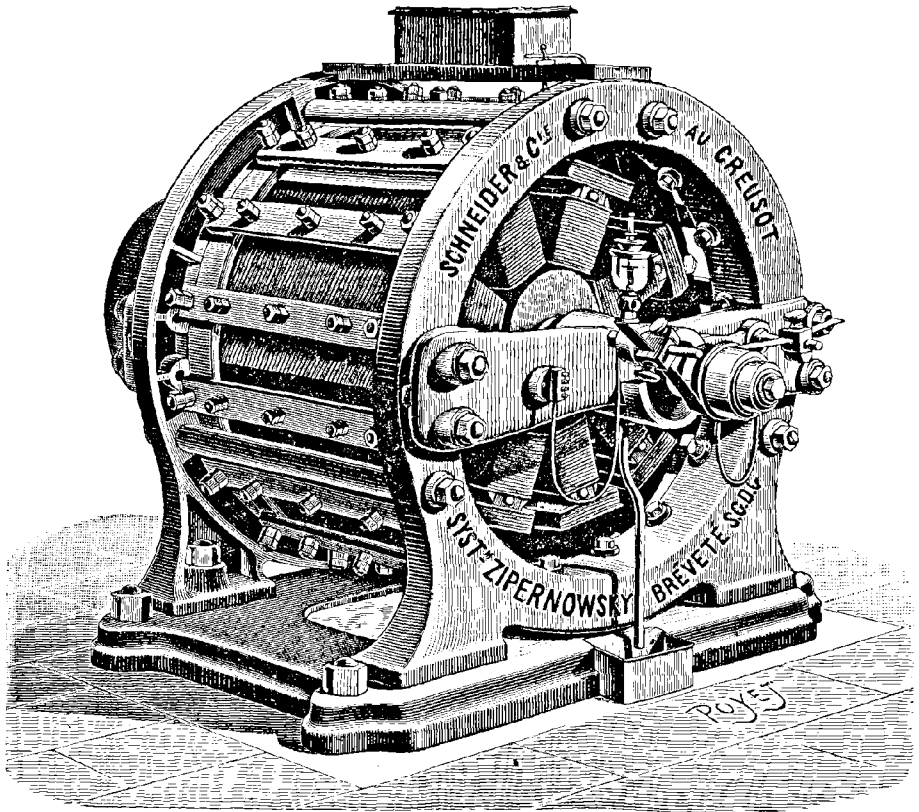


Fig. 561. — Alternateur Zipernowsky-Creusot.

Moteurs à courants alternatifs Zipernowsky Creusot. — Les électromoteurs de puissance supérieure à 5 chevaux sont construits sur le même type que les alternateurs Zipernowsky ci-dessus. Ceux de 1/2 cheval, 1 cheval, 3 et 5 chevaux sont établis suivant le type ci-après (fig. 562). L'excitation est produite par redressement du courant alternatif et sans étincelles au redresseur par suite des bobinages adoptés. La vitesse de ces moteurs est constante, quelle que soit la charge. Ils ont en outre une très grande élasticité de puis-

sance : en marche, on peut, sans les caler, augmenter de 50 p. 100 la puissance qui leur est demandée. S'ils viennent à s'arrêter accidentellement par suite de trop grande surcharge ou pour toute autre cause,

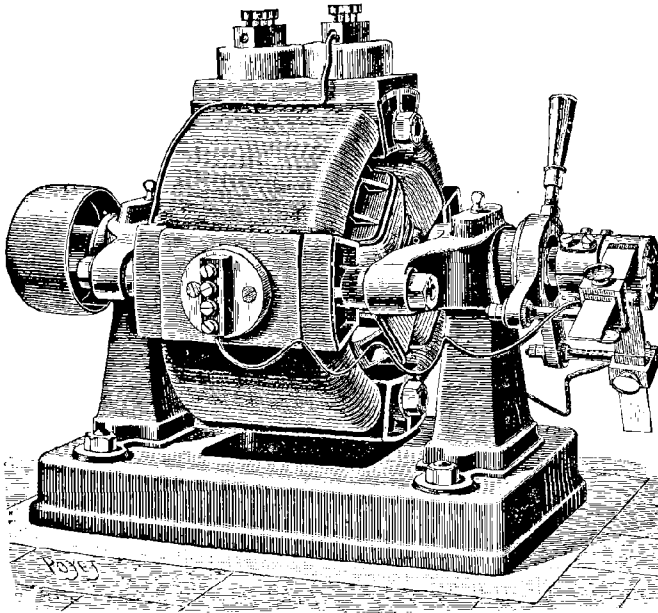


Fig. 562. — Moteur Zipernowsky-Creusot, à courants alternatifs.

l'intensité du courant n'atteint jamais une valeur trop considérable en raison de la self-induction, et l'appareil n'en est pas endommagé.

ÉTUDE SUR LES QUALITÉS MAGNÉTIQUES DE L'ACIER DOUX

Au moment où l'acier doux coulé tend à se substituer au fer dans la construction des machines dynamos, nous avons cherché à nous procurer divers renseignements sur les qualités magnétiques de cette matière. Nous donnons ci-après ceux qui nous sont parvenus.

Les perméabilités de l'acier doux Robert, employé dans la construction des carcasses des dynamos de la Société Cail, ont été étudiées par

M. Helmer par la méthode des forces portantes. Le tableau ci-dessous donne les résultats obtenus sur un échantillon de cet acier :

FORCE MAGNÉTOTRICE en unités C. G. S.	FORCE PORTANTE en grammes par cm ²	INDUCTION en unités C. G. S.	PERMÉABILITÉ
2,2	1 181	5 400	2 451
4,5	3 900	9 625	2 137
6	5 053	11 175	1 862
9	6 850	13 000	1 444
14	8 710	14 660	1 047
25,1	10 740	16 300	618
38	12 230	17 390	457
50	13 330	18 140	313
72	14 930	19 200	267
83	15 570	19 600	237
100	16 200	20 000	200

En exprimant les forces magnétomotrices en ampères-tours, et construisant la courbe correspondante des différentes valeurs de l'induction, on obtient d'après cette courbe le tableau pratique suivant :

INDUCTION en unités C. G. S.	FORCE MAGNÉTOTRICE en ampères-tours par cm.	INDUCTION en unités C. G. S.	FORCE MAGNÉTOTRICE en ampères-tours par cm.
6 000	1,895	14 000	9,2
7 000	2,23	15 000	12,8
8 000	2,62	16 000	18
9 000	3,12	17 000	26,4
10 000	3,90	18 000	38
11 000	4,8	19 000	53,6
12 000	5,76	20 000	80
13 000	7,2	»	»

FIN

BIBLIOGRAPHIE

OUVRAGES ET PUBLICATIONS UTILISÉS

(Indication des pages où ils sont cités.)

- ARNOLD. — Die Ankerwicklung der Gleichstrom-Dynamomaschinen (*Le bobinage des machines dynamos à courant continu*), 20, 292.
- AYRTON ET PERRY. — Memoir on Electro-motors (*Mémoire sur les Électromoteurs*), 111.
- BARLOW. — On Magnetic Attraction (*De l'Attraction magnétique*), 17.
- BLAKESLEY (T. H.). — Alternating Currents of Electricity (*Les Courants électriques alternatifs*, Traduction française par Rechniewski), 606, 613.
- DREDGE. — Electric Illumination (*L'Éclairage électrique*), 4.
- DUB (G.). — Electromagnetismus (*L'Électromagnétisme*), 162, 165.
- EVERETT. — Units and Physical Constants (*Unités et Constantes physiques*, Traduction française par J. Raynaud), 808.
- FARADAY. — Experimental Researches (*Recherches expérimentales*), 6, 7, 8, 166, 710.
- FLEMING. — The Alternate Current Transformer (*Le Transformateur à courants alternatifs*), 606, 607, 610, 731, 732.
- FRICTHE. — Die Gleichstrom-Dynamomaschine (*La Machine dynamo à courant continu*), 20, 292, 531.
- FRÖLICH (O.). — Die Dynamoelektrische Maschine (*La Machine dynamo-électrique*, Traduction française par E. Boistel), 113, 572, 589.
- GEHLER. — Physikalisches Wörterbuch (*Dictionnaire de physique*), 9.
- GORDON. — Practical Treatise on Electric Lighting (*Traité pratique d'Éclairage électrique*), 653.
- HENRY. — Scientific Writings (*Travaux scientifiques*), 17.
- HERING. — Principles of Dynamo-electric Machines (*Principes des Machines dynamo-électriques*), 20, 292.
- HOSPITALIER. — Formulaire de l'Électricien, 117.
- Traité élémentaire de l'Énergie électrique, 117, 118, 549, 814.
- HOWELL. — Incandescent Electric Lighting (*L'Éclairage électrique par incandescence*), 791.

- JACOBI. — Mémoire sur l'application de l'Électromagnétisme au mouvement des machines, 48, 538.
- JOULE. — Scientific Papers (*Travaux scientifiques*), 165, 538.
- KAPP (G.). — The Electric Transmission of Power (*La Transmission électrique de l'énergie*, Traduction française par E. Boistel), 537, 556, 568, 750.
- KENNEDY (R.). — Electrical Distribution by Alternating Currents and Transformers (*La distribution électrique par courants alternatifs et transformateurs*), 731.
- KITTLER. — Handbuch des Elektrotechnik (*Manuel d'Électricité*), 529.
- LODGE. — Modern Views (*Vues modernes*), 614.
- MARTIN ET WETZLER. — The Electric Motor and its Applications (*Le Moteur électrique et ses applications*), 537, 600.
- MASCART ET JOUBERT. — Leçons sur l'Électricité, 113, 732.
- MAXWELL. — Electricity and Magnetism (*Électricité et Magnétisme*, Traduction française par Seligman-Lui), 166, 170.
- DU MONCEL. — Exposé des Applications de l'Électricité, 4, 11, 16.
- MÜLLER. — Lehrbuch der Physik (*Traité de Physique*), 544.
- NAUDET. — Machines électriques à courants continus, système Gramme et congénères, 14, 467.
- OBERBECK. — Habilitation-Schrift (*Thèse d'agrégation*), 87.
- PICOU. — Manuel d'Électrométrie, 91.
- POGGENDORFFS Annalen (*Annales de Poggendorff*), 9, 10, 18, 19, 58, 165, 528, 607, 710.
- RANKINE. — Steam Engine (*La Machine à vapeur*), 544.
- DE LA RIVE. — Traité d'électricité, 165.
- SCHELLEN. — Die Magneto- und Dynamo-elektrischen Maschinen (*Les Machines magnéto- et dynamo-électriques*), 4, 794.
- VON SIEMENS (Werner). — Wissenschaftlichen und Technischen Arbeiten (*Travaux scientifiques et techniques*), 545, 602.
- SMITH (F. J.). — Work-measuring Machines (*Appareils pour la mesure du Travail*), 776, 783.
- SPON (E. et F. N.). — Dictionary of Engineering (*Dictionnaire de l'Ingénieur*), (Spon, éditeurs), 783.
- STURGEON. — Annals of Electricity (*Annales d'Électricité*), 9, 10, 19, 165, 534, 538, 638, 710.
- Scientific Researches (*Recherches scientifiques*), 9.
- THOMPSON (S. P.). — Electricity in Mining (*L'Électricité dans les Mines*), Conférences, 4, 6, 597, 600.
- The Electromagnet (*L'Électro-aimant*), 117, 146, 170, 694.
- Elementary Lessons on Electricity and Magnetism (*Leçons élémentaires d'Électricité et de Magnétisme*), 117.
- THOMSON (sir W.). — Electrostatics and Magnetismus (*Electrostatique et Magnétisme*), 166.
- UNWIN. — Machine Design (*Étude d'une Machine, Projet d'*), 379, 381, 382.
- VASCHY. — Théorie des Machines magnéto- et dynamo-électriques, 732.
- VERDET. — Théorie mécanique de la Chaleur, 544.
- WEBER. — Elektrodynamische Maasbestimmungen (*Mesures Électrodynamiques*), 18, 607.

- WEILLER (Lazare) et VIVAREZ (Henri). — Traité général des Lignes et Transmissions électriques, 817.
- WEISBACH. — Mechanics of Engineering (*La Mécanique appliquée à la science de l'Ingénieur*), 783.
- WIEDEMANN'S Annalen (*Annales de Wiedemann*), 17, 87, 91, 97, 157.
- Galvanismus (*Galvanisme*), 544.
- Lehre von der Electricität (*Leçons d'électricité*), 710.
- WILKE (Arthur). — Die Berliner Electricitäts-Werke (*Les Stations électriques de Berlin*), 497.
- American Institute Electrical Engineers (*Institut américain des Ingénieurs-Électriciens*), 71, 98, 623, 722.
- American Journal of Science (*Journal Scientifique américain*), 557.
- Annales de l'École normale supérieure, 19, 70, 607.
- des Mines, 545.
- de Physique et de Chimie, 4, 8, 18, 19, 66, 544, 607, 710.
- de Poggendorff (*Poggendorff's Annalen*), 9, 10, 18, 19, 58, 165, 528, 607, 710.
- de Sturgeon (*Annales of Electricity*), 9, 10, 19, 165, 534, 538, 638, 710.
- Télégraphiques, 732.
- de Wiedemann (*Wiedemann's Annalen*), 19, 87, 91, 97, 157.
- Annali delle Scienze Lombardo-Veneto (*Annales des Sciences Lombardo-Vénitiennes*), 17.
- Archives des Sciences Physiques, 19.
- Bayerisches Industrie- und Gewerbeblatte (*Journal bavarois de l'Industrie et des Métiers*), 784.
- Berliner Berichte (*Comptes rendus de l'Académie Royale de Berlin*), 13, 18, 19.
- Bulletin de la Société d'Encouragement, 11.
- — — Belge d'Électriciens, 512.
- — — Industrielle de Mulhouse, 749.
- — — Internationale des Électriciens, 421.
- Cambridge's Philosophical Transactions (*Travaux philosophiques de l'Université de Cambridge*), 148, 163.
- Centralblatt für Elektrotechnik (*Journal d'Electrotechnique*), 70, 87, 88, 114, 290, 297, 495, 514, 531, 650, 690, 742.
- Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 10, 14, 19, 20, 90, 91, 224, 710, 711, 829.
- Cosmos (Le), 17.
- Crystal Palace Exhibition 1882, Report (*Rapport américain sur l'Exposition du Crystal Palace de 1882*), 791.
- D. R. Patents (*Brevets Allemands*), 602.
- Electrical Review (The) (*La Revue électrique*), 58, 95, 167, 170, 178, 224, 375, 408, 422, 459, 461, 499, 506, 509, 515, 520, 531, 639, 643, 650, 672, 675, 704, 712, 731, 736, 741, 772, 785, 786, 787, 791.
- Electrical World (The) (*Le Monde électrique*), (Journal américain), 52, 59, 70, 163, 198, 290, 358, 422, 459, 460, 497, 520, 531, 592, 600, 601, 602, 623, 643, 647, 650, 675, 690, 694, 698, 722, 743, 764, 801, 816.
- Electrical Engineer (The) (*L'Ingénieur électricien*), (Journal américain), 502, 623, 722, 803.

Electrician (The) (*L'Electricien*), 20, 58, 59, 87, 91, 133, 135, 145, 159, 163, 166, 167, 168, 169, 170, 178, 198, 290, 292, 317, 422, 448, 492, 506, 508, 523, 524, 531, 593, 600, 602, 623, 643, 647, 650, 651, 665, 675, 693, 694, 704, 706, 722, 730, 731, 736, 741, 742, 743, 750, 769, 772, 777, 783, 786, 787, 788, 791, 801.

Electricien (L'), 59, 90, 113, 289, 290, 292, 578, 750.

Elektrotechnisches Echo (*L'Echo électrotechnique*), 605.

Elektrotechnische Zeitschrift (*Journal électrotechnique*), 19, 65, 70, 91, 109, 161, 178, 220, 240, 289, 290, 493, 495, 497, 514, 519, 523, 528, 589, 698, 704, 752, 791, 801.

Encyclopædia Britannica (*Encyclopédie Britannique*), 17.

— Metropolitana (*Encyclopédie Métropolitaine*), 17.

Engineer (The) (*L'Ingénieur*), 12, 412.

Engineering (The) (*L'Art de L'Ingénieur*), 38, 602, 785, 791.

Génie civil (Le), 829.

Handbuch der Elektrotechnik (*Manuel d'Électrotechnie*), 529.

Industrie électrique (L'), 737, 759.

Industries (The) (*Les Industries*), 467, 492, 508, 736, 759, 763.

Institut (L'), 17.

Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland (*Institut des Ingénieurs et Constructeurs de navires d'Ecosse*), 169, 492.

Journal of Franklin Institution (*Journal de l'Institut Franklin*), (Am.), 381, 448, 784, 791.

Journal of the Institution of Electrical Engineers (*Journal de l'Institut des Ingénieurs-Électriciens*), 20, 71, 74, 75, 83, 89, 115, 164, 176, 178, 218, 345, 415, 421, 422, 423, 424, 426, 448, 460, 462, 471, 574, 593, 621, 640, 648, 688, 689, 728, 731, 737, 741, 788, 791.

Journal de Physique, 19, 20, 607.

— of Royal Institution (*Journal de l'Institut Royal de Londres*), 17.

— de la Société physico-chimique russe, 532.

— of the Society of Arts (*Journal de la Société des Arts*), 66, 289, 753, 757, 758.

— of the Society of Telegraph Engineers (*Journal de la Société des Ingénieurs-Télégraphistes*), 86, 181, 253, 471, 569, 574, 583, 589, 607, 692, 693, 712, 731, 732, 736.

— of the Society of Telegraph Engineers and Electricians (*Journal de la Société des Ingénieurs-Télégraphistes et Électriciens*), 90, 169, 180, 752, 757, 777, 783, 785, 791.

Kronigs Journal (*Journal de Kronig*), 18.

Lumière électrique (La), 17, 19, 53, 88, 113, 148, 237, 240, 462, 495, 497, 502, 524, 529, 531, 590, 602, 643, 650, 694, 707, 711, 722, 731, 736, 743, 756, 763, 772, 791, 794, 795.

Nature (La), 742.

Nuovo Cimento (II) (*La nouvelle Expérience*), 13, 15, 18, 530.

Official Report of Munich Electric Exhibition, 1882 (*Rapport officiel de l'Exposition électrique de Munich*, 1882), 791.

Philosophical Magazine (*Magasin philosophique*), 8, 9, 10, 13, 19, 52, 91, 97, 148, 165, 166, 208, 290, 430, 529, 552, 575, 583, 591, 607, 618, 680, 710, 736.

- Philosophical Transactions (*Travaux philosophiques*), 6, 15, 20, 58, 88, 132, 137, 157, 170, 178, 235, 400, 416, 422, 484, 505, 607, 615, 732, 786.
- Physical Society (*Société américaine de Physique*), 764.
- Poggendorffs Annalen (*Annales de Poggendorff*), 9, 10, 18, 19, 58, 165, 528, 617, 710.
- Proceedings of the British Association (*Séances de l'Association Britannique*), 545, 730, 783.
- of the Institution of Civil Engineers (*Séances de l'Institut des Ingénieurs civils*), 89, 113, 114, 168, 240, 375, 421, 471, 537, 568, 601, 606, 607, 635, 665, 681, 688, 774.
 - of the Institution of Mechanical Engineers (*Séances de l'Institut des Ingénieurs-Mécaniciens*), 19, 238, 262, 783, 784.
 - of the Literary and Philosophical Society of Manchester (*Séances de la Société littéraire et philosophique de Manchester*), 12, 692.
 - of the Royal Society (*Séances de la Société Royale de Londres*), 13, 19, 157, 163, 166, 167, 170, 263, 394, 607, 618, 623, 734.
 - of the South Wales Institute of Engineers (*Séances de l'Institut des Ingénieurs du South Wales*), 597.
- Reports of the British Association (*Rapports de l'Association Britannique*), 234, 711.
- Report of Committee of Franklin Institution (*Rapport du Comité de l'Institut Franklin*), (Am.), 791.
- of the Electrical Conference at Philadelphia (*Rapport de la Conférence électrique de Philadelphie*, 1884), 791.
 - of Jurors, Cincinnati Industrial Exposition of 1883 (*Rapport du Jury sur l'Exposition industrielle de Cincinnati*, 1883), (Am.), 791.
- Reprinted Papers (*Réimpression des Travaux publiés par le Philosophical Magazine*), 529.
- Schweizerische Bauzeitung (*Journal Suisse de la Construction*), 752.
- Séances de la Société de Physique, 589, 691.
- Silliman's Journal (*Journal de Silliman*), 17.
- Specifications of Patents (*Brevets Anglais*), 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 52, 58, 167, 313, 314, 366, 462, 508, 512, 531, 579, 581, 600, 626, 643, 656, 671, 672, 693, 710, 711, 712, 742, 772, 774.
- Stevens Institute (*Institut Stevens*), 791.
- Transactions of the American Institution of the Electrical Engineers (*Travaux de l'Institut américain des Ingénieurs-Electriciens*), 71, 98, 623, 722.
- Turin Academia (*Académie de Turin*), 694, 732.
- U. S. Patents (*Brevets Américains*), 711, 719, 794.
- Wiedemanns Annalen (*Annales de Wiedemann*), 19, 87, 91, 97, 157.
- Wiener Berichte (*Comptes rendus de l'Académie de Vienne*), 19, 208.
- Zeitschrift für angewandten Elektricitätslehre (*Journal d'Électricité pratique*), 794.
- Zeitschrift für Elektrotechnik (*Journal Electrotechnique*), 736, 794.

