

CHEMINS DE FER

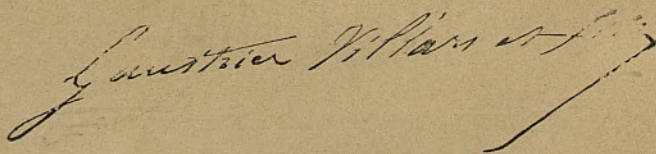
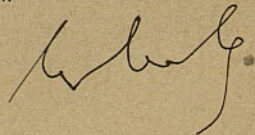
Journal

MATÉRIEL ROULANT

RÉSISTANCE DES TRAINS

TRACTION

Tous les exemplaires de **Résistance des trains. — Traction** devront être revêtus de la signature du Directeur de l'Encyclopédie Industrielle et de la griffe des libraires.



ENCYCLOPÉDIE INDUSTRIELLE

Fondée par M.-C. LECHALAS, Insp^r géⁿal des Ponts et Chaussées en retraite

CHEMINS DE FER

MATÉRIEL ROULANT

RÉSISTANCE DES TRAINS
TRACTION

PAR

E. DEHARME

Ingénieur principal du Service central
de la Compagnie du Midi,
Professeur du cours de Chemins de fer
à l'École centrale des Arts et Manufactures.

A. PULIN

Ingénieur des Arts et Manufactures,
Ingénieur Inspecteur principal de l'Atelier
central du Chemin de fer du Nord.



PARIS

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES
DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES, ETC.
55, Quai des Grands-Augustins, 55

R. 34181

ERRATA

- Page 3. 8^e ligne, en remontant, au lieu de 1^m,55, lire 1^m,45.
- 57. 2^e ligne, au lieu de $\frac{\sqrt{e^2 + 1^2}}{4}$, lire : $\sqrt{\frac{e^2 + 1^2}{4}}$.
- 106. 3^e ligne, en remontant, à la suite de *Annales des Ponts et Chaussées*, ajouter 1886.
- 113. Supprimer les 13^e, 14^e et 15^e ligne.
- 179. 11^e ligne, après les mots, *coefficient de frottement*, ajouter et par q la pression normale entre les surfaces en contact.
- 189. 5^e ligne, en remontant, au lieu de $\beta = 45^\circ$, lire $\alpha = 45^\circ$.
- » 6^e ligne, en remontant, au lieu de $\sin \beta = \cos \beta$, lire $\sin \alpha = \cos \alpha$.
- 190. 3^e ligne, au lieu de $\cos \beta = 0$, lire $\cos \alpha = 0$.
- 265. 15^e ligne, au lieu de *qui est la conséquence des condensations*, lire *dont la principale cause réside dans les condensations*.
- 275. 14^e ligne, au lieu de 74, lire 74 bis.
- 320. 4^e ligne, au lieu de *condensateur*, lire *condenseur*.
- 354. 7^e ligne, en remontant, dans la formule [4], au lieu de $\frac{r^2 + h}{r H}$, lire : $\frac{r^2 + H}{r H}$.
- 356. 2^e ligne, en remontant :

$$\text{au lieu de } \left(2 - \frac{r}{p + 1} - \frac{1}{r} \left(1 + \frac{1}{p} \right) \right),$$

$$\text{lire : } \left(2 - \frac{r}{p + 1} - \frac{1}{r} \right) \left(1 + \frac{1}{p} \right)$$

AVANT-PROPOS.

Cet ouvrage fait suite à celui qui a été publié par M. E. Deharme, dans *l'Encyclopédie des travaux publics*, sous le titre : *Chemins de fer ; Superstructure*¹. C'est dire qu'il est rédigé d'après le programme du Cours de chemins de fer de l'Ecole centrale des Arts et Manufactures.

Deux questions fondamentales, concernant le matériel roulant, sont traitées dans ce nouvel ouvrage. La première, la *Résistance des trains*, a été l'objet d'études et de recherches expérimentales très importantes, et les documents abondent sur ce sujet ; mais on ne peut prétendre en former un assemblage méthodique, tellement la question est complexe et peu déterminée. Nous nous sommes donc attachés à réunir, en les discutant, les données que nous avons pu recueillir dans les diverses publications techniques.

La seconde question, celle de la *Traction*, a été examinée dans sa généralité, comme préparation à des études plus complètes sur la locomotive.

Nous avons l'espoir que ce livre sera utile aux élèves ingénieurs et qu'il pourra être consulté avec profit dans les bureaux d'études.

Nous exprimons ici notre gratitude à M. Desdouits, Ingénieur en chef adjoint des chemins de fer de l'Etat, qui, en nous livrant de nombreux documents sur la

1. Baudry et Cie, libraires éditeurs.

résistance des trains, nous a prêté un concours efficace.

Enfin, pour compléter cet aperçu préliminaire sur le sujet que nous allons aborder, nous devons signaler les principales sources auxquelles nous avons puisé. Ce sont : La *Revue Générale des chemins de fer* ; l'ouvrage classique de *Couche : Voie, matériel roulant et exploitation technique des chemins de fer* ; les *Mémoires et Comptes rendus des travaux* de la *Société des Ingénieurs civils de France* ; enfin les publications du *Congrès international des Chemins de fer*.

INTRODUCTION

§ 1. — CARACTÈRES GÉNÉRAUX DU MATÉRIEL ROULANT DES CHEMINS DE FER.

L'établissement du matériel roulant, employé sur les voies ferrées, doit satisfaire à des conditions essentielles qui elles-mêmes découlent de ce double caractère de l'exploitation des chemins de fer : régularité du *service public*, et économie de l'*entreprise industrielle*. La considération dominante est celle de la *sécurité* ; elle doit présider à l'organisation de tous les services. Autour de cette condition première viennent se grouper celles qui, dans l'ordre technique ou dans l'ordre administratif, régissent la construction et l'emploi du matériel de transport et du moteur appliqué à la traction.

Les véhicules doivent présenter des dispositions simples, et leur solidité doit se concilier avec l'emploi économique de la matière ; il faut que leurs éléments constitutifs se prêtent à une surveillance facile, condition essentielle de sécurité ; que leurs attelages permettent la formation et la décomposition rapide des trains ; que les installations des voitures soient confortables. La recherche du bien-être des voyageurs sera d'autant plus désirable que les trajets devront être plus longs et les vitesses plus grandes.

La solidité du matériel n'est pas seulement impor-

tante au point de vue de la sécurité immédiate, elle a encore l'avantage d'assurer aux véhicules un service continu de longue durée, et de rendre aussi peu fréquente que possible leur immobilisation dans les ateliers de réparation.

Les dispositions des voitures et wagons, comme celles des machines, doivent aussi être étudiées en vue de la stabilité des véhicules sur la voie et de la réduction au minimum des résistances qu'ils opposent à la marche. Il s'en suit que, pour réaliser les transports avec le moins de dépense possible, il convient de ne donner au *poids mort* des véhicules remorqués, c'est-à-dire au poids des véhicules vides, que l'importance strictement nécessaire pour satisfaire aux conditions déjà énoncées. En effet, parmi les résistances multiples que nous aurons à examiner, il en est, et des plus importantes, qui sont proportionnelles au poids total ; le poids mort est donc à considérer, en tenant compte bien entendu de la contenance de chaque véhicule en unités de trafic (transport d'un voyageur ou d'une tonne de marchandises), dont l'ensemble forme le *poids utile*.

Les considérations qui précèdent ne concernent pas seulement les véhicules remorqués ; elles s'appliquent également et avec une rigueur particulière à la *locomotive*, qui, par son double caractère de lourd véhicule et de moteur, exige une construction robuste et très soignée.

L'adaptation de ce moteur à la voie ferrée qui le porte est parfaite, bien que l'idée première de la locomotion par la vapeur ait eu pour objectif les voitures sur routes : on connaît la célèbre tentative de Cugnot, dont le fardier à vapeur, inventé en 1769, figure au

Conservatoire des Arts et Métiers. A cette époque la voie de fer était en usage depuis un siècle dans les mines et les carrières, où elle procurait une réduction importante de la résistance au roulement proprement dit, et permettait de faire traîner des charges élevées par les moteurs animés. Lorsqu'on eut songé à utiliser la force de la vapeur pour faire mouvoir les véhicules, et que les essais entrepris sur les routes eurent montré la possibilité de résoudre le problème, il devenait tout naturel de chercher à employer sur la voie de fer le moteur mécanique dont l'effet utile sur le sol avait été à peu près nul, et le génie des inventeurs s'exerça à en tirer parti de cette façon, en le perfectionnant. Mais il manquait aux nouvelles machines la qualité qui devait achever de les rendre comparables aux moteurs animés : le *souffle*. Cette qualité ne tarda pas à leur être donnée.

Tandis que, en Angleterre, *Trewithick* et *Stephenson* s'attachaient à rendre plus parfaite la partie mécanique de la machine, et à augmenter la production de vapeur des chaudières alors en usage, *Séguin*, en France, inventait, par un trait de génie, un générateur approprié aux besoins nouveaux. S'il est vrai que, lorsque la locomotive et le rail se sont rencontrés, l'efficacité inespérée de *l'adhérence* ait contribué puissamment à créer l'industrie des chemins de fer, on peut dire que la découverte de la chaudière tubulaire a fait de la locomotive une merveille, qui s'est révélée en 1829 par le triomphe de la *Fusée* de *George Stephenson*, au mémorable concours de Rainhil, sur la ligne de Manchester à Liverpool.

A partir de cette date, les perfectionnements de la locomotive se produisirent avec une grande rapidité,

et les chemins de fer prirent un essor considérable. Pour parvenir à ce résultat, il n'a pas été nécessaire de faire subir à la machine de Stephenson de profondes modifications ; la locomotive de nos jours en diffère sans doute beaucoup, mais les changements successivement réalisés, changements qui ont eu principalement pour objet un accroissement continu de la puissance n'ont guère porté que sur les détails de la construction et sur l'amélioration du moteur proprement dit. Les locomotives ont profité des progrès des machines motrices employées dans les autres industries ; par contre, elles ont été dans certains cas les premières à recevoir d'importants perfectionnements qui se sont propagés ensuite parmi les autres moteurs ; l'invention de la coulisse, pour le renversement de la marche et la variabilité de la détente, en sont des exemples remarquables.

Les transports par grandes masses, essentiellement économiques par l'abaissement qu'ils procurent sur les frais généraux d'exploitation, et qui, avec les vitesses plus élevées, ont constitué un avantage considérable à l'actif des chemins de fer, ont donc été la conséquence de ces deux progrès simultanés : la diminution de la résistance des véhicules et l'augmentation de puissance procurée par la locomotive qui, dès son origine, laissait bien loin derrière elle les moteurs animés utilisés sur les voies de fer. Un fait important à noter est que les perfectionnements de la locomotive ont été obtenus en conservant à ce moteur sa simplicité native, qualité précieuse pour la conduite de la machine et la régularité dans le service. Il faut entendre par *dispositions simples* celles qui n'exigent pas de fréquentes réparations et qui assurent la certitude du fonctionnement régulier. Il est à remarquer que les appareils

inventés pour augmenter le rendement de ce moteur ont toujours été délaissés lorsqu'ils entraînaient une complication réelle ou lorsque leur fonctionnement était incertain.

Sur les locomotives comme sur les véhicules de transport, on doit s'attacher à réduire le *poids mort*, et pour définir ce poids en termes généraux, il suffira de dire qu'il comprend tout ce qui n'est pas nécessaire pour la réalisation de la puissance du moteur dont le type est, comme première condition, déterminé par la nature de son service.

§ 2. — SÉCURITÉ ET ÉCONOMIE.

La construction à la fois robuste et économique du matériel roulant est obtenue par les soins apportés dans les études, le choix des matériaux, le contrôle de l'exécution. Il faut remarquer ici que pour la construction des voitures à voyageurs la considération d'économie se trouve reléguée au second plan, à cause des installations de plus en plus confortables sans lesquelles il n'y aurait pas de véritable progrès ; de là, augmentation inévitable du poids par voyageur transporté.

En dehors des soins de la construction, certaines conditions essentielles sont à remplir pour la sécurité. Ce sont d'abord les visites minutieuses auxquelles les locomotives et les véhicules des trains sont constamment soumis pendant leur service, et les réparations périodiques nécessaires pour compenser l'usure. Le bon état d'entretien, par cela même qu'il permet d'éviter autant que possible les avaries en cours de route et les

perturbations de service qui en sont la conséquence, est une garantie pour l'observation des horaires des trains et pour la sécurité de l'exploitation.

Mais une autre condition de première importance s'impose : celle de pouvoir à volonté modérer la vitesse par l'action des freins. Il ne suffit pas en effet de disposer d'un matériel bien construit, d'une voie lourde et résistante et de signaux faisant connaître au mécanicien si la voie est libre ou non ; il faut encore, tant pour l'observation des itinéraires que pour la sécurité, pouvoir amortir la vitesse à un moment quelconque, et l'annuler au besoin dans un temps très court. Comme c'est une question de prompt réduction de la force vive du train, les moyens mis à la disposition des agents doivent être proportionnés à sa masse et à sa vitesse : la sécurité disparaîtrait si le mécanicien n'était pas, en toutes circonstances, *maître de son train*.

On a réalisé, dans l'exploitation des chemins de fer, un progrès très important par l'application des *freins continus*, qui ont fait leur apparition en France en 1878¹. Avec ce système, dont le fonctionnement repose, en général, sur l'utilisation de l'air comprimé, ou du vide relatif, la manœuvre d'un levier, placé à la main du mécanicien, suffit pour serrer les freins portés par chaque véhicule et dont l'action se propage rapidement de la machine à la queue du train. En raison de la promptitude du ralentissement, on a même dû, à l'origine de l'application des freins continus,

1. L'invention première des freins à air comprimé remonte plus haut ; elle appartient à M. *Martin*, ingénieur des arts et manufactures, qui vient de mourir à Rouen, sa ville natale. L'application en a été réalisée d'abord en Angleterre par *Westinghouse*, qui reconnaissait les titres de Martin et lui allouait une pension.

prendre des dispositions spéciales pour éviter aux voyageurs des secousses désagréables.

On a essayé, il y a bien longtemps, l'emploi des freins électriques ; le système des freins continus à air comprimé ou à vide a prévalu. Mais si l'électricité n'a pas donné toute satisfaction dans les applications de ce genre, par contre cet agent est utilisé de plus en plus largement dans d'autres circonstances pour la sécurité de l'exploitation ; il est d'un secours précieux pour la manœuvre des signaux à distance, pour les avertissements spéciaux donnés aux mécaniciens, enfin pour la manœuvre des signaux d'appel placés dans les voitures, à la disposition des voyageurs.

Aujourd'hui l'électricité, employée déjà comme force motrice pour la propulsion sur quelques tramways, entreprend une nouvelle conquête, celle de la traction sur les grandes lignes de chemins de fer, dans des conditions qui à certains points de vue seraient particulièrement avantageuses. C'est là un problème redoutable, en raison du grand développement de puissance nécessaire pour les besoins de l'exploitation telle qu'elle existe aujourd'hui sur les grandes lignes.

L'électricité a produit de telles merveilles, pendant la seconde moitié de ce siècle, que l'on n'est pas autorisé à mettre en doute la réalisation de ce nouveau progrès dans un temps plus ou moins éloigné ; mais la solution, parfois annoncée comme très prochaine, pourra se faire attendre longtemps encore, à moins qu'il ne s'agisse d'applications limitées à des cas particuliers ; cela tient à ce que, dans l'état actuel de la science, la traction des grandes masses au moyen de l'électricité serait notablement plus coûteuse que par l'emploi de la vapeur.

L'économie, tel est en effet le principe qui, après la sécurité, domine les grandes questions d'exploitation dans les chemins de fer. La traction des trains exige une dépense élevée ; pour la réduire au minimum, les deux moyens sans cesse recherchés sont la diminution des résistances à vaincre et l'augmentation du rendement du moteur.

Parmi les résistances il en est qui sont *fixes*, et pour celles-ci les perfectionnements réalisés dans la construction du matériel roulant ont abouti à une solution très satisfaisante du problème. D'autres tiennent soit au tracé de la ligne, en profil et en plan, soit aux conditions atmosphériques.

Quant au moteur, il a été également l'objet des études les plus sérieuses. L'amélioration du rendement des locomotives au point de vue thermique a été, dans la grande industrie des chemins de fer, une des œuvres les plus fécondes en résultats heureux. Il est à noter en effet, comme l'indiquent les résultats obtenus durant ces dernières années, que le développement de la puissance des locomotives, nécessaire pour les progrès de la traction, n'a pas été défavorable au principe d'économie, et que, tout au contraire, ces deux conditions désirables se sont trouvées naturellement associées.

§ 3. — INFLUENCE DE LA VOIE SUR LES RÉSISTANCES.

Les résistances à vaincre pour la progression d'un train de chemin de fer sont de trois sortes :

1° Celles qui s'exercent sur une voie rectiligne et horizontale par un temps calme : nous les avons appelées résistances *fixes*.

2° Celles qui proviennent des déclivités et des courbes de la voie.

3° Celles qui sont dues à l'agitation de l'atmosphère et à l'humidité des rails.

Les premières de ces résistances sont les mieux connues. Celles indiquées en troisième lieu sont essentiellement variables, capricieuses et non susceptibles d'évaluation précise.

Les résistances dues spécialement à la voie, auxquelles nous allons nous arrêter un peu, ont sur les résultats de l'Exploitation une influence particulière, dont il est essentiel de tenir compte dans l'étude du tracé d'un chemin de fer.

L'effort de traction nécessaire pour remorquer les véhicules sur une route ordinaire est très variable, car il suffit d'un effort de 20 kg. pour traîner une tonne sur un bon pavage korizontal, tandis que, sur une bonne chaussée empierreée, il faut de 25 à 30 ou 40 kilogrammes suivant l'état atmosphérique du moment et des jours précédents. Sur une chaussée horizontale, médiocre ou mauvaise, cet effort peut atteindre 60 ou 80 et même 100 kilogrammes. Si la voie est en rampe, le second élément de l'effort de traction, la *montée du poids*, ne diffère aucunement, moteur à part, sur une route ou sur une voie ferrée. Pour une *rampe* de un centième, il faudra ajouter à l'effort correspondant au premier élément de la résistance la valeur de la composante de la gravité dirigée parallèlement à l'inclinaison, soit 10 kilogrammes par tonne remorquée ; pour une rampe de deux centièmes, il faudra un supplément d'effort égal à 20 kilogrammes par tonne, et ainsi de suite.

Lorsque l'art d'entretenir les routes était dans l'en-

fance, alors que le premier élément de la résistance atteignait souvent 80 ou 100 kilogrammes par tonne pendant l'hiver, on ne pouvait attacher une grande importance à 20 ou 30 kilogrammes afférents à la montée d'une tonne sur les rampes de deux ou trois centimètres par mètre, et l'on acceptait même couramment des inclinaisons supérieures à 5 ; parfois même on dépassait 8 centièmes. Mais à mesure qu'on a pu réduire les résistances dues au roulement, l'élévation du poids a acquis une importance relative de plus en plus grande, et, comme conséquence naturelle de cet état de choses, on a cherché à ramener les déclivités des routes à des inclinaisons réduites. On a même cru que les sacrifices nécessaires pour la rectification des fortes rampes pourraient se justifier partout. Or, c'était souvent une erreur, car on cite bon nombre de vieilles routes à déclivités de 0,07, et même de 0,09, que le public s'obstine à suivre bien qu'on ait établi, à côté, des rectifications à 0,03 de rampe maximum.

On s'est dit d'abord que le public avait tort ; mais, en creusant un peu plus la question, on a fini par reconnaître qu'il avait parfaitement raison. Voici comment : la nouvelle route comporte des contournements très longs si l'on franchit les sommets à la même altitude. En supposant la chaussée dans un état moyen, exigeant un effort de 45 kilogrammes par tonne sur une voie horizontale, il faut, pour la rampe nouvelle de 0,03, exercer un effort de $45 + 30 = 75$ kg. par tonne, sur un parcours beaucoup plus long que celui qui exige l'effort de $45 + 70 = 115$ kg. ou $45 + 90 = 135$ kg. suivant que l'ancien tracé comporte des déclivités de 0,07 ou de 0,09. Lors donc que l'on s'élève autant avec la rampe de 0,03 qu'avec celle

de 0,09, la seconde a une longueur triple de la première, tandis que l'effort 135 kg. n'est pas même le double de 75 kg. Il est vrai que la traction d'une même charge exigerait des chevaux additionnels sur la rampe de 0,09, mais l'emploi des chevaux de renfort résout la difficulté, et la fourniture de ces chevaux était une industrie assez prospère lorsque les gros transports se faisaient sur les routes.

Nous nous bornerons à ces considérations sur le roulage ordinaire ; mais on pourra trouver le développement de ce sujet dans les mémoires spéciaux publiés dans les *Annales des Ponts et Chaussées* en 1879 et 1881, et dans l'ouvrage intitulé *Routes et chemins vicinaux*, qui fait partie de l'*Encyclopédie des Travaux publics*.

Ce que nous venons de dire montre qu'il faut se défier, en matière de tracés de voies publiques, des solutions qui paraissent évidentes, et que la réduction des déclivités présente d'autant plus d'intérêt que la résistance par unité de charge à traîner est plus faible, mais qu'il ne faut pas acheter la réduction de l'effort de traction par un trop grand allongement de la ligne.

On voit d'après ces conclusions que les profils longitudinaux très peu accidentés doivent convenir aux chemins de fer, sur lesquels la résistance en voie horizontale ou *palier* n'est guère que de 1 kg. 5 par tonne remorquée à très faible vitesse ; la comparaison de ce coefficient avec celui qui se rapporte aux routes dans les conditions les plus avantageuses (20 kg. sur un bon pavage) donne la mesure de la supériorité des voies ferrées. Mais aussi, à cause de la très faible résistance qui existe sur celles-ci en palier, le surcroît

d'effort à développer pour *monter la charge*, même sur une rampe minime, devient prépondérant.

Pour les lignes dont l'importance permet de recourir aux tunnels et autres ouvrages propres à éviter les allongements de parcours, la réduction des déclivités a une limite très faible est donc justifiée; mais lorsqu'on est obligé de s'en tenir à de faibles dépenses, et par suite d'épouser davantage les formes naturelles du terrain, comme cela a lieu pour les chemins à petit trafic, l'allongement reparaît, et l'on serait conduit à le porter au maximum si, en continuant à proscrire les travaux dispendieux, on s'imposait en même temps une limite très basse pour les déclivités. On peut donc se trouver ramené à accepter les rampes notables sur les chemins de fer secondaires, et l'on pourrait, à l'extrême rigueur, aller dans cette voie jusqu'aux inclinaisons voisines de 0,135, limite fixée par l'*adhérence* moyenne des locomotives; mais alors la charge *utile* deviendrait presque nulle. Selon le degré d'utilisation que l'on veut obtenir de la machine, on se trouve obligé pratiquement à rester plus ou moins au-dessous de la déclivité de 0,135 et, en tous cas, loin de cette limite théorique. Il est facile de comprendre qu'aux très grandes déclivités ne pourraient convenir que des transports par locomotive portant les voyageurs ou les marchandises, dont le poids contribuerait à l'augmentation de l'adhérence.

D'après ce que nous venons de voir, les rampes faibles apparaissent comme l'apanage naturel des voies à grande circulation, celle-ci justifiant les travaux nécessaires pour ne s'écarter que modérément des tracés directs en plan et en profil. C'est à ce prix seulement qu'on peut arriver aux forts tonnages ou aux

grandes vitesses des trains, nécessaires pour *déblayer* les voies à trafics considérables : *il faut proportionner la perfection des tracés à l'importance de la circulation sur les chemins de fer.*

Lors de la construction des grandes lignes françaises, on s'est astreint à ne pas dépasser la déclivité de 0,005 à 0,006. Les motifs qui ont fait adopter cette limite peuvent être variés, mais, ainsi que le fait remarquer M. de Freycinet dans son ouvrage sur les *Pentes économiques en chemins de fer* (page 144), on en pourrait trouver une raison dans les lois générales de l'Exploitation, et notamment dans les phénomènes de la traction : l'inclinaison de 5 à 6 millimètres par mètre est la limite supérieure pour laquelle il n'y a aucune perte de force vive des trains. Sur les rampes, la machine doit vaincre, outre les résistances qui existent en palier, la composante de la gravité parallèle à l'effort de traction ; à la descente, la locomotive surmonte encore les mêmes résistances que sur les voies horizontales, mais elle est aidée par la composante de la pesanteur. Si la pente est assez faible pour que cette dernière action puisse s'exercer librement, sans que le train risque de prendre une vitesse dangereuse, elle entrera tout entière en déduction de la force nécessaire pour surmonter les résistances fixes, et le travail de la gravité, devenu moteur à la descente, rachètera le travail résistant de cette même force à la montée. Quand, au contraire, la pente est trop rapide, il faut enrayer la vitesse et le travail de la pesanteur ne peut être utilisé entièrement ; il y a également une perte si la pente est très longue, puisqu'on ne peut admettre d'accélération au delà d'une certaine limite.

Sur une pente de 5 à 6 millimètres par mètre, la

composante de cette force est de 5 à 6 kilogrammes par tonne de charge, et c'est aussi la valeur de la résistance pour le train entier, machine comprise, aux vitesses moyennes de l'Exploitation des chemins de fer. Il ne s'agit ici, bien entendu, que d'une approximation, les vitesses étant essentiellement variables ; pour les trains express, par exemple, la locomotive doit développer sur ces pentes un travail considérable, malgré l'appoint fourni par la gravité. Aussi la déclivité limite, admise pour l'établissement des grandes lignes, est-elle devenue, avec l'augmentation de charge et de vitesse exigée pour certains trains, un obstacle sérieux à l'accroissement continu des vitesses moyennes qui caractérise notre époque. Pour éviter une marche trop rapide sur les pentes, on est obligé de réaliser en palier et en rampes des vitesses qui ne peuvent être obtenues que par un développement de force de plus en plus élevé. Il devient évident que pour obtenir les mêmes vitesses moyennes avec un travail moindre, il faudrait disposer de voies à peu près horizontales sur toute leur longueur.

Les rampes ne sont pas la seule cause de résistance additionnelle due à la voie : les courbes, qui raccordent entre eux les alignements droits, entraînent aussi une majoration de l'effort de traction nécessaire sur une voie rectiligne. Peu sensible et négligeable lorsque le rayon de la courbe atteint au moins 800 mètres, ce surcroît d'effort devient de plus en plus important à mesure que le rayon diminue. De plus, à cause du changement de direction que la voie impose constamment aux locomotives et aux véhicules, lorsqu'elle est en courbe prononcée, la sécurité commande une rédu-

tion de la vitesse proportionnée à celle du rayon, pour écarter toute chance de déraillement.

On a beaucoup discuté, depuis l'origine des chemins de fer, sur cette question des courbes, envisagées au point de vue de la sécurité et à celui de la résistance des trains, sans que des conclusions précises aient pu être formulées. Dans le principe, sur les lignes principales à grand trafic, pour lesquelles la déclivité maximum était de 0,005 ou 0,006, on a adopté pour les tracés en plan des rayons de courbes ne descendant pas au-dessous de 800 mètres. On a reconnu, par la suite, que les trains pouvaient sans danger circuler à grande vitesse dans les courbes de 500 mètres de rayon, moyennant certaines dispositions de la voie et du matériel.

Quant à la question des résistances, elle est des plus complexes : il est certain que, pour les lignes sinueuses, le surcroît de résistance dû aux courbes est un élément important à considérer dans l'établissement du prix de revient de la traction. Il faut remarquer aussi que, souvent, par une conséquence naturelle de la configuration du sol, les voies courbes établies en pays accidentés se trouvent être, en même temps, plus ou moins inclinées ; le principal avantage des voies de largeur réduite, employées pour certaines lignes d'intérêt local, consiste à permettre l'adoption de courbes de faibles rayons, sans augmenter d'une manière excessive la résistance spéciale qu'elles entraînent.

Remarquons enfin que si les courbes roides ont pour effet, comme les rampes, l'augmentation de la résistance constatée en alignement droit, elles ont aussi l'inconvénient de provoquer une usure plus rapide du matériel, et principalement des machines. L'accrois-

sement de puissance et de stabilité de ces machines a nécessité leur allongement, elles ne s'inscrivent plus aussi facilement que par le passé dans les courbes de faibles rayons et éprouvent de ce fait une fatigue plus grande.

En résumé, on ne peut songer à éviter l'emploi des déclivités et des courbes dans les tracés de chemins de fer, mais il est certain que les unes et les autres ont une influence très marquée sur les résultats de l'exploitation, soit en limitant, selon l'importance de leur effet nuisible, l'utilisation des machines, soit en rendant les réparations de celles-ci plus fréquentes et plus dispendieuses.

La puissance des locomotives se manifeste sous deux formes bien distinctes : celle de l'effort de traction maximum qu'elles peuvent produire à vitesse presque nulle, et celle du travail en pleine marche qui constitue la véritable puissance dynamique. Cette seconde qualité, si bien comprise et développée de toutes parts depuis quelques années, est de beaucoup la plus difficile à obtenir, et, pour terminer par une comparaison tirée de cette première étude, nous pouvons dire que toute augmentation de la puissance dynamique des locomotives, sans augmentation de leur poids, est une ressource plus précieuse que celle des chevaux de renfort sur les routes ordinaires à profil accidenté.

CHAPITRE PREMIER

GÉNÉRALITÉS

§ 1^{er}. La voie. — § 2. Caractères distinctifs du matériel roulant des chemins de fer. — Description sommaire d'une locomotive.

§ 1^{er}. — LA VOIE.

1. — Largeur de la voie normale. — Les conditions d'établissement du matériel roulant des chemins de fer sont liées d'une manière si intime à l'emploi des rails qu'il nous a paru nécessaire de rappeler, au début de ce livre, les dispositions principales de la voie ferrée.

C'est en cherchant à réduire la résistance des véhicules que, bien avant l'application de la vapeur à la locomotion, on a été conduit à substituer les rails aux voies ordinaires des voitures sur routes. Leur emploi s'étendit rapidement en Angleterre où l'on cherchait par tous les moyens à rendre plus économique le transport de la houille dans les mines, et lorsque, dans ce même pays, la grande industrie des chemins de fer prit naissance, il devint nécessaire de fixer la largeur à donner à la voie.

Les premières lignes furent construites en donnant aux rails l'écartement de 1^m,45 environ, correspondant à celui qui était en usage pour les roues des voitures sur routes ; mais bientôt, certains ingénieurs ayant considéré cette base comme insuffisante, *M. Brunel* adopta

l'écartement de 2^m,13 pour la ligne de Londres à Bristol ; d'autres ingénieurs choisirent des largeurs intermédiaires, et un débat important s'engagea sur cette question. Le gouvernement dut intervenir pour y mettre un terme, et, en 1845, il prescrivit une Enquête qui eut pour résultat l'adoption de l'écartement de 1^m,44 pour tous les chemins de fer du Royaume-Uni. Cette largeur avait été choisie également en France pour les quelques lignes déjà construites à cette date, et la plupart des autres Etats de l'Europe l'adoptèrent aussi. La voie de 1^m,44 est donc devenue *normale* d'un commun accord, sauf pour trois pays, la Russie, l'Espagne et l'Irlande qui ont adopté respectivement les voies de 1^m, 521 (ou 5 pieds anglais), 1^m, 736 et 1^m, 680.

En résumé, il n'y a pas à regretter que la largeur de voie actuelle ait prévalu ; suffisante pour assurer la stabilité du matériel aux plus grandes vitesses, elle a permis de construire des locomotives de puissance toujours croissante, et elle présente au point de vue économique, par rapport aux voies plus larges, le grand avantage de mieux se prêter à la réduction du rayon des courbes.

La conférence internationale réunie à Berne le 10 mai 1886, et à laquelle se trouvaient représentés les gouvernements de France, d'Allemagne, d'Italie, d'Autriche-Hongrie et de Suisse, a fixé d'une manière définitive la valeur des *unités techniques* à adopter pour la voie et le matériel roulant. Le protocole final de cette conférence, en date du 15 mai 1886, renferme la décision suivante :

« La largeur de la voie des chemins de fer (mesurée entre les bords intérieurs des têtes des rails) pour les voies neuves à poser et pour les voies à réfectionner, à

partir de l'entrée en vigueur des présentes dispositions, ne mesurera dans les alignements droits pas moins de 1^m,435 ».

Dans les courbes, l'écartement n'excédera pas, le surécartement compris : 1^m,465.

Les décisions de la conférence de Berne ont été rendues applicables en France par un arrêté du Ministre des Travaux publics en date du 31 mars 1887. Les grandes Compagnies ont choisi la cote de 1^m,45 en alignement droit, sauf celle du Midi qui a adopté 1^m,445.

2. — Courbes et déclivités. — Le surécartement des rails, admis dans les courbes, a pour but de faciliter l'inscription des roues qui sont montées sur des essieux parallèles. En outre, dans les courbes également, l'usage est de maintenir le rail extérieur un peu plus élevé que le rail intérieur, pour mieux combattre l'action de la force centrifuge sur les véhicules circulant à une vitesse élevée. Généralement les rayons en usage pour les anciennes lignes de premier ordre ne sont pas inférieurs à 800 mètres. Cependant, avec l'expérience acquise, on a pu descendre jusqu'à 500 mètres, puis employer en pays de montagnes le rayon de 300 mètres, considéré jusqu'ici comme un minimum, pour l'écartement de 1^m,55 entre rails. Toutefois, sur la ligne très sinueuse de Clermont à Tulle, on est descendu à 250 mètres pour un développement de voie assez considérable et, d'après des expériences récentes, dont nous aurons à rendre compte (46, D), il semblerait qu'on peut avoir avantage, *dans certains cas exceptionnels*, à adopter des rayons plus faibles encore pour la voie normale; cela permettrait de

réduire dans une proportion très importante, les dépenses de premier établissement.

Le profil de la voie présente une succession de *rampes*, *paliers* et *pentés*. Sur les bonnes lignes de premier ordre, les déclivités maxima sont ordinairement de 0^m, 005. Le profil, dans ce cas, est considéré comme assez facile. Mais les perfectionnements apportés dans la construction du matériel roulant et l'augmentation de puissance des locomotives, ont permis d'aborder des inclinaisons beaucoup plus fortes, à la condition de sacrifier, au profit des dépenses d'établissement de la voie, le rendement commercial des locomotives. Celles-ci se trouvent alors obligées d'absorber, pour se remorquer elles-mêmes, une portion considérable du travail qu'elles développent. A cet égard, on a été conduit à considérer la déclivité de 0^m, 035 comme une limite que l'on peut accepter pratiquement, pour les lignes à grand trafic, mais qu'il convient de ne pas dépasser.

§ 2. — CARACTÈRES DISTINCTIFS DU MATÉRIEL ROULANT DES CHEMINS DE FER. — DESCRIPTION SOMMAIRE D'UNE LOCOMOTIVE.

3. — Considérations générales. — Le matériel des chemins de fer, comme celui des transports sur routes, est constitué par des véhicules *roulants*. Cette expression, qui rigoureusement n'est pas correcte, mais que l'usage a consacrée, doit s'entendre de véhicules supportés par des roues qui prennent un mouvement de *roulement* sur la voie, tandis que le corps du véhicule progresse d'un mouvement de *translation* avec un

glissement dont l'amplitude très faible s'exerce à la circonférence des essieux.

La solution du *glissement des véhicules* n'est pas incompatible avec le principe des voies ferrées ; au contraire, la rigidité de la base d'appui et l'absence de tout obstacle en saillie semblent être des conditions favorables à la recherche de cette solution. Plusieurs inventeurs s'y sont attachés : on sait que des résultats d'expériences ont été obtenus, mais aucune des tentatives faites dans ce sens n'a abouti dans la pratique. Il suffira de mentionner ici le chemin de fer à *propulsion hydraulique*, ou *chemin de fer glissant*, dont on a pu voir fonctionner un spécimen à l'Exposition de 1889. Inventé en 1854 par M. Girard, ce système a été repris par M. Barre en 1885 et se trouve décrit dans le *Génie civil* (N° du 28 septembre 1889).

Le matériel roulant des chemins de fer se distingue de celui des routes principalement par les dispositions suivantes :

Présence des mentonnets sur les bandages des roues.

Calage des roues sur les essieux.

Conicité des bandages.

Parallélisme des essieux.

4. — Mentonnets ou boudins. — Les *bandages* des roues portent du côté intérieur un *boudin a* (fig. 1) dont la saillie est de 0^m,025 à 0^m,035. Son rôle est de maintenir les roues sur les rails et, dans certains cas, d'imprimer la direction au

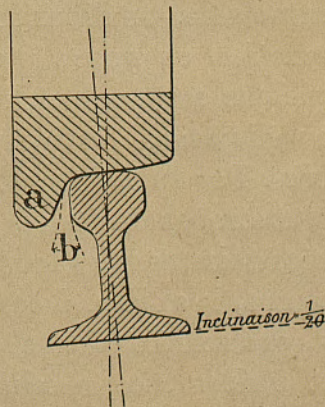


Fig. 1.

véhicule ; mais comme son action entraîne un surcroît de résistance, les dispositions de la voie et celles du matériel lui-même sont étudiées de manière à éviter autant que possible son intervention et à lui conserver son caractère d'organe de sécurité.

5. — Calage des roues sur les essieux. — La simplicité de construction et la solidité sont les motifs qui, dès le début, ont conduit à adopter cette disposition. On sait que, sur les voitures routières, le moyeu de la roue présente un évidement central de forme cylindrique ou conique, à l'intérieur duquel pénètre la partie extrême de l'essieu, la *fusée* ; le corps de l'essieu est relié à la caisse, et les roues tournent indépendamment l'une de l'autre, condition requise par la nature irrégulière de la voie, et par la nécessité impérieuse de pouvoir *tourner court*. Au point de vue de la résistance opposée à la marche par le frottement des fusées, les deux systèmes peuvent être considérés comme équivalents.

