

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
M. Ing.

PAR
ABDELKADER NAIR

CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DU COMPORTEMENT
DIÉLECTRIQUE DES SYSTÈMES D'ISOLATION STATORIQUE PAR LA
MÉTHODE DE MONTÉE PROGRESSIVE EN HAUTE TENSION CONTINUE

MONTREAL, LE 02 MAI 2006

(c) droits réservés de Abdelkader Nair

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

**M. Éric David, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure**

**M. Stéphane Hallé, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure**

**M. Louis Lamarche, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure**

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 02 MAI 2006
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DU COMPORTEMENT DIÉLECTRIQUE DES SYSTÈMES D'ISOLATION STATORIQUE PAR LA MÉTHODE DE MONTÉE PROGRESSIVE EN HAUTE TENSION CONTINUE

Abdelkader Nair

SOMMAIRE

Dans les centrales électriques, le système d'isolation de l'équipement électrique est continuellement soumis à des contraintes multiples provoquant des dégradations importantes de ses propriétés électriques réduisant ainsi la durée de sa vie utile. Pour éviter des tels défauts qui peuvent mener à des arrêts subits en service, des contrôles périodiques sont effectués sur le système d'isolation des enroulements statoriques de la machine électrique. Pour atteindre cet objectif, plusieurs méthodes non-destructives [1] ont été développées et sont utilisées lors des entretiens de l'équipement électrique. L'une de ces méthodes non-destructives qui a fait l'objet de plusieurs publications et d'une attention particulière au cours de cette dernière décennie est la méthode de montée progressive en haute tension continue. Pour mettre en application cette méthode, des mesures de courant de charge sur des barres/bobines statoriques de différents fabricants ont été effectuées dans le laboratoire de haute tension de l'école de technologie supérieure. Ce courant de charge mesuré inclut plusieurs composantes, le courant capacitif, le courant d'absorption et le courant de fuite (courant de conduction de surface et de volume). La détermination de ce dernier courant donne une idée sur l'état d'isolation et aide à définir les éventuelles actions d'entretien. Dans ce sens, un modèle linéaire a été développé à partir de la modélisation du courant de charge pour séparer le courant de fuite des deux courants capacitif et d'absorption. La transformée de Laplace est largement employée pour contourner certaines difficultés rencontrées dans les calculs. Une simulation de quelques défauts sur quelques barres et bobines a fait aussi l'objet de ce travail afin d'illustrer l'habileté de cette méthode à détecter des défauts tels que l'absorption d'humidité, le vieillissement thermique, la contamination...etc.

CHARACTERIZATION AND MODELIZATION OF THE DIELECTRIC BEHAVIOR OF STATOR INSULATION SYSTEMS USING THE RAMPED DIRECT HIGH-VOLTAGE METHOD

Abdelkader Nair

ABSTRACT

Considerable efforts have been expended in the last decades in order to study and to understand ageing mechanisms inducing deterioration of solid insulation systems employed in the electrotechnics. An abundant literature has been already devoted to this subject and the discussion is still going on. The ageing of insulating materials implies in an inherent way a modification of their structure as well as their physical properties. When their properties have deteriorated to the point that the materials can not anymore withstand the service stresses, the end of its life is reached. Periodic maintenance testing of large generator and motor stator windings is generally conducted to assess the condition of groundwall insulation, identify maintenance needs and operating restrictions, and ultimately to guard against unexpected in-service failures. Thus, non-destructive diagnostic tests are important tools to determine the condition of stator winding insulation. Various methods are commonly used, partial discharge measurements, hi-pot, step voltage test and ramped voltage test to name just a few. The I-V curve measured during a ramped direct voltage test includes the contribution of various components, the geometric capacitive current, the absorption current, the surface leakage and the bulk conductivity current. These contributions, especially the absorption and the conduction (surface or volume) current are not as easy to separate as in polarization\depolarization tests. A modeling of the I-V curve obtained with the ramped voltage test, allowing to separate the leakage current from the absorption and the capacitive currents is presented in this work. This modeling is compared with field measurements on complete stator windings and with lab measurements on single bars and coils in various conditions.

REMERCIEMENTS

Ce travail s'est déroulé au sein du laboratoire de haute tension de l'école de technologie supérieure (ETS) à Montréal.

Le support financier a été assuré par le directeur de recherche, Monsieur Éric David et par la compagnie d'électricité Hydro-Québec. Les échantillons et quelques équipements ont été fournis grâce à l'aide d'Hydro-Québec et de l'institut de recherche (IREQ).

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Éric David, directeur de mémoire et professeur au département de génie mécanique, pour le choix du sujet et pour avoir dirigé avec beaucoup de dévouement ce travail. Ses qualités scientifiques et techniques m'ont permis de mener à bien cette étude. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes plus sincères reconnaissances pour la bienveillance qu'il n'a cessé de manifester à mon égard.

Je tiens à remercier également l'ensemble des personnels et des étudiants de l'ETS qui ont partagé avec moi des moments conviviaux et inoubliables, et à ceux qui ont apportés à ce projet une précieuse contribution.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	i
ABSTRACT	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	4
1.1 IEEE Std 43-2000 « IEEE recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery »	4
1.2 IEEE Std 95-2002 « IEEE recommended practice for insulation testing of AC electric machinery (2 300V and above) with high direct..... voltage »	7
1.2.1 Essai par échelon de tension à des intervalles de temps uniformes.....	7
1.2.2 Essai échelon de tension à des intervalles du temps graduels	8
1.2.3 Essai en montée progressive à haute tension continue (Ramped Voltage Test)	9
1.3 High voltage DC tests for evaluating stator winding insulation: Uniform step, graded step, and ramped test methods.....	9
1.4 Advantages of the ramped direct high voltage method of assessing stator winding insulation condition.....	10
1.5 Dielectric ur spectroscopy in time and frequency domain on insulation system of high voltage rotating machines.....	14
1.6 Low frequency dielectric response of epoxy-mica insulated generator bars during multi-stress aging.....	15
CHAPITRE 2 MONTAGE ET INSTRUMENTS	19
2.1 Spectromètre Diélectrique dans le domaine du Temps.....	19
2.2 Matériel requis pour le spectromètre	22
2.2.1 Électromètre.....	22
2.2.2 Source de la haute tension en courant continu.....	23
2.2.3 Relais haute tension	23
2.2.4 Système d'acquisition	23
2.2.5 Carte d'acquisition (DAQ).....	24
2.2.6 Bus d'instrumentation (GPIB).....	25

2.3	Arrangement Instrumental pour effectuer un essai de montée progressive en tension	25
2.3.1	Version laboratoire.....	26
2.3.2	Version terrain	27
2.4	Logiciel de contrôle	29
2.4.1	Page de démarrage	31
2.4.2	Page des caractéristiques.....	32
2.4.3	Page parameters pour l'essai rampe.....	33
2.4.4	Page essai de montée graduelle en tension continue	35
CHAPITRE 3 THÉORIE DES DIÉLECTRIQUES		38
3.1	Généralités	38
3.1.1	Mesures dans le domaine du temps	40
3.1.1.1	Le courant capacitif (I_{cap}).....	43
3.1.1.2	Le courant d'absorption (I_{abs}).....	44
3.1.1.3	Le courant de conduction directe (I_{dc})	45
3.1.2	Mesures dans le domaine de fréquences.....	46
3.1.3	Normalisation par la capacité.....	49
3.1.4	Influence de la température.....	50
CHAPITRE 4 ENROULEMENTS STATORIQUES ET MATÉRIAUX COMPOSITES.....		51
4.1	Les enroulements statoriques des moteurs et des générateurs	51
4.1.1	L'isolation des conducteurs (ou des conducteurs secondaires)	54
4.1.2	L'isolation des spires	54
4.1.3	L'isolation de masse	55
4.2	Revue des matériaux isolants les plus utilisés dans l'industrie.....	56
4.2.1	Isolation de masse	56
4.2.2	Mica	56
4.2.3	Asphalte	58
4.2.4	Polyester.....	60
4.2.5	Époxy	62
4.3	Développements récents des systèmes d'isolation des enroulements statoriques	63
4.4	Revue des méthodes de diagnostic de l'état de dégradation de l'isolation des enroulements statoriques	64
CHAPITRE 5 MODÉLISATION.....		81
5.1	Mise en contexte	81
5.2	Principe de la modélisation.....	84
5.2.1	Définition	84
5.2.2	Le modèle linéaire.....	84
5.2.3	Les objectifs d'une étude de régression	85
5.2.4	Position du problème	85
5.2.5	Calcul des paramètres inconnus de l'équation de régression.....	86

5.2.5.1	Modèle approximé	95
5.2.5.2	Modèle exact	99
5.3	Analyse de la variance et test de signification	99
5.4	Résultats et étude des cas	102
5.4.1	Mesures en laboratoire	102
5.4.1.1	Bobine Beauharnois (Westinghouse), (figure 39 a, b, c)	104
5.4.1.2	Bobine Paugan (General Electric), (figure 40 a, b, c)	107
5.4.1.3	Barre La Tuque (General Electric), (figure 41 a, b, c)	110
5.4.2	Mesures sur le terrain	113
5.4.2.1	Alternateur 1- Centrale Murdock Wilson (figure 42 a, b, c)	113
CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSION		117
6.1	Échantillons	117
6.2	Mesures et discussions	119
6.2.1	Asphalte (General Electric)	120
6.2.1.1	Mesures	120
6.2.1.2	Discussion	121
6.2.2	Hydromat, Micamat (General Electric); Isotenax, Isotenax-N, Duritenax (Alstom)	123
6.2.2.1	Mesures	123
6.2.2.2	Discussion	131
6.2.3	Thermalastic (Westinghouse), Polyester (National Electric Coil)	136
6.2.3.1	Mesures	136
6.2.3.2	Discussion	139
6.3	Création de défauts	141
6.3.1	Contraintes Environnementales	142
6.3.1.1	Mesures	144
6.3.1.2	Discussion	145
6.3.2	Contraintes électriques	146
6.3.2.1	Décharge d'encoche	146
6.3.2.2	Défaut au niveau des extrémités de l'enroulement	149
6.3.3	Contamination et absorption d'humidité	152
6.3.3.1	Mesures	154
6.3.3.2	Discussion	154
6.3.4	Endommagement de la jonction des peintures	155
6.3.4.1	Mesures	157
6.3.4.2	Discussion	157
CONCLUSION		159
RECOMMANDATIONS		162
ANNEXE 1	Les essais hors service les plus utilisés pour le diagnostique des enroulements statoriques	163
ANNEXE 2	La table de la transformée de Laplace	165

ANNEXE 3 Les valeurs de F de la variable de Fisher-Snédecour $F(v_1, v_2)$	167
BIBLIOGRAPHIE.....	169

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau I	Les valeurs minimales recommandées pour la résistance d'isolation à 40.....	5
Tableau II	Les valeurs minimales recommandées pour l'indice de polarisation.....	6
Tableau III	Directives pour l'application des tensions continues lors des essais RI et PI	66
Tableau IV	Recommandation selon les valeurs de R'C	67
Tableau V	Degrés de liberté.....	100
Tableau VI	Résultats de modélisation et d'analyse de la variance pour la bobine Beauharnois (Westinghouse).....	106
Tableau VII	Résultats de modélisation et d'analyse de la variance pour la bobine Paugan (General Electric)	109
Tableau VIII	Résultats de modélisation et d'analyse de la variance pour la barre La Tuque (General Electric).....	112
Tableau IX	Résultats de modélisation et d'analyse de variance pour l'alternateur 1 Centrale Murdock Wilson	115
Tableau X	Conditions de mesure de chaque échantillon	118
Tableau XI	Résultats des mesures selon différents critères pour le cas d'une isolation à base d'une résine en Asphalte-mica (Fabricant : General Electric)	122
Tableau XII	Résultats des mesures selon différents critères pour le cas d'une isolation à base d'une résine en Epoxy-mica (Fabricant : General Electric)	133
Tableau XIII	Résultats des mesures selon différents critères pour le cas d'une isolation à base d'une résine en Epoxy-mica (Fabricant : Alstom).....	135
Tableau XIV	Résultats des mesures selon différents critères pour le cas d'une isolation à base d'une en résine en Polyester-mica (Fabricant : Westinghouse et National Coil)	140
Tableau XV	Résultats des courants et critères IEEE mesurés (Défaut : contrainte environnementale).....	146
Tableau XVI	Résultats des courants et critères IEEE mesurés (Défaut : décharge d'encoche)	149

Tableau XVII Résultats des courants et critères IEEE mesurés (Défaut au niveau des extrémités de l'enroulement).....	152
Tableau XVIII Résultats des courants et critères IEEE (Défaut de contamination et d'absorption d'humidité)	155

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Arrangement instrumental sur le site ou en laboratoire pour la mesure du courant20
Figure 2	Montage utilisé pour les essais de montée progressive en haute tension continue en laboratoire21
Figure 3	Contribution permettant de mesurer les propriétés du revêtements anti-effluves22
Figure 4	Système typique d'acquisition de données.....24
Figure 5	Arrangement instrumental lors des essais réalisés en laboratoire27
Figure 6	Courant de charge traversant un circuit monté en série28
Figure 7	Première configuration de terrain réalisée en centrale électrique pour le diagnostic de l'état d'isolation d'une machine électrique. L'électromètre est placé entre le circuit protecteur et le relais29
Figure 8	Deuxième configuration de terrain réalisée en centrale électrique pour le diagnostic de l'état d'isolation d'une machine électrique. L'électromètre est placé entre la source haute tension et la terre30
Figure 9	Page de démarrage du logiciel32
Figure 10	Page des caractéristiques33
Figure 11	Page paramètres pour l'essai rampe35
Figure 12	Page essai de montée graduelle en tension continue.....37
Figure 13	Technique de superposition.....41
Figure 14	Différents types de fonction de réponse diélectrique dans le domaine du temps42
Figure 15	Réponse d'un courant capacitif mesuré sur les trois phases statoriques d'un alternateur de 160 MVA44
Figure 16	Réponse d'un courant d'absorption mesuré sur les trois phases statoriques d'un alternateur de 160 MVA45
Figure 17	Réponse d'un courant de fuite obtenue par la soustraction des courants de charge et de décharge mesurés sur les trois phases statoriques d'un alternateur de 160 MVA.....46
Figure 18	Enroulements statoriques composés de trois phases montées en étoile à deux circuits parallèles par phase.....51

Figure 19	-a- Enroulement composé d'une bobine complète, -b- Enroulement composé de deux barres.	52
Figure 20	Une barre isolée avec un matériau composite utilisée dans la construction d'une bobine de stator d'un alternateur de puissance.....	53
Figure 21	Vue en coupe d'une bobine d'un alternateur illustrant ces principaux composants	55
Figure 22	Coupe de mica de mica de mica : Chaque structure de trois couches est séparée par une couche d'ions de potassium.....	58
Figure 23	Formation d'une chaîne linéaire de polyester par la réaction de condensation des demi-esters	61
Figure 24	Résine de polyester réticulée par le styrène. Le nombre de groupes styrènes formant les réticulations est variable.....	61
Figure 25	Structure d'un époxy prépolymère	62
Figure 26	Courbe typique d'un essai conventionnel	69
Figure 27	Courbe typique d'un échelon de tension graduel uniforme	70
Figure 28	Courbe typique d'un échelon de tension graduel non uniforme	71
Figure 29	-a- Technique de la formation de la rampe en tension, -b- Réponse du courant total	72
Figure 30	Calcul de l'angle de phase pour les mesures de $\tan\delta$ ($\cos\phi = FP$).....	76
Figure 31	La mesure des impulsions du courant des décharges partielles	79
Figure 32	Affichage d'oscilloscope des impulsions de décharges partielles en fonction de la tension	80
Figure 33	Modélisation en supposant un courant d'absorption linéaire.....	83
Figure 34	Modélisation en supposant un courant d'absorption linéaire.....	83
Figure 35	-a- Schéma équivalent d'un enroulement d'isolation statorique dont lequel les mécanismes de polarisation diélectrique sont combinés. b- Schéma simplifié	87
Figure 36	Approche Circuiterie	89
Figure 37	La partie droite de la courbe de charge utilisée pour la régression	97
Figure 38	La distribution de la variance au seuil de signification y	101
Figure 39	Arrangement instrumental pour des essais de montée progressive en haute tension continue effectués en laboratoire	103
Figure 40	Photo prise lors des essais en laboratoire sur deux bobines du fabricant westinghouse	104

Figure 41	Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant de charge	104
Figure 42	La réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles au début de la courbe	105
Figure 43	Séparation des trois contributions formant le courant mesuré	105
Figure 44	Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant de charge	107
Figure 45	La réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles au début de la courbe	108
Figure 46	Séparation des trois contributions formant le courant mesuré	108
Figure 47	Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant de charge	110
Figure 48	La Réponse du courant mesuré et des courant des deux modèles au début de la courbe	111
Figure 49	Séparation des trois contributions formant le courant mesuré	111
Figure 50	Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant de charge	113
Figure 51	La réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles au début de la courbe	114
Figure 52	Séparation des trois contributions formant le courant mesuré	114
Figure 53	Essai de montée progressive sur la bobine Paugan. -a- Courant de charge mesuré. -b- Modélisation du courant mesuré	120
Figure 54	Essai de montée progressive sur la barre n°1 Outardes III (GE). a- Courant de charge mesuré. -b- Modélisation du courant mesuré	123
Figure 55	Essai de montée progressive sur la barre 175B0039 après vieillissement. a- Courant de charge mesuré. -b- Modélisation du courant mesuré	124
Figure 56	Essai de montée progressive sur r la barre 175B0065 après vieillissement -a Courant de charge mesuré. -b- Modélisation du courant mesuré	125
Figure 57	Essai de montée progressive sur la barre 175B0187 après vieillissement -a- Courant de charge mesuré. -b- Modélisation du courant mesuré	126
Figure 58	Essai en montée progressive sur la barre 17B0087 après vieillissement -a- Courant de charge mesuré. -b- Modélisation du courant mesuré	127

Figure 59	Essai de montée progressive sur la barre Manic III. –a- Courant de charge mesuré. –b- Modélisation du courant mesuré.....	128
Figure 60	Essai de montée progressive sur la barre La Tuque. –a- Courant de charge mesuré. –b- Modélisation du courant mesuré.....	129
Figure 61	Essai de montée progressive sur la barre n°2 Outardes III (Alstom). –a- Courant de charge mesuré. –b- Modélisation du courant mesuré....	130
Figure 62	Essai de montée progressive sur la bobine n°1 Beauharnois (Westinghouse). –a- Courant de charge mesuré. –b- Modélisation du courant mesuré	136
Figure 63	Essai de montée progressive sur la bobine n°2 Beauharnois (NEC). –a- Courant de charge mesuré. –b- Modélisation du courant mesuré ...	137
Figure 64	Essai de montée progressive sur la bobine Shawingan (NEC). a- Courant de charge mesuré. –b- Modélisation du courant mesuré.....	138
Figure 65	Photo de deux bobines Westinghouse utilisées pour des mesures en laboratoire.....	141
Figure 66	Différents parties constituant une bobine.....	142
Figure 67	Courant de charge mesuré et modélisé avant vieillissement.....	144
Figure 68	Courant de charge mesuré et modélisé après vieillissement	144
Figure 69	Comparaison des deux résultats avant et après vieillissement.....	145
Figure 70	Zone de défaut sur la partie droite de la bobine	147
Figure 71	Dimensions du défaut.....	147
Figure 72	Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut.....	148
Figure 73	Photo du défaut sur l'extrémité de la bobine.....	150
Figure 74	Dimensions du défaut.....	150
Figure 75	Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut.....	151
Figure 76	Ruban du cuivre couvrant la peinture conductrice.....	153
Figure 77	Dimensions du défaut.....	153
Figure 78	Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut.....	154
Figure 79	Fissure sur l'extrémité de la bobine	156
Figure 80	Dimensions du défaut.....	156
Figure 81	Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut.....	157

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

A	Ampère (unité d'intensité de courant électrique)
aA	atto-ampère, 10^{-18} A
AC	Alternative current
Al	Aluminium (matériau chimique)
AØ	La phase A d'un alternateur
BØ	La phase B d'un alternateur
CØ	La phase C d'un alternateur
C	Carbone
c.c.	Courant continu
C _{BT}	Capacité de basse tension, µF
C _{HT}	Capacité de haute fréquence, µF
°C	degré Celsius
IEC	Insulation Electrical Committee
D	Pont de diode
DA	Digital analogique
DAQ	Data acquisition
DC	Direct current
DEV	Discharge Inception Voltage, V
DIV	Discharge Extinction Voltage, V
E	Tension nominale phase-phase, V
E(s)	Espérance mathématique
F	Valeur de Fisher
fC	femto-Coulombs, 10^{-15} C
FD	Facteur de dissipation
FIFO	First-Input/First-Output
FP	Facteur de puissance
FP _{bt}	Facteur de puissance basse tension

FP _h	Facteur de puissance haute tension
GΩ	Giga-ohms, 10 ⁹ Ω
GE	General Electric
GPIB	General purpose interface bus
GST	Grounded sample test
H	Hydrogène
Hz	Hertz, (unité de fréquence)
Hipot	High potential
HT	haute tension
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IREQ	Institut de recherche d'Hydro-Québec
K	Ion de potassium
Kbytes/s	Kilo-bytes par second
KΩ	Kilo-ohms, 10 ³ Ω
KV	Kilovolt
KVA	Kilovolt-ampère
mA	milliampère, 10 ⁻³ A
mn	minute, 60 seconds
Mbyte/s	Méga-byte par second
MT	Moyenne tension
MVA	Méga voltampère, 10 ⁶ VA
NEC	National Electrical Coil
Q _m	Pic d'impulsion de décharge, V
PET	Polyéthylène téréphtalate
PC	Personnel computer
O	Oxygène
RH	Humidité relative, %
SCI	Squirrel cage induction
SI	Silicium

T	Température, °C
T _v	Température de transition de verre, °C
T _{amb}	Température ambiante, °C
V/s	Volt par second
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
UST	Ungrounded sample test
W	watts (unité de puissance)
ε ₀	8,85x10 ⁻¹² F/m (Permittivité du vide)

INTRODUCTION

L'économie moderne est fortement tributaire de l'accès à une source d'énergie fiable et abondante, d'où la raison qu'un utilisateur de matériels électriques soit désireux de recueillir toute information susceptible de l'éclairer sur le degré de vétusté de son parc d'appareils et de le guider dans le choix d'une politique et d'un plan d'entretien.

Le système d'isolation des enroulements statoriques des grandes machines tournantes opérant en service est continuellement exposé à des contraintes électriques, mécaniques, thermiques et environnementales. Ces contraintes contribuent au processus de vieillissement du système d'isolation de la machine électrique réduisant ainsi la durée de sa vie utile. Donc, il est important de mener périodiquement des actions d'entretien et de contrôle de ces machines électriques afin d'éviter des arrêts en service. Au cours des dernières années, l'utilisation de la spectroscopie diélectrique, temporelle et fréquentielle, comme outil de diagnostic s'est nettement développée [2]. Une telle méthode est primordiale pour évaluer l'état d'une isolation, soit qu'il s'agit à titre de contrôle de fabrication d'une isolation neuve, soit que l'on veuille connaître la nature et le degré des dégradations suite à plusieurs essais d'endurance sur un équipement électrique en service après des années d'utilisation.

Le comportement d'un matériau diélectrique peut être caractérisé par trois composantes : conductivité électrique σ , la permittivité diélectrique haute fréquence ϵ_{∞} et la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ [3]. Des essais ou des méthodes basés sur la réponse diélectrique des systèmes d'isolation sont de plus en plus employés en industrie [4]. L'une de ces méthodes est la méthode de montée progressive en haute tension continue (Ramped test voltage). C'est une méthode non destructive introduite par Bruce McHenry en 1964 et éditée en 1967 [5-6]. En 2002, cette méthode a été incluse dans le standard IEEE Std 95-2002 lors de sa mise à jour [7-8].

Notre travail consistera à étudier le vieillissement de l'isolation de masse des enroulements statoriques utilisant la méthode de montée progressive en haute tension continue comme outil de diagnostique pour ce type de vieillissement. Ce travail sera axé sur trois principaux objectifs qui sont :

- Mettre en application cette méthode en réalisant des essais en laboratoire (un essai en centrale sera également présenté) sur des barres\bobines statoriques de réserve. À l'issue de ces essais, mettre en relief les avantages, les inconvénients et les limitations que présente cette méthode par rapport aux autres méthodes indirectes à haute tension continue.
- Séparer la contribution du courant de fuite des deux courants capacitif et d'absorption en proposant un modèle linéaire.
- Illustrer l'habilité de cette méthode à détecter des défauts tels que l'absorption d'humidité, les fissures, le décollement...etc. Dans ce sens, des défauts en laboratoire sur des barres\bobines statoriques ont été simulés en essayant le plus que possible de reproduire les mêmes défauts rencontrés en centrale sans causer des dégradations additionnelles à l'isolation de masse des échantillons sélectionnés.

Dans un premier chapitre, nous présenterons une revue de littérature des principales publications jusqu'à nos jours concernant l'étude et les champs d'application de cette méthode. Le deuxième chapitre présentera l'arrangement instrumental qu'exige cette méthode. On y abordera de plus en détails, les deux parties Hardware et Software employées lors de nos essais réalisés en laboratoire. Une revue de la théorie diélectrique dans le domaine de temps et de fréquences sera présentée dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre présentera la composition d'un enroulement statorique et les principaux matériaux diélectriques utilisés dans l'industrie formant son système d'isolation. De plus, une revue des essais couramment utilisés pour l'évaluation de l'état d'isolation de masse des enroulements statoriques sera également présentée. Le

cinquième chapitre abordera le principe et la technique de modélisation du courant de charge, employée dans ce projet, afin d'isoler les trois contributions formant ce courant de charge (capacitif, absorption et fuite). Finalement, le sixième chapitre exploitera les résultats obtenus lors des essais en laboratoire sur plusieurs types d'échantillons de différentes technologies de fabrication. Nous évaluerons l'état d'isolation de masse de chaque échantillon suite à la modélisation du courant de charge de chaque mesure. Une simulation de quelques défauts en laboratoire y sera présentée et discutée également.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'utilisation de la méthode en haute tension continue, pour diagnostiquer l'état de l'isolation de masse des grandes machines tournantes, a fait l'objet d'un certain nombre d'écrits. Nous présenterons ici un court résumé des principales publications.

1.1 IEEE Std 43-2000 « IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery » [9]

Ce document décrit la procédure à suivre pour la mesure de la résistance d'isolation et l'indice de polarisation pour les enroulements statoriques des machines tournantes (machine synchrone, machine à induction et machine à courant continu), d'une puissance de 750 watts et plus. Il présente aussi les valeurs minimales acceptées de la résistance d'isolation et de l'indice de polarisation pour différents types de machines tournantes.

La résistance d'isolation est définie comme étant le quotient de la tension continue appliquée et le courant mesuré ($R = \frac{V}{I}$). Pour maintenir l'uniformité de la mesure, la résistance d'isolation est déterminée à un instant spécifique t , en général une minute après l'application de la tension. Habituellement, la résistance d'isolation change directement avec l'épaisseur de l'isolation et inversement avec la superficie du conducteur. L'augmentation de la température d'un matériau diélectrique fournit une énergie thermique additionnelle qui libère des porteurs de charge, et de ce fait entraîne une augmentation de la conductivité du matériau, ce qui affecte de manière significative les mesures de la résistance diélectrique. Pour y remédier les mesures sont normalisées à une température standard, généralement 40°C, de telle sorte que pour chaque élévation de 10°C du spécimen, la résistance d'isolation est réduite de moitié. Ainsi, il est recommandé que les mesures de la résistance d'isolation soient obtenues à plusieurs températures sur des

nouveaux enroulements statoriques bien nettoyés et en bon état afin de déterminer le coefficient de correction de température le plus précis.

Selon le comité (IEEE), la résistance d'isolation corrigée minimale acceptée (en méga Ohms) est égale à la tension en kilovolts du système d'isolation plus un. Il est habituellement souhaitable d'avoir une résistance d'isolation aussi haute que possible (d'une centaine aux milliers de méga-ohms). Le tableau I, présenté ci-dessous, indique les valeurs minimales acceptables pour la résistance d'isolation après une minute de l'application de la tension d'essai pour les machines AC et DC.

Tableau I

Les valeurs minimales recommandées pour
la résistance de l'isolation à 40°C¹

Résistance à l'isolation Valeur minimale acceptable MΩ	Échantillons des essais
$R_{min} = kV + 1$	Des enroulements fabriqués avant 1970.
$R_{min} = 100$	Des enroulements DC et AC fabriqués après 1970.
$R_{min} = 5$	Des petites machines $\leq 1kV$

Pratiquement, les mesures de la résistance d'isolation sont employées pour détecter l'absorption d'humidité, la contamination conductrice, le degré de réticulation de la résine, et les fissures. Il est reconnu, qu'il est généralement difficile de faire des conclusions sur l'état d'isolation basées seulement sur les mesures de la résistance d'isolation.

¹ Ces valeurs sont tirées de la norme IEEE Std 43-2000 [9].

Le document présente un autre type d'essai, en l'occurrence l'indice de polarisation, qui est semblable à celui de la résistance d'isolation à l'exception que les lectures sont prises à deux intervalles différents, une minute et 10 minutes, après que la haute tension continue soit appliquée. Le rapport entre ces deux mesures de courant se nomme l'indice de polarisation et donne une indication du degré d'humidité de l'isolation, du degré de contamination, ainsi que de l'intégrité physique. Ce rapport est moins sensible aux variations de la température que les valeurs de la résistance d'isolation. Le standard IEEE 43-2000 recommande une valeur d'indice de polarisation supérieure ou égal à 2 pour la classe F et supérieure ou égal à 1,5 pour l'isolation de classe B. En pratique, l'essai d'indice de polarisation est un indicateur quelque peu ambigu des défauts et des détériorations d'isolation. Il est cependant conseillé de comparer ces mesures avec celles obtenues à partir des machines semblables en bon état pour mieux utiliser ses résultats. Le tableau II suivant exprime les valeurs minimales recommandées selon la classe thermique de l'isolation pour l'indice de polarisation.

Tableau II

Les valeurs minimales recommandées
pour l'indice de polarisation

Classe thermique d'isolation	Valeur minimale pour l'indice de polarisation
Classe A	1,5
Classe B	2,0
Classe F	2,0
Classe H	2,0

1.2 IEEE Std 95-2002 « IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and above) with High Direct Voltage » [8]

Dans ce document, le conseil d'association des comités de coordination des normes IEEE établit des méthodes uniformes d'utilisation de la haute tension continue pour l'évaluation de l'état d'isolation des enroulements statoriques des machines électriques de 2 300V et plus. Ces recommandations couvrent les essais avant la livraison de l'équipement depuis l'usine, après l'installation de l'équipement, et lors des entretiens de routine des machines déjà en service. Elles proposent un certain ensemble de conseils pour l'analyse des variations du courant mesuré en fonction de la tension appliquée afin de rendre l'évaluation de l'état de l'isolation plus efficace par rapport aux mesures utilisant une tension alternative. Chaque méthode d'essai offre des avantages et des inconvénients. Le document présente trois techniques généralement employées pour les essais à haute tension continue, qui se résument comme suit.

1.2.1 Essai par Échelon de tension à des intervalles de temps uniforme

Initialement un échelon de tension, égal à 30% ou moins de la tension maximale de l'essai, est appliqué afin de déterminer les valeurs de la résistance d'isolation et de l'indice de polarisation. Une fois que ces deux valeurs sont conformes aux critères de la norme IEEE Std 43-2000, la haute tension continue est appliquée sous forme d'une série d'échelon de tension à des intervalles de temps réguliers. Le niveau de tension de chaque échelon doit être égal à 3% ou moins du niveau maximal de la tension d'essai et reste maintenu jusqu'à ce que le courant d'absorption ait atteint une valeur négligeable avant d'appliquer l'échelon de tension suivant. Les lectures du courant sont prises à la fin de chaque intervalle de temps et ainsi la courbe du courant en fonction de la tension appliquée est reproduite instantanément sur un graphe. Pendant et après l'essai, la courbe est examinée afin de détecter des augmentations ou autres variations du courant de conduction en fonction de la tension appliquée qui pourraient indiquer des défauts d'isolation.

1.2.2 Essai Échelon de tension à des intervalles du temps graduels

Initialement un échelon de tension de 30% ou moins de la tension maximale de l'essai, est appliqué pendant 10 minutes. Les mesures du courant sont prise aux moments suivants : $t_1 = 30$ s, $t_2 = 45$ s, $t_3 = 1$ min et $t_4 = 2$ min puis jusqu'à 10 min avec des incréments de 1 min. Les valeurs mesurées sont immédiatement tracées sur une échelle log-log. Une courbe lisse est adaptée aux mesures après 8 minutes de lecture et qui sera extrapolée à 10 minutes. Trois points sont lus de cette courbe pour être employés à la détermination de la composante de conduction du courant mesuré. Ces trois points sont les valeurs du courant total lues aux moments : $t = 1$ min, $t = 3,16$ min et $t = 10$ min. Ils sont employés pour tirer la composante de conduction du courant mesuré selon l'équation suivante.

$$I_c = \frac{(i_{1\text{min}} \times i_{10\text{min}}) - (i_{3,16\text{min}})^2}{(i_{1\text{min}} + i_{10\text{min}}) - 2i_{3,16\text{min}}}$$

Ce courant I_c sera soustrait des lectures de courant mesuré à 1 minute et à 10 minute afin d'obtenir le courant d'absorption I_a (le courant capacitif est supposé négligeable). Ces valeurs sont ensuite utilisées pour calculer le rapport d'absorption N suivant :

$$N = \frac{I_{a_{1\text{min}}}}{I_{a_{10\text{min}}}}$$

Une fois que ces calculs sont complétés, les périodes des échelons de tension pour le reste du test (jusqu'au niveau de tension maximale) sont adaptées. Ces adaptations sont réalisées par pas moins de deux personnes. Ce facteur humain rend difficile de respecter avec exactitude les conditions d'essai mentionnées ci-dessus, menant à des imprécisions et des inexactitudes dans l'évaluation générale de l'état d'isolation.