INDEX ALPHABÉTIQUE

A

Absolu, Système — d'unités (Appendice A), 808.
 Accidents aux dynamos, 84, 361, 364, 458, 801.
 Accouplement des dynamos (*voir* Couplage).
 Accumulateurs, Charge des, 265, 267.
 Achard, Rendement des moteurs, 545.
 Acier, son Emploi dans les dynamos, 46, 47, 466, 679, 823, 825, 838, 865:
 — ses Propriétés magnétiques, 10, 128, 153, 825, 873.
 Actif, Courant —, 622.
 Action démagnétisante du Courant secondaire, 716.
 — — des Courants parasites, 85, 218, 574.
 — — de l'Induit, 82, 85, 246, 274, 397, 402, 421, 572.
 — — Remèdes à l', 88, 397, 402.
 Action gyrostatique de l'Induit, 375.
 Activité (*voir* Puissance).
 Adams [W. Grills], Discours d'inauguration, 791.
 — — Épreuves faites à l'Exposition du « Crystal Palace », 791.

DYNAMO-ÉLECTRIQUES.

Adams [W. Grills], sur la Dynamo à courants alternatifs, 687.
 « Agir », Moteur (*voir* Andersen).
 Aimantation, 125.
 — initiale, 244, 257, 286.
 — progressive, 84, 160.
 — résiduelle, 46, 154, 244, 257, 286.
 — résultante, 76.
 — transversale, 71, 75, 86, 200, 388, 420, 572.
 — Courbes d', 128.
 — Méthodes d', 46.
 — Saturation d', 128, 394.
 Aimants (*voir* Electro-aimants ou Inducteurs).
 — permanents, 46.
 Alabaster, Gatehouse and Co, 785, 791.
 Alignement des Coussinets, 381.
 Alimentation d'Huile sous pression, 382, 664, 670.
 Alioth, Dynamo, 317, 356, 520.
 Allan, Induit, 41.
 Allen [W. H. et Co], 473.
 Allgemeine Gesellschaft, 41, 519, 704.
 « Alliance », Machine de l', 11, 632.
 Allure lente, Machines à, 250, 524.
 — rapide, Machines à, 45, 545.
 Alteneck [von Hefner-], 14, 348, 651.
 Alternance ou Alternation (*voir* Période).
 Alternateurs polyphases, 676.
 — triphases, 677.

56

- Alternateurs-Volants, 650, 651, 653, 664, 855, 869.
 — à Courant constant, 676.
 — à Flux ondulé, 665, 856, 862.
 — à Grande fréquence, 623.
 — à Induit et Inducteurs fixes, 671.
 — à Résistance magnétique variable, 671.
 — Captation du courant aux, 359, 373, 634, 660, 805.
 — Collecteurs d', 33, 359, 373, 634, 638, 660, 805.
 — Couplage des, 680.
 — Electro-aimants des, 498, 637, 666, 678.
 — Excitation des, 637.
 — Théorie des, 46, 602, 635.
 — — du Bobinage d'Induit des, 302, 626, 634, 636.
 — Vitesse admissible des, 408, 664, 665.
- Alternateurs divers :
 — « Alliance », 11, 632.
 — Blakey-Emmott, 373, 647.
 — Brown (triphase), 17, 677.
 — Cail-Helmer, 851.
 — — à Induit et Inducteurs fixes, 856.
 — du Creusot, 871.
 — Elihu-Thomson, 645.
 — — à Induit et Inducteurs fixes, 674.
 — Elwell-Parker, 654.
 — Ferranti, 655.
 — Gordon, 653.
 — Helmer (*voir* Cail-Helmer).
 — Hopkinson, 649.
 — Kapp, 640, 863.
 — Kennedy, 675.
 — Kingdon, à Induit et Inducteurs fixes, 673.
 — Labour, 860.
 — Mordey, 17, 380, 665.
 — — à Induit et Inducteurs fixes, 672.
 — Oerlikon, 863, 865.
 — Parsons, 665.
 — Patin, 869.
- Alternateurs « Phénix » (Paterson et Cooper), 648.
 — Siemens, 651.
 — Stanley (Westinghouse), 629, 643.
 — — , à courant constant, 676.
 — Thury, 862.
 — Zipernowsky (Ganz), 650, 871.
- Ames (*voir* Noyaux).
 Amiraute anglaise, Spécification relative à l'échauffement des machines, 415.
 Ampérage possible dans les fils, 386, 391, 669, 818.
 Ampère, 8.
 — Règle d', 21.
 Ampère (Unité de courant), 812.
 Ampères efficaces (*voir* Efficaces).
 Ampères-tours, 121, 146, 175, 390, 396, 402, 405, 588, 716.
 Analyse des Pertes dans une dynamo, 788.
 Andersen et Girdlestone, Moteur « Agir », 597.
 André, Moteur, 582.
 Andrews, 772.
 Angle polaire sous-tendu, 75, 390, 422, 427, 635.
 — de Décalage (*voir* Décalage).
 — de Retard (*voir* Décalage).
 Angles ou Becs polaires, 78, 82, 95, 375, 423.
 Anneau, Induits en, 34, 39, 292, 308, 329, 467, 626.
 — — extérieurs, 40, 347, 495.
 — — Bobinage des, 291, 345, 348, 385, 408, 472.
 — — Diagrammes développés de Bobinage des, 297.
 — — Méthode pratique de Bobinage des, 329, 626.
 Anneau plat, Induits en, 40, 328, 484, 508, 628, 631.
 — — leurs Avantages, 488.
 Anneaux divers, 40.
 Anthony, 544.

- Antifriction, Métal (*voir* Métal).
 Appareil thermique de Carnot, 554, 558.
 Appold, 481, 782, 783.
 Arbres, Étude des, 34, 334, 377, 378, 826.
 Arc de feu aux Collecteurs, 84, 458, 805.
 Arc voltaïque, 262, 263, 432.
 Armatures (*voir* Induits).
 Arnold, Théorie du Bobinage, 20, 292, 300, 303, 304, 324.
 Arnoux [H.], Courbes de charge, 421.
 — Effet de l'Entrefer, 419.
 — Théorie du Bobinage, 292, 327.
 Arrachement des Conducteurs d'Induit, 108, 364, 624, 805.
 — des Pièces de connexions, 364, 804.
 — Méthodes d' —, pour la mesure de la Perméabilité, 433.
 Atkinson [Ll. B.] (*voir* Goolden).
 — Machine unipolaire, 529.
 — Moteur pour Mines, 600.
 — Moteurs à courants alternatifs, 693.
 — Perforateur, 602.
 Attelage direct, 869.
 Attraction des Induits, 374, 418, 573.
 Auerbach (*voir* Meyer).
 Auto-Excitation, Principe de l', 10, 12, 13, 48, 253, 637, 780.
 Auto-régulateurs, Moteurs, 583.
 Auto-régulatrices, Dynamos, 54, 55, 260, 270, 737.
 Ayrton [W. E.], Action démagnétisante de l'induit, 88, 574.
 — Méthode des trois voltmètres, 618.
 — Puissance et Dimensions des dynamos, 113, 114, 115.
 Ayrton et Mather, Rhéostats, 764.
 Ayrton et Perry, Collecteur, 361.
 — Courants alternatifs, 621.
 — Courbes de Couple mécanique, 110.
 — Dérivations magnétiques, 180.
 — Dynamo, 531.
 — Dynamomètre, 783.
 — Epaisseur du Bobinage, 430.
 — Mesure de l'Ondulation ou de la Discontinuité, 215.
 Ayrton et Perry, Moteurs, 578, 594.
 — — à Inducteurs faibles, 574.
 — Résistance apparente de l'Induit, 90.
 — Théorie de la Régulation des moteurs, 18, 580, 582, 588.
 — Transmission de l'Énergie, 545.
- B
- Babbit, Métal, 380, 486.
 Bagues folles, Coussinets à, 382.
 Bain, Dynamo à circuit ouvert, 463.
 Baker, sur l'Auto-excitation, 12.
 Balais, 2, 31, 33, 38, 365.
 — -pilotes, Recherches à l'aide des, 67, 770.
 — positif et négatif, 62.
 — rotatifs, 366.
 — de Charbon, 366, 367, 518, 822, 840, 848.
 — Calage des, 79, 82, 83, 422, 573, 800.
 — Différence de potentiel aux, 68, 219, 220.
 — Entretien des, 366, 799.
 — Largeur et Epaisseur des, 83, 366, 524.
 — Réglage automatique des, 454, 462, 763, 840.
 Balancier, Dynamos et Moteurs à, 16, 499, 535, 602.
 Ball, Dynamos pour éclairage par Arcs, 460.
 Barley et Stevenson, Porte-balais, 371.
 Barlow, Roue de, 17.
 Barres, Induits à, 343, 350, 471, 497, 532.
 Baumgardt [M.], sur l'Enroulement compound, 290.
 Becs ou Angles polaires, 78, 82, 95, 375, 423, 374.
 — en fonte, 375, 418.
 — Renversement du champ aux, 81, 83, 422, 426, 574.
 Beetz [von], 749, 750.
 Bell [Louis], sur l'Enroulement compound, 59, 290.

- Berlin, Machines des Stations centrales de, 298, 497, 498.
- Bernstein, Refus de Brevet américain, 719.
- Bertin, sur l'Enroulement compound, 15.
- Bidwell [S.], sur l'Aimantation du fer, 133, 134, 143, 144.
- Bifurcation du courant, 291.
- Bitume (*voir* Isolants).
- Blakesley [T. H.], Méthode des trois dynamomètres, 618.
- sur la Phase d'alternation, 613.
- Blakey, Emmott et C^{ie}, Alternateurs, 373, 647.
- — — — — Dynamos, 192, 195.
- Blindées, Dynamos (*voir* Cuirassées).
- Board of Trade, Unité du, 814, 815.
- Bobinage (*voir aussi* Enroulement).
- imbriqué des Induits, 300, 634, 648, 676.
- ondulé, ou en zigzag, des Induits, 300, 634, 648, 657, 676.
- Bobinages d'Inducteurs, Règles pour les, 231, 249, 410.
- d'Induits, Diagrammes, 297, 346, 676.
- — — — — Règles pour les, 291, 343, 349, 386, 408.
- — — — — Tableaux de, 295, 302, 340, 312, 316, 317.
- Bobine unique, Dynamo à, 196, 515.
- Bobines (*voir* Induits ou Armatures).
- inertes, 82, 438.
- de compensation, 89, 270, 275, 421, 584, 645, 737.
- de réaction, 737, 867, 868.
- des Moteurs, Règles pour les, 477, 589, 593.
- Bois, son Emploi pour Coins d'entraînement, 335, 341.
- son Emploi comme Séparation de pièces, 331, 349, 351, 353, 641.
- Bollmann, Induit, 326, 531.
- Bornes, Volts aux, 219, 220, 242.
- Bosanquet [R. H. M.], sur l'Aimantation du fer, 131, 132, 141, 144, 162, 166.
- Bourbouze, Moteur, 536.
- Brackett [Cyrus F.], Dynamomètre, 225, 786.
- Bradley, Moteur polyphase, 705.
- Bradley, sur l'Enroulement multipolaire, 320.
- Bramwell [sir F. J.], Dynamomètre, 784.
- Bras d'entraînement, 333.
- Breguet [Antoine], 4.
- Breguet [Maison], Dynamos, 218, 835.
- Brett [Jacob], Machine auto-excitatrice, 9, 12.
- Briques émaillées (*voir* Isolants).
- Bronze, 43.
- d'Aluminium, 472.
- phosphoreux, 43.
- Brotherhood, Accouplement, 384.
- Brown, Alternateur polyphase, 17, 677.
- Disques de noyaux reperçés, 332, 476, 678.
- Dynamos, 17, 192, 195, 383, 475, 525, 529, 752, 759.
- Etude d'arbre, 379.
- Inducteurs, 192, 195, 198, 199, 677.
- Mode de contact à glissement, 373, 680.
- Mode d'entraînement des disques d'induits, 337.
- Moteur polyphase, 199, 703.
- Transformateur, 729.
- Brown-Heilmann, Dynamo, 823.
- Bruissement ou Ronflement des dynamos, 721, 806.
- Brush, Collecteur, 442.
- Dynamo, 15, 93, 192, 438.
- — — — — Caractéristique de la, 246.
- — — — — Circuit taquin de la, 56, 523.
- Enroulement compound, 56, 57, 58.
- Enveloppe de cuivre du fer inducteur, 440.
- Induit, 15, 332, 446.
- Moteur, 580.
- Régulateur automatique, 767.

- Bureau (*voir* Office) des Brevets américains, Singularité, 719.
 Bürgin (*voir* Crompton).
 Burstyn, 794.
- C
- C. G. S., Système, 808.
 Cabanellas [G.], sur les Moteurs-générateurs, 711.
 — sur la Résistance apparente des Induits, 91.
 — sur la Variation du Champ magnétique, 95.
 Cabella, Dynamo, 195.
 Cail-Helmer, Alternateurs, 851, 855.
 — — — à résistance magnétique variable, 856.
 — — — de haute fréquence, 857.
 — Dynamos bipolaires, 825.
 — — multipolaires, 827, 830.
 — Transformateurs à résistance magnétique variable, 837.
 Calage des Balais, 31, 76, 77, 79, 81, 83, 428, 800.
 — — négatif dans les Moteurs, 88, 428, 572.
 Calculs d'Avant-projets, 391, 423, 593, 635, 752.
 Caldwell, 769.
 Capacité (*voir* Puissance).
 Capacité et Self-induction, 707.
 Caractéristiques de dynamos, 223, 236, 257, 286, 288, 419, 823.
 — et Courbes de Puissance, 240.
 — externes, 242.
 — internes, 253.
 — mécaniques des Moteurs, 111, 561, 563, 589.
 — plongeantes, 89, 246, 463.
 — totales, 236, 237.
 — Découverte des, 217.
 — Manière de prendre les, 238.
 — Prédétermination des, 169, 174.
 Carcasses de bobines en zinc, 651.
 Cardew, Méthode d'Épreuves, 787.
 — Recherches sur la Phase, 722.
 Cardew, Voltmètre, 617.
 Carhart, sur la Dérivation magnétique, 178.
 — Théorie des Moteurs à courant continu, 557, 558.
 Carnot, Appareil thermique de, 554, 558.
 « Castle », Dynamo (Holmes), 338, 344.
 Causes d'Étincelles, 89, 421, 427.
 — de Ruptures, 364, 801, 803.
 Cercle de feu aux Collecteurs, 84, 458, 805.
 Cercles ou Cerceaux concentriques, 40, 329, 485, 640, 728.
 Chaleur, ses Effets sur l'Aimantation, 152.
 — Perte de puissance due à la, 746, 747, 803.
 Chamberlain et Hookham, Dynamos, 332.
 Champ magnétique, 2, 22, 99, 117.
 — dissipé ou perdu, 93, 174, 176, 488.
 — tournant, 18, 676, 694, 695, 701.
 — Dispersion ou Épanouissement du, 82, 183, 401, 422, 427.
 — Mesure du, 245.
 — Modification du, 763.
 — Torsion du, 69, 70, 73, 76, 77, 78, 89, 98, 421, 572.
 — Traction ou Effort du, 3, 101, 341, 342, 539.
 Charbon, Balais de, 366, 367, 518, 648, 822, 840, 848.
 — Plaques de — pour Rhéostats, 767.
 Charge des Accumulateurs, 265, 267.
 — Courbes de, 420, 863, 865.
 Chemins de fer électriques, Machines pour, 508, 601.
 — Éclairage des trains de, 542.
 Chevauchement des fils d'Induit, 295, 301, 317, 348, 350, 802.
 Chevaux-vapeur, Calcul de la puissance en, 104, 392, 593.
 — Caractéristiques en — 240, 252.
 — Épreuves de puissance en, 782, 788.

- Chevaux, Puissance en —, des dynamos et moteurs, 104, 781, 783.
- Chute de l'Aimantation, 249, 253, 255.
— de Potentiel, 219, 267, 404, 788.
- Chwolson, Recherches de, 162.
- Cinq fils, Système de distribution à, 742.
- Circuit électrique, 26.
— fermé, Induits à, 37, 303, 698.
— indépendant, 47.
— magnétique, 17, 164, 395, 730, 781.
— ouvert, Induits à, 15, 38, 434, 463.
— séparé, Dynamos à, 47, 51.
— —, Moteurs à, 591.
— taquin, 56, 440.
- Circuits magnétiques branchés, dérivés ou ramifiés, 198, 199.
- Circumflux ou Induction de pôle à pôle, 423, 424.
- Clark, Dynamo, 192.
- Clark, Muirhead et C^o, 192, 520.
- Clarke, Machine magnéto, 8, 530.
- Classification des Collecteurs, 359.
— des Induits, 39, 300, 343, 625.
— des Machines, 1, 39, 46, 434.
— des Moteurs, 563, 584, 591.
— des Moteurs à courants alternatifs, 625, 690, 700.
— des Transformateurs, 709, 710.
- Clausius [R.], Théorie de la dynamo, 19, 91, 97.
- Clavetage des Induits, 333, 337, 383.
- Clerk Maxwell (voir Maxwell).
- Coefficient v ou v d'Hopkinson, 174.
- Coefficient économique, 112.
— de transformation, 112, 716, 788.
- Coins d'entraînement, 108, 331, 333, 341, 471, 473, 595, 640.
- Collecteur d'Alternateur, 33, 359, 373, 634, 638, 660, 805.
— extérieur, 364, 497, 532.
— Construction du, 360, 497.
— Détérioration du, 801, 803, 804.
— Dimensions du, 360.
— Fonction du, 2, 29, 31, 33, 38, 62, 360, 573.
- Collecteur, Isolement du, 360, 806.
— Isolement à air du, 458, 497, 845.
— Méplats au, 804.
— Potentiel au, 66, 445.
— Ventilation du, 361, 457.
- Collecteurs divers :
— Ayrton et Perry, 361.
— Brush, 441.
— Crompton, 360.
— Edison-Hopkinson, 507.
— Elihu-Thomson, 451.
— Hochhausen, 361.
— Holmes, 511.
— Hopkinson, 507.
— Gülcher, 362.
— Immisch, 596.
— Kapp, 362.
— Mountain, 514.
— Paterson et Cooper, 361.
— Siemens, 361, 494.
- Colliers de Porte-balais, 33, 79, 83, 368.
- Combinaisons de Bobinages d'Inducteurs, 53, 270, 584, 645, 739.
- Commutateur (voir Collecteur).
- Commutation, Fait de la, 81, 207, 215, 573.
— Diamètre de, 32, 42, 73, 79, 312, 573.
- Compensation, Bobines de, 89, 270, 275, 421, 584, 645, 737.
— Pôles de, 88, 426.
- Composante verticale du Champ terrestre, 217.
- Composite, Alternateur, 645.
- Compound (voir Enroulement).
- Compoundage, Temps nécessaire à l'action du, 285.
- Compression, son effet sur l'Aimantation, 152, 338.
- Condensateur, 707.
- Conductance ou Perméance, 180.
- Conducteurs bimétalliques, 829.
- Conduite des Dynamos, 792.
- Conformation des Pièces polaires, 69, 83, 98, 190, 344, 462, 508, 510, 579, 642.
- Connecteurs d'induits, 350, 354, 356, 364, 823, 833, 849.