Sur les véhicules de chemins de fer, les roues et l'essieu qui les porte, sont rendus solidaires par un calage invariable. On dit un *essieu monté*, une *paire de roues montées*, ou un *train de roues* ; l'ensemble forme en quelque sorte une seule pièce rigide qui résiste mieux au glissement transversal que si les roues étaient libres. Par suite de causes accidentelles, ce glissement peut être rendu possible par le jeu *b* (fig. 1) que possèdent nécessairement les boudins par rapport aux rails. Par contre, la solidarité des roues et de l'essieu constitue un obstacle à la facilité de circulation dans les courbes, et d'ailleurs cette solidarité n'est pas d'une absolue nécessité, comme en témoigne l'emploi du matériel

articulé, système Arnoux, appliqué durant de longues années sur le chemin de fer de Sceaux. Cette disposition récemment disparue, n'a pas reçu de développements, et, malgré les progrès réalisés dans la construction, le système de l'indépendance des roues ne semble pas devoir être appliqué dans un avenir prochain.

6. — Conicité des bandages. — Cette disposition est avantageuse au point de vue de la circulation dans les courbes. Sous l'action de la force centrifuge qui pousse le véhicule vers le rail extérieur, le roulement des deux roues conjuguées s'opère sur des diamètres différents et le rapport des chemins décrits sur les cercles de roulement se rapproche plus ou moins de celui des rayons des deux files de rails ; si ces deux rapports sont égaux, l'ensemble de l'essieu et des roues se meut, sans glisser, comme un cône dont le sommet se trouverait au centre de courbure de la voie. Ce mode de roulement implique donc la possibilité d'une certaine convergence des essieux dans les courbes, convergence que les dispositions de montage du véhicule sur ses roues permettent d'obtenir, en général, ainsi qu'on le verra (30,B). En alignement droit, la conicité des bandages peut contribuer, concurremment avec la solidarité des roues et des essieux, à ramener le véhicule dans l'axe de la voie lorsqu'il s'en est écarté accidentellement ; mais il ne peut conserver cette position que sous certaines conditions, parmi lesquelles figure en première ligne le parallélisme rigoureux des essieux. La conicité des bandages est ordinairement de $1/20$ (fig. 1).

7. — Parallélisme des essieux. — Ce système, né-

cessaire pour la marche en ligne droite, entraîne l'emploi de dispositions accessoires pour faciliter l'inscription de l'ensemble des roues sur les voies en courbe. Nous nous contenterons de mentionner ici le *jeu b* des boudins, qui existe dans les alignements rectilignes et que l'on augmente dans les courbes (fig. 1). Suivant une décision de la conférence de Berne, ce jeu, mesuré d'après le déplacement total de l'essieu, l'écartement de la voie étant supposé de 1^m, 440, doit être compris entre 15 et 35 millimètres.

Les quatre dispositions dont nous venons de parler se rapportent aussi bien aux locomotives qu'aux voitures et wagons ; il en existe deux autres qui, la première surtout, concernent particulièrement ces derniers véhicules, ce sont :

La position des roues sous les caisses.

L'application de la charge sur des fusées extérieures aux roues.

8. — Position des roues sous les caisses. — Ce système de construction a été adopté d'une manière générale sur les chemins de fer, pour rendre la largeur des caisses indépendante de celle de la voie. On a pu ainsi, à l'origine des chemins de fer, prévoir le développement du trafic sans avoir recours à un grand écartement des rails, et sans craindre de nuire à la stabilité qui, avec cette disposition, ferait défaut sur une route ordinaire : la voie étant de niveau, l'élargissement donné au véhicule ne peut aucunement lui faire courir le risque de verser. D'ailleurs cet élargissement est limité, le *gabarit* des dimensions transversales extérieures du matériel roulant devant s'inscrire dans le gabarit des ouvrages d'art.

9. — Application de la charge sur des fusées extérieures aux roues. — Cette disposition, qui peut se rencontrer sur les locomotives, existe toujours sur le matériel de transport. Ses avantages peuvent se résumer ainsi :

Maximum de stabilité du véhicule, et en particulier de la caisse.

Application de la charge dans les conditions les plus favorables à la réduction du diamètre des fusées, et par suite, comme nous le verrons ci-après, réalisation du minimum de résistance à la traction.

10. — Dispositions générales du matériel de transport. — A ne considérer que l'ensemble, les véhicules composant ce matériel sont de nature très variable. Suivant qu'ils sont affectés au service des voyageurs ou à celui des marchandises, ils se divisent en deux grandes catégories renfermant chacune des types nombreux, mais se différenciant et se classant uniquement d'après la forme et la destination de la *caisse*. Celle-ci est portée par un *train ou châssis* dont les parties constitutives se retrouvent sur tous les types, avec les mêmes dispositions générales et les mêmes fonctions.

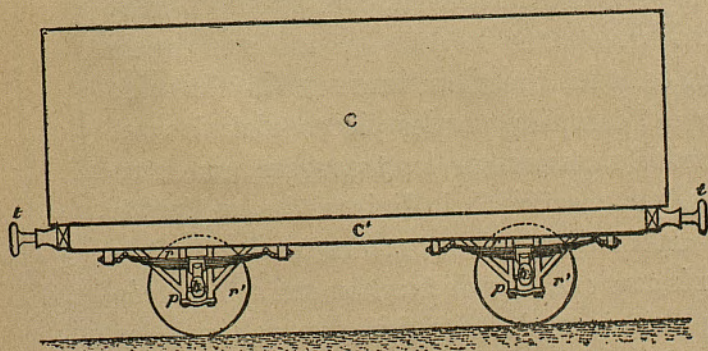


Fig. 2.

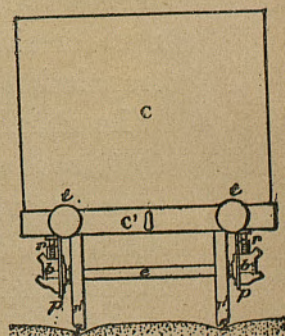


Fig. 3.

Les fig. 2 et 3 représentent comme spécimen un *wagon tombereau*. Le *train* ou chassis est formé de deux *brancards* longitudinaux *c'* et de deux *traverses* le tout convenablement entretoisé dans le plan horizontal pour éviter toute déformation. Les fusées des essieux, emprisonnées dans des *boîtes à graisse* *b* supportent la charge par l'intermédiaire de *ressorts de suspension* *r* dont les extrémités sont généralement reliées aux brancards par l'intermédiaire de *menottes* articulées (fig. 4).

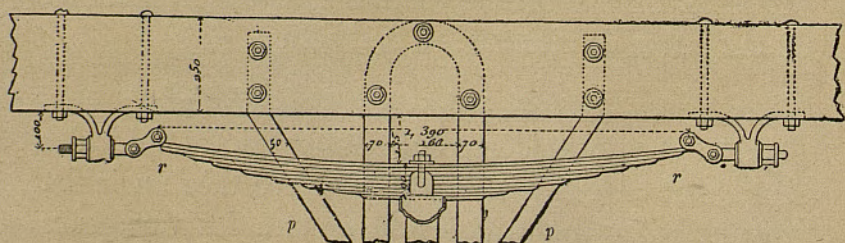


Fig. 4.

Les *chapes* des ressorts portent sur des *boîtes à graisse* renfermant des *coussinets* de friction en métal sur lesquels s'opère le glissement des fusées. La boîte à graisse est comprise, avec jeu, entre les branches d'une *plaque de garde* *p* faisant corps avec le brancard, de façon à permettre la flexion du ressort et à rendre le train de roues solidaire du chassis, tout en lui laissant une certaine liberté dans le sens du mouvement de translation et dans la direction transversale à la voie.

Le chassis est complété par les pièces *d'attelage* et de *tamponnement* montées sur les traverses, ou entre les brancards, pour servir à la liaison des véhicules entre eux, de la manière suivante : des *tendeurs d'attelage* à vis fixés *aux crochets de traction* qui sont placés dans l'axe du chassis, et dont les tiges sont reliées à des *ressorts de traction*, permettent à la fois de réunir deux

véhicules successifs et de provoquer la compression mutuelle de leurs *tampons de choc* montés sur des *ressorts de choc*. Pour le matériel à voyageurs, deux ressorts à lames disposés transversalement au centre du véhicule reçoivent en leur milieu les tiges de traction, et à leurs extrémités les tiges des tampons de choc auxquelles ils servent de butée. Cette disposition est indiquée sur la fig. 5 qui représente le plan d'ensemble

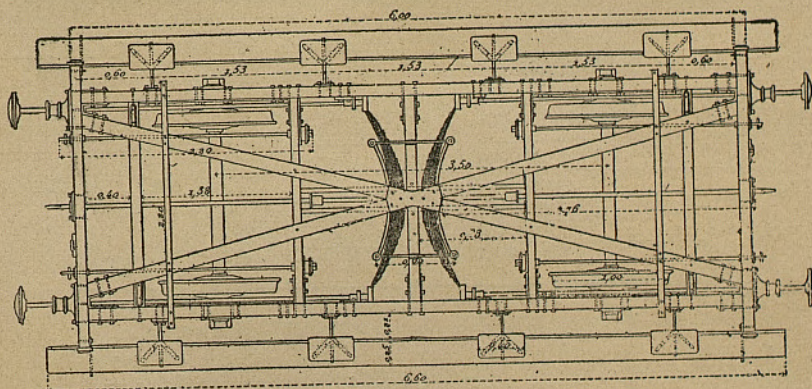


Fig. 5.

d'un châssis de voiture. Les attelages étant serrés, l'ensemble du train, bien qu'il soit compact, possède, par le jeu des ressorts de traction et de choc, la flexibilité dont il a besoin dans les courbes, et une certaine élasticité en vertu de laquelle sa longueur peut varier dans la mesure convenable. Ce serrage des attelages est pratiqué sur les trains de voyageurs pour éviter les oscillations longitudinales des voitures. Dans les trains de marchandises, les tendeurs ne doivent pas être serrés à bloc ; s'il en était ainsi, la mise en marche serait très difficile, sinon impossible. Les attelages comportent encore des *chaînes de sûreté* qui ne doivent entrer en fonction que dans le cas de rupture des autres pièces.

Enfin, le châssis supporte les pièces du frein et certains accessoires de détail.

Description sommaire d'une locomotive. — La locomotive se compose d'un véhicule présentant les mêmes caractères généraux que ceux dont nous venons de parler, et d'un moteur qui, par le mouvement de rotation imprimé à l'un des essieux détermine le déplacement de la machine et engendre l'effort de traction.

11. — Véhicule. — Le véhicule proprement dit (fig. 6) se compose du *châssis*, et des *trains de roues*,

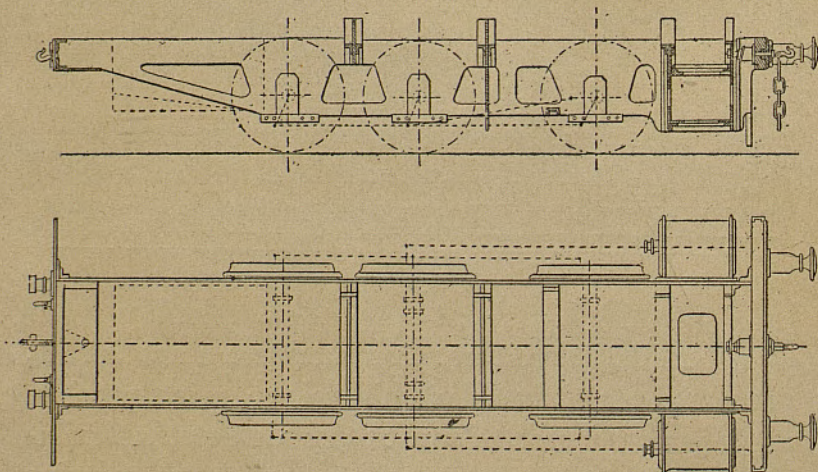


Fig. 6. — Châssis d'une locomotive à 3 essieux couplés.

sur lesquels il repose par l'intermédiaire des *ressorts de suspension*. Le châssis est formé par des tôles ou *longerons*, qui occupent toute la longueur de la locomotive, et qui sont reliés par des *entretoises* et par les *traverses* extrêmes. Le châssis sert à la fois de bâti à la machine et de support au générateur.

Les *plaques de garde*, découpées dans les longerons coulisent le long des *boîtes à graisse*, par suite de la

flexion des ressorts de suspension. Ces boîtes, munies de coussinets en métal, reçoivent la charge et la transmettent aux fusées d'essieux qui, selon les dispositions d'ensemble adoptées, peuvent être *extérieures* ou *intérieures* aux roues.

12. — Générateur. — Le générateur est une chaudière du genre dit *tubulaire*¹, dont le volume et le poids représentent une portion importante du volume et du poids de la machine elle-même. Cette chaudière repose sur les longerons par l'intermédiaire de *supports* servant parfois à les entretoiser. Tel est généralement le cas du support d'avant, nommé aussi *appendice d'avant*.

13. — Machine à vapeur. — La machine à vapeur des locomotives est ordinairement horizontale, et comporte deux cylindres qui peuvent être *extérieurs* ou *intérieurs* au châssis. Le mouvement des pistons, dont les *têtes* ou *crosses* sont guidés entre des *glissières*, est transmis par les *bielles motrices* à deux manivelles placées à angle droit sur l'arbre ou *essieu moteur*, condition indispensable pour assurer la mise en marche ou le *démarrage*, quelle que soit la position de l'essieu moteur. La puissance du mécanisme de propulsion est, aujourd'hui, rarement recueillie par un seul essieu, et celui que l'on appelle *moteur* est généralement relié, à l'aide de *manivelles* et de *bielles d'accouplement* à un, deux et parfois trois autres essieux dits *accouplés*, selon l'importance de l'effort à utiliser. Les essieux non ac-

1. Certaines locomotives à vapeur, dites *locomotives sans foyer*, n'ont pas de chaudière. Les cylindres sont alimentés par la vapeur provenant d'un *réceptif* que l'on a rempli d'eau chaude empruntée à une chaudière à haute pression.

couplés qui ne participent pas à la traction et jouent le même rôle que ceux des véhicules remorqués, sont dits *essieux porteurs*.

La vapeur est introduite dans les cylindres en ouvrant le *régulateur* qui consiste en un tiroir plan glissant sur une table. Le mécanisme de *distribution* est commandé par quatre excentriques dont les *poulies* sont calées sur l'essieu moteur. On obtient le mouvement en avant ou en arrière par la manœuvre du *changement de marche*, appareil qui permet aussi de faire varier l'introduction de la vapeur et la détente. La distribution est presque toujours opérée par un tiroir à coquille.

La chaudière, munie des appareils de sûreté réglementaires, est alimentée par des *injecteurs*, — rarement par des pompes. — La vapeur qui s'échappe des cylindres passe par la cheminée pour activer la combustion par le *tirage forcé*.

14. — Tender. — La locomotive est généralement accompagnée d'un véhicule spécial, le *tender*, portant les approvisionnements d'eau et de combustible et muni d'un *frein* ; il est également porteur des *agrès* servant au chargement et à la conduite du feu, ainsi que de *coffres* destinés à recevoir les outils, les matières de graissage et les vêtements du mécanicien et du chauffeur. La locomotive, dont la traverse d'avant porte des appareils d'attelage et de tamponnement semblables à ceux des voitures et wagons, est attelée au tender à l'aide de la *barre d'attelage* de manière à exercer une compression sur deux *tampons de connexion* élastiques, afin de donner à l'ensemble des deux véhicules la flexibilité nécessaire pour le passage dans les courbes.

Les Compagnies de chemins de fer emploient non seulement des locomotives à *tender séparé*, mais encore en plus petit nombre, des *locomotives-tenders* portant elles-mêmes leurs approvisionnements d'eau et de combustible. Ces machines se rencontrent aussi sur les chantiers de travaux publics.

En résumé, la locomotive doit être considérée à un double point de vue : c'est un véhicule recevant, avant ceux du train remorqué, la direction imprimée par la voie ; c'est en même temps une machine à vapeur pourvue de sa chaudière. Elle présente, avec des dispositions simples, le caractère tout particulier d'un moteur puissant dont le poids et le volume sont relativement faibles, conséquence remarquable de l'intensité de production du générateur.

CHAPITRE II.

RÉSISTANCE DES TRAINS

SECTION I.

Étude des diverses causes de résistance à la traction prises séparément. — Recherche des conditions de résistance minimum.

§ 1^{er}. Résistance propre des véhicules. — § 2. Résistance au roulement.
— § 3. Résistance de l'air. — § 4. Résistances accidentelles.

§ 1. — RÉSISTANCE PROPRE DES VÉHICULES.

Les résistances développées d'une manière normale dans la marche des véhicules qui composent un train de chemin de fer proviennent : 1^o des véhicules eux-mêmes ; 2^o de la voie sur laquelle ils progressent ; 3^o de l'atmosphère dans laquelle ils doivent s'ouvrir un passage.

Nous devons d'abord considérer ces résistances isolément, au point de vue de leur nature, de leur intensité, enfin des moyens propres à en réduire l'effet nuisible.

15. — Évaluation de la résistance due au frottement des fusées. — La *résistance propre*, dans un système matériel quelconque, provient de l'action réciproque des parties de ce système qui possèdent un *mouvement relatif*. Celle des véhicules de chemins de

fer consiste uniquement dans le *glissement* des fusées d'essieux sur les coussinets de boîtes à graisse.

A. *Considérations théoriques.* — On sait que le glissement de deux surfaces, pressées l'une contre l'autre par une force de direction quelconque, engendre un *frottement* dont l'intensité est proportionnelle à la grandeur de cette force, et dépend en outre de l'état des surfaces ainsi que de la nature de la matière lubrifiante interposée.

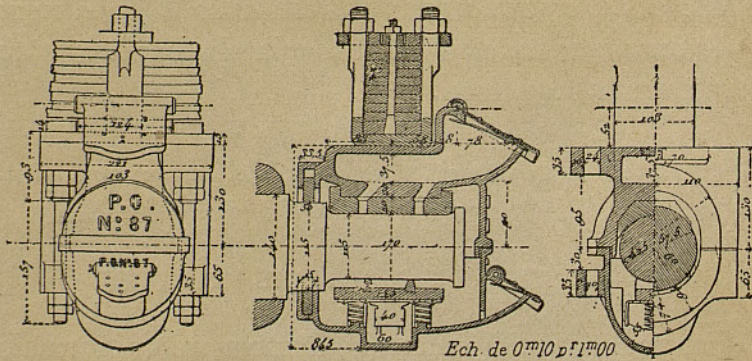


Fig. 7, 8, 9.

Les figures 7, 8, 9 représentent une boîte à graisse

de voiture, fixée au-dessous du ressort de suspension qui lui transmet une charge P_1 (fig. 10). Cette force, appliquée sur un coussinet c encasté dans la boîte à graisse, se trouve dans le plan vertical passant par l'axe o de l'essieu. L'effort de traction, que reçoit le véhicule suivant son axe, est réparti, par l'intermédiaire du châssis rigide et

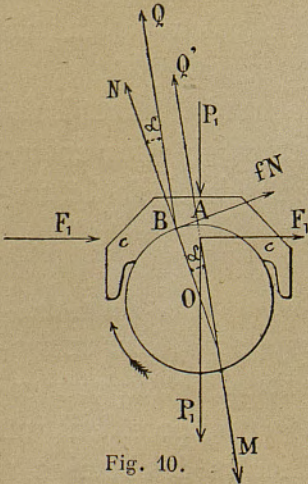


Fig. 10.

des ressorts de suspension, sur les quatre boîtes à graisse, et la portion de cet effort afférente à chacune d'elles est transmise à la fusée par le coussinet sur lequel s'exerce une force horizontale F_1 à l'arrière. Cette force et la charge P_1 ont une résultante M qui représente l'effort total appliqué sur la fusée.

Lorsque le véhicule, sollicité par l'effort de traction, se trouve néanmoins encore en repos, le contact des surfaces a lieu suivant la génératrice projetée en A. Au moment où la rotation de l'essieu commence à se produire dans le sens de la flèche, une nouvelle force intervient, celle du frottement : le contact s'établit alors suivant une génératrice B dont la position se trouve déterminée par l'intensité de ce frottement. Ainsi qu'on le démontre en mécanique, il faut, pour qu'il y ait équilibre du coussinet, que la réaction N , normale aux surfaces en contact, fasse avec la direction de la résultante M un angle α égal à l'angle de frottement, qui a pour tangente trigonométrique le rapport de la force tangentielle à la force normale. Si l'on désigne par f le coefficient de frottement, la force tangentielle a pour valeur fN et l'on a $Tg\alpha = \frac{fN}{N} = f$. La composante Q de N et de fN , qui représente la réaction de la fusée sur le coussinet pendant le mouvement, est égale et parallèle à M : à l'état de repos, cette dernière force provoquait une réaction Q' de la fusée ; mais, à la naissance de la rotation, Q' s'est déplacée parallèlement à elle-même pour se transporter de A en B. De cette façon, l'équation de projection des forces sur un axe quelconque est satisfaite ; le couple (QM) tend à entraîner le coussinet et la boîte à graisse autour de l'axe de l'essieu, dans le sens du mouvement ; il est équilibré par les réactions

du ressort de suspension auquel la boîte est fixée invariablement.

L'effort de traction F étant minime par rapport à la charge P_1 , la force $Q = M$ diffère très peu de P_1 . Or $Q = N \sqrt{1 + f^2}$, et le coefficient f , qui se rapporte aux métaux polis et bien lubrifiés, est assez faible ; on peut donc, sans erreur notable, négliger f^2 devant l'unité : ainsi, pratiquement on substitue N à Q et l'on prend comme valeur de la force tangentielle φ , qui exprime la résistance au glissement de la fusée sur le coussinet, $\varphi = f P_1$.

Il résulte de ce qui précède que la position de la génératrice de contact B dépend à la fois des valeurs de f et de P_1 ; la première de ces quantités est invariable tant que la vitesse et les conditions du graissage ne changent pas, mais la charge P varie pendant la marche à cause de la flexibilité des ressorts et des oscillations de la caisse qui, par les déplacements de son centre de gravité, changent la répartition de la charge. En réalité, le contact de la fusée et du coussinet s'établit, à l'arrière de la génératrice supérieure, sur une certaine surface dont l'étendue se modifie par l'usure.

D'après les expériences de *Coulomb*, le frottement φ serait indépendant de l'étendue des surfaces en contact et de la vitesse. Cette loi a été reconnue sensiblement exacte quant à l'étendue des surfaces : ainsi, dans les expériences faites en Angleterre en 1878 sur le serrage des freins continus, par le capitaine *Douglas Galton*¹, cet ingénieur a reconnu qu'en diminuant la surface des sabots de manière à tripler leur pression par unité de

1. *Revue générale des chemins de fer*, Février 1879, p. 418.

surface, on n'obtenait qu'une augmentation insignifiante du coefficient de frottement ; il n'en a pas été de même en ce qui concerne la vitesse. Le frottement développé par une pression donnée des sabots diminuait à mesure que la vitesse du train augmentait. Ce résultat s'est trouvé confirmé par des essais très complets entrepris par la Compagnie de l'Est sur le frottement des fusées, essais dont il sera question plus loin (16) ; mais, dans ces dernières expériences, la résistance au glissement variait avec la pression. Quoi qu'il en soit, on peut d'une manière générale et par approximation exprimer le frottement proportionnellement à la charge par la formule : $\varphi = f P_1$.

Dès lors, le glissement relatif de la fusée, pour un tour de roues, est égal à $2 \pi r$; le travail du frottement qui en résulte est donc : $\varphi \times 2 \pi r$, et pour une *translation* du véhicule égale à l'unité de longueur, le travail résistant t_1 a pour valeur :

$$t_1 = \frac{\varphi \times 2 \pi r}{2 \pi r} = \varphi \times \frac{r}{R} = f P_1 \times \frac{r}{R}$$

On peut évidemment considérer cette formule comme s'appliquant, non à une seule paire de roues montées, mais à plusieurs trains de roues identiques supportant le châssis et la caisse d'un véhicule. Soient :

P le poids *total* du véhicule,

p le poids des trains de roues réunis.

La charge totale sur les fusées est représentée par $P - p$, et la formule ci-dessus devient :

$$t_1 = \frac{f (P - p) r}{R}$$

Le poids $P - p$ se compose de deux parties essentiellement distinctes : l'une est la charge *utile*, le poids des

voyageurs ou des marchandises transportés ; l'autre est le *poids mort*, qui intervient dans la traction à titre purement onéreux. Soit u la valeur de la charge utile, m celle du poids mort, le travail du frottement par *unité de charge utile* transportée à l'*unité de distance* aura pour expression :

$$t' = \frac{f(u + m) \times \frac{r}{R}}{u} = f \frac{r}{R} \left(1 + \frac{m}{u}\right)$$

On voit, d'après cette formule, que les conditions de moindre résistance, et par suite de moindre dépense par *unité de trafic*, sont :

- Une valeur relativement faible du poids mort,*
- Un diamètre réduit des fusées,*
- Un grand diamètre des roues,*
- Un coefficient de frottement peu élevé entre la fusée et le coussinet.*

Nous n'avons pas à rechercher ici dans quelles limites il est possible de satisfaire pratiquement aux desiderata des trois premières conditions ; nous examinerons seulement la question du coefficient de frottement.

16. — Valeurs pratiques du coefficient de frottement. — Les matières employées dans la construction des véhicules d'un train sont : pour l'essieu, le fer ou l'acier ; pour le coussinet, les différents alliages : bronze, métal blanc, etc. Entre les deux surfaces est toujours interposée une matière lubrifiante, graisse ou huile. Dans les conditions ordinaires du service des chemins de fer, les hypothèses sur lesquelles repose le calcul ci-dessus de la valeur de t_1 ne conduisent qu'à une évaluation approximative de ce travail ; les essais nombreux qui ont été entrepris, surtout dans ces der-

nières années, ont montré que les lois du frottement sont en réalité très complexes. Chaque matière de graissage, chaque mode d'application du corps lubrifiant doit faire l'objet d'une étude spéciale, au point de vue des variations de pressions, de vitesse, de température. En sachant se placer dans des conditions favorables, on peut arriver avec les différentes matières usuelles, graisses, huiles végétales ou minérales, à des valeurs extrêmement réduites du coefficient de frottement.

Cette importante question ne peut être étudiée d'une manière complète qu'en recherchant les meilleures conditions de *construction* du matériel roulant. Nous devons nous borner dans cet ouvrage à indiquer les principaux résultats obtenus.

Deux méthodes principales d'expérience ont été appliquées à l'étude pratique du frottement des fusées.

A. *Essais au frein*. — Par la première méthode, analogue à celle du *frein de Prony*, on a cherché à mesurer l'effort de glissement qui nous occupe en l'isolant des autres causes de résistance des trains, c'est-à-dire des réactions des rails et de la résistance de l'air.

A cet effet, on a suspendu sur paliers des essieux dont l'une des fusées supportait par l'intermédiaire d'un coussinet semblable à ceux des véhicules une charge représentative de la fraction correspondante de leur poids. L'essieu recevait son mouvement d'une transmission mécanique, et l'effort de glissement était équilibré à chaque instant au moyen d'un levier dont la longueur et la charge donnaient la mesure.

M. *Kirchweger* a employé cette méthode dans les expériences très étendues qu'il a faites en 1861-1862 aux

ateliers du chemin de fer de Hanovre. Le coefficient de frottement a été trouvé variable entre $1/60$ et $1/100$ suivant la nature des coussinets et de la matière lubrifiante. D'après ces essais, l'emploi du métal blanc pour les coussinets présenterait un avantage notable.

Des observations du même genre ont eu lieu récemment à la Compagnie des chemins de fer de l'Est à l'aide d'une machine spécialement construite en 1885. Elle est figurée et décrite dans la *Revue Générale des Chemins de fer*¹. Étudiée en vue de la détermination du pouvoir lubrifiant des différentes huiles employées pour le graissage des fusées d'essieux des véhicules de chemins de fer, cette machine est disposée de manière à pouvoir reproduire les diverses circonstances du fonctionnement en service. L'essieu est remplacé par un arbre portant en son milieu un tourillon qui représente la fusée ; on peut faire varier la charge appliquée sur le coussinet, et abaisser à volonté la température des surfaces frottantes et celle de l'huile. Nous extrayons de l'article précité de la *Revue Générale* les renseignements suivants :

« Le pouvoir lubrifiant d'une huile étant, à pression et à vitesse égales, inversement proportionnel à la résistance tangentielle développée à la circonférence de la fusée par son glissement sur la surface du coussinet qui presse sur elle, c'est la valeur de cette résistance tangentielle qu'on s'est proposé de mesurer, et la machine inscrit automatiquement, à l'aide d'un appareil enregistreur, une quantité qui lui est proportionnelle ».

Cette méthode, basée sur la recherche du coefficient de frottement, qu'on obtient en divisant l'effort tan-

1. N° de décembre 1889, p. 505.

gentiel par la charge, fournit donc une solution de la question qui nous occupe. Voici les conclusions tirées des nombreux essais effectués à l'aide de la machine à essayer les huiles :

Influence de la pression sur le frottement. — « 1° Les coefficients de frottement obtenus pour différentes pressions à une même vitesse moyenne de 31^m,086 par minute, à la circonférence de la fusée¹, et dans les mêmes conditions de refroidissement de celle-ci, vont en décroissant à mesure que la pression augmente, jusqu'à un minimum qui, dans les conditions de l'expérience, semble correspondre à une pression voisine de 30 kilogs par centimètre carré, et augmentent ensuite pour les pressions supérieures.

« 2° Les conditions de refroidissement des surfaces frottantes restant les mêmes, les températures de régime croissent avec la pression.

« 3° Pour la vitesse considérée, et pour une même pression, dans les limites entre lesquelles il a été opéré, c'est-à-dire pour des pressions variant entre 0^k, 717 et 36^k, 428 par centimètre carré, et pour les températures comprises entre 16° et 40° centigrades, le coefficient de frottement décroît à mesure que la température de régime augmente ».

Influence de la vitesse sur le frottement. — « 1° Pour une même pression, et les conditions de refroidissement de la fusée restant les mêmes, la température de régime augmente avec la vitesse, et par suite le coefficient de frottement diminue.

« 2° Pour les pressions expérimentées, et à égalité

1. Vitesse correspondant à celle de 20 kilomètres 5 à l'heure pour le véhicule. Ces expériences ont d'ailleurs été exécutées pour toute l'échelle des vitesses de marche.

de température, le coefficient de frottement croît généralement avec la vitesse ».

Les valeurs trouvées pour le coefficient de frottement ont été très variables selon les données mêmes de ces expériences et, pour ce motif, on ne peut lui attribuer, même approximativement, une valeur qui puisse être employée comme moyenne. Il suffira de dire que ce coefficient s'est abaissé jusqu'à 0,01 avec l'huile de colza schistée de la Compagnie P.-L.-M., à la température la plus élevée des coussinets. D'une manière générale, avec les huiles minérales *vieilles* provenant des boîtes à huile, le coefficient de frottement, en décroissance avec l'élévation de température, tendait vers une limite voisine de 0,015.

Cette méthode d'essai au frein, entièrement satisfaisante au point de vue de la comparaison des huiles, et très intéressante pour les recherches sur les valeurs des coefficients de frottement, en ce sens qu'elle élimine complètement les résistances provenant des autres phénomènes, ne peut cependant, à ce second point de vue, être considérée comme rigoureusement exacte ; c'est, à proprement parler, une expérience de laboratoire qui, par cela même qu'elle supprime les réactions des rails, ne tient pas compte des trépidations du train de roues en marche sur la voie, lesquelles ne sont pas sans influence sur l'action réciproque des surfaces frottantes.

B. *Observations directes.* — Depuis la création des chemins de fer, des expériences nombreuses d'observation directe ont eu lieu sur les véhicules en mouvement. Pour dégager la valeur de l'effort de glissement des fusées, il faut que l'on puisse éliminer ou calculer, comme termes correctifs, l'influence du roulement et

celle de l'atmosphère. Le premier de ces effets est, comme on le verra plus loin, à peu près négligeable sur une voie en très bon état ; la résistance de l'air s'annule également si l'on opère à une vitesse très faible et dans une atmosphère calme. En attribuant au glissement la totalité de la résistance constatée dans ces conditions, on arrive à une évaluation par excès, mais très peu différente de la réalité. Nous examinerons plus loin (35), à propos de la résistance totale des trains, les deux modes d'observation en usage ; les principaux résultats qu'ils ont fournis sont consignés ci-après.

Des expériences très anciennes, faites en Angleterre par M. *Wood*, ont donné pour le coefficient de frottement du coussinet sur la fusée graissée des valeurs variables entre $1/10$ et $1/60$. Cet ingénieur opérait par l'observation directe du mouvement d'un wagon abandonné à lui-même sur une voie en pente suivie d'un palier, et il déduisait de la résistance totale calculée d'après la décroissance de la vitesse, constatée sur le palier, celle que des expériences du même genre l'avaient conduit à admettre pour la résistance due au roulement proprement dit (35). L'incertitude de ce procédé, et la résistance de l'air, dont il n'était pas tenu compte, peuvent expliquer l'importance de l'écart des résultats extrêmes.

MM. *Vuillemin*, *Guëbhard* et *Dieudonné*, Ingénieurs de la Compagnie des chemins de fer de l'Est, ont exécuté en 1865-1866 une série d'essais importants sur la résistance des trains. Les résultats obtenus, qui ont été consignés dans leur mémoire¹ présenté à la Société

1. De la résistance des trains et de la puissance des machines. Mémoires

des Ingénieurs civils en 1867, ne sont plus applicables aujourd'hui, principalement à cause des progrès réalisés dans la construction des véhicules et dans le système du graissage. En outre, on ne disposait pas à cette époque des moyens d'investigation perfectionnés qui sont maintenant en usage. Nous nous reporterons toutefois, à diverses reprises, aux expériences des *Ingénieurs de l'Est*, intéressantes au double point de vue historique et comparatif.

Le procédé employé pour la recherche du coefficient de frottement des fusées consistait à lancer un wagon et à l'abandonner ensuite à lui-même. On calculait sa résistance totale en observant le chemin parcouru et en tenant compte de la force vive des roues au commencement de l'observation. Les coefficients moyens ont été de $1/30$ pour le graissage à la graisse, et $1/50$ pour le graissage à l'huile. Ces chiffres sont, le premier surtout, trop élevés, et l'observation que nous avons faite au sujet des expériences de *Wood* trouve encore ici son application.

La Compagnie de Lyon et les chemins de fer de l'Etat français ont procédé récemment à des essais ayant pour objet la comparaison des huiles végétales, employées pendant de longues années par les Compagnies de chemins de fer, avec les huiles minérales ou de *naphte*, que la région du Caucase fournit en abondance et dans des conditions de grande économie. Aux chemins de fer de l'Etat, on opérait d'abord à une vitesse extrêmement faible, par un temps absolument calme, de manière à pouvoir considérer la

résistance de l'air comme tout à fait négligeable. On avait constaté que celle due au roulement proprement dit n'est elle-même qu'une fraction très faible de la résistance totale; en la négligeant aussi, on a trouvé les valeurs approchées *par excès* de $1/70$ pour l'huile de colza et $1/65$ pour l'huile minérale.

On était porté à croire anciennement que le coefficient de frottement des fusées était plus élevé au moment de la mise en marche que pendant le mouvement; mais cette hypothèse d'un frottement spécial *au départ* a été abandonnée. On admet que pour des surfaces polies, même dans le cas où le lubrifiant est une graisse consistante, la majoration qui peut exister dans la résistance au glissement, après un stationnement plus ou moins prolongé, est de faible importance.

En résumé, on peut admettre comme résultat *moyen* des expériences faites sur le frottement, dans *les conditions effectives du service des chemins de fer*, un coefficient égal à $1/70$. Si d'autre part on adopte la fraction $1/11$ comme représentant le rapport moyen du diamètre de la fusée à celui de la roue au contact du rail, on voit que la résistance totale due au glissement sera exprimée par le produit $1/11 \times 1/70 = 1/770$ du poids suspendu, soit environ 1 kg. 40 *pour une charge de 1000 kilogs.* Un tel résultat doit être considéré comme très satisfaisant, si on tient compte de ce que les règles de la construction ont été établies pour assurer, avant toutes choses, une *sécurité absolue* et une grande *simplicité de service et d'entretien.*

Nous ajouterons à propos de ce coefficient rapporté au *poids total* du véhicule, qu'il varie, toutes choses égales, avec l'importance du chargement. C'est un

point sur lequel nous aurons à revenir à la fin de ce chapitre (52).

On a songé à substituer dans le mouvement des fusées d'essieux le frottement de *roulement* à celui du *glissement*, au moyen de l'artifice bien connu des couronnes de galets. Cette solution qui, même dans des appareils fixes et dans des conditions de montage parfait, exige des soins fort délicats, devient tout à fait inapplicable pour le matériel des chemins de fer. Les quelques essais faits dans ce sens ont abouti à un insuccès complet, confirmant une fois de plus la nécessité de n'admettre dans ce genre de constructions que des dispositions simples et robustes, exemptes de tout risque de dérangement.

§ 2. — RÉSISTANCE AU ROULEMENT.

17. — Considérations générales. — La réaction du sol, qui dans la progression des véhicules sur une route ordinaire, même en bon état d'entretien, constitue la majeure partie de la résistance à la traction, se réduit au contraire dans le cas des chemins de fer à une valeur extrêmement faible. La diminution de cette cause de résistance est, comme nous l'avons vu, l'objet propre et la raison d'être des voies ferrées. On verra par ce qui suit que le problème peut être considéré comme résolu d'une manière entièrement satisfaisante.

La condition fondamentale du roulement consiste en ce que la longueur de l'arc développé par la circonférence de la roue sur le rail, pendant un temps déterminé, est égale au chemin parcouru par le centre pendant le même temps, de sorte que si l'on désigne par :

- v la vitesse du centre,
 ω la vitesse angulaire de la roue.
 r le rayon de la roue

on doit toujours avoir la relation : $v = r\omega$.