1.2.3 Essai de montée progressive en haute tension continue (Ramped Voltage Test)

Cet essai peut être considéré comme un essai échelon de tension pour lequel la tension est réajustée à des intervalles du temps très petits s'approchant de zéro. C'est ainsi qu'une rampe de tension est formée. Le courant d'isolation en fonction de la tension appliquée est enregistré sur un graphe en X-Y, pour fournir une observation continue et une analyse de la réponse du courant au fur et à mesure que l'essai progresse. L'application de la tenue de tension en montée progressive au lieu des deux premières méthodes, linéarise automatiquement la composante du courant de la capacité géométrique et du courant d'absorption de sorte que les variations significatives du courant mesuré seront observées plus facilement. En outre, l'augmentation lente et continue de la tension appliquée, en général 1 kilovolt par minute, est moins susceptible de causer des dommages imprévisibles à l'isolation que l'utilisation d'incrément de tension à un taux de montée d'approximativement 1 kilovolts par seconde. Le courant d'isolation versus la tension appliquée est automatiquement tracé sur un graphe X-Y, fournissant l'observation et l'analyse continue de la réponse de courant d'isolation au fur et à mesure que l'essai progresse. L'état d'isolation est évalué en fonction des non-linéarités du courant d'isolation observées sur le graphe et qui sont directement proportionnelles aux variations du courant de fuite

1.3 High-Voltage DC Tests for Evaluating Stator Winding Insulation: Uniform step, graded step, and Ramped Test Methods [11]

L'évaluation d'isolation des enroulements statoriques par des essais haute tension en courant continu, employée dans l'industrie pour la maintenance du système d'isolation, est réalisée par plusieurs méthodes pratiques (méthode d'échelon uniforme, méthode d'échelon à plusieurs niveaux, méthode de montée progressive en haute tension continue, etc.) [8, 9]. Chaque méthode présente des inconvénients et des avantages pour différents types et endroits d'essai. L'objectif de ce papier est de tracer un portrait de

niveau de fiabilité de chaque méthode pour l'évaluation de l'état du système d'isolation. L'essai de montée progressive en haute tension continue est présenté comme un outil très adapté pour les essais sur site qui endommagent moins le système d'isolation tout en respectant le standard IEEE Std 95-2002 [8]. L'approche utilisée pour former la rampe de tension est réalisée sous forme d'une montée progressive en tension à des intervalles temporels très courts. Cette technique linéarise automatiquement la composante d'absorption du courant d'isolation. Ainsi les déviations du courant de fuite seront facilement visualisées. Le graphe du courant d'isolation en fonction de la tension appliquée, fournit l'observation et l'analyse continue de la réponse diélectrique tant que l'essai progresse. L'essai de montée progressive en haute tension continue simplifie considérablement l'analyse des mesures de courant de fuite au niveau du stator de l'enroulement. Bien qu'aucun test de diagnostic ne puisse détecter avec succès tous les types de défauts de l'enroulement statorique, cet essai s'est avéré être un moyen efficace pour établir une bonne maintenance préventive afin d'éviter des éventuels échecs en service. En outre, il nous permet d'utiliser une seule personne pour l'exécution des essais, laquelle dispose d'un contrôle suffisant pour éviter d'endommager l'isolation lors de ces essais. Cette opération prend moins de temps pour être exécutée. L'auteur présente un résultat très important, qui se définit en une augmentation lente et continue de la tension appliquée, environ 1 kV/min ou 17 V/s, et qui est moins susceptible d'endommager l'isolation par rapport à une application de tension d'environ 1 kV/s.

1.4 Advantages of the Ramped Direct High-Voltage Method of Assessing Stator Winding Insulation Condition [12]

Dans cet article, l'auteur commence par rappeler les principaux facteurs qui accélèrent le processus de détérioration d'un système d'isolation des enroulements à masse statorique. La dégradation chimique des matériaux isolants peut causer une formation de poches d'eau, d'acides et de gaz ionisants résultant en une migration et une concentration de l'humidité et diminuant la rigidité diélectrique de l'isolation. Aussi l'auteur ajoute que les variations de température dues au cycle thermique sont

responsables de la formation de poches de gaz au long de l'isolation. Toutes ces contraintes agissent directement sur les propriétés électriques de l'enroulement que l'on peut mesurer, quantifier, et analyser. Ces dernières sont souvent utilisés pour le diagnostic de l'état d'isolation, en réalisant des essais hors service à haute tension continue (off-line tests), sur le système d'isolation à masse statorique. L'auteur revient sur ce dernier point en présentant la panoplie des essais à haute tension continue largement répandues dans l'industrie de l'électricité [8, 9].

Les essais à haute tension continue sont reconnus être bien adaptés pour détecter des problèmes d'isolation tels que le craquement, les fissures, la contamination externe, le mauvais traitement de la résine et la formation de l'humidité qui, selon l'auteur, vont augmenter d'une manière significative la conduction de volume ou de surface du système d'isolation. Ces méthodes sont moins habiles pour la détection d'une pauvre imprégnation, d'un décollement, ou d'une isolation thermique âgée. En effet, ces défauts génèrent une faible conductivité de courant continu, ce qui limitera la détection des variations subtiles du comportement électrique par les méthodes conventionnelles à tension continue citées en [8].

L'essai de montée progressive en haute tension continue vise à combler ces lacunes et ces limitations. Il est plus simple et exige une seule personne pour son exécution. Il améliore aussi la qualité des données acquises, et offre une analyse plus avancée sur l'état de l'isolation de l'enroulement statorique [13-14]. Il consiste en une unité de commande placée en dehors de la zone d'essai et souvent reliée à un PC. Elle est équipée de circuits de mesure de la tension et du courant et elle fournit un signal rampe lent et lisse à l'amplificateur haute tension. Le générateur (amplificateur) haute tension produit une sortie bien stable sans ondulations afin d'éviter des erreurs dans la mesure du courant. L'auteur insiste sur un point vital. Il recommande de mettre solidement l'enroulement statorique à la terre une fois que l'essai est terminé et ce pendant plusieurs heures pour s'assurer que toutes les charges ont été dissipées. Autrement, des tensions

dangereuses peuvent réapparaître sur les bornes de l'enroulement et si un autre essai de tension est appliqué juste après le premier essai, cela causera certainement des endommagements importants.

L'auteur abordera par la suite les types d'isolation en indiquant qu'une isolation en asphalte (une substance fortement polaire) est caractérisée par un plus grand nombre de dipôles par unité de volume que celle en époxy, ce qui mènera à des valeurs de courants mesurés plus élevées et conséquemment à une pente plus raide sur le graphe du courant en fonction de la tension. Il renforce ces propos en donnant un exemple d'un système d'isolation vieilli et détérioré en asphalte. La réponse montre une augmentation progressive de la non linéarité du courant en fonction de la tension. Cela indique qu'une dégradation thermique de l'isolation s'est produite, ce qui a comme conséquence une destruction des couches du ruban adhésif aux extrémités de l'enroulement, causant ainsi la formation de vacuoles et créant possiblement des chemins carbonisés dans l'isolation de masse statorique. Ces défauts deviennent des sites d'injections pour les charges d'espace et pour l'initiation de décharges partielles, donnant naissance à un courant de fuite important. Les systèmes d'isolation basés sur l'asphalte sont également vulnérables à l'absorption d'humidité à travers les fissures. Ces dernières sont généralement causées suite à : la volatilisation provoquée par la chaleur, l'oxydation chimique et la fente moléculaire de l'asphalte. Il est dans ces conditions important d'installer des chauffages électriques dans les chambres d'air du stator pour garder l'enroulement à quelques degrés au-dessus du point de condensation afin d'empêcher une condensation d'humidité sur les surfaces de l'enroulement pendant que la machine est à l'arrêt.

L'auteur donne un autre exemple d'une isolation en polyester-mica qui est composée d'un ruban de Mylar et de morceaux de mica imprégnés dans une résine du polyester. Le courant mesuré semble normal au fur et à mesure que la tension appliquée augmente de zéro à quelques kilovolts. Toutefois, lorsque la tension excède 3,2 kV, la pente de la réponse augmente brusquement et le courant devient non linéaire et quelque peu

erratique. L'auteur indique que lors de la fabrication et du traitement final de l'enroulement à l'usine, une température et une pression insuffisante ont été appliquées afin de fondre et de consolider correctement les couches d'isolation. Conséquemment, l'isolation souffrait de décollements répandus et de délamination entre les rubans. Le traitement incomplet de la résine est aussi caractérisé par une plus grande densité des charges conductrices et polaires, menant à l'accroissement du courant de polarisation et du courant de fuite. L'auteur ajoute un autre exemple d'une machine ayant un système d'isolation thermodurcissable, qui est vulnérable à l'usure mécanique et aux fissures. Cet enroulement présente une fissure sur l'isolation de masse, causée suite à une rude manipulation de l'enroulement lors de son installation. Cela s'interprète par une augmentation pointue du courant de conduction dû à des activités de décharges à l'endroit du craquement. De même, un mauvais traitement des résines, des vernis, et d'autres enduits provoque des conséquences semblables. L'auteur, avant de conclure, donne un dernier exemple d'une isolation en époxy-mica sévèrement contaminée. L'inspection physique de la machine indique une contamination significative sur les parties supérieures et inférieures de l'enroulement statorique. Il est impératif de faire attention aux contaminants tels que le huile, le carbone, la poussière, la saleté, lesquels, combinés avec l'humidité, peuvent causer un indésirable accroissement dans le courant de conduction pendant les essais à haute tension.

L'auteur conclut que l'essai de montée progressive en haute tension continue, une fois correctement fait, peut identifier les enroulements statoriques qui s'approche de leur fin de vie sans accélérer leur processus de détérioration.

1.5 Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain on Insulation System of High Voltage Rotating Machines [3]

Dans cet article l'auteur, revient sur l'utilité de la méthode d'analyse de la réponse diélectrique mesurée dans les deux domaines, temporel et fréquentiel, et employée dans l'évaluation de l'état d'isolation des systèmes électriques. Cette méthode montre qu'on peut caractériser le comportement du matériau diélectrique à partir des mesures de la conductivité courant continu (σ), de la composante haute fréquence de la permittivité relative ϵ_∞ et de la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ [14]. Pour cette investigation une barre statorique basée sur la technologie VPI époxy, selon la norme du fabricant, est utilisée. Un instrument d'une plage de fréquence allant de 10^{-4} à 10^3 Hz, appelé le IDA 200 [15], est employé pour mesurer les pertes diélectriques, $\tan\delta(\omega)$, et la capacité $C(\omega)$ à des fréquences discrètes. Les mesures ont été réalisées en appliquant une crête de tension de 200 V. Dans le domaine de temps, la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ est estimée après un temps de charge de 1 000 secondes à partir du courant de dépolarisation selon l'équation (1.1) suivante :

$$f(t) \approx -\frac{i_{\text{dépolariation}}}{C_0 U_c} \quad (1.1)$$

Le résultat de l'équation (1.2), présenté ci-dessous, confirme que la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ du système d'isolation haute tension des machines tournantes suit le modèle de Curie von Schweidler :

$$f(t) = At^{-n} \quad (1.2)$$

Le courant de dépolarisation est transformé du domaine temporel vers le domaine fréquentiel dans le but de vérifier la linéarité du système d'isolation pour quatre différentes tensions de charge : 0,2, 1, 2 et 4 kV. La fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ trouvée, confirme son indépendance du champ électrique appliqué et de la linéarité du système d'isolation. Cependant, pour une meilleure estimation des propriétés diélectriques, il est

nécessaire, lors de la mesure du courant de décharge, que la durée de décharge soit inférieure d'en moins d'une décade à celle du courant de charge.

Les résultats montrent aussi que le domaine du temps est idéal pour les mesures à faibles fréquences ($f < 10$ Hz) tandis que les mesures à hautes fréquences sont plus facilement mesurables dans le domaine fréquentiel du fait que habituellement une lecture du premier point dans le domaine du temps prend un délai minimum d'une seconde d'où la perte de l'information haute fréquence. L'auteur termine cet article, en présentant l'approximation d'Hamon [16] comme un outil très puissant pour un calcul plus rapide des pertes diélectriques dans le domaine des fréquences à partir des données temporelles.

1.6 Low-Frequency Dielectric Response of Epoxy-Mica Insulated Generator bars During Multi-Stress Aging [17]

Dans cet article, une étude de l'évolution de la réponse diélectrique à basse fréquence des matériaux isolants thermodurcissables en époxy-mica utilisés dans l'isolation des enroulements statoriques a été menée en fonction du vieillissement. Ce dernier agit sur le comportement physique et chimique des matériaux isolants menant à un changement de leurs réponses diélectriques. Pour comprendre ces changements, des mesures diélectriques dans le domaine temporel effectuées en laboratoire ont été conduites sur des barres statoriques individuellement avant, pendant et après vieillissement. A cet effet, deux configurations de laboratoire à deux électrodes actives ont été définies. La première configuration permet d'analyser l'évolution de la réponse diélectrique sur la partie droite de la barre statorique, tandis que la deuxième concerne l'évolution de la réponse diélectrique du revêtement semi-conducteur sur les extrémités de la barre statorique. Sous des conditions de mesure en laboratoire de 20°C et 30% RH, des mesures dans le domaine du temps de courant de charge et de décharge ont été effectuées sur une barre statorique non-vieillie isolée en époxy-mica suite à l'application des échelons de tension de 1, 5, 10, 15 et 20 kV. La durée de charge équivalente à chaque échelon de tension était de 2 000 s suivie d'un temps de décharge de 1 000 s.

Pour une évaluation de la réponse diélectrique à basse fréquence, ces mesures sont transformées dans domaine de fréquences utilisant l'équation (10) présentée dans cet article [17].

Pour étudier l'évaluation de la réponse diélectrique en fonction du vieillissement, 12 barres d'un alternateur ont été sélectionnées pour deux programmes de vieillissement réalisés à l'institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ). Les essais de ces deux programmes de vieillissement à contraintes multiples ont été exécutés sur les trois phases d'un alternateur contenant les 12 barres statoriques sélectionnées. Chaque phase comprend quatre barres disposées symétriquement à raison de deux barres par encoches.

Le premier programme de vieillissement a été exécuté sous une tension de 16 kV rms. Le cycle thermique de charge correspondant à une température du conducteur variait entre 40°C et 122°C. La température du cycle a été réalisée par l'injection d'un courant sur les trois phases en utilisant une source de courant triphasée tel qu'il est montré à la figure 2 dans [18]. Une fois que la température atteint le niveau maximal désiré (122°C), des ventilateurs de refroidissement sont activés pour ramener cette température à la température ambiante de 40°C. La durée complète d'un cycle été de 5 heures, 3^{1/2} pour le chauffage suivi de 1^{1/2} de refroidissement. L'essai a été exécuté pour une durée totale de 1500 cycles pendant lequel aucune barre n'a été endommagée. Les résultats préliminaires des activités de décharges partielles sont reportés dans [18] et ils sont plus détaillés dans [19].

Le deuxième programme de vieillissement a été exécuté sur deux ensembles de barres du même type soumis au même niveau de tension et aux mêmes contraintes électriques que celles du premier programme. La seule différence entre les deux programmes est que les grandeurs des contraintes mécaniques et thermiques ont été augmentées dans ce deuxième programme. Le premier ensemble de barres est formé de quatre barres non vieilles isolées en époxy-mica, tandis que le second ensemble est composé de quatre

barres non vieillies et de quatre autres barres vieillies lors du premier programme de vieillissement. Les barres de ce deuxième ensemble sont elles aussi isolées en époxy-mica. Une injection de courant a été réalisée sur le premier ensemble de barres (quatre barres non vieillies) jusqu'à ce que la température du conducteur ait atteint une température de 165°C sous une tension de 16 kV rms. Les 8 autres barres formant le deuxième ensemble ont été elles aussi vieillies sous les mêmes conditions thermiques utilisant une source de courant monophasée, tel qu'illustré à la figure 2 dans [19]. La tension appliquée est de 12 kV rms mais aucune contrainte mécanique n'est appliquée sur ces 8 barres. Au 733^{ème} cycle de charge, le vieillissement a été interrompu pour substituer deux barres des 12 barres, qui présentaient une activité très intense de décharges sur leurs extrémités, par deux nouvelles barres. Le programme de vieillissement avait repris jusqu'à atteindre un total de cycle de 1 049.

Des essais hors service de diagnostique à échelon de tension continue pour l'étude de l'évolution de la réponse diélectrique en fonction du vieillissement utilisant une seule électrode active (voir chapitre 2) ont été effectués périodiquement lors de ces deux programmes de vieillissement à la température du conducteur ayant été ramenée à la température ambiante. Pour le premier programme de vieillissement, les mesures de courant de charge et de décharge ont été réalisées à partir du 1 033^{ème} cycle de vieillissement après chaque centaine de cycle (100 cycle) jusqu'au 1 500^{ème} cycle en appliquant des échelons de tension, tandis que pour le second programme de vieillissement, ces mesures ont été conduites aux cycles 0, 105, 267, 304, 535, 706 et 872 pour les deux ensembles de barres statoriques. Pour ce second programme, le niveau des échelons de tension des essais hors service a été fixé à 500 V afin d'éviter des injections de charge qui peuvent affectées ce deuxième programme de vieillissement.

Pour les essais de vieillissement accéléré, l'auteur constate que les résultats expérimentaux obtenus sur les barres vieillies et non-vieillies n'ont pas menés à un changement significatif de la réponse diélectrique de l'isolant à basses fréquences sur la

toute la partie droite des barres. Cependant, une dégradation considérable a été enregistrée sur les extrémités des barres pendant le vieillissement, menant à un accroissement de la conductivité de surface au niveau du revêtement anti-effluves. Conséquemment, ceci a mené à un changement significatif de la réponse diélectrique de la barre complète observée dans la plage de fréquence de 10^{-4} à 10^{-1} Hz.

De plus, la dégradation progressive du système d'isolation a été caractérisée par une occurrence d'un pic de relaxation qui se déplaçait vers les hautes fréquences au fur et à mesure que le vieillissement progressait. Les méthodes temporelles, qui sont bien adaptées pour une analyse en basse fréquence, se sont avérées sensibles au vieillissement qui a eu lieu. Un modèle d'équation d'une ligne de transmission avec une capacité complexe modélisant le volume du matériau isolant a été proposé par l'auteur pour modéliser les extrémités des barres. Ainsi, les résultats du modèle linéaire se concordent bien avec ceux expérimentaux.

CHAPITRE 2

MONTAGE ET INSTRUMENTS

Dans la dernière décennie, plusieurs travaux ont porté sur la possibilité de mesurer les pertes diélectriques en utilisant une rampe de tension ainsi que l'application de cette méthode comme outil de diagnostic pour les enroulements statoriques [8, 10-13, 20, 21].

2.1 Spectromètre diélectrique dans le domaine du temps

Une instrumentation de laboratoire a été développée afin de mesurer le courant de polarisation pour des échelons de tension plus élevés que 1 kV. Le fait de pouvoir polariser à plus haute tension (jusqu'à 20 kV) permet d'obtenir des courants de polarisation de beaucoup supérieurs au bruit ambiant et d'éliminer les fluctuations aux longues mesures correspondantes aux basses fréquences. Le montage de laboratoire est illustré à la figure 2, présentée ci-dessous. Les essais en laboratoire utilisent, habituellement, un montage à deux électrodes actives (appelé UST pour « Ungrounded Sample Test »). Habituellement, lors de ce type d'essai on utilise la carte GPIB (General Purpose Interface Bus) pour la lecture du courant de charge et de décharge, tandis que les essais faits en centrale emploient un montage à une seule électrode active (appelé GST pour « Grounded Sample Test »).

La figure 1 présente l'arrangement instrumental des deux situations.

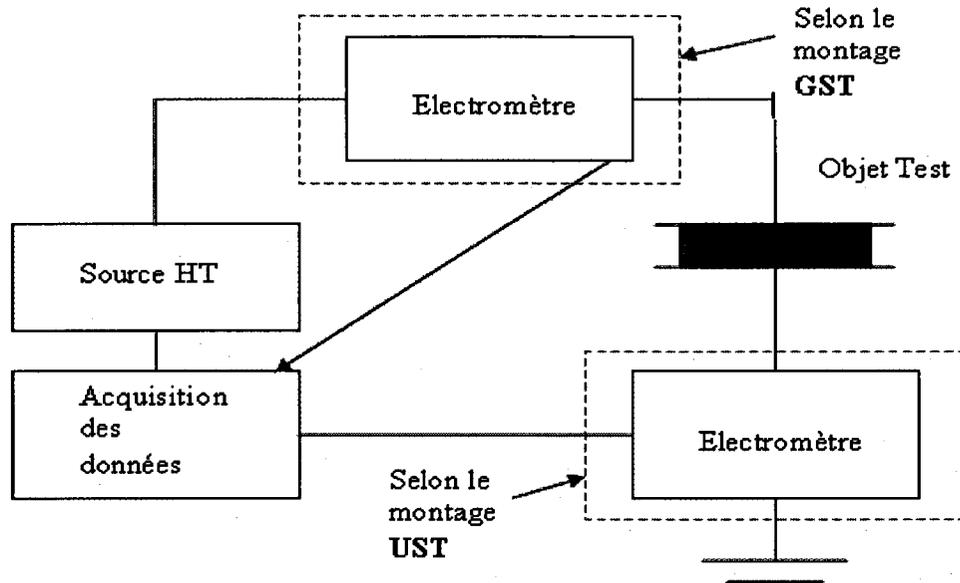


Figure 1 Arrangement instrumental sur le site ou en laboratoire pour la mesure du courant

Cette spectroscopie est réalisée à l'aide des instruments existants sur le marché. Des appareils fonctionnant dans le domaine du temps jusqu'à 20 kV et dans le domaine des fréquences de 10^{-3} à 10^{+3} Hz jusqu'à 30 kV sont maintenant commercialement disponibles. La description des modèles utilisés dans notre cas sera présentée plus loin dans ce chapitre. Notre système de contrôle est réalisé autour d'une application LabView [22], permettant de piloter la source haute tension, l'électromètre et le relais haute tension. La source haute tension est une source à courant continu contrôlable de la compagnie TREK dont la tension maximum est de 20 kV.

La résistance R_2 branchée en série avec l'échantillon (figure 2) a deux fonctions. La première est de protéger l'électromètre contre les forts courants capacitifs survenant au début de la charge et de la décharge. En effet, l'électromètre mesurant le courant pourrait alors être endommagé étant donné la fragilité de cet instrument. L'autre fonction de cette résistance est d'obtenir une bonne immunité au bruit lors de la mesure. L'électromètre a une entrée de type amplificateur de courant qui nécessite un contrôle de

l'impédance de l'objet d'essai. Pour obtenir de bons résultats de mesure sur un objet capacitif, il est préférable d'utiliser une résistance en série donnant une constante de temps entre 0,5 s et 2 s [23]. Cette constante de temps peut être réduite par l'utilisation des diodes dans le circuit de mesure. La résistance R_2 en série avec le pont de diodes D sert à empêcher l'électromètre d'être exposé à des courants qui pourraient l'endommager lors de la polarisation [24]. La combinaison des diodes en série avec la résistance R_2 permet d'augmenter davantage l'impédance série lors des mesures à faible courant étant donné leur impédance non linéaire, donnant ainsi un bon rapport signal/bruit.

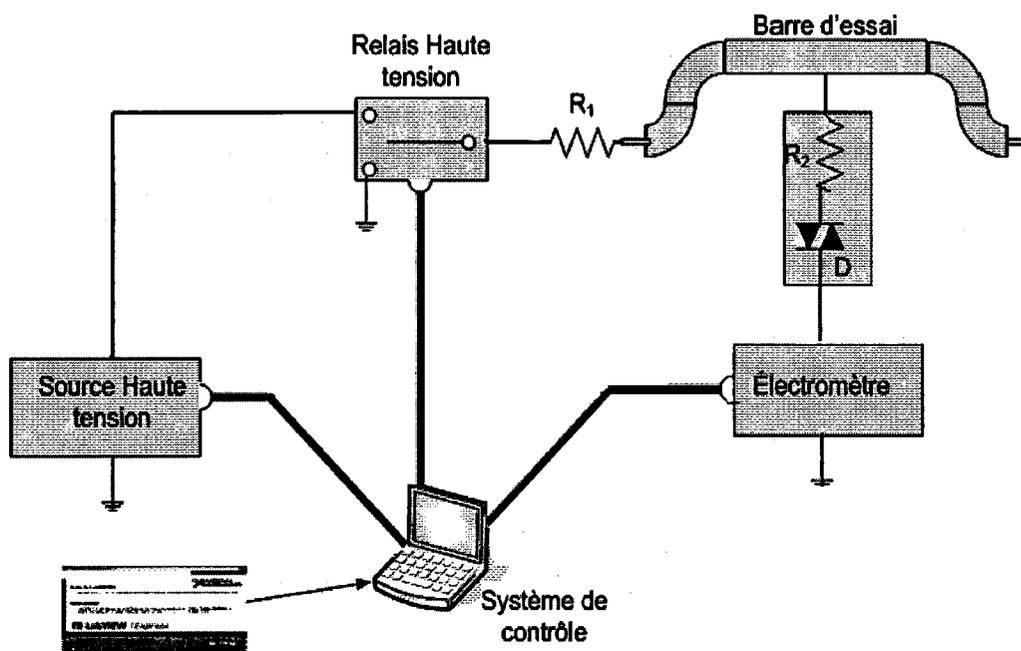


Figure 2 Montage utilisé pour les essais de montée progressive en haute tension continue en laboratoire

La figure 3, montre l'utilisation des électrodes de gardes, donnant une séparation entre la réponse de la partie droite d'une barre et celle des développantes. Afin d'éviter une apparition d'une importante tension de surface suite à la séparation entre la garde et la partie droite de la barre, la largeur de cette séparation doit être la plus mince possible.

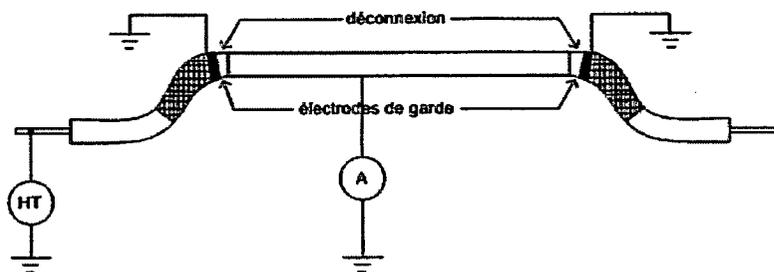


Figure 3 Contribution permettant de mesurer les propriétés du revêtement anti-effluves

2.2 Matériel requis pour le spectromètre

2.2.1 Électromètre

L'électromètre est un multimètre à Courant Continu de haute résolution. En tant que tel, il peut être pratiquement employé pour toutes les mesures de charges. En plus, ses spéciales caractéristiques d'entrée et sa haute sensibilité aux faibles mesures lui donne tout le privilège par rapport aux multimètres numériques classiques dans les mesures de : tension, courant, résistance et des mesures de charges. Les modèles Keithley (6517A, 237, 2010) offrent une grande précision et une haute sensibilité aux mesures. Le modèle 6517A est le plus précis par rapport au deux autres. Il offre des mesures, de courant de 100 aA à 20 mA, de tension de 10 μ V à 200 V, de résistance de 1 Ω à 10^{17} Ω et des mesures de charge de 10 fC à 2 μ C. Il peut être également commandé par l'intermédiaire d'une interface IEEE-48 (GPIB) intégrée par un système de commande tel qu'un ordinateur.

2.2.2 Source de la haute tension en courant continu

La compagnie TREK propose un modèle d'amplificateur de puissance haute tension courant continu TREK 20/20A, conçu pour fournir des tensions de sorties dans une plage de 0 à ± 20 kV en courant continu et un courant de charge de 0 à ± 20 mA à partir d'un signal d'entrée compris entre 0 et ± 10 V courant continu avec un gain de 2 000 et une impédance d'entrée de 50 k Ω . Cet amplificateur sera utilisé pour nous produire une tension de sortie jusqu'à 20 kV ce qui représentera notre source de haute tension.

2.2.3 Relais haute tension

Notre choix s'est porté sur le relais modèle E 60 kV de la compagnie Ross Engineering Corporation. Ce relais peut supporter un courant dans une plage de 1 mA à 600 A. Le but de son utilisation dans notre montage est de permettre de décharger l'échantillon dans une boucle externe. Son utilisation dépend de la source de tension utilisée puisque certaines sources de tension, telle que le TREK 20/20 A, possèdent un système de décharge incorporé dans la source. Donc, dans le cas de la source TREK 20/20 A le relais haute tension n'est pas utilisé, tandis que pour des sources de tension, telles que la source Glassman et la source Spellman, le relais haute est utilisé puisque ces deux sources de tension (Glassman et Spellman) ne sont pas équipées d'un système de décharge.

2.2.4 Système d'acquisition

Notre système d'acquisition de données est un ensemble d'instruments et d'appareils interconnectés permettant de faire automatiquement une série de mesure sur l'objet d'essai (figure 4). L'analyse et le choix des caractéristiques du système sont fortement liés à l'application.

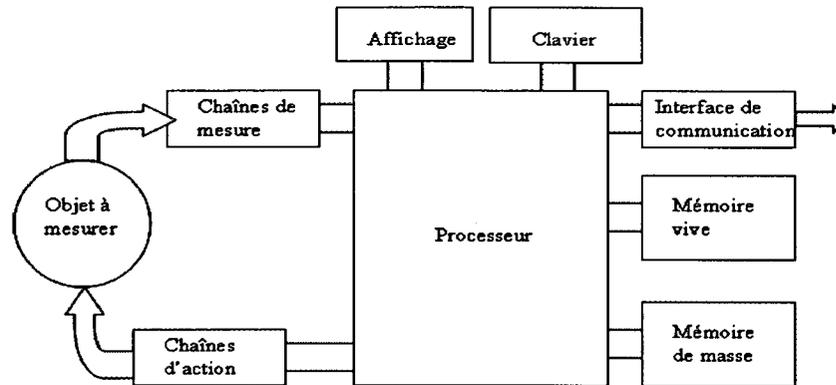


Figure 4 Système typique d'acquisition de données

2.2.5 Carte d'acquisition (DAQ)

Les cartes universelles d'acquisition permettent de réaliser à bon marché des applications d'acquisition et de contrôle de processus. Il ne faut pas oublier que leur résolution et leur précision sont limitées, qu'elles sont sujettes à passablement de bruit et les fréquences d'échantillonnage sont limitées tant par le nombre de canaux à mesurer que par la nécessité de les commander directement par le processeur. Ces cartes sont dotées d'un multiplexeur 16 canaux asymétriques (commutable en 8 canaux différentiels) et suivi d'un amplificateur d'instrumentation à gain programmable (gain 0,5/1/2/5/10/20/50/100), puis du convertisseur AD (Analogique-Digital) 12 bits (gamme $\pm 5V$ ou 0-10V) et d'un tampon (FIFO). Elles sont dotées aussi de deux convertisseurs DA (Digital-Analogique), avec leur tampon et les commutations de gamme de sorties associées (gamme $\pm 10V/0-10V$ avec référence interne ou $\pm EXT/0-EXT$ en référence externe, celle-ci étant limitée à $\pm 11V$). Huit entrées/sorties digitales avec lesquelles on peut travailler individuellement bit à bit, ou de manière globale en tant que groupe. On trouve aussi; des compteurs programmables pour gérer la fréquence de balayage entre canaux et la fréquence d'échantillonnage, plus deux compteurs disponibles pour gérer des signaux externes de synchronisation (impulsions de durée ou de fréquence programmable, comptage d'événements ...), et un connecteur interne (RTSI) pour la

synchronisation entre cartes multiples d'acquisition puis un autre connecteur externe pour relier les signaux.

2.2.6 Bus d'instrumentation (GPIB)

Le processeur communique avec l'ensemble des chaînes de mesure ou d'action au travers d'un bus numérique externe, ce qui permet de répartir l'instrumentation à proximité des points de mesure, et d'exploiter des appareils 'intelligents' effectuant une bonne partie du traitement du signal (capteur compensé, analyseur de spectre, synthétiseur de signaux ...). Notre système d'instrumentation est aussi bâti autour d'un bus GPIB (General Purpose Interface Bus) comme une autre alternative de lire le courant de polarisation en communiquant avec l'électromètre. Ce bus (GPIB) a été développé par Hewlett-Packard en 1965, il permet de relier un maximum de 15 appareils, avec une longueur de câble inférieure à 20 mètres. La vitesse de transfert est de 400 kbyte/s à plus de 1 Mbytes/s selon les options de construction. L'avantage d'une telle normalisation est qu'une quantité croissante d'instruments de différents fabricants sont disponibles et permettent de satisfaire pratiquement toutes conditions d'essai.

2.3 Arrangement Instrumental pour effectuer un essai de montée progressive en tension

Les essais réalisés en laboratoire sont différents de ceux réalisés en centrale électrique. Cette différence apparaît surtout dans l'emplacement des instruments de mesure formant le montage électrique puisque, à la différence des essais en laboratoire, on a accès seulement à une électrode de l'enroulement statorique en centrale. Les deux versions, laboratoire et terrain, sont présentées ci-dessous.

2.3.1 Version laboratoire

Les essais en laboratoire sont plus simples que ceux en centrale puisque l'échantillon, qu'il soit une barre ou une bobine, est complètement enlevé de la machine électrique et est transporté au laboratoire. Ceci nous offre la possibilité d'utiliser les deux électrodes (conducteur (s) en cuivre et la partie droite de l'échantillon). Pour ce genre d'essais, l'électromètre ou le multimètre est placé en aval de l'échantillon à diagnostiquer par l'entremise d'un circuit protecteur [24] (figure 5). La source de haute tension continue, variant suivant une rampe constante (1 kV/min), charge l'échantillon à travers la résistance haute tension, montée en série, jusqu'au niveau maximum de tension d'essai. Lors de nos essais de laboratoire, présentés dans le chapitre 6, ce niveau maximum de tension d'essai est compris entre 20 kV et 35 kV pour des périodes d'essai variant de 0 à 25 min. Ces périodes d'essai représentent le temps de charge ou le temps de lecture du courant de charge via le système d'acquisition. L'essai peut être arrêté avant d'atteindre ce temps de charge si des non linéarités importantes apparaissent dans la courbe courant versus tension ou si la pente de cette courbe devient asymptotique ou erratique. Ceci afin d'éviter un endommagement du système d'isolation de l'échantillon. Le relais haute tension est utilisé pour décharger l'échantillon après l'arrêt ou la fin de l'essai pour un temps de décharge au moins égal à la moitié du temps de charge (chapitre 3). Ceci va, d'un côté, nous éviter d'avoir un offset dans la courbe courant versus tension si un deuxième essai est directement lancé, et d'un autre côté, il va protéger l'expérimentateur contre un choc électrique si celui-ci s'approche de l'échantillon pour une raison ou pour une autre. Ces essais de laboratoire requièrent des conditions d'environnement favorables, c'est-à-dire un environnement moins humide et moins pollué.