- Connexions transversales des bobinages d'induits, 306, 320, 487, 489, 525.
 — Fautes dans les, 803.
 — Théorie des, 291, 350.
 Constantes de Dynamos, 827, 829, 840, 845, 848, 849, 851, 853, 856, 860.
 Construction, Principes de, 328.
 Contact des Alternateurs, Bagues de, 359, 373, 634, 660, 805.
 — sur le Collecteur, Ligne de, 79, 799.
 Contacts à glissement, 359, 373, 527, 535, 633, 634, 680.
 Continuité des courants, 36, 211.
 Conversion, Rendement de, 112, 788.
 Convertisseurs (*voir* Transformateurs).
 Cooke (*voir* Wheatstone).
 Cooper, 537.
 Couplage ou Accouplement des Dynamos, 680, 793.
 — en dérivation ou en parallèle des Bobines, 304, 486, 660.
 — en dérivation ou en parallèle des Dynamos, 684, 794.
 — en série des Dynamos, 681, 792.
 — pour entraînement direct, 384, 869.
 Couple mécanique (*ou* Torque), 402, 405, 409, 559, 561.
 — — , Caractéristiques ou Courbes du, 589.
 Courant ou Intensité de courant, 1, 21, 23, 24, 203.
 — actif, Alternateurs à, 622.
 — constant, —, 675.
 — — Distribution à, 54, 268, 433, 560, 748.
 — — Dynamos à, 432.
 — — Montages pour, 433, 560, 748, 764.
 — — Moteurs à, 590, 593, 601.
 — — Moteurs alimentés par, 590, 593, 601.
 — — Régulateurs de, 764.
 — — Transformateurs à, 737.
 — continu, Machines à, 1, 33, 34.
 — — Transformateurs à, 741.
 Courant critique d'une dynamo, 251, 253.
 — diacritique d'Inducteur, 161.
 — inactif, 622.
 — périphérique, 423, 424.
 — possible dans les fils, 386, 391, 669, 818.
 — redressé ou rectifié, 36, 437.
 — tournant, 18, 676, 695, 701.
 — Alternativités du, 603.
 — Continuité du, 36, 208, 438.
 — Densité de, 386, 408, 669, 757, 818.
 — Équations du — pour une dynamo en dérivation, 230.
 — — , pour une dynamo en série, 228.
 — Périodes du, 605.
 — Sens du, 74.
 — Unité de (*Ampère*), 811.
 Courants alternatifs, 1, 31, 207, 603.
 — — polyphasés, 676.
 — — Distribution par, 712.
 — — Machines à (*voir* Alternateurs).
 — — Mesure des, 619.
 — — Principes des, 603.
 Courants parasites ou de Foucault, 71, 85, 91, 332, 339, 353, 445, 471, 485, 593, 669, 687, 694, 696, 698, 718, 731.
 — — Action démagnétisante des, 85, 111, 218, 574.
 — — Échauffement dû aux, 344, 445, 631, 718.
 Courbe de Sinus (*voir* Sinus et Sinusoïde).
 Courbes ascendantes de Magnétisme ou d'Aimantation, 128, 139, 175.
 — caractéristiques, 223, 237, 257, 286, 288, 419, 564, 823.
 — descendantes de Magnétisme ou d'Aimantation, 138, 139.
 — magnétiques, 128, 136.
 — de Charge, 420, 863, 865.
 — de Couple mécanique, 109.
 — de Potentiel aux collecteurs, 65, 68, 70.

Courroies d'entraînement, 383, 798.
 Court-Circuit, 82, 802, 803.
 — — magnétique, 193.
 Coussinets à bagues folles, 382.
 — à boulets, 381.
 — à cannelures, 380, 668.
 — à siège sphérique, 381, 645, 662.
 — convexes, 380, 381, 645, 662.
 — Étude des, 379.
 — Graissage des, 381, 664, 670.
 — Pression sur les, 374.
 Coût du Champ magnétique, 50, 402, 411, 670, 680.
 Creil-Paris, Expériences, 750.
 Creusot, Le (voir Zipernowsky), 871, 872.
 Crocker [F. B.], 592.
 — Moteur, 602.
 Crompton [R. E.], Alliage pour Collecteurs, 360.
 — Bobinage d'Induits, 347, 356, 470.
 — Dynamo, 334, 341, 354, 470, 524.
 — Inducteurs, 192.
 — Induit, 17, 334, 341, 354, 470.
 — sur l'Enroulement compound, 59.
 — sur le Toronnage des conducteurs, 345, 472.
 Crompton-Bürgin, Dynamo, 192, 330, 470.
 Crompton-Kapp, Dynamo (voir Crompton).
 Crompton-Kyle, Enroulement, 355.
 Crompton-Swinburne, Induit en tambour, 354, 471.
 Cuirassées, Dynamos, 195, 492.
 Cuivre de l'induit, Chaleur perdue dans le, 410.
 — — Poids du, 411.
 — Dépôt de, 525.
 — Feuilles de — pour absorber les extra-courants, 440.
 — Qualité et Quantité de, 408, 421.
 Culasse magnétique, 190.
 Cuming, 165.
 Curtis, Crocker et Wheeler, Moteur, 602.
 Cuttriss, Moteur, 602.
 Cycles d'Aimantation, 456, 721.
 — périodiques, 603, 625.

D

Dal Negro, Machine magnéto, 8.
 — Moteur, 17, 535.
 Davenport, Moteur, 17.
 Davidson, Moteur, 17, 537.
 Davis, sur le Principe de la Réversibilité, 18.
 Décalage, 612, 615, 619, 622, 736.
 — des balais, 77, 79, 83, 422, 572.
 — — , négatif dans les Moteurs, 82, 572.
 Définition d'une Machine dynamo, 1.
 Delafield, Dynamo unipolaire, 529.
 De la Rive, 165.
 Delta, Métal, 471.
 De Meritens, Alternateur, 627.
 Densité admissible de Courant dans une bobine, 386, 391, 411, 669, 818.
 — — des Lignes de force dans un noyau, 387, 389, 393, 395, 409, 636, 721.
 Dents d'Induits, 13, 39, 331, 344, 480, 513, 515, 645, 841.
 Déplacement des balais, 79, 82, 370, 753, 800.
 — — , pour Régulation, 268, 454, 456, 460, 462, 753, 840.
 — des Points neutres, 76, 79.
 Deprez [Marcel], Caractéristiques, 4, 19, 237, 244.
 — Combinaisons pour Auto-régulation, 17, 53, 55, 286, 433.
 — Dynamos, 193, 467.
 — Effort statique (Couple mécanique), 110, 111.
 — Expériences de Transport d'énergie, 18, 749.
 — Frein, 783.
 — Loi de similitude, 113.
 — Moteurs, 580, 602.
 — sur les Electro-aimants, 193, 224.
 — sur le Prix du Couple mécanique, 111.
 Deprez [Marcel] et Carpentier [Jules],

- Transmission par Transformateurs, 741.
- Dérivation *ou* Shunt, 50.
- Dynamo en, 50, 229, 252, 256, 260, 569.
 - magnétique, 48, 763, 771.
 - — Coefficient de, 176, 177, 394, 419.
- Dérivations magnétiques, 93, 174, 176, 461, 464, 745, 736.
- Désamorçage, 249, 253, 255.
- Desroziers, Dynamo-disque, 17, 42, 326, 343, 531, 829, 835.
- Dérivation magnétique, 763.
- Détérioration des Collecteurs, 803, 804, 806.
- Développantes de cercles, 830.
- Diagrammes développés de Bobinages, 297, 676.
- Diamètre de Commutation, 32, 42, 73, 79, 312, 572:
- des Fils, Choix du, 343, 386, 408, 409, 440, 442, 457, 816.
- Diehl, Dérivation magnétique, 763.
- Différence de potentiel, 54, 65, 219, 220.
- — aux Bornes, 219, 220, 242.
 - — constante, 221, 267.
 - — — Combinaisons pour, 270.
 - — — Distribution sous, 54.
 - — élevée, Economie d'une, 718.
 - et Force électromotrice, 64, 66, 220, 238.
- Dimensions et Puissance, 112, 264, 593, 640.
- Discontinuité des courants, 36, 207, 215, 458.
- magnétique, 146, 190, 330.
- Disque de soutènement des Induits *ou* Plateau, 329, 831.
- Disques de Noyaux, Estampage des, 328.
- Dynamos — Desroziers, 17, 42, 326, 531, 829.
 - — — Edison, 16, 325, 326, 531.
 - — — Faraday, 6, 527.
- Disques, Dynamos — Fritsche, 17, 42, 326, 531.
- — — Pacinotti, 15, 324, 530.
 - — — Polechko, 532.
 - Induits —, 15, 39, 42, 324, 408, 530, 634.
 - des Induits en anneau, 40, 328, 341, 408.
- Distribution à trois et cinq fils, 742.
- sous Courant constant, 54, 261, 268, 433, 660, 711, 740, 748.
 - sous Potentiel constant, 261, 267, 570, 583, 712, 740.
- Division des Conducteurs d'Induits, 91, 344, 345, 388, 389.
- des Electro-aimants des Moteurs, 693.
 - des Inducteurs, 285, 517, 653, 672, 841.
 - des Noyaux et des Pièces polaires, 43, 91, 328, 331, 333.
- Dobrowsky [von Dolivo], Moteur à champ tournant, 18, 698, 701.
- Transformateurs multiples, 745.
- Double circuit magnétique, Avantages du, 190, 200, 427.
- Calcul du, 200.
- Double enroulement, 56, 58.
- —, Compoundage, 43, 17, 56, 270, 583.
- Douglass, 11.
- Dove, 165.
- Dub, 162, 165.
- Du Bois [H. G.], Balance de Traction, 135.
- Dujardin, Machine, 10, 16.
- Du Moncel [Comte], 4, 11.
- Duncan, 791.
- et Hassen, 791.
- Dynamo, Définition de la, 1.
- Fonction de la, 1.
 - — dans l'éclairage par arcs, 432.
 - Nom de la, 1, 2, 13.
 - Poulie de Polechko, 463, 532.
 - — de sir W. Thomson, 463, 532.
- Dynamos à Balancier *ou* Oscillantes, 499.

Dynamos à Bobine unique, 193, 515.

- à Courants alternatifs ou Alternateurs (*voir* Alternateurs).
- à Circuit fermé, 37, 64, 303, 698.
- — ouvert, 15, 38, 291, 434, 463.
- à Grand débit, 520, 848, 849, 851.
- à Haute tension, 432, 822.
- à Induit et Inducteurs fixes, 11, 625, 671.
- à Longue portée, 742.
- à Pièce polaire unique (Ball), 460.
- à Pôles internes, 429, 460.
- Blindées ou Cuirassées, 195, 492.
- Compound, 13, 17, 56, 270, 583.
- — , leur Nom, 270.
- Cuirassées, 195, 492.
- d'Équilibre ou de Compensation, 743.
- en Dérivation, 50, 229, 252, 256, 260, 569.
- en Série, 49, 228, 251, 260, 568, 767, 792.
- multipolaires, 16, 422, 427, 473, 488, 495, 502, 509, 519, 626.
- polyphases, 676.
- pour Éclairages par Arcs, 432.
- pour Électrolyse, 848.
- pour Électrométallurgie, 448, 478, 521, 837, 849, 851.
- pour Galvanoplastie, 9, 330, 344, 350, 448, 521.
- pour Stations centrales, 196, 298, 356, 472, 473, 494, 497, 498, 502, 508, 509, 510, 516, 643, 651, 655, 662, 670, 675, 827, 837, 848, 855, 862, 865, 867, 871.
- sans Collecteurs, 348, 497, 847.
- sans Pôles, 528.
- unipolaires, 6, 827, 849.
- Volants, 650, 651, 653, 664, 855, 869.
- Accidents aux, 84, 361, 364, 458, 801.
- Classification des, 1, 39, 46, 434.
- Conduite des, 792.
- Organes des, 2, 30.

Dynamos, Types divers de :

- Alioth, 317, 358, 520.
- Allan, 41.
- Allen (*voir* Kapp).
- de l' « Allgemeine Gesellschaft » (A. E. G.), 41, 519, 704.
- de l' « Alliance » (Alternateur), 11, 632.
- de la C^{ie} Alsacienne, 375, 418, 845.
- Alteneck (*voir* Siemens).
- Atkinson, 529.
- Ayrton et Perry, 531.
- Bain, 463.
- Ball (à Pièce polaire unique, pour Arcs), 460.
- Blakey, Emmott et C^{ie}, 192, 195.
- Blakey, Emmott et C^{ie} (Alternateur), 373, 647.
- Bollmann, 531.
- Bradley, 320.
- Brown, 383, 475, 562, 840.
- — (pour Electrometallurgie), 478.
- — (triphase), 677.
- — (unipolaire), 529.
- — -Heilmann, 823.
- Brush, 413, 438, 523.
- de la C^{ie} Brush (*voir* Mordey), 198, 484.
- Bürgin, 96, 192, 330, 470.
- Cabella, 195.
- Cail-Helmer, 825, 827, 830.
- — (Alternateurs), 851, 856.
- « Castle », 338, 344.
- Chamberlain et Hookham, 332.
- Clark, 192.
- Clark, Muirhead et C^{ie}, 192, 520.
- Clarke, 8.
- Cooper (*voir* Paterson).
- du Creusot (Alternateurs), 871.
- Crompton, 334, 341, 354, 470, 524.
- Crompton-Bürgin, 330, 470.
- Crompton-Kapp, 471.
- Crompton-Kyle, 355.
- Crompton-Swinburne, 354, 471.
- « cuirassés », 195, 492.
- Dal Negro, 8.
- Delafied (Unipolaire), 529.

- Dynamos de Méritens (Alternateur), 627.
- Deprez [Marcel], 193, 467.
 - Desroziers, 17, 42, 326, 343, 531, 763, 829.
 - Diehl, 763.
 - Dobrowolsky (voir Allgemeine).
 - Dujardin (Alternateur à fer tournant), 10, 16.
 - Edison (à Anneau multipolaire), 298, 502.
 - — (à Balancier), 16, 499.
 - — (à Disque), 16, 326, 531.
 - — (à Induit en tambour), 351, 499.
 - — (Marine), 198.
 - — (Municipale), 461.
 - Edison-Hopkinson, 176, 177, 296, 393, 394, 397, 400, 410, 501, 504.
 - Edison-Upton, 499.
 - Eickemeyer, 105, 197, 357.
 - Elmore, 522.
 - Elphinstone-Vincent, 16, 167.
 - Elwell-Parker, 192, 195, 517, 523.
 - — (Alternateur), 654.
 - Esson (voir Paterson).
 - Ettingshausen, 8.
 - Faraday, 1, 6, 7, 8, 527.
 - Farmer (voir Wallace-Farmer).
 - Fein, 195, 196, 495.
 - Ferranti (Alternateur), 16, 17, 198, 380, 632, 634, 635, 655.
 - Ferraris [E.] (Unipolaire), 529.
 - Firth, 763.
 - Forbes, 195, 528.
 - Foster et Andersen (voir Clark, Muirhead et Cie).
 - Fritsche, 317, 531.
 - Fuller-Gramme, 40, 467.
 - Ganz (voir Zipernowsky), 195.
 - General Electric Traction Co (voir Immisch).
 - Goolden et Cie, 367, 372, 381, 510, 530, 640, 763.
 - Gordon (Alternateur), 653.
 - Gramme, 14, 16, 39, 329, 330, 466, 522, 837.
 - — (Alternateur), 626, 627.
- Dynamos : Greenwood et Batley, 515.
- Gülcher et Cie, 289, 321, 330, 488.
 - Hammerl, 463.
 - Hefner-Alteneck [von], 14, 348, 530, 651.
 - Heisler (Alternateur pour arcs), 675.
 - Helmer (voir Cail-Helmer).
 - Henley, 11.
 - Hjörth, 11.
 - Hochhausen, 193, 361, 467.
 - Holmes [F.], 11, 52, 366, 632, 637.
 - Holmes [J. H.] et Cie, 338, 344, 511, 513, 671.
 - Hopkinson (voir Edison-Hopkinson).
 - Hopkinson [J. et E.], 338, 482, 523.
 - — (Alternateur), 649.
 - Hopkinson et Muirhead, 530.
 - Houston (voir Thomson-Houston).
 - Immisch, 196, 338, 515.
 - « Iron-Clad », « Cuirassées » ou « Blindées », 178, 195, 492.
 - Jacobi, 9.
 - Jehl et Rupp, 42, 531.
 - Joel, 192, 329.
 - Johnson et Phillips (voir Kapp).
 - « Jumbo », 500.
 - Jürgensen, 193.
 - Kapp (Gisbert), 192, 195, 342, 371, 380, 384, 410, 472.
 - — (Alternateur), 373, 640, 863.
 - Kennedy [Rankin], 195, 196, 492, 515.
 - — (Alternateur), 628, 631, 675.
 - Kingdon (à Induit et Inducteurs fixes), 673.
 - Labour (Alternateur), 860.
 - Ladd, 13, 52.
 - Lahmeyer, 178, 195, 196, 332, 514.
 - Langley, 763.
 - Laurence, Paris et Scott, 314, 513.
 - « Leeds » (voir Greenwood).
 - de « L'Éclairage électrique », 841, 860.
 - de « L'Industrie électrique », 822, 839, 848, 849, 862.

- Dynamos : Lontin, 14, 41, 52, 195, 630, 763.
- Lorenz (*voir* Jürgensen).
 - Mac Tighe, 196, 482.
 - Main (Alternateur), 671.
 - Malderen [van], 11.
 - « Manchester » (*voir* J. et E. Hopkinson).
 - Mather et Hopkinson, 192, 482.
 - Mordey, 484.
 - — (à Induit et Inducteurs fixes), 672.
 - — (Alternateur), 629, 665.
 - Mountain (*voir* Ernest Scott et C^{ie}).
 - Muirhead (*voir* Clark).
 - Muirhead et Hopkinson (*voir* Hopkinson).
 - Müller, 763.
 - Newton, 463, 517.
 - Niaudet, 97, 530.
 - Nollet, 11, 631.
 - Oerlikon, 840, 851, 863, 865.
 - Pacinotti, 13, 331.
 - — (à disque), 15, 324, 530.
 - Page, 10.
 - Paris et Scott (*voir* Laurence).
 - Parsons (Alternateur), 665.
 - Paterson et Cooper, 192, 333, 392, 393, 395, 478, 523.
 - — — (Alternateur), 648.
 - — — (pour Arcs), 462.
 - Perry (*voir* Ayrton et Perry).
 - « Phénix » (*voir* Paterson et Cooper).
 - Pixii, 8.
 - Plücker (Unipolaire), 528.
 - Polechko (Poulie), 532.
 - Raffard-Gramme, 338.
 - Ravenshaw (*voir* Goolden).
 - Rechniewski, 95, 841.
 - Reignier et Parrot, 829.
 - Ritchie, 8, 9, 10.
 - Robin, 531.
 - Rubmkorff, 52.
 - Rupp (*voir* Jehl).
 - Sautter-Lemonnier, 467.
 - Sautter et Harlé (*voir* Sautter-Lemonnier).
- Dynamos : Sawyer, 11, 195.
- Saxton, 8, 530.
 - Sayers, 531.
 - — (pour Galvanoplastie), 524.
 - Schorch, 196.
 - Schuckert, 508.
 - Schuckert-Mordey, 198, 289, 321, 329, 484, 570.
 - Schuyler (pour Arcs), 463.
 - Scott (*voir* Laurence).
 - Scott [Ernest] et C^{ie}, 514, 628.
 - Siemens (à Anneau), 347, 495.
 - — (à Navette ou en double T), 11, 32.
 - — (à Tambour), 348, 492.
 - — (Alternateur), 651.
 - Sinsteden, 58.
 - Smith (Willoughby), 528.
 - Snell (*voir* Immisch).
 - Société Alsacienne, 375, 418, 845.
 - Spang-Gramme, 338.
 - Sperry (pour Arcs), 459.
 - Stafford et Eaves (pour Galvanoplastie), 196, 523.
 - Stanley (Alternateurs), 629, 643, 675.
 - Statter (pour Arcs), 196, 462, 463.
 - Stöhrer, 9, 530.
 - Sturgeon, 9, 32.
 - Swan, 58.
 - Swinburne, 294, 332.
 - « Taunton » (*voir* Newton).
 - Tesla (Alternateurs), 623.
 - Thomson [Elihu] (*voir* Thomson-Houston).
 - Thomson-Houston, 413, 620.
 - — (Alternateur), 645.
 - — (à Induit et Inducteurs fixes), 675.
 - — (pour Arcs), 448.
 - — (pour Incandescence), 457.
 - Thomson [sir William] (Alternateur), 16, 634, 635.
 - — (Poulie), 463, 531.
 - Thury, 191, 317, 348, 519, 520, 822, 830, 848, 849, 862.
 - Trotter (*voir* Goolden).