Une paire de roues, montées sur leur essieu, éprouverait, si elle était mise en mouvement sur une voie horizontale et d'une régularité parfaite, deux sortes de résistances : la réaction de l'air, et celle des rails qui constitue la résistance au *roulement proprement dit*, appelée aussi parfois *frottement de roulement*, bien qu'il n'existe aucune analogie entre ce phénomène et celui du frottement. La réaction de l'air est faible aux petites vitesses, et celle qui provient du roulement est toujours très minime ; dans ces conditions, la paire de roues pourrait fournir un long parcours sous l'impulsion première.

On conçoit que le frottement de deux surfaces l'une sur l'autre provoque une résistance appréciable due aux petites aspérités de ces surfaces, qui doivent être arrachées pour permettre le glissement ; mais dans le roulement, ces obstacles minuscules sont seulement écrasés ou franchis, et l'on comprend difficilement qu'ils puissent créer une résistance quelconque, surtout lorsque les corps en contact sont à peu près indéformables. Ainsi, *a priori*, la résistance provenant du roulement des bandages sur les rails paraît à peu près négligeable.

18. — Roulement proprement dit. — On est convenu de représenter la réaction due au roulement par une force verticale Q agissant à une distance s en avant du point de rencontre A de la verticale passant par le centre avec le plan d'appui (fig. 11). On a

alors comme condition d'équilibre, en désignant par F l'effort horizontal nécessaire pour vaincre la résistance :

$$FR = Q \delta, \text{ d'ou } F = \frac{Q \delta}{R}$$

On ne peut voir dans cette représentation qu'une

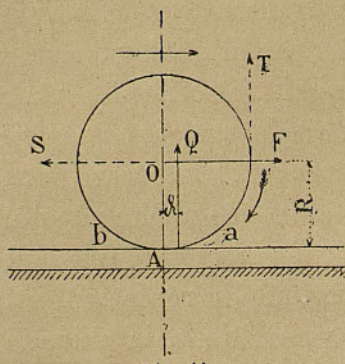


Fig. 11.

simple hypothèse faite pour expliquer les résultats de l'expérience. Il en est de même de la considération qui peut être admise soit d'une force tangentielle T , soit d'une force S passant par le centre, parallèle au plan d'appui, et dirigée en sens contraire du mouve-

ment. En réalité, la disposition des forces qui sont mises en jeu dans le roulement est encore inconnue.

Pour exprimer par une formule les effets du phénomène qui nous occupe, on a admis d'après *Coulomb* que, pour un disque de rayon R ou de poids P , ou supportant une charge P , l'effort F qu'il faut appliquer au centre du disque parallèlement au plan d'appui, pour produire le roulement, est directement proportionnel au poids et en raison inverse du rayon, c'est-à-dire que l'on a :

$$F = k \frac{P}{R} \text{ ou } F = \frac{k}{R} \times P,$$

k étant un coefficient dépendant seulement de la nature des corps et de l'état de leurs surfaces. Ce coefficient n'est autre que la distance δ qui entre dans la formule précédente.

En réalité, les parties voisines du point de contact d'une roue sur sa base d'appui se compriment, et les

surfaces s'appliquent l'une contre l'autre sur une certaine étendue (fig. 11). Lorsque cette roue se déplace, la compression se propage successivement et donne lieu à des réactions normales qui sont la cause de la résistance. Sur les routes la déformation est permanente ; il n'en est pas de même sur les voies ferrées à cause de l'élasticité des métaux. Il en résulte que le travail de compression produit en *a*, à l'avant de la roue, pourrait être restitué à l'arrière en *b*, à mesure qu'elle quitte le rail, si le déplacement s'opérait avec lenteur ; mais, aux vitesses usuelles des chemins de fer, il n'y a guère à compter sur une restitution de ce genre. Cette observation peut avoir quelque importance, non au point de vue de la compression de la matière puisqu'elle est extrêmement faible, mais à celui de la flexion élastique de la voie : le travail résistant qu'elle détermine doit être constamment surmonté par le moteur, et il ne s'agit plus alors, il est vrai, de la résistance au roulement proprement dit.

On a admis pendant longtemps, pour le rapport $\frac{k}{R}$ applicable au matériel roulant des chemins de fer, la valeur 0,001, déduite d'expériences anciennes ; mais ce coefficient est beaucoup trop fort, et il serait impossible de le remplacer par un autre déduit de considérations théoriques ; cette lacune est d'ailleurs de peu d'importance, des observations expérimentales plus récentes, dont il sera question plus loin, ayant démontré que la valeur effective de la résistance au roulement proprement dit est, dans le cas des chemins de fer, tout à fait minime et entièrement négligeable.

19. — Flexion du rail entre ses points d'appui. —
Les ondulations élastiques qu'éprouve le rail, ainsi que

la voie elle-même, au passage des roues successives, déterminent un mouvement vertical alternatif des véhicules, mais *sans changement de la position moyenne du centre de gravité* (fig. 12) : il semblerait donc, *a priori*, qu'il n'y a pas là de

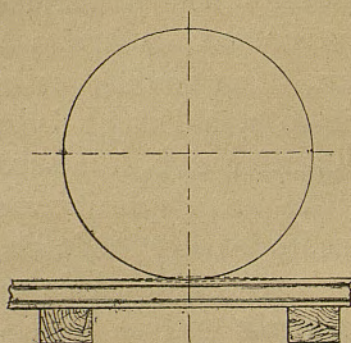


Fig. 12.

dépense de travail, sauf la perte qui peut résulter du mouvement vibratoire que chaque roue laisse derrière elle ; la diminution de force vive du véhicule ne peut être nulle, mais on conçoit qu'avec les rails rigides et le faible écartement des tra-

verses qui les supportent, cette perte soit de très peu d'importance.

20. — Rencontre des joints des rails. — La rencontre des joints successifs par chaque roue donne lieu d'une part à une *oscillation verticale*, analogue à celle qui résulte de la flexion entre les traverses, d'autre part à un *choc*, aisément perçu par l'oreille, et qui se produit au moment où la partie de la roue portant encore sur l'extrémité du premier rail, *qu'elle déprime, vient rencontrer l'extrémité en saillie* du rail suivant

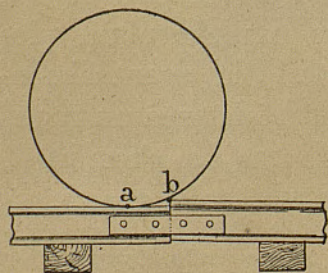


Fig. 13.

et prend autour de ce point un mouvement de *rotation* pour revenir à la position propre du roulement (fig. 13). Il y a choc parce que le point de rencontre *b* de la roue est animé d'une certaine vitesse qui doit s'annu-

ler : mais cette vitesse est *très faible* à cause du peu de distance existant entre le point *b* et le point de contact *a*, qui dans le mouvement de roulement a une vitesse *nulle* : la perte de travail due au choc sera donc elle-même peu importante. D'ailleurs, il faut ajouter que la dénivellation des rails à l'endroit des joints est à peine sensible sur les bonnes voies, et que le passage des roues de l'un à l'autre ne doit entraîner aucune trépidation des véhicules.

Il est facile de réaliser une expérience comparative qui ne laisse aucun doute sur cette conclusion. Si l'on dispose sur un plan rigide des tasseaux, par exemple de 1 à 2 millimètres de hauteur, de distance en distance, un disque métallique animé d'une vitesse suffisante pour franchir le premier d'entre eux, franchira les suivants sans éprouver une perte de force vive supérieure à celle qui résulterait du roulement simple, et qui elle-même est très faible.

21. — Présence de corps étrangers sur le rail. —

Un obstacle rigide et de dimensions appréciables qui se trouverait placé sur le rail (fig. 14), s'il est assez résistant pour ne pas céder sous le passage des premières roues, produira un effet analogue à celui des joints saillants. Si l'obstacle, comme il arrive le plus souvent, est susceptible de s'écraser (pierres, graviers), il y a une perte de travail, résultat de cet écrasement même, et qui d'ailleurs est à peu près limitée au passage du premier essieu. Cette perte de travail devien-

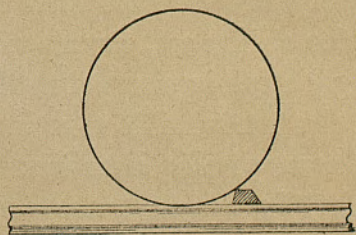


Fig. 14.

drait importante si les dimensions ou le nombre des obstacles étaient considérables, par exemple pour une voie en réparation où le rail serait recouvert par une certaine quantité de ballast. Sur une voie en état normal d'entretien, où les roues ne rencontrent que la poussière soulevée par le vent ou par le passage des trains précédents, cette cause de résistance n'a pas d'influence appréciable. Elle se retrouve, avec une valeur qui n'est pas négligeable, dans les parties de voies où les mécaniciens pour augmenter l'adhérence de leur machine font usage de sable fin projeté sur le rail.

22. — Recherches expérimentales sur la résistance au roulement. — Les recherches expérimentales sur la question du roulement, envisagée au point de vue spécial du matériel des chemins de fer, sont assez peu nombreuses.

On cite encore aujourd'hui communément celles qui ont été faites anciennement par *Wood*, bien que les résultats en soient reconnus très exagérés. L'auteur a trouvé en effet pour le *roulement seul* un coefficient de résistance variable entre $1/1000$ et $1,6/1000$: ce dernier chiffre est, comme nous le verrons, sensiblement égal à celui qui exprime la résistance totale des véhicules à très faible vitesse. *Wood* opérait sur des trains de roues isolés, abandonnés à eux-mêmes dans une déclivité ; la résistance constatée était due en grande partie au mouvement serpentant qui se produisait nécessairement sur des roues non guidées, et qui provoquait un frottement des boudins contre les rails. Ajoutons que la résistance de l'air n'était pas non plus négligeable.

Si on reprend les expériences de *Wood*, mais de ma-

nière à éliminer aussi complètement que possible les perturbations qu'on vient de signaler, c'est-à-dire en opérant sur palier, à une vitesse extrêmement faible, dans une atmosphère calme, et sur un parcours assez limité pour que le train de roues, primitivement placé suivant l'axe de la voie, ne vienne pas toucher par ses boudins aux champignons des rails, on trouve un coefficient qui s'abaisse d'autant plus que les conditions de l'expérience sont plus précises, et qui descend jusqu'à $1/10.000$, soit à peine $1/10$ de la valeur donnée par *Wood*.

Si, au lieu d'un essieu chargé directement comme dans les expériences précédentes, on considère un véhicule suspendu, on reconnaît que les résistances sont atténuées par l'action des ressorts. La suspension a pour effet, surtout aux vitesses un peu grandes, de rendre moins rigoureuse la dépendance entre le châssis et les roues ; celles-ci subissent seules le choc aux joints des rails et le mouvement oscillatoire produit par la flexion de la voie. La résistance au roulement, exprimée en fonction du poids total, sera donc moindre que celle qui a été trouvée pour une paire de roues.

On peut d'ailleurs obtenir une évaluation directe de cet effort, en comparant, par exemple, à faible vitesse, les résistances totales d'un même wagon successivement chargé d'un poids Q et réduit à sa tare q . Soient :

p le poids des trains de roues non compris dans la tare,

r la résistance par tonne du poids suspendu, c'est-à-dire la résistance due au glissement des fusées,

r' la résistance due au roulement,

R_1 et R_2 les résistances totales constatées dans les deux expériences.

On a évidemment :

$$(Q + q) r + (Q + q + p) r' = R_1$$

et
$$Q \times r + (q + p) r' = R_2$$

équations qui feraient connaître les valeurs de r et de r' .

On pourrait employer la même méthode d'expérimentation à des vitesses variables, mais toujours assez faibles pour que la résistance de l'air soit très minime, car, lors même qu'elle serait identique dans les deux expériences, elle introduirait un nouveau terme inconnu dans les équations ci-dessus. On constate alors que la résistance totale au roulement n'augmente pas avec la vitesse ; sachant d'ailleurs que l'effort de glissement change très peu avec cet élément, on est conduit à conclure que la résistance au roulement ne varie pas elle-même d'une quantité appréciable.

En fait, la résistance totale comprenant : le roulement proprement dit, la flexion des rails, la rencontre de leurs joints et l'existence des corps étrangers qui peuvent se trouver à leur surface, représente pour une voie lourde, solide et bien établie, une quantité très faible.

Au point de vue pratique, il convient d'admettre comme conclusion des expériences faites sur le *roulement*, dégagées des perturbations accidentelles qui ont entaché certains essais, que la réaction des rails sur les roues, dans la *progression rigoureusement rectiligne* des trains, est à peu près négligeable, ce qui réduit sensiblement la résistance totale à deux termes : le frottement des fusées d'essieux et la résistance de l'air.

§ 3. — RÉSISTANCE DE L'AIR.

La réaction de l'air est peut-être la cause la plus

complexe de résistance à la marche des trains de chemins de fer, et cette complexité existe même pour la progression en air calme, indépendamment de l'agitation de l'atmosphère. Il est bien établi aujourd'hui que cette résistance ne doit être considérée comme entièrement négligeable que dans le cas de vitesse très faible. Par contre, elle peut acquérir, notamment pour les trains express, une importance de premier ordre, sur laquelle on ne possède encore que des indications incertaines. Cependant, s'il est vrai que les études faites depuis quelques années sur cette question n'ont pas permis de définir d'une manière précise la part d'influence que peut avoir la résistance *normale* de l'air sur la marche des trains, elles ont du moins permis de poser les principes d'après lesquels la théorie peut en être établie.

23. — Considérations théoriques. — En France, *M. Desdovits*, Ingénieur en chef adjoint du matériel et de la traction des chemins de fer de l'État, s'est particulièrement attaché à l'étude de ce difficile problème. Nous aurons à rendre compte de la méthode expérimentale qu'il a employée pour l'évaluation des résistances de toutes sortes, et nous ne croyons pouvoir mieux faire que d'exposer ici, d'après les notes qu'il a bien voulu nous fournir sur ce sujet, la théorie que ses nombreuses recherches l'ont conduit à admettre.

Si on considère un corps solide de forme oblongue, par exemple un prisme droit à base rectangulaire, progressant avec une certaine vitesse dans une atmosphère calme, parallèlement à son axe de figure, il est évident que l'air, directement atteint et refoulé par la

surface de front (section droite antérieure du prisme), se comprime et produit par réaction une *pression* correspondante sur la base du prisme. En même temps, et en vertu de son excès de pression, cet air s'écoule latéralement dans l'atmosphère ambiante. Il est ensuite ramené par la réaction élastique de cette atmosphère *le long de la surface latérale* du solide en marche; cette surface n'exerce sur lui, si elle est exempte d'aspérités, qu'une action de *frottement* peu sensible, déterminant un entraînement partiel, — en d'autres termes la formation d'une gaine fluide, dont les couches internes participent plus ou moins complètement à la translation du solide, — tandis que celles du dehors par un glissement relatif se retrouvent progressivement à l'état de repos comme l'atmosphère extérieure. A l'arrière du prisme, le *vide* qui se forme à tout instant est immédiatement comblé par l'irruption des filets d'air primitivement séparés de part et d'autre, et il s'établit une pression un peu inférieure à celle de l'atmosphère, ou, suivant le langage adopté, une *non-pression* plus ou moins sensible.

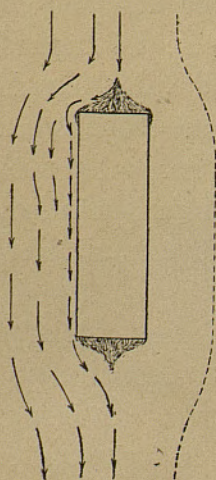


Fig. 15.

On peut se figurer, d'après ce qui précède, la loi des trajectoires relatives des filets d'air déviés. Ceux qui se trouvaient à l'avant (fig. 15), exactement dans l'axe du mouvement, viennent s'écraser contre la surface d'attaque et s'y épanouissent par un coude brusque, laissant seulement à la partie centrale une petite région d'air stagnant. Les filets infléchis glissent sur la surface de front et, sous l'influence de la vitesse acquise, ils

en dépassent plus ou moins le contour ; repoussés par l'air ambiant, ils s'infléchissent brusquement de nouveau, pour prendre une direction parallèle à la surface latérale ; les plus rapprochés du solide ayant leur vitesse relative réduite par l'entraînement, tandis que celle des filets extérieurs se rapproche de celle de l'atmosphère ambiante égale et contraire à celle de la marche. Arrivés à la partie arrière du solide, les filets d'air subissent une nouvelle inflexion brusque, et sont enfin ramenés, par leur convergence mutuelle, au parallélisme.

Si, au lieu d'un corps solide isolé, on considère une *série de corps* de dimensions transversales analogues, sinon identiques, séparés les uns des autres par *certaines intervalles* (fig. 16), tels par exemple que les véhicules qui composent un train de chemin de fer, il se produit une superposition d'effets plus ou moins complexe. Les filets d'air qui, après le passage du premier véhicule, viennent converger pour remplir l'espace laissé libre, rencontrent obliquement la face de front du véhicule suivant, et sont de nouveau rejetés à l'extérieur, laissant dans la partie centrale une région neutre, d'autant plus étendue que la distance entre les deux véhicules est plus faible ; dans cette région séjourne une masse d'air stagnant, entraînée avec le train lui-même.

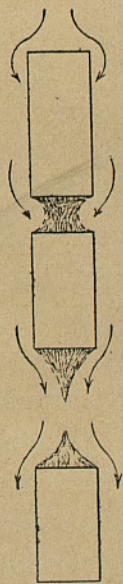


Fig. 16.

L'effet est beaucoup plus prononcé si, au lieu de véhicules ayant tous des caisses de formes à peu près identiques séparées par de faibles intervalles, il se trouve, interposés entre plusieurs véhicules à caisses

élevées, des wagons réduits à de simples plates-formes. Dans ce cas, le courant d'air relatif se referme plus ou moins complètement et le premier des véhicules à caisse, faisant suite à cette coupure, se trouve presque dans les mêmes conditions que celui qui forme la tête du train.

En résumé, il y a lieu de considérer, pour un train de chemin de fer :

1^o la résistance *des surfaces de front*, qui attaquent directement l'air ambiant ;

2^o la résistance *des surfaces latérales*, ou le frottement ;

3^o la résistance produite sur la *face arrière* par une sorte d'aspiration.

4^o la résistance des surfaces transversales des véhicules successifs, partiellement masquées.

24. — Résistance des surfaces de front. — On admet généralement que la réaction produite sur une surface plane S exposée, perpendiculairement au plan, à l'action d'un vent relatif, de vitesse V , est proportionnelle à la fois à l'étendue de la surface et au *carre de la vitesse*.

Cette résistance serait donc représentée par un produit θSV^2 , θ étant un coefficient invariable (pour une valeur donnée de la *pression atmosphérique*).

La loi de proportionnalité de la résistance à l'étendue superficielle, bien que généralement admise *a priori*, n'est pas évidente : elle comporte même certainement des restrictions. Il n'y a pas similitude *géométrique* ni à plus forte raison *dynamique* dans le mouvement de deux colonnes d'air rencontrant, avec la même vitesse relative, des surfaces d'étendues et de

formes différentes. Il est même certain que si deux surfaces ont des aires égales, mais que le contour linéaire de l'une d'elles soit beaucoup plus développé (par exemple si l'on compare à un carré une bande rectangulaire très allongée), l'influence des perturbations produites au voisinage des arêtes doit compliquer et aggraver pour cette dernière la loi de résistance. D'autre part, à ne comparer que des surfaces de même forme, la loi qui nous occupe ne saurait encore être considérée comme exacte, par ce motif que l'action d'un plan en mouvement dans un air calme s'étend au delà des limites de sa superficie. Un observateur placé à l'avant d'une locomotive en marche et protégé par une tôle verticale, peut en effet, quelle que soit la vitesse, regarder la voie au-dessus du bord de cette tôle sans éprouver en aucune façon l'impression du vent relatif. Dans le cas de surfaces à *contour plein* et de formes à peu près semblables, la loi de proportionnalité aux aires peut cependant être admise, pour de faibles variations, notamment lorsqu'il s'agit de comparer entre eux des véhicules de chemin de fer dont les dimensions transversales présentent peu de différences.

La proportionnalité des résistances au *carré des vitesses*, bien qu'on ait cherché à la démontrer par des considérations théoriques, ne saurait être acceptée non plus comme une loi physique exacte. On peut admettre qu'elle exprime empiriquement d'une manière assez satisfaisante la variation de la résistance depuis 0 jusqu'à une vitesse de 14 ou 15 mètres par seconde (50 kil. à l'heure) ; mais au delà l'accroissement de résistance est beaucoup moins rapide que ne l'indique cette loi.

A. *Surfaces normales*. — Les études entreprises

sur la résistance de l'air sont très nombreuses, mais la plupart ont été faites dans des conditions trop spéciales pour qu'on puisse en faire une application immédiate au problème qui nous occupe, celui de la traction des véhicules de chemins de fer.

Les expériences les plus connues sont celles de *Borda* à la fin du siècle dernier ; de *MM. Piobert, Morin et Didion* en 1835, les unes et les autres étaient faites sur des plans minces ou des modèles de dimensions réduites, animés d'un mouvement circulaire ou rectiligne et dont on faisait varier la vitesse dans des limites étendues.

Poncelet a donné, comme résumant les expériences connues, la formule $p = 0,088 V^2$, dans laquelle p représente la pression en kilogrammes sur une surface de 1 mètre carré. Cette formule donne pour la vitesse de 20 mètres à la seconde (72 kil. à l'heure), ordinairement prise comme terme de comparaison : $p = 35$ kilogrammes.

D'autres auteurs ont donné des coefficients différents, généralement plus élevés, dont la justification fait défaut.

C'est à l'expérience des chemins de fer qu'il convient de demander la valeur effective de la résistance de l'air, de même qu'on a déterminé par des mesures *directes* les coefficients de glissement des fusées et de roulement. Un véhicule de chemin de fer, tel qu'une voiture à voyageurs, abstraction faite de ses roues et de quelques parties un peu saillantes, est un solide géométrique de forme simple, pour lequel la résistance de l'air se réduit très sensiblement à celle qu'éprouve sa section transversale antérieure, exposée normalement à la marche. Si donc on a déterminé la résis-

tance totale de ce véhicule, pour une vitesse connue, par exemple 72 kilomètres à l'heure, et qu'on en ait déduit la valeur connue de la résistance au roulement (glissement des fusées), on obtiendra la réaction totale de l'air : en divisant la valeur trouvée par la surface transversale des véhicules, on aura une évaluation *par excès, mais très approchée, de la résistance de l'air par mètre carré*, pour la vitesse considérée.

L'expérience peut être faite avec une grande précision, en observant le mouvement d'un véhicule abandonné à lui-même, par temps calme, de préférence sur une partie de voie en pente, afin que la diminution de vitesse ne soit pas trop rapide. Cette expérience donne, pour la vitesse de 72 kilomètres à l'heure, sensiblement le même résultat que la formule de Poncelet : 35 kilogrammes par mètre carré de section transversale.

La même méthode permet d'étudier la *loi de variation* des résistances *avec la vitesse*, entre des limites très étendues. Ici, comme il s'agit seulement de la *forme* de la fonction, indépendamment de ses coefficients, il y a avantage à opérer, non plus avec un véhicule ordinaire, mais avec une machine qui fournit elle-même l'impulsion initiale. On a pu opérer dans ces conditions, depuis les plus faibles vitesses, jusqu'à une allure de plus de 120 kilomètres à l'heure. On a reconnu que la loi différait sensiblement de celle du carré des vitesses, qui avait pour expression graphique une branche de parabole, telle que $am n$ (fig. 17) : la progression pour les vitesses élevées est moins rapide, et sa représentation géométrique correspond plutôt à une branche d'hyperbole $a m n_1$.

La formule du 2^e degré $r = \theta V^2$, relative à la résis-

tance r par *mètre carré* de surface de front, peut être admise pratiquement pour les vitesses comprises entre 0 et 40 ou 50 kilomètres à l'heure (12 à 15 mètres à la seconde). Pour des vitesses plus élevées, on a une approximation beaucoup plus satisfaisante en assimilant la courbe de résistance à une droite, ce qui correspond à l'équation, purement empirique : $r = k (V-a)$,

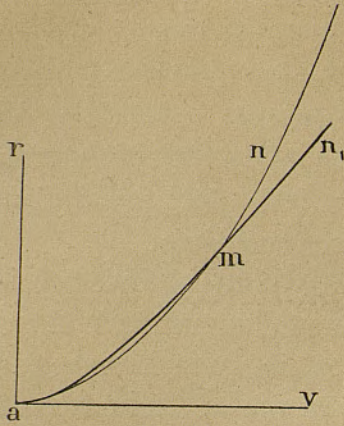


Fig. 17.

V étant la vitesse en mètres par seconde, les coefficients d'application sont :

pour la formule du 2^e degré : $\vartheta = 0,1$ } V étant la vitesse en mètres
pour la formule du 1^{er} degré } $k = 2,3$ } par seconde.
} $a = 5$

Pour le matériel à voie normale, la surface de front varie de 5 à 7 mètres carrés ; on prend ordinairement 6 m² comme surface moyenne.

B. *Surfaces d'attaque obliques.* — Si la partie antérieure du corps mobile, qui exerce directement son action sur l'air ambiant, au lieu d'offrir comme on l'a supposé jusqu'ici une section perpendiculaire au sens de la marche, se présente avec une inclinaison plus ou moins grande, la déviation de la masse fluide sera moins prononcée et la réaction qui en résulte sera moins énergique.

On peut, en opérant sur des modèles à échelles réduites, se rendre compte du bénéfice apporté par l'emploi de diverses formes géométriques plus ou moins aiguës.

En opérant sur des prismes à section rectangulaire, garnis de poutes de différentes formes, on a trouvé que la diminution de résistance qui en résulte pouvait être évaluée à l'aide des coefficients contenus dans le tableau ci-dessous :

NATURE DE LA PROUE	COEFFICIENT DE RÉDUCTION DE LA RÉSISTANCE
Angle dièdre isocèle (Rapport de la hauteur à la base : 3/4)	0,40
Pyramide à base carrée ayant même côté de base et même hauteur que ci-dessus.	0,35
Demi-cylindre	0,40
Ogive ayant une hauteur égale à la largeur de sa base.	0,50

C. *Surfaces échelonnées.* — La surface d'attaque peut présenter une série de plans parallèles entre eux, mais disposés par échelons : c'est ce qui arrive par exemple dans les locomotives, où la traverse d'avant, la section du corps cylindrique, l'abri du mécanicien forment une série d'échelons. L'expérience constate que la résistance totale est très sensiblement égale à celle d'une surface transversale unique, égale à la projection de l'ensemble.

25. — Résistance des surfaces latérales. — Si la surface latérale est uniquement formée de parois planes ou cylindriques, parallèles à la marche et sans parties saillantes, la résistance de l'air est une simple action de frottement, et sa valeur est négligeable pour toutes les vitesses.

S'il existe le long des parois des parties plus ou moins saillantes, elles éprouvent une résistance analogue à celle des surfaces de front. Toutefois, à cause de l'en-

traînement d'air qui existe jusqu'à une certaine distance du corps en mouvement, le coefficient de résistance est diminué. On constate par exemple que pour un train de chemin de fer, à la vitesse de marche ordinaire, un élément de surface transversale avoisinant immédiatement la paroi latérale, n'éprouve que le $1/4$ de la résistance de la surface de front. Cette influence se fait sentir jusqu'à une distance de un peu plus de 1 mètre, où l'air extérieur se retrouve à l'état de repos.

26. — Résistance à l'arrière. — La dépression produite par le remous de l'arrière est difficile à évaluer directement.

Différentes observations indiquent que la résistance correspondante est très faible, sinon entièrement négligeable. Il faut remarquer d'ailleurs que les mesures de résistance, prises sur des plans minces, ou sur des surfaces prismatiques, correspondent en réalité à la somme des résistances de la face antérieure et de la face postérieure : et c'est à cette somme qu'il convient d'appliquer les coefficients indiqués plus haut.

27. — Résistance des surfaces partiellement masquées. — C'est encore à l'expérience des chemins de fer qu'il faut demander les coefficients applicables aux divers groupements que peuvent présenter les véhicules,

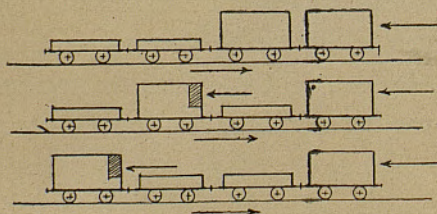


Fig. 18.

de gabarit transversal à peu près identique, mais séparés par des intervalles plus ou moins grands (fig. 18). En opérant au

moyen d'une portion de train composée de véhicules

à caisse et de véhicules plats, et en faisant varier le groupement de manière à intercaler entre deux wagons couverts un ou plusieurs wagons plats, on constate que, pour une distance égale à 5 fois le côté de sa section transversale (cette section est très sensiblement un carré), l'action de la 1^{re} caisse sur la 2^e s'annule. Pour une distance deux fois plus faible, (soit la longueur d'un véhicule plat, interposé entre deux wagons couverts), la résistance est réduite de $1/3$. Pour l'intervalle ordinaire existant entre deux wagons consécutifs (soit 1 mètre environ, avec une section transversale de $2^m,5 \times 2^m,5$), la résistance se réduit à 10 ou 12 p. 100 de sa valeur normale.

On voit que dans un train de voyageurs de proportions ordinaires, dont le premier véhicule, si on le suppose directement exposé au vent relatif, supporterait, à la vitesse de 72 kilomètres à l'heure, une pression de $2,5 \times 2,5 \times 35 = 219$ kilogrammes, l'action de l'air sur chacun des véhicules consécutifs sera seulement de 22 à 25 kilogrammes soit 2 à 3 millièmes de leur poids. C'est, un peu plus que la résistance due à ce qu'on nomme communément le *roulement*, c'est-à-dire en réalité le *frottement des fusées*.

Pour un train de marchandises *composé de wagons couverts*, la résistance de l'air par véhicule sera moindre, à cause de la vitesse plus faible. Mais si des wagons plats et des wagons couverts se succèdent dans un *ordre quelconque*, la résistance moyenne peut augmenter dans des proportions importantes.

Il résulte évidemment de tout ce qui précède que pour obtenir la plus grande réduction possible de la résistance due à la progression dans l'air ambiant, on devrait chercher, au moins pour les trains de vitesse, à

réaliser la forme générale d'un fuseau, cylindrique ou prismatique, à faible section transversale, terminé à l'avant par des surfaces obliques et ne présentant sur sa longueur que le moins possible de solution de continuité. Nous posons ce principe, mais à un point de vue purement théorique ; l'avenir dira s'il y a possibilité de faire profiter la pratique de l'étude qui précède, ou si l'on n'arriverait qu'à compliquer outre mesure, sans utilité suffisante, le mode de construction actuel.

Pour les trains express, l'une des considérations les plus intéressantes paraît être de réduire la réaction de l'air ambiant sur la locomotive. La Compagnie des chemins de fer de Paris-Lyon-Méditerranée construit en ce moment des machines dont les formes extérieures ont été spécialement étudiées à ce point de vue. Eu égard aux vitesses élevées qui sont atteintes aujourd'hui, on peut attendre des perfectionnements de ce genre une diminution sensible de la résistance de la locomotive.

En résumé, la résistance de l'air s'exerce suivant une loi très complexe qu'on ne peut songer à représenter avec quelque précision par une formule. L'expression θSV^2 indiquée plus haut est applicable à la surface de front de la locomotive.

Appliquée aux grandes vitesses, elle fournit une évaluation par excès qu'on peut admettre sans inconvénient eu égard à l'incertitude qui existe sur la valeur de la résistance des autres véhicules. En tous cas on pourra, d'après les considérations que nous avons exposées, modifier la valeur du coefficient θ pour tenir compte approximativement de la nature des véhicules remorqués, de leur nombre et de la composition

du train. Le travail t_3 exigé par cette résistance totale, pour une translation égale à *l'unité de longueur*, entrera donc dans l'expression générale de la résistance d'un train sous la forme : $t_3 = \theta SV^2$.

28. — Résistance due au vent extérieur. — Ce qui précède se rapporte à la résistance engendrée par la translation des véhicules dans un air calme. Cette résistance est souvent modifiée par l'agitation de l'atmosphère ou *vent extérieur* dont les effets peuvent être, suivant sa direction, favorables ou nuisibles à la marche, mais ce dernier cas est de beaucoup le plus fréquent.

Si le vent, supposé doué d'une vitesse constante v , se présente dans une direction *exactement opposée* à la marche, V étant la vitesse du train, la *résistance totale de l'air* devra être considérée comme résultant de la vitesse relative ($V + v$) : elle se trouve donc accrue dans une proportion plus ou moins considérable. Avec les vitesses du vent existant dans nos climats, l'augmentation de résistance pour un train de voyageurs, à la vitesse moyenne de 72 kilomètres, atteint fréquemment 10 à 15 pour cent, parfois 20 à 30 pour cent, exceptionnellement 50 pour cent.

Si le vent se présente, au contraire, *dans le sens* même de la marche, la vitesse relative de l'air sera la différence ($V - v$), et la résistance sera diminuée : mais cette diminution est moindre que l'accroissement produit par le vent contraire. Dans le cas, de beaucoup le plus habituel, où le vent présente une direction *oblique* par rapport à la marche, on peut considérer sa vitesse comme décomposée suivant le sens du mouvement et suivant le sens perpendiculaire. La première composante,

agit, suivant son sens, pour augmenter ou diminuer la vitesse relative, et par suite la réaction sur le *front* du train. La composante *transversale*, agissant sur les côtés du train, a *toujours* pour effet de rendre oblique la direction relative des filets atmosphériques, et par suite de les faire agir sur une plus grande étendue des surfaces de front imparfaitement masquées. Cet effet se traduit par une augmentation de la résistance, qui est surtout sensible pour les trains longs, comme les trains de marchandises. — Par un vent violent, incliné à 45° sur la direction de la marche, la résistance de ces trains peut se trouver plus que doublée, et cette résistance accidentelle est une des principales causes du retard des trains de voyageurs. La composante transversale du vent peut encore avoir pour effet de presser les boudins des bandages sur les rails lorsque l'intensité de cette force est suffisante pour surmonter leur frottement transversal. Il en résulte un surcroît de résistance qui peut être assez prononcé.

§ 4. — RÉSISTANCES ACCIDENTELLES.

Les causes de résistances que nous avons examinées jusqu'ici sont celles qui existent d'une manière permanente dans la marche des trains, et que l'on peut considérer comme inhérentes à la locomotion sur les chemins de fer. A ces résistances viennent s'ajouter d'une manière assez fréquente d'autres efforts que nous appellerons *accidentels* pour les distinguer des premiers, mais qui présentent encore, à proprement parler, un caractère normal¹.

1. Nous nous bornerons à mentionner pour mémoire les résistances

La résistance opposée à la marche par le *vent extérieur* fait en réalité partie de cette catégorie d'efforts ; nous en avons parlé toutefois au paragraphe précédent, *Résistance de l'air*, où sa place se trouvait marquée logiquement. Il nous reste maintenant à examiner deux causes de résistances accidentelles d'importance très variable, ce sont :

1° L'influence de la *pesanteur* qui s'exerce dans un sens favorable ou défavorable à la marche, suivant que la voie descend une *pente* ou, au contraire, gravit une *rampe* ;

2° La résistance spéciale due à la circulation du train dans les courbes.

29. — Résistance due à la gravité. — La pesanteur est une force indépendante de la conception des voies ferrées comme des conditions spéciales d'établissement du matériel roulant, et qui donne lieu à une résistance dont la valeur irréductible résulte de l'inclinaison de la voie et du *poids total* transporté. Une fraction importante de ce poids total étant représentée par celui des véhicules eux-mêmes, *la tare* du train, on voit que la considération de la gravité, en tant que cause de résistance conduit comme celle du roulement à chercher la *réduction du poids mort*.

L'action de la pesanteur, *résistante* dans les rampes, devient *motrice* sur les profils en pente, et comme chaque section de la ligne est parcourue dans les deux sens par un nombre de trains à peu près égal, et de charges sensiblement équivalentes, il s'établit (au

anormales qui peuvent se manifester exceptionnellement et que l'on évite par les soins apportés dans la construction et l'entretien des véhicules.

moins partiellement) une compensation, au point de vue de l'effort moyen de traction. Mais dans tous les cas la considération de la *rampe maximum* présente une importance de premier ordre pour la détermination de la *valeur maximum de la résistance*.

Soit i la déclivité, c'est-à-dire, suivant le mode de mesure adopté, la différence de niveau entre deux points dont la distance horizontale est de 1 mètre, ou la tangente trigonométrique de l'angle α que fait la voie avec

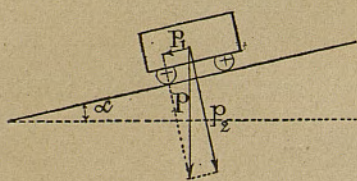


Fig. 19.

l'horizon (fig. 19). Il est clair que si on décompose le poids P d'un véhicule suivant deux forces, l'une parallèle à la marche et l'autre perpendiculaire, la com-

posante P_1 constitue une résistance additionnelle, dont

la valeur est $P \sin \alpha$ ou $P \times \frac{Tg \alpha}{\sqrt{1+Tg^2 \alpha}} = P \times \frac{i}{\sqrt{1+i^2}}$

ou très sensiblement $P i$. Cette force s'ajoute à la résistance du véhicule; tandis que la composante

$P_2 = P \times \frac{i}{\sqrt{1+i^2}}$ peut être substituée au poids total P , avec lequel elle ne présente qu'une différence insignifiante, pour l'évaluation des efforts de frottement et de roulement.

En résumé, l'influence d'une rampe d'inclinaison i est pratiquement équivalente à une augmentation de résistance égale au produit du poids du train par la valeur de la rampe, et l'expression $t_4 = P i$ représente en même temps le *travail* résistant pour une translation égale à l'unité.