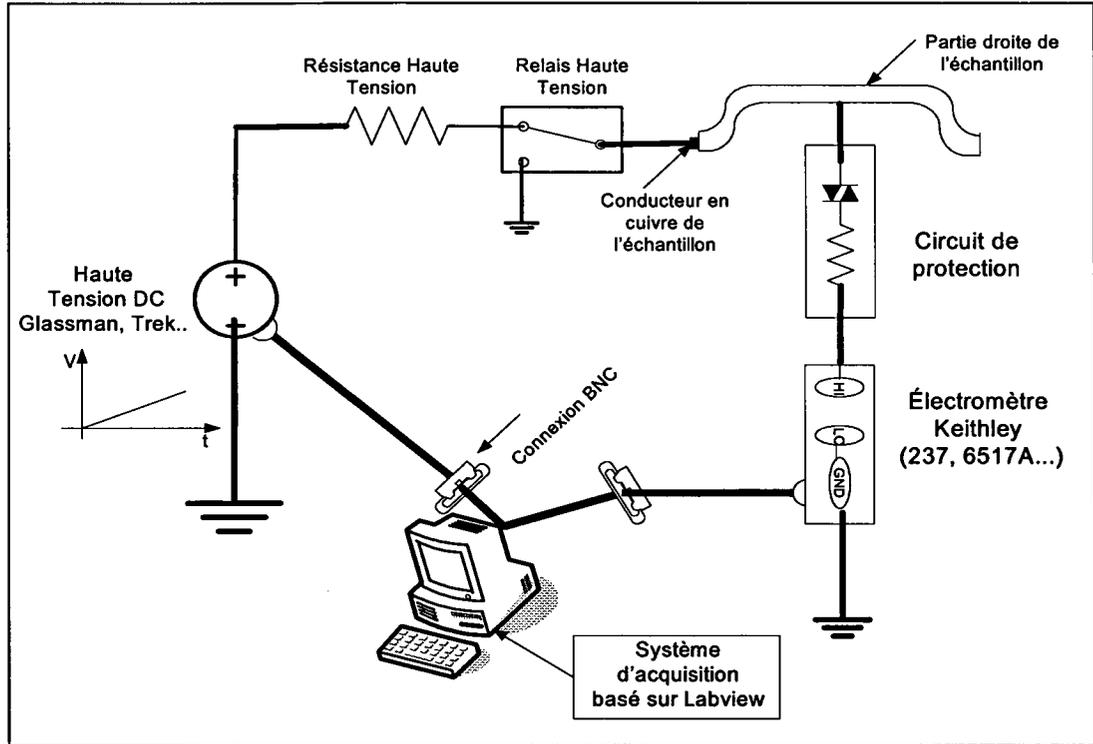


Figure 5 Arrangement instrumental lors des essais réalisés en laboratoire

2.3.2 Version terrain

Sur le terrain (en centrale) la deuxième électrode, en l'occurrence la partie droite, n'est pas accessible (insérée à l'intérieur de l'encoche fixée sur le noyau statorique). Seulement le conducteur en cuivre est accessible. Donc, on a accès à une seule électrode ce qui nous exige une configuration du montage d'essai différente de celle en laboratoire. Selon le théorème de Kirchhoff [25], dans un circuit électrique monté en série il existe un seul courant qui traverse tous les composants formant ce circuit (circuit électrique à une seule boucle), et reste le même dans toute la boucle (figure 5).

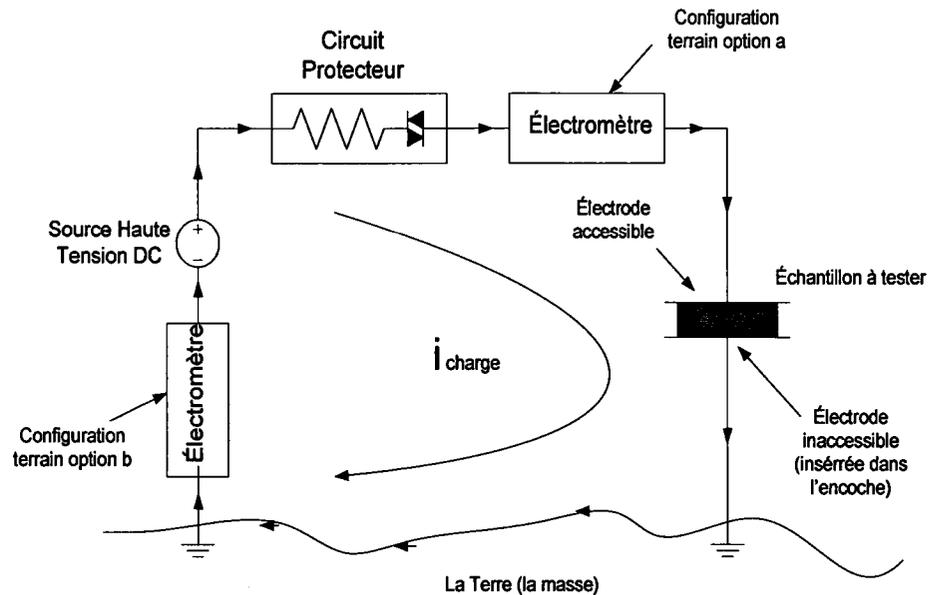


Figure 6 Courant de charge traversant un circuit monté en série

Donc il faut penser à trouver un emplacement pour l'électromètre, différent de celui de laboratoire, afin de pouvoir lire ce courant. On peut proposer deux configurations (figures 7 et 8). Dans le montage de la figure 7, l'électromètre est directement relié à la borne haute tension, ce qui l'expose à des fortes impulsions de courant qui peuvent l'endommager. Pour y remédier il faut mettre un circuit protecteur entre la borne haute tension et l'électromètre [24]. Le montage de la figure 8 représente la meilleure configuration. L'avantage principale de cette dernière est que l'électromètre se trouve protégé contre les pics de courant puisqu'il n'est pas exposé d'une manière directe à la haute tension (il est relié à la borne de basse tension de la source haute tension). On utilise généralement des sources de haute tension à masse flottante (Floating Ground), tel que la source Glassman, source Spellman...etc. La machine électrique étant en arrêt, l'essai est réalisé de la même façon que celui en laboratoire à l'exception des points suivants :

- L'électromètre est monté en amont de l'échantillon à diagnostiquer;

- Il peut ne pas s'agir d'une seule bobine/barre mais plutôt d'un ensemble de bobines/barres, montées en série formant une partie ou l'ensemble de l'enroulement statorique de la machine électrique, supposées avoir un problème au niveau de l'isolation de masse;
- La grandeur du courant est plus importante que celle de l'essai de laboratoire, d'ordre d'une centaine de microampère voir plus;
- Les conditions d'environnement ne sont pas les mêmes. Il peut s'agir d'un environnement moins propre que celui en laboratoire. Donc, avant de commencer l'essai, il est conseillé de procéder à une mesure de la résistance et de l'indice d polarisation de l'échantillon ou des échantillons en question [1].

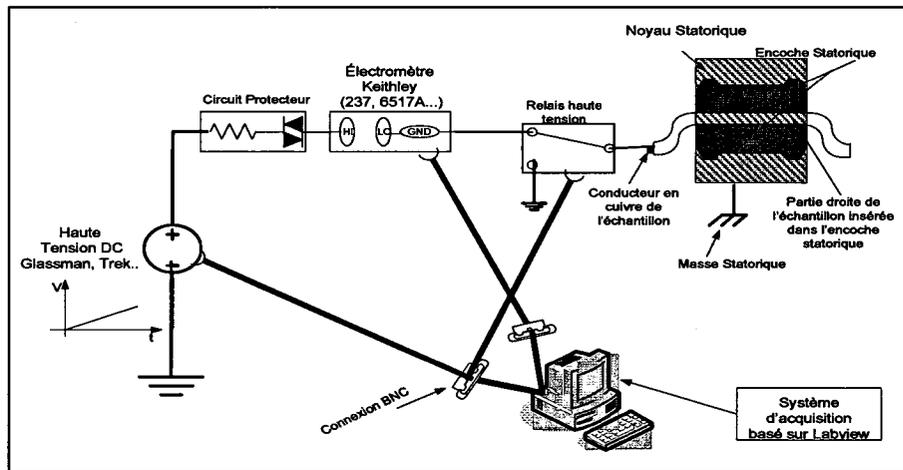


Figure 7 Première configuration de terrain réalisée en centrale électrique pour le diagnostic de l'état d'isolation d'une machine électrique. L'électromètre est placé entre le circuit protecteur et le relais

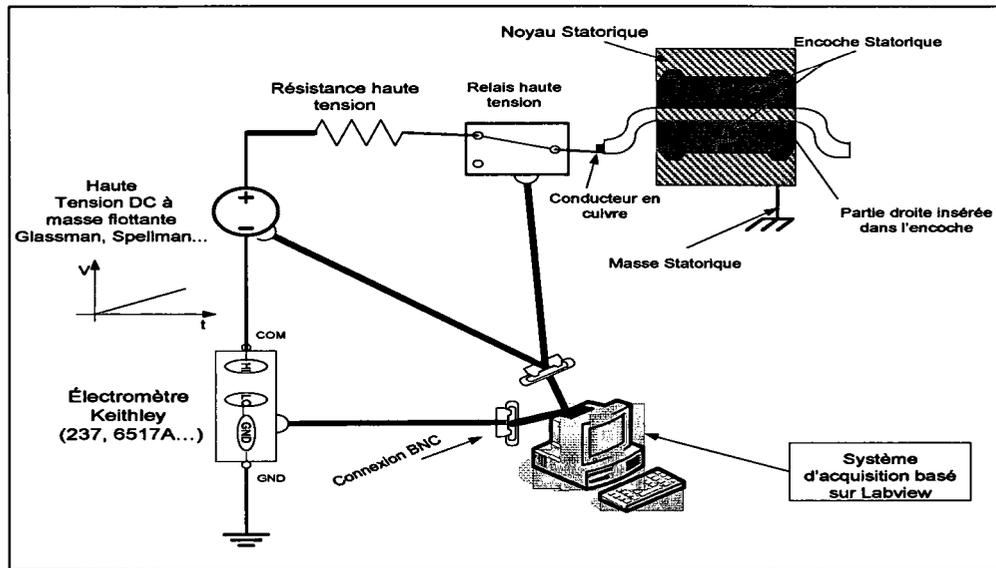


Figure 8 Deuxième configuration de terrain réalisée en centrale électrique pour le diagnostic de l'état d'isolation d'une machine électrique. L'électromètre est placé entre la source haute tension et la terre.

2.4 Logiciel de contrôle

Le logiciel de contrôle est une application Labview®. Il s'agit d'un langage de haut niveau spécialisé dans l'acquisition, le traitement et la représentation des données. Il utilise les pilotes des fabricants et libère l'utilisateur de toute une série de tâches répétitives par des instructions orientées sur l'acquisition (par exemple acquisition d'un bloc de données, transformation de Fourier, optimisation de paramètres, analyse statique, représentation graphique...). Notre système d'acquisition, piloté à partir d'un ordinateur, est conçu autour d'un environnement graphique très puissant. Une partie ou la plate forme de ce logiciel de contrôle était déjà réalisée par le technicien Michel Drouin. Donc, à partir de ce travail déjà fait plusieurs opérations ont été modifiées et ajoutées telles que l'acquisition par la carte GBIP, des choix de sources de tension, des choix des instruments de mesures de courant... etc. La programmation se fait sous forme graphique à l'écran, chaque tâche d'acquisition étant représentée par un icône, la succession des opérations dépendant des liaisons entre les icônes (plus quelques

structures de base : boucles, choix conditionnels ...). L'interface utilisateur, dans l'application se fait sous forme d'un panneau fictif d'appareil, représenté à l'écran et actionné par la souris. Ici aussi on peut exécuter en interactif tout ou une partie du programme, ce qui permet un développement aisé. De plus, il n'est pas nécessaire de changer d'environnement (éditeur, compilateur) pour l'écriture proprement dite du programme. Les applications Labview ont l'avantage d'être orientées vers l'acquisition de données et d'éviter la programmation proprement dite pour ne se concentrer que sur les conditions d'acquisition, mais elles exigent un compromis entre les possibilités (fortes pour les langages, faibles pour les menus) et la nécessité d'un apprentissage plus ou moins long. Les principales pages de dialogue de notre logiciel se résument comme suite :

2.4.1 Page de démarrage

Au début de chaque exécution, une page de démarrage apparaît indiquant à l'utilisateur le début de l'essai (figure 9). Aucune saisie de données n'est faite à ce niveau là. L'utilisateur doit tout simplement appuyer sur le bouton Démarrer un essai. Pour évaluer un essai déjà fait et reprendre la simulation complète en temps non réel, on clique sur le bouton Visualiser un essai déjà effectué.

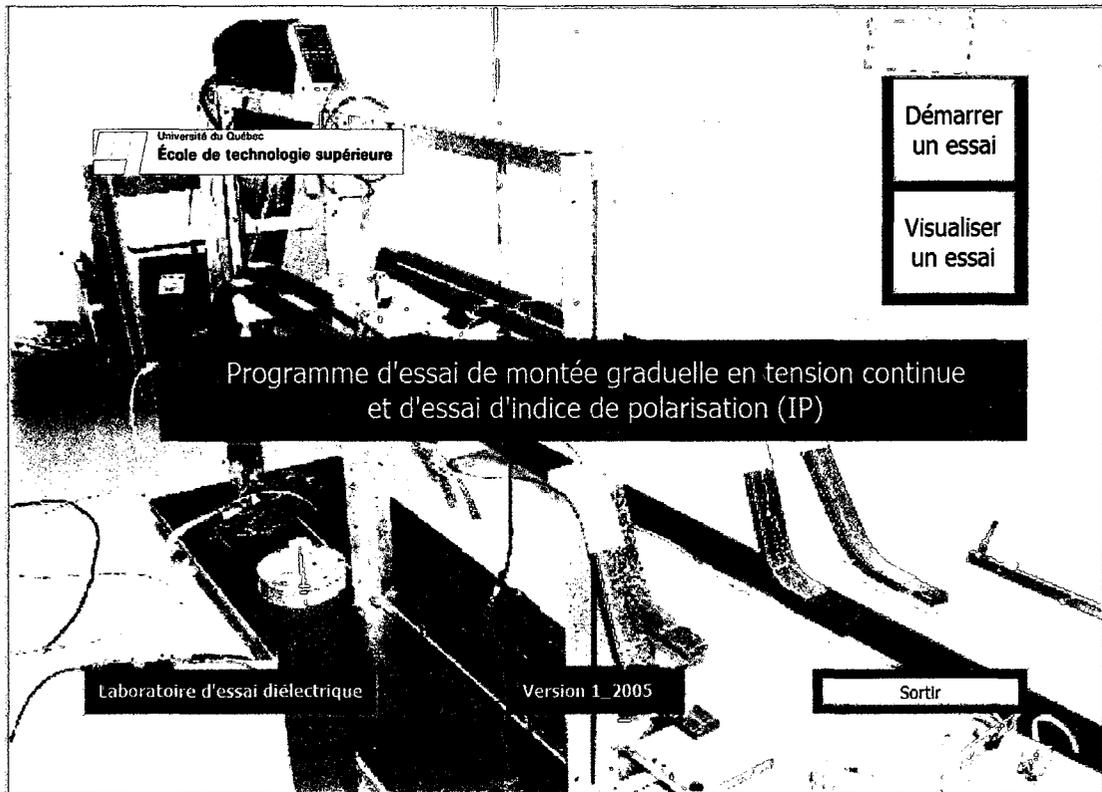


Figure 9 Page de démarrage du logiciel

2.4.2 Page des caractéristiques

Cette étape nous permet simplement la sauvegarde de certain nombre d'informations additionnelles propre à l'application sans que ces informations affectent l'essai lui même. Répartie en trois sections (Identification, Caractéristiques de la machine et Paramètres d'essai), toutes les informations jugées pertinentes seront saisies directement dans les cases blanches ou noirs correspondantes (figure 10). Cela donnera plus d'entité à l'application en question et aidera tout les utilisateurs à bien identifier et bien étudier les conditions du déroulement de l'essai. La sauvegarde de ces caractéristiques se réalise automatiquement ou manuellement à travers un bouton de sauvegarde.



Figure 10 Page des caractéristiques

2.4.3 Page paramètres pour l'essai rampe

Répartie à son tour en quatre sections, cette boîte de dialogue présente les données les plus importantes que l'utilisateur doit saisir (figure 11). La section paramètre de mesure comporte la durée de la rampe ou de l'essai, le niveau maximal de haute tension, le gain de l'amplificateur et le nombre de lecture par seconde désirés. Ces données vont affecter directement l'essai. Une saisie soignée est donc recommandée. La deuxième section, en l'occurrence la lecture du courant, offre deux choix d'acquisition soit par la carte GPIB ou par la carte DAQ. Chaque choix offre la possibilité d'utiliser différents instruments de mesure pour la lecture du courant. Ce choix est en fonction du type

d'instrument à notre disposition et de la précision recherchée lors de la lecture du courant. L'option GPIB offre plusieurs choix d'instruments de mesure de courant de marque Keithley [24] (237, 6517A, 2010 et 2001). Ces instruments sont les plus utilisés dans notre environnement de travail, mais il est toujours possible d'ajouter d'autres instruments de mesure de courant possédant l'option de lecture via le bus GPIB si désiré. La source de haute tension continue est commandée seulement via la carte DAQ. Cette dernière présente un choix de sources de haute tension (TREK 20/20A, Glassman et spellman). Ces instruments peuvent à la fois appliquer la haute tension d'essai et lire le courant de charge. Mais ils sont moins sensibles pour des courants de l'ordre de $1\mu\text{A}$ et moins. Pour ces grandeurs de courant, l'option GPIB est nettement meilleure puisque la mesure de courant se fait via des instruments de haute sensibilité [26]. Dans le cas d'une mesure de courants d'ordre supérieur à $1\mu\text{A}$, la lecture du courant via la carte DAQ peut se faire et a l'avantage de nous épargner d'utiliser un instrument de mesure de courant dans le montage.

La troisième section est réservée au choix des canaux d'entrée et de sortie de la carte d'acquisition. Ces canaux servent à véhiculer ou échanger les informations entre la partie hardware (instruments de mesure, source haute tension) et la partie software (le logiciel de commande). Il y a huit possibilités pour les canaux d'entrée et deux pour celles de sortie. La section paramètres de l'arrêt de l'essai concerne les conditions maximales des niveaux de lectures protégeant ainsi l'ensemble des composants impliquées dans l'essai. Une fois que ces données sont saisies, une confirmation doit se faire en cliquant sur le bouton OK. Une boîte de dialogue s'ouvre vous demandant de saisir le nom de l'essai et de choisir son emplacement. L'utilisateur n'a qu'appuyer sur le bouton OK pour lancer l'essai.

Paramètres pour l'essai rampe

Paramètres de la mesure

Durée de la rampe (min.)

Tension maximale (kV)

Echantillonnage (data/s)

Gain de l'amplificateur

Atténuation

Lecture du courant

Carte GPIB

Carte DAQ

Choix d'un instrument de mesure

Paramètres de l'arrêt de l'essai

Courant maximum (uA)

Choix des Canaux

Canal de Lecture du Courant AI

Canal de Lecture de la tension AI

Canal de Lecture de la tension de sortie AOwt

Figure 11 Page paramètres pour l'essai rampe

2.4.4 Page essai de montée graduelle en tension continue

Cette page (figure 12) permet de suivre l'évolution de l'essai en temps réel, affichant le comportement des trois grandeurs du courant (capacitif, absorption et total) en fonction de la tension appliquée sur le système d'isolation en question. Le courant capacitif (se reporter au prochain chapitre pour plus de détails) est directement calculé et tracé puisque toutes ses composantes sont connues. L'équation à partir de laquelle ce courant est calculé est la suivante :

$$I_{\text{capacitif}} = C \frac{dU_c}{dt}$$

où C est la capacité de l'échantillon telle que lue par un multimètre (en μF), $\frac{dU_c}{dt}$ est la variation de la tension d'essai U_c (en volts) en fonction du temps t (en seconde). Ce rapport représente la pente de l'essai (V/s) qui est constante durant toute la période de l'essai. Ce courant capacitif est représenté par une ligne horizontale de couleur verte. Le courant total ou courant de charge mesuré est tracé en temps réel. Le système d'acquisition enregistre 1 667 valeurs par seconde puis il calcule la moyenne de ces valeurs et affiche la valeur de cette moyenne sur le graphe courant en fonction de la tension. Donc, à chaque seconde une seule valeur est affichée pendant toute la période de l'essai et c'est ainsi que la courbe du courant total (couleur rouge) est faite. À partir de cette courbe une évaluation approximative du courant est tracée. Cette droite représente la somme des deux courants capacitif et d'absorption. Deux valeurs du courant total sont utilisées pour tracer cette droite. La première est la valeur du courant total lorsque la tension appliquée atteint 10% du niveau maximal de tension d'essai. La seconde est déterminée à 30% du niveau maximal de la tension d'essai. Dans cette plage de tension (de 10% à 30% du niveau maximal de tension d'essai) le comportement diélectrique est considéré généralement linéaire. Une fois que ces deux points sont déterminés, la droite du courant capacitif plus le courant d'absorption est directement tracée avant la fin de l'essai. Elle est superposée à la courbe du courant total et représentée par une couleur bleue. Toute la partie du courant total excédant cette droite est présumée représenter le courant de fuite. La progression de la rampe en tension (tension commandée en kV) et la lecture du courant (courant total en μA) en fonction du temps (en seconde) sont aussi indiquées par des cadrans à droite du graphe. Un bouton d'urgence offre la possibilité d'arrêter l'essai à tout moment si une déviation raide très prononcée de la courbe survient. On peut donc détecter un défaut d'isolation sans endommager le système d'isolation de l'objet d'essai. Pour se faire, dès qu'un problème survient l'utilisateur doit appuyer rapidement sur le bouton arrêt d'urgence.

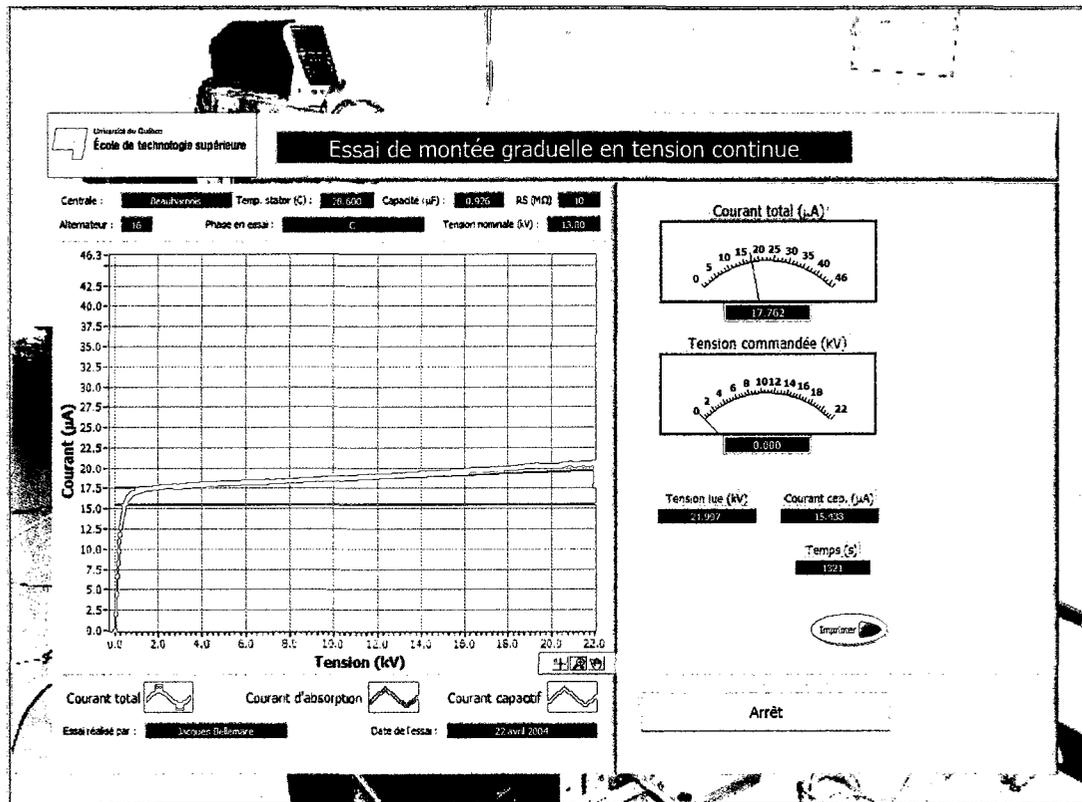


Figure 12 Page essai de montée graduelle en tension continue

L'importance du logiciel est primordiale dans un système d'acquisition, cependant il reste inutile d'acheter un système sophistiqué s'il faut consacré des années à développer le programme d'application. Dans ce contexte, notre option est de faire un développement complet du logiciel au moyen d'un langage structuré de haut niveau et d'un driver permettant d'accéder au matériel tout en respectant le cahier des charges.

CHAPITRE 3

THÉORIE DES DIÉLECTRIQUES

Pour comprendre le principe de fonctionnement de la spectroscopie diélectrique, il est important de recourir à la théorie des diélectriques et à ses concepts. Dans les prochains paragraphes un rappel sommaire sera présenté. Pour une description plus détaillée et plus profonde, il existe une littérature abondante sur le sujet [27-29].

3.1 Généralités

Quand un matériau diélectrique est polarisé l'intensité du champ électrique à l'intérieur de ce matériau est différente de celle en espace libre. Le déplacement électrique est défini comme suit [28]:

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (3.1)$$

où $E(t)$, ε_0 et $P(t)$ sont respectivement le champ électrique, la permittivité du vide et la polarisation. La densité de courant $J(t)$ traversant un matériau s'exprime par la relation de Maxwell :

$$J(t) = \sigma E(t) + \frac{\partial D(t)}{\partial t} \quad (3.2)$$

où σ est la conductivité directe. Faisons une combinaison des deux équations (3.1) et (3.2). On aura :

$$J(t) = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \frac{\partial E(t)}{\partial t} + \frac{\partial P(t)}{\partial t} \quad (3.3)$$

La relation entre la polarisation et le champ électrique est réalisée par le biais d'une fonction $f(t)$ appelée la fonction de réponse diélectrique d'un matériau [28]. C'est cette

fonction qui caractérise les propriétés diélectriques d'un matériau. Considérant qu'un matériau réagit toujours avec un certain retard à l'application d'un champ électrique, on peut alors écrire [30] :

$$P(t) = \varepsilon_0 \int_0^{\infty} f(\tau) E(t-\tau) d\tau \quad (3.4)$$

où $f(t)$ est la fonction de réponse diélectrique du matériau qui représente l'effet de mémoire dans un isolant électrique. Cette fonction inclut tous les processus de polarisation : processus de polarisation rapide et lente. L'observation des processus de polarisation rapide dans l'échelle de temps qui nous intéresse n'est pas perceptible que ceux de la polarisation lente. De ce fait, il convient bien de séparer les deux processus de polarisation qui se produisent dans la gamme de fréquences expérimentale. Ceci nous mène à écrire ce qui suit [31] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_0^{\varepsilon} f(t) dt = \chi_{\infty} = \varepsilon_{\infty} - 1 \\ f(t) = f_s(t) \quad t) \varepsilon \end{array} \right. \quad (3.5)$$

où χ_{∞} est la susceptibilité haute fréquence, ε_{∞} est la composante de la permittivité à haute fréquence et $f_s(t)$ est la fonction de réponse diélectrique du matériau lors des processus de polarisation lents. La densité du courant à travers ce matériau diélectrique, en combinant les équations (3.4) et (3.5), est donnée par l'équation suivante :

$$J(t) = \sigma E(t) + \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \left\{ \varepsilon_{\infty} E(t) + \int_0^t f(\tau) E(t-\tau) d\tau \right\} \quad (3.6)$$

3.1.1 Mesures dans le domaine du temps

La polarisation électrique $P(t)$ dans un matériau peut être divisée en deux termes, un terme qui représente le processus de la polarisation rapide tandis que l'autre représente celui de la polarisation lente.

$$P(t) = \varepsilon_0 (\varepsilon_\infty - 1) E(t) + \Delta P(t) \quad (3.7)$$

$$P(t) = \underbrace{\varepsilon_0 (\varepsilon_\infty - 1) E(t)}_{\text{Polarisation rapide}} + \varepsilon_0 \underbrace{\int_0^t f(\tau) E(t-\tau) d\tau}_{\text{Polarisation lente}} \quad (3.8)$$

Le terme de la polarisation rapide suit le champ électrique appliqué, alors que celui de la polarisation lente est construit à partir d'une intégrale de convolution entre le champ électrique appliqué et la fonction $f(t)$, présentée ci-dessus. Le processus de la polarisation lente ne peut pas être mesuré directement, mais la mesure des courants de charge et de décharge dans le domaine du temps donne le comportement du processus de la polarisation lente dans un isolant électrique. Assumons un matériau homogène, le champ électrique $E(t)$ peut être considéré comme issu d'une tension externe $u(t)$. Ainsi, le courant $i(t)$ peut être exprimé à partir de l'équation (3.6) comme suit:

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} u(t) + \varepsilon_\infty \frac{du(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) u(\tau) d\tau \right] \quad (3.9)$$

avec :

$$u(t) = \begin{cases} 0 & \text{à } t < 0 \\ U_c & \text{à } 0 \leq t \leq t_c \\ 0 & \text{à } t > t_c \end{cases}$$

Maintenant assumons que l'échantillon à tester est totalement déchargé et qu'une tension U_c est appliquée à $t=0$, durant un certain temps de charge t_{ch} , suivi d'un court-circuit de l'échantillon tout en faisant l'acquisition du courant de décharge durant un temps t_{dech} .

Physiquement, cette expérience est tout à fait équivalente à appliquer un échelon de tension $+U_c$ durant toute la durée de la charge et de la décharge et à superposer à cet échelon de tension un échelon inverse $-U_c$ à partir de t_{dech} (théorème de superposition), tel qu'il est illustré sur la figure 13 ci-dessous.

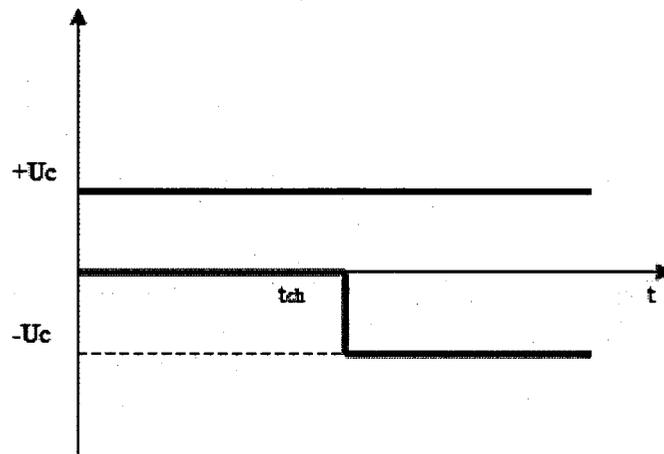


Figure 13 Technique de superposition

Le courant de charge $i_{ch}(t)$ et le courant de décharge $i_{dech}(t)$, s'expriment comme suit :

$$i_{ch}(t) = \frac{C_0 \sigma}{\epsilon_0} U_c + U_c C_0 [\epsilon_\infty \delta(t) + f(t)] \quad 0 \leq t \leq t_c \quad (3.10)$$

$$i_{dech} = -U_c C_0 [\epsilon_\infty \delta(t) - f(t+t_c) + f(t)] \quad t > t_c \quad (3.11)$$

Le courant de décharge $i_{dech}(t)$ représente la relaxation du processus de polarisation. Il est, pour des grandes valeurs de t_{ch} , proportionnel à la fonction de réponse diélectrique [14] :

$$f(t) \approx -\frac{i_{dech}}{C_0 U_c} \quad (3.12)$$

Donc, il est possible d'estimer à partir des deux équations (3.10) et (3.12) la conductivité directe σ :

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{C_0 U_c} [i_{ch}(t) + i_{dech}(t)] \quad (3.13)$$

Chaque isolant électrique a sa propre et unique fonction de réponse diélectrique. Des fonctions de réponse diélectrique représentant les processus de polarisation lente trouvés dans des isolants électriques sont présentées à la figure 14 [30].

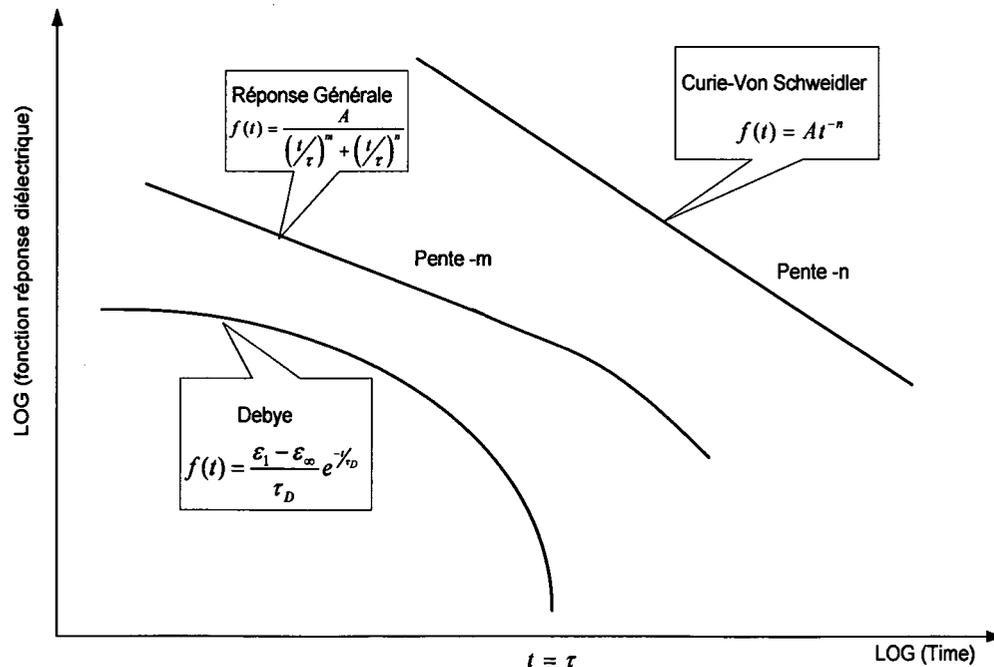


Figure 14 Différents types de fonction de réponse diélectrique dans le domaine du temps

Pendant les essais à haute tension, les trois composantes du courant d'isolation statorique (courant total) sont : le courant capacitif, le courant d'absorption diélectrique et le courant de conduction (fuite).

$$I_{charge} = I_{capacitif} + I_{absorption} + I_{conduction} \quad (3.14)$$

3.1.1.1 Le courant capacitif (I_{cap})

Le courant capacitif est cette composante attribuable à la capacité entre l'enroulement et la masse et est égal aux variations de la tension appliquée U_c en fonction des variations du temps t multipliées par la capacité géométrique C . On a donc :

$$I_{capacitif} = C \frac{dU_c}{dt} \quad (3.15)$$

La capacité C est la capacité tel que mesurée par le multimètre. Elle dépend de la géométrie et de la permittivité des matériaux isolants. Lorsqu'une résistance série est utilisée, le courant capacitif prend la forme suivante :

$$I_{capacitif} = \frac{U_c}{R} e^{-t/RC} \quad (3.16)$$

où R est la résistance série. En pratique on joue sur la valeur de la résistance en série pour ajuster la constante du temps. Dans le cas où RC est très élevée, le courant capacitif apparaît au début de la courbe de charge et de décharge.