Dynamos : « Tyne » (voir Scott [E.] et C^o).

- Van de Poelle, 193.
- Van Malderen (Alternateur), 11.
- Varley [O. et F.], 12, 52.
- Varley [S. Alfred], 12, 58, 528.
- « Victoria » (voir Schuckert-Mordey).
- Vincent (voir Elphinstone).
- Voice (Unipolaire), 529.
- Wallace-Farmer, 97, 530.
- Waterhouse, 768.
- Watkins, 8.
- Wenström, 195, 332, 520.
- Westinghouse (voir Stanley).
- Weston, 15, 41, 333, 342, 343, 522.
- Wheatstone, 9, 11, 13.
- Wilde, 11, 12, 16, 52, 195, 198, 522, 612, 613.
- Winkler, 52.
- Włodicka, 306.
- Wood (pour Arcs), 460.
- Woolrich, 9, 522.
- Zipernowsky (Alternateur), 630, 650, 871.

Dynamomètre, 781, 783.

- Ayrton et Perry, 781, 783, 785.
- Brackett, 786.
- Bramwell [sir F. J.], 784.
- Carpentier [J.], 783.
- Deprez (M.), 786.
- Easton et Anderson, 785.
- Edison [T. A.], 784.
- Froude [W.], 783, 784.
- Hefner-Alteneck, 781, 784.
- Heinrichs, 785.
- Morin, 781, 785.
- Murray, 785.
- Siemens (Hefner-Alteneck), 781, 784.
- Smith [F. J.], 781, 785.
- Tatham, 784.
- Thomson [J.], 783.
- Unwin, 783.

Dynamométrique, Balance —, Brackett, 786.

— — Deprez, 786.

— Réglage, 776.

Dyne (Unité de Force), 809.

E

Ébonite (voir Substances isolantes).

Echauffement admissible et Surface de refroidissement, 413.

- des Electro-aimants, 94, 410.
- des Induits, 339, 418, 801.
- des Noyaux, 91, 93, 157, 724.
- des Pièces polaires, 94, 332.
- Limite possible d', 411, 412, 413, 430.

Éclairage par Arcs, Machines pour (voir aussi Haute tension).

- — Ball, 460.
- — Brush, 438.
- — Edison (Éclairage municipal), 461.
- — « Phénix », 462.
- — Schuyler, 463.
- — Sperry, 459.
- — Stanley (Alternateur), 675.
- — Statler, 462.
- — Thomson-Houston, 448.
- — Wood, 460.

Économie maximum, Loi d', 544, 555.

— d'une Transmission d'énergie, 751.

Économique, Coefficient, 112, 224.

Écrans magnétiques en zinc, 178, 400, 501, 606.

Edison, Balais, 365, 371.

- Dynamo à Balancier, 16, 499.
- — à Disque, 16, 326, 531.
- — municipale, 461.
- Dynamos, 16, 499.
- Inducteurs, 190, 192, 499.
- Induit, 351, 531.
- Régulateur, 269.
- Revendication de l'Enroulement compound, 58.

Edison General C^o, Dynamo marine, 198.

— — multipolaire, 502.

Edison-Hopkinson, Dynamo, 176, 177, 296, 347, 400, 410, 501, 504, 505, 506.

- Edison-Hopkinson, Dynamo, Calculs relatifs à la, 106, 107, 176, 182, 393, 394, 400.
- — Dérivations magnétiques de la, 174, 177.
- — Épreuves de la, 235.
- — Étude de la, 176, 397, 400.
- Edmunds, 777.
- Edwards et Normandy, Transformateurs, 741.
- Effet d'Aimantation transversale des induits, 74, 75, 86, 200, 388, 422, 572.
- Effet d'Aimantation transversale des induits, Remède à l', 76, 200, 274, 420, 426, 512.
- Efficaces, Intensité et Force électromotrice, 616, 617, 812, 813.
- Effort sur des fils parcourus par un courant, 3, 100, 101, 106, 123, 341, 539, 624, 696.
- Efforts mécaniques, leur action sur l'Aimantation, 152.
- Eickemeyer [R.], Dynamo, 195, 197, 357.
- Électro-aimant à une seule bobine, 196, 515.
- transversal, 13.
- Électro-aimants ou Inducteurs faibles, Résultat des, 83, 574.
- intérieurs, 495.
- Construction des, 190, 199, 440.
- Courbe de Saturation des, 147.
- Échauffement des, 152, 410.
- Forme des, 190.
- Formules des, 160.
- Noyaux des, 389, 393, 395.
- Polarité des, 119.
- Premier Emploi des, 7, 9.
- Règles pour le Bobinage des, 396, 410.
- Ventilation des, 493.
- Électrolyse, 848.
- Électromagnétiques, Appareils (voir Moteurs).
- Règles, 120, 395.
- Électrométallurgie, 448, 521, 528, 837, 849, 851.
- Électromoteurs (voir Moteurs).
- Électromotrice, Force — et Différence de Potentiel, 64, 66, 220, 238.
- — d'une Dynamo, 21, 203.
- — efficace, 616.
- — maximum, 611.
- — moyenne, 203, 611, 616.
- — Ondulation de la, 208, 211.
- — Unité de (Volt), 813.
- Élémentaire, Théorie, 201, 603.
- Elmore, Dynamo, 522.
- Elphinstone [Lord] et Vincent [C.W.], 16, 167.
- Elwell-Parker, Alternateurs, 654.
- Dynamos, 192, 195, 517, 523.
- Moteurs-dynamos, 742.
- Emballement ou Empolement des Moteurs, 580.
- Émission de la Chaleur par une surface, 413.
- Emploi des dynamos, Instructions sur l', 798.
- de pièces forgées pour Collecteurs, 360.
- Énergie dépensée, 100, 543, 550, 553.
- dissipée, 111, 787, 788.
- électrique, 1.
- utilisée, 543, 550, 553.
- Transmission et Transport de l', 746.
- Transport de l', 568, 758.
- Enroulement (voir aussi Bobinage), 56, 58.
- compound, 440.
- — Brush, 289.
- — Crompton, 270.
- — Gülcher, 289.
- — Mordey, 289, 591.
- — Siemens, 282, 289, 493, 494.
- — Thomson [Elihu], 284, 457, 645.
- — « Victoria » Mordey, 289.
- — Watson, 591.
- — des Moteurs, 577, 583, 589.
- — Lenteur d'action de l', 285.

- Enroulement compound, Meilleur mode d', 284.
- — Nom de l', 270.
- — Théorie de l', 278.
- — sur l', par Esson, 289.
- — sur l', par Frölich, 282.
- Double, 13, 17, 56, 270, 583.
- Entailles pour arrêter les Étincelles, 427, 524.
- Entraînement d'un Moteur, 539.
- Coins d', 108, 331, 333, 341, 471, 473, 595, 640.
- Modes d', 34, 43, 331, 353, 471, 473, 595, 824.
- Entrefer, 61, 146, 147, 148, 171, 183, 396, 419, 424, 430.
- Effort dans l', 102, 539.
- Entretien des Balais, 366, 799.
- Épanouissement du Champ magnétique, 82, 183, 401, 422, 427.
- Épreuves des Dynamos et Moteurs, 778, 836, 843.
- d'une machine Brush, 448.
- — Desroziers, 836.
- — Edison, 235.
- — Kapp, 235.
- — Labour, 861.
- — Rechniewski, 843, 844, 845.
- — Siemens, 235.
- d'un Transport d'Énergie, 749, 760.
- Équations de la Dynamo, 44, 46, 203.
- — (Frölich), 229.
- des Électro-aimants, 160.
- des Moteurs, 546.
- Équilibre des Induits, 341, 378, 805.
- Espace d'Air, 62, 146, 147, 148, 171, 183, 396, 419, 424, 430.
- Espacement dans le Bobinage des induits, 304.
- Essais de Machines, 823, 824, 827, 829, 845, 848.
- Esson [W. B.] (*voir aussi* Paterson et Cooper).
- Ampères-tours et Volume du courant, 423.
- Esson, Coefficients de Dérivations magnétiques, 176, 177.
- Dynamos pour Arcs, 462.
- sur le Calage des Balais, 460.
- sur les Courbes de Charge, 421.
- sur les Dynamos de l'Exposition de Francfort, 499, 509.
- sur les Dynamos multipolaires, 20, 427.
- sur l'Échauffement possible, 413.
- sur les Fils de Bobinage, 408, 409.
- — — Frettage, 343.
- sur l'Interférence de l'Induit, 422, 639.
- sur les Machines à excitation indépendante *ou* séparée, 224, 639.
- sur les Machines auto-régulatrices, 289, 290.
- sur les Projets de Dynamos, 20, 74, 415, 422, 424, 640.
- sur la Puissance des Dynamos, 115, 426, 640.
- sur le Refroidissement superficiel, 415.
- sur la Vitesse périphérique, 407.
- Estampage des Disques de Noyaux, 329.
- Etats-Unis, Office des Brevets, Singularité, 719.
- Étincelles, Causes d', 80, 574.
- Charge limitée par les, 83, 421.
- Prévention des, 83, 420, 421, 524, 575, 800, 803, 805.
- dans les Moteurs, 574.
- Étoiles d'induits (*voir aussi* Manchons, Modes d'entraînement et Plateaux), 329, 333, 338, 379, 469, 479, 510, 831.
- Ettingshausen, Dynamo, 8.
- Étuvage des Induits, 345, 364.
- Evershed [Sydney], sur les Transformateurs, 730.
- Ewing [James A.], Recherches magnétiques, 128, 131, 132, 144, 145, 150, 152, 157.
- Théorie du Magnétisme, 163.
- sur l'Aimantation progressive *ou* Viscosité magnétique, 84, 160.

- Ewing, sur l'Effet de la Compression, 151, 152.
 — — des Joints, 150.
 — — des Vibrations, 159.
 — sur l'Hystérésis, 155.
 Excitation (*voir* Ampères-tours).
 — composée *ou* composite, 54, 643.
 — compound, 13, 17, 36, 270, 583.
 — indépendante, Dynamo à, 47, 217, 223, 627, 638.
 — — Emploi d'une machine pour, 47, 224, 643, 650, 651, 669, 680.
 — séparée, Dynamo à, 47, 224, 632, 637, 643, 650, 651, 669, 680.
 — de l'Électro-aimant, Loi de l', 160, 171.
 — des Inducteurs, Modes d', 46.
 Excitatrice séparée, 47, 224, 645, 650, 651, 669, 680.
 Externe, Caractéristique, 242, 252.
 Extra-courant, 80, 440.
- F
- Fantômes magnétiques, 23, 24, 25, 102.
 Faraday, Aimant tournant de, 7.
 — Découverte de la Rotation électro-magnétique, 17.
 — Invention de la Dynamo, 6, 7, 8.
 — Machine à disque, 6, 527.
 — Notion des Lignes de force, 23, 166.
 — Principe de l'Induction, 1, 3, 6, 21.
 — Self-induction, 607.
 — Transformateur, 710.
 Farmer [Moses G.], sur l'Auto-excitation, 12.
 Faux-ronde du Collecteur, 804.
 Favre, sur la Théorie des Moteurs, 19.
 Fein, Dynamo, 195, 196, 495.
 F. E. M. (*voir* Force électromotrice).
 Fer forgé, Propriétés du, 136, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145.
 — Fil de — pour Noyaux, 43, 323, 332, 349, 491, 492, 530, 724, 728.
- Fer, Fonte de, 136, 137, 138, 139, 140, 142, 144, 394, 481, 648, 840, 849, 851.
 — Importance de la Qualité et de la Quantité du, 128, 139, 155, 162, 328, 714.
 — Perméabilité du, 123, 129, 394.
 — Propriétés magnétiques du, 116, 136.
 — Saturation du, 128, 143, 160, 408.
 — Section droite du, 387, 393, 409.
 Ferranti, Alternateur, 16, 17, 42, 198, 380, 632, 634, 635, 655.
 — Transformateur, 712, 728, 729.
 Ferraris [E.], Dynamo unipolaire, 529.
 Ferraris [Galileo], Moteurs à champ tournant, 18, 694, 696.
 — sur le Rendement des Transformateurs, 732, 736.
 Feuillard, son Emploi, 43, 93, 328, 446.
 Feussner, 794.
 Fibre vulcanisée, Emploi de la (*voir* Substances isolantes).
 Fil inerte *ou* inactif, 40, 488.
 Fil de cuivre pour Bobinage, 343, 386, 409, 411, 816.
 — — carré, son Emploi, 330, 344, 345, 389, 485, 505, 652, 816.
 Fil de fer pour Noyaux d'Induits, 43, 329, 491, 492.
 — pour Noyaux de Transformateurs, 724.
 — recouvrant les Induits, 332, 515.
 Fil pour Frettage (*voir* Frettes).
 Finzi, sur l'Hystérésis, 159.
 Firth, 763.
 Fleming [J. A.], Règle pour le sens de l'Induction, 21, 99.
 — sur les courants alternatifs, 621, 651, 694.
 — sur la Réductivité magnétique, 164.
 — sur les Transformateurs à courants alternatifs, 731, 732.
 Flux de force *ou* Flux magnétique *ou* Flux d'induction, 2, 21, 22, 44, 170, 387, 393, 395, 396.

- Flux de force dans un Noyau, 387, 389, 393, 395, 409, 636, 721.
 — — perdu, 180.
 — — utile, 180.
 — — Mesure du, 215.
 — — Modification du, 22, 763.
- Fontaine [H.], 18, 750.
- Fonte de fer (*voir* Fer).
- Fonvielle, Principe des Moteurs à Champ tournant, 705.
- Forbes [Georges], Dynamos, 195, 528.
 — sur le Champ perdu ou dérivé, 169, 181.
 — sur l'Échauffement des Inducteurs, 413.
 — sur les Transformateurs, 736.
- Force centrifuge, Action sur les induits, 108, 114, 342, 488.
 — — Régulateurs à — pour Moteurs, 580.
- Force coercitive, 155.
- Force électromotrice efficace, 616, 617, 812, 813.
 — — inverse (*voir* Forces contre-électromotrices).
 — — maximum, 611.
 — — motrice, 541.
 — — moyenne, 204, 205, 611, 616.
 — — d'une Dynamo, 21.
 — — et Différence de potentiel, 64, 66, 220, 238.
 — — Ondulation de la, 207, 208, 211, 215.
 — — Unité de (*Volt*), 204, 213.
- Force magnétisante, 126.
- Forces contre-électromotrices dans l'Arc voltaïque, 432.
 — — dans un Induit de dynamo, 82, 762.
 — — d'un Moteur, 538, 539, 692.
 — — de Self-induction, 607, 613, 719, 815.
- Formes d'Inducteurs, 190.
- Formules des Electro-aimants, 160.
- Foster et Andersen (Clark, Muirhead et C^o), Dynamo, 520.
- Foucault, Courants de (*voir* Courants parasites).
 Fourier, Théorème de, 620.
 Fourrures, 383.
 Fraaz frères, 745.
 Francfort-Lauffen, Expériences de, 759, 791.
- Freins dynamométriques (*voir aussi* Dynamomètres), 781, 782.
 — d'Appold, 781, 783.
 — de Froude, 781, 782, 783.
 — de Poncet, 781, 783.
 — de Prony, 781, 783.
 — de Raffard, 781, 783.
- Fréquence, 610, 645, 669.
- Frettes d'Induits, 41, 108, 335, 342, 644.
 — — Diamètre des Fils de, 342.
- Friction de l'Air, 111.
 — magnétique (*voir* Hystérésis).
 — sur les Coussinets, 111, 380.
- Fritsche, Induit en Disque, 17, 42, 43, 531.
 — Théorie du Bobinage, 20, 292, 297, 300, 317, 531.
- Frölich [D^r O.], 4, 19, 91, 109, 113, 229, 240, 282, 372, 589.
 — Formules de l'Electro-aimant, 19, 161, 229.
 — sur l'Enroulement compound, 270, 290, 293.
- Froment, Moteur, 17, 536.
- Froude, 781, 782, 783.
- Fuller-Gramme, Dynamo, 40, 467.

G

- Gaine anti-inductrice en cuivre, 440.
- Gaisberg [von], sur la Torsion de réaction d'Induit, 70.
- Galvanoplastie, Dynamos pour, 9, 330, 344, 350, 448, 521.
 — Dynamos propres à la, 49, 522.
- Ganz (*voir* Zipernowsky).
- Gaugain [J. M.], sur les Courbes d'Induction, 4, 66.
- Gauss, Principe de, 536.
- General Electric Traction Co^o (*voir* Im-misch).

- Générateur, Dynamo comme, 1, 3, 61.
 Génératrice, Dynamo, 1, 3.
 Glissement, Contacts à, 359, 373, 527, 535, 633, 634, 680.
 Glissières ou Rails de glissement, 34, 799, 827.
 Goolden [W. T.] et C^e, Dynamos, 196, 367, 372, 381, 510, 512, 640.
 — Calcul des Dynamos, 182.
 — Épreuves des Dynamos, 512, 791.
 — Régulateurs, 764, 765.
 Goolden et Trotter, Régulateurs magnétiques, 763.
 Gordon, Alternateur, 16, 198, 653.
 Graissage du Collecteur, 800, 806.
 — des Coussinets, 381, 664, 670.
 — sous Pression, 382, 664, 670.
 Graisseurs, 34, 381, 664, 670.
 Gramme, Dynamos à Courants alternatifs, 627, 628.
 — — — auto-excitatrices, 627.
 — — multipolaires, 16, 467, 468, 837.
 — — pour Électrometallurgie, 330, 522, 837.
 — — pour Transport d'Énergie, 18, 750, 837.
 — — Balais des, 366.
 — — Caractéristiques des, 244, 245, 254.
 — — Inducteurs des, 172, 193, 195, 382, 466, 467, 468.
 — — Induits des, 16, 39, 329, 330, 466.
 — — Potentiel au Collecteur des, 68.
 — Moteurs, 749.
 Greenwood et Batley, Dynamos, 315.
 Griscom, Moteur, 192.
 Groupement des Sections d'induit, 300, 313.
 Grove, 537.
 Gülcher, Dynamo, 16, 321, 330, 362, 363, 368, 488.
 — — Caractéristique de la, 288, 289.
 Gyrostatique, Action — de l'Induit, 375.
- H
- Hachures, 298.
 Hagenbach, Point de Théorie, 19.
 Hammer, Dynamo à circuit ouvert, 463.
 Haselwander, Moteur polyphase, 705.
 — Transformateur multiplex, 745.
 Haut Isolement, 728.
 Haut Voltage, Collecteurs pour, 433, 660.
 — — Machines de, 432, 458, 634, 660, 748, 759, 822.
 — — Transformateurs à, 728.
 Haute Fréquence, Courants alternatifs de, 623.
 Haute Tension (voir Haut Voltage).
 — — Machines de (voir aussi Dynamos pour Éclairage par Arcs).
 Hefner-Alteneck [von], Dynamomètre, 781, 784.
 — — Induit, 14, 348, 530.
 — — sur le Transport de l'Énergie, 756.
 Heinrichs, 785.
 Heisler, Alternateur, 675.
 Helmer (voir Gail-Helmer), 825, 873.
 Henley, Dynamo, 11.
 Henrion, Régulateur, 769.
 Henry, Moteur, 17, 535.
 — sur la Self-induction, 607.
 Henry (Unité de Self-induction), (voir Quadrant et Unités).
 Hering [Carl], sur le Bobinage en tambour, 20, 292.
 — sur les Dérivations du Champ magnétique, 178.
 « Hérisson », Transformateur, 728, 729.
 Herrick, sur les Rhéostats, 764.
 Herwig, Point de Théorie, 19.
 Hjorth [Sören], Machine combinée, 11, 56.
 — Moteur, 537.
 Hochhausen, Dynamo, 193, 361, 467.
 Hoho [P.], 512.
 Holmes [F.], Machine magnéto, 11, 52, 366, 632, 637.
 Holmes [J. H.] et C^e, Dynamos, 338, 344, 511, 513, 671.
 — Éclairage des Trains de chemins de fer, 512.