30. — Résistance spéciale due aux courbes. — Le surcroît de résistance dû au passage d'un train dans les voies en courbes est très variable, non seulement suivant la valeur du rayon adopté, mais encore selon les conditions d'établissement des véhicules. Nous n'aurons pas à examiner dans cet ouvrage les nombreuses solutions imaginées pour atténuer autant que possible cette résistance spéciale. Nous nous préoccupons seulement d'évaluer les efforts additionnels qui se développent à défaut de ces dispositions susceptibles de les réduire, et nous commencerons par les calculer en supposant le matériel entièrement rigide.

A. *Formule théorique.* — La résistance due aux courbes est produite par les deux causes suivantes :

Solidarité des roues et des essieux.

Parallélisme des essieux.

La force centrifuge peut aussi engendrer une résistance spéciale si elle est suffisante pour déterminer le frottement des boudins contre le rail extérieur, mais outre que le travail ainsi produit est faible, comme nous l'avons fait remarquer à propos de l'influence du vent transversal, nous pouvons admettre que la surélévation du rail extérieur, ou *dévers*, annule dans la plupart des cas l'action de la force centrifuge.

Solidarité des roues et des essieux. — En raison de cette solidarité, et de la différence des chemins à parcourir simultanément sur les deux files de rails, il se produit un certain glissement à la jante de la roue intérieure. Soient :

ρ le rayon moyen de la courbe.

e la largeur de la voie.

P le poids total du véhicule.

f'' le coefficient de frottement.

Les diamètres des cercles de roulement des deux roues conjuguées étant supposés égaux, les chemins parcourus sont, pour un mouvement de translation du véhicule représenté par l'unité :

$$\text{pour la roue intérieure : } \frac{\rho - \frac{e}{2}}{\rho},$$

$$\text{pour la roue extérieure : } \frac{\rho + \frac{e}{2}}{\rho}.$$

La différence est $\frac{e}{\rho}$ et le travail correspondant à ce glissement du poids $\frac{P}{2}$, charge des roues intérieures sur les rails, a pour valeur : $\frac{f''Pe}{2\rho}$.

Il en résulte que, pour un rayon donné, cette résistance est proportionnelle à l'écartement des rails.

Parallélisme des essieux. — Le changement de direction imposé constamment au véhicule par la réaction permanente du rail extérieur sur le boudin de la roue d'avant, et par celle que le rail intérieur exerce parfois sur le boudin de la roue d'arrière, détermine un glissement transversal des bandages sur les rails ; le travail produit par le frottement des boudins est, comme nous l'avons fait remarquer, de peu d'importance. Pour apprécier le chemin parcouru par ce glissement transversal, on suppose que le véhicule décrit la circonférence entière de rayon ρ dont le développement est $2\pi\rho$. Revenu à son point de départ, il peut être considéré comme ayant pivoté autour d'un axe vertical passant par le centre de figure O, et dans ce mouvement les points frottants ont parcouru une circonfé-

rence de rayon OA (fig. 20) dont la longueur est :
 $2\pi \times \frac{\sqrt{e^2 + I^2}}{4}$. Il s'ensuit que pour un déplacement du

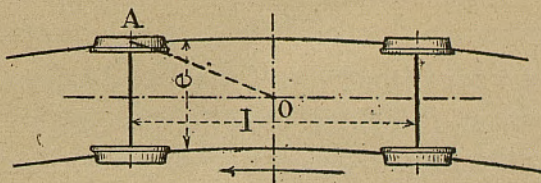


Fig. 20.

véhicule égal à l'unité, le chemin parcouru par le frottement de chacun des bandages est $2\pi \frac{\sqrt{e^2 + I^2}}{4}$, et

le travail correspondant à la charge totale sur rails P a pour valeur : $\frac{f'' P \sqrt{e^2 + I^2}}{2 \rho}$.

Pour un déplacement égal à l'unité, le travail résistant spécial d'un wagon circulant en courbe est donc : $\frac{f'' P e}{2 \rho} + f'' P \frac{\sqrt{e^2 + I^2}}{2 \rho}$ ou bien : $t_5 = \frac{f'' P}{2 \rho} (e + \sqrt{e^2 + I^2})$

On voit que la résistance est inversement proportionnelle au rayon de la courbe, et que pour un rayon donné, elle augmente avec la largeur de la voie et l'écartement des essieux.

Le coefficient de frottement f'' est assez variable selon l'état de l'atmosphère ; on peut lui attribuer la valeur moyenne de 1/6.

Les conditions très complexes de la progression d'un véhicule dans une voie en courbe, sous l'action des diverses forces qui le sollicitent (composante transversale de la pesanteur due au dévers de la voie, force centrifuge, composantes transversales des efforts agissant

sur les tendeurs d'attelage et sur les tampons de choc, réactions des rails sur les boudins des roues), ont été l'objet d'études nombreuses et de controverses, mais elles sont encore peu définies.

Nous ne nous étendrons donc pas davantage sur le côté purement théorique de cette question au sujet de laquelle on pourra consulter avec profit l'ouvrage de *Couche*¹, l'étude très complète publiée dans la *Revue générale des chemins de fer* par *M. Léon Pochet*², et la théorie de l'*inscription dans les courbes* par *M. Louis Le Châtelier*³. Nous devons toutefois appeler l'attention sur les conclusions tirées des formules qui précèdent. On a vu que, pour un rayon donné de la courbe, les résistances au glissement produites par la solidarité des roues avec les essieux et par le parallélisme de ceux-ci, sont proportionnelles à l'écartement des rails. Cette particularité constitue l'un des avantages de l'adoption des voies étroites, qui permet l'emploi des courbes raides pour les tracés sinueux.

B. *Observations sur la résistance réelle.* — Les conditions habituelles de construction de la voie et du matériel roulant sont de nature à atténuer beaucoup la résistance spéciale des courbes, en pleine marche. Le surhaussement du rail extérieur ne peut, il est vrai, compenser exactement l'action de la force centrifuge que si la vitesse est sensiblement celle pour laquelle le dévers a été calculé, mais elle entraîne une diminution

1. Voie, matériel roulant et exploitation technique des chemins de fer (3^e volume, page 649).

2. Théorie du mouvement en courbe sur les chemins de fer, avec ses applications à la voie et au matériel (N^o de février 1883, p. 138).

3. Voir le *Génie civil* du 3 octobre 1891.

de résistance dans la plupart des cas. En outre, et au moins pour le matériel à voyageurs, le jeu des boîtes à graisse par rapport aux plaques de garde, dans le sens transversal à l'axe de l'essieu, et la présence des *menottes* de ressorts laissent à ce dernier la faculté de converger vers le centre de courbure de la voie ; il est évident que, sans cette condition, la conicité des bandages qui, lorsque l'action de la force centrifuge est suffisante, établit une différence entre les chemins parcourus par les deux roues conjuguées, ne pourrait en aucune façon faciliter le passage en courbe. L'élément principal de la résistance se réduit alors au glissement longitudinal qui peut subsister en partie, comme conséquence de la solidarité des roues et des essieux. L'ensemble des véhicules plus ou moins nombreux d'un train semble donc devoir, en pleine marche, se déplacer avec autant de facilité que l'un d'eux roulant isolément, — le surcroît total de la résistance restant à peu près proportionnel au poids remorqué. — Les expériences de la *Commission des courbes de faibles rayons* ont mis en évidence l'exactitude de ce fait (46 D). D'ailleurs, la tension oblique des attelages a pour effet de ramener à leur position normale les véhicules, dont la tendance est d'attaquer sans cesse le rail extérieur à l'avant. Cette position normale d'un wagon en courbe est celle pour laquelle son axe transversal est dirigé vers le centre ; et si, comme on peut le voir sur le croquis ci-dessous (fig. 21), l'effort de

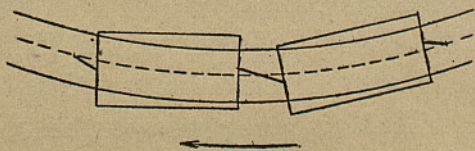


Fig. 21.

traction qui existe à l'arrière tend à l'en écarter, celui qui agit à l'avant tend à l'y ramener, et ces actions se compensent à peu près ; les deux efforts ne diffèrent que de la résistance opposée par le seul véhicule considéré.

Par contre, l'action directrice de la voie s'exerce intégralement sur les roues de la locomotive, et principalement sur celle qui *cisaille* le rail extérieur par son boudin, sous un angle d'autant plus ouvert que la courbe est plus raide.

Il faut remarquer que si les courbes entraînent nécessairement une augmentation de résistance au roulement, par suite de la rigidité des trains de roues et du parallélisme imposé en principe aux essieux d'un même wagon, d'autre part, elles font disparaître, même aux grandes vitesses, le mouvement serpentant ou *de lacet*, qui, dans les alignements droits, contribue à majorer la résistance due à la translation rigoureusement rectiligne.

Ces diverses circonstances, les plus favorables à la facilité du passage dans les voies en courbe, concourent donc à réduire la résistance totale au minimum, mais seulement lorsque le train s'y trouve complètement engagé. L'entrée et la sortie donnent lieu, en effet, à une réaction toute spéciale, temporaire, inhérente à chaque courbe et qui est due au changement de position que doivent subir les essieux, soit à l'entrée pour se rapprocher de la convergence autant que la constitution du véhicule peut le permettre, soit à la sortie pour revenir au parallélisme.

Enfin, il est essentiel d'observer que l'influence des courbes présente un caractère tout particulier d'aggravation lorsqu'il s'agit de la mise en marche, ou du *démarrage* d'un train. Au repos, les boudins des roues

s'appuient sur la file intérieure des rails, à cause du dévers. Le train de roues d'avant tend à reprendre la position moyenne par le roulement qui le porte vers le rail extérieur ; mais celui d'arrière étant incité par la traction oblique tend à conserver sa position ; le glissement du bandage sur le rail intérieur se trouve alors augmenté par suite de la différence qui existe entre les diamètres des cercles de roulement des roues d'un même essieu (6).

Au démarrage en courbe, la locomotive subit particulièrement l'effet de glissement dont il vient d'être parlé et qui tend à se transformer en *patinage*, c'est-à-dire en mouvement de rotation des essieux sur place. Aussi cherche-t-on, dans l'établissement de la voie, à éviter les courbes, de même que les rampes, sur les points de la ligne où les stationnements sont prévus.

Ce que nous avons exposé suffit pour montrer que la résistance spéciale due aux courbes dépend d'un trop grand nombre d'éléments pour qu'il soit possible de la représenter par une formule exacte. En nous occupant au chapitre suivant de l'évaluation des résistances totalisées d'un train de chemin de fer, nous ferons connaître les résultats des expériences faites à diverses époques au sujet de la circulation en courbes.

SECTION II

Évaluation de la résistance totale des trains.

§ 1^{er} Etude théorique. — § 2. Exposé des méthodes expérimentales. — § 3 Résultats d'expériences. — Formules diverses. — § 4. Résistance des locomotives et tenders. — § 5. Résistance des trains des chemins de fer à voie étroite. — § 6 Conclusions.

§ 1. — ÉTUDE THÉORIQUE.

La résistance totale d'un train sera obtenue en ajoutant ensemble les résistances partielles calculées précédemment, savoir :

Le frottement des fusées (t_1) ;

La résistance au roulement (t_2) ;

Celle de l'air (t_3) ;

Celle de la gravité (t_4) ;

(Quantités qui se rapportent aux alignements droits) ;

Et, s'il y a lieu, la valeur de (t_5) qui représente le travail résistant spécial dû aux courbes.

31. — Mouvement de lacet. — Pour obtenir le maximum du travail total T, on serait conduit à introduire aussi dans la formule un terme afférent à une résistance que nous avons déjà mentionnée, celle due au *lacet*. Le travail qu'il engendre est très variable ; il dépend de diverses circonstances, et notamment des conditions de construction et d'entretien des véhicules. Un léger défaut de parallélisme des essieux, ou une faible différence dans les diamètres des roues conjuguées suffisent pour provoquer le lacet.

L'état de la voie possède aussi une influence marquée sur la nature du mouvement. Les petites dénivellations qui peuvent se présenter dans le sens transversal et les irrégularités de toutes sortes entraînent inévitablement des perturbations.

Mais, indépendamment de ces causes, le lacet, qui se manifeste surtout sur les trains de voyageurs, en raison de leur vitesse, peut et doit se produire momentanément en ligne droite, avec un matériel en parfait

état et sur une bonne voie, si accidentellement les véhicules se trouvent poussés de côté. Les chemins parcourus par les roues d'un même essieu n'étant plus égaux, chaque véhicule tourne sur lui-même pour revenir dans l'axe de la voie, mais la vitesse acquise fait qu'il dépasse cette position, et la roue qui se trouvait la plus rapprochée du rail devient celle qui en est la plus éloignée; le mouvement tournant recommence avec moins d'importance, et le véhicule ne reprend sa position normale qu'après une série d'oscillations transversales. Il en résulte un certain glissement des roues qui crée une résistance additionnelle. Toutefois, tant que l'amplitude de ce mouvement serpentant n'est pas suffisante pour que les boudins des bandages viennent heurter les champignons des rails, cette résistance spéciale paraît être peu importante. En tous cas, s'il est vrai que la forme conique du profil des bandages est nécessaire pour faciliter le passage dans les courbes, et que, pour ce motif, elle s'impose, on ne doit toutefois la considérer comme ayant une influence sérieuse sur le mouvement de lacet que lorsque celui-ci a pour causes des défauts du matériel ou de la voie. D'ailleurs, si des véhicules à roues de forme cylindrique se trouvaient poussés contre une file de rails, ils pourraient éprouver pendant un temps indéterminé, en raison du frottement des boudins, un supplément de résistance plus prononcé que celui provoqué par le lacet.

Les locomotives sont exposées au mouvement serpentant, en raison des forces d'inertie développées par les mouvements relatifs des organes du mécanisme. Cette cause de perturbation dans la marche est combattue efficacement par des dispositions spéciales de construction des machines, et la stabilité des locomotives est

maintenant assurée d'une manière satisfaisante : nous devons faire remarquer aussi que le lacet se produit sur les véhicules du train indépendamment de l'influence qu'ils peuvent subir de la part de la locomotive, et que cette perturbation se manifeste lorsque les véhicules sont abandonnés à eux-mêmes sur une voie en pente.

On observe, en général, que l'amplitude du mouvement serpentant, et l'importance des chocs qui peuvent en être la conséquence, augmentent de la tête à la queue du train, ce qui s'explique par la décroissance de l'effort de traction : les véhicules sont d'autant moins bien assujettis à se maintenir dans l'axe de la voie que cet effort est plus faible.

Le mouvement serpentant augmente d'importance avec la vitesse et diminue avec l'écartement des essieux. Enfin, toutes choses égales, il se modifie suivant la nature du profil : très prononcé sur les pentes à forte déclivité, il peut disparaître complètement sur les rampes, à cause de l'augmentation de l'effort de traction.

Le travail résistant dû au lacet peut être considéré, par approximation, comme proportionnel au poids P du véhicule et à la vitesse V . Il serait donc représenté par l'expression $k' P V$. Toutefois, le coefficient k' devient très faible lorsque le terme qu'il affecte est introduit dans l'expression générale de la résistance *en rampes et en courbes* (30).

32. — Influence de la longueur du train à poids égal.

— A ne considérer que le lacet, il résulte de ce qui précède que la résistance à la traction en alignement droit, *pour une même charge remorquée*, doit augmenter avec la longueur du train. Il en est de même dans les courbes, mais c'est alors, comme nous le verrons,

leur résistance spéciale qui est cause de cette majoration. En pratique, ces conclusions ont été généralement vérifiées.

33. — Formule générale de la résistance des véhicules d'un train. — Cette formule théorique est la suivante :

$$T = \frac{f(P-p)r}{R} + \frac{kP}{R} + \theta S v^2 \pm Pi + \frac{f''P}{2\rho}(e + \sqrt{e^2 + I^2}) + k'Pv$$

Chacun des termes exprimant un travail par unité de chemin parcouru, T indique en même temps le travail total et la force à appliquer à la traction pour surmonter l'ensemble des résistances.

Nous rappellerons la signification des autres notations :

f coefficient de frottement des fusées d'essieux sur les coussinets de boîtes à graisse.

r rayon des fusées supposées cylindriques.

P poids total du véhicule. P peut évidemment représenter aussi le poids d'un ensemble de wagons.

p poids des trains de roues du ou des véhicules remorqués.

R rayon des roues au contact des rails.

k coefficient relatif à la résistance au roulement proprement dit.

θ coefficient relatif à la résistance de l'air.

S surface de front du véhicule isolé ou du train.

v vitesse.

i déclivité de la voie exprimée par la tangente trigonométrique de l'angle qu'elle fait avec l'horizontale.

f'' coefficient de frottement des bandages sur les rails.

ρ rayon moyen de courbure de la voie.

I écartement des essieux d'un véhicule, supposé à deux essieux.

Rappelons aussi que le second terme $\frac{k P}{R}$ qui concerne le *roulement* est très minime si la voie est bonne et si le matériel est en parfait état. Le coefficient $\frac{k}{R}$ que nous représentons par f'' n'est pas à proprement parler un frottement ; il se rapporte à l'ensemble des petites résistances que nous avons analysées, et qui, selon les circonstances, peuvent se trouver pratiquement très peu importantes ou nulles ; on ne saurait lui attribuer une valeur moyenne, et le terme $f''P$ est conservé dans la formule générale pour mémoire.

Le poids P entre dans tous les termes, sauf le troisième qui concerne la résistance de l'air. Toutefois, dans le premier terme entre également le poids p des trains de roues, et si l'on se reporte à leur charge moyenne habituelle, on reconnaît qu'il est permis de poser approximativement $P - p = \frac{5}{6}P$. En faisant la substitution et divisant tous les termes par P , on aura l'effort résistant T par unité de charge :

$$T' = \frac{5}{6} \times \frac{fr}{R} + f' + \frac{\theta Sv^2}{P} \pm i + \frac{f''}{2S} (e + \sqrt{e^2 + l^2}) + k'(v)$$

La première partie de la formule, constituée par les trois premiers termes, comprend les résistances fixes et permanentes qui ne dépendent ni du profil ni du tracé de la voie. La seconde correspond aux résistances essentiellement variables en raison des déclivités et des sinuosités qui se rencontrent plus ou moins sur toutes les lignes de chemins de fer.

D'après cette formule, la résistance par unité de charge serait, pour un poids total donné, théoriquement indépendante à la fois du nombre des essieux qui répartissent ce poids sur les rails, et de la longueur

du train, abstraction faite de la résistance de l'air calme. Ces deux observations ne se trouvent pas vérifiées en pratique.

En ce qui concerne la répartition de la charge, les résultats des expériences faites au sujet du coefficient de frottement des fusées (16) suffisent pour expliquer l'influence du nombre des essieux sur la résistance propre d'un poids donné de véhicules. La longueur du train, qui dépend ordinairement de ce nombre d'essieux, n'est pas non plus négligeable à d'autres points de vue.

Le terme $\frac{\theta SV^2}{P}$ montre que la résistance de l'air par unité de poids transporté, décroît lorsque la charge augmente, et si cette augmentation est la conséquence de l'accroissement du nombre des véhicules, l'influence de la variation de longueur du train se complique en raison des remous de l'air interposé entre les véhicules. Cette considération explique la nécessité d'attribuer au coefficient θ une valeur suffisante pour tenir compte des réactions atmosphériques autres que la résistance des surfaces normales à la direction du mouvement, et démasquées.

Le nombre des essieux et la longueur d'un train de poids déterminé ayant une influence appréciable sur la valeur de l'effort de traction qui doit être appliqué à l'unité de charge, on voit que, parmi les nombreux éléments pouvant influencer sur cet effort, la *composition* du train est à prendre en considération.

§ 2. — DESCRIPTION DES MÉTHODES EXPÉRIMENTALES.

34. — Exposé du sujet. — L'étude analytique des causes qui concourent à la résistance des trains indi-

que la voie à suivre pour construire un matériel aussi parfait que possible, mais la réalisation de ce desideratum dépend de conditions diverses qu'on ne saurait trouver réunies dans le *matériel existant* d'une exploitation de chemin de fer. Nous avons montré qu'il serait illusoire de chercher une formule de la résistance établie *a priori*. Il n'en était pas moins nécessaire de s'arrêter aux évaluations théoriques, très utiles pour l'interprétation judicieuse des résultats parfois anormaux et divergents que fournissent les recherches expérimentales.

Au point de vue immédiat de la pratique, il importe de déterminer, d'une manière au moins approximative, et en bloc, la résistance opposée à la traction par des trains de composition variable aux différentes vitesses admises en service.

Des recherches nombreuses ont été entreprises dans cet ordre d'idées, depuis les premiers temps de l'exploitation des chemins de fer, par diverses méthodes que nous allons examiner.

Il est essentiel de remarquer, tout d'abord, que l'usage est d'exprimer la résistance des trains en kilogrammes par tonne, ce qui peut s'entendre de la charge remorquée, ou du *poids brut* comprenant celui de la locomotive et du tender ; or c'est généralement la première manière qui est adoptée, la machine exigeant, par son double caractère de véhicule spécial et de moteur, une évaluation particulière des résistances.

35. — Évaluation par la gravité. — A diverses époques, on a cherché à utiliser le travail de la pesanteur pour produire le mouvement des véhicules dans des conditions permettant de déterminer leur résistance

totale pour une vitesse connue. Si on abandonne un ou plusieurs wagons à eux-mêmes sur une pente d'inclinaison suffisante pour entretenir leur mouvement, la vitesse s'accélère jusqu'au moment où le travail croissant des résistances devient égal au travail moteur dû à la gravité. La résistance totale en kilogrammes par tonne, à la vitesse uniforme qui s'établit alors, est évidemment exprimée par la pente en millimètres par mètre (29). Ce procédé a toutefois l'inconvénient d'exiger un plan incliné d'une grande longueur.

On peut aussi, comme l'ont fait *M. Wood* et *M. de Pambour* en Angleterre¹, opérer sur une pente suivie d'un palier ou d'une rampe, sur lesquels la vitesse obtenue au bas du premier plan est progressivement détruite sous la double influence des résistances fixes et de la pesanteur. Connaissant les chemins parcourus, on a les éléments nécessaires pour calculer la résistance en bloc en exprimant l'égalité des travaux réalisés sur les deux plans. Mais on est ici obligé de considérer la résistance calculée comme se rapportant à la vitesse moyenne obtenue en divisant le parcours total par le temps correspondant.

Nous nous bornerons à mentionner ce procédé de recherches qui présente, indépendamment des inconvénients signalés, celui de ne pas être applicable aux vitesses extrêmes, et notamment aux plus faibles, qu'il convient de choisir lorsqu'on veut éliminer la résistance de l'air.

36. — Emploi du dynamomètre de traction. — La méthode la plus usitée consiste à interposer, entre le

1. Voie, matériel roulant et exploitation technique des chemins de fer, par *M. Couche*, t. III, p. 628.

tender et les véhicules du train, un wagon spécial portant un ressort dynamométrique dont l'échelle de flexibilité, relevée d'avance, fait connaître d'une manière permanente les efforts de traction qui s'inscri-

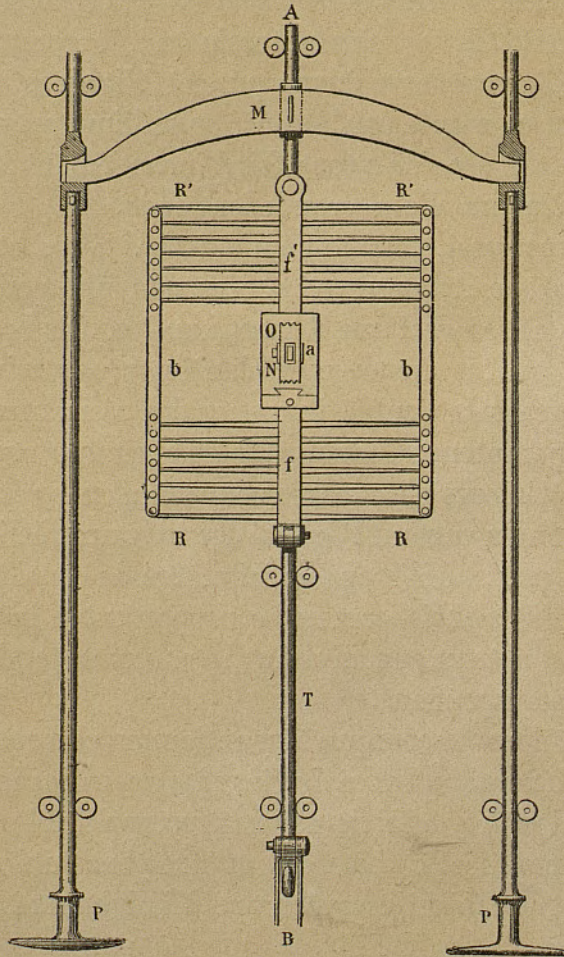


Fig. 22. — Dynamomètre de l'Est.

vent automatiquement sur une bande de papier. L'appareil enregistreur permettant aussi de déterminer la vitesse, on possède les deux éléments nécessaires pour calculer la résistance par tonne et le travail utilisé.

Les Compagnies de chemins de fer ont établi, pour réaliser ces expériences, des wagons dynamométriques dont les dispositions sont assez variables. Nous décrivons ceux des Compagnies de l'Est, du Nord, de l'Ouest et de Paris-Lyon-Méditerranée.

37. — Wagon d'expériences de la Compagnie de l'Est.

— Ce wagon, décrit d'une manière détaillée dans la *Revue générale des chemins de fer*¹, et dans les *Annales industrielles*², a reçu des installations très complètes, combinées, en 1875-1877, dans le but de perfectionner celles que MM. *Vuillemin, Guébbard* et *Dieudonné* avaient créées pour leurs expériences de 1865-1866. Quelques-uns des appareils nouveaux n'ont pas été conservés : nous les mentionnerons cependant à cause de l'importance du wagon d'expériences de l'Est, dont les dispositions ont été plus ou moins imitées dans les autres Compagnies de chemins de fer.

A. *Dynamomètre*. — Les appareils de ce wagon sont représentés par les figures 22 à 26. Les efforts de traction, ou de poussée par refoulement, sont mesurés à l'aide d'un ressort à lames (fig. 22 et 23) R R, R' R'. La barre d'attelage T du véhicule, guidée par des galets, s'adapte à la chape d'un premier groupe R de sept lames. Cette chape est munie de galets roulant sur un plan. Les tiges des tampons de choc P, P sont reliées à un arc en fer M qui s'adapte à un second groupe de lames de ressort semblable au premier. Les deux groupes sont réunis par quatre bielles *b, b*. Entre les chapes se trouve un bloc O faisant partie du châssis

1. N° de novembre 1878, p. 285.

2. Livraison du 5 janvier 1879.

du wagon, et servant de butée, à l'aide d'un plan incliné de réglage N, à la chape f' s'il y a traction au moyen de la barre T, ou à la chape f si le refoulement s'exerce par les tiges de tampons. Dans les deux cas, les groupes du ressort entrent en jeu ensemble. Les flexions sont reproduites, proportionnellement à leur valeur, à l'aide du mécanisme suivant, sur une bande de papier qui se déroule à l'intérieur du wagon sur la table d'expérience.

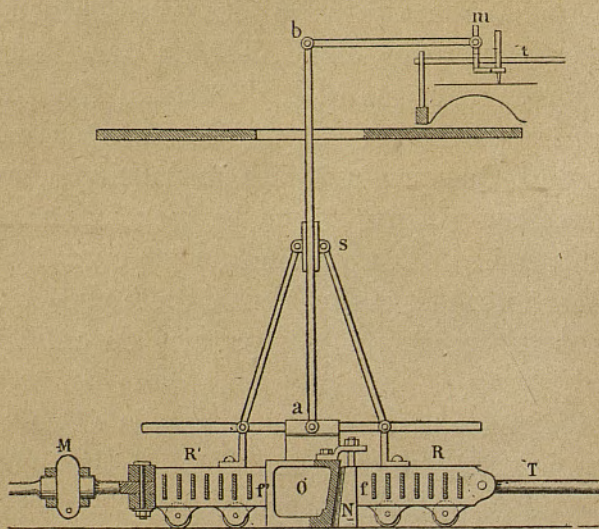


Fig. 23. — Transmission du déplacement des ressorts.

Une tige $a b$ (fig. 23) dont l'extrémité b commande les déplacements du style enregistreur, est articulée en a sur le bloc fixe O . Deux bielles, articulées à leur partie supérieure sur un même glissoir S coulissant le long de cette tige, et à leur partie inférieure sur l'une des chapes de ressort, fait incliner $a b$ dans un sens ou dans l'autre suivant que l'effort transmis au ressort est dû à la traction ou au refoulement. Cette disposition ne donnerait pas au crayon m des déplacements

proportionnels à ceux de la chape du ressort. Pour parvenir à ce résultat, on a mis en usage une disposition cinématique due à M. *Marcel Deprez* et représentée par le schema (fig. 24).

Un porte crayon cd se meut le long d'une tige ab , parallèlement à lui-même, en prenant les positions $c'd'$, $c''d''$, $c'''d'''$, dont l'écart est variable. D'autre part, l'extrémité fd d'une équerre mdf se meut le long d'une tige gh parallèle à ab , de manière à prendre les positions f' , f'' , f''' également espacées entre elles, cette division régulière représentant la rectification de l'échelle c, c', c'', c''' . L'équerre est articulée en d sur l'extrémité de cd , et, lorsqu'on fait mouvoir les deux pièces simultanément, l'extrémité m décrit une courbe facile à déterminer par points. Si donc, inversement, m est astreint à suivre cette courbe pendant que cd se déplace, le point f sera forcé de prendre des positions conformes à une progression arithmétique, et il suffira de placer le style en f au lieu de le placer en d pour avoir résolu le problème : les irrégularités de flexibilité que peut présenter le ressort ne se retrouvent pas dans les ordonnées de la courbe inscrite sur le papier, et cependant cette courbe représente exactement le travail de flexion du ressort.

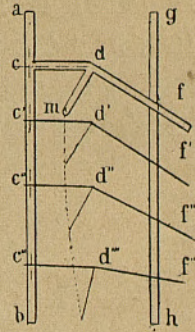


Fig. 24. — Disposition cinématique de M. *Marcel Deprez*

B. *Inscription automatique des résultats.* — La bande de papier se déplace perpendiculairement à l'axe longitudinal du wagon avec une vitesse constamment proportionnelle à celle de la translation. A cet effet, une vis sans fin calée sur l'essieu d'arrière peut être

embrayée à volonté avec une roue d'engrenage que l'on abaisse de l'intérieur du wagon par un mécanisme simple. Lorsque l'enregistreur doit être mis en marche, l'arbre horizontal qui porte cette roue dentée transmet le mouvement de rotation, par l'intermédiaire de deux roues d'angle, à un arbre vertical CD (fig. 25), qui traverse la table d'expérience. La transmission par double engrenage I et H, à encliquetage

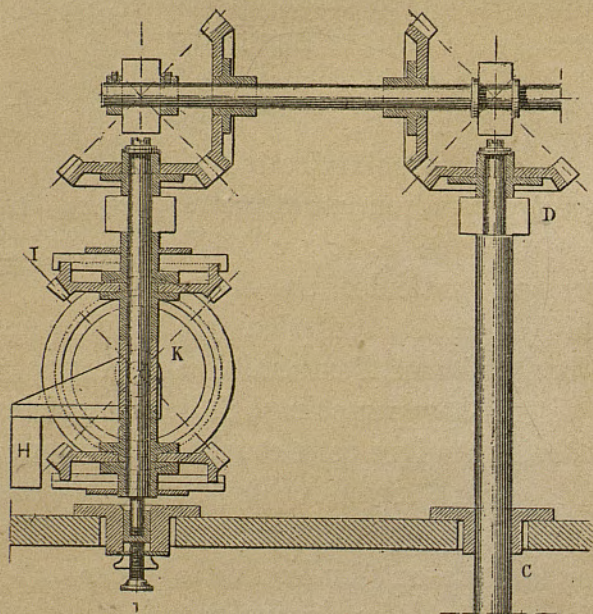


Fig. 25. — Encliquetage Dobo.

Dobo¹, commande le déplacement du papier en agissant sur le pignon conducteur de l'arbre K, et permet de le faire dérouler toujours dans le même sens, quel que soit le sens de marche du wagon. Pour permettre à la caisse de se déplacer relativement à l'essieu par suite des oscillations des ressorts de suspension, l'ar-

1. Cet encliquetage permet d'agir sans bruit, et sans perte de temps lors du renversement de la marche.

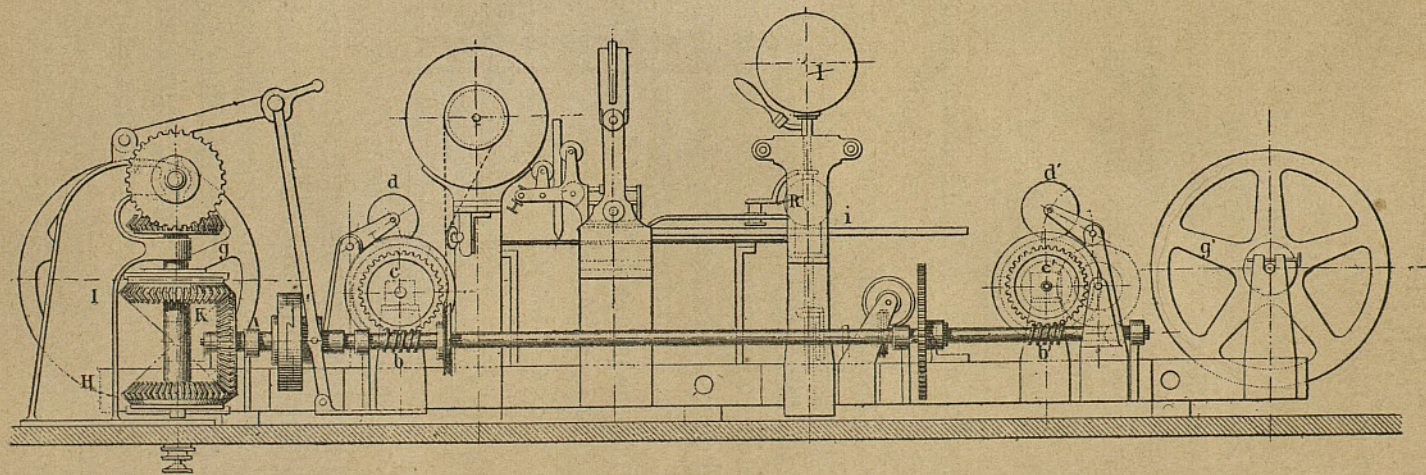


Fig. 26. — Appareil inscripteur.

bre de prise de mouvement sur l'essieu porte un joint universel.

La bande de papier emmagasinée en g (fig. 26) passe entre deux groupes de cylindres lamineurs $c d, d' c'$, qui l'entraînent sur une table bien dressée, et vient s'enrouler en g' . Ce déplacement linéaire peut avoir lieu à deux vitesses différentes au moyen d'un mécanisme disposé en F.

Pour connaître la vitesse de marche à chaque instant, on inscrit les temps écoulés au moyen d'une horloge fournissant toutes les 10 secondes un contact électrique et actionnant un des électro-aimants fixés sur le bâti de l'appareil, de sorte qu'un cran se trouve marqué sur le papier après chacune de ces périodes.

C. *Appareil totaliseur*. — Les conditions de marche ayant été ainsi enregistrées, on peut calculer à loisir le travail développé au crochet de traction du tender, mais il peut être, en outre, intéressant d'en connaître la valeur au cours même de l'expérience. C'est dans ce but qu'on avait installé un totaliseur dont nous indiquerons le principe, bien que l'on ait renoncé à son emploi. L'arbre bb' qui commande le déroulement du papier (fig. 26) fait tourner rapidement, et proportionnellement à la vitesse de translation du wagon, par l'intermédiaire d'une paire de roues d'angle, un plateau horizontal i parfaitement plan, qui détermine, par friction, la rotation d'une roulette dont l'axe est perpendiculaire à celui du plateau. Le contact de la roulette s'établit à l'aide d'un système particulier de liaison, à une distance du centre du plateau constamment égale à l'ordonnée de la courbe figurative des efforts de traction. Soient :

α et ω les vitesses angulaires de la roulette ^{et} du plateau.

r le rayon de la roulette.

x la distance variable du contact de celle-ci au centre du plateau.

Le chemin parcouru par le point de contact, sur la circonférence de la roulette et sur le disque du plateau étant le même pendant un temps infiniment petit, on a l'égalité suivante :

$$r \, d\alpha = x \, d\omega$$

En intégrant pour un temps fini $(t-t_0)$, on a

$$r \int_{t_0}^t d\alpha = \int_{t_0}^t x \, d\omega$$

ou

$$r (\alpha - \alpha_0) = \int_{t_0}^t x \, d\omega$$

Le terme $(\alpha - \alpha_0)$ n'est autre que le nombre de tours et fraction de tour accompli par la roulette pendant le temps $(t-t_0)$. Dans le second membre, x représente l'effort de traction et $d\omega$ est proportionnel au chemin parcouru dans le sens de cette force ; l'intégrale $\int_{t_0}^t x \, d\omega$ exprime donc le travail résistant qu'il s'agit d'évaluer, et $r (\alpha - \alpha_0)$ en donne la mesure.

Il suffit de lire, au commencement et à la fin d'une expérience, les nombres de tours de la roulette inscrits sur le cadran d'un compteur, et d'en multiplier la différence par une constante que l'on détermine d'après les conditions d'établissement de l'appareil, pour avoir la valeur du travail résistant du train, développé pendant cette expérience.