Après l'application de la tension U_c , le courant capacitif décroît exponentiellement à zéro au bout de quelques secondes (figure 15). La charge de la capacité représente une énergie stockée réversible et elle n'est habituellement pas considérée pour l'évaluation de l'état de l'isolation [28]. Elle reflète uniquement l'arrangement instrumental utilisé pour la mesure.

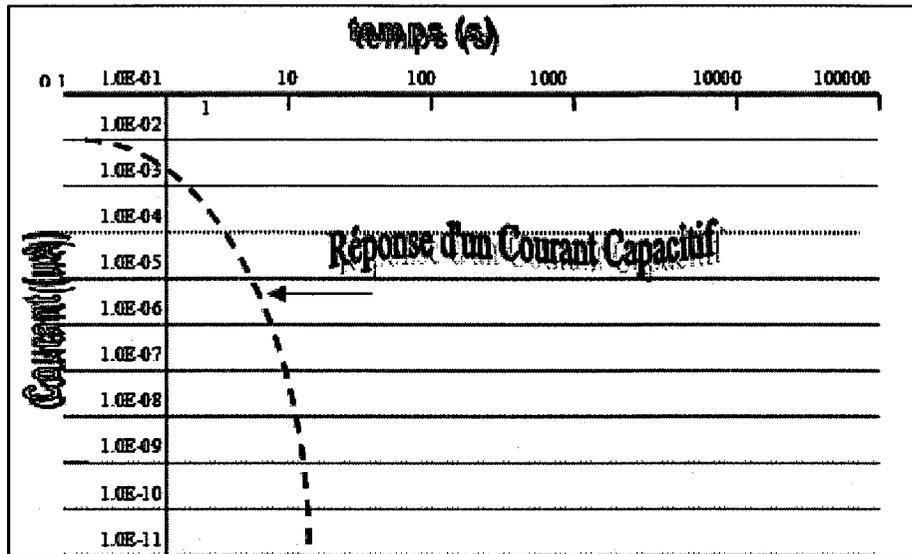


Figure 15 Réponse d'un courant capacitif mesuré sur les trois phases statoriques d'un alternateur de 160 MVA [32]

3.1.1.2 Le courant d'absorption (I_{abs})

Appelé aussi courant de relaxation diélectrique, ce courant est le plus important parmi les trois contributions du courant total, en vertu du fait qu'il est lié directement à l'état du matériau diélectrique. Il résulte essentiellement des déplacements de charges électriques (électrons ou ions) à l'intérieur du diélectrique et du changement d'orientation de dipôles électriques dans le matériau.

La réponse du courant d'absorption (figure 14 et figure 16), lors d'un essai de haute tension, est semblable à la réponse du courant capacitif sauf que le courant d'absorption prend typiquement des minutes voir des heures pour décroître à une valeur négligeable. Une expression empirique usuelle pour le courant d'absorption après l'application d'un échelon de tension U_c est donnée par (loi de Curie-Von Schweidler) :

$$I_{absorption} = KU_c t^{-n} \quad (3.17)$$

avec :

K : constante déterminée par la nature de l'isolant, et la température de l'échantillon (s^{n-1}).

U_c : la tension appliquée en (volt)

n : exposant d'absorption de l'échantillon (sa plage est typiquement de 0,5 à 0,9)

t : temps de l'application de la tension (s)

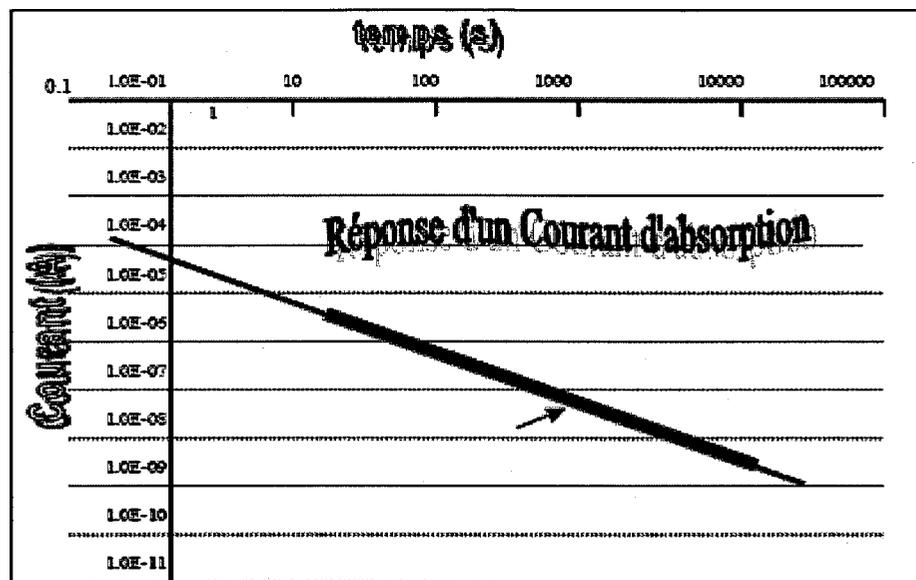


Figure 16 Réponse d'un courant d'absorption mesuré sur les trois phases statoriques d'un alternateur de 160 MVA [32]

3.1.1.3 Le courant de conduction directe (I_{dc})

La composante du courant de conduction (ou de fuite) de l'isolation statorique est un courant continu et irréversible résultant de l'application de la tension à travers une isolation imparfaite (figure 17). Il mesure la contribution des charges électriques provenant d'une électrode, traversant l'isolant le long des surfaces ou à travers le volume du diélectrique et atteignant la deuxième électrode. Sa réponse variera en fonction de la température, de l'humidité, de la présence de contaminants. Pour une

isolation de haute qualité ce courant est, en général, petit et linéaire (proportionnel à la tension appliquée). À mesure que l'isolation commence à vieillir et s'affaiblir, le courant de fuite augmentera, et à un certain niveau de tension, il deviendra non linéaire ce qui se manifestera par une augmentation positive de la pente de la courbe du courant en fonction de la tension. Une augmentation significative du courant de fuite en fonction de la tension d'essai peut indiquer un problème imminent au niveau du système d'isolation. Le courant de fuite peut être mesuré par la soustraction des équations (3.10) et (3.11).

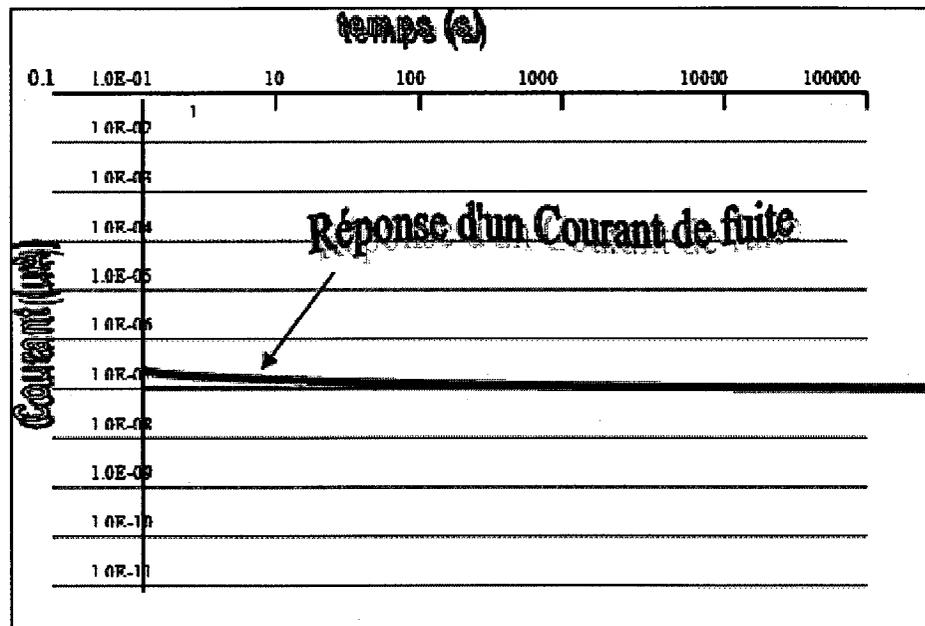


Figure 17 Réponse d'un courant de fuite obtenue par la soustraction des courants de charge et de décharge mesurés sur les trois phases statoriques d'un alternateur de 160 MVA [32]

3.1.2 Mesures dans le domaine de fréquences

Les mesures dans le domaine de fréquences représentent une autre méthodologie pour obtenir la réponse diélectrique d'un isolant. Dans ce domaine, la susceptibilité est

définie à partir de la transformée de Fourier de la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ selon l'expression suivante :

$$\begin{aligned}\chi^*(\omega) &= \chi'(\omega) - j\chi''(\omega) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \\ \Rightarrow \chi^*(\omega) &= \int_0^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt - i \int_0^{\infty} f(t) \sin(\omega t) dt\end{aligned}\quad (3.18)$$

La densité du courant total $J(\omega)$ dans un isolant sous un champ électrique périodique $E(\omega) = E_c e^{-j\omega t}$ peut être exprimée par la relation suivante :

$$\begin{aligned}\hat{J}(\omega) &= \sigma \hat{E}(\omega) + \varepsilon_0 i \omega \hat{E}(\omega) + i \omega \left(\varepsilon_0 \chi_e \hat{E}(\omega) + \varepsilon_0 (\chi'(\omega) - i\chi''(\omega)) \hat{E}(\omega) \right) \\ \hat{J}(\omega) &= i \omega \varepsilon_0 \left(\underbrace{1 + \chi_\infty + \chi'(\omega)}_{\text{partie capacitive}} - i \underbrace{\left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right)}_{\text{partie résistive}} \right) \hat{E}(\omega) \quad (A/m^2) \quad (3.19)\end{aligned}$$

De l'équation 3.19 on remarque que le courant total est la somme de deux termes distincts. Le premier terme est purement capacitif associé à la capacité de l'échantillon. Tandis que le deuxième terme est purement résistif dû, d'un côté, aux pertes ohmiques causées par le mouvement des charges libres dans le matériau, et de l'autre côté, aux pertes de polarisation. La relation entre la permittivité complexe, la susceptibilité électrique et les pertes diélectriques est exprimée comme suit :

$$\varepsilon'(\omega) = 1 + \chi_e + \chi'(\omega)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \chi''(\omega)$$

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega)$$

En utilisant l'équation (3.19), le courant traversant un échantillon excité par une tension sinusoïdale $\hat{U}_c(\omega)$ est défini par :

$$\hat{I}(\omega) = [\varepsilon_r''(\omega) - i\varepsilon_r'(\omega)] \omega C_0 \hat{U}_c(\omega)$$

L'isolant électrique entre deux électrodes peut être représenté par une capacité complexe en fonction de la fréquence, de telle sorte que :

$$C^*(\omega) = \frac{\hat{I}(\omega)}{i\omega \hat{U}_c(\omega)} \quad (3.20)$$

$$C^*(\omega) = C'(\omega) - iC''(\omega) \quad (3.21)$$

La capacité imaginaire représente le terme de perte diélectrique et ω la fréquence angulaire. En pratique, la mesure du courant est limitée entre deux points temporels t_1 et t_2 d'où la plage fréquentielle suivante :

$$\frac{1}{t_1} < \omega < \frac{1}{t_2} \quad (3.22)$$

Les valeurs des capacités réelles et imaginaires peuvent être obtenues en appliquant une transformée de Fourier des mesures du courant en fonction du temps, à partir des équations suivantes :

$$C'(\omega) = \frac{1}{U_c} \int_0^{\infty} i(t) \cos(\omega t) dt + C_{\infty} \quad (3.23)$$

$$C''(\omega) = \frac{1}{U_c} \int_0^{\infty} i(t) \sin(\omega t) dt \quad (3.24)$$

où C_{∞} est la capacité à haute fréquence. La résolution de ces deux dernières équations n'est pas une tâche facile même numériquement, d'où il est plus judicieux de faire appel à des techniques numériques bien adaptées [33-35]. L'approximation d'Hamon [16], est un outil très puissant simplifiant les deux intégrales ci-dessus. Cette approximation nous permet de tirer l'expression de $C''(\omega)$:

$$C''(\omega) \cong \frac{i(0.1/f)}{2\pi f U_c} \quad (3.25)$$

où f est la fréquence en Hz. L'utilisation du courant de charge permet de superposer les pertes dues au courant de conduction directe à celles dues au courant de déplacement. La tangente de l'angle des pertes δ , qui est caractérisée par son indépendance de la géométrie de l'échantillon, est défini par :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (3.26)$$

Si on considère que la partie réelle de la capacité reste plus ou moins constante en fonction de la fréquence, la tangente de l'angle des pertes prend la forme suivante :

$$\operatorname{tg} \delta \approx \frac{i(0.1/f)}{2\pi f U_c C} \quad (3.27)$$

avec C est la capacité de l'échantillon telle que lue par un multimètre.

3.1.3 Normalisation par la capacité

Il est important de prendre en considération la capacité de chaque échantillon pour faire une comparaison plus exacte entre deux échantillons de taille différente. Considérons le cas d'un condensateur plan aux bornes duquel une tension u est appliquée. On définit alors :

$$J(t) = \frac{I(t)}{A}$$

$$E(t) = \frac{u(t)}{h}$$

ou $I(t)$ est le courant en Ampère, h la distance inter-électrodes et A la surface. Une fois que ces deux équations sont remplacées dans (3.6), on obtient :

$$I(t) = \frac{A\varepsilon_0}{h} \left(\frac{\sigma}{\varepsilon_0} u(t) + \frac{d}{dt} \left\{ \varepsilon_\infty u(t) + \int_0^t f(\tau) u(t-\tau) d\tau \right\} \right) \quad (3.28)$$

La capacité géométrique de l'échantillon est représentée par le terme $\frac{A\varepsilon_0}{h}$ de l'équation ci-dessus (3.28). On remarque clairement que le courant est directement proportionnel à ce terme indépendamment de la nature du spécimen. Pour amener la comparaison de deux échantillons sur une même base d'une façon plus simple, il faut diviser les courants de charge et de décharge par une valeur standard de capacité directement lue par un multimètre.

3.1.4 Influence de la température

La température est un deuxième facteur, qui est au même niveau d'importance de la capacité, si l'analyse est basée sur le principe de comparaison entre des résultats obtenus à des températures différentes. De façon générale, la résistance électrique des diélectriques solides diminue avec la température. Il existe des facteurs de correction publiés dans la norme IEEE Std 43-2000 [9] pouvant s'appliquer à différents types d'isolation. La dépendance entre la température et la résistance électrique des diélectriques solides est habituellement modélisée par une équation empirique pour laquelle R varie exponentiellement avec la température. L'équation de correction de la norme IEEE 43-2000 pour une température supérieure à 40°C est de la forme :

$$R_c = R_T e^{0.069[T-40]} \quad (3.29)$$

R_c est la résistance corrigée à 40°C et R_T est la résistance telle que mesurée à une température T en degrés Celsius. Il faut toutefois noter que le facteur de correction n'est pas nécessairement le même pour le courant de conduction ou le courant d'absorption, d'où la difficulté dans la comparaison des résultats obtenus à des températures différentes.

CHAPITRE 4

ENROULEMENTS STATORIQUES ET MATÉRIAUX COMPOSITES

4.1 Les enroulements statoriques des moteurs et des générateurs

Les enroulements statoriques des grandes machines synchrones sont composés de trois différentes phases montées en étoile. Le neutre est mis à la masse afin de minimiser l'effort électrique auquel l'isolation de masse statorique est soumise. Chaque phase peut comprendre un circuit simple d'enroulements connectés en série ou deux ou plusieurs circuits parallèles, tel qu'illustré à la figure 18.

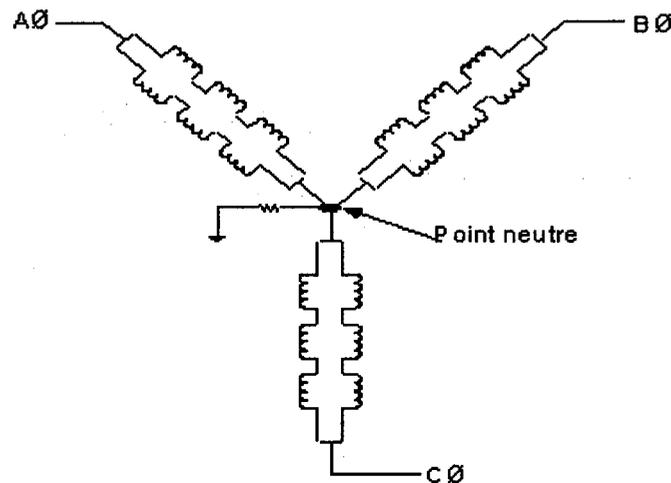


Figure 18 Enroulements statoriques composés de trois phases montées en étoile à deux circuits parallèles par phase

Les enroulements statoriques peuvent être fabriqués soit sous forme de bobines complètes ou de barres (appelées aussi barres à conducteurs transposés de type Roebel) figure 19 (a et b). Le bobinage de ces enroulements est en fonction de la tension nominale de la machine et du nombre d'enroulements connectés en série par phase.

Le nombre d'enroulements par phase est déterminé par le nombre de pôles dans le rotor et le nombre d'encoches dans le noyau statorique.

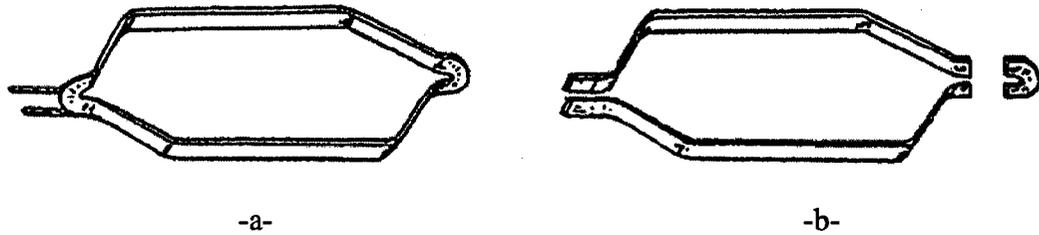


Figure 19 -a- Enroulement composé d'une bobine complète
-b- Enroulement composé de deux barres

Lors de la fabrication des enroulements statoriques, les conducteurs en cuivre sont assemblés puis ils sont enrubannés manuellement sur toute la longueur de la barre au moyen d'un ruban composite constitué par deux rubans très minces de tissu de verre préimprégnés de résine, entre lesquels est disposée une couche de mica. Chaque barre est ensuite imprégnée dans un autoclave par la méthode VPI (Vacuum Pressure Impregnation). Dans la zone de développante (extrémité courbée de barre), une électrode interne (figure 20) en matière conductrice est utilisée pour améliorer la distribution du champ à fin de limiter l'apparition des décharges partielles [36].

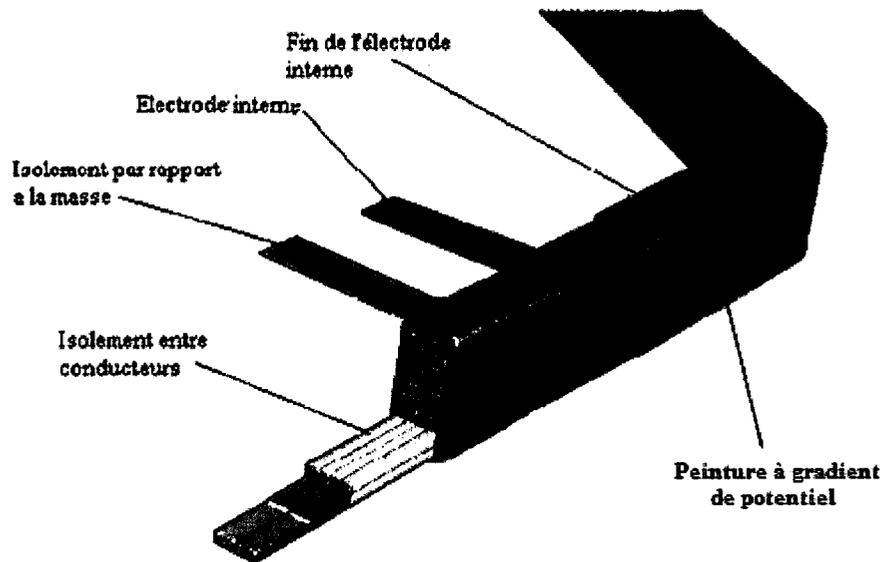


Figure 20 Une barre isolée avec un matériau composite utilisée dans la construction d'une bobine de stator d'un alternateur de puissance²

Les trois principaux composants dans un enroulement statorique sont: les conducteurs en cuivre, le noyau de stator, et l'isolation électrique. Le cuivre est le conduit du courant statorique. Le noyau statorique est composé de feuilles minces d'acier magnétique qui agissent comme un chemin à faible réluctance (faible impédance magnétique) pour le champ magnétique du rotor vers le stator dans un générateur ou dans un moteur. L'isolation électrique est le composant principal dans un enroulement statorique puisqu'elle empêche des courts-circuits de se produire entre les conducteurs et la masse. À la différence des conducteurs de cuivre et du noyau statorique, qui sont des composants actifs en faisant une fonction de moteur ou de générateur, l'isolation est passive. Cette dernière contient plusieurs composants et dispositifs, qui assurent ensemble que des courts circuits électriques ne se produisent pas, que les pertes de chaleur en cuivre (I^2R) sont transmises au radiateur, et que les conducteurs ne vibrent

² Pour plus de détails voir [37].

pas sous l'effet des forces magnétique (figure 21). Les composants de base d'un système d'isolation statorique sont : l'isolation des conducteurs, l'isolation des spires et l'isolation de masse.

4.1.1 L'isolation des conducteurs (ou des conducteurs secondaires)

Cette isolation a deux raisons d'être distinctes. D'un point de vue mécanique, si la section d'un conducteur est assez grande (pour une grande intensité de courant désiré), il est difficile de plier et de façonner un tel conducteur à la forme de l'enroulement. Pour y remédier, on le découpe en brins ou en petits conducteurs. Du point de vue électrique, si la section du conducteur en cuivre est assez grande, le courant qui le traverse circulera sur sa périphérie. Ce phénomène est connu sous le nom de l'effet pelliculaire. La profondeur de pénétration du champ électrique dans un conducteur en cuivre est de 8,5 millimètres à 60 hertz. Si la section de ce conducteur est supérieure à 8,5 millimètres, il y a une tendance pour que le courant passe par la périphérie du conducteur au lieu de son centre. L'isolation des conducteurs doit être fiable et capable de résister à des hautes températures (jusqu'à 155°C pour l'équipement de classe F). Elle est à base de films de verre, de fibres de verre, ou de verre et de fibres de polyester fondues (Daglas™).

4.1.2 L'isolation des spires

Le but de l'isolation des spires dans les stators à enroulement préformé ou à fils jetés est d'empêcher des courts-circuits entre les spires dans un enroulement. Si un court-circuit d'une spire se produit dans l'enroulement secondaire, par exemple, dans un enroulement à 100 spires entre la borne de phase et le neutre (l'enroulement primaire), un courant de 100 fois le courant normal traversera la spire court-circuitée, endommageant ainsi l'enroulement. Pour des machines fonctionnant à 4 160 V et plus, chaque spire est isolée par un ruban en mica qui fournit une excellente résistance aux décharges partielles.

4.1.3 L'isolation de masse

La détérioration de l'isolation de masse de l'enroulement statorique affecte directement le fonctionnement et la durée de vie des grands moteurs et générateurs électriques. L'isolation de masse est le matériau qui sépare les conducteurs en cuivre du noyau statorique relié à la terre. Un défaut d'isolation de masse occasionne un arrêt immédiat d'un moteur ou d'un générateur. Pour une longue durée de vie de ces moteurs ou générateurs, l'isolation de masse doit avoir une bonne immunité face aux efforts électriques, thermiques et mécaniques au quels les enroulements statoriques sont soumis. L'isolation de masse des enroulements statoriques des grandes machines tournantes est souvent à base de mica renforcé, de colle, et de matériaux imprégnés. Actuellement, les machines électriques en service sont à base des résines d'asphalte, de polyester, ou d'époxy. Une isolation de masse solide peut être composée de 55% de mica, 30% de résine et de 15% de matériau de renforcement.

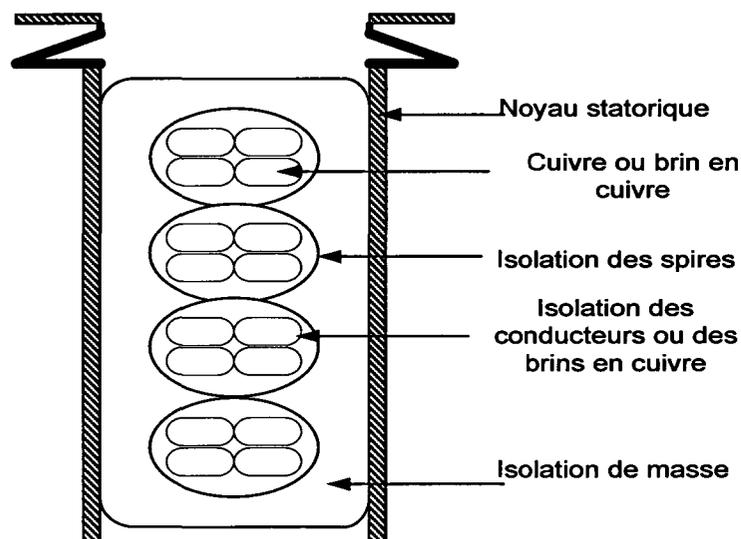


Figure 21 Vue en coupe d'une bobine d'un alternateur illustrant ces principales composantes

4.2 Revues des matériaux isolants les plus utilisés dans l'industrie

4.2.1 Isolation de masse

L'isolation de masse des grands générateurs et moteurs à courant alternatif est typiquement composée de mica renforcé organiquement, de collage, et de matériaux imprégnés. Aujourd'hui les isolations statoriques des machines en service sont principalement fabriquées à l'aide de résines à base de polyester ou d'époxy.

La structure chimique d'un matériau isolant a une influence profonde sur les modes de détérioration de l'isolation. Les propriétés électriques et physiques telles que la constante diélectrique, la rigidité diélectrique, la conductivité, la dureté, le point de fusion, etc., sont corrélées avec la structure moléculaire d'un composé. Pour comprendre entièrement les caractéristiques électriques d'un matériau isolant et son vieillissement, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance de sa structure chimique.

4.2.2 Mica

Les deux classes de mica les plus généralement utilisées dans les applications électriques sont la muscovite (mica de potassium) et la phlogopite (mica de magnésium). Leurs formules chimiques sont respectivement :



Les minéraux de mica sont composés de couches de silicate séparées par des couches d'oxyde métallique en alternance avec des couches d'ions métalliques. Structurellement, le mica peut être considéré comme un système de répétition de trois couches, tel qu'illustré à la figure 22. Les deux couches externes sont composées du tétraèdre de silicate dont un quart des atomes de silicium est remplacé par des atomes d'aluminium. Chaque atome de silicium ou d'aluminium est entouré par quatre atomes d'oxygène. La

couche intérieure se compose d'atomes d'aluminium (ou d'atomes de magnésium, dans le cas du mica de phlogopite) disposés octaédralement.

L'atome en aluminium est entouré par une répétition d'un cortège d'atomes d'oxygène et de groupes hydroxydes (OH). Des ions positifs de potassium sont localisés entre les couches de tétraèdre-octaèdre-tétraèdre, et puisque l'attraction cohésive entre le potassium et l'oxygène est faible, les liaisons ioniques sont facilement brisées. En conséquence, le mica montre généralement une morphologie fendue donnant des feuilles fortes et flexibles pouvant être très légères [40].

La structure du mica aide également à la compréhension de ses propriétés électriques. La séparation des ions positifs de potassium par rapport aux ions négatifs d'oxyde entraîne une augmentation du moment dipolaire permanent, même en absence d'un champ électrique externe. En raison de cette polarité naturelle, le mica présente une constante diélectrique relativement haute. En outre, la structure bidimensionnelle infinie des couches de tétraèdre-octaèdre-tétraèdre, offre relativement peu de chemin conducteurs, ce qui confère au mica une haute rigidité diélectrique et une basse conductivité. La caractéristique la plus importante du mica en ce qui concerne son utilisation dans les machines tournantes est sa résistance supérieure à l'érosion due aux décharges partielles. En effet, les barres et les bobines des gros alternateurs 13,8 kV (la grande majorité des machines du parc d'Hydro-Québec) sont affectées de façon naturelle par des décharges internes à la tension de service [41]. Cependant, le mica est légèrement hygroscopique en raison de sa structure cristalline et de son affinité chimique avec l'eau [42].

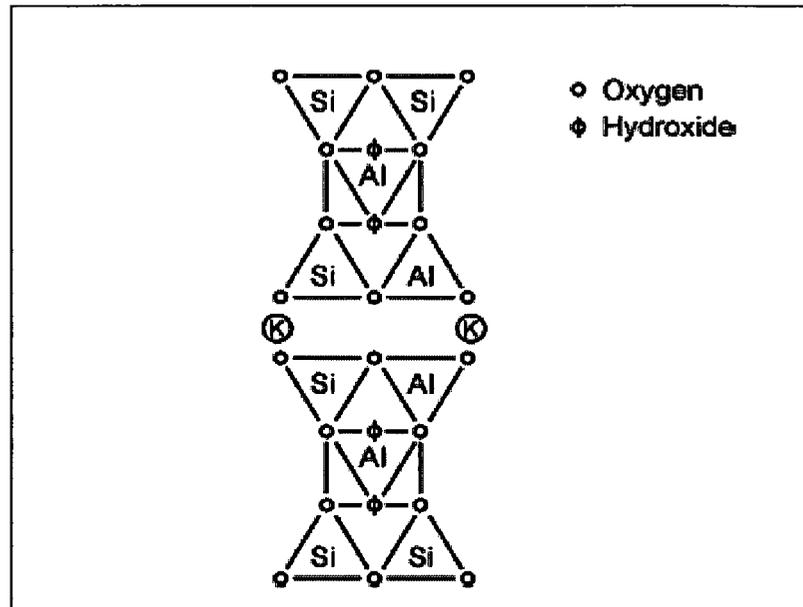


Figure 22 Coupe de mica de muscovite : Chaque structure de trois couches est séparée par une couche d'ions de potassium³.

4.2.3 Asphalte

Du début des années 20 jusqu'à la fin des années 60, des composants à base d'asphalte ont été employés intensivement comme agents de liaison et d'imprégnation dans l'isolation à haute tension de petites et moyennes machines. Beaucoup de générateurs et des moteurs de cette ère sont toujours en service aujourd'hui, en particulier ceux qui étaient opérationnels à des niveaux thermiques et électriques modérés. Les substances asphaltiques se produisent naturellement ou dérivent du pétrole. Les asphaltes sont des thermoplastiques qui se liquéfient graduellement une fois chauffés. Elles sont composées de mélanges d'hydrocarbures et contiennent typiquement un peu de soufre, d'azote, et d'oxygène [44].

³ Pour plus de détails voir [43].

Bien que la composition chimique de l'asphalte soit complexe et varie largement, les molécules insaturées sont fortement réactives, permettant à l'asphalte de se combiner avec une grande variété de groupes fonctionnels. En conséquence, les substances asphaltiques présentent des pertes diélectriques relativement élevées et une rigidité diélectrique modérée. La double liaison covalente entre les atomes de carbone et d'oxygène mène à un dipôle permanent significatif dans lequel l'oxygène est négatif et le carbone est positif. Ce déséquilibre des forces électrochimiques influence fortement sur les caractéristiques physiques et les propriétés électriques du matériau.

Plusieurs composés en asphalte sont polaires [45]. Quand un champ électrique est appliqué à un matériau isolant, les dipôles permanents induits par ces groupes polaires tendent à s'aligner dans la direction du champ, causant ainsi une augmentation de la polarisation, et par conséquent, une augmentation de la constante diélectrique. Les asphaltes présentent un fort coefficient de rigidité diélectrique négatif avec une augmentation de la température, ce qui limite leur utilisation à des systèmes d'isolation de classe B (130°C). Une fois chauffés à haute température, les constituants d'huile présents dans l'asphalte disparaissent par volatilisation ou sont détruits soit par oxydation chimique, soit par craquage moléculaire. À très hautes températures, l'asphalte peut se carboniser, menant ainsi à la formation de chemins de carbone et à une augmentation des pertes diélectriques et de la conductivité.

Dans les systèmes d'isolation basés sur l'asphalte, des défauts d'isolation de masse au niveau des extrémités du noyau statorique peuvent survenir dus aux agents migratoires et au décollement du ruban adhésif causés par le cycle thermique. Ce mode de détérioration d'enroulement statorique est généralement désigné sous le nom "craquage de périmètre". Bien que les asphaltes aient une bonne résistance à la transmission de l'humidité, cette dernière peut pénétrer par les fissures et les craquages.