- Hoopes [A.], sur la Théorie d'Ewing, 163.
 Hopkinson [D^r Ed.], Inducteurs des dynamos, 192, 482.
 — sur le Couple moteur, 568.
 — sur les Courbes des Moteurs, 753.
 Hopkinson [D^r Ed. et D^r J.], Alternateurs, 20, 649, 671.
 — Coefficient v ou v' d', 174, 394.
 — Etude de la Machine Edison-Hopkinson, 505.
 — Induit, 338, 482.
 — Théorie, 20.
 — sur le Circuit magnétique, 16, 20, 169, 178.
 — sur les Dérivations magnétiques, 177, 178, 179.
 — sur la Réaction d'induit, 88, 422.
 — sur la Théorie des Dynamos, 20.
 Hopkinson (D^r John), Applications des Caractéristiques, 237, 240, 262.
 — Couplage des Alternateurs, 680.
 — Formules de Bobinage, 302.
 — Invention des Caractéristiques, 19, 237.
 — Induit en tambour, 353.
 — Modification de la Dynamo Edison, 16, 501, 504.
 — Relation entre les Dimensions et la Puissance d'une dynamo, 113.
 — Renversement de marche, 577.
 — sur l'Aimantation du fer, 131, 132, 136.
 — sur le Dynamomètre Siemens, 784.
 — sur l'Enroulement multipolaire, 320.
 — sur la Force coercitive, 155, 158, 159.
 — sur les Réactions d'Induit, 89.
 — sur la Self-induction, 607.
 — sur la Théorie des Dynamos, 19.
 Hospitalier [E.], 59, 117, 118, 290, 691, 710.
 — Courbes, 549, 550, 551.
 Housman, sur les Épreuves, 20, 788.
 — sur les Pôles compensateurs, 426.
 Houston (voir Thomson-Houston).
 Howell, 791.
 Hughes [D. E.], Balance magnétique, 130.
 Huile, Alimentation sous pression, 382, 664, 670.
 — son Emploi comme Isolant, 729, 759, 816.
 Hummel, 529, 791.
 Humphrey et Powell, 722.
 Hunt [Robert], sur la Puissance motrice, 537.
 Hutin et Leblanc, Moteur, 707.
 Hystérésis, 155.
 — visqueuse ou Aimantation progressive, 84, 160.
 — Perte de puissance par, 158, 159, 402, 730, 788.
- I
- Imbriqué, Bobinage, 300, 634, 648, 676.
 Imbriqués, Conducteurs d'induit, 344, 471, 481.
 Immisch (voir aussi Snell).
 Immisch, Collecteur, 596.
 — Dynamos, 196, 338, 515.
 — Moteur, 338, 595, 596, 597.
 Impédance (voir aussi Résistance magnétique), 614, 707.
 Inactif, Courant, 622.
 Indicateurs de Phases, 690.
 — Diagrammes, 157, 236, 781, 782.
 Inductance (voir aussi Self-induction), 614, 707.
 Inducteurs (voir aussi Electro-aimants), 2, 33.
 — à une seule bobine, 196, 515.
 — de Dynamos à haute tension, 462.
 — Bobinage des, 283, 396, 410, 415, 421, 588.
 — Bobines d', 410, 650.
 — Construction des, 190, 199, 440.
 — Division des, 841.
 — Échauffement des, 152, 410, 415.
 — Étude des, 199, 389, 393, 407, 415, 417.
 — Fonction des, 2, 33.
 — Formes d', 190, 417.
 — Formules des, 160, 171, 396.
 — Joints dans les, 148, 191.

- Inducteurs, Modes d'Excitation des, 46, 270, 588, 590, 645, 740.
- Puissance des — dans les Moteurs, 478, 575, 593, 601, 748, 752, 759.
 - Puissance des —, Avantages de la, 45, 83, 98, 546, 563, 575, 579, 593, 601.
 - Résistance convenable des, 229, 234.
 - Types d' (*voir* Formes d').
- Induction (*ou* Aimantation interne), 126, 171, 393, 409.
- Fausse, 70.
 - inverse, 85.
 - magnétique, 3, 124, 167, 172, 393, 409.
 - mutuelle, 96, 714.
 - Self-, 80, 90, 97, 575, 608, 715.
 - transversale, 72, 75, 86, 87.
 - Bobines d' (*voir* Transformateurs).
 - Courbes d', 64.
 - Processus de l', 21, 28.
 - Règle mnémorique pour le sens de l', 21, 99, 298.
 - Troubles d', 79, 97.
 - — Remède aux, 97.
- Inductor Dynamos (*voir* Dynamos à Induit et Inducteurs fixes), 11, 625, 671.
- Induit *ou* Armature, 2, 34.
- Coefficient d', 202.
- Induits à Barres, 343, 350, 471, 497, 532.
- à Circuit fermé, 37, 303.
 - à Circuit ouvert, 15, 434, 458.
 - à plusieurs Circuits indépendants, 304, 495, 524.
 - annulaires *ou* en Anneau, 34, 39, 292, 308, 329, 467, 626.
 - annulaires extérieurs, 347, 495.
 - dentés, 13, 39, 331, 344, 480, 513, 515, 645, 841.
 - disques, 15, 39, 42, 324, 408, 530, 631, 829.
 - en Anneau-disque, 40, 328, 484, 508, 628, 631.
 - en Navette *ou* double T, 11, 32, 348, 522, 537.
- Induits en Tambour, 14, 39, 41, 293, 306, 312, 348, 629.
- lisses, 331, 480.
 - perforés *ou* reperçés, 332, 476, 678, 851, 866.
 - polaires, 39, 630.
 - sphériques, 448.
 - Bobinage des, 291, 345, 348, 385, 408, 472.
 - — Diagrammes développés de, 297.
 - Bobinage des —, Méthodes pratiques de, 329, 626.
 - Bobines d', 291.
 - — Mode d'Assujettissement (*voir* Frettage).
 - Bras d'entraînement des, 333.
 - Classification des, 39, 300, 343, 625.
 - Combustion des, 801.
 - Construction des, 328, 344, 626.
 - Diamètre des, 388, 389, 416, 640, 652, 662.
 - Disjonctions dans les, 803.
 - Division des, 43, 91, 328, 349, 446.
 - Echauffement des, 339, 408, 413, 669, 802.
 - Emploi erroné des — pour l'aimantation des inducteurs, 88, 574.
 - Entraînement des —, Modes d', 333, 341, 471.
 - Équilibre des, 341, 378, 805.
 - Fonction des, 2, 33, 202.
 - Formules de bobinage des, 304.
 - Frettage des, 41, 108, 335, 342, 644.
 - Induction magnétique dans les, 388, 409, 637, 642.
 - Induction par les, 34, 70, 459, 604.
 - Isolement des, 43, 338, 342, 440, 640, 659.
 - Limite de Charge des, 421, 424, 640, 670.
 - Longueur des, 93, 388, 389, 416, 425, 429, 640.
 - Noyaux des, 31, 43, 329, 387, 393, 408, 629, 639.
 - Profondeur radiale des, 388, 408.

- Induits, Réactions dues aux, 71, 421, 529, 572, 639.**
 — Sections des, 38, 387.
 — Ventilation des, 197, 333, 335, 339, 473, 669, 823, 826, 818, 850.
- Induits, Types divers d' :**
 — Alioth, 317, 358, 520.
 — Arnold, 515.
 — Ayrton et Perry, 531.
 — Bollmann, 326, 531.
 — Brown, 332.
 — Brush, 15, 446.
 — Bürgin, 330.
 — Crompton, 334.
 — Desroziers, 326, 343, 531, 830.
 — Edison, 351, 531.
 — Eickemeyer, 357.
 — Ferranti, 656, 659.
 — Fritsche, 17, 42, 531.
 — Gramme, 14, 39, 329, 330, 467.
 — Hefner-Alteneck, 530.
 — Hookham, 326.
 — Hopkinson, 333.
 — Hopkinson et Muirhead, 530.
 — Kapp, 473.
 — Lontin, 14, 630.
 — Mordey, pour Alternateurs, 666.
 — — multipolaires, 321.
 — Niaudet, 97, 530.
 — Pacinotti, 13, 15, 331, 530.
 — Perry, multipolaires, 323.
 — Schuckert, 508.
 — Siemens, 306.
 — Stanley, 643.
 — Sturgeon, 32.
 — Swinburne (*voir* Crompton).
 — Thomson [sir William], 531.
 — Thomson-Houston, 449.
 — Thury, 317, 318, 848, 849, 862.
 — Wallace-Farmer, 97, 530.
 — Wilde, 632.
 — Wodicka, 306.
- Inerte, Bobine, 82, 438.**
 — Fil, 40, 488.
- Inertie électrique (*voir* Self-induction).**
 — magnétique, 155.
 — mécanique, 80, 344.
- Initiale, Aimantation, 270.**
- Instabilité de l'Arc voltaïque, 263.**
 — du Magnétisme, 249, 253, 255.
- Instructions sur l'Emploi des dynamos, 798.**
- Intégration de Courbes, 65, 66.**
- Intensité d'Aimantation, 127, 408, 409.**
 — de Champ magnétique, 117, 812.
 — de Courant (*voir* Courant).
 — de Force magnétisante d'une Bobine, 121.
- Interférence de Forces électromotrices alternatives, 639, 695.**
 — de l'Induit et des Inducteurs, 71, 89, 420, 572, 639.
- Interne, Caractéristique, 253.**
- Internes, Dynamos à inducteurs et pôles, 429, 460.**
- Intersection des Lignes ou du Flux de force, 21, 25, 201, 527, 603, 713.**
- Intervalle d'Air (*voir* Entrefer ou Espace d'Air).**
- Isenbeck [D^r Aug.], Recherches, 66.**
- Isolants ou Substances isolantes :**
 — Air, 361, 458, 497, 845.
 — Amiante, 43, 361, 637, 806.
 — Ardoise, 361.
 — Bitume, 848.
 — Bois, 727.
 — Brique émaillée, 848.
 — Calicot, 344, 440, 513.
 — Canevas, 339, 440.
 — Caoutchouc, 345, 596.
 — Coton, 344, 816.
 — Couche d'Huile, 345, 510.
 — — d'Oxyde, 320, 345, 367.
 — Ébonite, 333, 370, 373, 660, 661, 667, 729, 730, 860.
 — Enduit, Émail, 329, 339, 344, 652.
 — Fibre blanche dure, 342, 371, 473, 510.
 — Fibre vulcanisée, 339, 341, 342, 343, 361, 362, 371, 440, 651, 657, 658, 667.
 — Gaïac, 505.
 — Gomme-laque, 339, 345, 440.
 — Huile de pétrole, 729.
 — Ivoire, 534, 536.
 — Laque, 339.

- Isolants, Mica, 43, 329, 343, 351, 361, 640, 657, 667, 803, 806, 822.
 — Ozokérite, 727.
 — Papier, 329, 339, 347, 351, 440, 476, 517, 640, 651, 726, 806.
 — Papier bitumé, 330.
 — — mâché ou Carton, 438.
 — — Manille, 339.
 — — paraffiné, 479.
 — — parcheminé (Willesden). 339, 361, 596.
 — — verni, 339.
 — Peinture, 345.
 — Plâtre, 361.
 — Porcelaine, 638, 667, 728, 822.
 — Ruban, 344, 669.
 — Soie, 510.
 — Soufre, 639.
 — Vernis, 43, 329, 339, 345, 440, 652.
 — Vernis au Caoutchouc de Scott, 339.
 — Verre, 659.
- Isolation des Bâties de dynamos, 802, 822.
 — des Bobines, etc., 339, 345, 440, 667.
 — des Collecteurs, 361.
 — des Disques de Noyaux, 43, 328, 338, 667.
 — des Porte-balais, 368, 370, 371, 373.
- Isolateurs à garde d'huile, 759.
 Isolement, Épreuves d', 780.
 Isthme, Méthode de l' (Aimantation), 144.
- J
- Jablochkoff [P.], 711.
 Jacobi, Bateau électrique, 534.
 — Commutateur, 9, 534.
 — Loi de l'Électro-aimant, 160.
 — Loi de Puissance maximum, 538, 544, 545, 555.
 — Machine magnéto, 9.
 — Moteur, 17, 18, 534.
 — Principe de la Réversibilité, 18.
- Jamieson, 169, 375.
 — Régulateur électrique, 775.
- Jamin et Richard, 607.
 Jauge des fils, Choix de la, 343, 386, 408, 409, 410, 412, 457, 816.
 Jeu latéral à donner, 378.
 — à éviter, 378, 379, 380, 662, 668.
 — des Organes mobiles, 390, 429, 431, 460, 476.
- Joel, dynamo, 192, 329.
 Jehl et Rupp, Dynamo-disque, 42, 531.
 — Transformateur à courant continu, 742.
- Johnson and Phillips, Dynamo Kapp, 380, 473, 640.
 — Isolateurs à garde d'huile, 759.
- Joints dans un Circuit magnétique, 148, 190.
 — cylindriques des Paliers, 845.
- Joubert [J.], sur l'Induction des induits, 70.
 — sur la Puissance des dynamos, 113.
 — — Self-induction, 90.
 — — Vitesse, 218.
 — Théorie des Alternateurs, 19, 607.
- Joule [J.P.], Forme d'Électro-aimant, 164.
 — Loi de, 160, 165.
 — Redresseur de Courants, 638.
 — sur le Moteur électrique, 20, 534.
 — sur la Saturation magnétique, 128, 143.
- Joyce, Échauffement des couches de fils dans les bobines, 415.
 « Jumbo », Dynamos, 500.
 Jurgensen, Dynamo, 193.
- K
- Kapp [Gisbert], (voir aussi Crompton et Kapp).
 — Alternateur, 46, 373, 628, 640, 863.
 — Courbes de Charge, 421, 640.
 — Coussinets d'Alternateurs, 380.
 — Diagramme (ou Schéma) pour Moteurs, 755.
 — Disques de noyaux en Segments, 329, 474.
 — Dynamos, 44, 192, 195, 220, 342, 371, 380, 384, 410, 472.

- Kapp, Enroulements multipolaires, 314, 316, 357, 474.
 — Etude d'Arbre, 379.
 — Formes d'Inducteurs, 192, 195, 475.
 — Formule pour l'Électro-aimant, 160, 168, 170.
 — Mode d'Entraînement des disques de noyaux, 335, 336.
 — Méthodes d'Épreuves de Puissance, 20, 783, 788, 789, 791.
 — Prédétermination de la Caractéristique, 20.
 — Règle sur le Poids et l'Épaisseur de l'enroulement, 412.
 — Saturation du fer, 144.
 — Surface de Refroidissement, 415.
 — Transformateurs, 724, 730, 731, 736.
 — Transport électrique de l'Énergie, 537, 556, 757.
 — sur la Charge limite des Induits, 425.
 — sur le Couplage des Alternateurs, 688.
 — sur l'Enroulement compound, 39, 276, 290.
 — sur le Moteur en série, 568.
 — sur la Puissance et les Dimensions d'une dynamo, 144.
- Kelvin [lord], (voir Thomson, sir William).
- Kennedy [R.], Alternateurs, 628, 631, 675.
 — Dynamo à une seule bobine, 196, 492.
 — Dynamo cuirassée, 195, 492.
 — Régulation des Alternateurs, 740.
 — Transformateurs, 712, 731.
 — sur les Unités, 816.
- Kennelly, sur l'Aimantation transversale, 87.
 — sur la Réductivité magnétique, 163.
- Kerchove et C^{ie}, Moteurs à vapeur, 497.
- Kingdon, Alternateur, 11, 672, 673.
- Kirchhoff, Recherches, 130.
- Kohlrausch [W.], sur la dynamo Lahmeyer, 70, 514.
- Koosen [J. H.], Points de théorie, 19, 607.
- Kuhn, Machines à vapeur, 499.
- L
- Labour, Alternateur, 860.
- Ladd [W.] Dynamo, 13, 52.
- Lahmeyer, Dynamo, 70, 178, 179, 193, 196, 197, 514.
 — Induits dentés, 332.
- Lamont, Formule de l'Électro-aimant, 161.
- Lampe pilote ou témoin, 800.
- Lane-Fox, Transformateur de courant continu, 741.
- Langley [J. W.], Dérivation magnétique, 763.
- Lauckert, 58.
- Lauffen-Francfort (Expériences de Transport d'énergie), 17, 18, 651, 700, 704, 759, 760.
- Laurence, Paris et Scott, Dynamos, 314, 333, 357, 513, 599.
 — — — Moteurs-générateurs, 741.
- Leblanc [Maurice], (voir Hutin).
- « L'éclairage électrique » [Société], (voir Labour et Rechniewski).
- Ledeboer, sur le Couplage des Dynamos, 794, 795.
- Leduc, 148.
- « Leeds », Dynamo (voir Greenwood et Batley).
- Lenz, Loi de l'Induction, 19, 575.
 — Recherches théoriques, 19.
 — et Jacobi (voir Jacobi).
- Le Roux, Recherches théoriques, 11, 19, 607.
- Ligne neutre, 82, 574.
- Lignes de force magnétique, 2, 21, 118, 812.
- Limite d'Aimantation, 143, 408.
 — de Charge sans étincelles, 421, 424.
 — de Température admissible, 411.
- Linde [D.], 605.
- L'Industrie électrique [C^{ie} de] (voir Thury),
- Lodge [Oliver J.], Calcul des Ondulations, 211.
 — sur la Loi des Moteurs, 556.

- Lodge, sur la Résistance apparente, 91.
 Loi de l'Action et de la Réaction, 575.
 — du Circuit magnétique, 165, 171, 395.
 Loi de l'Électro-aimant, 160.
 — du Flux de courant alternatif, 612, 617.
 — de Jacobi, 160, 538, 544, 545, 555.
 — de Joule, 160, 164.
 — de Lenz, 19, 575.
 — de Lenz et de Jacobi (voir Jacobi).
 — d'Ohm, 22.
 — de Siemens, 547.
 — de Thompson, 576.
 Longue dérivation, 57, 279, 793.
 — portée, Dynamo à, 742.
 Longueur de Fil de bobinage, 409.
 — des Induits, 93, 388, 390, 416, 426, 430, 640.
 Lontin, Dynamos, 14, 41, 52, 195, 630, 763.
 Loomis, 803.
 Lorberg [H.], 91.
 Lorenz (voir Jurgensen).
- M**
- Machines (voir Dynamos).
 Machines à faible vitesse, 250, 524.
 — à grande vitesse, 45, 545.
 — à vapeur, 497, 499.
 — — Breguet, 834, 835.
 — — Ferranti, 664.
 — — Cail, 829, 830.
 — — Kerchove, 497.
 — — Kuhn, 499.
 — — Oerlikon, 840, 841.
 — — Parsons (Turbine à vapeur), 665.
 — — Willans, 510, 655, 845.
 — dynamos (voir Dynamos).
 Mac Tighe, Dynamo, 192, 196, 482.
 Magnétique, Intensité, 117, 122, 810.
 — Perméabilité, 125, 129, 143.
 — Polarité, 119.
 — Potentiel, 423, 424.
 — Réductance, Réductivité, Résistance, 168, 170, 395.
 Magnétique, Attraction — de l'Induit, 374, 418, 573.
 — Champ, 2, 22, 100, 147, 812.
 — Circuit, 17, 164, 395, 730, 781.
 — Dérivation (*Shunt*), 48, 763, 771.
 — Discontinuité, 330.
 — Flux, 44, 118, 170, 387, 393.
 — Induction (voir Induction).
 — — Coefficient d' (voir Perméabilité).
 — Lignes de force, 2, 21, 118, 812.
 — Shunt, 48, 763, 771.
 — Viscosité, 160.
 Magnétiques, Dérivations (*Leakage*), 93, 174, 176, 461, 464, 715, 736.
 — Principes, 116, 165.
 — Unités, 117, 810.
 Magnétisme (voir aussi Aimantation).
 — permanent, 46, 244, 257, 286.
 — — dans la caractéristique, 244, 257.
 — rémanent, 244, 257.
 — résiduel, 244, 257.
 — Instabilité du, 249, 253, 255.
 — Unité de, 117, 810.
 Magnétisante, Force — d'une Bobine, 120, 395, 396, 397.
 — — d'une Bobine en série, 414.
 — — en dérivation, 414.
 Magnéto-électrique, Machine (Magnéto-dynamo), 46, 217.
 — Caractéristique de la, 223, 563.
 Magnétomètre, 130.
 Magnétomotrice, Force, 120, 166, 395.
 — — dans un entrefer, 424.
 — — Calcul de la, 395, 396, 397.
 Magnolia, Métal, 380.
 Maillechort, son Emploi contre les courants parasites, 669, 831, 833.
 Main, Alternateurs, 671.
 Malderen [van], Machines dynamos, 11.
 « Manchester », Dynamo (voir J. et E. Hopkinson), 192, 193, 383, 482.
 Manchons d'induits (voir aussi Étoiles, Modes d'entraînement, Plateaux), 34, 333, 379.
 Maquaire, Régulateur, 579, 766.
 Martin et Wetzler, sur les Moteurs, 600.