D. *Tachymètre et appareils manométriques.* — On avait installé primitivement un tachymètre dû à M. *Napoli*. Le fonctionnement de cet appareil est basé sur la résistance opposée par l'air au mouvement d'ailettes montées sur un axe commandé par l'arbre de

l'appareil enregistreur, et tournant avec une vitesse proportionnelle à celle du wagon. Ce tachymètre permettait de lire sur un cadran la vitesse réalisée à chaque instant, et pouvait au besoin l'inscrire sur le papier : on a cependant renoncé à son emploi, les indications qu'il fournissait n'étant pas toujours bien exactes.

Enfin, le wagon dynamomètre de la Compagnie de l'Est renfermait, lors de son installation, des appareils manométriques fort remarquables dus à la collaboration de M. *Marcel Deprez* et des Ingénieurs de la Compagnie.

Lorsqu'on connaît le travail moteur exercé par la vapeur sur les pistons d'une locomotive, et celui qui est utilisé au crochet de traction du tender, on obtient par différence le travail absorbé par la machine et par son tender. La détermination du travail *moteur*, produit dans les cylindres, est d'ailleurs utile à divers points de vue, et notamment pour connaître le *rendement* de la locomotive : on évalue ce travail au moyen des *diagrammes d'indicateur* relevés sur la machine, opération difficile, surtout aux grandes vitesses.

Ce fut dans le but de parer à ces difficultés que les appareils manométriques, dont on trouvera la description dans l'article précité de la *Revue générale des chemins de fer*, ont été étudiés : ils devaient permettre de relever les diagrammes en opérant à l'intérieur du wagon. Les problèmes très compliqués auxquels conduisait une expérience de ce genre paraissaient donc entièrement résolus. Toutefois, on doit signaler que pratiquement les résultats obtenus n'ont pas été d'une précision suffisante.

38. — Wagon dynamomètre de la Compagnie du Nord. — Ce wagon est décrit dans la *Revue générale des chemins de fer*¹ et dans les *Annales industrielles*². Il comporte les appareils nécessaires pour l'évaluation du travail utilisé au crochet de traction du tender. Il a été installé en 1880, en remplacement de celui que la Compagnie avait établi en 1859 pour mesurer et inscrire les efforts de traction.

L'appareil enregistreur, qui présente beaucoup d'analogie avec celui du wagon de l'*Est* dont il vient d'être question, et avec celui des wagons de la Compagnie P.-L.-M. qui sera décrit plus loin, permet d'inscrire automatiquement, et au moyen de l'électricité, les indications qui se rapportent au temps écoulé, à l'espace parcouru et à l'effort développé au crochet d'attelage.

Le ressort dynamométrique disposé comme ceux des wagons des Compagnies de l'Est et du P. L. M. peut enregistrer les efforts de traction jusqu'à 10.000 kilog. On peut, en supprimant une partie des menottes reliant les extrémités des lames, augmenter à volonté la flexibilité de ce ressort, pour l'évaluation des faibles efforts ; on peut aussi, au moyen d'un changement de roues d'engrenages, remplacer la vitesse de déroulement du papier, qui est habituellement de 14 centimètres environ par kilomètre, par une vitesse quatre fois plus grande, nécessaire pour rendre nette l'observation des phénomènes de courte durée.

L'ensemble des tracés se présente comme l'indique la figure 27. La ligne supérieure montre les oscillations continuelles de l'effort de traction, qui résultent à la fois de la variation du travail moteur à chaque coup de

1. Avril 1883, p. 317.

2. Livraison du 19 novembre 1882.

piston, et des inégalités de la voie. La vitesse se déduit de l'écartement de deux points consécutifs marqués sur

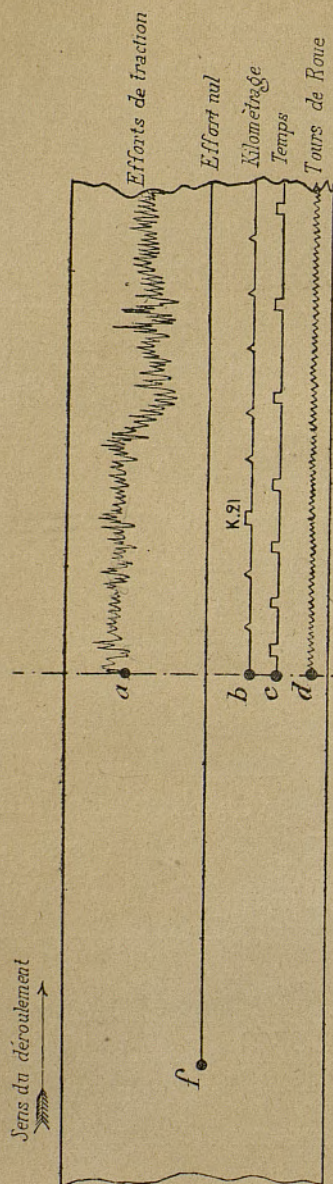


Fig. 27.

le papier, à l'intervalle de temps de dix secondes, par l'application d'un coefficient résultant de la distance constante des points kilométriques. Ce calcul donne les vitesses moyennes du véhicule pendant ces courtes périodes de temps, et non les vitesses instantanées. L'approximation est, toutefois, généralement suffisante.

Les efforts de traction sont donnés par la courbe moyenne de tracé *a*, et pour les observations précises, on peut relever au planimètre l'ordonnée moyenne de la courbe réelle.

Il importe que le ressort dynamométrique soit taré exactement, dans ses conditions de fonctionnement sur le wagon. Pour obtenir l'échelle réelle de ses flexions, on l'a relevée sur le ressort tout monté. Le wagon, pouvant rouler au-dessus d'une fosse profonde,

était mis en mouvement à l'aide d'un cabestan. On

soulevait des charges représentant les efforts, au moyen d'une chaîne fixée au crochet de traction, et passant sur une poulie de renvoi de 0^m, 60 de diamètre. Chaque opération avait lieu dans les deux sens de marche, ce qui permettait de tenir compte de la résistance de la poulie, et d'en faire la correction rigoureuse. La moyenne des deux flexions du ressort, pour une même charge en mouvement, fournissait un point exact de la graduation de l'échelle.

39. — Fourgon d'expériences de la Compagnie de l'Ouest (Fig. 28). — Ce fourgon, installé postérieurement à ceux des Compagnies de l'Est et du Nord, figurait à l'Exposition universelle de 1889¹. Les appareils qu'il renferme se prêtent aux différentes recherches précédemment énumérées, mais avec des variantes qu'il est intéressant de faire connaître.

A. *Dynamomètre*. — Le ressort dynamométrique fonctionne exactement dans les mêmes conditions que celui des wagons des Compagnies du Nord et de l'Est. En outre, l'attelage est disposé de manière à permettre de soustraire ce ressort aux efforts de traction dans les parties du trajet où il n'est pas utilisé. Il suffit pour cela d'enlever le boulon d'axe L (fig. 29) et de placer l'étrier de calage N en N'. Le dynamomètre se trouve alors isolé de la barre d'attelage, et la traction s'effectue sur les *rondelles Belleville*. Enfin, pour permettre d'amener les tampons de choc au contact, lors de l'attelage du wagon, et d'éviter toute réaction de l'un sur l'autre dans la circulation en courbe, les tiges de tampons, guidées comme la barre d'attelage par

1. *Revue générale des chemins de fer*, juillet 1889.

des galets (fig. 29), sont conjuguées par un balancier

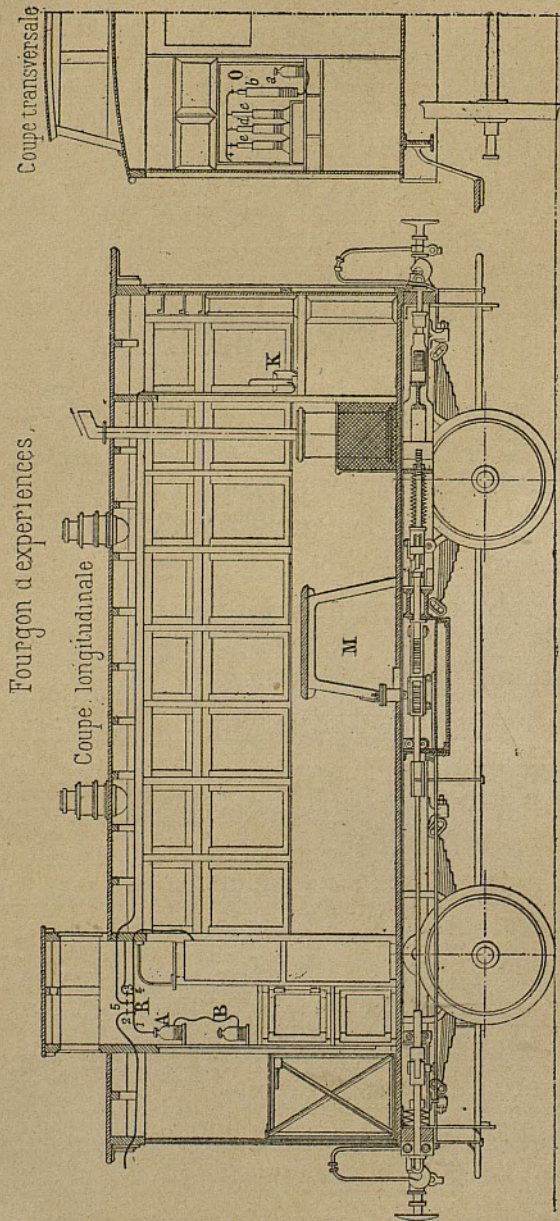


Fig. 28.

transversal qui s'appuie, en son milieu, sur un ressort formé par des rondelles Belleville.

B. *Appareil enregistreur* (Fig. 29 à 31). — Cet appareil permet l'inscription des résultats par l'intervention de l'électricité. Il est commandé par une transmission avec engrenages, roues hélicoïdales et vis sans fin, dont les détails sont faciles à suivre sur le dessin. La bande de papier se déroule de S en S' avec une vitesse proportionnelle à celle du véhicule. Les pointages se font au moyen des trois styles n^{os} 4, 5, 6 (fig. 31). Le premier marque les tours et dizaines de tours de roues.

Le style n^o 5 enregistre le temps au moyen d'une horloge fournissant un contact électrique toutes les dix secondes.

Le style n^o 6 pointe les kilomètres et autres repères, sous la dépendance d'un bouton électrique manœuvré par un observateur.

C. *Inscription de la vitesse*. — Indépendamment de ces dispositions qui permettent de déterminer les vitesses moyennes par périodes de dix secondes, on peut évaluer, à chaque instant, la vitesse réelle au moyen de l'appareil suivant qui est enregistreur. Une molette μ (fig. 31), formant écrou, peut se mouvoir sur un plateau π , animé d'un mouvement uniforme de rotation par un mécanisme d'horlogerie. Cette vis tourne autour de son axe de figure avec une vitesse proportionnelle à celle de l'essieu, qui commande ce mouvement, et tend constamment à déplacer la molette ; cette dernière, sollicitée en sens inverse par suite de la rotation que lui imprime le plateau, se place constamment en un point tel que les deux actions se compensent. La distance de ce point au centre du plateau est proportionnelle à la vitesse du train.

En effet, en appelant x cette distance, r le rayon de

Etrier de calage
se posant en N°

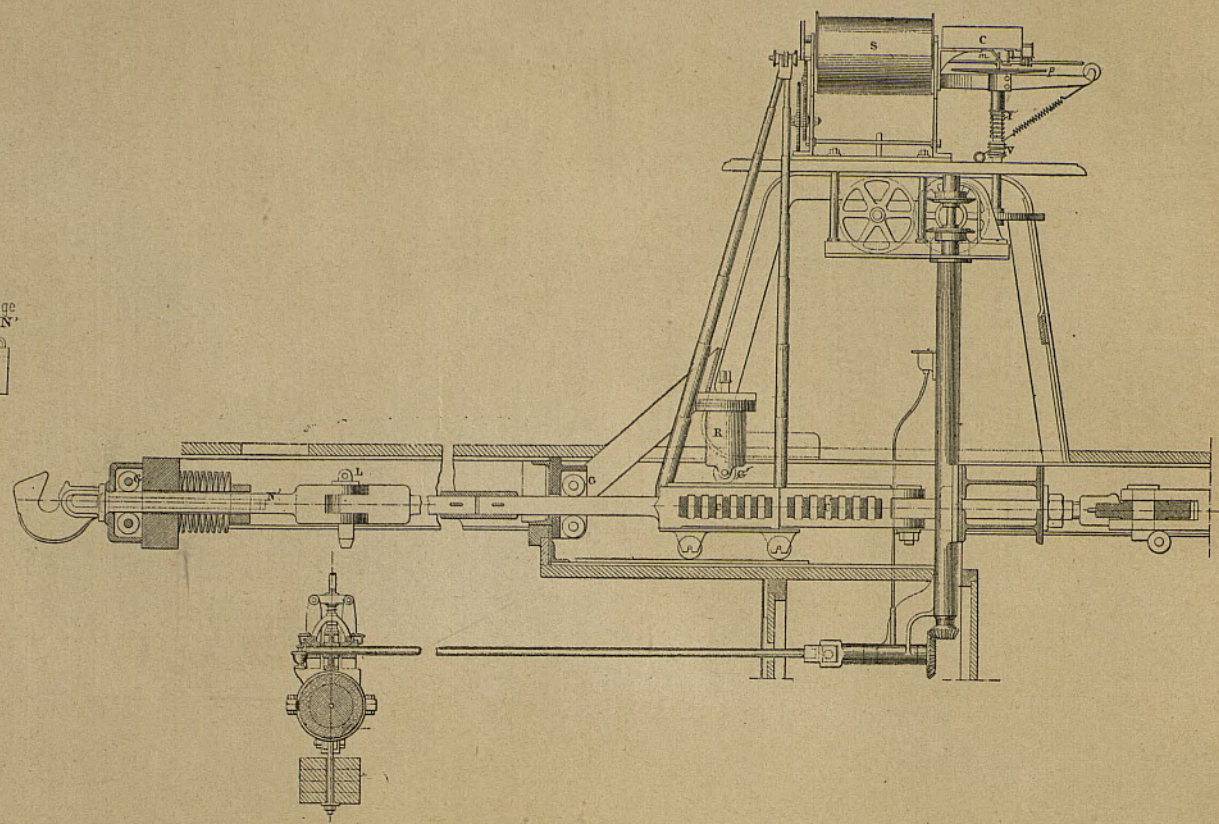
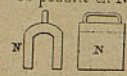


Fig. 29.

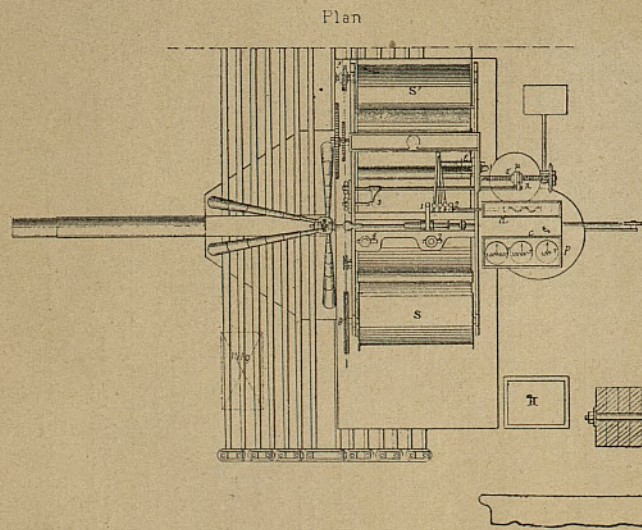


Fig. 31.

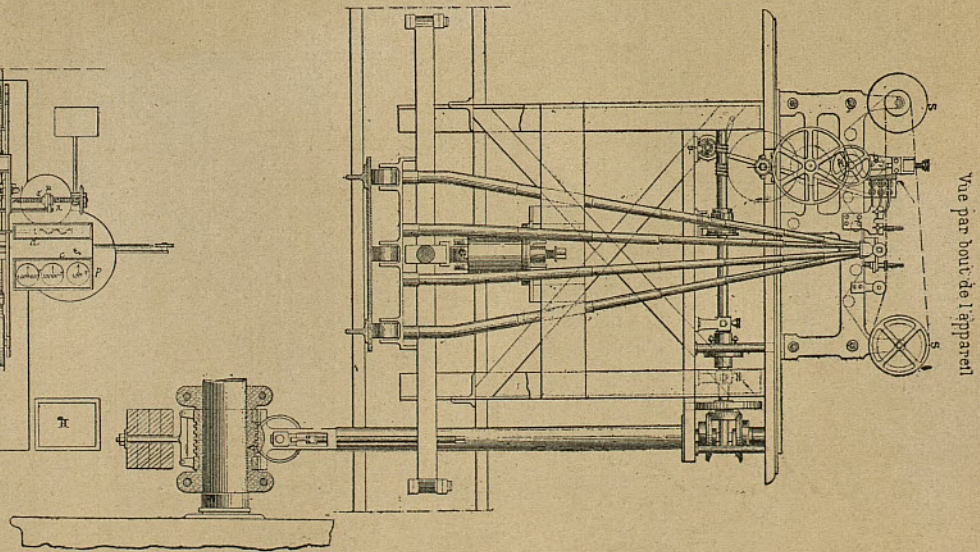


Fig. 30.

la molette, Ω la vitesse angulaire du plateau et ω celle de la vis, on a :

$$r\omega = x \Omega$$

d'où : $x = r \frac{\omega}{\Omega},$

c'est-à-dire que x est proportionnel à ω qui représente, à un facteur constant près, la vitesse du train.

Le style n° 3, commandé par la molette au moyen d'une tige, enregistre les vitesses sur la bande de papier.

D. *Enregistrement du travail totalisé.* — Pour permettre d'évaluer le travail au moment où il est produit et pour simplifier les opérations ultérieures du dépouillement des résultats, par la connaissance du travail développé aux divers points du parcours, on a imaginé un *totaliseur* (fig. 29 à 32) dont nous empruntons la description à la Notice de la Compagnie de l'Ouest concernant les objets présentés à l'Exposition de 1889.

Sur le prolongement de la tige du crayon 1, enregistreur des efforts, est montée une fourche qui supporte une molette m maintenue au contact d'un plateau p par un ressort à boudin, à tension réglable au moyen de la vis V, monté sur l'arbre de ce plateau. L'axe de cette molette est parallèle à la tige du crayon et passe par le centre du plateau ; enfin ce dernier est animé d'une vitesse de rotation proportionnelle à celle de l'essieu du véhicule. Sous l'action du mouvement du plateau, la molette tourne, et le nombre de tours qu'elle effectue (nombre variable suivant sa distance au centre du plateau) mesure, à un facteur constant près, le travail développé.

En effet, en appelant f la distance de la molette au

centre du plateau, distance qui mesure l'effort à un instant quelconque ; $d\omega$ la rotation angulaire infiniment petite du plateau, et $d\alpha$ la rotation correspondante de la molette de rayon r , on a $f d\omega = r d\alpha$, et

$$\int_{t_0}^t f d\omega = r (\alpha - \alpha_0)$$

Détail de l'enregistreur de travail. — Plan.

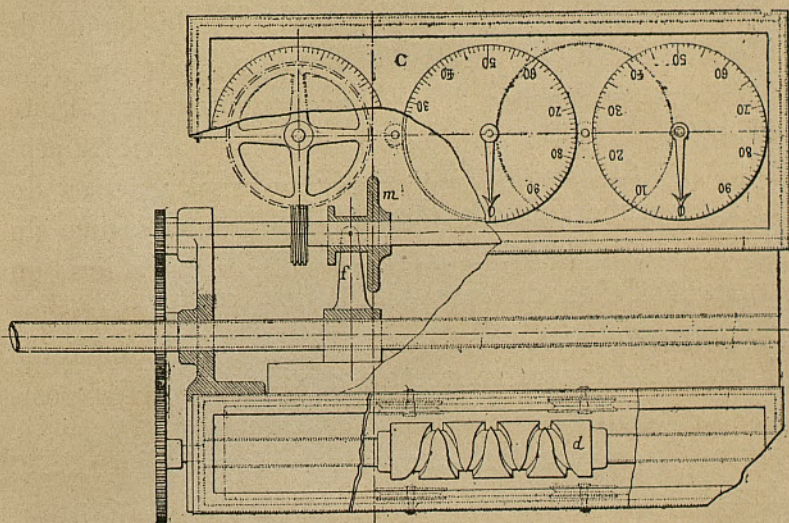


Fig. 32.

Or la vitesse du plateau étant proportionnelle à celle du train $\int_{t_0}^t f d\omega$ représente le travail développé pendant le temps $(t-t_0)$.

D'autre part, $r (\alpha - \alpha_0)$ représente le nombre de tours de la molette pendant ce même temps, donc ce nombre de tours mesure le travail. Il suffit de l'enregistrer pour avoir à chaque instant le travail développé depuis l'origine. A cet effet, on a installé sur l'arbre de la molette un compteur de tours C ; une simple lecture

permet de se rendre compte immédiatement du travail exprimé en kilogrammètres.

En outre, ce même arbre fait tourner, par l'intermédiaire d'un jeu d'engrenages, un cylindre d (fig. 31 et 32), à la surface duquel on a creusé une rainure hélicoïdale continue et fermée, à pas croisés. Dans cette rainure s'engage une sorte de galet qui entraîne un chariot auquel est fixée une tige guidée qui porte un crayon 2 (fig. 31). Le cylindre, en tournant, fait décrire au galet une portion de génératrice et ce déplacement est transcrit par le crayon sur la bande de papier.

Or, les dimensions de la molette, des engrenages et de la vis sont établies de telle manière que, pour 60 tours de la molette, le galet parcourt la génératrice correspondant à l'un des pas de l'hélice, et, pendant les 60 tours suivants, celle qui correspond au pas inverse, de manière à se retrouver à son point de départ. Il en résulte qu'en raison du mouvement de translation du papier, le crayon décrit une sorte de sinusöide (fig. 33), dont les sommets s se trouvent sur deux lignes parallèles. L'ordonnée de chacun de ces sommets correspond à un nombre connu de kilogrammètres (600.000 dans le cas actuel). L'ordonnée d'un point a de la courbe situé entre deux sommets consécutifs mesure, à l'échelle, le travail développé entre le dernier sommet et le point considéré. On voit qu'étant donné le sens de déroulement du papier indiqué par la flèche, la portion de courbe $s'a$ a été parcourue de s' vers a , et qu'il faut prendre l'ordonnée ac comme mesure du travail accompli de s' en a ; pour le point b , au contraire, il faudrait prendre l'ordonnée bd .

Le diagramme (fig. 33) offre un spécimen des différents tracés obtenus simultanément.

Le calcul de la résistance d'un train, effectué d'après la méthode que nous venons de décrire, suppose que les observations ont été faites à *vitesse constante*, ou tout au moins, que les vitesses initiale et finale de la période observée sont égales. S'il en était autrement, une cor-

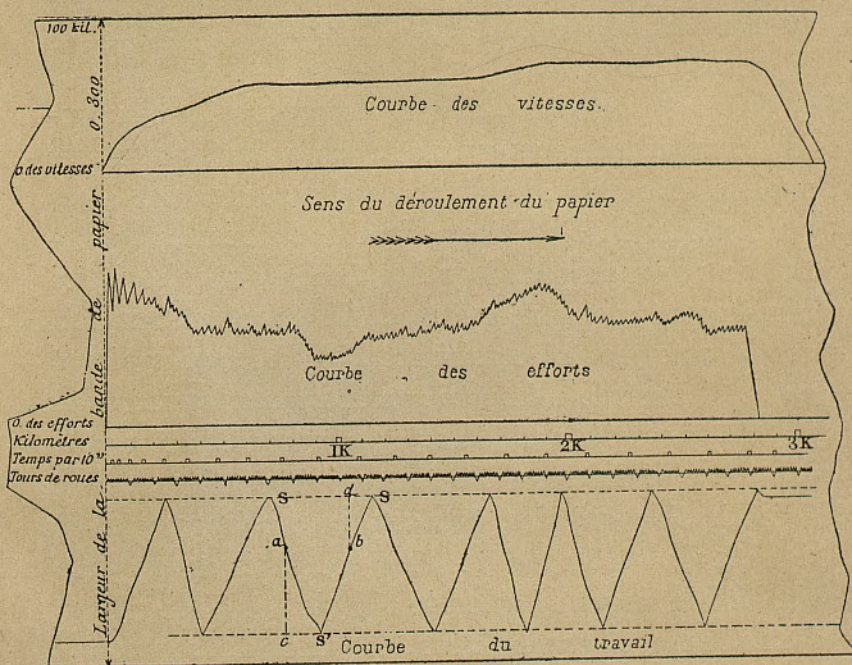


Fig. 33. — Diagramme.

rection deviendrait nécessaire pour tenir compte du travail qui se rapporterait à l'accélération positive ou négative, déterminée d'après les variations de la vitesse. Si le mouvement est *accéléré*, il faut, pour connaître l'effort de traction réel afférent à la vitesse *actuelle*, *retrancher* de l'effort constaté celui qui est nécessaire pour produire cette accélération sur la masse du train remorqué. Si, au contraire, le mouvement est *retardé*,

il faut *ajouter* l'effort correspondant à l'accélération négative.

Ces corrections ne pouvant être faites qu'avec une certaine approximation, il est préférable d'opérer en mouvement uniforme, mais les observations de ce genre sont ordinairement assez rares, surtout s'il s'agit de les faire dans les conditions habituelles du service, la vitesse des trains étant, pour divers motifs, essentiellement variable.

On peut, il est vrai, obtenir les valeurs des résistances d'une manière assez exacte en opérant à vitesse variable et sans qu'il soit nécessaire de recourir à ces corrections. Il suffit de choisir dans les résultats obtenus un parcours pour lequel la vitesse du train ait été la même au commencement et à la fin, et cela sur un profil uniforme. L'accroissement de force vive étant nul, il en est de même de la somme des travaux des forces qui ont déterminé les variations de vitesse pendant cette période. On n'a donc pas à se préoccuper de l'accélération qui s'est produite avec changement de signe, et la *résistance moyenne* constatée se rapporte à la *vitesse moyenne* calculée d'après le pointage que donne l'appareil enregistreur, de dix en dix secondes.

40. — Wagons dynamomètres de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée. — La Compagnie de Lyon a construit, dans ses ateliers, en 1888, deux wagons dynamomètres étudiés avec le plus grand soin. Nous en donnons ci-après la description d'après la note publiée dans la *Revue générale des chemins de fer*¹, par M. *Chabal*, Ingénieur en chef adjoint du matériel et

1. Février 1894, p. 97.

de la traction. « La Compagnie a construit deux wagons, dit cet ingénieur, parce que lorsqu'on veut comparer, au point de vue de l'influence qu'elles peuvent avoir sur la résistance à la traction, deux dispositions différentes, on est conduit, le plus souvent, pour éliminer toutes les autres influences, à faire les expériences sur un train composé de deux parties qui ne diffèrent que par les dispositions que l'on veut comparer, et à relever les efforts de traction nécessités par chacune des moitiés du train ; les influences de la vitesse, du profil de la voie, des circonstances atmosphériques étant les mêmes sur les deux moitiés du train à un même moment, on peut ne plus s'inquiéter de ces influences dont il serait fort difficile de tenir compte, et la comparaison des efforts de traction, relevés à un même moment, chiffre exactement l'influence, toutes choses égales d'ailleurs, des deux dispositions que l'on veut comparer ».

Les wagons, figures 34 et 35, sont, comme la grande majorité des voitures de cette Compagnie, montés sur trois essieux. Celui du milieu, sur lequel est pris le mouvement du papier enregistreur, a été fait à fusées intérieures pour se prêter à cette prise de mouvement, et ne porte pas de frein. Le wagon est divisé en deux parties à peu près égales dont l'une est la chambre d'expériences et l'autre comprend une salle de travail et un water-closet.

A. *Attelages et ressorts d'expériences.* — A l'une de ses extrémités, le wagon est muni de l'attelage *Chevalier* et *Rey* dont les dispositions réalisent les deux conditions suivantes :

1° Les pressions sur les deux tampons de choc sont toujours égales entre elles.

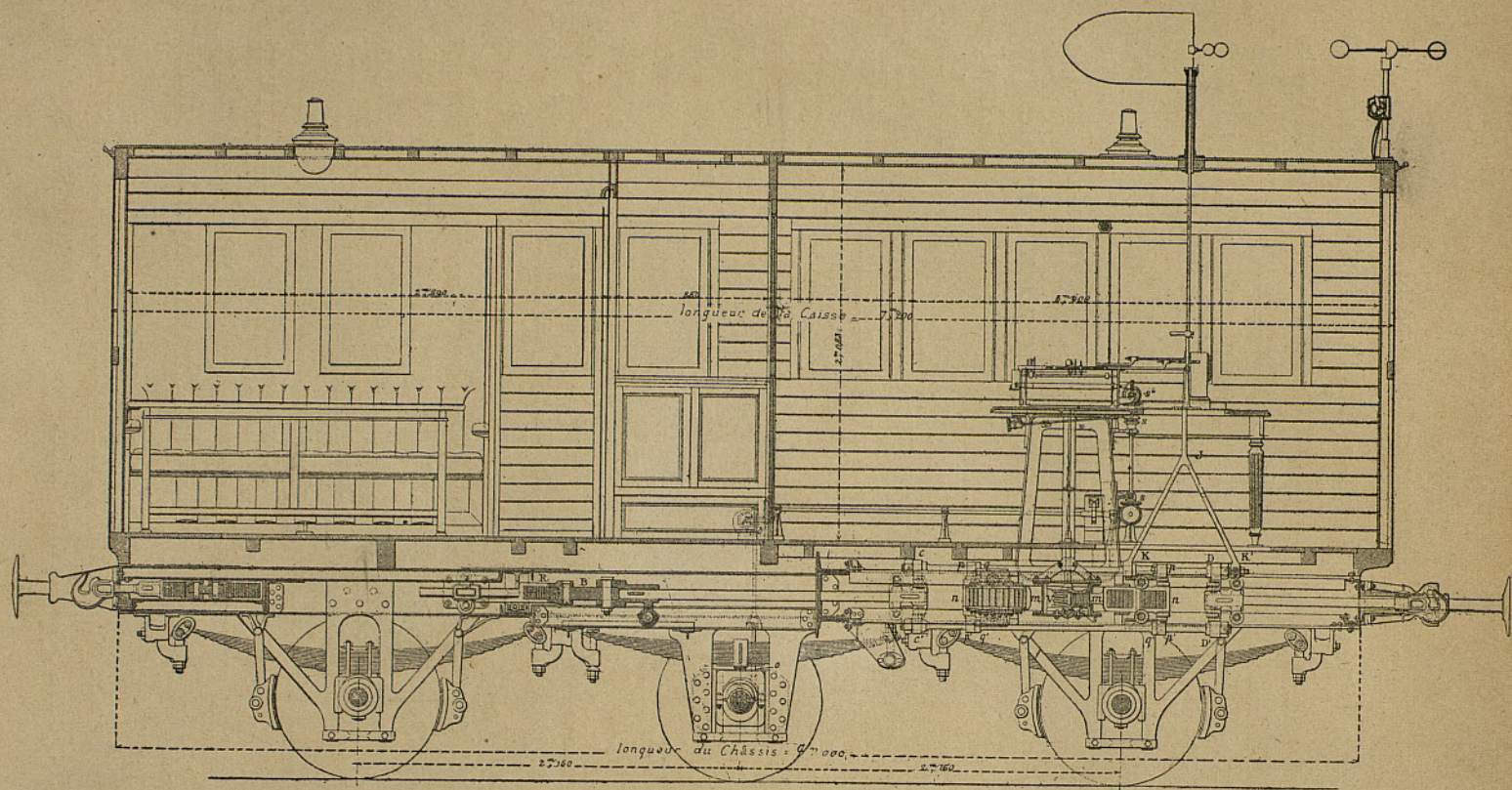


Fig. 34. — Coupe longitudinale.

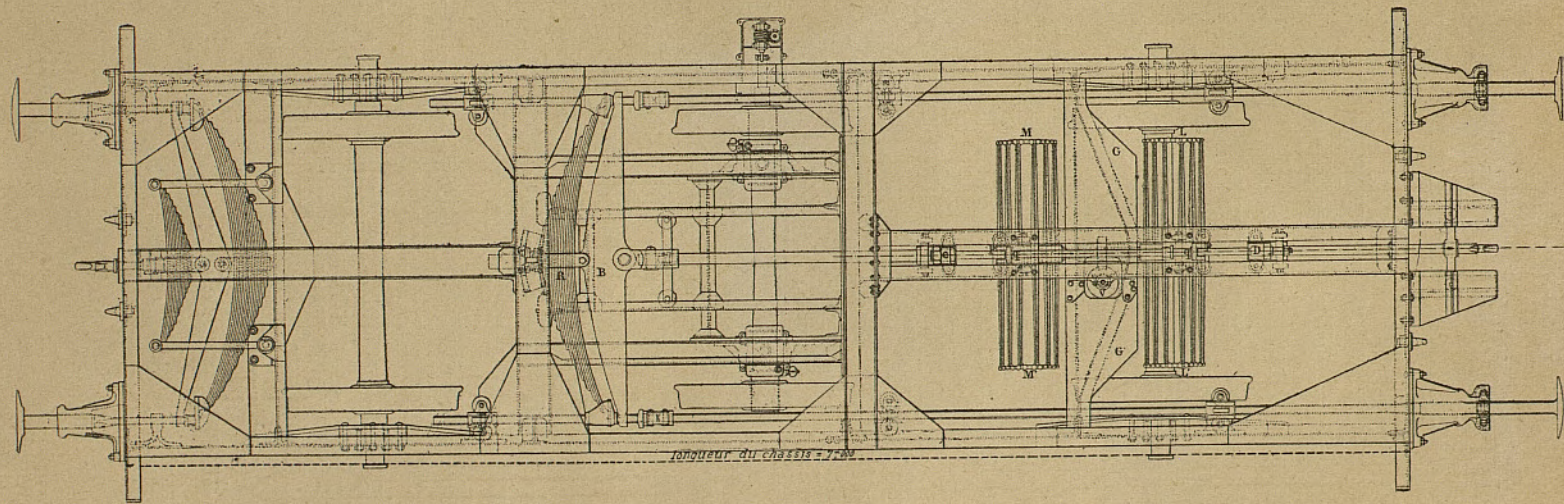


Fig. 35. — Wagon dynamomètre P.-L.-M. — Plan du chassis, la caisse étant enlevée.

2° Une fois l'attelage fait et serré de façon à produire au repos une certaine pression entre les tampons en contact, la pression en cours de route ne peut jamais descendre au-dessous de celle qui a été donnée au repos ; elle lui est égale lorsqu'il y a traction entre les deux véhicules en contact, et elle lui devient supérieure s'il y a compression en marche. Il était intéressant de réaliser également ces conditions à l'autre extrémité du wagon dynamomètre, dont l'attelage doit être disposé pour l'évaluation des efforts de traction ou de compression, et sans que la mesure et l'enregistrement de ces efforts en fussent aucunement influencés, de façon que le wagon pût être attelé à un train dans des conditions aussi bonnes, au point de vue de la stabilité, qu'une voiture ordinaire.

Avant de décrire cette application de l'attelage Chevalier et Rey, nous devons, pour la clarté de l'exposé, indiquer le principe du système qui a été imaginé en vue de faciliter le passage des trains dans les courbes et d'assurer le contact permanent des tampons. Ce résultat est obtenu par l'interposition entre le ressort de choc et le ressort de traction, d'un balancier supportant à ses extrémités la tension initiale du ressort de choc, et la reportant, en son milieu, sur la partie postérieure de la chape du ressort de traction. Les chapes des deux ressorts sont, en outre, articulées sur un axe commun qui reçoit en même temps l'extrémité de la tige de traction. La fig. 36 et la légende ci-après indiquent cette disposition :

- A. Tige de traction ;
- B. Chape du ressort de traction ;
- C. Chape du ressort de choc ;
- D. Ressort de traction ;

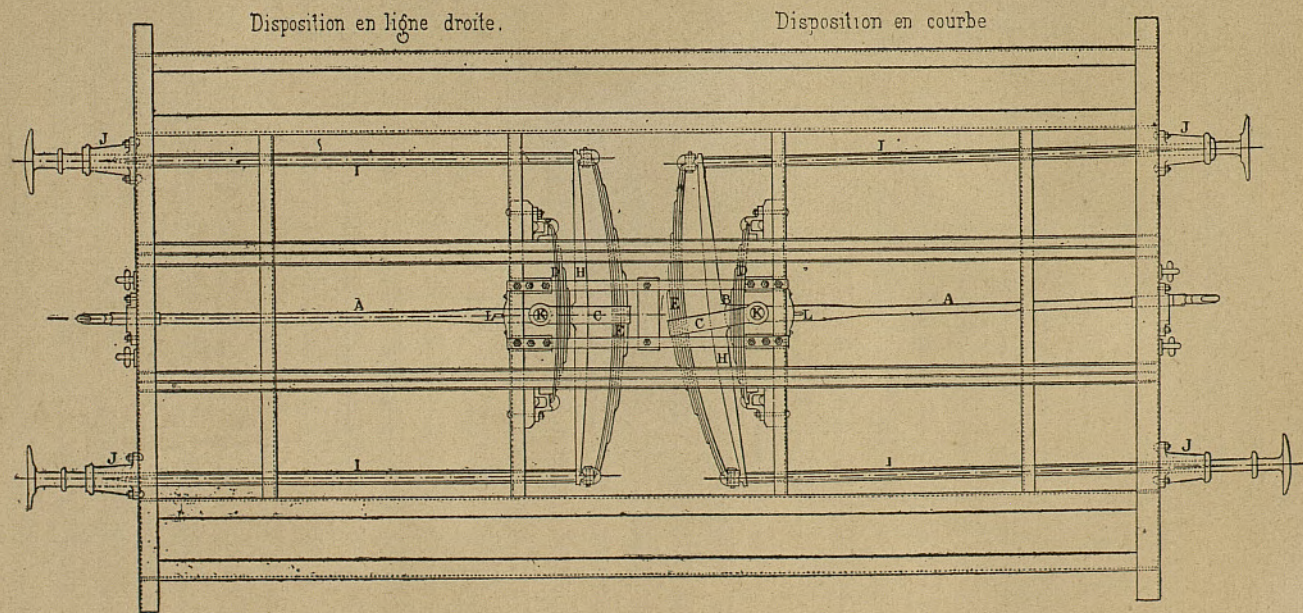


Fig. 36.