4.2.4 Polyester

Les premières machines électriques furent isolées en utilisant des matériaux qui se trouvent à l'état naturel (air, mica, asphalte, et semblables) ou des dérivés de sources naturelles (huile minérale, colophane, et cellulose). Cependant, les développements dans le domaine énergétique ont imposé un grand besoin pour des matériaux isolants caractérisés par une grande stabilité thermique, mécanique et électrique. Dans les années 40 et les années 50, l'avancement de la chimie des polymères a mené à l'utilisation des composants à isolation synthétique, tels que les résines de polyester et d'époxy. Les polymères sont généralement subdivisés en deux larges classifications : thermoplastique et thermodurcissable. Les matériaux solides qui se ramollissent et fondent réversiblement, sont classés comme étant thermoplastique. En revanche, un matériau thermodurcissable, une fois chauffé, subit une réaction chimique et devient un solide qui ne se ramollit pas au moment de son réchauffement. Les résines de polyester peuvent être thermoplastiques ou thermodurcissables, selon leur structure moléculaire. Les polymères thermoplastiques sont composés d'une longue chaîne de molécules linéaires. Les polyesters thermoplastiques, tels que le Mylar et Dacron, sont flexibles et élastiques. Cependant, l'utilisation des polyesters thermoplastiques dans les applications à haute température est limitée par leur thermoplasticité. Les polyesters thermodurcissables possèdent des groupes à chaînes linéaires qui sont réticulés à diverses positions, formant ainsi un polymère tridimensionnel ou spatial. Les réticulations créent des liens intermoléculaires très forts qui ne se brisent pas une fois exposées aux températures pour lesquelles les thermoplastiques fondent ou se ramollissent. Les polyesters sont polymérisés suite à la réaction de condensation d'un acide polybasique avec un alcool polyhydrique. Les molécules d'alcool et d'acide doivent contenir au moins deux groupes fonctionnels pour ces réactions afin de produire une longue chaîne de polymère. La formation d'un polyester linéaire est montrée à la figure 23 [46]. Dans beaucoup d'applications, la résine de base du polyester est mélangée avec un monomère réactif tel que le styrène. La présence de bandes insaturées dans les polyesters à haut degré de réticulation produit des

matériaux infusibles et insolubles. La structure tridimensionnelle du polyester est illustrée sur la figure 24 [47]. Les résines de polyester sont relativement peu coûteuses, et sont caractérisées par de bonnes propriétés électriques, une bonne résistance thermique et un bon impact mécanique. Puisque ces composés sont souvent de nature polaire (selon le degré de réticulation), leurs propriétés diélectriques sont inférieures à celles exhibées par les époxydes.

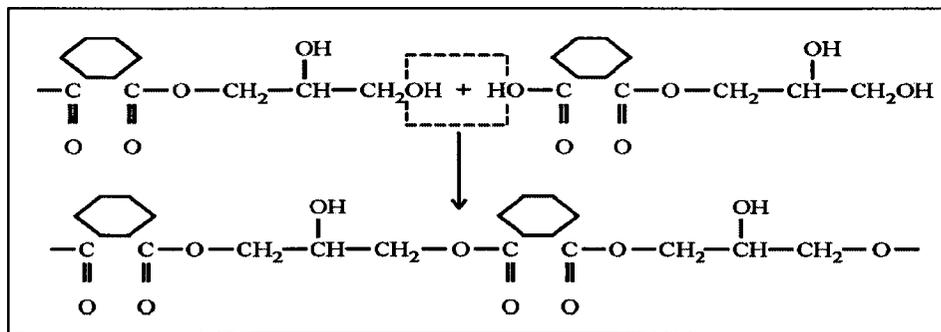


Figure 23 Formation d'une chaîne linéaire de polyester par la réaction de condensation des demi-esters.

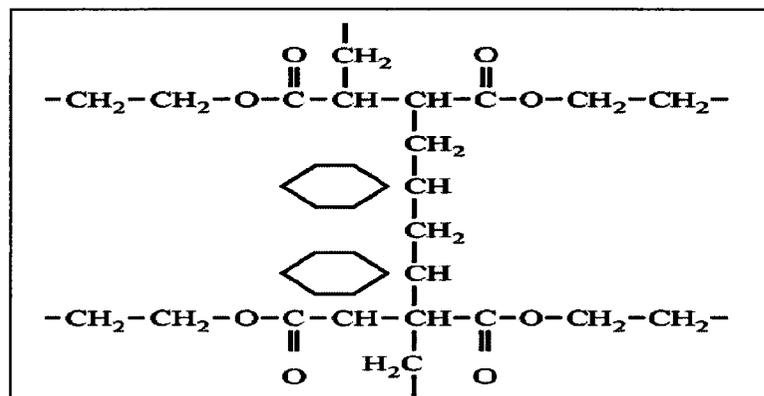


Figure 24 Résine de polyester réticulée par le styrène. Le nombre de groupes styrènes formant les réticulations est variable.

4.2.5 Époxy

Les résines d'époxy sont caractérisées par leur haute résistance mécanique, leur bonne adhérence à la plupart des matériaux y compris les métaux, leur résistance à l'humidité, aux solvants, et aux autres produits chimiques. Les époxydes prennent leur nom du groupe fonctionnel d'époxyde (l'anneau à trois membres contenant de l'oxygène). Ils sont formés en partie à partir de la molécule d'epichlorhydrine, un des deux réactifs utilisé pour préparer la résine. L'autre composant généralement employé est le propane diphénylique, plus souvent appelé bisphénol A. La réaction de polycondensation de ces deux substances résulte en une structure prépolymérique tel qu'illustré à la figure 25, dont le degré de la polymérisation est habituellement décrit par n [48].

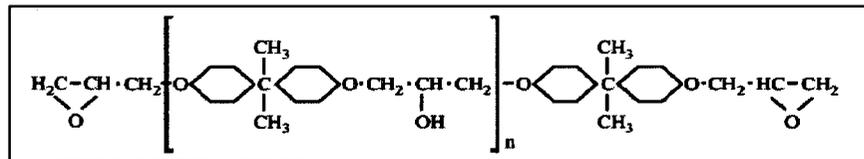


Figure 25 Structure d'un époxy prépolymère

Pour qu'il soit transformé en un produit fini utile, le prépolymère visqueux illustré à la figure 25, doit être traité par l'action des durcisseurs. Différents agents de réticulation peuvent être employés pour provoquer la réticulation dans la chaîne. En raison de leur nature non polaire, les résines époxydes montrent une constante diélectrique relativement basse, une haute résistivité électrique, et une bonne résistance à l'absorption d'humidité.

4.3 Développements récents des systèmes d'isolation des enroulements statoriques

Les systèmes d'isolation des enroulements statoriques actuels possèdent une plus haute rigidité diélectrique. Une fois l'isolation correctement faite, les niveaux de décharges partielles sont très bas par comparaison avec les systèmes utilisés dans les années 60. Les coûts de ces nouveaux produits sont également moins chers, ce qui leur donne un excellent rapport qualité/prix. Ces changements technologiques ont améliorés la stabilité thermique des matériaux en fournissant une isolation plus dense avec peu de vacuoles.

Actuellement le domaine de recherche des matériaux isolants se trouve focalisé sur deux domaines de développement :

- a- L'augmentation de la conductivité thermique des systèmes d'isolation;
- b- L'augmentation de la résistance des systèmes d'isolation face aux décharges partielles.

Dans un système d'isolation, les résines d'agglomération de polymère se caractérisent par une plus basse conductivité thermique. De ce fait, la première approche est d'ajouter à la résine imprégnée des renforts ou des supports présentant une haute conductivité thermique. Dans ce sens, une addition de matériaux semblables au ruban mica a été essayée, donnant un résultat mécanique généralement faible dû aux particules de renfort qui tendent à perturber l'intégrité des morceaux de mica une fois la formation du ruban faite. Récemment, Toshiba, a présenté un nouveau système d'isolation qui utilise des rubans contenant un support de nitrure de bore dans la résine d'agglomération des supports de verre. Ceci va permettre à Toshiba d'augmenter le mégavolt-ampère de ses générateurs à pas moins de 15%, pour les mêmes dimensions d'encoches et les mêmes températures de fonctionnement [49]. Bien que les fibres de verre, utilisées pour le renforcement du ruban aient une bonne conductivité thermique, le tissu de verre contient un nombre assez important des petits vides. Les fournisseurs Japonais ont développés une version de papier mica calciné mélangé avec l'Amaride contenant une gamme de fibres

d'Aramid d'environ 3 à 6%. La société Toshiba, vient de constater que ce type de papier est facile à imprégner donnant une meilleure conductivité thermique en service, puisque l'Aramid réduit la séparation des particules de mica aux températures élevées [50].

En plus de ces nouveaux progrès technologiques, des nouveaux films de polyester faits avec le naphthalate de polyéthylène, ayant une meilleure stabilité thermique sont disponibles dans le commerce depuis la fin des années 90, remplaçant ainsi les films faits avec le terephthalate de polyéthylène dans quelques applications. Le produit de Dupont, du nom commercial Kaladex™, a une température de transition vitreuse (T_V) qui est d'environ 42°C plus haute que celle des films faits avec le terephthalate de polyéthylène. Ce produit a un plus haut module, ce qui lui donne une rigidité de 25% plus grande et une force électrique moyenne aussi de 25% plus haute que les films faits avec le terephthalate de polyéthylène. Au début des années 90, Dupont a présenté un film en polyimide, du nom commercial Kapton CR™, basé sur un germanium organique breveté résistant aux décharges partielles. Une fois celui-ci combiné avec du mica non calciné, le résultat améliore la rigidité diélectrique, en plus de donner une excellente stabilité diélectrique et thermique.

4.4 Revue des méthodes de diagnostic de l'état de dégradation de l'isolation des enroulements statoriques

4.4.1 Le diagnostic hors service (Off-line Test)

4.4.1.1 Diagnostic par des paramètres non-électriques [51, 52, 53]

Il s'agit de méthodes acoustiques pour détecter les cavités et les délaminations à l'interface matrice/renfort, ainsi que de méthodes basées sur l'inspection visuelle. On peut en effet estimer l'état de l'isolant en observant le changement de sa couleur ainsi que la présence de dépôt symptomatique de la présence de décharges partielles.

4.4.1.2 Diagnostic basé sur l'histoire de fonctionnement [52]

Le nombre d'heures de fonctionnement est considéré comme l'indice standard du vieillissement de la machine. La fréquence des cycles marche/arrêt et les variations de charges fréquentes accélèrent également le vieillissement.

4.4.1.3 Essai résistance d'isolation et indice de polarisation (Insulation resistance and index polarization test)

C'est probablement l'essai le plus utilisé dans l'industrie pour le diagnostic des enroulements des moteurs et des générateurs. Son application est valable pour toutes machines et enroulements, à l'exception des enroulements rotoriques des moteurs à induction à cage d'écureuil, puisqu'ils ne contiennent pas une isolation à tester. Ce type d'essai est très puissant pour la détection des problèmes de pollution et de contaminations des enroulements. Il peut même détecter la détérioration thermique pour les anciens systèmes d'isolation. Ce type d'essai est utilisé depuis plus de soixante dix ans. Les deux mesures (IP, RI) utilisent la même instrumentation et sont habituellement réalisées en même temps. Le tableau III, représente les recommandations établies par la norme IEEE Std 43-2000 [9], pour la grandeur de la tension à appliquer durant les mesures de la résistance d'isolation (RI) et de l'indice de polarisation (IP). Les tableaux I et II, présentés en premier chapitre, représentent respectivement, les valeurs minimales de la résistance d'isolation recommandées par la même norme lorsque corrigé à 40°C et les valeurs minimales de l'indice de polarisation selon la classe d'isolation.

Tableau III

Directives pour l'application des tensions
continues lors des essais RI et PI

Tension nominale de l'enroulement V	Essai de la résistance d'isolation à tension continue V
<100	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

Un autre critère, R'C, est aussi utilisé pour l'évaluation de l'état d'isolation de masse. Ce paramètre représente le produit de la résistance en décharge par la capacité de l'échantillon. La résistance en décharge est définie comme le rapport de la tension appliquée sur le courant de décharge mesuré après une minute du début de la décharge [54]. Cette résistance est corrigée à 40°C selon la procédure décrite dans [8]. La grandeur de ce paramètre dépend du type de matériau et de son degré de vieillissement. Il présente les avantages suivants :

- Indépendant de la taille de la machine;
- Comparable avec une barre de réserve du même type de matériau;
- Indépendant de la présence de saleté ou de l'absorption d'humidité.

Le tableau IV, ci-dessous, représente les critères basés sur les valeurs de $R'C$ [32].

Tableau IV

Recommandations selon les valeurs de $R'C$

Type d'isolant	Bon	Âgé	Dégradé
Asphalte-mica	$R'C > 45$	$10 < R'C < 45$	$R'C < 10$
Époxy-mica	$R'C > 450$	$100 < R'C < 450$	$R'C < 100$

4.4.1.4 Essai à haute tension continue (DC hipot test)

Ce genre d'essai est valable pour tous les types d'enroulements statoriques et rotoriques à l'exception des rotors des moteurs à induction à cage d'écureuil (SCI : Squirrel Cage Induction). L'idée fondamentale est que si l'enroulement arrive à supporter l'effort électrique suite à l'application de la haute tension continue pendant toute la durée d'essai, l'isolation de masse est jugée bon (non vieillée) et l'enroulement peut retourner en service pour un fonctionnement normal. Par contre, si l'enroulement échoue pendant le test, il est nécessaire d'effectuer une réparation ou procéder à un rebobinage complet car certainement l'isolation de masse a été perforée durant cet essai. Il y a plusieurs méthodes d'essai à haute tension continue, dont on fera une brève description dans les paragraphes suivants:

4.4.1.4.1 Essai conventionnel à haute tension continue (Conventional DC hipot test)

Dans ce cas, la haute tension continue est appliquée sous forme d'une série d'échelons de tension uniforme séparés par des périodes de décharge suivant un cycle de temps régulier (figure 26). Des lectures de courant sont prises à chaque intervalle, et instantanément une courbe de courant en fonction de la tension est visualisée via le système d'acquisition. Pendant et après l'essai, cette courbe est examinée pour de possibles indications de faiblesse de l'isolation de masse. Une importante partie des variations du courant de fuite peut être masquée par les courants d'absorption diélectrique qui dominent les mesures. Pour réduire au minimum ces effets, la tension appliquée peut être maintenue assez longtemps à chaque niveau pour permettre au courant d'absorption de tendre à une valeur négligeable. Ce temps de stabilisation peut excéder une heure pour quelques machines.

Pour l'exécution de cet essai, un bloc d'alimentation haute tension continue approprié (fournit par plusieurs fournisseurs) est utilisé. Il est relié, soit à un appareillage de connexion (switchgear), soit aux bornes de la machine afin de charger l'enroulement statorique. Chaque niveau de tension d'essai est rapidement atteint et reste maintenu pour une période de 1 minute ou de 5 minutes. Par la suite, la tension est rapidement remise à zéro et l'enroulement est solidement mis à la terre. Si les disjoncteurs d'alimentation se déclenchent, alors il est fort probable qu'une perforation de l'isolation de masse s'est produite. Cette action se manifeste par une chute rapide de la résistance d'isolation à une faible valeur, et, selon la loi d'Ohm, le courant devient très grand et l'alimentation ne peut fournir ce courant. L'enroulement endommagé doit obligatoirement subir des réparations ou doit être remplacé par un autre en bon état.

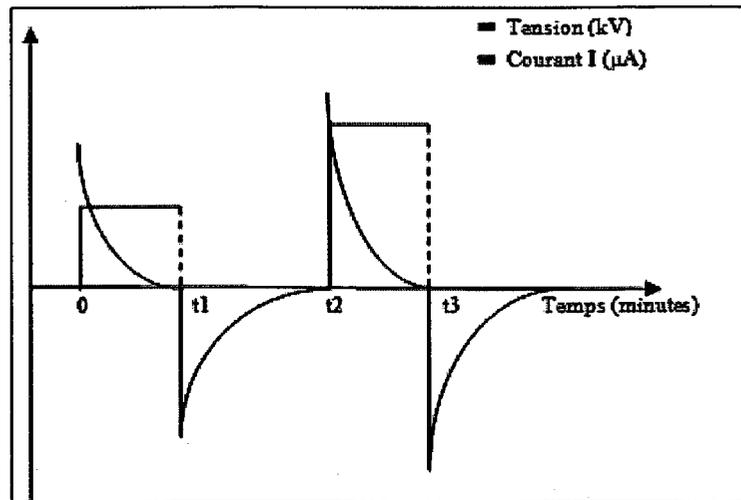


Figure 26 Courbe typique d'un essai conventionnel

4.4.1.4.2 Essai haute tension à plusieurs échelons (Step-Stress hipot test)

Cet essai a été développé par Schleif dans les années 50. Ce développement a été réalisé à l'époque où l'isolation de masse à base d'asphalte mica était présente dans la plupart des machines électriques. Le principe est semblable à celui de l'essai conventionnel avec l'utilisation de la même instrumentation, mais cette fois-ci la tension est augmentée graduellement avec des échelons uniformes (figure 27). La tension continue peut avoir un incrément de 1 kilovolt pour chaque niveau de tension et qui sera maintenu pendant 1 minute avant le prochain incrément de tension. L'acquisition du courant se fait à la fin de chaque niveau de tension (bien entendu le courant capacitif à ce moment-là aura déjà chuté à une très faible valeur). Cette acquisition est reproduite sur un graphique du courant en fonction de la tension.

Il n'est habituellement pas pratique que le maintien d'un niveau de tension soit assez long pour rendre le courant d'absorption négligeable. Pour y remédier, des programmes d'essais complexes ont été développés, ils sont plus détaillés dans [55]. L'idée de base

de ces programmes est d'ajuster préalablement dans un ordre décroissant les durées des niveaux des tensions appliquées (figure 28), puisque la composante d'absorption du courant mesuré est proportionnelle à la tension appliquée. De cette façon, le courant d'absorption sera linéarisé de telle sorte que les changements du courant de conduction deviennent relativement perceptibles. Idéalement, la forme de la courbe du courant en fonction de la tension sera une ligne droite avec quelques légères fluctuations. Cependant, parfois le courant augmente abruptement à un certain niveau de tension. Ceci peut être un avertissement d'une éventuelle perforation de l'isolation qui risque de se produire. Conséquemment, si la tension à laquelle l'instabilité du courant a été détectée, est inférieure au niveau maximal de la tension d'opération, il est très risqué de retourner l'enroulement en service sans lui faire subir une réparation.

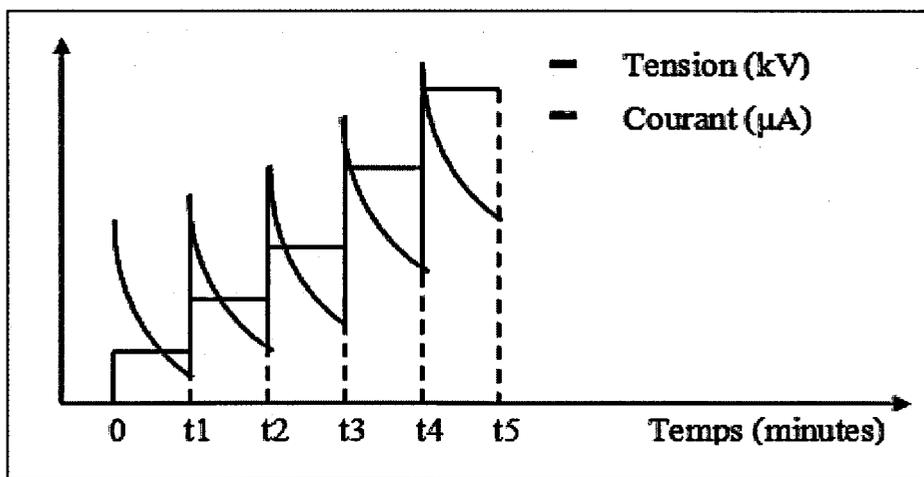


Figure 27 Courbe typique d'un échelon de tension graduel uniforme

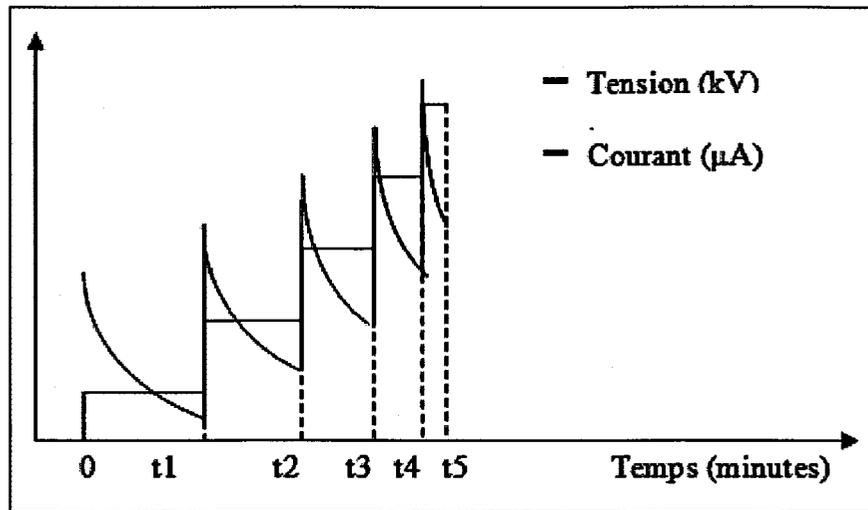
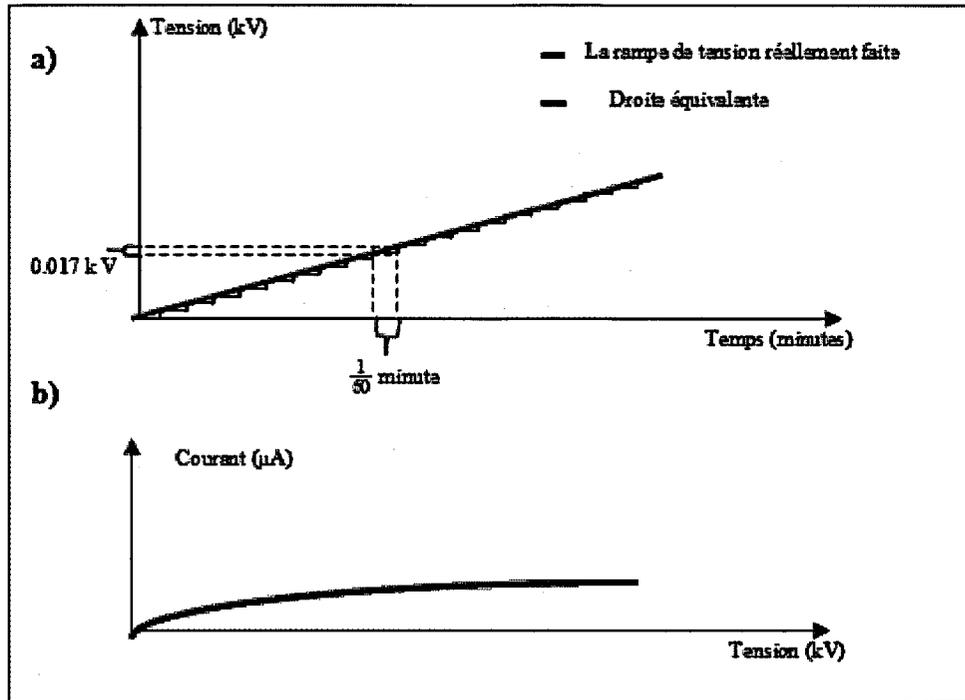


Figure 28 Courbe typique d'un échelon de tension graduel non uniforme

4.4.1.4.3 Essai en montée progressive en haute tension continue (DC Ramp Hipot Test)

En 2003, Adwel a présenté un model commercial d'un essai de montée progressive (rampe) en haute tension continue. Dans ce cas, la tension continue est lentement et linéairement augmentée jusqu'au niveau maximal avec une pente constante d'environ 1 ou 2 kV/minute. Cette approche correspond à une montée progressive en tension à des intervalles temporels très courts (figure 29-a). La composante d'absorption du courant d'isolation se linéarise automatiquement, et les déviations du courant de fuite seront facilement visualisées. Le courant en fonction de la tension est reproduit automatiquement sur un graphique (figure 29-b). À la différence des essais à échelon de tension décrits ci-dessus, cette forme de montée progressive en tension donne un courant capacitif constant. Bien qu'aucun test de diagnostic ne puisse détecter avec succès tous les types de défaut d'isolation de l'enroulement statorique, cet essai simplifie considérablement l'analyse des mesures de courant de fuite. Il est donc un moyen efficace pour établir une bonne maintenance préventive afin éviter des éventuels échecs en service [56]. Une seule personne est requise pour l'exécution et le bon contrôle de cet

essai. Cette opération prend moins de temps pour être exécutée que les autres essais haute tension.



L'autre avantage de cette technique, est qu'on peut arrêter l'exécution à n'importe quel moment si une instabilité importante du courant se produit, après que le courant capacitif soit devenu constant. En conséquence, ce type d'essai permet éventuellement d'éviter une perforation de l'isolation de masse. Notre travail dans le cadre de ce mémoire est axé principalement sur cette méthode qui sera le sujet des prochains chapitres.

4.4.1.5 Essai haute tension à courant alternatif (AC high potential)

Cet essai est semblable à l'essai haute tension continue, mais la tension employée dans ce cas est alternative d'une fréquence de 50 ou 60 Hz [57]. Parfois une fréquence de 0,1 Hz est également utilisée. Pour les essais à haute tension continue décrits dans le paragraphe précédent, la tension chute à travers les composantes de l'isolation de masse et les extrémités de l'enroulement statorique, en fonction des résistances (résistivité) de ces mêmes composantes. Ces derniers auront une chute de tension plus faible à leurs bornes si leurs résistances sont faibles. En revanche, pour un essai à haute tension à courant alternatif, la tension chute à travers chaque composant de l'isolation de masse ou au niveau des extrémités de l'enroulement, en fonction cette fois-ci de la capacité de chaque composante. Ainsi, il y a tendance à avoir une distribution de l'effort électrique complètement différente au niveau des têtes de bobines (voir la norme IEEE 433 [57]) de masse entre les deux essais. Chez les plus anciens systèmes d'isolation, en particulier les systèmes en asphalte-mica, cette différence dans la distribution de l'effort électrique était moins prononcée parce que la résistivité au niveau des anciennes isolations de masse était moindre à cause de l'absorption de l'humidité. Cependant, avec des isolations en époxy-mica moderne, la résistivité est très grande. L'essai de tenue en tension AC exige l'utilisation d'un transformateur à courant alternatif pour charger la capacité de l'enroulement. Occasionnellement, ce transformateur est remplacé par une alimentation à très basses fréquences (Very Low Frequency Supply), c'est-à-dire à 0,1 Hz. Il faut noter, que cet essai est un essai "tout ou rien" (go-no-go test). Donc si à l'issue de cet essai l'enroulement n'échoue pas, l'isolation de masse est jugée bonne, mais s'il échoue, alors probablement que l'isolation de masse vient de subir une perforation. Cette technique est plus généralement appliquée aux enroulements préformés (Form Wound Winding). Les essais de maintenance à haute tension alternative sont rarement employés en Amérique du Nord, mais trouvent une application plus répandue en Asie et en Europe.

4.4.1.6 Essai de montée de capacité (Capacitance Tip-up Test)

La mesure de la capacité d'un enroulement peut parfois indiquer des problèmes tels que la détérioration thermique ou la saturation de l'isolation par l'humidité. Cet essai est seulement valable pour les enroulements statoriques préformés évoluant à 2 300 V et plus. Ainsi il n'y a aucune procédure normalisée pour son exécution.

Initialement, une alimentation de tension à courant alternatif suffisante pour charger la capacité de l'enroulement à la tension voulue est nécessaire pour cet essai. Cette opération peut se faire via un transformateur conventionnel, une alimentation résonnante ou même une alimentation de très basse fréquence. Pour un grand stator, une puissance de 20 à 30 kVA est nécessaire. Un autre instrument est aussi nécessaire, capable de mesurer la capacité à au moins la tension nominale phase-neutre de l'enroulement statorique. Pour qu'il soit valable pour toutes les machines électriques, cet instrument doit être capable d'opérer jusqu'à environ 25 kilovolts, avec une précision de plus de 1%. Le pont de Schering et le pont de rapport de transformateur sont les plus utilisés [58]. La meilleure façon d'exécuter cet essai, est d'isoler et d'interconnecter les phases du reste de l'équipement, afin d'avoir une bonne sensibilité.

Une phase à la fois est examinée, avec les deux autres phases mises à la terre. La capacité de basse tension (C_{BT}) est d'abord mesurée, habituellement à environ 0,2E, où E est la tension nominale phase-phase du stator. Puis la tension appliquée est augmentée à environ la tension nominale phase-neutre (environ 0,58E). On mesure ainsi la capacité à haute tension (C_{HT}). La montée de capacité est donnée par :

$$\Delta C = \frac{C_{HT} - C_{BT}}{C_{BT}} \quad (4.1)$$

Ce rapport est habituellement exprimé en pourcentage.

Une valeur de ΔC élevée est caractéristique d'une isolation contenant un grand nombre de vides (des poches d'air ou de gaz). Les masses statoriques à époxy-mica moderne devraient avoir un ΔC inférieur à 1%, alors que celui des anciens enroulements à base d'asphalte-mica doit être inférieur à 3 ou 4%. Si ΔC est plus haut que ces valeurs, cela indique qu'il y a une détérioration de l'isolation, ou cela peut indiquer la présence de certains problèmes de fabrication. Ainsi, cette méthode présente quelques limitations qui affectent l'interprétation des résultats.

4.4.1.7 Essai de facteur de dissipation (Dissipation factor)

Le facteur de dissipation fournit une indication des pertes diélectriques dans l'isolation. Certains processus de détérioration, comme la détérioration thermique et l'absorption d'humidité, augmenteront ces pertes. Il y a deux manières principales de mesurer les pertes diélectriques : la première est la technique du facteur de dissipation ($\tan \delta$) et la seconde est celle du facteur de puissance. Ces deux techniques sont utilisées seulement pour les enroulements statoriques et plus précisément pour les enroulements préformés.

Considérant que l'enroulement est essentiellement un condensateur avec des pertes diélectriques, la mesure des pertes diélectriques se fait par les deux méthodes suivantes :

1. Facteur de dissipation (FD) ou $\tan \delta$: ce facteur est mesuré avec un instrument à pont équilibré, où le réseau résistif-capacitif est varié pour donner la même tension et le même facteur de dissipation ($\tan \delta$) que ceux déjà mesurés à travers l'enroulement statorique (figure 30). Le FD est alors calculé à partir des éléments de R et de C du pont au point d'équilibre (tension nulle). Cette méthode peut facilement atteindre une précision de 0,01%.

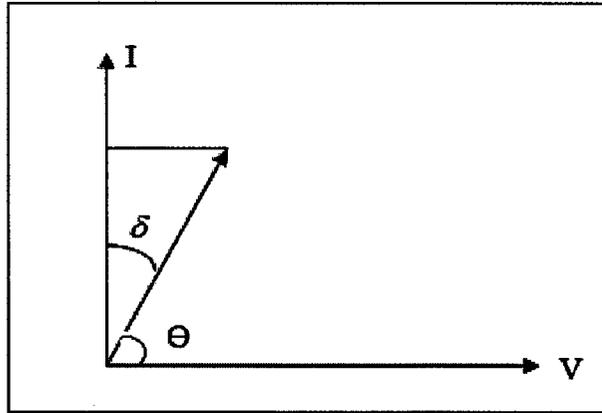


Figure 30 Calcul de l'angle de phase pour les mesures de $\tan \delta$ ($\cos \theta = FP$)

2. Facteur de puissance (FP) : pour des matériaux avec un facteur de dissipation relativement faible, ce qui est le cas pour la plupart des isolations des enroulements statoriques, le facteur de puissance et le facteur de dissipation sont à peu près identiques. Le facteur de puissance est déterminé en mesurant la tension (V), appliquée entre le cuivre et le noyau de l'enroulement, puis le courant résultant (I). En même temps, la puissance (W) de l'enroulement est mesurée avec un Wattmètre précis. le facteur de puissance *FP* est :

$$FP = \frac{W}{VI} \quad (4.2)$$

Comme avec le FD, le FP est habituellement exprimé en pourcentage. L'essai de FP est moins précis pour la mesure des pertes diélectriques par rapport à l'essai FD, mais l'instrumentation a tendance à être moins chère puisqu'elle n'emploie pas d'instrument à pont équilibré. Le FD peut être converti en FP on utilisant :

$$FP = \frac{FD}{(1 + FD^2)^{0.5}} \quad (4.3)$$

Les valeurs de FD sont environ de 0,5% pour les deux isolations en époxy moderne et en polyester, et il est sont environ de 3 à 5% pour des enroulements en asphalte mica. Si le FD est mesuré de façon régulière, par exemple à toutes les années, et demeure constant pendant plusieurs années, cela indique qu'aucun vieillissement thermique ou contamination de l'enroulement ne se sont produits. En revanche s'il augmente d'environ 1% ou plus de sa valeur initiale, ceci est une indication soit une surchauffe de l'isolation soit d'une contamination de l'enroulement due à l'humidité ou à des contaminants partiellement conducteurs.

4.4.1.8 Essai de montée du facteur de puissance (Power Factor Tip-up Test)

Cet essai est également appelé l'essai de montée du facteur de dissipation. C'est une technique indirecte pour la détection des décharges partielles au niveau de l'enroulement statorique à haute tension, qui est complémentaire à l'essai de montée de capacité (décrit ci-dessus). Cet essai est seulement valable pour les enroulements statoriques évoluant à 2 300 V et plus.

Tous les matériaux d'isolation utilisés en pratique, présentent des pertes diélectriques qu'on peut mesurer par ce genre d'essai. Aux basses tensions, le facteur de puissance ne dépend pas de la tension. Cependant, à mesure que la tension alternative augmente à travers l'isolation des enroulements préformés (Form-Wound Coil), et si des vacuoles sont présentes au niveau de l'isolation de masse, alors à un certain niveau de tension des décharges partielles commencent à se produire. Ces décharges se manifestent par une diffusion de la chaleur, de la lumière, ainsi que la génération d'un signal acoustique au niveau de l'équipement électrique. Le même phénomène se produit en cas d'un décollement ou d'une délamination dans l'enroulement. Ces décharges partielles vont accroître la valeur du facteur de puissance à des valeurs supérieures à la normale, puisqu'elles représentent une composante additionnelle de perte dans l'isolation.

Dans cet essai, le facteur de puissance FP est mesuré à deux niveaux de tensions. Un premier facteur de puissance est mesuré à basse tension, FP_{bt} , et est un indicateur des pertes diélectriques normales de l'isolation. Il est habituellement mesuré à environ 20% de la tension nominale phase-neutre du stator. Puis cette tension est augmentée à la tension nominale phase-neutre pour mesurer un deuxième facteur de puissance à haute tension, FP_{ht} . En fin, la montée du facteur de puissance ΔFP est calculée comme suit :

$$\Delta FP = FP_{HT} - FP_{BT} \quad (4.4)$$

Il est à noter que certaines compagnies font des mesures à plusieurs niveaux de tension puis calculent plusieurs ΔFP entre ces différents niveaux de tension. Cependant si après une période de quelques années, selon le cycle d'entretien, on constate que ΔFP s'éloigne de la valeur normale, l'enroulement en question est en présence d'une importante activité des décharges partielles, causée par les détériorations thermiques et les cycles de charge.