- Mascart *et* Mascart *et* Joubert, Recherches, 19, 113.
- Masson, Recherches, 11.
- Mather *et* Ayrton, sur les Rhéostats, 764.
- Mather *et* Hopkinson, Dynamo, 192, 195, 482.
- Mather *et* Platt, Dynamos, 192, 195, 353, 383, 482.
- — Fer employé dans leurs dynamos, 136, 137.
- — sur la Compensation de la réaction d'induit, 88.
- Maximum, Aimantation, 128.
- Courant, 615, 617.
- — possible, 386, 391, 414.
- Force électromotrice, 611.
- Maxwell [J. Clerk], Recherches de, 19, 166, 536, 607, 732.
- Règle mnémonique pour la Polarité (Tire bouchon), 120.
- Mécaniques, Caractéristiques, 561, 571.
- Détails d'études, 374.
- Principes, 99, 368.
- Réactions — dans un Alternateur, 108, 623.
- — dans une Dynamo, 99, 108, 602.
- Méplats (*voir* Clavetage), 333, 337, 383.
- Méplats aux Collecteurs, 804.
- Métal antifriction pour coussinets, 380.
- Babbit, 380, 486.
- Delta, 471.
- Magnolia, 380.
- Mitis, 145.
- Méthodes d'arrachement pour la mesure de la Perméabilité, 135.
- Meyer *et* Auerbach, Recherches, 19.
- Meylan, sur le Couplage des Machines, 794.
- Miesbach-Munich, Expériences de, 749.
- Mines, Éclairage des, 367, 368, 518.
- Minet, 502, 791.
- Mitis, Métal, 145.
- Modes de Combinaisons d'Enroulements, 53, 270, 584, 645, 739.
- Moindre Vitesse d'Auto-excitation (*voir* aussi Vitesse critique) 49, 781.
- Moment magnétique, 127.
- Moment de Flexion des arbres, 378, 805.
- d'un Couple mécanique *ou* Torque, 102, 103, 109, 539, 561.
- Moncel (*voir* du Moncel).
- Mordey [W. M.], Alternateurs, 17, 42, 198, 663, 671, 672.
- Amélioration de la dynamo Schuckert, 16, 484.
- Balais en toile métallique, 671.
- Dynamos à puissance constante sous vitesse variable, 712.
- Étude d'Arbre, 379.
- Inducteur cuirassé, 196.
- Inducteur multipolaire, 198.
- Mode de Connexions multipolaires, 321.
- Transformateurs, 727.
- sur le Couplage des Alternateurs, 688.
- — des Dynamos compound, 796, 798.
- sur les Courants parasites dans les Moteurs, 575.
- sur la Courbe de Force électromotrice, 68, 71.
- sur la Distribution du potentiel, 67, 71, 484.
- sur le Gouvernement des Moteurs, 591.
- sur les Moteurs en dérivation, 570.
- — synchrones, 692.
- sur les Pertes par Hystérésis, 20, 159, 731.
- sur la Relation entre la Vitesse et la F. E. M., 218.
- sur le Rendement commercial, 678.
- *et* Watson, sur le Compoundage, 591.
- Morin, Dynamomètre, 781, 785.
- Moindre Vitesse d'Excitation, 49, 781.
- Moteur *ou* Réceptrice, 1, 3, 61.
- Moteurs à Balancier *ou* oscillants, 535, 602.
- à Courant continu, 533.
- à Courants alternatifs, 691.
- à Champ tournant, 18, 694, 706.
- à Inducteurs lamellés, 693.

Moteurs asynchrones, 866, 867.

- Générateurs, ou Moteurs-dynamos (voir Transformateurs à courant continu).
- polyphases, 694, 705.
- synchrones, 691.
- tétraphases, 697.
- triphases, 699, 703.
- Balais pour, 367.
- Calage des balais des, 82, 422, 572, 576.
- Gouvernement des, 577, 580.
- Puissance relative des Inducteurs des, 478, 575, 593, 601, 748, 752, 759.
- Rendement des, 547.
- Théorie des, 542, 563.

Moteurs, Types divers de :

- « Agir », 597.
- Allgemeine Gesellschaft, 602.
- Andersen et Girdlestone (« Agir »), 597.
- André, 582.
- Atkinson, 600, 693.
- Ayrton et Perry, 594.
- Borel, 694, 706.
- Bourbouze, 535, 536.
- Bradley, 705.
- Brown, 478, 599, 703.
- Brush, 580.
- Cail-Helmer, 857.
- du Creusot, 872.
- Curtis, Crocker et Wheeler, 602.
- Cuttris, 602.
- Dal Negro, 17, 535.
- Davenport, 17.
- Davidson, 17, 537.
- Deprez, 602.
- Dobrowolsky, 698, 699, 701, 704.
- Ferraris, 694, 705.
- Froment, 17, 536.
- Goolden, 600.
- Griscom, 192.
- Gramme, 750.
- Haselwander, 705.
- Henry, 17, 535.
- Hjorth, 537, 602.

Moteurs Hopkinson, 601.

- Hutin et Leblanc, 707.
- Immisch, 599.
- Jacobi, 17, 18, 534.
- Joule, 534.
- Leblanc (voir Hutin).
- Mather et Platt, 601.
- Mordey, 693.
- Oerlikon, 866.
- Pacinotti, 18.
- Page, 17, 535, 537, 602.
- Patin-Levavasseur, 871.
- Perry (voir Ayrton et Perry).
- Reckenzaun, 594.
- Ritchie, 17, 534.
- Schallenberger, 706.
- Siemens, 601, 602, 705.
- Snell, 574, 593, 597.
- Sprague, 541, 582, 588, 599.
- Sturgeon, 535.
- Tesla, 694.
- Thomson [Elihu], 693.
- Thomson-Houston, 601.
- Trouvé, 536, 602.
- Van de Poele, 602.
- Wheatstone, 17, 536.
- Wenström, 705.
- Wheeler, 602.
- Zipernowsky, 872.

Moteurs (voir aussi Réceptrices ou Récepteurs).

Mountain [W. C.], Étude de Collecteurs et de Porte-balais, 369.

Moyeux d'induits, 329, 333, 338, 379, 469, 479, 510, 831.

Müller, 10, 763.

Müller, Formule de, 160.

Multipolaire, Bobinage en série, 300, 313, 322, 472, 474.

Multipolaires, Dynamos, 16, 422, 427, 473, 488, 495, 502, 509, 519, 626.

— Étude des, 427, 626.

— Inducteurs des, 195, 198, 199, 495, 509, 626, 677.

— Induits des, 297, 312, 320, 495.

- Munich, Épreuves des Expériences de, 235, 749, 761.
- Municipaux, Éclairages — ou de villes, 433, 461.
- Murray, Épreuves de dynamos, 448, 786, 791.
— sur l'Auto-excitation, 12.
- N
- Navette, Induit en, 11, 32, 348, 537.
- Negro (*voir* Dal Negro).
- Neumann, Recherches théoriques, 18, 607.
- Neutre, Ligne, 82, 574.
- Neutres, Points, 68, 76, 79, 304, 366, 574.
- Newall, sur les Joints magnétiques, 148.
- Newton [F. M.], Dynamo, 463, 517.
- Niaudet [Alfred], 4.
— Induit, 97, 530.
— sur la Machine Gramme, 467.
- Nichols, 769.
- Nollet, Machine, 11, 631.
- Nom « Dynamo-électrique », 1, 2, 13.
- Notations algébriques et Symboles, 202.
- Notes historiques, Alternateurs, 8, 9, 11, 15, 16, 17, 625.
— — Dynamos, 6.
— — Moteurs, 17, 18, 534.
— — Transformateurs, 710.
- Noyaux, 43, 92, 328, 388, 393, 445, 626, 724.
— en feuillard, leur Emploi, 43, 93, 328, 446.
— Courants parasites dans les, 92, 445.
— Disques de — dentés, 331, 480, 513, 841.
— — perforés ou reperçés, 332, 344, 471, 476, 525, 678, 704, 851, 866.
— — en segments, 329, 652, 654.
— — Choix des, 388.
— — Diamètre des, 388, 408.
— — Épaisseur des, 93, 328, 408, 640.
- Noyaux, Disques de, Isolement des, 43, 328, 471, 505, 595, 640.
— — Modes d'entraînement des, 333, 513.
— — Profondeur radiale des, 388, 408.
— — Ventilation des, 333, 339, 473.
— Division des, 43, 91, 328, 445, 724.
- O
- Oerlikon (Ateliers d'), Alternateurs, 863.
— — à courants triphasés, 865.
— Dynamos, 17, 192, 475, 680, 758, 840.
— — pour Électrométallurgie, 851.
— Moteurs à courants alternatifs, 866.
— Moteurs triphasés, 866.
— Transformateurs, 863.
- Olm [Dr G. S.], Loi d', 22, 167, 612, 813.
- Ohm (Unité de résistance), 814.
- Ondulations du Courant, 36, 207, 208, 211, 215, 458, 603.
— — Mesure des, 215.
- Organes des Dynamos, 2, 30, 33.
- Oscillants, Dynamos et Moteurs, 16, 499, 535, 602.
- P
- Pacinotti, Collecteur, 14.
— Dynamo et Moteur, 13, 18.
— Dynamo-disque, 15, 42, 324, 531.
— Induit, 13, 15, 331.
— sur la Réversibilité, 18.
- Page, Première Machine magnéto, 10.
— Moteurs, 17, 535, 537, 602.
- Paget Higgs, Enroulement compound, 58.
- Paliers, 379, 383.
— à boulets, 381.
— à joints cylindriques, 845.
- Papier (*voir* Substances isolantes).
— Willesden (*voir* Isolants).

- Parafoudres, 802.
- Parallèle, Couplage des Bobines en, 304, 486, 660.
— Couplage des Dynamos en, 684, 794.
- Paris et Scott (*voir* Laurence).
- Parsons, Alternateur, 665.
— Porte-balais, 372.
- Pas d'un alternateur multipolaire, 302, 635, 641.
- Patent-Office des États-Unis, Singularité, 719.
- Paterson et Cooper, Alternateur, 195, 648.
— Dynamos « Phénix », 478, 523.
— — Calculs relatifs aux, 403.
— — Collecteurs des, 361, 362, 370.
— — Données relatives aux, 403, 480.
— — Inducteurs des, 192, 195, 383, 403, 480, 481.
— — Induits des, 333, 343, 403, 478.
— — pour Éclairage par arcs, 229, 462.
- Perdu, Champ, 177.
- Perdus, Ampères — dans une dérivation, 230, 391, 788.
— Volts, 219, 267, 404, 788.
- Perforés, Disques de Noyaux, 332, 471, 476, 525, 678, 704, 851, 866.
- Période, 610, 625.
- Périodicité (*voir* Fréquence), 625.
- Périodique, Temps, 610, 625.
- Périphérique, Vitesse, 114, 344, 407, 664, 834.
- Permanent, Magnétisme — dans la caractéristique, 244, 257, 286.
- Permanents, Aimants, 46.
- Perméabilité, 125, 126, 129.
— du fer, 125, 126, 127, 874.
— Mesure de la, 129.
- Perméamètre, 134.
- Perméance (Conductance magnétique), 180.
- Perry [John] (*voir* Ayrton et Perry).
— Combinaisons pour Auto-régulation, 56.
— Dynamo, 531.
— Mode de Bobinage des induits, 313, 323.
— sur le Moment de flexion des arbres, 378.
— sur les Transformateurs, 736.
- Perte de Magnétisme *ou* d'Aimantation, 249, 253, 255.
- Pertes, Epreuves analytiques des, 788.
— de charge, Courbes, 863, 865.
- Perturbations dues aux masses de fer, 93, 174, 177.
- Pesetto, sur la Puissance d'une machine, 113.
- Petrina, Commutateur, 9.
- Peukert, Recherches, 88, 736.
- Phase d'un courant périodique, 603, 627, 681.
- « Phénix », Dynamo, (*voir* Paterson et Cooper).
- Phosphoreux, Bronze —, son Emploi, 342, 360.
- Physique, Théorie — de la Dynamo, 21.
- Picard, 276.
- Picou, 590.
- Pièce polaire unique, Dynamo à, 461.
- Pièces polaires, 190, 192, 642.
— — internes, 460.
— — Courants parasites dans les, 93.
— — Échauffement des, 93.
— — Forme des, 83, 98, 190, 475, 483, 508, 579, 642.
- Pilote, Balai —, Recherches à l'aide du, 67, 770.
— Lampe — *ou* témoin, 800.
- Pixii, Dynamo, 8.
- Plaques de Charbon pour Rhéostats, 767.
— de Fondation, 34, 178, 191, 383, 798.
- Plateaux d'induits, 329, 831, 833.
- Plücker, Dynamo unipolaire, 528.
- Poggendorff [J.], Commutateur, 9.
— Points de théorie, 19.

- Point diacritique (*voir* Saturation).
 — — de demi-saturation, 161, 431.
 — mort d'un moteur, 686.
 — neutre, 68, 76, 79, 304, 366, 574.
 — — Déplacement du, 76.
- Points morts dans les Moteurs, 696.
 — fondamentaux dans l'étude des Dynamos, 43, 385, 593.
 — fondamentaux dans l'étude des Moteurs, 539, 594, 752.
 — importants d'un projet de dynamo, 407, 421, 593, 633, 640.
- Poids du Fil de bobinage, 410, 412.
- Polaire, Angle — sous-tendu, 75, 390, 422.
- Polaires, Becs — en fonte, 375.
 — — Renversement du champ sous les, 82, 423.
 — Induits, 39, 41, 630.
 — Pièces, 192, 642.
 — — internes, 460.
 — — Courants parasites dans les, 93.
 — — Échauffement des, 93.
 — — Forme des, 83, 98, 190, 475, 483, 508, 579, 642.
 — Surfaces —, Conformation des, 69, 83, 98, 190, 344, 462, 508, 510, 579, 642.
- Polarité magnétique, 119.
 — — Renversement de, 49, 50, 265, 522.
- Pôle auxiliaire de renversement, 88, 426.
- Polechko, Dynamo-disque, 463, 532.
- Pôles 24, 117, 119, 190.
 — consécutifs, 193, 467.
 — internes, Dynamos à, 429, 459, 495.
 — résultants, 76.
 — saillants, 193, 468.
 — de Compensation, 88, 826.
- Pollard [J.], Expérience de, 778.
- Polyphases, Alternateurs, 676.
 — Moteurs, 694.
- Polyphasés, Courants, 627, 676, 694, 759, 760.
- Porte-à-faux, Inducteur en, 680.
 — Induit en, 496, 663, 838.
 — Poulie en, 378, 838.
- Porte-balais, 368.
- Portées ou Fusées, Proportions convenables des, 376.
- Potentiel constant, Combinaisons pour, 55.
 — — Distribution sous, 54, 267, 560, 748.
 — — Dynamos à, 267.
 — Courbes de Distribution du, 65, 66, 68, 445.
 — Différence de — et Force électromotrice, 220.
 — Différence de — aux Bornes, 249.
- Poulies, 34, 378, 383.
 — employées pour Contacts à glissement, 273, 680.
- Prédétermination des Courbes des Dynamos, 168, 170, 174, 405.
- Pression ou Tension électrique (*voir* Différence de Potentiel et Force électromotrice).
- Pression sur les Coussinets, 374.
- Principe de l'Auto-excitation, 10, 12, 13.
- Principes fondamentaux de la Dynamo, 4, 21, 205.
 — magnétiques, 116, 165.
 — des Courants alternatifs, 603.
 — des Moteurs, 539, 542.
 — de la Réversibilité, 1, 18, 593.
 — des Transformateurs, 713.
- Profondeur maximum de Bobinage, 819.
 — radiale des Noyaux, 388, 408.
- Progrès dans la Construction des Transformateurs, 736.
- Projets (Avant-projets et Etudes) de Dynamos, 43, 234, 285, 385, 427.
 — — d'Alternateurs, 635, 640.
 — — de Moteurs, 593.
 — — de Transformateurs, 721.
- Prony, Frein de, 781, 782, 783.
- Propriétés du fer, 136, 138, 139, 140, 141, 143, 144, 145, 873.
 — magnétiques, 116, 136.
 — régulatrices des dynamos en Dé-
 rivation, 51, 260, 570.

- Propriétés régulatrices des dynamos, en Série, 568, 570.
- Propulsion, Entraînement de — dans un Moteur, 260, 539.
- Puissance ou Activité, 104, 544.
- Produit de deux facteurs, 102, 104, 559.
 - apparente, 622, 731.
 - des Dynamos, 104, 112, 385, 423, 593, 640, 815.
 - — par rapport à leurs Dimensions, 112, 385, 423, 429, 593, 640.
 - d'un Moteur, 559, 593.
 - en chevaux des Dynamos et des Moteurs, 104, 781, 783.
 - — Calcul de la, 104, 392, 593.
 - — Caractéristiques de, 240, 252.
 - — Épreuves de la, 782, 788.
 - maximum d'un Moteur, 545, 554.
 - nécessaire à l'entraînement d'une Dynamo, 3, 100, 104.
 - perdue ou dissipée (*Stray-Power*), 111, 787, 788.
 - Méthodes de Mesure de la, 782.
 - Transmission électrique de la — mécanique, 746.
 - Transport électrique de la, 568, 758.
 - Unité de —, (*Watt*), 815.
- Pulsation, 610.
- Pulsatoires, Moteurs — ou oscillants, 602.
- Puluj, sur la Continuité du courant, 208.
- Pulvermacher, sur la Division des Noyaux, 9.
- Q
- Quad* ou *Quadrant* (Unité de Self-induction) (*voir aussi* « Henry »), 619, 815.
- Quadrature ou Décalage d'un quart de période, 613.
- R
- Radian* (Unité d'Angle), 104.
- Raffard, Accouplement élastique, 835.
- Dynamo Gramme, 338, 467.
 - Frein, 781, 783.
- Rails de glissement, 34, 799, 827.
- Rais d'Induit ou Bras d'entraînement, 333.
- Ravenshaw (*voir aussi* Goolden), 771, 788.
- Raworth, sur l'Induction dans les induits, 71.
- Rayleigh [lord], sur les Épreuves électriques, 779, 780, 788, 814.
- sur la Self-induction, 607.
- Raynaud [J.], 808.
- Réactance, 707.
- Réactions électriques d'Induit et d'Inducteurs dans les Dynamos, 60, 71, 108, 420.
- — dans les Moteurs, 572.
 - — mécaniques dans les Induits, 108, 364, 624, 805.
- Rebobinage d'une dynamo, 249, 385, 408, 421.
- Récepteurs, Réceptrices (*voir* Moteurs).
- Rechniewski, Dynamos, 841.
- Etudes, 113, 589, 606, 731, 736, 743.
- Reckenzaun, Moteur, 577, 594.
- Redressement des Courants, 36, 206, 437, 637, 645.
- Réduction de l'Aimantation, 249, 253, 255.
- Refroidissement, Surface de, 411, 413, 428.
- Réglage des Dynamos, 48, 268, 432.
- — Moteurs, 580.
 - par Pression de la vapeur, 433, 776.
- Règle d'Ampère, 21.
- de Fleming, 21, 99.
 - de Maxwell, 120.
- Règles d'Étude et de Construction, 234, 342, 343, 391, 407, 593.
- pour le Bobinage, 408.
 - pour le Compoundage, 284, 397, 589.
 - pour la Construction des Transformateurs, 713.