- E. Ressort de choc ;
- H. Balancier reposant sur la chape B ;
- II. Tiges de tampons traversant les extrémités du balancier H ;
- JJ. Guides extérieurs des tiges de tampons II.
- K. Boulon d'articulation commun aux deux chapes B et C et à la tige de traction A ;
- L. Clavette fixée sur la tige de traction A, servant à régler la tension initiale du ressort de traction D et à recevoir la réaction des efforts transmis au ressort de choc E par les tiges de tampons II.

L'extrémité de la tige de traction étant articulée sur le boulon commun aux deux chapes des ressorts de choc et de la traction, il s'ensuit que toute flexion de ce dernier ressort sous l'effort de traction de la locomotive entraînera, d'une quantité correspondante, l'ensemble du balancier et du ressort de choc, de sorte que la saillie des tampons, sous l'action de cet effort, sera précisément égale à celle du crochet de traction.

On voit, d'après la figure 36, que dans les courbes les tampons peuvent rentrer dans leurs guides extérieurs ou en sortir, en surmontant le frottement du balancier sur le dos de la chape du ressort de traction, et celui de la chape du ressort de choc sur le boulon d'articulation. On voit aussi que la pression des tampons est la même pour les deux côtés des véhicules attelés ensemble et qu'elle résulte de la bande initiale de montage du ressort de choc, augmentée de celle donnée au ressort de traction lors de l'attelage.

Ceci étant entendu, il s'agissait, en installant sur le wagon d'expérience le ressort dynamométrique, qui sert en même temps de ressort de traction, de le soustraire à l'effort initial exercé sur le crochet pour l'at-

telage du véhicule, et de l'actionner seulement par les efforts de traction provenant de la locomotive.

A cet effet (fig. 34 et 35), l'attelage comprend, comme celui du système *Chevalier* et *Rey* ordinaire, un grand ressort de choc R, dont la bride est articulée sur l'arrière d'un balancier B et sur l'extrémité duquel agissent les deux tiges de tampons ; le crochet de traction est relié au balancier par une tige rigide, articulée sur l'avant de cette pièce et qui, sur une partie de sa longueur, est constituée par un cadre vertical CC', DD' embrassant les deux ressorts dynamométriques LL' et MM', servant à évaluer, le premier les efforts de traction, le second les efforts de compression. Ces ressorts sont constitués chacun par deux groupes de six lames ; ces lames sont reliées entre elles à leurs extrémités par des *menottes* articulées. Des deux brides d'un même ressort, l'une *m* est reliée à un plateau d'attelage GG', solidement fixé au châssis du véhicule, l'autre *n* porte deux oreilles *pp'* ; le cadre de traction CC', DD' est muni de quatre embases *qq'*, par l'intermédiaire desquelles il agit sur les oreilles des brides mobiles qu'il entraîne en se déplaçant dans le sens voulu pour bander le ressort correspondant ; mais il n'agit pas sur les oreilles des brides quand il se déplace en sens contraire.

Le ressort de choc R ayant une certaine tension initiale, si l'on vient à serrer l'attelage avec un véhicule voisin jusqu'à produire sur les tampons une pression supérieure à cette tension, les extrémités des ressorts se séparent du balancier d'une quantité correspondant à la différence des deux efforts. Supposons que l'appareil soit réglé de telle manière que, chacun des ressorts dynamométriques étant sans tension, les quatre embases du cadre de traction portent sur les

quatre oreilles des brides de ces ressorts ; si, en route, il n'y a ni effort de traction ni effort de compression entre le wagon d'expérience et le véhicule attelé à son extrémité dynamométrique, le cadre de traction reste en contact, par ses embases, avec les quatre oreilles des brides des ressorts.

S'il y a traction, le ressort de traction LL' fléchit plus ou moins, mais le ressort de compression MM' ne subit aucune déformation, les embases du cadre quittant les oreilles de sa bride mobile ; la tige de traction, le balancier et le ressort de choc se déplacent ensemble de la flèche prise par le ressort de traction, sans que, si le véhicule voisin est muni d'un attelage Chevalier et Rey ou d'un autre analogue, le jeu entre les extrémités du ressort de choc et le balancier varie aucunement, et sans que, par suite, la pression entre les tampons en contact se trouve modifiée. Mais de toute façon et quel que soit l'attelage du véhicule voisin, le ressort dynamométrique de traction subit une flexion correspondant à la différence qui existe entre l'effort exercé sur le crochet de traction et la pression sur les tampons.

S'il y a compression, c'est le ressort MM' qui fléchit d'une quantité correspondant à la différence entre la pression sur les tampons et l'effort exercé sur le crochet ; le ressort de choc R conserve d'ailleurs la même flèche tant que la pression sur les tampons ne dépasse pas celle réalisée lors de l'attelage et se comprime ensuite lorsque cette pression continue à croître : à partir du moment où la pression sur les tampons dépasse celle qui a été donnée en serrant l'attelage, les tiges de tampons qui, jusque là, ne rentraient que de quantités égales aux accroissements de flèches du ressort dyna-

mométrique de compression MM' , rentrent de la somme des déformations de ce ressort et du ressort de choc R ; mais les déformations du ressort dynamométrique de compression MM' sont toujours la mesure exacte de la compression effective entre les deux véhicules.

Les déplacements du cadre de traction mesurent donc exactement les efforts de traction et de compression effectifs, et c'est à ce cadre que se trouve relié le crayon inscrivant les efforts sur le papier.

Les brides des ressorts dynamométriques attachées au plateau d'attelage ne lui sont pas reliées d'une façon absolument invariable : elles se terminent chacune par une tige filetée qui se visse dans un écrou emprisonné dans ce plateau, les filets des deux vis étant de sens contraire. On peut, au moyen d'une vis sans fin V , manœuvrée de l'intérieur du wagon, faire tourner l'écrou et rapprocher du plateau d'attelage les deux brides qui lui sont reliées. D'autre part, les oreilles des brides opposées, sur lesquelles agit le cadre de traction, sont empêchées par des cales fixées au châssis de se rapprocher à moins d'une certaine distance du plateau. On peut donc, au moyen de la vis sans fin V , donner aux deux ressorts dynamométriques une certaine bande initiale, allant jusqu'à 3000 kg.

Lorsqu'on use de cette latitude, le cadre de traction ne peut évidemment se déplacer, par rapport au châssis, que si l'effort de traction ou de compression devient supérieur à la tension initiale ainsi donnée aux ressorts. Cette disposition a été adoptée en vue de certains essais, dans lesquels, ayant à mesurer de grands efforts, on pouvait craindre que l'attelage dynamométrique ne donnât lieu, dans le train, à de fortes réactions.

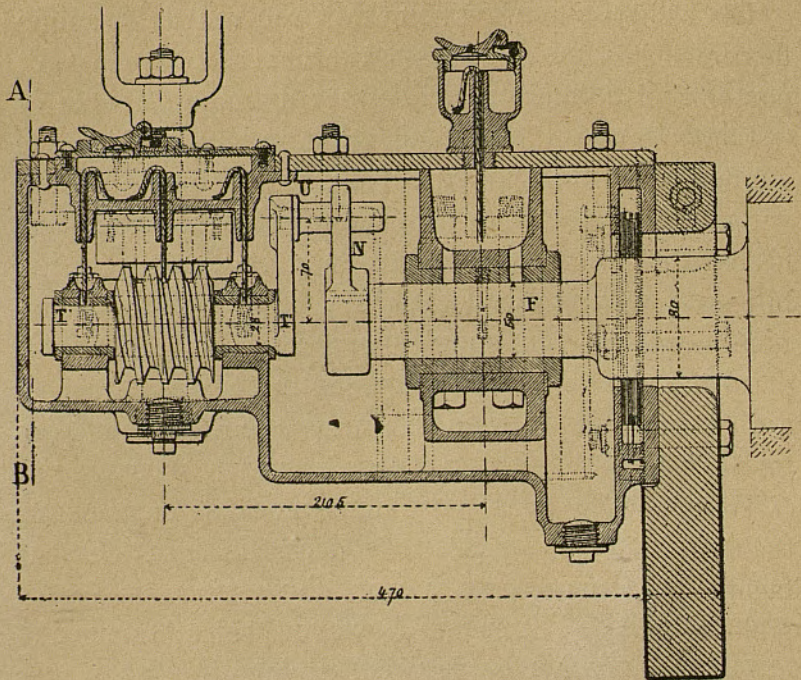


Fig. 37. — Prise de mouvement pour le déroulement du papier. —
Coupe parallèle à l'essieu.

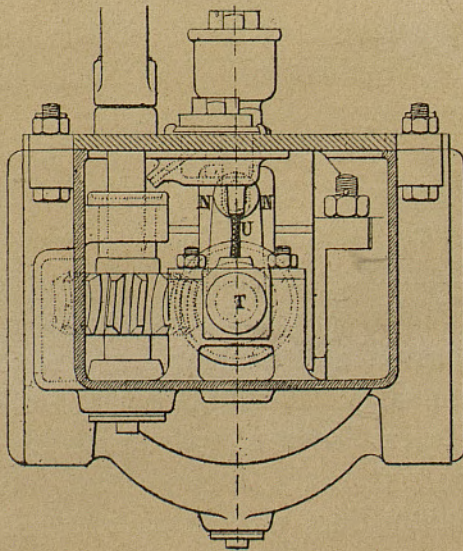


Fig. 38. — Coupe perpendiculaire à l'essieu.

Les ressorts de traction et de compression ont une flexibilité de 18 millimètres par tonne ; ils peuvent supporter l'un et l'autre un effort maximum de 10.000 kg.

Lorsqu'on a besoin d'une flexibilité plus grande, pour augmenter la sensibilité de l'appareil, il suffit d'enlever un certain nombre des menottes reliant entre elles les extrémités des lames de ressort, de manière à immobiliser une partie de ces lames. C'est ainsi que de nombreux essais ont été faits en ne conservant en prise que trois lames pour chaque demi-ressort, c'est-à-dire avec une flexibilité de 36 millimètres par tonne.

Toutes les pièces mobiles de l'appareil de choc et de traction sont supportées par des galets disposés de façon à leur permettre d'exécuter, sans résistance sensible, les mouvements qu'elles sont appelées à faire.

B. *Mouvement du papier* (fig. 37 et 38). — La prise de mouvement pour le déroulement du papier enregistreur se fait à une extrémité de l'essieu du milieu, sur une fusée F, au moyen de la vis sans fin calée sur l'arbre TT' et actionnant une roue hélicoïdale, disposition analogue à celle des wagons dynamomètres des Compagnies de l'Est et de l'Ouest. Le mouvement de l'essieu est transmis à l'appareil au moyen de l'arbre vertical SS (fig. 34) qui porte un embrayage permettant d'établir ou d'arrêter la communication de ce mouvement aux appareils enregistreurs. L'arbre dd' (fig. 39 et 40) donne le mouvement aux cylindres dérouleurs du papier par l'intermédiaire d'un encliquetage Dobo S'' S'', ce qui permet de faire dérouler le papier toujours dans le même sens, quelque soit le sens de la marche du wagon.

Le papier enregistreur a une largeur de 480 milli-



mètres et se déroule transversalement au wagon, avec une vitesse proportionnelle à celle de ce véhicule : les

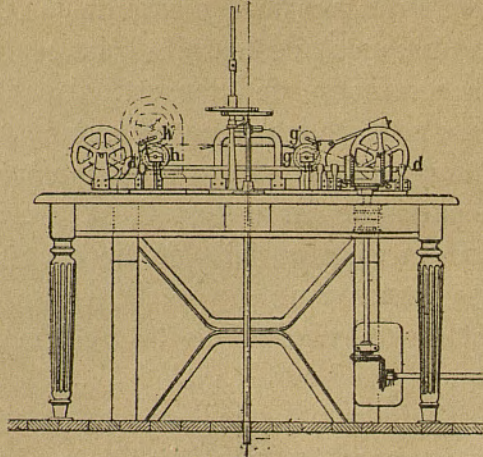


Fig. 39. — Vue transversale de la table des relevés.

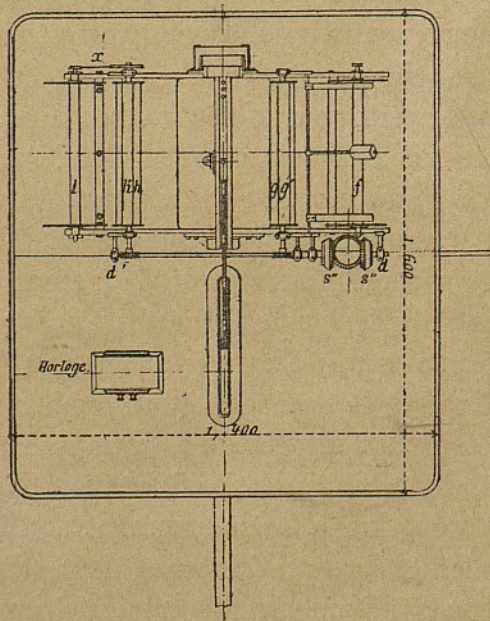


Fig. 40. — Plan de la table des relevés.

dispositions adoptées pour la transmission du mouvement sont tout à fait semblables à celles du wagon

dynamomètre de la Compagnie de l'Est. La transmission est établie de telle sorte que le papier se déroule de 100 millimètres par kilomètre parcouru par le wagon. On a d'ailleurs des jeux d'engrenages de rechange, permettant de modifier cette vitesse lorsqu'on le juge utile pour certains essais, et de la porter à 200 millimètres ou à 500 millimètres, ou même à 1 mètre par kilomètre parcouru.

L'appareil enregistreur inscrit sur le papier à mesure qu'il se déroule :

- 1° Les efforts de traction,
- 2° Les temps écoulés,
- 3° La position des poteaux kilométriques ou autres points intéressants,
- 4° L'intensité et la direction du vent relatif.

C. *Enregistrement des efforts de traction et de compression.* — Une armature JKK' (fig. 34), fixée au côté supérieur du cadre de traction d'une manière très rigide, commande, par l'intermédiaire d'une bielle, le crayon qui trace la *courbe des efforts*, dont les ordonnées sont mesurées par rapport à une ligne droite de base tracée par un crayon fixe, et qui représente soit le zéro des efforts, soit l'effort égal à la bande initiale donnée aux ressorts. Les crayons employés sont des mines ordinaires de très petit diamètre.

D. *Enregistrement des temps écoulés.* — Une horloge, montée sur un plateau convenablement suspendu à la table des relevés, porte sur son arbre des secondes dix touches isolées l'une de l'autre, et qui, toutes les six secondes, donnent pendant 1" environ passage au courant d'une pile à laquelle l'horloge est reliée. Un crayon, qui trace une ligne droite dans le sens du mouvement se déplace légèrement dans le sens perpendicu-

laire, sous l'action d'un petit électro-aimant, chaque fois que passe le courant et trace une encoche. Pour certains essais, dans lesquels on avait besoin d'enregistrer non plus seulement les intervalles de six secondes, mais la demi-seconde, on a remplacé l'horloge dont il vient d'être question par celle d'un chronotachymètre de la Compagnie P.-L.-M.

E. *Enregistrement des espaces parcourus.* — Un crayon, installé comme celui qui enregistre les temps, permet de pointer sur le papier la position des poteaux kilométriques, stations ou autres points intéressants. Le courant électrique, déplaçant ce crayon, peut d'ailleurs être lancé de la machine pour marquer les endroits de la ligne où l'on y fait certaines observations. Lorsqu'on n'a à enregistrer que les positions observées de l'intérieur du wagon lui-même, on ne se sert pas de l'électricité pour actionner le crayon : on le déplace simplement, au moyen d'un cordon, de sa position normale à laquelle le rappelle un petit ressort. Pour apercevoir d'avance les points qu'il devra noter au passage, l'opérateur surveille la voie sans se déplacer, à l'aide d'un miroir vertical, monté en dehors de la baie qui lui fait face et incliné à 45° sur l'axe du wagon.

F. *Enregistrement du vent relatif.* — Un anémomètre, monté sur le toit du wagon, communique son mouvement de rotation à un arbre muni d'une touche qui laisse passer un courant pendant un instant chaque fois que le wagon a parcouru un kilomètre par rapport au vent, et à ce moment un crayon spécial trace une encoche ; l'intervalle de deux de ces points, rapproché du temps écoulé, permet de déterminer la vitesse du vent relatif. La direction du vent est enregistrée également au moyen d'une girouette montée sur un arbre

vertical qui, à l'aide de deux excentriques calés, l'un dans la direction de la girouette et l'autre à angle droit du premier, commande deux crayons se déplaçant parallèlement à l'axe du wagon : les ordonnées des courbes qu'ils décrivent, mesurées par rapport à une droite tracée par un crayon fixe, permettent de déterminer l'angle que fait la direction du vent avec l'axe du wagon.

Les deux wagons dynamomètres de la Compagnie P.-L.-M., achevés depuis 1889, ont été employés dans un grand nombre d'expériences. Ils ont servi à étudier l'influence de la nature des coussinets et de celle du système de graissage sur la résistance due au frottement des fusées d'essieux. C'est à la suite d'essais de ce genre que la Compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée a adopté pour tout son matériel les coussinets en bronze garni de métal blanc, et l'huile de colza schistée, dans la proportion de 90 pour cent d'huile et de 10 pour cent de schiste.

Ces wagons ont servi aussi aux expériences de traction qui ont été faites par la *Commission des courbes de faibles rayons* en 1891 et 1892, expériences dont nous ferons connaître plus loin les résultats.

41. — Méthode rationnelle. — Dans le but d'évaluer la résistance des trains sans recourir à l'emploi des wagons dynamomètres, et sans avoir à se préoccuper du régime de la vitesse, *M. Desdovits* a proposé l'emploi de la *méthode rationnelle*, à laquelle il a consacré des études importantes. Cette méthode est basée sur l'application des lois de la mécanique aux variations de vitesse et d'accélération d'un corps dont la masse est connue.

On sait que pour un mouvement varié quelconque et en désignant par e le chemin parcouru, par v et j la vitesse et l'accélération correspondantes, on a les relations :

$$[1] \quad e = f(t).$$

$$[2] \quad v = \frac{de}{dt} = f'(t).$$

$$[3] \quad j = \frac{dv}{dt} = f''(t).$$

C'est-à-dire que la vitesse obtenue au bout d'un temps quelconque est la *dérivée* de l'*espace* par rapport au temps, et que l'accélération est la *dérivée* de cette *vitesse* par rapport au temps. L'une de ces trois équations étant connue, on en déduit les deux autres, et le mouvement est entièrement déterminé.

Tel est le principe de la méthode rationnelle dont *M. Desdovits* a publié des descriptions très détaillées, et dont il a fait connaître les applications pratiques et les résultats¹. Elle se présente sous les deux formes suivantes :

A. *Dynamomètre à force d'inertie, ou pendule Desdovits*. — En intégrant la troisième des équations ci-dessus, on a :

$$\int_0^v \frac{dv}{dt} dt = \int_0^v dv = v - v_0.$$

Il suffit donc d'opérer la quadrature du diagramme des accélérations, pour déterminer la loi des vitesses.

Pour y parvenir, *M. Desdovits* emploie un appareil qui procède du pendule, le *dynamomètre à force d'inertie*², dont les déviations dans le sens de la marche,

1. Applications de la méthode rationnelle aux études dynamométriques ; *Annales des Ponts et Chaussées*, 1^{er} semestre, p. 371.

2. Note sur un nouvel appareil dynamométrique ; *Revue générale des chemins de fer*, octobre 1883, p. 215.

par rapport à la position qu'il occupe au repos, fournit les ordonnées de la courbe.

Cet appareil est constitué en principe par un disque D (fig. 41) à jante assez large, pouvant rouler sur un plan. Un poids P , qui se déplace à volonté suivant le rayon OA , permet de faire varier la distance du centre de

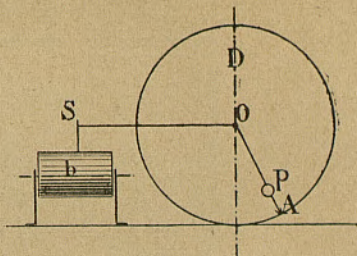


Fig. 41.

gravité du disque à son centre de figure O . Il y a donc, pour chaque position de P , une position correspondante d'équilibre, à laquelle le disque tend toujours à revenir, comme le pendule dévié de la position verticale, tend à s'y placer de nouveau sous l'action de la pesanteur ; mais ici on peut changer le moment de la force produisant ce rappel, et modifier à volonté la sensibilité de l'appareil.

Les déplacements du disque entraînent ceux du style S qui les enregistre sur le papier du barillet b . Dans l'exécution, on a remplacé ce disque par un secteur cylindrique se comportant de même.

La quadrature de la courbe ainsi obtenue, entre deux ordonnées quelconques, fait connaître la valeur moyenne de l'accélération pendant le temps correspondant¹, et par suite la *résistance* par unité de poids du *train tout entier*, pour la vitesse moyenne observée.

Les dispositions données pratiquement à l'appareil peuvent varier selon le genre d'observations que l'on se propose de faire. Les fig. 42, 43, 44 représentent

1. En vertu de la relation : $F = m j$ concernant l'accélération j produite sur une masse m par une force F .

la forme qui se prête spécialement à l'étude des problèmes ordinaires de la traction. Le poids mobile ayant une faible excentricité, l'appareil possède une grande

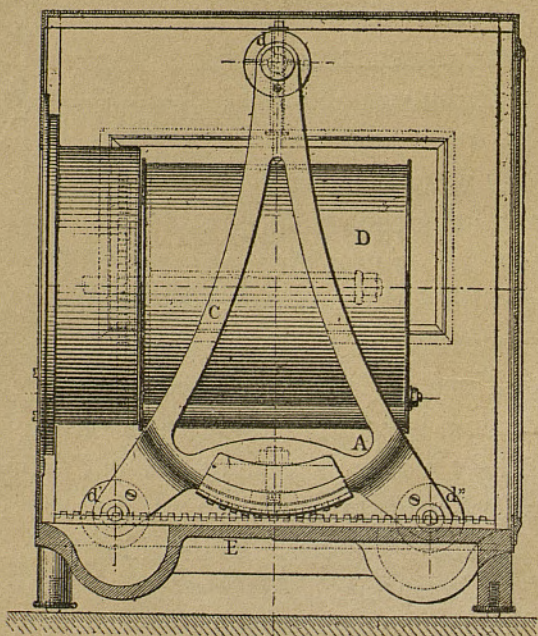


Fig. 42.

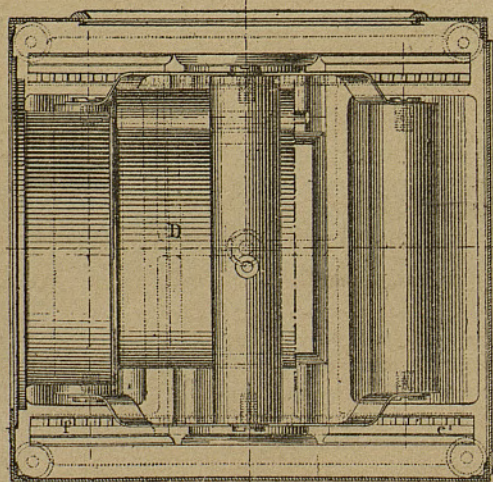


Fig. 43.

inertie, et il est peu influencé par les trépidations résultant de l'état de la voie ou de toute autre cause.

L'emploi du dynamomètre à force d'inertie se distingue donc de celui du ressort dynamométrique en ce

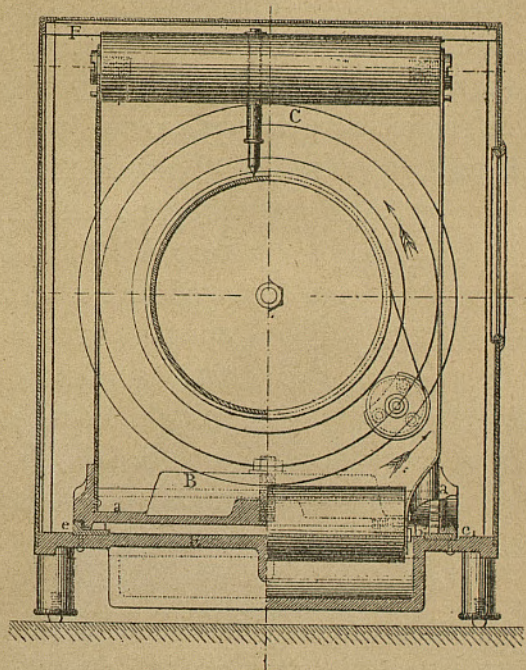


Fig. 44.

LÉGENDE DES FIGURES 42, 43 et 44.

- A. — *Chassis métallique* constituant un pendule roulant qui se déplace sous l'action des forces d'inertie.
- a. — *Patin en bronze* formant secteur de cercle dont les extrémités, tournées sous forme de gorge, roulent sur les rails *e*.
- bb. — *Secteurs dentés* fixés au patin, pour empêcher le glissement.
- cc. — *Flasques* en tôle découpée.
- dd'd'' — *Entretoises massives* donnant à l'appareil pendulaire un grand moment d'inertie et une longue période d'oscillation.
- B. — *Poids mobile* permettant de faire varier la distance du centre de gravité au centre de roulement et de régler ainsi la sensibilité de l'appareil.
- C. — *Style* inscrivant les déplacements du pendule.
- D. — *Tambour enregistreur* mû par un mécanisme d'horlogerie.
- E. — *Socle en bronze* supportant les rails de roulement *ee* et les crémaillères *ff*, correspondant aux secteurs dentés *bb*.
- F. — *Boîte en tôle* renfermant tout l'appareil, pourvue de fenêtres de regard.

que, dans le premier cas, on mesure la résistance totale du *train brut*, machine et tender compris, tandis que, dans le second cas, la résistance des *véhicules remorqués* est seule évaluée.

L'appareil de *M. Desdouits* peut être appliqué à la mesure des efforts *moteurs* ou *résistants*. Pour ces derniers, les seuls dont nous ayons à nous occuper ici, le train étant lancé, en palier par exemple¹, si on supprime l'action de la vapeur, la vitesse initiale V décroît

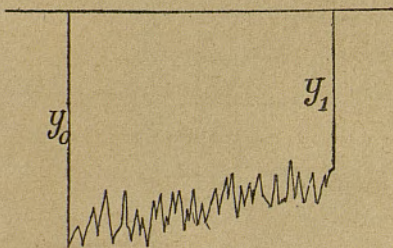


Fig. 45.

progressivement jusqu'à zéro. L'ordonnée qui mesure la résistance subit aussi des variations depuis sa valeur initiale y_0 jusqu'à la valeur finale y_1 (fig. 45). La quadra-

ture de l'aire ($y_0 y_1$) fera connaître V puisque dans l'expression $\int_{V_0}^V j dt = V - V_0$, V_0 est nul.

Si la vitesse, au lieu de s'annuler, passe de la valeur V à une autre V_0 , les indications de l'appareil enregistreur des accélérations doivent être complétées par l'observation des espaces en fonction du temps, pour déterminer la vitesse moyenne.

B. *Observations chronométriques*². — L'application de cette seconde méthode peut d'ailleurs être générale. Selon *M. Desdouits*, il en serait de même pour le *dynamomètre d'inertie*, et celui-ci conviendrait seul pour l'étude des efforts de courte durée ou brusquement va-

1. On peut d'ailleurs opérer sur un profil quelconque.

2. Note sur l'emploi des observations chronométriques pour l'étude dynamique des systèmes en mouvement. Application à la résistance des trains et à la puissance des machines, par *M. Desdouits* (*Revue générale des chemins de fer*, mars 1884, p. 129).

riables, — comme ceux des démarrages, ou des ralentissements sous l'action des freins.

La méthode inverse, dite *chronométrique*, s'appliquerait plus spécialement à des mouvements de longue durée et dont la loi est simple. Elle peut être mise en pratique sans l'intervention d'appareils enregistreurs analogues à ceux des wagons d'expériences et simplement par l'usage d'une montre tachymètre. Elle avait même été indiquée en principe par MM. *Vuillemin*, *Guëbhard* et *Dieudonné* à la seconde page de leur Mémoire ; mais elle exige des précautions assez minutieuses. Le repérage des espaces par les poteaux hectométriques existant sur toutes les lignes de chemins de fer, est suffisant. Quant aux *temps*, ils doivent être mesurés à une petite fraction de seconde près, et pour ce motif, le *compteur chronographe* doit être employé de préférence aux *tachymètres* ordinaires, à cause du pointage qu'il permet de faire sur le cadran, au moment précis de chaque observation.

42. — Comparaison des méthodes expérimentales précitées. — Les deux méthodes que nous venons de décrire présentent l'une et l'autre leurs avantages et leurs inconvénients.

L'application d'un ressort de flexibilité connue à la mesure des efforts de traction offre les meilleures garanties d'exactitude ; mais le ressort devant être monté sur un véhicule spécial, cette solution se concilie plus ou moins facilement avec les exigences du service, et bien que les expériences puissent être faites généralement dans les conditions habituelles de la marche des trains, il n'est pas toujours aisé, en raison des difficultés qu'elles présentent, de les multiplier autant qu'il

serait nécessaire pour en dégager des conclusions certaines. De plus, avec ce système d'investigations, il est désirable, pour éviter des corrections quelque peu douteuses, d'opérer à vitesse uniforme ; or ce résultat est difficile à obtenir en pratique.

L'équilibre doit, il est vrai, nécessairement s'établir entre le travail moteur supposé constant, et le travail résistant du train entier, qui augmente avec la vitesse ; mais d'une part, l'uniformité du travail de la vapeur sur les pistons n'est pas réalisée aussi facilement qu'on pourrait le croire au premier abord, et de l'autre, la *voie* présente rarement de longs développements sans changements de profil ou de tracé, et aussi sans inégalités.

L'emploi du wagon dynamométrique a aussi l'inconvénient de limiter les recherches, et de ne pouvoir se prêter à l'étude des résistances d'un train entier. Cette méthode permet d'évaluer séparément les résistances de la locomotive considérée comme véhicule et du tender, mais en *remorquant* ces véhicules c'est-à-dire sans tenir compte de la réaction de l'air telle qu'elle s'exerce en service : ce procédé n'est donc réellement applicable que pour de très faibles vitesses.

Enfin, le dynamomètre à ressort, s'il se prête bien à l'évaluation des efforts en ligne droite ou dans les courbes de grands rayons, ne fournit plus des indications aussi exactes dans les courbes raides, à cause de l'obliquité de la force par rapport à la direction de la barre d'attelage.

Ces divers inconvénients sont évités par la méthode rationnelle dont la simplicité est séduisante. Le dynamomètre à force d'inertie, facilement transportable, permet de faire des observations multiples, sans exiger

de longs préparatifs, et sans occasionner aucune gêne dans le service. Ses indications sont indépendantes du tracé de la ligne, et les variations de vitesse constituent le principe même de son fonctionnement. Mais à l'inverse de ce qui a lieu pour les ressorts de traction, le dynamomètre à force d'inertie ne peut fournir aucune indication sur les résistances développées en mouvement uniforme. Il donne lieu, toutefois, à des objections beaucoup plus sérieuses.

Les équations [1], [2], [3] sont générales, mais en pratique il conviendrait, pour en tirer des conclusions précises, de pouvoir considérer j comme constant. Or, non seulement la *courbe* des accélérations enregistrée par l'appareil présente des ondulations beaucoup plus fortes que celles fournies par le jeu d'un ressort, mais dans la marche d'un train de chemin de fer, les accélérations ne se montrent pas plus constantes que les vitesses. Cette circonstance est aggravée par le fait que la *courbe* des accélérations enregistrées par le pendule dynamométrique présente des ondulations beaucoup plus fortes que celles provenant du jeu d'un ressort de traction : l'interprétation des graphiques fournis par le dynamomètre d'inertie est donc très délicate.

Quant aux observations chronométriques faites sans avoir recours aux wagons d'expériences, elles constituent le procédé le plus simple pour l'étude des lois du mouvement. Elles sont applicables aux phénomènes de courte durée, à la condition de noter les temps par rapport à des repères rapprochés les uns des autres, ou au développement des circonférences des roues dont on compte les tours. Mais alors on peut reprocher à ce système d'observations, comme au dynamomètre

à force d'inertie, de laisser une trop large part à l'habileté de l'expérimentateur.

En résumé, la méthode des wagons dynamométriques et celle dite *rationnelle* peuvent se compléter mutuellement. Ajoutons que malgré les inconvénients signalés pour la première, c'est encore à elle que l'on donne le plus souvent la préférence dans les grandes Compagnies de chemins de fer à cause des garanties d'exactitude qu'elle présente.

§ 3. — RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES. FORMULES DIVERSES

43. — Division du sujet. — L'ensemble des considérations exposées précédemment conduirait à admettre qu'en alignement droit la résistance R par tonne d'un véhicule isolé ou d'un train doit, théoriquement, se composer de trois termes :

1° Une constante représentant la résistance à très faible vitesse en palier ;

2° Un terme de valeur proportionnelle à la vitesse, pour exprimer les résistances dues au mouvement de lacet ;

3° Un terme proportionnel au produit de la surface de front S par le carré de la vitesse et inversement proportionnel au poids total P du train, pour représenter la résistance de l'air.

L'expression serait donc de la forme :

$$R = A + BV + \frac{CSV^2}{P}$$

On a cherché à déterminer les coefficients A, B, C.

Les essais ont eu lieu dans quatre cas distincts et dans le but d'évaluer :

1° La résistance des trains *bruts* (machine et tender compris), en alignement droit ;

2° La résistance des voitures et wagons en alignement droit ;

3° Le surcroît réel de résistance dans les courbes ;

4° La résistance des locomotives et tenders.

Quelles que soient les méthodes qu'ils aient employées, les expérimentateurs se sont généralement attachés à résumer dans une formule empirique les résultats de leurs observations.

44. — Résistance des trains bruts en alignement droit. — Nous mentionnerons ici quelques formules anciennes qui ont joui pendant longtemps d'une grande faveur, mais dont l'application est devenue assez rare.

A. *Formule de W. Harding.* — Elle a été proposée en Angleterre par M. *Scott Russell* d'après une série d'expériences fondées sur la gravité, faites en 1846 par M. *Harding*. Cette formule est :

$$t = 2.72 + 0.094 V + 0.00484 \frac{SV^2}{P}$$

t exprime la résistance en kilogrammes, par tonne de train brut (machine et tender compris) ;

V exprime la vitesse en kilomètres à l'heure ;

S exprime la section transversale du train en mètres carrés ;

P exprime le poids total du train en tonnes (machine et tender compris).

La valeur de t comprend la résistance de la locomotive considérée comme véhicule, et ne renferme pas celle qui résulte de l'action de la vapeur sur son mécanisme : t est donc la résistance par tonne de train, évaluée aux jantes des roues motrices.

La discussion de cette formule présenterait peu d'intérêt. Ses *coefficients* ne peuvent, en tous cas, s'appliquer qu'au matériel existant à cette époque, et dans lequel le rapport du *poids aux dimensions* des véhicules était plus faible qu'aujourd'hui, ce qui avait évidemment pour effet d'aggraver la résistance par tonne.

De plus, elle réunit *en bloc* la résistance de la machine avec celle des véhicules : toute formule qui admet cette assimilation est, comme on le verra plus loin, essentiellement défectueuse.

En fait la formule de Harding donnerait, pour un train de composition moyenne en matériel actuel, des résultats de 2 à 4 fois trop élevés.

B. *Formules anciennes du chemin de fer de l'Est, pour les trains bruts.* — MM. Vuillemin, Guébbard et Dieudonné, à la suite d'une série importante d'expériences exécutées en 1865-1866 au chemin de fer de l'Est et devenues classiques, ont cru devoir conserver la formule de Harding, mais en lui appliquant quatre séries différentes de coefficients suivant la nature des trains, marchandises, mixtes, omnibus, express :

Marchandises. — Vitesse de 12 à 32 kil. (graissage à l'huile) $r = 1.65 + 0.05 V$ (1).

Mixtes. — Vitesse de 32 à 50 kil. (graissage à l'huile) $r = 1.80 + 0.08 V + 0.009 \frac{SV^2}{P}$

Omnibus. — Vitesse de 50 à 65 kil. (graissage à l'huile) $r = 1.80 + 0.08 V + 0.006 \frac{SV^2}{P}$

(1) Le coefficient du terme en V^2 est 0.

Express. — Vitesse de 70 à 80 kil. (graissage à l'huile) $r = 1.80 + 0.14 V + 0.004 \frac{SV^2}{P}$.

(P représente le poids du train, machine et tender compris et r la résistance par tonne).

Ce mode de procéder, en laissant subsister les objections de principe que soulève l'emploi de la formule de *Harding*, offre en outre l'inconvénient de représenter d'une manière discontinue un phénomène dont la loi est évidemment continue. Pour une même vitesse, par exemple 50 kilomètres, l'application de l'une ou de l'autre des formules, considérées comme répondant à cette vitesse, donne des résultats très sensiblement différents.

La modification des coefficients permet avec ces formules d'approcher plus près de la réalité qu'avec l'expression primitive de *Harding*. Toutefois leur application au matériel actuel donne encore des résultats notablement trop élevés. Ainsi pour un train de 200 tonnes brutes, section transversale des véhicules 7^{m^2} , vitesse 80 kilomètres, on a par le calcul une résistance par tonne de 14 kilogrammes; tandis que l'expérience directe donne un résultat inférieur à 8 kilogrammes.