Pour un nouvel enroulement présentant un ΔFP supérieur à environ trois écarts types de sa valeur moyenne, cela signifie que son isolation de masse était mal imprégnée.

4.4.1.10 Mesure de décharges partielles [53, 57, 58, 59, 60]

Cet essai lorsque utilisé hors service, exige une alimentation d'énergie capable de charger l'enroulement à au moins la tension nominale phase-neutre. Dans le cas des stators des grands générateurs, un transformateur conventionnel ou résonnant d'une puissance nominale de 20 à 40 kVA est nécessaire. Lors d'un arrêt temporaire de la machine, un condensateur de haute tension relié aux bornes du stator, d'ordre de 80 pF à 1 000 pF, est employé pour séparer le signal haute fréquence des décharges partielles de l'alimentation 60 Hz (figure 31). On peut alors mesurer et d'observer l'évolution de la tension d'initiation des décharges (Discharge Inception Voltage-DIV). Le potentiel est augmenté graduellement à la tension nominale phase-neutre. L'enroulement reste soumis à ce

potentiel pendant 10 à 15 minutes pour enregistrer les pics des impulsions (Q_m) des décharges (figure 32). La durée de maintien est importante puisque ces décharges partielles tendent à être plus haute dans les premières minutes après l'application de la tension. Ensuite, la tension est graduellement abaissée jusqu'au niveau où les décharges ne sont plus discernables. Ceci représente la tension d'extinction des décharges (DEV : Discharge Extinction Voltage). Cette dernière est habituellement inférieure à celle d'initiation des décharges (DIV). Comme montré sur la figure 32, des impulsions positives et négatives sont mesurées lors d'un essai DP.

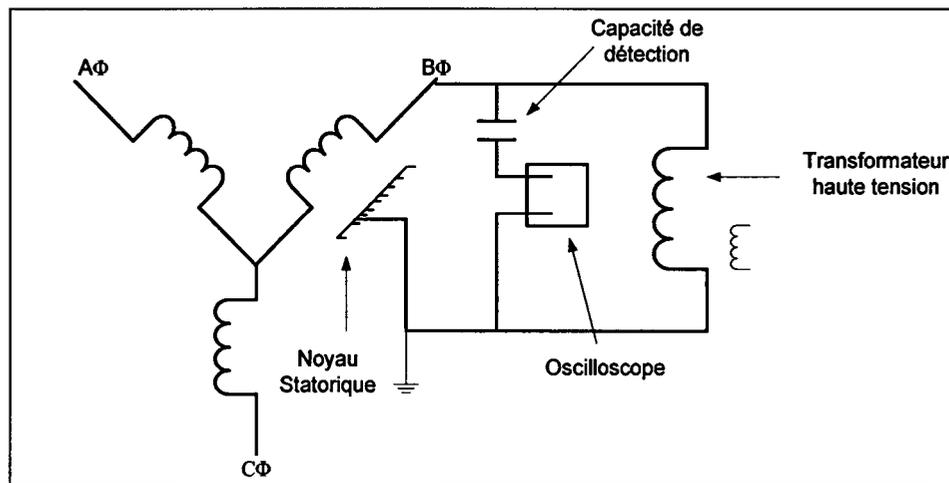


Figure 31 La mesure des impulsions du courant des décharges partielles

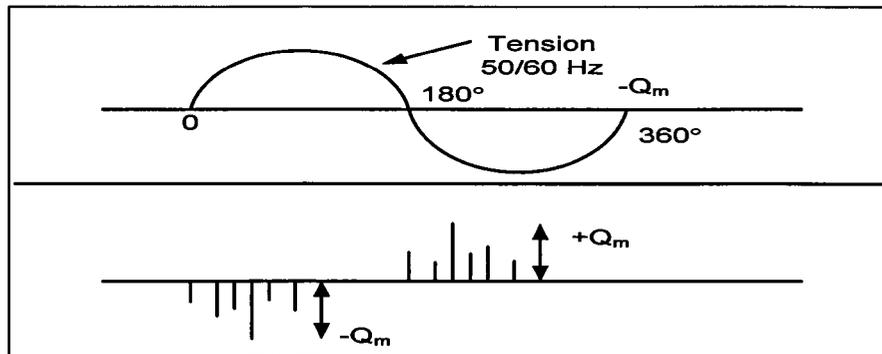


Figure 32 Affichage d'oscilloscope des impulsions de décharges partielles en fonction de la tension

4.4.2 Le diagnostic en service (On-line)

4.4.2.1 Les mesures de décharges partielles [49, 52, 58, 61, 62, 63]

La méthode de mesure des décharges partielles « on-line » est similaire à celle off-line sauf qu'on n'utilise pas de source extérieure puisque la machine reste toujours en marche. L'avantage de cette méthode est de pouvoir estimer l'état de l'isolation sans arrêter la machine. Mais son interprétation est rendue difficile par le bruit haute fréquence provenant de sources autre que les décharges partielles.

4.4.2.2 Les autres méthodes « on-line » [49]

Sont également utilisées en service les méthodes suivantes: la mesure de la vibration des barres au cours du fonctionnement, de la température d'isolation par rapport à celle en fonctionnement normal. L'annexe 1 fait une récapitulation et une comparaison de la plupart des essais que l'on vient de mentionner.

CHAPITRE 5

MODÉLISATION

5.1 Mise en contexte

Comme on l'a décrit au troisième chapitre, le courant de charge mesuré (équation 3.28) est une somme de trois contributions de courant (capacitif, absorption et fuite). Faire une évaluation de l'état d'un système d'isolation d'un enroulement statorique revient à connaître l'ampleur des différentes composantes de ce courant, particulièrement le courant de fuite traversant ce système d'isolation. Donc, il faut isoler les trois contributions du courant mesuré. Le courant capacitif est dépendent des composantes du système de mesure (résistance en série, capacité de l'échantillon) et de la durée de l'essai, décrivant ainsi seulement les conditions du système de mesure et non pas du système d'isolation. Autrement dit, il n'agit pas d'une manière directe sur le comportement diélectrique. Ce courant est initialement connu et calculé, ce qui réduit les calculs à seulement deux contributions de courant (absorption et fuite). Pour séparer ces dernières, on fait appel au principe de modélisation (expliqué plus loin) qui revient à modéliser le courant mesuré ou plutôt à donner un modèle mathématique au courant mesuré puis calculer les paramètres inconnus reliés aux deux courants d'absorption et de fuite (équation 5.3). Ces paramètres inconnus, en l'occurrence la conductivité σ , la composante haute fréquence de la permittivité relative ϵ_{∞} , et la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$, sont utilisés pour décrire un matériau isolant linéaire, homogène et isotropique dans le domaine temporel. Une des possibilités de calcul est de procéder analytiquement en utilisant la transformée de Fourier de telle façon à ce que l'intégrale de convolution de l'équation (5.3) puisse être résolue analytiquement menant à un système d'équations linéaire [53]. Le problème avec cette approche, en plus de sa difficulté de calcul, est que beaucoup de fonctions de réponse diélectrique sont des fonctions à changement rapide sur plusieurs décades (grande dynamique) menant ainsi à

un système d'équations linéaire avec un coefficient de matrice mal conditionné. Pour les essais en montée progressive à haute tension continue, une possibilité [43] beaucoup plus simple, est de tracer une droite correspondante au courant de charge une fois que le courant capacitif est devenu constant (figure 33), et de considérer que le courant d'absorption obéi à cette forme de droite pour le reste de la courbe du courant versus la tension. Mais cette approche est imprécise et inexacte et occasionnellement mène à des situations pour lesquelles le courant de conduction serait négatif (figure 34). Il s'en suit une surestimation du courant d'absorption et une sous-estimation du courant de fuite.

Dans ce travail, la composante haute fréquence de la permittivité relative ϵ_∞ n'est pas calculée puisqu'on utilise la capacité haute fréquence C de l'échantillon telle que lue par le multimètre qui contient le paramètre ϵ_∞ suivant l'équation suivante :

$$C = C_0 \epsilon_\infty \quad (5.1)$$

Ainsi notre modèle se résume en deux inconnus : la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ et la résistance de l'échantillon R_c qui est reliée à la conductivité par la relation (5.6).

Pratiquement et comme on va le voir plus loin, ces deux paramètres vont nous permettre de séparer les trois contributions du courant de charge (courant capacitif, courant de conduction et courant d'absorption). La deuxième nouveauté de notre travail, dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, est l'utilisation de la transformée de Laplace [64] pour modéliser le courant de charge total. Malgré les approximations qu'elle exige (expliquées plus loin), cette technique s'avère très facile et très efficace. L'estimation des paramètres propres au matériau d'isolation (R_c et $f(t)$) est réalisée par le biais d'une régression linéaire simple ou multiple de la courbe du courant de charge en employant le principe de minimisation. Cette technique sera expliquée au long de ce chapitre.

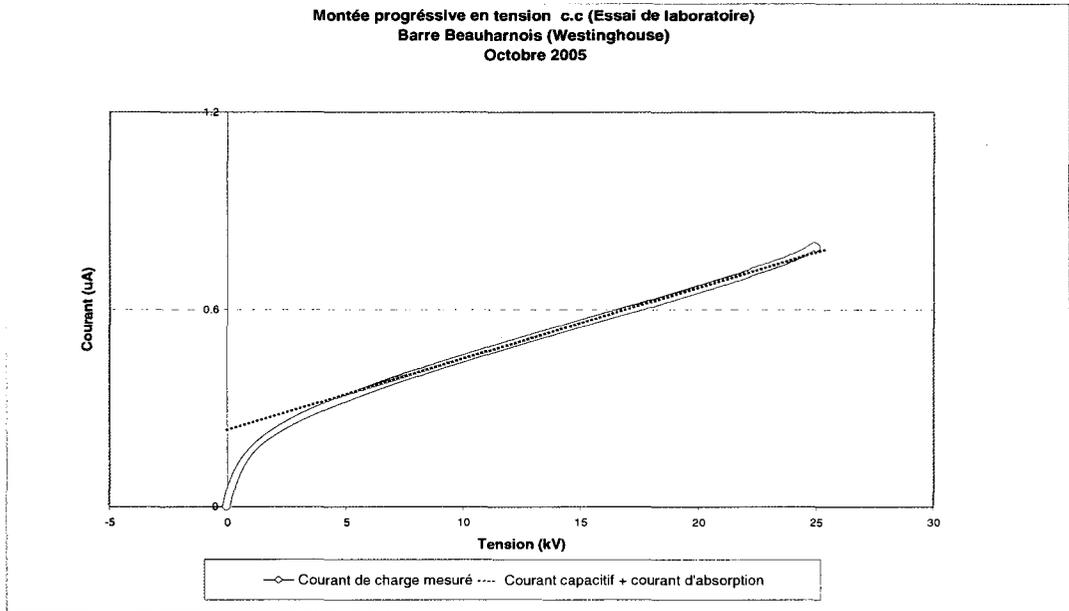


Figure 33 Modélisation en supposant un courant d'absorption linéaire

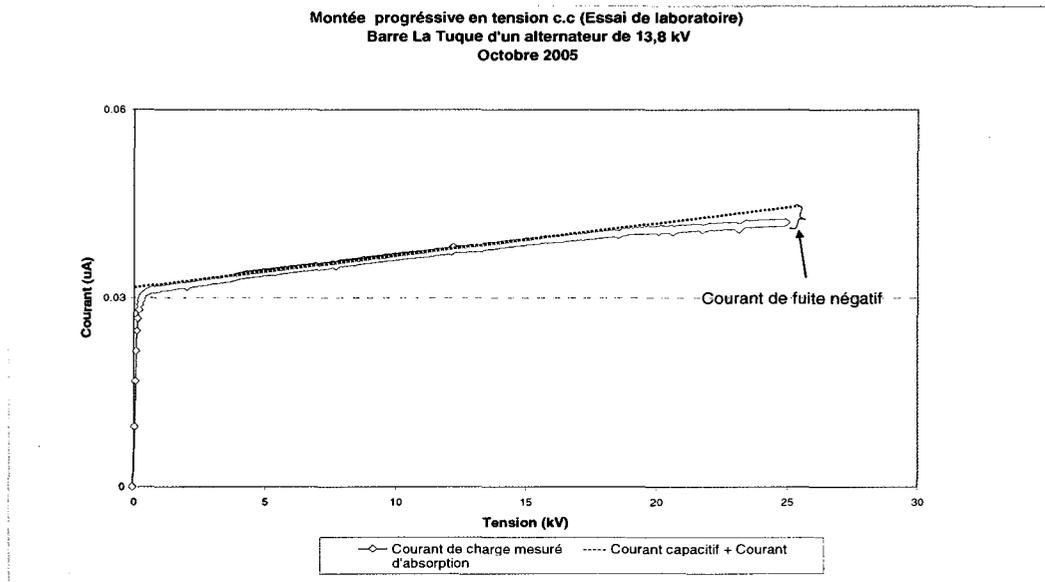


Figure 34 Modélisation en supposant un courant d'absorption linéaire

5.2 Principe de la modélisation

5.2.1 Définition

La modélisation trouve sa justification dans l'explication et la prédiction du phénomène temporel. Dans un modèle, on explique les variations de la variable d'intérêt, dite variable dépendante ou variable expliquée (dans notre cas le courant de charge) par les variations d'un ensemble d'autres variables dites explicatives ou variables indépendantes (dans notre cas le temps). L'explication permet de prédire les valeurs que peut prendre la variable expliquée selon celles prises par les variables explicatives. Elle représente le comportement d'une grandeur naturelle par une expression comportant une partie déterministe (une fonction) et une partie aléatoire. La partie déterministe est ce qui permet de décrire le comportement de la moyenne du phénomène (le comportement moyen). La partie aléatoire est le différentiel entre la vraie valeur étudiée et la partie déterministe.

5.2.2 Le modèle linéaire

Le modèle linéaire généralisé est sans doute l'outil le plus général, le plus utile et, par conséquent, le plus utilisé de la panoplie des instruments dévolus à la modélisation [65]. Il est connu sous le nom de régression linéaire simple ou multiple et se présente de la façon suivante :

$$\begin{array}{ll}
 Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i ; & \text{Régression simple} \\
 Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_k X_{ik} + \varepsilon_i ; & \text{Régression multiple}
 \end{array} \quad (5.2)$$

Y_i est la variable dépendante (le courant de charge) exprimée en fonction d'une variable explicative X (le temps). L'erreur ε_i (encore appelée « résidu aléatoire ») est non corrélée linéairement avec X . De plus son espérance $E(\varepsilon) = 0$. $\beta_0, \beta_1 \dots \beta_k$ sont des coefficients de l'équation de régression.

5.2.3 Les objectifs d'une étude de régression

Les objectifs d'une étude de régression sont de déterminer dans quelle mesure la droite de régression est utile à expliquer la variation existante dans les observations du courant de charge. Cette approche nous permettra également de présenter une autre façon de tester si la régression est significative, test effectué à l'aide d'un rapport de variances.

Les objectifs de l'analyse de la variance en régression linéaire sont :

1. Le modèle de régression linéaire simple ou multiple nous permet d'identifier les composantes qui peuvent contribuer de façon importante à expliquer les fluctuations dans les mesures du courant de charge.
2. L'analyse de la variance va nous permettre :
 - a) de quantifier la variation totale dans les observations ou les mesures et de décomposer en deux sources de variation : soit une variation attribuable à la régression soit une variable résiduelle;
 - b) de vérifier, à l'aide d'un tableau d'analyse de la variance, si la source de variation attribuable à la régression est significative;
 - c) de définir un indice qui donne une mesure descriptive de la qualité de l'ajustement des points expérimentaux (temps t , courant de charge) par la droite de régression.

5.3 Position du problème

Si la conductivité σ , la composante haute fréquence de la permittivité relative ϵ_{∞} et la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ de l'échantillon sont connues, il est possible au moins numériquement de calculer le courant total de charge. Mais cela n'est pas souvent le cas. Habituellement on a donc à résoudre le problème inverse.

En effet, à partir des mesures ou des observations du courant de charge total, on retire les paramètres inconnus de l'équation de régression (dans notre cas, la résistance R_c et la

fonction de réponse diélectrique $f(t)$) en employant une routine de minimisation pour réduire au minimum l'écart type par rapport aux valeurs mesurées. Cependant, cette méthode fonctionne bien quand la forme de la fonction de la réponse diélectrique est connue et peut être décrite avec une simple fonction analytique paramétrée (figure 14).

5.3.1 Calcul des paramètres inconnus de l'équation de régression

Reprenant l'équation (3.8) présentée dans le troisième chapitre :

$$i(t) = C_0 \left[\frac{\sigma}{\varepsilon_0} u(t) + \varepsilon_\infty \frac{du(t)}{dt} + \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) u(\tau) d\tau \right] \quad (5.3)$$

La capacité à vide de l'échantillon C_0 est reliée à la résistance R_c de ce même échantillon par la formule (5.6) suivante :

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{l}{d} \Rightarrow \frac{l}{d} = \frac{C_0}{\varepsilon_0} \quad (5.4)$$

$$R_c = \frac{d}{l\sigma} \Rightarrow \frac{l}{d} = \frac{1}{R_c\sigma} \quad (5.5)$$

$$\frac{C_0}{\varepsilon_0} \sigma = \frac{1}{R_c} \quad (5.6)$$

avec :

ε_0 : Permittivité du vide (= 8.85×10^{-12} F/m)

l : Surface des plaques (les deux armatures formant le condensateur de l'échantillon), [m^2].

d : La distance entre les deux plaques, [m].

σ : Conductivité électrique propre à l'échantillon, [$(\Omega m)^{-1}$].

C_0 : Capacité à vide, [F].

R_c : Résistance de l'échantillon [Ω].

Donc l'équation (5.3), en y insérant les deux équations (5.1) et (5.6), devient :

$$i(t) = \frac{u(t)}{R_c} + C \frac{du(t)}{dt} + C_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau) u(\tau) d\tau \quad (5.7)$$

Un modèle équivalent simple de l'isolation statorique employé pour décrire les pertes relatives et tenant compte des divers phénomènes diélectriques qui se produisent pendant l'essai à haute tension est représenté sur la figure 35-a.

La figure 35-b est le schéma simplifié dans le domaine de Laplace avec C^* et R_c représentent tous les effets de charge, de polarisation, de conduction, d'ionisations et de pertes diélectriques [43].

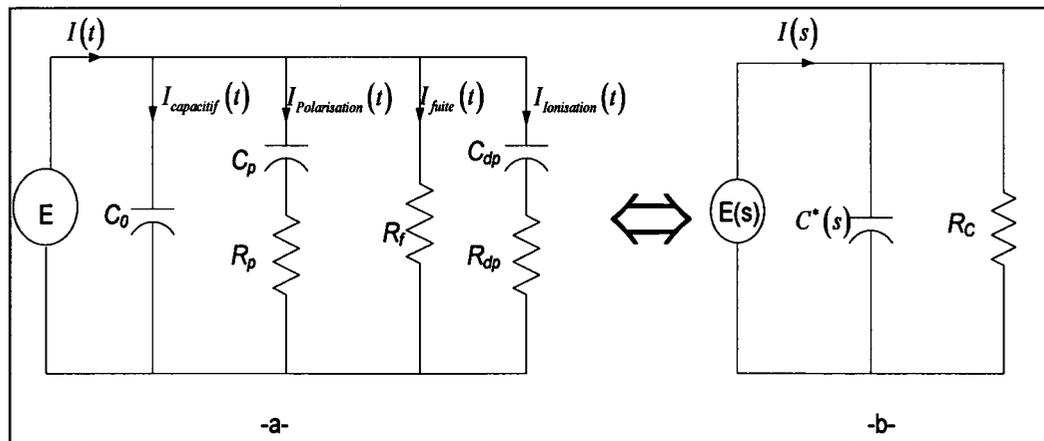


Figure 35 -a- Schéma équivalent d'un enroulement d'isolation statorique dont les mécanismes de polarisation diélectriques sont combinés.
-b- Schéma simplifié.

Si on remplace les équations (5.1) et (5.6) dans l'équation (3.10) (voir chapitre 3) nous obtenons l'équation suivante :

$$i_{ch}(t) = \frac{U_c}{R_c} + U_c C \delta(t) + U_c C_0 f(t) \quad 0 \leq t \leq t_{ch} \quad (5.8)$$

La transformée de Laplace, désignée par la lettre L (Annexe 2), de l'équation (5.7) donne l'équation du courant $i(t)$ dans le domaine de Laplace $I(s)$. Ce courant est défini par l'équation suivante :

$$I(s) = L(i(t)) = \frac{U(s)}{R_c} + sCU(s) + sC_0F(s)U(s)$$

$$I(s) = \frac{U(s)}{R_c} + s[C + C_0F(s)]U(s)$$

$$I(s) = \frac{U(s)}{R_c} + sC(s)U(s) \quad (5.9)$$

avec : $U(s) = L(U_c)$

$$L(\delta(t)) = 1$$

$$F(s) = L(f(t))$$

$C(s) = [C + C_0F(s)]$ est la capacité universelle Laplacienne.

Si on ajoute à la figure 35-b une résistance de mesure en série R_s (figure 36), avec l'échantillon on obtient dans le domaine de Laplace le circuit suivant :

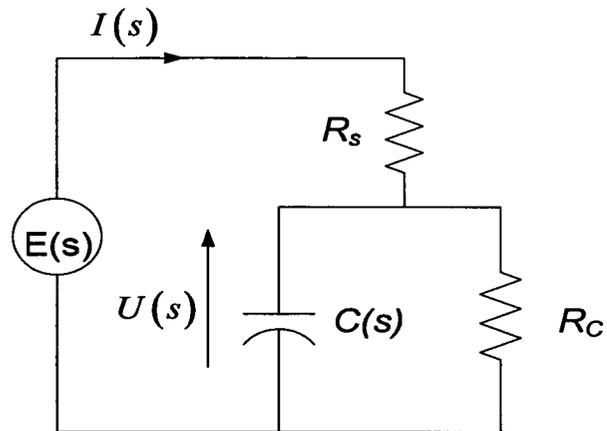


Figure 36 Approche circuiterie

avec : R_s est résistance série et R_c est la résistance de l'échantillon

Selon la figure 36, $U(s)$ est égale:

$$U(s) = E(s) - R_s I(s) \quad (5.10)$$

Remplaçons cette équation dans (5.9), nous aurons :

$$I(s) = \frac{E_s(s) - R_s(s)I(s)}{R_c} + Cs(E_s(s) - R_s(s)I(s)) + C_0F(s)(E_s(s) - R_s(s)I(s)) \quad (5.11)$$

Après quelques manipulations on aura:

$$I(s) + \frac{R_s}{R_c} I(s) + R_s s I(s) [C + C_0 F(s)] = E(s) \left[\frac{1}{R_c} + s \{C + C_0 F(s)\} \right] \quad (5.12)$$

Insérons la capacité universelle Laplacienne. L'égalité (5.12) devient :

$$I(s) \left\{ 1 + \frac{R_s}{R_c} + R_s s C(s) \right\} = E(s) \left[\frac{1}{R_c} + s C(s) \right]$$

$$I(s) = \frac{E(s) \left[\frac{1}{R_c} + sC(s) \right]}{\left\{ 1 + \frac{R_s}{R_c} + sR_s C(s) \right\}}$$

$$I(s) = \frac{E(s)}{R_s + \left(\frac{1}{R_c} + sC(s) \right)^{-1}} \quad (5.13)$$

Pour tous les échantillons examinés lors de nos mesures, vieilli et non vieilli, le comportement diélectrique dans la plage de temps de 10 s à 1 000 s rapporte une réponse diélectrique plate caractérisée par un courant d'absorption suivant la forme de Curie-Von Schweidler [17], et exprimé par:

$$I_{absorption}(t) = CU_c K t^{-n} \quad (5.14)$$

avec n étant l'exposant d'absorption compris entre 0 et 1, C étant la capacité haute fréquence de l'échantillon telle que lue par un multimètre et U_c est le niveau de l'échelon de tension. La valeur du nouveau paramètre K, [s^{n-1}], est liée aux pertes diélectriques et elle dépend fortement de la nature de la résine de liaison et du degré de réticulation.

L'équation (5.8), présentée précédemment, est la somme de deux courants (conduction et absorption) pendant le temps de charge puisque le courant capacitif décroît rapidement et devient négligeable. Pour des valeurs de temps de charge supérieure à zéro, le paramètre $U_c C_0 \delta(t)$ de l'équation (5.8) est nul. De ce fait, la contribution d'absorption de l'équation (5.8) se réduit à :

$$I_{Absorption}(t) = U_c C_0 f(t) \quad 0 < t \leq t_{ch} \quad (5.15)$$

Donc, si on remplace le coté gauche de l'équation (5.14) par l'équation (5.15), la fonction de la réponse diélectrique f(t) sera égale à :

$$f(t) = \frac{C}{C_0} K t^{-n} \quad (5.16)$$

Dans le domaine de Laplace l'équation (5.16) est égale à :

$$F(s) = L(f(t)) = \frac{C}{C_0} K \Gamma(1-n) s^{n-1} \quad (5.17)$$

Si on remplace l'équation (5.17) dans le paramètre $sC(s)$ de l'équation (5.13), nous aurons :

$$sC(s) = sC + CK\Gamma(1-n)s^n$$

Posons $B = CK\Gamma(1-n)$, alors :

$$sC(s) = sC + Bs^n \quad (5.18)$$

Pour une rampe de tension $E(t) = \alpha t$ (α est le rapport dV/dt , appelée aussi la pente), $E(s)$ est égal à :

$$E(s) = L(E(t)) = \frac{\alpha}{s^2} \quad (5.19)$$

Si on remplace les deux équations (5.18) et (5.19) dans l'équation (5.13) et faisant quelques arrangements, le courant $i(t)$ sera égal à :

$$i(t) = L^{-1} \left\{ \frac{\alpha \left\{ \frac{1}{R_c} + sC + Bs^n \right\}}{s^2 \left\{ 1 + \frac{R_s}{R_c} + R_s (sC + Bs^n) \right\}} \right\} \quad (5.20)$$

avec L^{-1} désigne la transformée de Laplace inverse (Annexe 2).

On pratique, l'ordre de grandeur de la résistance en série R_s est de quelques $M\Omega$ (chez Hydro-Québec R_s est de l'ordre de $10 M\Omega$ et elle de l'ordre de $1 M\Omega$ chez Manitoba-

Hydro). La résistance R_c , comme on va le voir dans le prochain chapitre, est de l'ordre de quelques $G\Omega$, ce qui permet d'écrire :

$$\frac{R_s}{R_c} \ll 1$$

On peut aussi écrire pour des grandes valeurs de s et de n , ce qui suit :

$$Bs^n \ll sC$$

Tenant compte de ces deux approximations, l'équation (5.20) devient :

$$i(t) = L^{-1} \left[\frac{\alpha \left\{ \frac{1}{R_c} + sC + Bs^n \right\}}{s^2 \{1 + R_s sC\}} \right]$$

$$i(t) = \alpha L^{-1} \left\{ \frac{1/R_c}{s^2 \{1 + R_s sC\}} \right\} + \alpha L^{-1} \left\{ \frac{C}{s \{1 + R_s sC\}} \right\} + \alpha L^{-1} \left\{ \frac{Bs^{n-2}}{\{1 + R_s sC\}} \right\} \quad (5.21)$$

Prenons la constante de temps : $\tau = R_s C$

L'équation (5.21) par identification à l'équation (3.14) (voir chapitre 3), on tire les égalités suivantes :

$$i_{Conduction}(t) = \alpha L^{-1} \left\{ \frac{1/R_c}{s^2 \{1 + \tau s\}} \right\} = \frac{\alpha}{R_c} (t - \tau + \tau e^{-t/\tau}) \quad (5.22)$$

$$i_{Capacitif}(t) = \alpha L^{-1} \left\{ \frac{C}{s \{1 + \tau s\}} \right\} = \alpha C (1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.23)$$

$$i_{Absorption}(t) = \alpha L^{-1} \left\{ \frac{Bs^{n-2}}{\{1 + \tau s\}} \right\} = \frac{\alpha B}{\tau} L^{-1} \left\{ \left(\frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} \right) \bullet (s^{n-2}) \right\} \quad (5.24)$$

Posons : $H(s) = \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}}$ et $G(s) = s^{n-2}$, selon le théorème de Laplace (produit de

convolution, Annexe 2), on écrit :

$$L^{-1}(G(s) \bullet H(s)) = \int_0^t G(x)H(t-x)dx$$

avec :

- x et t sont des variables temporelles
- $G(x) = L^{-1}(G(s)) = \frac{x^{1-n}}{\Gamma(2-n)}$
- $H(t) = L^{-1}(H(s)) = e^{-\frac{t}{\tau}}$
- $H(t-x) = e^{-\frac{(t-x)}{\tau}}$

L'équation (5.24) devient alors :

$$i_{Absorption}(t) = \frac{\alpha B e^{-t/\tau}}{\tau \cdot \Gamma(2-n)} \int_0^t x^{1-n} e^{x/\tau} dx \quad (5.25)$$

Pour développer cette l'intégrale de cette équation, il faut intégrer par partie.

Posons :

$$f(x) = x^{1-n} \Rightarrow f'(x) = (1-n)x^{-n} \quad \text{et} \quad g'(x) = e^{x/\tau} \Rightarrow g(x) = \tau e^{x/\tau} - \tau$$

Selon le théorème de l'intégration par partie, on a :

$$\int_a^b g'(x) f(x) dx = g(x) f(x) \Big|_a^b - \int_a^b g(x) f'(x) dx$$

L'équation (5.25) devient :

$$i_{Absorption}(t) = \frac{\alpha B e^{-t/\tau}}{\tau \cdot \Gamma(2-n)} \left[\left((\tau e^{x/\tau} - \tau) \bullet (x^{1-n}) \Big|_0^t \right) - (1-n) \int_0^t (\tau e^{x/\tau} - \tau) x^{-n} dx \right] \quad (5.26)$$

On remarque directement que l'équation (5.26) diverge lorsque $x = 0$, puisque le terme $x^{-n} \rightarrow \infty$ à $x = 0$. Pour contourner cette divergence, on introduit le paramètre m qui prend une valeur la plus proche de zéro mais supérieure de zéro. Ce qui implique qu'on intègre entre m et t au lieu de 0 à t l'intégrale de l'équation (5.25). Donc l'équation (5.26) devient :

$$i_{Absorption}(t) = \frac{\alpha B e^{-t/\tau}}{\tau \cdot \Gamma(2-n)} \left[\left(\left(\tau e^{x/\tau} - \tau \right) \cdot \left(x^{1-n} \right) \right) \Big|_m^t - (1-n) \int_m^t \left(\tau e^{x/\tau} - \tau \right) x^{-n} dx \right] \quad (5.27)$$

Après développement et simplification de l'équation (5.27), nous aurons :

$$i_{Absorption}(t) = \frac{\alpha B}{\Gamma(2-n)} t^{1-n} - \frac{\alpha B e^{-m/\tau}}{\Gamma(2-n)} m^{1-n} - \frac{\alpha B}{\Gamma(1-n)} \int_m^t e^{-(t-x)/\tau} x^{-n} dx \quad (5.28)$$

Le troisième terme de l'équation (5.28) est calculé en utilisant la méthode de trapèze [66] ce qui donne :

$$\int_m^t x^{-n} e^{-(t-x)/\tau} dx = \frac{(t-m) \left[m^{-n} e^{-(t-m)/\tau} + 2 \left(\sum_{i=1}^{g-1} \left(\frac{mg + i(t-m)}{g} \right)^{-n} e^{-(t-m)(g-i)/g\tau} \right) + t^{-n} \right]}{2g} \quad (5.29)$$

avec g est le nombre des trapèzes utilisés.

On pose par la suite :

$$W = \frac{-e^{-m/\tau}}{1-n} \cdot m^{1-n} - \int_m^t e^{-(t-x)/\tau} x^{-n} dx$$

$$W = \frac{-e^{-m/\tau}}{1-n} \cdot m^{1-n} - \frac{(t-m) \left[m^{-n} e^{-(t-m)/\tau} + 2 \left(\sum_{i=1}^{g-1} \left(\frac{mg + i(t-m)}{g} \right)^{-n} e^{-(t-m)(g-i)/g\tau} \right) + t^{-n} \right]}{2g}$$

L'équation (5.28) devient :

$$i_{Absorption}(t) = \frac{\alpha B}{\Gamma(2-n)} t^{1-n} + \frac{\alpha B}{\Gamma(1-n)} W \quad (5.30)$$

$$i_{ch}(t) = \alpha C \left(1 - e^{-t/\tau}\right) + \frac{\alpha}{R_c} \left(t - \tau + \tau e^{-t/\tau}\right) + \frac{\alpha B}{\Gamma(2-n)} t^{1-n} + \frac{\alpha B}{\Gamma(1-n)} W \quad (5.31)$$

5.3.1.1 Modèle approximé

Afin de faciliter les calculs, on a pris quelques approximations dans l'équation de courant de charge (5.31) lors de la régression pour garder que les variables explicatives à grandes influences sur la variable dépendante (courant total). Ce modèle va nous aider à calculer les paramètres R_c , K et n d'une manière moins compliquée. Ces approximations sont les suivantes :

$$\begin{cases} \frac{\alpha B}{\Gamma(2-n)} t^{1-n} \gg \frac{\alpha B}{\Gamma(1-n)} W \\ t \gg \tau \left(e^{-t/\tau} - 1 \right) \text{ pour } t \gg \tau \end{cases} \quad (5.32)$$

Finalement l'équation (5.21) prend la forme :

$$\begin{aligned} i(t) &\cong \alpha C \left(1 - e^{-t/\tau}\right) + \frac{\alpha t}{R_c} + \frac{\alpha B t^{1-n}}{\Gamma(2-n)} \\ i(t) &\cong \alpha C \left(1 - e^{-t/\tau}\right) + \frac{\alpha}{R_c} t + \frac{\alpha C K}{(1-n)} t^{1-n} \end{aligned} \quad (5.33)$$

Le courant capacitif qui est égal à $\alpha C \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$ est connu, donc on peut le transférer vers la partie gauche de l'équation (5.31) et on pose :

$$I'(t) = i(t) - i_{capacitif}(t) \cong \frac{\alpha}{R_c} t + \frac{\alpha C K}{(1-n)} t^{1-n} \quad (5.34)$$

Dans le calcul suivant, le but est de déterminer les paramètres inconnus de l'équation (5.33) qui sont R_c , K et n . Ces trois paramètres vont nous permettre d'isoler les trois contributions du courant de charge. On pose :

$$\begin{cases} X_{i1} = t \\ X_{i2} = t^{1-n} \end{cases}$$

avec X_{i1} et X_{i2} sont des variables explicatives et i est le nombre d'observations ou de mesures. La relation linéaire entre la variable dépendante $I'(t)$ et les variables explicatives est de la forme :

$$I'(t) = \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} \quad (5.35)$$

On veut estimer les paramètres β_1 et β_2 du modèle (équation 5.34) dont les moyennes et la variance des $I'_i(t)$, avec $i=1, \dots$, nombre de points ou d'observations, sont :

$$\begin{aligned} E(I'_i(t)) &= \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} \\ \text{Var}(I'_i(t)) &= \sigma^2, \text{ pour tout } i \end{aligned}$$

L'estimateur de $E(I'_i(t))$ est $\hat{I}'_i(t)$ où

$$\hat{I}'_i(t) = b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} \quad (5.36)$$

L'équation (5.36) représente l'équation de régression, et $e_i = I'_i(t) - \hat{I}'_i(t)$ est le résidu pour l' i ième observation, b_1 est l'estimateur de β_1 et b_2 est celui de β_2 .