- Règles pour la Division du Fer, 92.
- pour les Inducteurs (*voir* Inducteurs).
 - pour les Induits (*voir* Induits).
 - pour les Résistances, 234, 235, 638.
- Régulateurs de machines (Gouverneurs), 269, 762.
- automatiques dynamométriques, 776.
 - — Brush, 448, 767.
 - — Edison, 269.
 - — Goolden, 764.
 - — Henrion, 769.
 - — Jamieson, 775.
 - — Maquaire, 766.
 - — Lane-Fox, 772.
 - — Ravenshaw et Trotter, 770.
 - — Reignier, 772.
 - — Richardson, 269, 772.
 - — Sperry, 772.
 - — Statter, 462, 463, 768.
 - — Thomson-Houston, 456, 768.
 - — Trotter et Ravenshaw, 770.
 - — Waterhouse, 768.
 - — Willans, 269, 774.
 - — Wood, 769.
- Régulation automatique (*voir* Régulateurs).
- par Circuit d'excitation, 51, 763.
 - par Déplacement des balais, 268, 454, 462, 763, 840.
 - par Introduction de résistances, 51, 762, 767.
 - par troisième Balai, 51, 768.
- Régulatrices, Propriétés — des Dynamos en Dérivation, 51, 591.
- — des Dynamos en Série, 49, 567.
- Reignier, Recherches, 756, 772.
- Reignier et Parrot, Dynamo, 829.
- Réductance ou Résistance d'un circuit magnétique, 171, 180, 395, 431.
- Réductivité, 168, 170, 395.
- Rémanence, 155.
- Rendement maximum, 544, 555.
- Rendement réduit par les Courants parasites, 111, 344, 669.
- d'une Dynamo, brut, électrique et net, 112, 222, 224, 234, 393, 670, 837.
 - des Moteurs, 541, 837.
 - des Moteurs-dynamos, 742.
 - des Transformateurs, 731.
 - d'un Transport d'énergie, 751.
 - Calculs de, 112, 392, 401, 512; 514, 751.
 - Courbes de, 863, 865.
- Renversement du Champ sous les bords polaires, 81, 83, 422, 426, 574.
- de Courant à la commutation, 81, 207, 215, 573.
 - de Marche, 577, 579.
 - de Polarité, 49, 50, 265, 522.
- Réparations, 348, 451, 645, 801.
- Repercés, Disques de noyaux, 332, 471, 476, 525, 678, 704, 851, 866.
- Résiduel, Magnétisme, 154.
- Résistance, 22, 780, 781, 813.
- Unité de (*Ohm*), 814.
 - apparente, 90, 614.
 - — d'un Induit, 90, 614.
 - critique, 49, 249, 251, 254.
 - magnétique (Réductance), 171, 395, 431, 780.
 - — variable, Dynamos à, 11, 671.
 - variable (*voir* Rhéostat).
 - dans la Caractéristique, 248, 249, 254.
 - d'une Bobine d'un volume donné, 410.
 - d'une Dynamo, 219, 779.
 - d'Isolement, 780.
 - de Régulation, 269, 432, 762.
 - par centimètre cubé d'Enroulement, 416, 418.
- Retard du Courant sur la Force électromotrice (*voir aussi* Décalage), 618, 623.
- de Phase, 154, 612.
 - — dans les Transformateurs, 721.
 - magnétique, Prétendu, 81, 97, 154, 160.

- Réversibilité, Principe de la, 1, 18.
- Rhéostat-Régulateur (*voir* Régulateur), 269, 764, 766.
- Richardson, Régulateur, 269, 773.
- Richter [Ernest], sur la Différence de potentiel et la Force électromotrice, 220.
- sur les Dynamos Siemens, 289.
- Ritchie, Bobine d'induction, 710.
- Circuit magnétique, 165.
- Machine magnéto, 8, 9, 10.
- Moteur, 17, 534.
- Robert, Acier, 825, 873.
- Robin, Dynamo, 531.
- Roue de Barlow, 17.
- Rowland [Henry A.], sur le Magnétisme, 131, 132, 143, 166, 167, 190.
- Ruban (*voir* Isolants).
- de cuivre pour bobinage, 343, 657, 666, 817.
- de fer ou Feuillard, Noyaux en —, leur Emploi, 43, 93, 328, 446.
- Rücker [A. W.], Limite d'Auto-régulation, 20, 290.
- Ruhmkorff, Bobinage d'Induits, 52.
- Bobine d'induction, 710.
- Rupp (*voir* Jehl).
- Ruptures, Causes de, 364, 801, 803.
- de Connecteurs, 803.
- Ryan, sur les Courbes de Réaction d'induit, 70, 71.
- sur la Torsion du Champ magnétique, 98.
- sur les Transformateurs, 722.
- S
- Saturation magnétique, Courbe de, 129.
- — Effets de la, 128, 129, 161.
- — Formules pour la, 160.
- — Point diacritique de, 161, 431.
- — Valeurs de, 161.
- Sautter, Lemonnier et C^{ie}, Dynamo Gramme, 467.
- Sawyer, Dynamo, 11, 195.
- Saxton, Machine, 8, 530.
- Sayers, Dynamo-disque, 531.
- — à Puissance constante sous vitesse variable, 512.
- — pour galvanoplastie, 524.
- Entailles pour arrêter les étincelles, 427, 524.
- Schellen [H.], 4, 794.
- Schémas (*voir* Diagrammes).
- Schmidt, 690.
- Schorch, Dynamo, 196.
- Schröter, 784.
- Schuckert, Dynamos, 58, 70, 508.
- — multipolaires, 16, 508.
- Transformateur multiplex, 745.
- Schuckert-Mordey, Dynamos, 198, 484.
- Schültze, sur l'Aimantation transversale, 87.
- Schuyler, Dynamo, 463.
- Scott [Ernest] et Mountain, 369, 514, 628.
- Scott (*voir* Laurence).
- Vernis au caoutchouc (*voir* Substances isolantes).
- Séchage des induits à l'étuve, 345, 364.
- Secohm (*voir* Quadrant ou Henry).
- Secohmmètre, 816.
- Sections d'Induits, 37, 62, 387, 626.
- d'Inducteurs, 602.
- Segments ou Touches de Collecteurs, 62, 360.
- Disques de noyaux en, 329, 347.
- Self-induction, 23, 80, 89, 90, 97, 208, 459, 462, 608, 638, 639, 707, 715, 815.
- Coefficient de, 462, 608, 638, 715, 815.
- Retard dû à la, 612.
- Unité de (*Quadrant*, *Secohm* ou *Henry*), 815.
- Sellers, Coussinets convexes, 381.
- Double graissage, 382.
- Sellon [R. P.], 484, 712, 743.
- Série, Couplage en — des Dynamos, 681, 792.
- Dynamo en, 49, 228, 251, 260, 568, 767, 792.
- Dynamos pour Éclairage en —, 432.

- Série, Groupement en — des sections d'induit, 300, 313.
- Series-dynamo, 49, 228, 260, 568, 767, 792.
- Shunt ou Dérivation, 50.
— — — Dynamo, 50, 229, 252, 256, 260, 569.
— — — magnétique, 48, 763, 771.
- Siemens, Alternateur, 15, 42, 198, 375, 651.
— — — Coussinets, 381.
— — — Dynamos (ancien type), 14, 16, 32, 192, 522.
— — — (nouveau type), 492.
— — — (types récents), 195, 494.
— — — compound, Bobinage des, 493.
— — — pour Galvanoplastie, 350, 522, 528.
— — — unipolaires, 528.
— — — Caractéristiques des, 237, 241, 243, 252.
— — — Constantes et Rendement des, 235.
— — — Enroulement de l'induit des, 304, 348, 494.
— — — Inducteurs des, 192, 195, 493.
— — — Loi de, 547.
- Siemens [Alexandre], Constructions graphiques, 253, 753.
— — — sur le Couplage des moteurs, 693.
- Siemens [sir William], Premières recherches, 11, 16.
— — — Rendement des moteurs, 546.
— — — sur l'Enroulement compound, 58.
— — — sur l'Instabilité de la lumière à arc, 263.
— — — sur les Machines en dérivation, 15, 253.
— — — sur le Transport de l'Énergie, 545, 569.
- Siemens [Werner von], Induit en navette ou double T, 11, 32, 348, 522, 537.
- Siemens [W. v.] Machine auto-excitatrice, 13.
— — — Nom donné à la « Dynamo », 13.
— — — sur l'Aimantation transversale, 87.
— — — sur le Magnétisme, 162.
— — — sur le Transport de l'Énergie, 545.
- Siemens et Halske, Dynamo à anneau externe, 195.
— — — Dynamo à pôles internes, 17, 195, 347, 408, 429, 495.
— — — Moteurs polyphases, 705.
— — — Porte-balais, 372.
— — — Transformateur de courants alternatifs en courant continu, 744.
- Sinsteden, Études théoriques, 19.
— — — Perfectionnements primitifs, 10, 58.
- Sinusoïdes ou Courbes de Sinus, 63, 68, 69, 207, 614, 615, 625.
- Smée, 537.
- Smith [Frédéric J.], Dynamomètre, 225, 776, 781, 785.
— — — Epreuves des Moteurs, 785.
- Smith [Holroyd], Balais pour Moteurs, 367.
- Smith [Willoughby], Expérience d'induction, 528.
- Snell [Albion T.], Balais en charbon, 367, 518.
— — — Dynamo, 518.
— — — Enroulement des Induits, 317.
— — — Étude de Moteurs, 574, 593, 597.
— — — Puissance et Dimensions, 426, 429, 593.
- Snell et Kapp, Transformateur (voir Kapp).
- Société Alsacienne, Dynamos de la, 375, 418, 845.
- Socle en Zinc, 178, 399, 400, 501.
- Socles, Plaques de fondation ou Bâties, 34, 178, 191, 383, 798.
- Soudure à l'argent, 351, 651.

- Souffleur d'air, 457.
 South London Electric Railway, 507, 508, 601.
 Spang, Induit en anneau, 338.
 Sperry, Dynamo à haut voltage, 459.
 Sphérique, Induit, 448, 458.
 Spirale, Bobinage en — ou en Hélice, 300.
 Sièges sphériques de Coussinets, 380, 381, 510, 645, 662.
 Spottiswoode, 623.
 Sprague [F. J.], Épreuves de dynamos, 791.
 — Moteurs, 192, 541, 582, 588, 599.
 — sur la Régulation des Moteurs, 582.
 Stafford et Eaves, Dynamo, 196, 523.
 Stanley, Alternateur, 195, 629, 643, 676, 791.
 Stations centrales de Berlin, 498.
 — — américaines, 460, 502.
 — — anglaises, 653, 655, 662, 664, 741, 774.
 — — Dynamos pour, 196, 356, 472, 473, 494, 497, 502, 508, 509, 510, 516, 643, 651, 655, 662, 670, 675.
 Statter [J. G.], Dynamo à haut potentiel, 196, 462, 463.
 — Régulateur 462.
 Stephenson [Robert], 537.
 Stöhrer, Dynamo, 9, 530.
 Stoletow, Recherches, 131, 162.
 Storch, sur la Puissance spécifique des machines, 114.
 Stroh [A.], 13.
 Strömberg, sur la Désaimantation, 87.
 Sturgeon, Circuit magnétique, 165.
 — Collecteur, 9.
 — Disque de, 535.
 — Machine magnéto, 9, 32.
 Substances diamagnétiques, 127.
 — isolantes (*voir* Isolants).
 Supports de Paliers, 379, 383, 845.
 — à boulets (*voir* Coussinets), 381.
 Surcompoudage ou Hypercompoudage, 283, 285, 487, 744, 759.
 Surface de refroidissement, 410, 413, 414, 428.
 Surveillance des Dynamos, 792.
 Susceptibilité magnétique, 125, 127.
 Swan [Joseph W.], 58.
 Swinburne [James] (*voir* Crompton et Swinburne).
 — Disques de noyaux reperçés, 332.
 — sur l'Aimantation du fer, 133.
 — sur le Bobinage suivant des cordes, 86, 294, 355.
 — sur l'Emploi d'un Pôle auxiliaire de renversement, 426.
 — sur l'Enroulement compound, 58.
 — sur les Épreuves de Puissance, 618, 787.
 — sur l'Interférence d'Induit, 89, 422.
 — sur les Potentiels au Collecteur, 70.
 — sur les Transformateurs, 712, 731.
 Symboles employés, 202.
 Symétrie, sa Nécessité, 190, 348, 351, 417.
 Synchrones, Moteurs, 691.
 Synchroniseur, Pouvoir, 689.
 Synchronisme, Condition de, 689.
 Système d'Unités employé en électricité, 808.
 — inducteur (*voir* Inducteurs), 2, 33.
 — induit (*voir* Induits), 2, 33.

T

- T, Induit en double, 11, 32, 348, 537.
 Tableaux, 87, 92, 103, 104, 110, 115, 140, 143, 145, 149, 151, 158, 159, 177, 179, 214, 235, 238, 245, 344, 377, 406, 409, 412, 417, 512, 514, 525, 526, 527, 541, 584, 592, 597, 598, 636, 654, 655, 687, 717, 738, 739, 742, 760, 788, 818, 819, 824, 827, 829, 836, 844, 845, 848, 853, 856, 860, 861, 874.

- Tableaux de Bobinages, 295, 302, 310, 312, 316, 317.
- Taillage des Balais, 366, 799.
- Tambour, Induits en, 14, 39, 41, 293, 306, 312, 348, 629.
- Tangentielle, Vitesse, 114, 344, 407, 408, 415, 481, 494, 664, 834.
- Taquin, Circuit, 56, 440.
- Tatham, Dynamomètre, 784.
- « Taunton », Dynamo (*voir* Newton).
- Technomasio, 195.
- Température, Élévation de (*voir* Échauffement).
- Temps nécessaire à l'Action du compoundage, 285, 508.
- Temps périodique, 610, 625.
- Tension ou Pression électrique (*voir* Différence de Potentiel et Force électromotrice).
- Tesla [Nikola], Moteurs à champ tournant, 18, 694, 698, 700.
- sur les Alternateurs de haute fréquence, 623.
- Tétraphasés, Moteurs à courants, 697.
- Théorie du Bobinage d'induit, 291.
- algébrique de la Dynamo, 3, 4, 201.
- élémentaire de la Dynamo, 201, 603.
- géométrique de la Dynamo, 4, 236.
- physique de la Dynamo, 4, 21.
- de la Dynamo compound, 271.
- — — à courants alternatifs, 603.
- — — en dérivation, 229.
- — — en série, 228.
- — — Histoire de la, 18.
- — — Progrès récents de la, 19.
- des Moteurs, 18, 546, 561.
- des Transformateurs, 731, 743.
- du Transport de l'Énergie, 749.
- Thompson [Milton E.], sur l'Induction d'induit, 70, 459.
- Thompson [Silvanus P.] :
- Accidents des dynamos, 801.
- Thompson, Alternateurs à résistance magnétique variable, 11, 672.
- Circumflux, 423.
- Desideratum relatif au circuit magnétique, 167.
- Dimensions et Puissance des dynamos, 113.
- Excitation diacritique, 161.
- Formes d'Inducteurs, 168.
- Inducteur à bobine unique, 193, 196.
- Inverseur de marche pour Moteurs, 578.
- Isolement des Bâtis de dynamos, 802.
- Machine à disque de Faraday, 6.
- Mesure de la Perméabilité, 134.
- Méthode d'exploration aux Collecteurs, 66, 67.
- Observations expérimentales, 44, 83, 487, 596.
- Perméamètre, 134.
- Procédé pour éviter les Étincelles aux balais, 427.
- Régulation dynamométrique des Moteurs, 581.
- Régulation électrique des Moteurs, 582.
- Renforcement des Aimants par arrachements, 95.
- Représentation graphique des Lois des moteurs, 552 à 556.
- Représentation schématique, 68.
- sur l'expression de « Torque », 103.
- sur les machines Compound, 58.
- Théorie de la dynamo, 4.
- — — élémentaire des phénomènes magnétiques, 117.
- Thomson [Elihu], Alternateurs, 195, 645, 675.
- Bobine oblique de compensation, 89, 284.
- Moteurs à courants alternatifs, 693, 694.
- Régulateur automatique, 456, 768.
- — — dynamométrique, 776.

- Tompson [El.], sur un Indicateur de phases, 690.
- sur la Torsion du champ magnétique, 70.
 - sur les Transformateurs, 737, 743.
 - sur le Transport de l'Energie, 545.
- Thomson [James], Dynamomètre, 783.
- sur l'expression de « Torque », 103.
- Thomson [Joseph J.], sur les Joints magnétiques, 148.
- Thomson-Houston, Dynamo, 15, 448.
- — pour lampes à incandescence, 457.
 - — Collecteur, 451.
 - — Courbes d'induction, 70.
 - — Dérivations magnétiques, 178.
 - — Inducteurs, 194, 448.
 - — Induit, 449.
 - — Nouvel induit en anneau, 451.
 - Régulateur automatique, 456, 768.
 - Souffleur d'air, 457.
- Thomson [sir William], Balais tournants, 366.
- Dynamo à courants alternatifs, 16, 634, 655.
 - Dynamo-poulie, 463, 532.
 - Dynamo réductrice, 545.
 - Historique des Moteurs, 537.
 - Loi des électro-aimants semblables, 416.
 - Règles pour le bobinage des dynamos, 20, 229, 234.
 - Théorie de la dynamo unipolaire, 329.
 - sur l'Action gyrostatique, 375.
 - sur la Puissance motrice, 545.
 - sur le Transport de l'Energie, 545.
- Thurston, sur la dynamo Brush, 448.
- Thury, Dynamos, 195, 196, 317, 318, 519, 320, 822, 840, 848, 849.
- Toile métallique pour balais, 366.
- Torons, Conducteurs en, 345, 388, 474, 481, 652, 816, 848, 851.
- Torque et ses synonymes (voir Couple mécanique), 102.
- Torsion du Champ magnétique, 69, 70, 73, 76, 77, 78, 89, 98, 421, 572.
- Torsion des Conducteurs sur l'induit, 345, 474.
- Touches de Collecteurs (voir Collecteurs).
- Tourbillons magnétiques autour d'un conducteur, 24.
- Tournant, Moteurs à champ, 694.
- Tournants, Balais, 366.
- Champs, 701.
 - Courants, 701.
- Tours morts, 91, 219, 247.
- Tramways, Dynamos pour, 285, 508.
- Transformateurs à Courants alternatifs, 708, 712.
- à Commutation, 742.
 - à Courant continu, 741.
 - à Résistance magnétique variable, 857.
 - de Courants alternatifs en Courants continus, 744.
 - différés, 710.
 - en Coquille, 724.
 - instantanés, 710.
 - rehausseurs de potentiel, 758.
 - Construction des, 724.
 - Courbes de Rendement et de Perte de charge, 865.
 - Emploi dans une distribution, 708, 712.
 - Notes historiques sur les, 710.
 - Progrès dans la construction des, 736.
 - Théorie des, 713, 731, 743.
- Transformateurs, Types divers de :
- Cail-Helmer, 857.
 - Deprez et Carpentier, 711.
 - Gaulard et Gibbs, 711, 712.
 - Ferranti, 712, 728.
 - Kapp et Snell, 712, 724, 730.
 - Mordey, 712, 726.
 - Oerlikon, 863, 865, 866.
 - Patin, 871.
 - Société « L'Éclairage électrique », 860.
 - Swinburne, 712, 728, 730, 737.
 - Westinghouse, 712.