Pour opérer d'une manière correcte, il est indispensable de considérer séparément la *machine*, qui constitue, réunie avec son tender, un véhicule moteur, ayant ses lois propres de résistance, et, d'autre part, le *train remorqué*, qui peut être regardé, jusqu'à un certain point, comme formé d'unités semblables entre elles, réunies en nombre plus ou moins grand. Les lois de résistance de la machine comme des véhicules doivent être déduites d'expériences directes, exécutées sur

le type même de matériel que l'on a en vue, ou du moins sur un type aussi voisin que possible sous le rapport du poids et des formes.

Nous indiquerons donc successivement les résultats pratiques et les formules qui se rapportent aux véhicules de transport et aux locomotives.

45. — Résistance des voitures et wagons, en alignement droit ¹.

A. *Expériences du chemin de fer d'Orléans.* — Ces expériences commencées par *M. Camille Polonceau* en 1857, ont été continuées par *M. Forquenot* qui les a décrites dans un mémoire adressé à la *Société des Ingénieurs civils*². Ce mémoire renferme des documents importants sur l'influence du diamètre des fusées d'essieux, de la longueur des trains, de la nature du graissage, du vent extérieur, etc.

Les tableaux ci-dessous font connaître les résistances constatées pour les deux systèmes de graissage, à différentes vitesses. Les calculs, tout approximatifs, ont été faits en cherchant l'*effort moyen* correspondant à une certaine *vitesse moyenne* réalisée sur un parcours sans arrêt :

Graissage à la graisse.

1° Train de marchandises ; 16 wagons pesant 158 tonnes :

Vitesse en kilomètres à l'heure	Résistance par tonne, en palier
15	2 kil. 42 à 3 kil. 60
30	4 — 28 à 4 — 35

1. Voir aussi les formules de *Frank* (48 E).

2. Année 1868, p. 309. Note sur les expériences de traction de la Compagnie d'Orléans.

2° Train de voyageurs ; 14 à 16 voitures pesant 96 à 107 tonnes :

Vitesse en kilomètres à l'heure	Résistance par tonne, en palier
45	5 kil. 79 à 6 kil. 67
60	8 kil. 72

Graissage à l'huile.

1° Train de marchandises composé de 15 wagons pesant 167^t, 5 :

Vitesse en kilomètres à l'heure	Résistance par tonne, en palier
15	1 kil. 435
29	2 — 464

2° Train de voyageurs composé de 8 voitures pesant 73^t, 5 :

Vitesse en kilomètres à l'heure	Résistance par tonne, en palier
43	3 kil. 088
55	4 — 653
60	5 — 25

Dans le même mémoire, l'influence du vent est mise en évidence par la comparaison des deux trains d'expérience suivants composés de 35 wagons, et marchant l'un et l'autre à la vitesse de 23 kilomètres à l'heure :

Avec un temps calme : résistance par tonne en palier 3^{kg}, 57.

Avec un vent violent de travers : résistance par tonne en palier 4^{kg}, 95.

B. *Expériences de la Compagnie de Paris-Lyon-Méditerranée.* — Elles ont eu lieu en 1860 à l'aide de wagons dynamomètres et avaient surtout pour but la comparaison des deux modes de graissage. On a été amené à conclure que la nature et la valeur des graisses et des huiles sont extrêmement variables. A l'inverse de ce qui a eu lieu dans les expériences de la Compagnie d'Orléans, la supériorité s'est presque toujours trouvée acquise à la graisse dont la préparation était d'ailleurs l'objet de soins tout particuliers. Cependant, après un examen prolongé de cette question dans son ensemble, les diverses Compagnies de chemins de fer ont été conduites à substituer l'emploi de l'huile à celui de la graisse. Nous verrons que cette dernière a été conservée seulement dans des proportions très restreintes pour parer aux éventualités du chauffage des boîtes d'essieux.

Les expériences dont il vient d'être question et qui sont décrites par M. *Couche*¹ peuvent être résumées par la comparaison des coefficients suivants :

Pour des trains de vingt wagons de houille pesant 107 tonnes, on a trouvé, en moyenne, à la vitesse uniforme de 30 kilomètres à l'heure en palier :

Pour le graissage à la graisse ; résistance par tonne 3^{kg}.

Pour le graissage à l'huile ; résistance par tonne 3, 3 à 3, 8.

C. *Formule du chemin de fer de l'Est pour les trains de voyageurs (expériences de 1880).* A la suite

1. T. III, p. 633.

de l'Exposition universelle de 1878, la Compagnie des chemins de fer de l'Est a procédé, au moyen du wagon dynamométrique dont nous avons parlé, à une série d'expériences relatées dans la *Revue Générale des chemins de fer*¹.

Les ingénieurs de cette Compagnie, abandonnant les anciennes formules, qui procèdent de celle de *W. Harding*, ont étudié, en 1880, la résistance des trains de voyageurs, évaluée au crochet de traction du tender, et, pour simplifier l'analyse des documents recueillis en nombre considérable, ils ont admis que la résistance par tonne, en alignement, ne dépendait que du *poids* et de la *vitesse* du train considéré, les circonstances atmosphériques se trouvant ainsi reléguées parmi les erreurs d'observations. Cette manière de procéder est justifiée par les difficultés qu'on rencontre à établir une formule répondant aux conditions *moyennes* du service. Celle qui suit résumait convenablement les observations pour des valeurs de P comprises entre 80 et 130 tonnes, et pour celles de V comprises entre 40 et 80 kilomètres à l'heure.

$$R = 0,0843 V + 2,34 - \frac{P}{200}$$

R résistance en kilogrammes par tonne du train remorqué,

V vitesse en kilomètres à l'heure,

P poids du train remorqué.

Mais entre les limites indiquées pour P, l'influence de ses variations était si faible, qu'il a paru plus simple d'adopter la formule :

$$R = 1,83 + 0,0843 V.$$

1. N° de juillet 1881, p. 3.

On remarquera que le terme en V^2 des anciennes formules empiriques a disparu. Cela tient à ce que la surface de front du fourgon de tête se trouvant en grande partie masquée par la locomotive et le tender, les variations de la résistance de l'air sur les véhicules remorqués peuvent être, en l'absence de tout vent extérieur, considérées comme peu importantes, entre les limites de vitesse de 40 à 80 kilomètres à l'heure.

Les résistances calculées par cette formule sont plus faibles que celles données par les anciennes [44], qui s'appliquaient aux trains bruts. Elles sont cependant encore supérieures aux résultats constatés aujourd'hui par la pratique pour les trains remorqués. On le reconnaît par la valeur attribuée à la résistance à très faible vitesse qui, d'après les expériences récentes, est d'environ $1^k 5$ par tonne. De plus, à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure, la formule donnerait $R = 8^k 54$; or, dans des essais effectués de janvier à mars 1892, au chemin de fer du Nord, sur des trains express de 180 tonnes remorquées, on a trouvé que la résistance en palier, à cette vitesse, était de 7^{kg} à $7^{kg} 5$ par tonne. Ce chiffre peu élevé a été obtenu avec de grandes voitures de 1^{re} classe pesant environ 12 tonnes, chargement compris.

D. *Formules de Fink.* — Ce qui précède se rapporte exclusivement à la progression des trains en ligne droite. Il peut être utile, pour les calculs rapides, de recourir à des formules susceptibles de donner, avec une approximation forcément assez large, les résistances moyennes pour un tracé dans lequel les courbes plus ou moins raides alternent avec les alignements droits. Dans ce cas, les formules suivantes, proposées en 1870 par un ingénieur autrichien M. *Fink*,

peuvent être d'un usage commode. Cet ingénieur a distingué deux sortes de conditions, les unes *favorables*, les autres *défavorables*¹:

1° *Conditions favorables*. — Pas ou peu de courbes de rayon moindre que 500 mètres; vent faible; température, au-dessus de 5°; graissage à l'huile; charge plus de 100 tonnes brutes:

$$r = 2,5 + 0,001 V^2$$

2° *Conditions défavorables* (mais non cependant extrêmes). — Nombreuses courbes de moins de 500 mètres; vent fort; température au-dessous de 5°; graisse; charge inférieure à 100 tonnes:

$$r = 3,75 + 0,0015 V^2$$

Ces deux formules, applicables à un matériel de construction ordinaire, donnent les valeurs pratiques suivantes:

Vitesse :	12 kilom. à l'heure	15	20	25	30	35	40	50	60	70	
Résistan- ces par tonne. {	1 ^{re} formule	2 kilog. 65	2.73	2.90	3.13	3.40	3.72	4.10	5.00	6.10	7.40
	2 ^e formule	4 — 00	4.09	4.35	4.70	5.10	5.58	6.15	7.50	9.15	11.10

E. *Expériences du chemin de fer du Nord sur des trains de marchandises*². — En 1882-1883, des expériences assez nombreuses ont eu lieu au chemin de fer du Nord sur des trains composés exclusivement de wagons tombereaux, chargés de 10 tonnes de houille et dont les fusées d'essieux sont graissées à l'huile. Les résistances moyennes constatées pour des vitesses variant de 25 à 55 kilomètres à l'heure, en palier et alignement droit, sont indiquées dans le tableau suivant:

1. *Couche*, t. III, p. 647.

2. *Revue générale des chemins de fer*. N° d'avril 1883, p. 330.

Vitesse en kilomètres à l'heure	Charge remorquée en tonnes	Nombre de véhicules remorqués	Résistance en kilogrammes par tonne
25	605	41	1.90
30	529	36	2.10
35	529	36	2.35
40	529	36	2.70
45	529	36	3.10
50	455	31	3.50
55	397	27	3.90

Ces résultats peuvent être représentés graphiquement par une courbe (fig. 46) qui aurait pour abscisses les valeurs de la vitesse et pour ordonnées celles de la résistance par tonne correspondante.

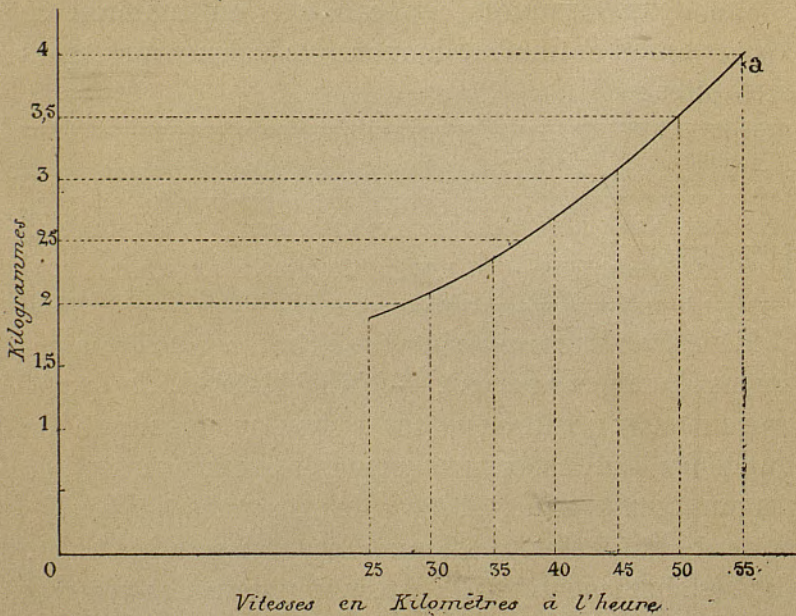


Fig. 46.

Le point a, figurant la résistance de 3^k, 90, serait seul en dehors de cette courbe de forme très régulière. Cela paraît tenir à la faible longueur du train, composé

de véhicules identiques et sur lesquels la réaction de l'air est d'ailleurs assez faible en raison de leur forme. On est amené à conclure que, pour la vitesse de 55^{km} la réduction de résistance par tonne, relativement à celle qu'on pourrait déduire de la courbe, est due, principalement à la diminution d'importance du mouvement de lacet.

La formule suivante représenterait d'une manière satisfaisante les résultats ci-dessus, *pour un train comprenant au moins 30 wagons*, et pour des vitesses comprises entre 20 et 50 kilomètres à l'heure :

$$r = 1,45 + 0,0008 V^2$$

Cette formule, applicable à des véhicules identiques, donnerait des résultats trop faibles si on l'employait pour des trains de marchandises composés de wagons très dissemblables comme forme, à cause de la résistance de l'air sur les surfaces démasquées.

F. *Expériences des chemins de fer de l'État*. — Il y a quelques années, on a fait, aux chemins de fer de l'État français, des expériences ayant pour objet d'évaluer les efforts résistants développés dans la marche des trains et de déterminer, par suite, les conditions d'établissement du matériel qui procurent, pour un même service, la plus grande économie de travail moteur. Ces expériences, dont M. *Desdovits* a rendu compte dans la *Revue générale des chemins de fer*¹, ont été faites sur les trains en service, et c'est la méthode chronométrique qui a été employée pour l'évaluation de la résistance des véhicules remorqués.

Il s'agissait de comparer, au point de vue de la traction, le matériel à voyageurs ordinaire avec les grandes voitures à trains articulés ou *bogies*, dont les Com-

1. Nos de mai et juin 1890.

pagnies ont récemment entrepris la construction. Les essais ont eu lieu pendant la saison d'été de 1889. Les trains d'expériences, mis en marche le même jour, à un faible intervalle de temps, étaient formés, l'un de véhicules ordinaires pesant environ 8 tonnes, l'autre de 3 voitures à bogie, et ils avaient le même poids total de 78 tonnes. Les résistances constatées en palier et en alignement droit à la vitesse de 74 kilomètres à l'heure ont été les suivantes :

Voitures ordinaires. . . .	5 kg. par tonne
Voitures à bogies. . . .	3 kg. 78 —

L'avantage du matériel à bogies se faisait sentir seulement lorsque la vitesse était un peu élevée. Aux vitesses inférieures à celle de 20 kilomètres à l'heure cet avantage s'annihilait. On était porté à en conclure que les conditions de roulement étaient les mêmes et que la différence provenait uniquement de la réaction de l'air.

« La résistance de l'air, dit M. *Desdovits*, plus faible dans le cas des voitures à bogies, tient en partie à la longueur un peu moindre du train, mais surtout à ce que le nombre des intervalles ouverts entre les voitures est réduit dans le rapport de 7 à 2. Si cette cause de résistance disparaissait entièrement, on gagnerait encore environ les $\frac{2}{7}$ du bénéfice déjà obtenu : on est ainsi conduit à un coefficient de 0,65, qui représente l'extrême limite à laquelle pourrait être portée la diminution de résistance d'un train, si on le supposait réduit à une seule voiture ayant les dimensions transversales actuelles, mais une longueur illimitée ».

Les expériences des chemins de fer de l'Etat ont confirmé ce fait déjà connu que la réaction de l'air

ambiant sur un train quelconque formé de véhicules ordinaires est assez variable selon leur *gabarit*, et que son influence sur la résistance *par tonne* est sensible. Il est bien constaté que cette résistance a une valeur notablement plus grande pour un véhicule vide que pour un véhicule semblable lourdement chargé.

Pour résumer les expériences en question, M. *Desdovits* a proposé de faire usage de l'une des formules suivantes qu'il a bien voulu nous communiquer et qui sont applicables à un train formé de voitures ou de wagons couverts semblables, d'un poids moyen de 10 tonnes, chargement compris :

$$(a) \quad r = 1,5 + 0,0007 V^2$$

$$(b) \quad r = 1,5 + 0,04 V$$

dans lesquelles r représente la résistance par tonne en kilogrammes et V la vitesse en kilomètres à l'heure.

La formule (a) a été établie pour les vitesses comprises entre 0 et 80 kilomètres à l'heure, et la formule (b) pour celles comprises entre 30 et 100 kilomètres. L'une et l'autre, et en général les formules de ce genre, ne pourraient s'appliquer aux trains de marchandises formés de wagons très dissemblables comme forme et comme chargement, répartis sans aucun ordre sur la longueur du train. En pareil cas la résistance *due à la vitesse* est essentiellement variable et relativement très élevée : sa valeur peut aux vitesses ordinaires de marche atteindre le double ou le triple de ce que donnerait l'application des formules.

Nous ajouterons que, même pour des véhicules semblables, les coefficients de résistance fournis par les formules ci-dessus ne doivent être employés que si les circonstances sont très favorables à la réduction des résistances.

La formule (b) notamment paraît donner des résultats trop faibles.

46. — Surcroît réel de résistance des voitures et wagons, dû aux courbes. — Les difficultés qu'on rencontre à établir des formules pratiques, pour exprimer la résistance des véhicules en alignement droit, se retrouvent, ainsi que nous l'avons dit, plus sérieuses encore lorsqu'il s'agit du passage en courbes (30).

Des recherches nombreuses et importantes ont été entreprises cependant, à diverses époques, pour l'étude de cette question.

A. *Résultats d'expériences.* — Les expériences faites en 1865-1866 par MM. *Vuillemin, Guébard* et *Dieudonné* avaient conduit ces ingénieurs à admettre que, pour la voie normale, le coefficient de résistance par tonne de train remorqué, en alignement droit, se trouvait majoré de 1 kilogramme dans les courbes de 1000 mètres de rayon et 1^{kg} 5 dans celles de 800 mètres. Ces chiffres ont été reconnus beaucoup trop élevés.

Au chemin de fer *d'Orléans*, M. *Polonceau* a opéré sur un train de 35 wagons à marchandises dont la résistance par tonne en ligne droite était de 3^{kg} 20, à la vitesse de 25 kilomètres à l'heure. Il a conclu à l'adoption des nombres suivants pour exprimer la résistance propre des courbes de différents rayons à cette même vitesse :

Rayons des courbes	1500	1400	1300	1200	1100	1000	900	800	700	600	500	400	300
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
Surcroît de résistance par tonne	0	0.05	0.15	0.30	0.50	0.75	1.05	1.40	1.80	2.25	2.75	3.30	3.90

M. *Forquenot*, continuant les expériences de M. *Po-*

lonceau a obtenu les résultats indiqués dans le tableau ci-après :

Rayons	Résistance spéciale due à la courbe	
	Train de 40 véhicules à 25 kilomètres	Train de 12 véhicules à 50 kilomètres
1000 mètres	0 kilog. 35	0 kilog. 40
500 —	1 — 40	1 — 50
300 —	3 — 90	4 — 10

Dans ces expériences, la plus grande valeur de la résistance spéciale produite par la courbe correspond au train le plus court, et cependant il est bien établi que cette résistance croît avec la longueur du train, mais ici un autre élément, *la vitesse*, intervient pour la réduire avec une influence appréciable.

Enfin, au chemin de fer P.-L.-M., des expériences faites sur trois catégories de trains : *Express, voyageurs, marchandises*, ont fourni les résultats comparatifs suivants :

Trains	Nombre moyen de véhicules	Rayons des courbes					
		mètres 1000	mètres 800	mètres 500	mètres 400	mètres 300	mètres 250
		Résistance due à la courbe					
Express	10	kilog. 0.50	kilog. 0.60	kilog. 1.00	kilog. 1.20	kilog. 1.70	kilog. 2.00
Voyageurs	20	0.55	0.70	1.15	1.50	2.10	2.30
Marchandises	50	0.75	0.90	1.50	1.80	2.50	3.00

La résistance plus grande des trains de marchandises semble devoir être attribuée en partie à l'absence de menottes aux ressorts de suspension. Nous avons déjà signalé l'utilité de ces pièces (30) pour faciliter la convergence des essieux dans les courbes.

B. *Coefficients à adopter.* — Nous nous en tiendrons à ces documents au sujet des expériences anciennes¹, et, en présence de résultats assez contradictoires, nous nous contenterons d'indiquer, à défaut de règle précise impossible à formuler, les principales conclusions qui se dégagent de leur ensemble.

En premier lieu, l'influence de la vitesse paraît très faible, et cela n'a rien de surprenant si l'on considère que la cause essentielle du surcroît de résistance dû à la vitesse en ligne droite, abstraction faite de la résistance de l'air, consiste dans le mouvement de lacet que les circonstances mêmes de la circulation en courbes ont tendance à supprimer.

Il est non moins certain, d'après les données de l'expérience, que la résistance par unité de charge, dans les courbes, augmente d'une manière appréciable avec la longueur des trains. Il faut en conclure que la progression des véhicules n'a pas lieu exactement selon les hypothèses concernant l'obliquité des efforts de traction et les effets qu'elle produit (30). Une constatation de ce genre a eu lieu sur la ligne du *Semmering* à courbes de très petits rayons. On a trouvé qu'à la vitesse de 15 kilomètres à l'heure, deux trains du même poids, composés l'un de 26 wagons, l'autre de 13, accusaient, en courbe de 189 mètres de rayon, un surcroît de résistance, le premier de 3^{kg}, 58, le second de 3^{kg}, 03².

En résumé, on pourrait admettre aujourd'hui, comme coefficients moyens de la résistance d'un train dans les courbes, non compris les résistances de la machine et du tender :

1. *Couche*, t. III, p. 658.

2. *Couche*, t. III, p. 673.

Pour un rayon de 800 mètres	0 ^{kg} , 50	par tonne.
— 600 »	1 ^{kg} , 00	—
— 500 »	1 ^{kg} , 25	—
— 400 »	2 ^{kg} , 00	—
— 300 »	3 ^{kg} , 00	—

On verra plus loin que des expériences récentes faites sur des courbes de petits rayons ont conduit à adopter, mais d'une manière très approximative, les coefficients suivants :

Pour un rayon de 200 mètres	4 ^{kg} .	par tonne.
— 150 »	6 ^{kg} .	—

Il est établi que, dans les courbes de 1000 mètres au moins de rayon, le matériel employé actuellement sur la voie normale n'éprouve aucun surcroît de résistance.

Enfin, ces indications supposent que le train est contenu tout entier dans la courbe, l'entrée et la sortie exigeant l'une et l'autre un effort de traction un peu plus élevé.

C. *Formule de M. Desdovits.* — Dans un ouvrage, publié récemment dans l'*Encyclopédie des travaux publics*¹, M. *Bricka* a donné, pour exprimer le surcroît de résistance par tonne d'un train entier (locomotive et tender compris), la formule suivante, établie par M. *Desdovits* :

$$\delta = \frac{500 e}{\rho}$$

δ Surcroît de résistance par tonne.

e Largeur de la voie (en nombres ronds, 1^m50, 1^m00 ou 0^m60).

1. Cours de chemins de fer professé à l'école nationale des Ponts et Chaussées, par C. *Bricka*, ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, t. I, p. 42 et 49.

ρ Rayon de la courbe.

Nous indiquerons plus loin les coefficients qui ont été trouvés pour les locomotives séparées de leur train.

La formule ci-dessus de M. Desdouits ne correspond pas à une loi quelconque. Elle est donnée comme l'expression suffisamment approchée des résultats obtenus dans diverses expériences. Il a été trouvé que la valeur de δ varie dans des proportions énormes (quelquefois du simple ou double), avec les circonstances atmosphériques, le dévers de la voie, le profil des bandages, etc.

Les chiffres fournis par la formule $\delta = \frac{500 e}{\rho}$ se rapportent aux résistances maxima, qui peuvent se produire en service courant. D'après cette formule empirique, le surcroît de résistance des courbes se trouvant, pour chaque rayon, à peu près proportionnel au poids du train, est assimilable à la résistance supplémentaire produite par les rampes; dans l'étude des tracés, ce surcroît de résistance est pour une largeur de voie donnée, fonction du rayon de la courbe et indépendant de la longueur du train.

D. *Expériences des Commissions françaises sur les courbes de faibles rayons.* — Une Commission ministérielle fut constituée en 1860 pour comparer les résistances du matériel ordinaire et du matériel avec boîtes à graisse radiales, système *Edmond Roy*, dans les courbes de faibles rayons. Cette Commission entreprit, avec le concours de la Compagnie d'Orléans, des essais dynamométriques sur un chemin de fer provisoire à voie normale établi à Ivry-sur-Seine, et comportant des courbes de 80 mètres de rayon; le train d'expérience se composait dans les deux cas de 10 wagons plateformes.

Nous n'avons pas à étudier ici les diverses solutions imaginées pour faciliter le passage des trains dans les courbes. Nous nous contenterons donc de mentionner que la résistance des véhicules pourvus des boîtes *Roy* a été trouvée très inférieure à celle du matériel ordinaire. Dans ce dernier cas, le surcroît de résistance par tonne des wagons plateformes, en courbes de 80 mètres de rayon, a d'ailleurs varié dans des proportions considérables, selon que les rails étaient mouillés ou secs, soit de 2^{kg}, 85 à 8^{kg}, 35. Dans le cas des boîtes *Roy*, le surcroît de résistance était seulement de 2 kilogrammes environ.

Le détail et les résultats de ces expériences sont indiqués dans un mémoire récent de M. Edmond Roy¹.

Par décision du 18 juillet 1890, le Ministre des travaux publics chargea une Commission spéciale de procéder à des expériences de traction sur une voie de largeur normale établie entre Draguignan et Grasse, et qui comportait des courbes de 150 mètres de rayon.

Ces expériences avaient pour objet de rechercher s'il était possible de faire la traction des trains militaires sur cette ligne avec des machines ordinaires. Les essais, qui eurent lieu en juin et juillet 1891, montrèrent que divers types de locomotives de la Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée et des chemins de fer de l'Etat étaient aptes à effectuer la traction des trains dans des courbes de 150 mètres de rayon. Le problème paraissait résolu en principe ; mais la Commission avait recueilli un grand nombre de faits concernant

1. Expériences et études sur le passage en courbes du matériel roulant, par M. *Edmond Roy*. Bulletin de la Société des Ingénieurs civils de France ; Février 1894, p. 128.

les surcroits de résistance dans les courbes, et, en comparant les résultats obtenus dans des circonstances qui paraissaient identiques, elle y remarqua des différences inexplicables au premier abord.

La Commission ne tarda pas à constater que ces anomalies provenaient de causes très variables, telles que la direction et l'intensité du vent, l'importance plus ou moins grande du coefficient de frottement des bandages, les positions très diverses que les boudins des roues peuvent prendre entre les rails, etc. On résolut alors de procéder à des recherches minutieuses et de longue durée sur le surcroit de résistance dû aux courbes. La *Commission des courbes de faibles rayons* qui avait été définitivement constituée en novembre 1890 sous la présidence de M. *de la Tournerie*, Inspecteur général des Ponts et Chaussées, eut l'idée de créer à Noisy-le-Sec, dans les dépendances d'un dépôt de la Compagnie de l'Est, le champ d'expériences dont elle avait besoin.

Ces nouvelles expériences eurent lieu en 1891-1892, sur une voie spéciale en forme de boucle (fig. 47), comportant des courbes de 200, 150 et 100 mètres de rayon.

Les évaluations ont été faites principalement au moyen du dynamomètre d'inertie de M. *Desdouits*, ou de la méthode chronométrique. On conçoit les difficultés d'emploi du wagon dynamomètre dans ce cas, à cause de l'obliquité appréciable de l'effort de traction et de la durée forcément très limitée des observations. On remarquera toutefois que cette dernière circonstance, qui constitue l'une des principales difficultés des essais, se retrouve pour toutes les méthodes d'expériences.

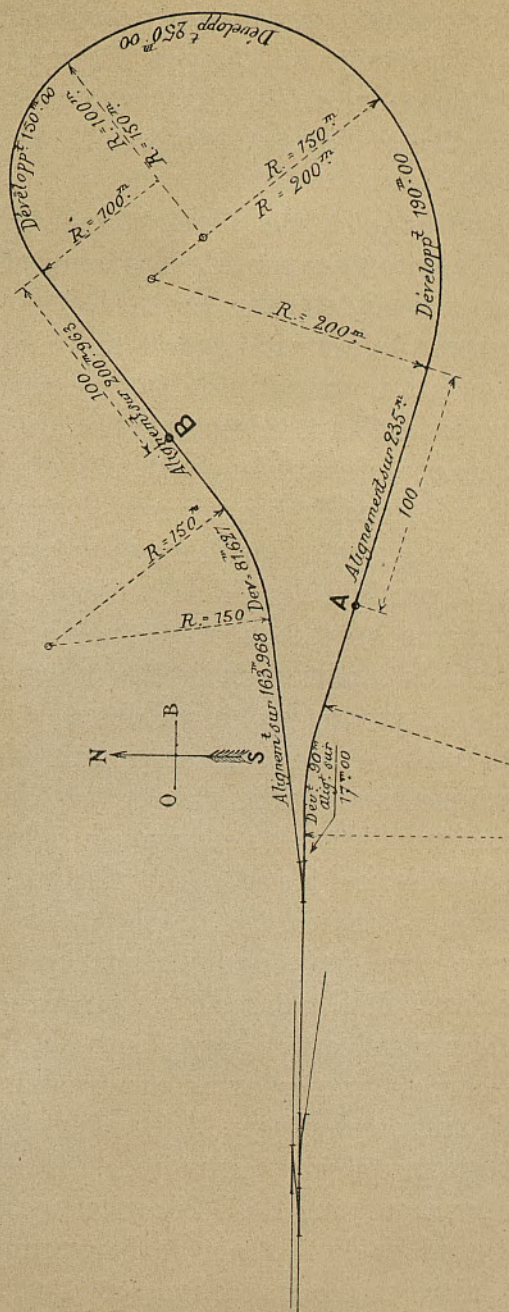


Fig. 47. — Expériences de la Commission.

Le rapport de la Commission des courbes de faibles rayons a été présenté au *Congrès international des chemins de fer*, tenu à *St-Petersbourg* en 1892. Les conclusions adoptées par le Congrès ont été les suivantes :

« Le Congrès constate l'intérêt très grand que
« présentent les expériences de la Commission fran-
« çaise des courbes de faibles rayons.

« Il constate également l'intérêt non moins grand
« qu'il y aurait à poursuivre des expériences de ce
« genre sur les différents réseaux, pour déterminer les
« résistances opposées par les courbes de divers rayons
« au passage des machines et véhicules de toute nature,
« et pour expliquer les résultats donnés jusqu'à ce
« jour par la pratique des différentes exploitations.

« Le Congrès adopte en outre les résolutions ci-
« après : 1° A la condition de limiter convenablement
« la vitesse, on peut admettre sur des points particu-
« liers, en raison des circonstances exceptionnelles,
« sur des lignes à voie normale placées en dehors des
« grandes circulations, des courbes de faibles rayons
« pouvant descendre jusqu'à 150 mètres, et même à
« la rigueur au-dessous, le matériel ordinaire actuel
« de la voie normale pouvant généralement passer
« dans de semblables courbes à vitesse réduite ;

« 2° D'après les expériences dont il a été rendu
« compte aux sections réunies, le surcroît de résis-
« tance dû aux courbes pouvait être évalué en palier
« à 4 kilogrammes par tonne pour les courbes de
« 200 mètres de rayon, et à 6 kilogrammes par tonne
« pour les courbes de 150 mètres de rayon, ces chif-
« fres n'étant que des indications et, étant entendu
« que le surcroît de résistance peut varier dans des

« limites très étendues d'après les résultats mêmes des
« expériences ;

« 3^o Les chiffres précédents sont intéressants à re-
« later au point de vue de l'étude des projets de lignes ;
« mais on ne doit pas perdre de vue que les courbes
« de faibles rayons imposent une augmentation des
« dépenses d'exploitation, non seulement par suite du
« surcroît de résistance, mais en raison de l'usure du
« matériel et de la voie qui en résulte. Enfin, il con-
« vient de tenir compte des chances de déformation de
« la voie qu'entraîne le surcroît de résistance ;

« 4^o Si, par diverses considérations, on est conduit
« à réduire les rayons de certaines courbes, il faut
« tenir compte des rectifications ultérieures qui pour-
« raient s'imposer ».

Ces conclusions restrictives et assez incertaines font ressortir l'extrême complexité du problème qui nous occupe, et il n'est pas sans intérêt de les mettre en regard d'autres conclusions qui ont été formulées 30 ans auparavant, dans un ouvrage de M. *Eugène Flachet*¹ consacré à la situation des chemins de fer à cette époque, et donnant les résultats de l'enquête entreprise par la Commission gouvernementale sur l'exploitation et la construction des chemins de fer. A cette question (p. 170) : « Quel est, eu égard aux conditions
« actuelles d'établissement du matériel roulant et aux
« perfectionnements les plus récents apportés à la dis-
« position de ce matériel, le minimum que l'on peut
« admettre pour le rayon des courbes sur les chemins
« de fer ? » les Compagnies exprimèrent en général l'avis que, pour les courbes en pleine voie, le rayon de

1. *Les chemins de fer en 1862 et en 1863* par M. Eugène Flachet (Librairie L. Hachette et Cie, 1863).

300 mètres devait être considéré comme un minimum au-dessous duquel il convenait de ne pas descendre. La vitesse correspondant à ce minimum était fixée à 30 kilomètres à l'heure.

D'un autre côté, parmi les conclusions exprimées sous forme d'avis par ladite Commission, et présentées par M. *Michel Chevalier*, vice-président, on trouve cette observation (p. 124) : « Que les progrès
« de l'industrie pouvant déterminer chaque jour, pour
« ainsi dire, des facilités nouvelles à l'égard des pentes
« et des courbes, il n'y a *plus* lieu de poser, en cette
« matière, de règles limitatives absolues ».

Or, depuis l'époque à laquelle nous nous reportons, le matériel roulant des chemins de fer n'a pas subi de modifications profondes à l'égard de la facilité de circulation des trains dans les courbes. Faut-il en conclure que l'industrie n'a pas su mettre à profit la latitude qui lui était si largement octroyée par la Commission d'enquête de 1861 ? Assurément non ; mais, malgré les progrès accomplis, la question reste à l'étude, aucun des systèmes en usage ne donnant la solution complète et satisfaisante de ce difficile problème.

Nous avons reproduit plus haut les observations du Congrès des chemins de fer de 1892 concernant les résultats des expériences de Noisy-le-Sec. Nous mentionnerons en outre, à cause de l'importance du sujet, les principales constatations et conclusions du Rapport de la Commission qui a dirigé les essais, conclusions relatives aux dispositions à prendre pour faciliter le passage des trains dans les courbes.

Il a été reconnu que la résistance croît avec le coefficient de frottement des bandages sur les rails, ce qui explique certaines différences souvent considérables

constatées aux essais de Noisy-le-Sec, selon que les rails étaient secs ou humides : ce fait a été mis en lumière par l'expérience du graissage des boudins, qui a entraîné une diminution de résistance.

Il s'agissait aussi de rechercher si le dévers est favorable à la traction, indépendamment des garanties qu'il présente pour la stabilité de la voie. Avec un dévers de $0^m, 08$ on n'a pas obtenu de résultats bien concluants, mais avec un dévers de $0^m, 16$ on a vu les résistances diminuer dans une proportion très notable.

Les surcroîts de résistance dûs aux courbes de 200, 150 et 100 mètres de rayon ne semblent pas augmenter avec la vitesse, au moins dans la limite de 45 kilomètres à l'heure qui n'a été dépassée que très rarement à Noisy-le-Sec.

Les déformations de la voie n'ont pas été trouvées plus graves en courbe qu'en alignement droit, excepté aux entrées de courbes où des déviations très sensibles se produisaient assez souvent : il conviendra donc, lorsqu'on emploiera de courts rayons, de recourir aux raccordements paraboliques dans le tracé des courbes, et de limiter la vitesse des machines à des maxima très réduits.

Pour le matériel expérimenté à Noisy, et qui avait été emprunté aux diverses grandes Compagnies de chemins de fer, ces maxima sont :

35 kilomètres à l'heure dans les courbes de 150 mètres de rayon, 20 kilomètres à l'heure dans les courbes de 100 mètres.

Les boudins des bandages devront avoir un profil approprié, pour le matériel qui circulera dans ces courbes, afin de faciliter le roulement et d'atténuer l'usure des bandages. L'essieu d'avant des machines devra

pouvoir se déplacer un peu latéralement ; de puissants organes de rappel le ramèneront à sa position normale.

Enfin, la Commission fait ressortir, d'après l'expérience acquise en Autriche-Hongrie, que, pour les lignes à faible circulation, il y a grand avantage à admettre les courts rayons dans les courbes à voie normale, et elle conclut que « les machines ordinaires à « trois ou quatre essieux, et les types usuels des véhicules en service dans les administrations françaises, « peuvent passer sans difficulté dans les courbes de « 150 et même de 100 mètres de rayon ».

Nous ne pourrions, sans sortir du cadre de cet ouvrage, nous étendre plus longuement sur les questions d'établissement du matériel roulant en vue de sa circulation dans les courbes de faible rayon : nous avons indiqué précédemment (46), d'après le Rapport de la Commission, les surcroîts de résistance que l'on peut admettre ; nous devons, pour terminer, présenter une observation qui intéresse spécialement les locomotives. Eu égard aux conditions nécessaires au développement de la puissance requise actuellement pour la traction sur les lignes principales, ces machines *peuvent passer* il est vrai dans les courbes de très faibles rayons, mais au prix d'un entretien onéreux.

§ 4 — RÉSISTANCE DES LOCOMOTIVES ET TENDERS.

La résistance des tenders et celle des locomotives considérées en tant que véhicules, c'est-à-dire abstraction faite des frottements de leur mécanisme, dépendent de tous les éléments qui ont été étudiés à l'occasion du matériel de transport : frottement des fusées, réactions du rail, résistance de l'air.

Nous examinerons d'abord le cas des tenders dont les conditions de marche sont comparables à celles des voitures et wagons.

47. — Résistance des tenders seuls. — Soient :

t Le travail résistant d'un tender *par unité de charge sur les fusées*,

r Le rayon des fusées,

R Le rayon des roues au contact des rails,

t' , r' , R' , les quantités semblables se rapportant à un wagon.

On a, d'après la formule qui a été établie pour évaluer la résistance *propre* des véhicules du train (15 A) :

$$\frac{t}{t'} = \frac{\frac{r}{R}}{\frac{r'}{R'}}$$

$$\text{d'où } t = t' \times \frac{r}{r'} \times \frac{R'}{R}$$

Les diamètres des fusées et des roues des tenders sont toujours plus grands que ceux des wagons, de sorte qu'on a $\frac{r}{r'} > 1$ et $\frac{R'}{R} < 1$. L'influence du premier rapport l'emporte sur celle du second pour les véhicules de transport dont les fusées sont de faibles diamètres ; mais lorsque le diamètre atteint ou dépasse 0^m, 100, alors que celui des fusées de tenders est de 0^m, 130 environ, il se trouve que le rapport $\frac{r}{r'} \times \frac{R'}{R}$ est sensiblement égal à l'unité ; en tous cas, cette formule permet de calculer la première résistance lorsqu'on a déterminé la seconde par l'interposition d'un wagon dynamomètre entre le tender et les autres véhicules.