Par correspondance entre les deux équations (5.34) et (5.36) on peut écrire :

$$b_1 = \frac{\alpha}{R_c} \quad (5.37)$$

$$b_2 = \frac{\alpha K C}{(1-n)} \quad (5.38)$$

On remarque qu'on a deux équations (b_1 et b_2) à trois inconnus (K , R_c et n) qu'on veut déterminer. Donc il nous faut au moins une troisième équation. Pour contourner cette difficulté on procède numériquement puisque la plage de variation de l'exposant n est connue. Cette plage est généralement entre 0,5 et 0,95. Dans une boucle on fait varier n

pour une plage de 0,5 à 0,95 à des incréments d'ordre de 0,005 (grandeur utilisée dans notre programme) et pour chaque valeur de n on fait une régression linéaire en utilisant le principe de minimisation pour trouver b_1 et b_2 qui donnent l'erreur résiduelle la plus petite. À l'issue de cette boucle on tire la valeur de n , b_1 et b_2 qui vont nous permettre de déterminer R_c et K .

La régression est faite juste sur la partie la plus stable de la courbe du courant de charge (entre les deux points début de régression et fin de régression) là où le comportement diélectrique est linéaire (figure 37)).

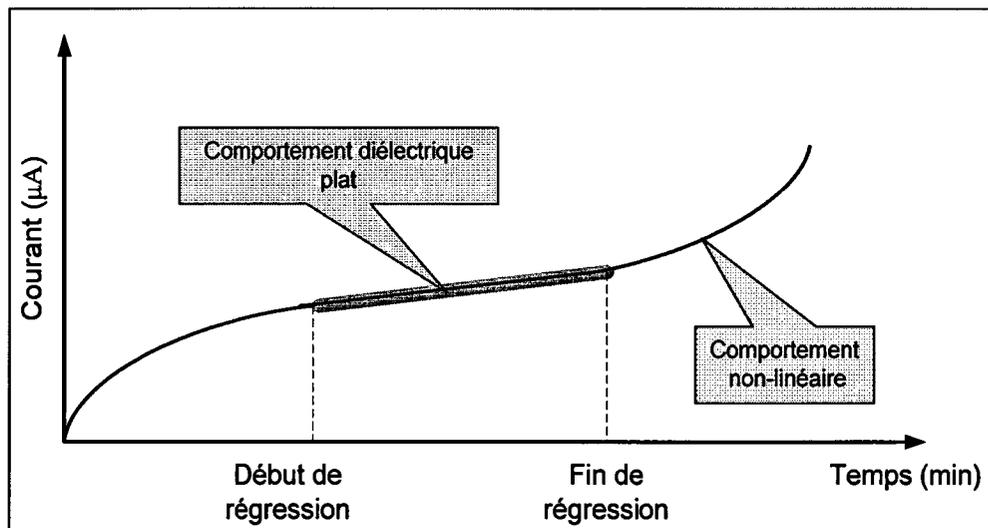


Figure 37 La partie droite de la courbe de charge utilisée pour la régression

Pour obtenir les expressions des deux estimateurs b_1 et b_2 on applique la méthode des moindres carrés qui consiste à minimiser la somme de carrés résiduelle ($\sum e_i^2$) par rapport à b_1 et b_2 sur l'intervalle allant du point début de régression jusqu'au point fin de régression dans une boucle on faisant varier n :

$$\begin{aligned} \text{Minimiser} \left(\sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} e_i^2 \right) &= \text{Minimiser} \left(\sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} \left(I'_i(t) - \hat{I}'_i(t) \right)^2 \right) \\ &= \text{Minimiser} \left(\sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} \left(I'_i(t) - b_1 X_{i1} - b_2 X_{i2} \right)^2 \right) \end{aligned}$$

On a recours aux d\u00e9riv\u00e9es partielles :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left(\sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} e_i^2 \right)}{\partial b_1} &= 2 \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} \left(I'_i(t) - b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} \right) X_{i1} \\ \frac{\partial \left(\sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} e_i^2 \right)}{\partial b_2} &= 2 \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} \left(I'_i(t) - b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} \right) X_{i2} \end{aligned}$$

Annulant ces d\u00e9riv\u00e9es, et apr\u00e8s quelques arrangements nous obtenons le syst\u00e8me suivant :

$$\begin{aligned} b_1 \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i1}^2 + b_2 \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i1} X_{i2} &= \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} I'_i(t) X_{i1} \\ b_1 \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i1} X_{i2} + b_2 \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i2}^2 &= \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} I'_i(t) X_{i2} \end{aligned}$$

La forme matricielle des coefficients de r\u00e9gression, une fois le calcul matricielle est bien fait s'\u00e9crit :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i1}^2 & \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i1} X_{i2} \\ \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i1} X_{i2} & \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i2}^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i1} I'_i(t) \\ \sum_{i=\text{d\u00e9but-regression}}^{\text{fin-regression}} X_{i2} I'_i(t) \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

À ce niveau là, n est connue (la valeur utilisée dans la boucle) les coefficients b_1 et b_2 sont connus. Ces trois valeurs donnent la plus petite erreur résiduelle entre le courant de charge modélisé et celui mesuré. Finalement R_c et K sont égales à :

$$R_c = \frac{\alpha}{b_1} \quad (5.40)$$

$$K = \frac{b_2(1-n)}{\alpha C} \quad (5.41)$$

5.3.1.2 Modèle exact

Ce modèle est équivalent au modèle approximé, déjà calculé, plus la partie négligée dans le modèle approximé, c'est-à-dire le paramètre $\frac{\alpha}{R_c} \left(\tau e^{-t/\tau} - \tau \right) + \frac{\alpha B}{\Gamma(1-n)} W$. Ceci va nous permettre de retrouver tous les paramètres de l'équation (5.31) et de compenser l'erreur due aux approximations prise dans le modèle approximé. L'équation (5.42) suivante représente le modèle complet sans approximation :

$$i_{ch}(t) = \underbrace{\alpha C \left(1 - e^{-t/\tau} \right)}_{\text{Modèle}} + \underbrace{\frac{\alpha t}{R_c} + \frac{\alpha B t^{1-n}}{\Gamma(2-n)}}_{\text{Approximé}} + \underbrace{\frac{\alpha}{R_c} \left(\tau e^{-t/\tau} - \tau \right) + \frac{\alpha B}{\Gamma(1-n)} W}_{\text{Partie Négligée dans le 1^{er} Calcul}} \quad (5.42)$$

Les valeurs de R_c , K et n restent les mêmes que celui du model approximé, mais comme on va le préciser dans les prochains paragraphes, les courants de fuite et d'absorption sont plus précis dans le modèle exact par rapport au modèle approximé.

5.3.2 Analyse de la variance et test de signification

L'analyse suivra les étapes suivantes :

- L'ampleur de la variabilité attribuable à l'écart expliqué par l'équation de régression et par l'écart résiduel ou inexpliqué par l'équation de régression à l'aide des sommes de carrés suivantes :

$$SC_{\text{regression}} = \sum_{i=\text{début-regression}}^{\text{fin-regression}} \left(b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} - \left(\frac{I'_i(t)}{\text{fin-regression-début-regression}} \right) \right)^2$$

$$SC_{\text{résiduelle}} = \sum_{i=\text{début-regression}}^{\text{fin-regression}} (I'_i(t) - b_1 X_{i1} - b_2 X_{i2})^2$$

$$SC_{\text{totale}} = SC_{\text{regression}} + SC_{\text{résiduelle}} = \sum_{i=\text{début-regression}}^{\text{fin-regression}} \left(I'_i(t) - \left(\frac{I'_i(t)}{\text{fin-regression-début-regression}} \right) \right)^2$$

avec : $SC_{\text{regression}}$ est la variation expliquée par la droite de charge, $SC_{\text{résiduelle}}$ est la variation résiduelle et SC_{totale} est la variation totale.

- L'analyse de régression comporte (P+1) paramètres à estimer à l'aide de S observations, les degrés de liberté des sommes de carrés précédentes se décomposent comme suit (tableau V) :

Tableau V

Degrés de liberté

Somme de carrés	Degrés de liberté
SC_{Totale}	S-1
$SC_{\text{regression}}$	P
$SC_{\text{résiduelle}}$	S - (P+1)

- Pour évaluer la qualité de l'ajustement de l'équation de régression entre la variable dépendante $I'(t)$ et l'ensemble des variables explicatives X_1 , X_2 et X_3 , on a recours au coefficient de détermination multiple, noté R^2 . Soit

$$R^2 = \frac{SC_{\text{regression}}}{SC_{\text{Totale}}}; \text{avec } 0 \leq R^2 \leq 1$$

- On veut tester si la régression est significative dans son ensemble. Les hypothèses nulles et alternatives que l'on veut alors soumettre au test sont les suivantes :

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = 0$ (aucune contribution significative des X_j)

$H_1 : \text{au moins un des } \beta_j \neq 0$ (au moins une variable, disons X_j apporte une contribution significative).

Pour effectuer le test, on a recours aux carrés moyens mentionnés précédemment. Il s'agit de comparer le carré moyen dû à la régression avec le carré moyen résiduel en calculant la quantité suivante :

$$F = \frac{SC_{\text{régression}} / P}{SC_{\text{résiduelle}} / (S - P - 1)}$$

Règle de décision : Rejeter H_0 et favoriser H_1 si : $F > F_{y,P,S-P-1}$ où $F_{y,P,S-P-1}$ est distribué selon la loi de Fisher (figure 38) avec P et S-P-1 degrés de liberté et un seuil de signification y).

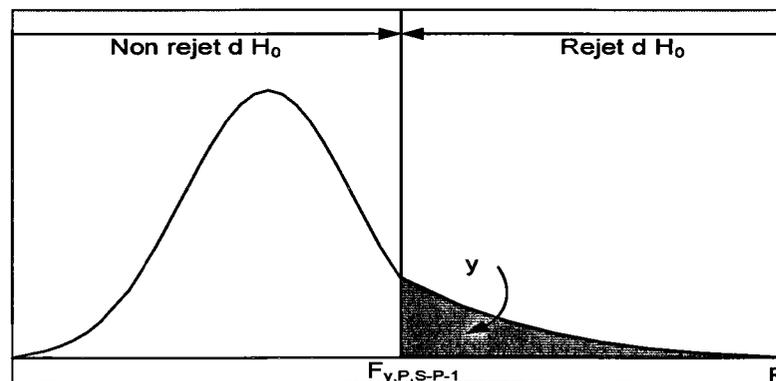


Figure 38 La distribution de la variance au seuil de signification y

5.4 Résultats et étude des cas

Un programme en Visual Basic a été développé pour les calculs des paramètres de modélisation du courant mesuré qu'on vient de détailler dans les précédents paragraphes de ce chapitre. Ce programme nous permet aussi de séparer le courant capacitif, le courant de fuite et le courant d'absorption du courant mesuré modélisé. Ce dernier est déterminé sur toute la période de charge et il apparaît superposé avec le courant de charge mesuré sur le graphe courant en fonction de la tension appliquée. Une courbe d'un courant de charge mesuré pour une isolation de masse en bon état se superposera bien avec celle de son modèle linéaire. Dans le cas d'une isolation dégradée, des non-linéarités apparaîtront sur la courbe du courant de charge mesuré par rapport au modèle linéaire (ce point sera bien élucidé au chapitre 6). Ces non-linéarités proviennent généralement du courant de fuite et donnent une idée sur l'ampleur du défaut de l'isolation de masse de l'enroulement statorique. Des essais ont été réalisés dans ce sens au laboratoire haute tension de l'École de Technologie Supérieure sur des échantillons (barres et bobines) de différentes technologies. Certains essais ont aussi été réalisés à l'IREQ. Un autre essai réalisé sur le terrain sera présenté lui aussi. Dans ce chapitre, le but de ces essais est de vérifier la qualité de la modélisation du courant de charge et de voir qu'elle précision le modèle exact donne t'on par rapport au modèle approximé. Des discussions et des interprétations sur ces essais ainsi que d'autres seront présentées au chapitre 6.

5.4.1 Mesures en laboratoire

Toutes les mesures ont été effectuées en utilisant un amplificateur de haute tension TREK (20 kV – 20 mA). Le courant a été mesuré via l'électromètre Keithley 6517A. Contrairement aux essais sur le terrain, le montage utilisé est un montage à deux électrodes actives. La résistance de mesure (résistance série) utilisée est une résistance de 2,53 G Ω pour tous les essais. Cette résistance donne une constante de temps comprise

entre 4,2 et 13,3 secondes selon les différents échantillons testés. Conséquemment, la constante de temps pour ces essais est du même ordre de grandeur que celle utilisée pour les essais sur le terrain où typiquement une résistance série de $10\text{ M}\Omega$ est utilisée pour un bobinage d'environ $1\ \mu\text{F}$ (constante de temps de l'ordre de 10 s). Toutes les mesures ont été effectuées en utilisant une pente de $1\text{ kV}/\text{min}$ jusqu'à 20 kV . La figure 39 illustre l'arrangement instrumental de mesure en laboratoire. Une photo prise lors des essais en laboratoire sur deux bobines du fabricant Westinghouse est aussi présentée à la figure 40. Ces bobines sont des bobines de réserve de la centrale Beauharnois. Elles ont été fabriquées dans les années 60.

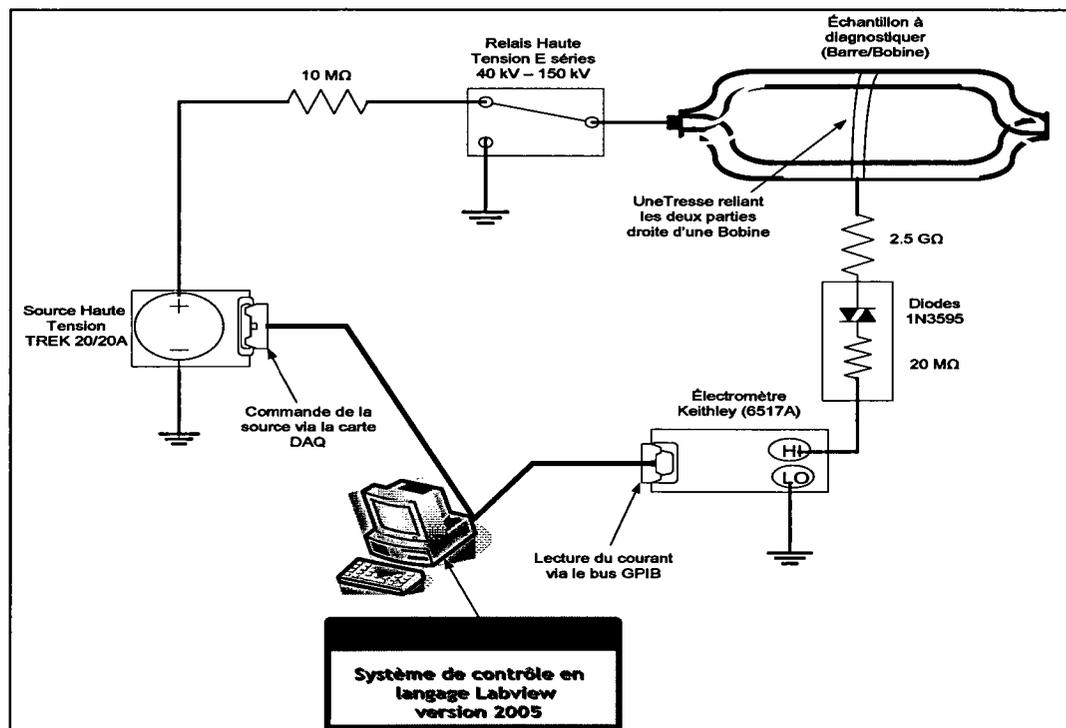


Figure 39 Arrangement instrumental pour des essais en montée progressive en haute tension continue effectués en laboratoire

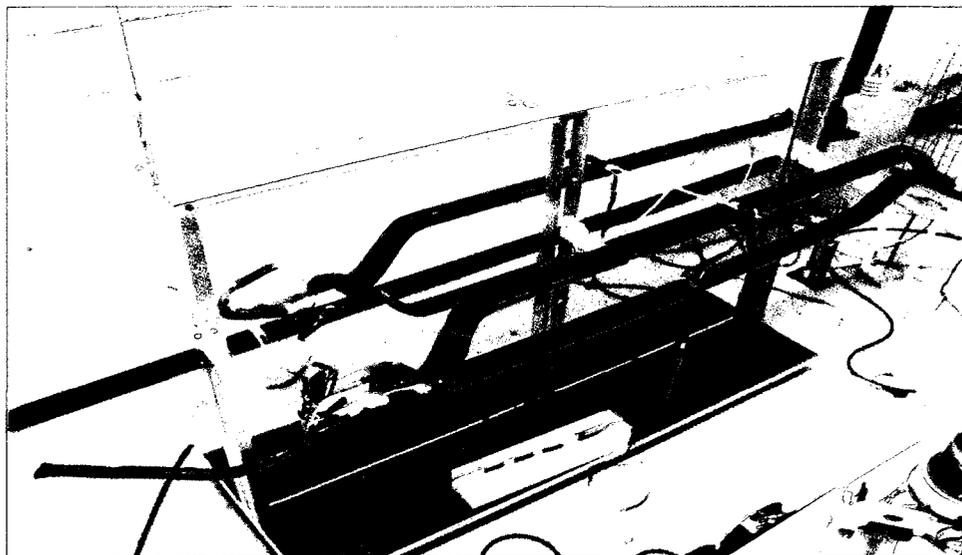


Figure 40 Photo prise lors des essais en laboratoire sur deux bobines du fabricant Westinghouse

5.4.1.1 Bobine Beauharnois : résine en Polyester-mica (Westinghouse)

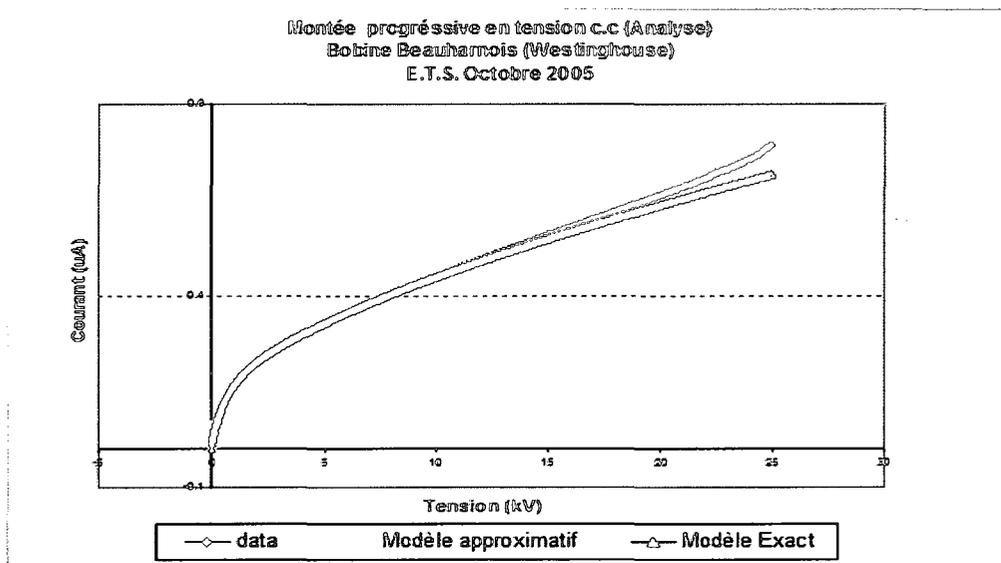


Figure 41 Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant mesuré

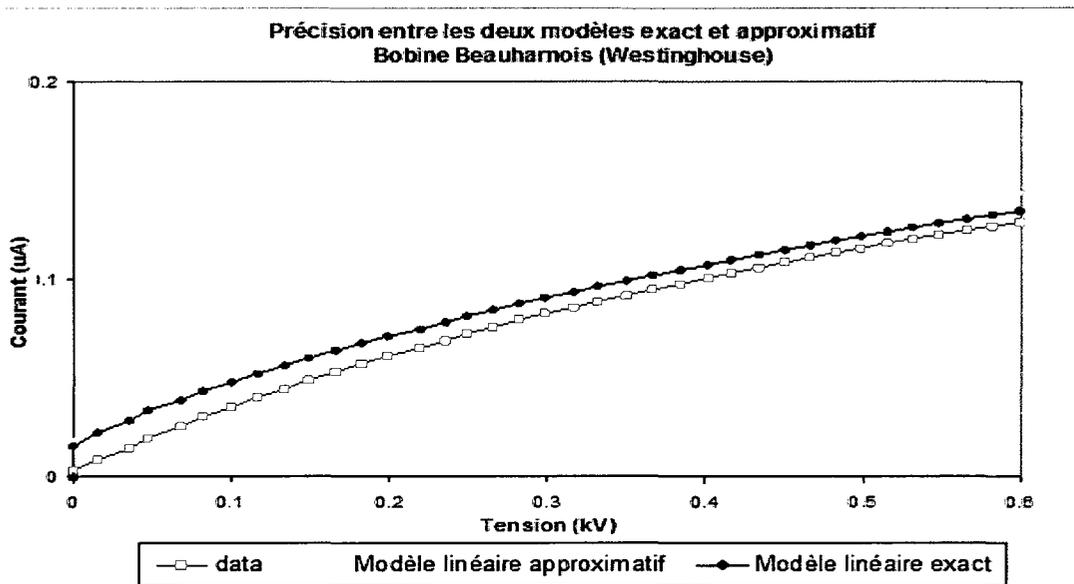


Figure 42 La réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles au début de la courbe

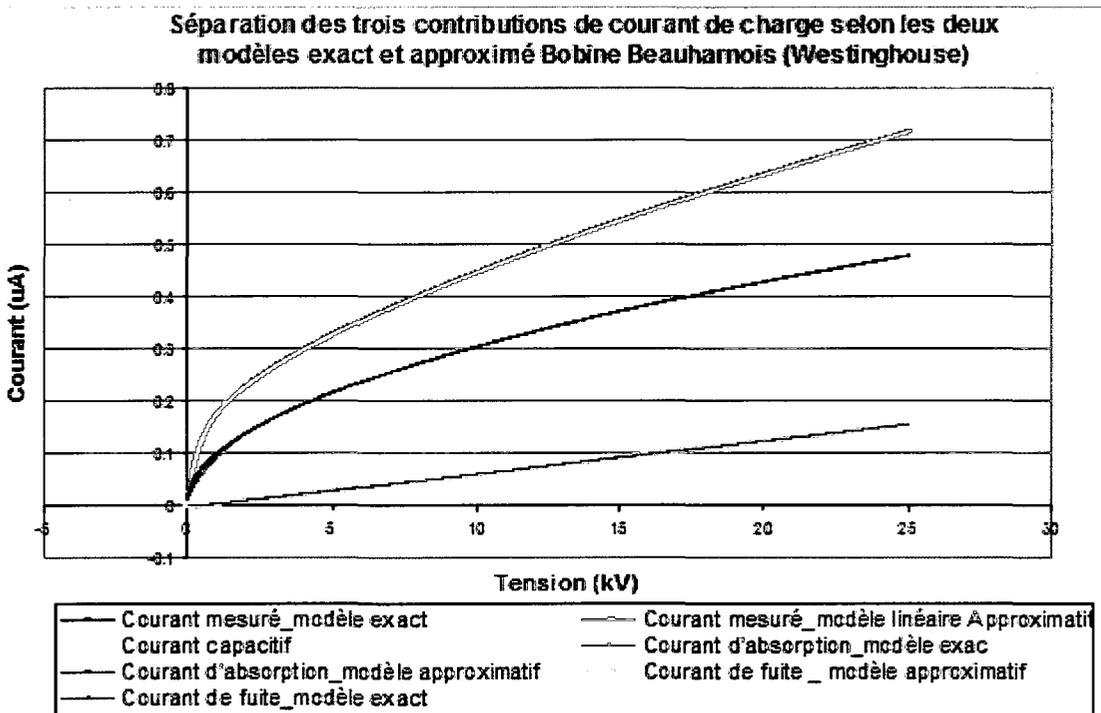


Figure 43 Séparation des trois contributions formant le courant mesuré

Tableau VI

Résultats de modélisation et d'analyse de la variance pour la bobine Beauharnois (Westinghouse)

	Model Approximé	Model exact
b1	$10,5 \times 10^{-5}$	$10,5 \times 10^{-5}$
b2	0,01283	0,01283
R_c (GΩ)	783,93	783,93
K (sⁿ(n-1))	0,0768	0,0768
n	0,505	0,505
Erreur Résiduelle SC_résiduelle	0,0118	0,0052
Erreur de Régression SC_régression	63,6107	64,406
Erreur Totale SC_totale	63,6225	64,4112
P	1	1
S	328	328
Nombre d'observation	330	330
R² (%)	99,98	99,99
F expérimental	3227×10^3	7441×10^3
F théorique	3,88	3,88
Courant total moyen (μA)	0.47585	0.4771
Courant d'absorption moyen (μA)	0.3203	0.3194
Courant capacitif moyen (μA)	0.0809	0.0809
Courant de fuite (μA)	0.074626	0.07672

Sur la figure 41 on ne peut pas voir la différence entre les réponses des deux modèles puisqu'elles sont bien superposées. Cette différence est bien illustrée au début de la courbe comme le montre la figure 42. La figure 43 montre la réponse des trois contributions du courant mesuré séparément pour les deux modèles. La régression est

significative dans son ensemble au seuil de 5% puisque selon le tableau VI, F expérimentale est supérieure à F théorique (voir l'annexe 3) [65] pour les deux modèles (approximé et exact). On remarque que le modèle exact est plus précis (99,99%) que le modèle approximé (99,98%).

5.4.1.2 Bobine Paugan : résine en Asphalte-mica (General Electric)

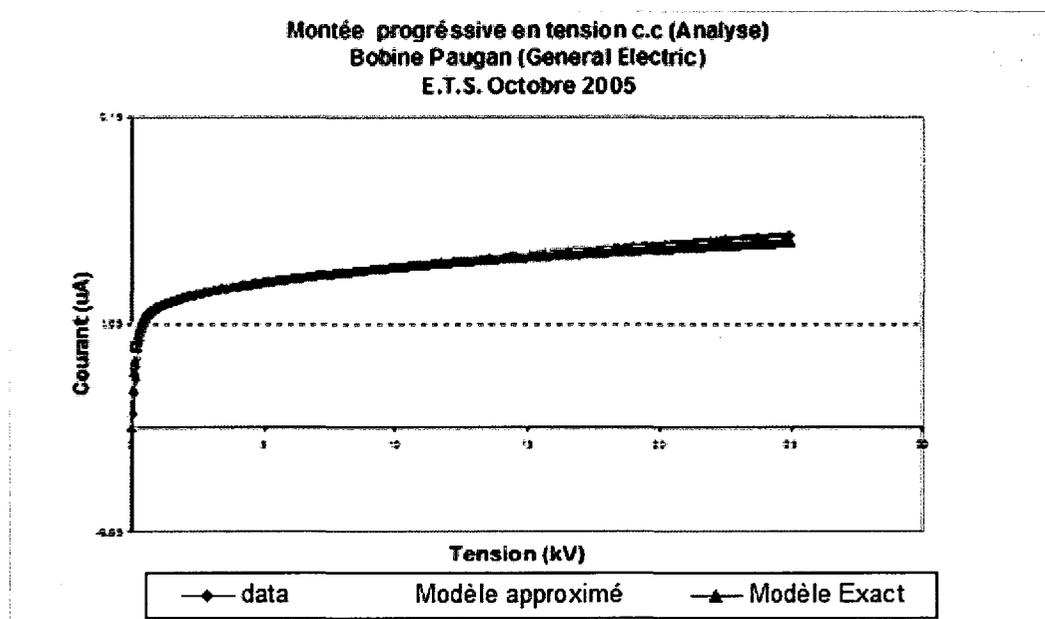


Figure 44 Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant mesuré

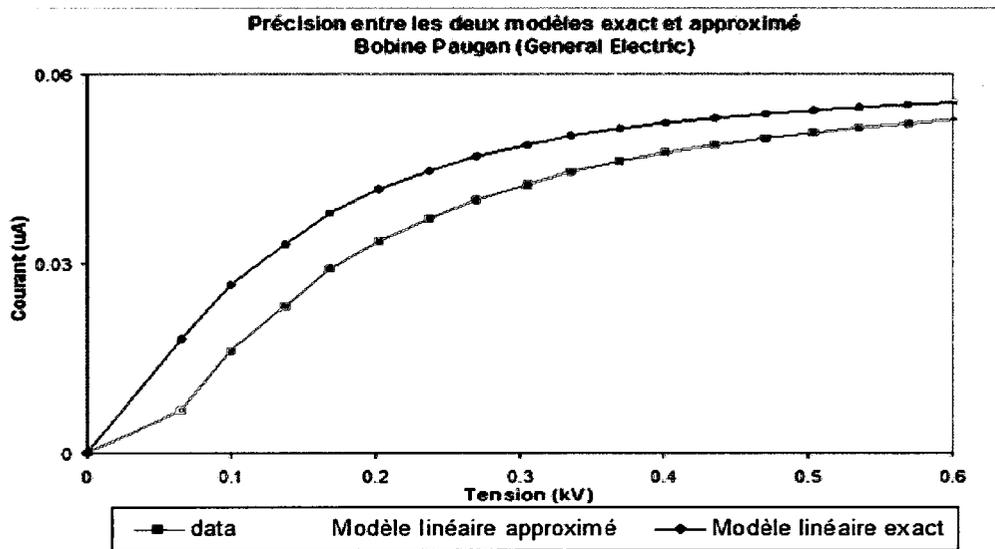


Figure 45 La réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles au début de la courbe

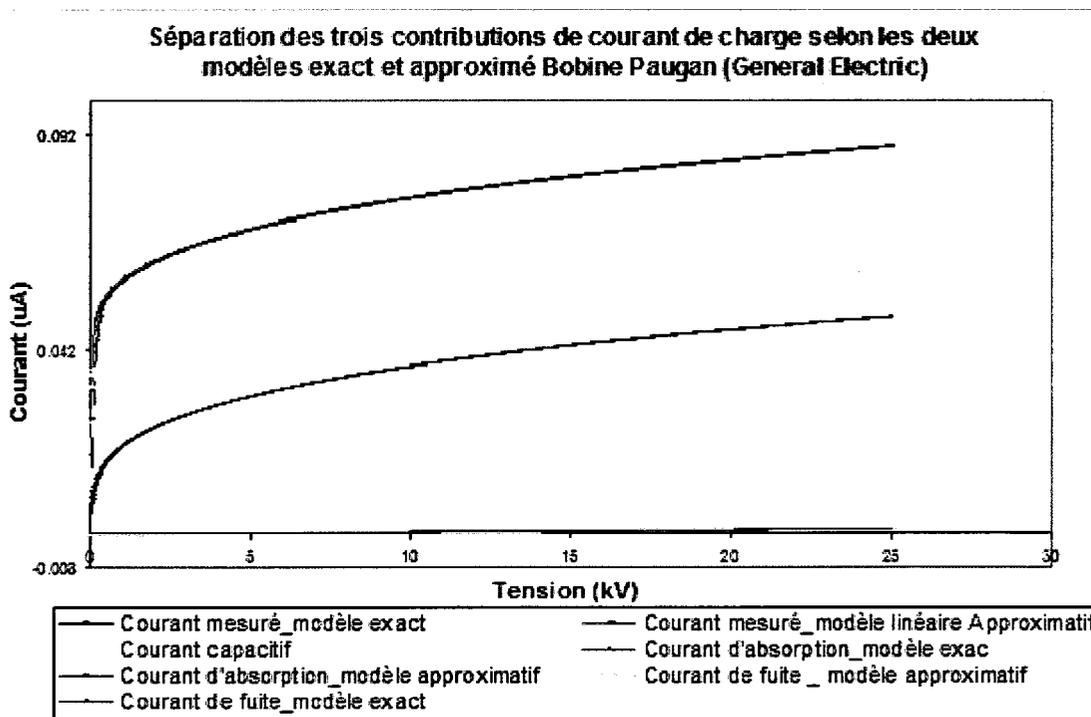


Figure 46 Séparation des trois contributions formant le courant mesuré

Tableau VII

Résultats de modélisation et d'analyse de la variance
pour la bobine Paugan (General Electric)

	Model Approximé	Model exact
b1	$7,25 \times 10^{-7}$	$7,25 \times 10^{-7}$
b2	$64,48 \times 10^{-4}$	$64,48 \times 10^{-4}$
R_c (GΩ)	53088,2	53088,2
k	0,0469	0,0469
n	0,720	0,720
Erreur Résiduelle Sc_résiduelle	0,0002	0,0002
Erreur de Régression SC_régression	1,3956	1,4085
Erreur Totale SC_totale	1,3958	1,4086
P	1	1
S	328	328
Nombre d'observation	330	330
R² (%)	99,99	99,99
F expérimental	$2,1 \times 10^6$	$2,7 \times 10^6$
F théorique	3,88	3,88
Courant total moyen (μA)	0,077515	0,07826
Courant d'absorption moyen (μA)	0,039	0,0393
Courant capacitif moyen (μA)	0,038	0,038
Courant de fuite (μA)	$0,53 \times 10^{-3}$	$0,64 \times 10^{-3}$

La figure 44 montre la réponse du courant d'une bobine de réserve de la centrale Trenche fabriquée dans les années 50. Sur cette figure on ne peut pas voir la différence entre les réponses des deux modèles puisqu'elles sont bien superposées. Cette différence est bien illustrée au début de la courbe comme le montre la figure 45. La figure 46

montre la réponse des trois contributions du courant mesuré séparément pour les deux modèles. Cette bobine présente un courant de fuite très faible, on le voit à peine sur la figure 46 (superposé avec l'axe des x). La régression est significative dans son ensemble au seuil de 5% puisque selon le tableau VII, F expérimentale est supérieure à F théorique pour les deux modèles (approximatif et exact). On remarque que le modèle exact à la même précision (99.99%) que le modèle approximé (99.99%).