- Transformateurs Zipernowsky, 737.
 Transmission, Dynamomètres de, 783.
 — et Transport de l'Énergie, 555, 568, 746.
 Transversal, Électro-aimant, 13.
 Transversale, Aimantation, 72, 75, 86, 87.
 Travail effectué sur ou par un Conducteur dans un champ magnétique, 124, 539.
 Trépidations à éviter, 806.
 Triphases, Alternateurs, 676, 677.
 — Moteurs, 699.
 Trois Dynamomètres, Méthode des, 618.
 Trois Voltmètres, Méthode des, 618.
 Trois fils, Système de Distribution à, 742.
 Troisième balai, Réglage par, 51, 768.
 Trotter (voir Goolden).
 Trotter [A. P.], Régulateurs, 763, 771, 772.
 — sur les Dérivations magnétiques, 178.
 Trouvé, Moteur, 536, 602.
 Turbines, 665, 822, 840, 848, 851, 871.
 Tyndall, 537.
 « Tyne », Dynamo (voir Ernest Scott et C^{ie}).
 Types d'Inducteurs, 190.
 — d'Induits, 39, 291, 626.
- U
- Unipolaires, Dynamos, 6, 527.
 Unités du Board of Trade, 811, 813, 814.
 — de Magnétisme, 810.
 — de Puissance (Unité du Board of Trade), 815.
 Unités, Système d' — employé en électricité, 808.
 — C. G. S., 808.
 — pratiques de mesures, 811.
 Unwin, 783.
 Uppenborn, 290, 529.
 Upton [C.], 499.
 Usure des Collecteurs, 360, 801.
- V
- Van de Poele, Dynamo, 193.
 Van Malderen (voir Malderen).
 Variation du flux magnétique, 22, 26, 201, 527, 603, 713.
 Varley [Cromwell F.], 12, 208, 366, 740.
 Varley [Octavius et Frederick], 12, 52.
 Varley [S. Alfred], Dynamo unipolaire, 528.
 — Machine à électro-aimants, 13.
 — Revendication de l'Enroulement compound, 58.
 — sur les Aimants permanents, 12.
 — sur l'Auto-excitation, 12.
 — sur une Machine à double enroulement, 13.
 Vélocimètre, Compte-tours ou Compteur de tours, 786.
 Ventilateur, 339, 501, 826, 848.
 Ventilation du Collecteur, 361, 457.
 — des Inducteurs, 493, 849.
 Ventilation de l'Induit, 197, 333, 535, 339, 341, 428, 447, 473, 482, 488, 504, 660, 669, 823, 826, 848, 850.
 Vibrations à éviter, 341, 804, 806.
 Vibrations, Effet des — sur le magnétisme, 152, 159.
 « Victoria », Dynamo (voir Schuckert-Mordey).
 Vincent [C. W.] (voir Elphinstone et Vincent).
 Virtuels, Ampères et Volts (voir Efficaces).
 Viscosité du Magnétisme ou Hystérésis visqueuse, 84, 160.
 Vitesse angulaire, 103, 665, 786.
 — basse ou faible, Machines à, 250, 524.
 — critique, 49, 56, 57, 252, 272, 529, 586, 781.
 — — d'une dynamo, 252, 272, 529, 781.
 — — d'un moteur, 586.
 — périphérique ou tangentielle, 114, 344, 407, 408, 415, 481, 494, 664, 834.
 — Avantages d'une grande, 45, 545.
 — Relation entre la — et la Puissance, 104, 559.
 — Relation entre la — et le Refroidissement, 415.

- Vitesse, Relation entre la — et le Voltage, 22, 44, 218, 392, 610.
- Vivarez [Henry] (*voir* Lazare Weiller).
- Voice, Dynamo unipolaire, 529.
- Volt (Unité de Force électromotrice), 204, 813.
- Volt-Ampère (*voir* Watt).
- Volts aux Bornes, 219, 220, 242.
— efficaces, 616, 617, 812, 813.
- Volume, sa Relation avec la Puissance, 426, 594, 640.
- Von Ettingshausen (*voir* Ettingshausen).
- Von Hefner-Alteneck (*voir* Hefner-Alteneck).
- Von Siemens (*voir* Siemens).
- Von Waltenhofen (*voir* Waltenhofen).
- Vulcanisée, Emploi de la Fibre — (*voir* Substances isolantes).
- W
- Waleno, sur la Réversibilité, 18.
- Wallace-Farmer, Dynamo, 97, 530.
- Walmsley [D^r], Machine Gramme modifiée, 745.
- Waltenhofen [A. von], Recherches théoriques, 19.
— sur la Loi de l'électro-aimant, 160.
- Warburg, sur les Cycles d'aimantation, 157.
- Waterhouse, Régulateur, 465, 768.
- Watkins, Machine, 8.
- Watson et Mordey (*voir* Mordey).
- Watt (Unité de Puissance électrique), 104, 225, 240, 413, 815.
- Watts apparents, 622, 731.
— dissipés ou perdus, 158, 392, 402, 412, 413, 512, 669, 670, 680, 730, 788.
- Webber, sur les Transformateurs à courant continu, 741.
- Weber [H. F.], Épreuves d'un Transport d'énergie, 752, 759.
- Weber [Wilhelm], 527.
- Weber, Théories de, 18, 163, 607.
- Weiller [Lazare] et Vivarez [Henry], 817.
- Wenström, Dynamo, 195, 520, 791.
- Wenström, Mode de Bobinage des Induits, 332, 520.
- Westinghouse, Alternateur, 195, 629, 643.
— Transformateur, 726.
- Weston, Bobinage en circuits indépendants, 304.
— Dynamo, 15, 41, 333, 342, 343, 522.
— Inducteurs de la dynamo, 192.
- Wetzler (*voir* Martin et Wetzler).
- Weymouth, sur le Bobinage en tambour, 292.
- Wheatstone [sir Charles], Dynamo en dérivation, 13.
— Moteurs, 17, 536, 573.
— Premiers perfectionnements, 9, 11.
— Principe de l'Auto-excitation, 9, 13.
- Wheeler, Moteurs, 602.
- Wheeler [S. S.], sur le Couplage des Machines, 794.
- Wiedemann, 162.
- Wilde, Dynamos, 11, 12, 16, 42, 47, 52, 190, 191, 195, 196, 198, 522, 632.
— Recherches sur le Couplage des dynamos, 680.
- Wilke [A.], sur les Dynamos de Berlin, 497.
- Willans, Couplage magnétique à griffes, 384.
— Moteurs à vapeur à grande vitesse pour stations centrales, 508, 510, 512, 655, 791, 845.
— Régulateur électrique, 269, 774.
- Willesden, Papier (*voir* Isolants).
- Willson, Dynamo, 364.
- Winkler, Dynamo, 52.
- Wodicka, Bobinage d'Induits, 306.
- Wood, Dynamo à haut potentiel, 460.
— — Gramme, 467.
— Régulateur pour machine à haut potentiel, 769.
- Woolrich, Dynamo pour Galvanoplastie, 9, 522.
- Worms de Romilly, 14.
- Wright et Kapp, 276.

Wynne, Brevets, 484.

Z

Zeuner, Diagramme de, 606.

Zickler [C.], sur l'Enroulement compound, 290.

— Recherches, 736.

Zigzag, Bobinage en — (*voir* Bobinage ondulé).

Zinc, Coût du — comme combustible pour puissance motrice, 537.

Zinc, son Emploi comme Carcasse de Bobine, 651.

— Socle de machine en, 478, 400, 504, 506.

Zipernowsky, Alternateurs, 17, 630, 650, 874.

— Dynamos, 495, 495.

— Méthode de Compoundage, 59, 737, 740.

— Moteurs à courants alternatifs, 872.

— Transformateurs, 724.

CATALOGUE DE LIVRES
SUR
L'ÉLECTRICITÉ ET LES MACHINES

PUBLIÉS PAR
LA LIBRAIRIE POLYTECHNIQUE, BAUDRY ET C^{ie}
15, RUE DES SAINTS-PÈRES, A PARIS

Le catalogue complet est envoyé franco sur demande.

ÉLECTRICITÉ

Traité d'électricité et de magnétisme.

Traité d'électricité et de magnétisme. Théorie et applications, instruments et méthodes de mesure électrique. Cours professé à l'école supérieure de télégraphie, par A. VASCHY, ingénieur des télégraphes, examinateur d'entrée à l'école Polytechnique. 2 volumes grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte 25 fr.

Traité pratique d'électricité.

Traité pratique d'électricité à l'usage des ingénieurs et constructeurs. Théorie mécanique du magnétisme et de l'électricité, mesures électriques, piles, accumulateurs et machines électrostatiques, machines dynamo-électriques génératrices, transport, distribution et transformation de l'énergie électrique, utilisation de l'énergie électrique, par FÉLIX LUCAS, ingénieur en chef des ponts et chaussées, administrateur des chemins de fer de l'Etat. 1 volume grand in-8°, avec 278 figures dans le texte. 45 fr.

Électricité industrielle.

Traité pratique d'électricité industrielle. Unités et mesures; piles et machines électriques; éclairage électrique; transmission électrique de la force; galvanoplastie et électro-metallurgie; téléphonie, par E. CADAT et L. DUBOST. 4^e édition. 1 volume grand in-8°, avec 257 gravures dans le texte, relié. 16 fr. 50

Manuel pratique de l'électricien.

Manuel pratique de l'électricien. Guide pour le montage et l'entretien des installations électriques, par E. CADAT. 1 volume in-12, avec de nombreuses figures dans le texte, relié. 7 fr. 50

Électricité industrielle.

Électricité industrielle. Production et applications. Induction électromagnétique : méthodes de mesure ; étude théorique et expérimentale des machines électriques ; piles ; canalisation électrique ; application à l'électrolyse, à la métallurgie, au transport de la force et à la production de la lumière ; distribution de l'énergie électrique. Cours professé à l'École centrale des arts et manufactures, par D. MONNIER, ingénieur. 1 volume grand in-8°, avec 388 figures dans le texte. 20 fr.

L'Année électrique.

L'Année électrique, ou Exposé annuel des travaux scientifiques, des inventions et des principales applications de l'électricité à l'industrie et aux arts, par PH. DELAHAYE. 1 volume in-12 par année : Prix de chaque volume 3 fr. 50
La 1^{re} année a paru en 1885.

Pile électrique.

Traité élémentaire de la pile électrique, par ALFRED NIAUDET. 3^e édition revue par HIPPOLYTE FONTAINE et suivie d'une notice sur les accumulateurs, par E. HOSPITALIER. 1 volume grand in-8°, avec gravures dans le texte 7 fr. 50

Électrolyse.

Électrolyse ; renseignements pratiques sur le nickelage, le cuivrage, la dorure, l'argenture, l'affinage des métaux et le traitement des minerais au moyen de l'électricité, par HIPPOLYTE FONTAINE. 2^e édition. 1 volume grand in-8°, avec gravures dans le texte, relié. 15 fr.

Électrolyse.

Étude sur le raffinage électrolytique du cuivre noir, par HUGON. 1 brochure grand in-8° 1 fr. 50

Machines dynamo-électriques.

Traité théorique et pratique des machines dynamo-électriques, par R.-V. PICOU, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume grand in-8°, avec 198 figures dans le texte. 12 fr. 50

Les Moteurs électriques à champ magnétique tournant.

Les moteurs électriques à champ magnétique tournant, par R.-V. PICOU. *Supplément au Traité des machines dynamo-électriques du même auteur.* 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte. 1 fr. 50

Machines dynamo-électriques.

La machine dynamo-électrique, par FRÉLICH, traduit de l'allemand par E. BOISTEL. 1 volume grand in-8°, avec 62 figures dans le texte . . . 10 fr.

Éclairage à l'électricité.

Éclairage à l'électricité. Renseignements pratiques, par HIPPOLYTE FONTAINE. 3^e édition entièrement refondue. 1 volume grand in-8°, avec 326 figures dans le texte 16 fr.

Éclairage électrique.

Éclairage électrique de l'Exposition universelle de 1889. Monographie des travaux exécutés par le syndicat international des électriciens, par HIPPOLYTE FONTAINE. 1 volume in-4°, avec 29 planches tirées à part et 32 gravures dans le texte, relié. 25 fr.

Éclairage électrique.

Manuel pratique d'éclairage électrique pour installations particulières, maisons d'habitation, usines, salles de réunions, etc., par EM. CAHEN, ingénieurs des ateliers de construction des manufactures de l'Etat. 1 volume in-12, avec de nombreuses figures dans le texte. Prix relié. . . 7 fr. 50

Éclairage électrique.

N. B. — Les mémoires ci-dessous ont paru dans le *Portefeuille des machines* et se vendent, avec la livraison qui les renferme, au prix de 2 fr. la livraison.

Locomotive électrique de Gramme destinée à l'éclairage à distance pour la défense des places, avec 1 planche. Livraison de juillet 1878. . . 2 fr.

Éclairage électrique de la Gran Plaza de Toros du bois de Boulogne, à Paris, avec 1 planche. Livraison de mars 1891. 2 fr.

Usine municipale d'électricité des Halles centrales, à Paris, avec 3 planches. Livraisons de juillet et d'août 1891. 4 fr.

Éclairage électrique de Saint-Pancras, station de Regent's Park, à Londres, avec 1 planche. Livraison de septembre 1892. 2 fr.

Éclairage électrique.

Etude pratique sur l'éclairage électrique des gares de chemins de fer, ports, usines, chantiers et établissements industriels par GEORGES DUMONT, avec la collaboration de GUSTAVE BAIGNIÈRES. 1 volume grand in-8°, avec 2 planches 5 fr.

Électricité.

Manuel élémentaire d'électricité, par FLEEMING JENKIN, professeur à l'Université d'Edimbourg; traduit de l'anglais par N. de TÉNESCO. 1 volume in-12, avec 32 gravures. 2 fr.

Les courants alternatifs d'électricité.

Les courants alternatifs d'électricité, par T.-H. BLAKESLEY, professeur au Royal Naval College de Greenwich, traduit de la 3^e édition anglaise et augmenté d'un appendice, par W.-C. RECHNIEWSKI. 1 volume in-12, avec figures dans le texte, relié 7 fr. 50

Problèmes sur l'électricité.

Problèmes sur l'électricité. Recueil gradué comprenant toutes les parties de la science électrique, par le D^r ROBERT WEBER, professeur à l'Académie de Neuchâtel. 2^e édition. 1 volume in-12, avec figures dans le texte. 6 fr.

Chemin de fer électrique.

Chemin de fer électrique des boulevards, à Paris, par CHRÉTIEN. 1 brochure in-4°, avec gravures. 2 fr.

Traction électrique.

Étude sur la traction électrique des trains de chemin de fer, par H. BONNEAU, ingénieur des ponts et chaussées, sous-chef de l'exploitation des chemins de fer P.-L.-M., et E. DESROZIERS, ingénieur civil des mines. 1 brochure grand in-8°, avec figures dans le texte. 1 fr.

Transmissions électriques.

Transmissions électriques, renseignements pratiques, par H. FONTAINE. 1 volume grand in-8°, avec gravures. 3 fr.

L'Accumulateur voltaïque.

Traité élémentaire de l'accumulateur voltaïque, par ÉMILE REYNIER. 1 volume grand in-8°, avec 62 gravures dans le texte et un portrait de M. Gaston Planté. 6 fr.

Les Voltamètres-régulateurs.

Les voltamètres-régulateurs zinc-plomb. Renseignements pratiques sur l'emploi de ces appareils, leur combinaison avec les dynamos et les circuits d'éclairage. par ÉMILE REYNIER. 1 brochure in-8°, avec gravures et schémas d'installation. 1 fr. 25

Le Téléphone.

Le Téléphone, par WILLIAM-HENRI PREECE, électricien en chef du *British Post Office*, et JULIUS MAIER, docteur ès sciences physiques. 1 volume grand in-8°, avec 290 gravures dans le texte. 15 fr.

Télégraphie sous-marine.

Traité de télégraphie sous-marine. — Historique. — Composition et fabrication des câbles télégraphiques. — Immersion et réparation des câbles sous-marins. — Essais électriques. — Recherche des défauts. — Transmission des signaux. — Exploitation des lignes sous-marines, par WUNSCHENDORFF, ingénieur des télégraphes. 1 volume grand in-8°, avec 469 gravures dans le texte. 40 fr.

Tirage des mines par l'électricité.

Le tirage des mines par l'électricité, par PAUL-F. CHALON, ingénieur des arts et manufactures. 1 volume in-18 jésus, avec 90 figures dans le texte. Prix, relié. 7 fr. 50

MÉCANIQUE ET MACHINES

Portefeuille des machines.

Portefeuille économique des machines, de l'outillage et du matériel, relatifs à la construction, à l'industrie, aux chemins de fer, aux routes, aux mines, à la navigation, à l'électricité, etc.; contenant un choix des objets les plus intéressants des expositions industrielles; fondé par OPPEN-

BAUDRY ET C^{ie}, ÉDITEURS, 15, RUE DES SAINTS-PÈRES, PARIS 925

MANN. 12 livraisons par an formant un beau volume de 50 à 60 planches et 200 colonnes de texte. Abonnements : Paris, 15 fr. — Départements et Belgique, 18 fr. — Union postale. 20 fr.
Prix de l'année parue, reliée 20 fr.
La 3^e série a commencé à paraître en 1876.
Table des matières des années 1876 à 1887. 0 fr. 50

Aide-mémoire de l'ingénieur.

Aide-mémoire de l'ingénieur. Mathématiques, mécanique, physique et chimie, résistance des matériaux, statique des constructions, éléments des machines, machines motrices, constructions navales, chemins de fer, machines-outils, machines élévatoires, technologie, métallurgie du fer, constructions civiles, législation industrielle. Edition française du Manuel de la Société « Hütte », par PHILIPPE HUGUENIN. 1 beau vol. contenant plus de 1 200 pages, avec 500 figures dans le texte, solidement relié en maroquin . 15 fr.

Mécanique appliquée.

Cours élémentaire de mécanique appliquée, à l'usage des écoles primaires supérieures, des écoles professionnelles, des écoles d'apprentissage, des écoles industrielles, des cours techniques et des ouvriers, par BOCQUET, ingénieur, directeur de l'École Diderot. 2^e édition. 1 volume in-12, relié. 5 fr.

Physique.

Physique, par GABRIEL, ingénieur en chef des ponts et chaussées, professeur de physique à la Faculté de médecine et à l'École nationale des ponts et chaussées. 2 volumes grand in-8^o, avec de nombreuses gravures dans le texte 20 fr.

Chaudières à vapeur.

Traité pratique des chaudières à vapeur employées dans les manufactures, par DENFER, chef de travaux graphiques à l'École centrale des arts et manufactures. 1 volume grand in-4^o, accompagné de 81 planches cotées et en couleur. 50 fr.

Manuel du chauffeur-mécanicien.

Manuel du chauffeur-mécanicien et du propriétaire d'appareils à vapeur, par HENRI MATHIEU, garde-mines, inspecteur des appareils à vapeur de la Seine, professeur au syndicat général des chauffeurs-mécaniciens. 1 volume grand in-8^o, avec 409 figures dans le texte. 16 fr.

Traité de la machine à vapeur.

Traité de la machine à vapeur. Description des principaux types et théorie; étude, constitution, conduite et applications, par ROBERT H. THURSTON, directeur du « Sibley College » Cornell University, ancien président de « l'American Society of Mechanical Engineers », traduit de l'anglais et annoté par MAURICE DEMOULIN. 2 volumes grand in-8^o, avec de nombreuses figures dans le texte. Relié. 60 fr.

Essais de machines et chaudières à vapeur.

Manuel pratique des essais de machines et chaudières à vapeur, par ROBERT H. THURSTON, directeur du « Sibley College » Cornell University,

ancien président de « l'American Society of Mechanical Engineers », ancien ingénieur de la marine aux États-Unis, traduit de l'anglais par AUGUSTE ROUSSEL, ancien élève de l'École polytechnique et de l'École nationale supérieure des mines. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses figures dans le texte. Relié. 25 fr.

Machines à vapeur.

Traité théorique et pratique des machines à vapeur au point de vue de la distribution. — Méthode générale des gabarits, permettant d'établir des épures approchées ou exactes de tous les types de machines. — Étude méthodique des principales distributions au double point de vue de leur fonctionnement et de leur construction, par COSTE et MANIQUET. 2^e édition. 1 volume grand in-8° contenant 53 figures intercalées dans le texte et 1 atlas grand in-4° de 46 planches de dessins exactement réduits à l'échelle et cotés. 25 fr.

Moteurs à gaz.

Traité théorique et pratique des moteurs à gaz ; gaz de houille, gaz pauvres, air carburé (pétroles) et de leurs applications diverses à l'industrie, la locomotion et la navigation, contenant des détails sur l'installation et l'entretien des moteurs à gaz et suivi d'un tableau résumé de l'industrie du pétrole, par GUSTAVE CHAUVEAU, ingénieur civil, lauréat de la Société technique de l'industrie du gaz en France. 1 volume grand in-8°, avec de nombreuses gravures dans le texte 15 fr.