A défaut d'observations directes sur les tenders, on peut aussi déduire approximativement leur résistance par tonne de celle que l'on a trouvée pour le train, bien que le rapport de la charge sur les fusées à la charge sur rails ne soit pas le même pour les deux sortes de véhicules. Enfin, il convient, d'une manière générale, de majorer un peu le coefficient de résistance du tender, comparé à celui du train, pour tenir compte de la réaction plus forte de l'air ambiant.

Les expériences directes sur la résistance des tenders sont peu nombreuses. Au chemin de fer de l'Est, MM. Vuillemin, Guéhard et Dieudonné ont trouvé, pour des tenders à 4 roues et pour les vitesses comprises entre 30 et 45 kilomètres à l'heure, des résistances de 5 kg. 07 à 7 kg. 45. Ces coefficients, très élevés, ne sont plus applicables.

Quelques essais ont eu lieu aux chemins de fer de l'État Français. On a obtenu des résultats variant entre 2 kg. et 2 kg. 50.

Lorsqu'on opère à l'aide d'un wagon dynamomètre, on peut évaluer assez exactement la résistance du tender en la déduisant de celle des véhicules du train, d'après les considérations que nous venons d'exposer.

48. — Résistance des locomotives, accompagnées ou non de leurs tenders. — Les considérations précédentes sur les tenders s'appliquent également aux locomotives, mais à leur résistance *comme véhicule* viennent s'ajouter les frottements du mécanisme qui constituent les *résistances passives* de la *machine à vapeur*.

Si la locomotive est pourvue de *bielles d'accouplement*, il semble rationnel de comprendre ces organes de transmission du travail au nombre des pièces du mé-

canisme de propulsion ; mais il est pratiquement beaucoup plus simple de considérer l'accouplement comme inhérent au véhicule. Nous mentionnerons les différentes recherches faites pour déterminer le travail absorbé par la machine marchant sans admission de vapeur, soit montée entièrement, soit après démontage partiel.

Remarquons avant tout que la réaction de l'air s'exerce dans des conditions toutes particulières, et souvent avec une très grande énergie sur la locomotive qui ouvre le passage au train dans l'atmosphère avec une surface de front pouvant atteindre 8 mètres carrés. Aux grandes vitesses, cette considération plus que toute autre oblige à attribuer à la machine des coefficients de résistance très importants.

On exprime habituellement la résistance des locomotives *par tonne* de leur poids total, comme on le fait pour le tender et les wagons. Ce système d'évaluation n'est justifié que s'il s'applique au véhicule proprement dit dépourvu de toutes bielles ; il devient irrationnel lorsqu'il s'agit de machines montées, les frottements de leur mécanisme se trouvant, selon leur type, en rapport très variable avec les résistances du véhicule. Le mieux serait sans doute de se borner à exprimer la résistance totale des locomotives en kilogrammes. Nous nous conformerons cependant, en cette matière, à un usage tout à fait général.

A. *Expériences de MM. Vuillemin, Guébbard et Dieudonné.* — Ces essais ont eu lieu en 1866, les uns par la méthode chronométrique sur des machines en feu lancées, puis abandonnées à elles-mêmes, les autres à l'aide du wagon dynamomètre.

1° *Essais chronométriques.* — Dans le premier cas,

on attelait au tender un wagon de résistance connue et dans lequel se tenait l'observateur. La résistance totale déduite de la vitesse initiale et du chemin parcouru comprenait celle des organes du mécanisme *sans pression de vapeur* ; on avait soin de tenir les purgeurs des cylindres ouverts, pour atténuer les effets pneumatiques d'aspiration et de refoulement : on verra plus loin que cette précaution était insuffisante. On a obtenu les résultats suivants :

Vitesse moyenne en kilomètres à l'heure	Résistance par tonne de la machine et du tender en palier
Machine mixte et son tender	
11	3 kilog. 20
15	4 — 00
20	4 — 35
23	5 — 70
Machine à 6 roues couplées et son tender	
9	5 kilog. 32
12	6 — 43
16	7 — 52

2^e *Essais dynamométriques.* — Le wagon dynamomètre était intercalé entre deux locomotives, dont la première tirait la seconde.

Machines	Vitesse	Résistance moyenne par tonne de la machine et du tender, en palier
	kilom. à l'heure	kilogrammes.
Machine à essieux indépendants	45	5.48
Machine mixte	45	6.41
Machine à 6 roues couplées (roues de 1 mètr. 40)	26	10.24
Machine à 6 roues couplées (roues de 1 mètr. 30)	24	9.52

Ces coefficients sont notablement plus élevés que les précédents, ce qui est dû en partie aux vitesses plus grandes, mais surtout à ce que la machine tirée effectuait plusieurs kilomètres sans vapeur et sans graissage. Les auteurs ont fait d'ailleurs observer que des divergences peuvent s'expliquer pour des machines du même type par le rodage plus ou moins parfait des pièces frottantes.

Dans le but d'évaluer la résistance des véhicules proprement dits, et aussi de faire la part des frottements produits par l'accouplement, on a appliqué la même méthode d'expérimentation à des machines *froides*, sans leurs tenders et sans bielles motrices :

- 1° Avec bielles d'accouplement ;
- 2° Sans bielles d'accouplement.

Le tableau suivant contient les résultats obtenus.

Machine sans tender	Vitesse	Résistance par tonne de la machine en palier
	kilom. à l'h ^{re}	kilogrammes.
<i>1° Résistance du véhicule (toutes les bielles démontées).</i>		
Machine mixte à 4 roues accouplées de 1 ^m 68.	28	4.52
	28	5.60
	45	6.58
Machine à 6 roues accouplées de 1 ^m 30.	27	6.35
	24	5.96
Machine à 8 roues accouplées.	6 à 10	11.00
<i>2° Résistance du véhicule, y compris l'accouplement (bielles motrices démontées, bielles d'accouplement en place).</i>		
Même type de machine mixte.	26	4.32
	38	4.50
	26	5.70
	36	6.09
Même type de machine à 6 roues couplées.	27	6.46
	27	6.66

On admettra facilement que l'influence de l'accouplement sur la résistance d'une locomotive *remorquée* soit négligeable en alignement droit, comme le montrent les coefficients ci-dessus, et cela même lorsque les roues sont accouplées au nombre de six ou de huit. Il suffit que les diamètres des roues soient bien égaux, et que la longueur des bielles se rapporte exactement à l'entr'axe des essieux. Lorsqu'il en est autrement, les bielles peuvent engendrer un travail résistant considérable.

Des expériences ont été faites également, à l'aide du wagon dynamomètre, sur des machines des mêmes types, en feu, toutes montées et sans leurs tenders ; elles ont donné les résultats suivants :

Machine toute montée, sans tender	Vitesse	Résistance par tonne de la machine en palier
	kilom. à l'h ^{re}	kilogrammes
Machine mixte à 4 roues accouplées, de 1 mètr. 68	27	9.58
	44	10.19
	30	9.63
	45	11.80
Machine à 6 roues accou- plées, de 1 mètr. 30	27	12.40
	29	12.00

On remarquera que ces résistances sont très supérieures à celles trouvées pour l'ensemble de la machine et du tender (48 A), ce qui s'explique, mais seulement en partie, par l'absence de ce dernier dont la résistance est plus faible que celle de la machine. Toutefois, les locomotives étant *traînées*, la réaction de l'air était peu élevée à ces vitesses, et les coefficients ci-dessus seraient exagérés si on les appliquait aux locomotives construites aujourd'hui.

Les expériences précédentes ont été recommencées

sur les mêmes machines, à des vitesses peu différentes, après démontage des bielles d'accouplement seulement. Ici encore, on a trouvé que l'influence de ces organes était à peu près nulle en alignement droit.

Enfin quelques essais ont eu lieu sur des locomotives à huit roues couplées toutes montées, accompagnées de leurs tenders et traînées par l'intermédiaire du dynamomètre. On n'a pas constaté de différence notable entre les résistances de ces machines selon qu'elles étaient froides ou en feu, et la moyenne de quatre expériences a donné le coefficient de 21^{kg}, 5 au sujet duquel nous répéterons, en l'accentuant davantage, l'observation faite à propos des locomotives à quatre et à six roues couplées : il est beaucoup trop élevé pour les machines actuelles, comme nous allons le voir.

B. *Expériences du chemin de fer du Nord.* — En 1884, des essais ont eu lieu, à l'aide du wagon dynamomètre, pour déterminer les résistances des locomotives à huit roues couplées, dans différentes conditions de montage. Ces expériences ont été faites :

1° Entre Mitry et Dammartin en rampe de 6^{mm} et sur une longueur de 6 km. environ, en alignement droit.

2° Entre Silly-la-Poterie et Villers-Cotterets, en rampes de 15^{mm}, sur un parcours de 2 kilomètres, dont 780^m en courbes de 500^m de rayon.

Deux ou trois locomotives semblables, munies de leurs tenders, étaient attelées ensemble et remorquées à une vitesse constante. L'importance recherchée des efforts de traction avait pour but de rendre négligeables les erreurs d'observation qui se produisent inévitablement dans les expériences de ce genre.

1° Traction de trois locomotives à huit roues accouplées, et leurs tenders, nos 4649, 4680, 4685, en feu

et toutes montées, régulateur fermé, sur rampe de 6^{mm}, à la vitesse constante de 33 kilom. à l'heure.

Poids total remorqué : 199 t. 7.

Résistance par tonne :

Observée, 15 kg. 5.

En palier, déduction faite de la résistance due à la rampe, 9 kg. 5.

2° Traction de deux locomotives semblables aux précédentes, n^{os} 4643 et 4645, en feu, régulateur fermé, sur rampe de 15^{mm} (courbe de 500^m de rayon au minimum).

Machines et leurs tenders	Vitesse	Résistance moyenne par tonne	
		observée en rampe de 15 millimètres	En palier, rampe déduite
		kilogrammes	kilogrammes
Chaudes, toutes montées	20	22.85	7.85
	30	23.75	8.75
Bielles motrices démontées	22	19.35	4.35
Bielles motrices et bielles d'accouplement démontées	20	18.80	3.80
Bielles motrices, bielles d'accouplement et mouvements de distribution démontés	23	18.40	3.40

On peut tirer de ces résultats les déductions suivantes :

1° L'écart entre les résistances de 9 kg. 5 et 8 kg. 75 pour les machines toutes montées, traînées aux vitesses peu différentes de 33 et 30 kilomètres à l'heure, est assez prononcé. Il s'explique, cependant, par ce fait que les essais n'ont pas porté sur les mêmes machines. Des divergences plus fortes que celle-ci peuvent se produire entre locomotives semblables, selon l'état

d'usure des pièces et le degré de perfection du montage.

2° On constate au tableau ci-dessus l'influence très sensible de la vitesse sur la résistance des mêmes machines toutes montées, et la part importante qui paraît incomber aux frottements du mécanisme de propulsion, sans admission de vapeur.

3° L'influence de l'accouplement est appréciable : on voit que, sur les locomotives à huit roues couplées, il faut en tenir compte, dans les courbes de 500 mètres de rayon.

4° La résistance des mouvements de distribution est très faible comme on pouvait le prévoir pour des machines marchant sans vapeur.

Ajoutons que les résultats ci-dessus, relatifs aux machines toutes montées, concordent avec ceux qui ont été donnés par M. *Lechâtelier* pour les locomotives du même type ¹.

Au sujet de la résistance du mécanisme, qui semble élevée, une observation importante est ici nécessaire. Cette résistance, dans les essais qui nous occupent et probablement aussi dans les essais antérieurs, s'est trouvée augmentée en raison des effets pneumatiques d'aspiration et de refoulement déterminés dans les cylindres par le mouvement des pistons, sur lesquels existe une pression résistante, même lorsque les robinets purgeurs sont ouverts. Cette résistance, tout à fait anormale, se trouve naturellement supprimée lorsque la vapeur est admise dans les cylindres. Il serait fort utile de connaître la résistance due seulement aux frottements des organes : la question vaut la peine

1. *Mémoire sur la contre-vapeur*, 1869, p. 40.

d'être étudiée expérimentalement, ainsi qu'on le reconnaîtra par le calcul suivant :

On peut estimer que la différence de pression produite sur les faces d'un même piston par l'aspiration et le refoulement de l'air, correspond à une colonne de mercure de 0^m10 environ de hauteur, ce qui donne une pression résistante de 0 kg 13 par centimètre carré. Cette donnée introduite dans la formule servant à calculer l'effort de traction des locomotives (68) et appliquée à une machine à huit roues couplées, permet d'évaluer approximativement la résistance supplémentaire à 3 kg 5 par tonne de machine seule et 2 kg 5 par tonne de machine et tender.

Une expérience par la gravité a été faite en 1886, au chemin de fer du Nord, sur une locomotive semblable à celles dont il vient d'être question, pour déterminer sa résistance totale. Cette machine ayant été mise en marche, avec son tender, sur une pente de 12^{mm}, on a fermé le régulateur lorsque la vitesse a atteint 25 kilomètres à l'heure. Celle-ci a été en décroissant, et est devenue constante lorsqu'elle est descendue à 21 kilom. 2 à l'heure. La résistance moyenne par tonne de locomotive et tender était donc de 12 kg. en palier, à la vitesse de 21 kilom. environ. On avait trouvé, en 1884, le coefficient beaucoup plus faible de 8 kg. 75, dans les mêmes conditions ; mais il faut remarquer :

1° Qu'en premier lieu on opérait sur une forte rampe où le mouvement de lacet n'existait pas, tandis que la machine abandonnée en pente de 12 millimètres le subissait.

2° Que, dans les premières expériences, les locomotives *étant remorquées* se trouvaient soustraites à la

réaction de l'air qui, à cette vitesse de 21 kilomètres à l'heure, est déjà très appréciable.

C. *Expériences des chemins de fer de l'Etat français*¹. — La question de résistance des locomotives et tenders a été étudiée, il y a quelques années, aux chemins de fer de l'Etat à l'aide des méthodes dynamométriques mises en pratique par *M. Desdovits*. Les essais ont eu lieu sur des machines de différents types, les uns à la vitesse très faible de 1 mètre par seconde, dans une atmosphère entièrement calme, d'autres aux vitesses variables de marche, afin de faire ressortir l'influence de la résistance de l'air.

1° *Résistance à faible vitesse.*

Machine toute montée et son tender	Diamètre des cylindres	Course des pistons	Poids de la machine et du tender	Résistan ^{ce} par tonne
	mètres	mètres	kilogrammes	kilogrammes
Locomotive à voyageurs à 4 roues couplées de 2 ^m 010	0.400	0.650	55	3.10
Locomotive à 6 roues cou- plées de 1 ^m 510	0.420	0.600	52	3.60
Locomotive à marchandises à 6 roues couplées de 1 ^m 300	0.450	0.650	55	4.80
Locomotive à marchandises à 8 roues couplées de 1 ^m 280 (tiroirs cylindriques).	0.520	0.660	70	4.30

La résistance relativement faible par tonne de ces dernières machines a été attribuée à leurs poids élevés, et aussi à la présence des *tiroirs de distribution cylindriques*.

1. *Revue Générale des chemins de fer* ; mai 1890, p. 271. Résumé des expériences exécutées aux chemins de fer de l'Etat.

2° *Résistance en marche.* — L'évaluation de la résistance totale des locomotives en pleine marche est une recherche très difficile ; cette évaluation ne peut être faite d'une manière exacte en remorquant la machine, car le front doit rester, comme en service, exposé à la résistance de l'air. On peut remplir cette condition en employant la méthode rationnelle, appliquée aux chemins de fer de l'Etat, sous la forme chronométrique, par l'observation des vitesses variables sur un profil donné ; la machine était abandonnée à elle-même, *régulateur fermé*, après avoir reçu, par l'action de la vapeur, une certaine impulsion initiale.

Dans ces essais, la courbe représentative des résistances variait de forme selon le type de la machine expérimentée ; on a reconnu que, dans la plupart des cas, les résultats pouvaient être exprimés par une fonction parabolique. Toutefois, selon M. *Desdoutis*, il est préférable d'employer une formule applicable seulement entre deux limites de vitesse, et obtenue en substituant à la courbe réelle des résistances sa tangente en un point, ou mieux la corde qui passe par deux de ses points. Cet ingénieur, en choisissant les points qui correspondent aux vitesses de 40 et de 70 kilomètres à l'heure, a indiqué, pour les locomotives de grande vitesse à deux essieux accouplés, la formule suivante qui peut convenir entre les limites de vitesse de 30 et 100 kilomètres à l'heure :

$$r = 1 + 0,17 V.$$

r résistance par tonne de locomotive et tender.

V vitesse en kilomètres à l'heure.

3° *Résistance du mécanisme des locomotives.* — A la résistance de la locomotive, considérée comme *véhicule*, vient s'ajouter celle des organes du méca-

nisme qui peut être envisagée à deux points de vue très différents, suivant que la machine marche sans admission de vapeur ou avec admission. Dans le premier cas, les pièces telles que les pistons et leurs tiges, les têtes de pistons et de bielles, les poulies d'excentriques, les coulisseaux et les tiroirs de distribution, donnent lieu à des frottements qui, sans être négligeables, présentent une importance assez faible. Dans le second cas, la pression exercée par la vapeur sur les segments des pistons, les tiroirs et les garnitures de tiges, donne une importance beaucoup plus grande aux frottements des divers organes. En raison même de son origine, le surcroît de résistance du mécanisme dû à la pression peut être considéré comme entrant avec une valeur soustractive dans l'expression de l'effort moteur. Toutefois cette résistance doit, pour la bonne utilisation du travail de la vapeur, être, comme les autres, réduite au minimum.

Dans les essais des chemins de fer de l'Etat, après avoir constaté la résistance des locomotives toutes montées, on démontait les bielles motrices et celles du mouvement de distribution, puis on renouvelait les expériences pour avoir, dans chaque cas, la résistance du mécanisme, par différence. Les résultats obtenus sont les suivants :

Types de locomotives	Poids de la machine et du tender	Résistance des organes par tonne de machine et tender
Locomotive de grande vitesse à deux essieux couplés	55 tonnes	0 kilog. 85
Locomotive à trois essieux couplés	52 —	1 — 35
Locomotive à marchandises à quatre essieux couplés	70 —	0 — 90

M. *Desdouits* estime que, si ces coefficients sont faibles relativement à ceux qui ont été admis anciennement, cela doit être attribué aux perfectionnements apportés dans la construction des locomotives, et aux systèmes de graissage qui ont réduit la résistance de tous les organes. D'ailleurs, l'augmentation de poids des machines a pour conséquence de diminuer la résistance par tonne, due aux frottements des organes du mécanisme.

Au lieu de rapporter les résistances au poids total de la machine et de son tender, il est préférable de considérer le poids de la machine seule. En supposant que les tenders pèsent 20 tonnes en ordre de marche, on obtient les coefficients ci-après rapportés aux locomotives seules :

Locomotive de grande vitesse à deux essieux accouplés, 1^k, 35 par tonne.

Locomotive à trois essieux accouplés, 2^k, 20 par tonne.

Locomotive à quatre essieux accouplés, 1^k, 26 par tonne.

Enfin, on peut admettre que la résistance des organes du mécanisme varie peu avec la vitesse.

D. *Formules de M. Welkner*. — Les diverses formules et les résultats d'expériences cités précédemment pour les locomotives toutes montées, laissent en général de côté la portion de la résistance des organes du mécanisme qui provient de la pression de la vapeur en marche. Les trois formules suivantes ont été proposées en 1875 par M. *Welkner*¹, ingénieur allemand, pour le calcul de la résistance *totale* en kilogrammes par tonne d'une machine à six roues et de son tender en palier :

1. *Couche*, t. III, p. 707.

$t = 6 + 0,0044 V^2$, pour le cas des essieux indépendants.

$t = 8 + 0,0044 V^2$, si 4 roues sont accouplées.

$t = 12 + 0,0044 V^2$, si les 6 roues sont accouplées.

V , vitesse en kilomètres à l'heure.

L'augmentation du premier terme représente à la fois l'influence de l'accouplement et celle du diamètre des roues, qui est moindre pour le second et le troisième type que pour le premier.

E. *Formules de M. Frank. Résistance des locomotives et des trains.* — La *Revue générale des chemins de fer*¹ a publié, d'après l'*Organ*², un compte-rendu de la méthode suivie par M. *Frank*, professeur à l'école technique supérieure de Hanovre, pour le calcul de la résistance des locomotives et des trains et exposée par lui dans la *Revue allemande*.

Cet ingénieur a pris pour point de départ les expériences de MM. *Vuillemin*, *Guëbhard* et *Dieudonné* et celles de M. *Von Rochl*, directeur des chemins de fer bavarois, qui a donné, pour exprimer les résistances du matériel de chemin de fer en palier et alignement droit, les formules suivantes :

$X_1 = 0,005 + 0,000\ 000\ 21 V^3$, pour les locomotives.

$X_2 = 0,0025 + 0,000\ 000\ 21 V^3$ pour les véhicules du train.

Le surcroît de résistance en courbe est exprimé par le coefficient :

$$X_3 = \frac{0,6504}{R - 55}$$

V , vitesse en kilomètres à l'heure.

1. N° de juillet 1884, p. 21.

2. Nos I, II, III, année 1883.

R, rayon de la courbe en mètres.

X_1 , X_2 , X_3 , résistance en kilogr. par *kilogramme* de poids brut.

M. Frank n'a conservé de ces formules que celle qui se rapporte à la circulation en courbe, et il a représenté la résistance totale W d'un train circulant *sans vapeur*, en palier et alignement droit, par une expression de la forme :

$$W = \mu Q + \lambda V^2$$

Q, poids de la locomotive ou des véhicules.

μ et λ , coefficients à déterminer par l'expérience.

Pour la recherche de ces coefficients, l'auteur a repris l'ancienne méthode des *Ingénieurs de l'Est*, consistant à lancer la machine ou les véhicules, puis à observer la décroissance de leur vitesse initiale, mais au lieu d'opérer sur un palier, il a procédé aux essais sur une voie en pente, parce que dans le premier cas la vitesse diminue très rapidement, et que la plus grande partie du trajet s'effectue à une vitesse inférieure à la vitesse normale des trains. A la descente, au contraire, avec une inclinaison convenablement choisie, l'action de la pesanteur compense partiellement celle des forces retardatrices, et les observations peuvent être faites avec une précision beaucoup plus grande.

Les expériences ont eu lieu sur une voie en alignement droit de 9.000 mètres de longueur, en pente de 0^m,005, interrompue seulement par un palier de 300 mètres.

Pour une voie inclinée et en courbe, la formule de la résistance d'un train entier, y compris la machine circulant sans vapeur et le tender, est la suivante :

$$W = \mu_1 Q_1 + \mu_2 Q_2 \pm (Q_1 + Q_2) \sin \alpha \\ + (Q_1 + Q_2) \frac{0,6504}{R-55} + \lambda (F_1 + F_2) V^2$$

Q_1 , poids de la machine et du tender.

Q_2 , poids du train.

α , angle d'inclinaison de la voie.

R , rayon de la courbe.

μ_1 et μ_2 , coefficients de résistance.

λ , coefficient relatif à la résistance de l'air.

F_1 , surface de front du train évaluée à 8^{mq} .

F_2 , surface totale du train exposée à la réaction de l'air.

Il est bien entendu que, pratiquement, on remplace $\sin. \alpha$ par la déclivité, en millimètres par mètre, que nous avons appelée i (29).

M. *Frank* attribue aux coefficients les valeurs suivantes :

μ_1	{	0,0032 pour les locomotives à 2 essieux couplés.
		0,0038 à 0,0039 pour les locomotives à 3 essieux couplés.
μ_2	{	0,00248 pour les voitures à voyageurs.
		0,0029 pour les wagons.

$\lambda = 0,1225$, en supposant F_2 calculé d'après les surfaces indiquées ci-après :

Fourgons à bagages	1 ^{mq} 7
Voitures à voyageurs et wagons couverts	0 ^{mq} 5
Wagons ouverts chargés	0 ^{mq} 4
— vides	1 ^{mq}

Pour tout wagon fermé, ou voiture à voyageurs suivant immédiatement un wagon ouvert, on ajoute à ces chiffres 1 mq. par véhicule.

Cette méthode de calcul se distingue des précédentes en ce que l'expression de la résistance totale est assimi-

lée à la formule théorique établie au paragraphe 1 (33) et qu'elle évalue chacune des résistances prises séparément, au lieu de les prendre en bloc. Le procédé est logique, et le degré d'approximation des résultats dépend évidemment, dans les deux cas, de l'appropriation convenable des coefficients aux conditions d'établissement du matériel roulant et à l'état de la voie.

F. *Résistance spéciale des locomotives dans les courbes.* — Les locomotives à essieux indépendants peuvent, au point de vue du surcroît de résistance du véhicule dans les courbes, être assimilées aux voitures et wagons, en tenant compte de l'écartement des essieux extrêmes. Il n'en est pas de même lorsque les essieux sont accouplés en totalité ou en partie : la résistance inévitable due aux bielles d'accouplement est alors d'autant plus prononcée que le nombre des essieux accouplés est plus grand et que la courbe est plus raide. On a reconnu, dans la pratique du service, que, sur certaines lignes très sinueuses, l'avantage résultant de l'extension de l'accouplement et de l'augmentation d'adhérence des machines (60) se trouve entièrement compensé par l'accroissement de résistance dans les courbes. Il peut se faire, en pareil cas, qu'une locomotive à quatre essieux accouplés, par exemple, capable de remorquer un certain maximum de poids sur une ligne de ce genre, puisse prendre la même charge après suppression d'une paire de bielles, réduisant à trois le nombre des essieux accouplés.

Les expériences faites spécialement sur la résistance des locomotives dans les courbes sont assez récentes. Les plus importantes, en France tout au moins, ont été entreprises par la *Commission des courbes de faibles rayons* dont nous avons déjà examiné les travaux

(46 D). On a expérimenté, sur la voie spéciale du dépôt de *Noisy-le-Sec*, à peu près tous les types de locomotives des Compagnies françaises, tantôt en lançant les machines sur la voie en courbe par une impulsion initiale, et en évaluant ensuite la résistance au moyen du pendule dynamométrique de M. *Desdovits*, tantôt en faisant parcourir la voie par les machines sous l'action de leur effort moteur, et en déterminant à l'aide du même appareil les variations de résistance produites au passage dans les courbes tantôt, mais plus rarement, en faisant refouler les machines froides par l'intermédiaire d'un wagon dynamomètre.

La Commission a donné, dans son Rapport, les résultats très détaillés de ces essais, mais elle n'a pas indiqué de coefficients de résistance *moyens* relatifs aux divers types de locomotives, ce qui s'explique par la nature très variable et assez incertaine de ces coefficients.

Pour les machines à grande vitesse de divers systèmes, à deux essieux accouplés, accompagnées du fourgon d'expérience dans lequel on avait placé le pendule *Desdovits*, le surcroît de résistance a été de 2 à 3 kilogrammes par tonne du poids total, en courbe de 200 mètres de rayon, et de 4 à 5^{kg}, 5 en courbe de 100 mètres.

Le surcroît de résistance des machines à trois essieux accouplés a atteint 8 kilogrammes.

Enfin, pour certaines locomotives à quatre essieux accouplés, on a constaté jusqu'à 9^k, 5 de résistance supplémentaire par tonne.

Nous nous bornerons à donner ces quelques chiffres à titre d'indication. La Commission a montré que les divergences et certaines anomalies des résultats devaient être attribuées en partie à l'influence considéra-

ble du coefficient de frottement des boudins sur les rails, et à l'influence des conditions atmosphériques sur ce coefficient. Enfin, elle a fait ressortir l'utilité qu'il y aurait à faire de nouvelles expériences sur la résistance des locomotives en courbe.

En quittant ce sujet des recherches expérimentales sur la résistance des trains, nous rappellerons que toutes les formules et tous les coefficients indiqués correspondent aux résistances minima par un temps calme. Il ne faut pas oublier que les réactions du vent extérieur peuvent être considérables.

§ 5. — RÉSISTANCE DES TRAINS SUR LES CHEMINS DE FER A VOIE ÉTROITE.

On ne possède encore que fort peu de données sur les résistances des trains pour voies de largeur réduite. Nous pouvons, à défaut de résultats d'expériences, chercher des indications théoriques sur cette question, en comparant les conditions d'établissement du matériel de ces lignes avec celles du matériel ordinaire pour voie normale.

49. — Résistance en alignement droit. — On a vu (15) que la résistance propre des véhicules — celle du frottement des fusées d'essieux — est proportionnelle au diamètre des fusées, et en raison inverse du diamètre des roues; elle est donc proportionnelle au rapport de ces deux quantités, auxquelles on peut, pour les véhicules de construction récente et en vue d'une évaluation approximative, attribuer les valeurs suivantes :

	Diamètre		Rapport des diamètres
	de la fusée	de la roue	
Matériel à voie normale. . .	100 mm.	0 m. 930	$\frac{1}{9,3}$
Matériel à voie de 1 mètre. .	80 mm.	0 m. 700	$\frac{1}{8,75}$

La différence des rapports, qui se trouve en faveur du matériel à voie normale, est peu considérable ; elle s'accroît si l'on fait la comparaison pour des fusées de 85 à 90 millimètres de diamètre, anciennement employées dans la construction des véhicules à voie normale et qui existent encore aujourd'hui sur un très grand nombre d'entre eux.

Quant à la réaction de l'air ambiant sur les véhicules du train, on peut avoir une idée de sa valeur relative en rapportant les surfaces de front des véhicules à leurs poids ; les calculs effectués sur des fourgons donnent sensiblement le même rapport pour les deux sortes de matériel.

On peut donc admettre actuellement que sur un même profil en alignement droit et dans des conditions identiques de marche, la résistance des véhicules remorqués est un peu plus élevée dans le cas des voies étroites que dans celui de la voie normale.

Pour les locomotives, on arriverait à une conclusion semblable.

50. — Surcroît de résistance dans les courbes. —

Pour que la comparaison, entre les deux sortes de véhicules, à voie normale et à voie étroite, soit justifiée, il faut supposer que les distances entre leurs essieux extrêmes sont entre elles dans le rapport des largeurs de voie, afin que la facilité d'inscription dans

les courbes soit la même. Cette condition étant remplie, si l'on se reporte aux formules établies pour évaluer théoriquement le surcroît de résistance des véhicules dans les courbes (30), on reconnaît que les deux résistances de glissement des bandages, déterminées, l'une par la solidarité des raies et des essieux, l'autre par le parallélisme des essieux, sont, pour un même rayon de la courbe, proportionnelles à l'écartement des rails ; on peut donc, sans augmenter ces résistances spéciales, employer des rayons d'autant plus faibles que les rails sont moins écartés, et cette considération explique l'un des avantages des chemins de fer à voie étroite : la réduction des dépenses de premier établissement par la nature même du tracé.

En résumé, jusqu'à ce que l'expérience ait fourni des données pratiques sur la résistance des trains de chemins de fer à voie étroite, il est permis d'admettre pour le matériel roulant de ces lignes, comparé à celui des chemins de fer à voie normale, que, dans les mêmes conditions d'établissement des véhicules et pour un même profil de la voie, la résistance par tonne, en alignement droit, est un peu plus élevée. Dans les courbes, une petite majoration due aux mêmes causes subsiste, mais par contre il existe une diminution de résistance d'autant plus prononcée que l'écartement des rails est plus faible. Il y a grand avantage à réduire la largeur de la voie lorsqu'on emploie des courbes de faible rayon.

§ 6. — CONCLUSIONS.

51. — Observations générales. — L'exposé assez détaillé, mais cependant incomplet, des expériences

de toutes sortes entreprises pour l'évaluation pratique des résistances d'un train, montre que la difficulté de formuler d'une manière générale des conclusions nettes est inhérente au sujet lui-même.

A propos des expériences faites en Angleterre par M. de Pambour (35), M. Couche écrivait ces lignes en 1876¹.

« Ceux qui s'étonneraient que la pratique des chemins de fer en soit si souvent réduite à des expériences qui ont trente ou trente-cinq ans de date, n'auraient pas tout à fait tort. Mais, dans le cas actuel, c'est un peu aussi la faute de la nature même de la question. C'est un travail médiocrement attrayant que la détermination de résistances aussi variables, aussi capricieuses ; les résultats ne conviennent qu'aux conditions dans lesquelles ils ont été obtenus ; et leur application supposerait par cela même des recherches préalables, telles que celles de la vitesse et de l'intensité du vent. »

Ces réflexions si justes de l'éminent professeur peuvent encore être faites après une période de près de vingt ans, ce qui nous permettra de borner nos observations sur ce point à quelques remarques essentielles. Hâtons-nous de dire qu'en dépit du caractère *médiocrement attrayant* de ces travaux, les Compagnies de chemins de fer, en France et à l'étranger, n'ont pas cessé de les poursuivre.

D'ailleurs, les progrès constamment réalisés dans la construction du matériel, progrès en vertu desquels les anciennes formules ne s'appliquent généralement plus, et les perfectionnements apportés dans les procédés

1. T. III, p. 630.

d'expérimentation, contribueront toujours sans aucun doute à faire rechercher des solutions nouvelles dans l'étude de la *résistance des trains*.

52. — Lois des résistances fixes. — Nous appelons *résistances fixes* celles qui existent sur une bonne voie, droite et de niveau, pour un matériel se mouvant dans une atmosphère calme. Ces résistances sont : le frottement des fusées d'essieux et la réaction de l'air ambiant.

Le frottement des fusées est, avec l'action de la gravité, la seule cause de résistance des trains qui soit suffisamment connue ; l'intensité du frottement dépend à la fois des diamètres donnés aux fusées et aux roues, et du lubrifiant. Ces diamètres étant déterminés par des considérations de construction, on a dû chercher à réduire la résistance au minimum en perfectionnant le système de graissage, et les résultats auxquels on est parvenu aujourd'hui sont des plus satisfaisants.

On avait cru primitivement que l'emploi des graisses consistantes se prêtait moins bien que celui des huiles à l'abaissement du coefficient de frottement ; mais les deux systèmes ont été reconnus équivalents. Plusieurs Compagnies de chemins de fer ont adopté les boîtes à graisse mixtes qui effectuent le graissage au moyen de tampons placés au-dessous de la fusée et alimentés par l'huile d'un réservoir inférieur. Lorsque la boîte vient à s'échauffer, la graisse, contenue dans un réservoir supérieur, fond et fournit un lubrifiant plus efficace contre le chauffage.

Mentionnons enfin la boîte à graisse, système *Dietz*, qui a été assez largement appliquée au chemin de fer

de l'Est et qui est disposée de telle façon que la fusée plonge complètement dans l'huile.

Comme conclusion, pour un véhicule ayant une charge moyenne, la portion de résistance afférente au glissement des fusées est de 1 kg. 4 à 1 kg. 5 par tonne. Ce coefficient peut varier d'une manière assez sensible avec le poids porté par les essieux. En effet : d'une part, la résistance étant rapportée au poids total du véhicule, et de l'autre le poids des essieux et des roues étant sans influence sur la résistance créée par le frottement des fusées, il en résulte que le coefficient de résistance diminue lorsque ce poids prend plus d'importance relativement au poids total ; c'est ainsi que pour le même véhicule lourdement chargé le coefficient de la résistance propre, par tonne, peut descendre à 1 kg. 2 et au-dessous ; il peut dépasser 1 kg. 8 pour les véhicules vides.

On doit voir dans la variabilité de ce coefficient une explication des différences souvent très grandes observées, en alignement droit et dans les mêmes conditions atmosphériques, sur des trains composés de véhicules plus ou moins chargés, d'où ressort la nécessité de compléter les résultats d'expériences par l'indication de la composition des trains. M. *Edmond Roy*, dans un mémoire que nous avons déjà mentionné (46 D), a rappelé qu'en 1860 la Commission des expériences d'Ivry avait comparé les résistances par tonne, en alignement droit, pour des wagons-plateformes vides ou chargés : le coefficient était notablement plus élevé dans le premier cas, et la différence existait au même degré sur les différents profils.

Il est donc rationnel, lorsqu'on veut déterminer la charge d'une machine dont on connaît la puissance,

de se préoccuper du nombre total des essieux du train, et d'évaluer cette charge en *unités de transport* après l'avoir évaluée en tonnes. Cette méthode présente aussi l'avantage de mieux tenir compte du supplément de résistance dû au vent extérieur, qui, pour un même poids total, augmente en raison directe de la longueur du train.

Au chemin de fer du Nord, les unités de transport sont ainsi établies :

Un wagon vide ou contenant moins de 1.000 kg. compte pour 2 unités.

Un wagon chargé de 1.000 à 6.500 kg. compte pour 3 unités.

Un wagon chargé de 6.500 à 10.000 kg. compte pour 4 unités.

Un wagon chargé de 15.000 kg. compte pour 6 unités.

Pour les trains mixtes de voyageurs et marchandises, une voiture à voyageurs, vide ou non, compte pour 3 unités.

Les wagons à chargement de 10 tonnes, qui sont de beaucoup les plus nombreux, pesant environ 5 tonnes à vide, leur poids de 15 tonnes en charge est *triple* de celui des wagons vides ; mais, en *unités de transport*, ceux-ci comptent pour *moitié* relativement aux wagons à charge complète.

Les lois de la réaction de l'air calme sur les trains de chemins de fer sont encore peu connues, malgré les recherches qui ont été faites à diverses époques dans le but de les déterminer : on a seulement acquis la certitude que cette cause de résistance, assez importante aux vitesses modérées, constitue l'une des principales