5.4.1.3 Barre La Tuque : Résine en Epoxy-mica (Alstom)

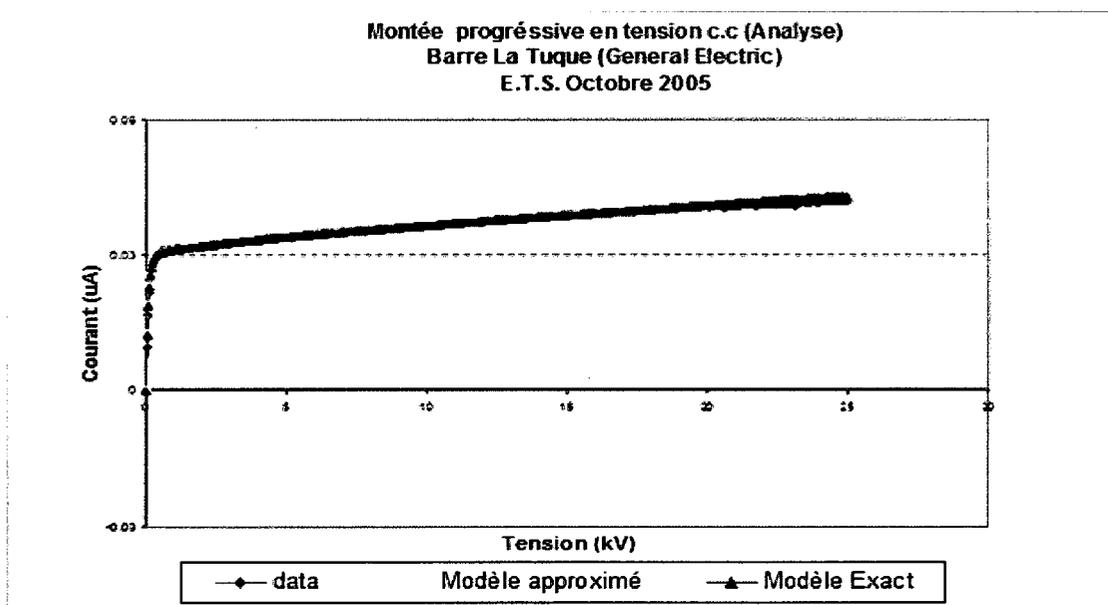


Figure 47 Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant mesuré

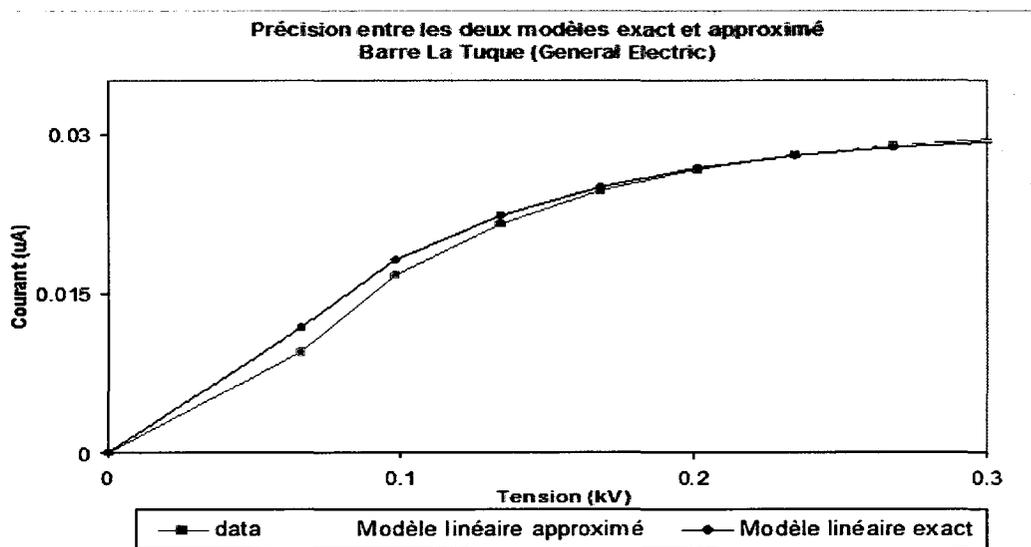


Figure 48 La réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles au début de la courbe

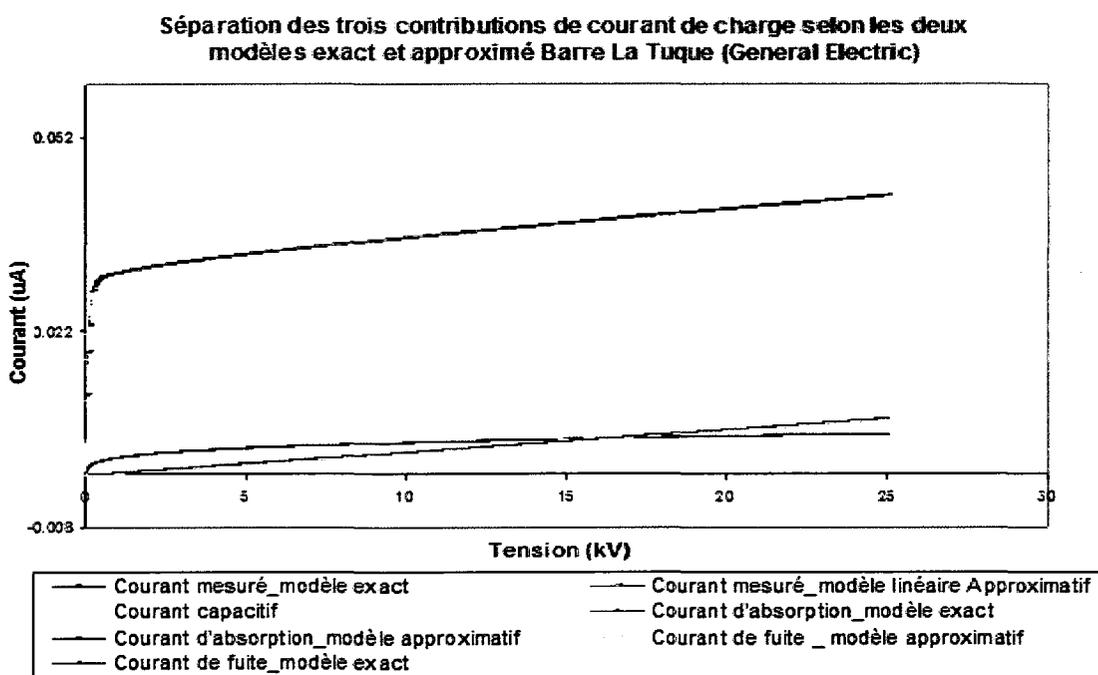


Figure 49 Séparation des trois contributions formant le courant mesuré

Tableau VIII

Résultats de modélisation et d'analyse de la variance
pour la barre La Tuque (Alstom)

	Model Approximé	Model exact
b1	$10,89 \times 10^{-7}$	$10,89 \times 10^{-7}$
b2	$33,2 \times 10^{-5}$	$33,2 \times 10^{-5}$
R_c (GΩ)	25857,46	25857,46
K (s^{^(n-1)})	0,0058	0,0058
n	0,505	0,505
Erreur Résiduelle Sc_{résiduelle}	0,0005	0,0001
Erreur de Régression SC_{régression}	0,3384	0,3374
Erreur Totale SC_{totale}	0,3389	0,3375
P	1	1
S	328	328
Nombre d'observation	330	330
R² (%)	99,85	99,99
F expérimental	$20,04 \times 10^4$	$2,4 \times 10^6$
F théorique	3,88	3,88
Courant total moyen (μA)	0,037178	0,037769
Courant d'absorption moyen (μA)	0,0083	0,0087
Courant capacitif moyen (μA)	0,0281	0,0281
Courant de fuite (μA)	$8,143 \times 10^{-4}$	$9,152 \times 10^{-4}$

La figure 47 montre une réponse du courant mesuré bien superposée avec ceux des courants des deux modèles, bien qu'il y a une légère différence entre la réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles comme le montre la figure 48. La figure 49 montre la réponse des trois contributions du courant mesuré séparément pour

les deux modèles. Cette barre présente un courant de fuite assez important et un courant d'absorption faible par rapport au courant capacitif. La régression est significative dans son ensemble au seuil de 5% puisque selon le tableau VIII, F expérimentale est supérieure à F théorique pour les deux modèles (approximé et exact). On remarque que le modèle exact est plus précis (99.99%) que le modèle approximé (99.85%).

5.4.2 Mesures sur le terrain

5.4.2.1 Alternateur 1 Centrale Murdock Wilson: Polyester-mica (Westinghouse)

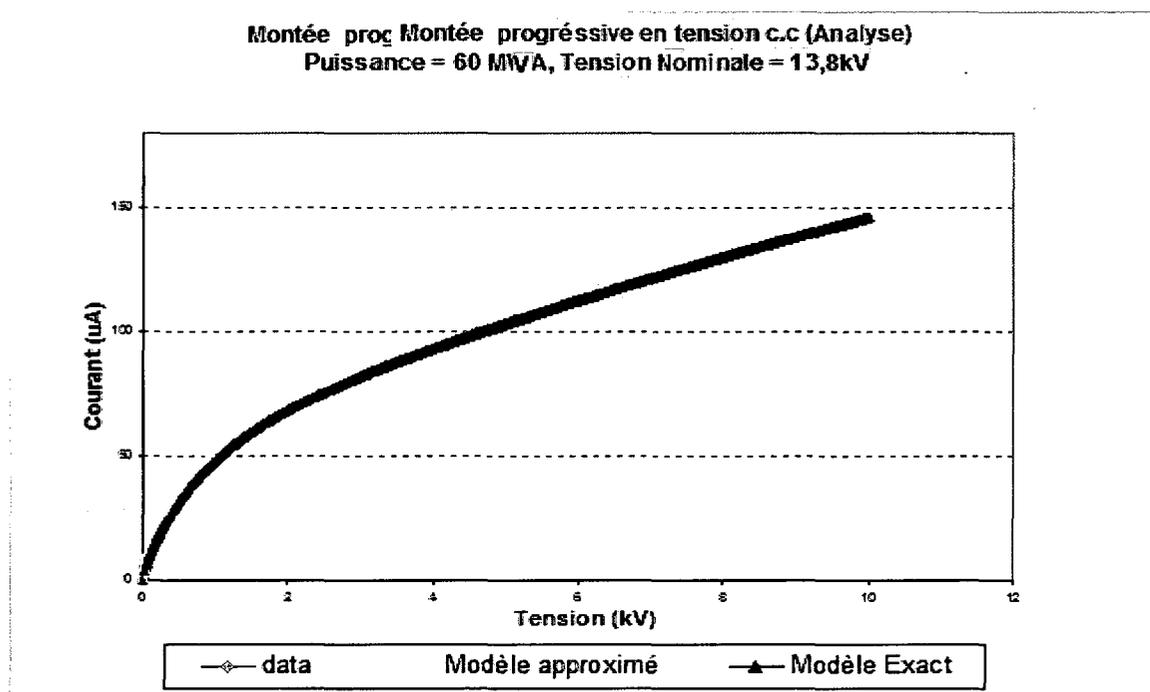


Figure 50 Résultats des deux modèles (exact et approximé) après la modélisation du courant mesuré

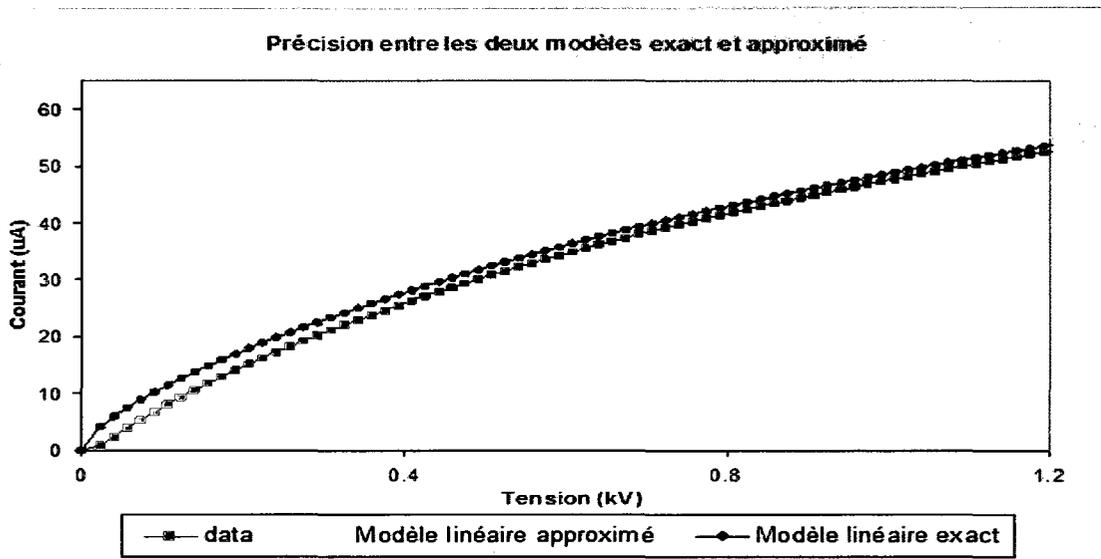


Figure 51 La réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles au début de la courbe

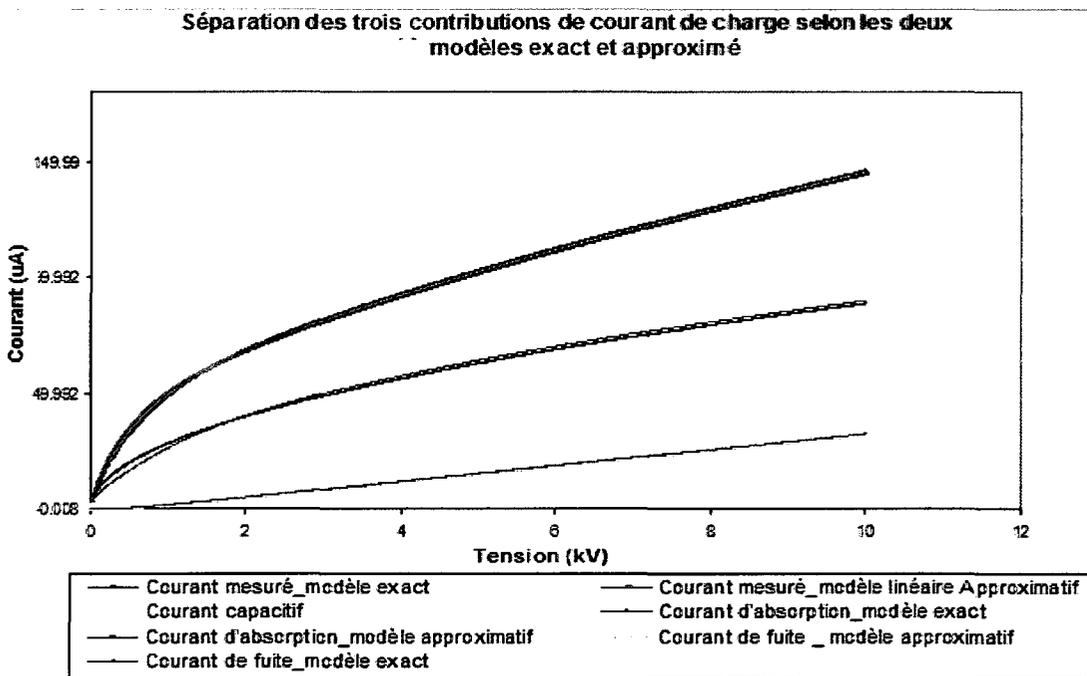


Figure 52 Séparation des trois contributions formant le courant mesuré

Tableau IX
Résultats de modélisation et d'analyse de la variance
pour l'alternateur

	Model Approximé	Model exact
b1	57.06×10^{-3}	57.06×10^{-3}
b2	3,742	3,742
R_c (GΩ)	414,78	414,78
K (sⁿ(n-1))	0,0783	0,0783
n	0,505	0,505
Erreur Résiduelle SC_résiduelle	2749,3	406
Erreur de Régression SC_régression	$6,32 \times 10^3$	$6,44 \times 10^3$
Erreur Totale SC_totale	$6,33 \times 10^6$	$6,44 \times 10^6$
P	1	1
S	328	328
Nombre d'observation	330	330
R² (%)	99,96	99,99
F expérimental	$1,38 \times 10^6$	$9,49 \times 10^6$
F théorique	3,88	3,88
Courant total moyen (μA)	97,37	97,992
Courant d'absorption moyen (μA)	59,3871	60,0103
Courant capacitif moyen (μA)	22,4670	22,4670
Courant de fuite (μA)	15,5148792	15,5148926

La figure 50 obtenue à partir d'une mesure sur l'enroulement complet d'un alternateur hydraulique, montre une réponse du courant mesuré bien superposée avec ceux des courants des deux modèles, bien qu'il y a une très légère différence entre la réponse du courant mesuré et des courants des deux modèles comme le montre la figure 51. La

figure 52 montre la réponse des trois contributions du courant mesuré séparément pour les deux modèles. Ce type de bobine présente un courant de fuite non négligeable et un courant d'absorption important par rapport au courant capacitif. L'ordre de grandeur de ces courants est important par rapport à celui des échantillons présentés précédemment. La régression est significative dans son ensemble au seuil de 5% puisque selon le tableau IX, F expérimentale est supérieure à F théorique pour les deux modèles (approximé et exact). On remarque que le modèle exact est plus précis (99.99%) que le modèle approximé (99.96%).

Les valeurs de K (dépend du matériau) et de n de la bobine Beauharnois (tableau VI) et de l'alternateur complet (tableau IX) sont presque les mêmes puisque la technologie de fabrication est la même (le même fabricant : Westinghouse). Ceci vérifie le bon fonctionnement du modèle de calcul développé lors de ce mémoire.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Dans le cadre de ce projet de recherche, des essais en montée progressive ont été effectués en laboratoire sur des barres et des bobines de réserve provenant de différents manufacturiers et de différentes technologies de fabrication. Des résultats et des discussions seront portés après chaque mesure selon le type de technologie d'isolation utilisée.

6.1 Échantillons

Le tableau X, ci-dessous, énumère les conditions de mesures sur les échantillons testés et donne les paramètres utilisés pour l'analyse des courbes suivant une régression linéaire du courant versus la tension entre deux tensions données. Les plages de tension utilisées pour les interpolations linéaires sont données dans la colonne 7. Les deux colonnes 6 et 8 donnent respectivement les niveaux de tensions d'essai (tension maximale atteinte lors de l'essai) et la durée d'essai correspondants à chaque échantillon. Les valeurs de la capacité géométrique telle que lue par un multimètre de chaque échantillon sont données dans la colonne 5. La température ambiante d'essai correspondante à chaque échantillon est pratiquement la même comme le montre la colonne 4 du tableau X.

Tableau X
Conditions de mesure de chaque échantillon

Bobine ou barre	Fabricant	Technologie	T_{amb} (°C)	C (nF)	U_{test} (kV)	Plage de calcul des paramètres de régression (kV)	Durée d'essai (minute)
Bobine-Paugan	General Electric	GE-Asphalte	24	2,31	25	10 – 20	25
Barre n°1 Outardes III	General Electric	GE-Micamat	24	2,5	25	10 – 20	25
Barre 175B0039	General Electric	GE-Hydromat ⁴	24	2,24	35	10 – 20	14
Barre 175B0065	General Electric	GE-Hydromat ⁴	24	2,36	35	10 – 20	14
Barre 175B0087	General Electric	GE-Hydromat ⁴	23	2,36	35	10 – 20	14
Barre 175B0187	General Electric	GE-Hydromat ⁴	23	2,55	35	10 – 20	14
Barre Manic III	Alstom	Alstom-Isotenax ⁴	24	5,32	25	10 – 20	25
Barre LaTuque	Alstom	Alstom-isotenax-N ⁴	24	1,69	25	10 – 20	25
Barre n°2 Outardes III	Alstom	Alstom-Duritenax ⁴	24	3,65	25	10 – 20	25
Bobine n°1 Beauharnois	Westinghouse	Westinghouse Thermalastic ⁵	24	4,96	25	10 – 20	25
Bobine n°2 Beauharnois	NEC ⁶	NEC Polyester ⁵	24	4,45	25	05 – 15	25
Bobine Shawinigan	NEC ⁶	NEC-Polyester ⁵	24	4,66	25	05 – 15	25

⁴ La résine d'imprégnation utilisée est l'Époxy-mica.

⁵ La résine d'imprégnation utilisée est le Polyester-mica.

⁶ NEC est National Electric Coil.

6.2 Mesures et discussions

Les figures 53 à 64 illustrent les essais effectués sur les 12 échantillons du tableau X. La courbe expérimentale est illustrée à la partie -a-, alors que le résultat de l'analyse linéaire est illustré à la partie -b-.

Sur ces figures, le courant de charge mesuré est la somme du courant capacitif, du courant d'absorption, du courant d'ionisation et du courant de conduction. Le courant capacitif obtenu sur chaque échantillon est constant pendant tout l'essai puisque la pente dv/dt est constante. Cependant, le graphe du courant de charge est légèrement arrondi au début de l'essai en raison de la résistance série utilisée pour la mesure. Les paramètres R_c , K et n , discutés dans le chapitre précédent, sont présentés sur les figures 53-b à 64-b. Les deux paramètres K et n dépendent uniquement du matériau isolant concerné. Ils ne dépendent donc pas de la taille (capacité) de l'échantillon et devraient être les mêmes pour une phase complète ou une barre de réserve si les matériaux sont identiques, tandis que le paramètre R_c est proportionnel au nombre de barres ou de bobines.

On aborde notre analyse, dans les prochains paragraphes, selon le nom du fabricant et le type de matériau isolant constituant le système d'isolation d'une barre ou d'une bobine mentionné dans le tableau X.

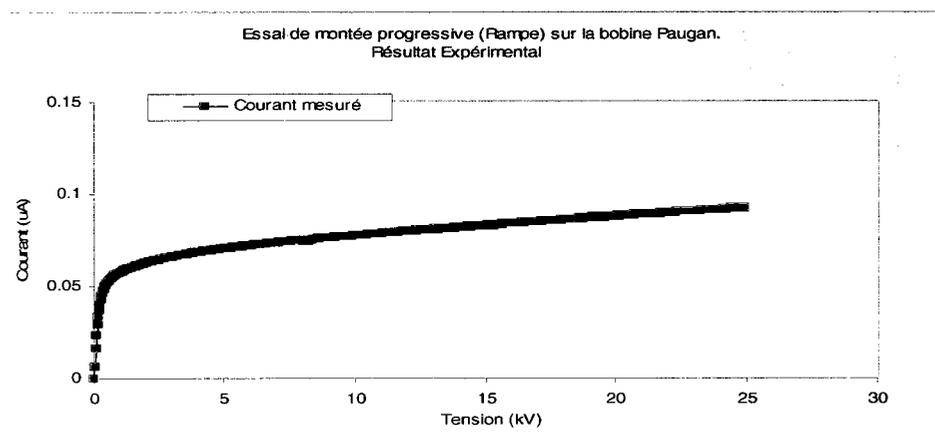
Au long de ce chapitre les valeurs des courants mesurés portés dans tous les tableaux ci-dessous sont des valeurs moyennes exprimées selon l'équation suivante :

$$\bar{I} = \frac{\sum_{i=1}^z I_i}{z}$$

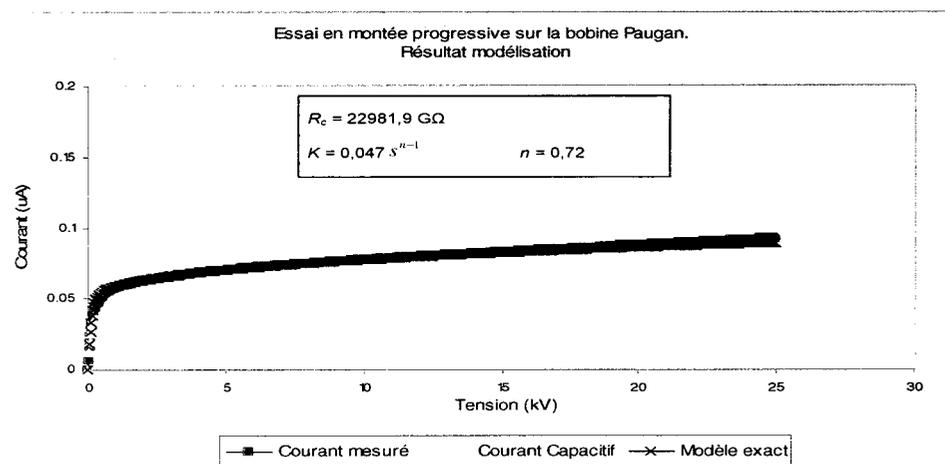
avec : \bar{I} est la valeur moyenne, I_i est la i ème mesure du courant et z est le nombre de mesures ou d'observations.

6.2.1 Asphalte (General Electric)

6.2.1.1 Mesures



-a-



-b-

Figure 53 Essai de montée progressive sur la bobine Paugan
 a) Courant de charge mesuré
 b) Modélisation du courant mesuré

6.2.1.2 Discussion

La figure 53-a représente le courant de charge mesuré sur la bobine Paugan. Cet échantillon est à base d'une isolation en Mica enrobé d'asphalte modèle General Electric de classe thermique « Class B 130°C ». Cette substance est constituée par des lamelles de mica et une matrice d'asphalte. Ce matériau contient une quantité limitée de polyester thermoplastique (PET) et il est fortement polaire. Sous l'influence du champ électrique un plus grand nombre de dipôles par volume unitaire s'aligneront dans le champ. De ce fait, plus les charges induites seront neutralisées sur les électrodes plus le courant de charge augmente pour maintenir le potentiel appliqué. Ceci est montré sur la figure 53-a par une inclination de la courbe du courant de charge sous forme d'une pente plus raide. Le problème souvent rencontré avec ce type d'isolant est la délamination des couches de mica, en particulier à l'extrémité de la barre où il subit la température et la contamination de l'huile (craquage de périmètre).

La figure 53-b représente le résultat de la modélisation du courant de charge pour l'échantillon en question, elle illustre clairement la contribution du courant de fuite.

Le tableau XI, présenté ci-dessous, résume les résultats obtenus sur les différents échantillons selon différents critères mentionnés dans le chapitre 3 (normes IEEE et critère d'Hydro-Québec). On remarque bien sur ce tableau, que la bobine Paugan présente un courant de fuite négligeable. De plus, les valeurs de l'indice de polarisation (IP)⁷, de la résistance d'isolation ($RI_{1mn} @ 40^{\circ}C$)⁸ et du paramètre $R'C_{1min} @ 40^{\circ}C$ (critère utilisé par Hydro-Québec)⁹ sont supérieures aux valeurs minimales recommandées par la norme IEEE 43-2000 [9] (voir chapitre 3).

⁷ Pour la classe thermique B (voir la norme IEEE 43-2000), la valeur minimale de l'IP est de 2.

⁸ Cette bobine est fabriquée avant 1972. RI corrigé à 40°C minimum selon la norme est de 14,8 MΩ (la tension nominale : 13,8 kV).

⁹ Pour le cas d'asphalte la valeur minimale de R'C corrigé à 40°C est de 45.

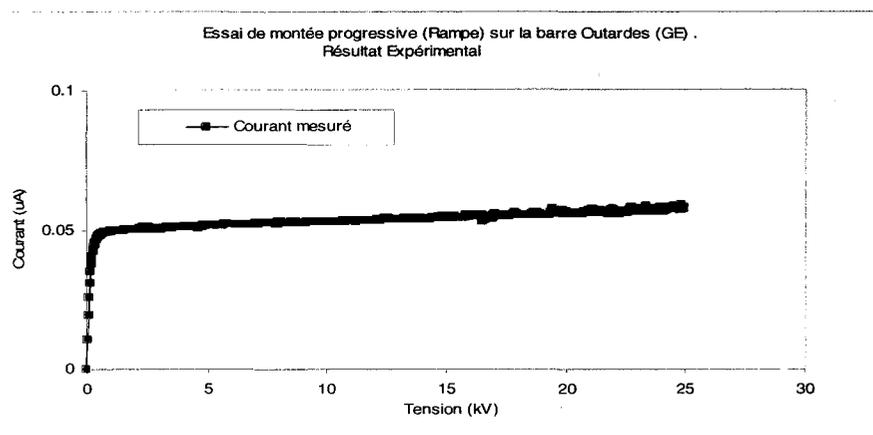
Tableau XI

Résultats des mesures selon différents critères pour le cas d'une isolation à base d'une résine en Asphalte-mica (Fabriquant : General Electric)

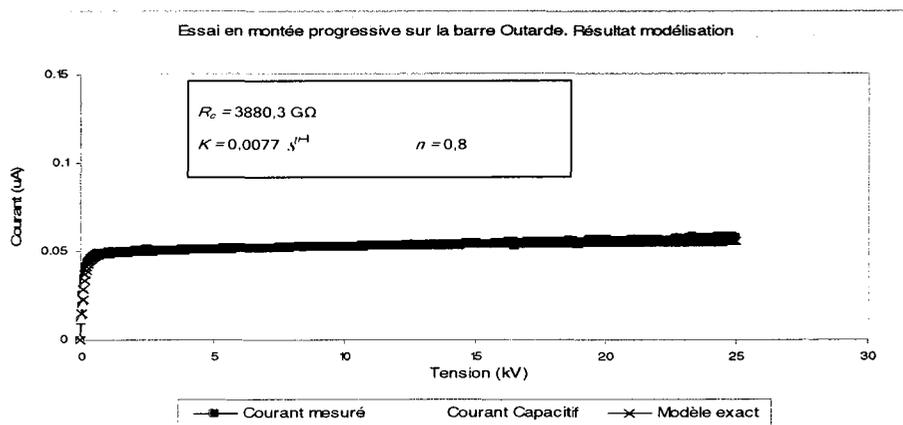
\bar{I}_{total} nA	$\bar{I}_{\text{capacitif}}$ nA	$\bar{I}_{\text{absorption}}$ nA	\bar{I}_{fuite} nA	$\frac{\bar{I}_{\text{fuite}}}{\bar{I}_{\text{total}}}$ %	Classe Thermique	IP	K_T	$R_{I_{\text{min}}}$ Corrigée à 40°C GΩ	$R'I_{\text{min}}$ Corrigée à 40°C GΩ	$R'I_{\text{min}} \cdot C$ s
78,4	38	39	1	1,38	B	5,16	0,33	57,61	58,05	406,51

6.2.2 Époxy-mica: Hydromat, Micamat (General Electric); Isotenax, Isotenax-N, Duritenax (Alstom)

6.2.2.1 Mesures

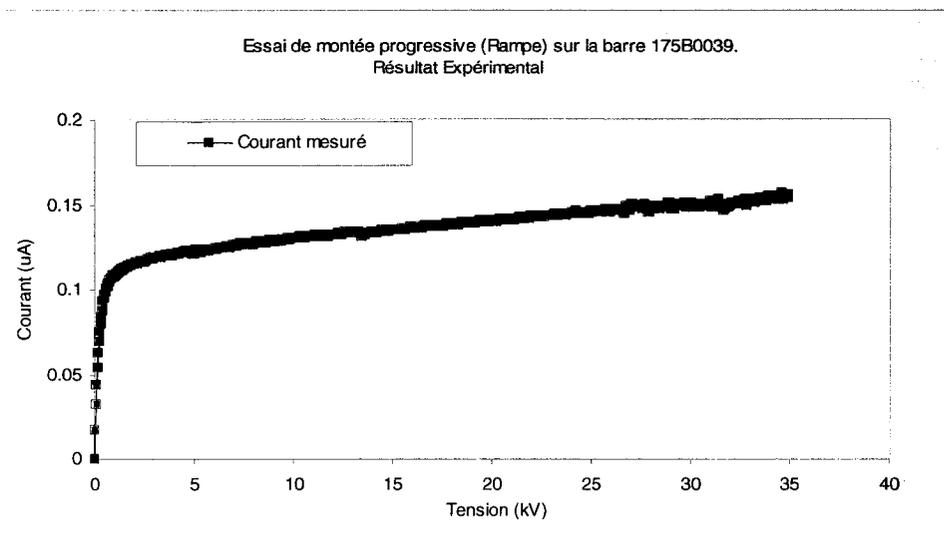


-a-

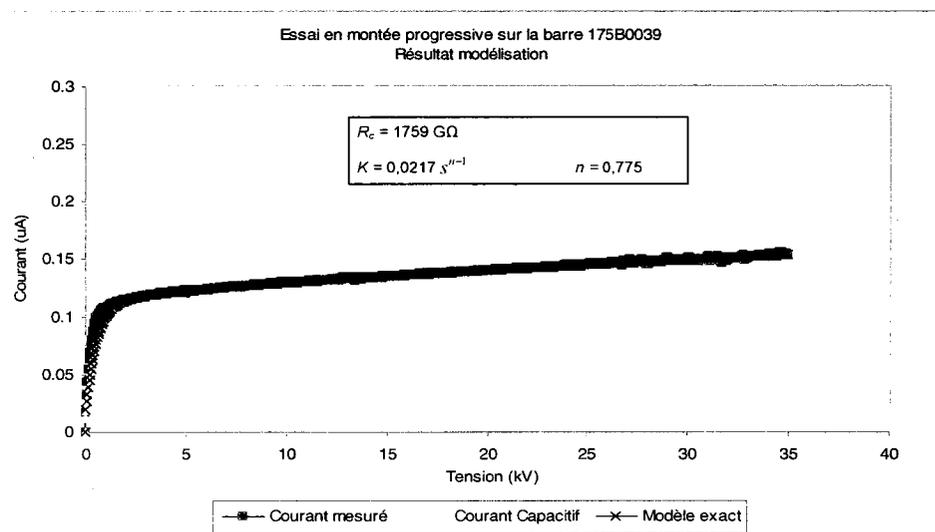


-b-

Figure 54 Essai de montée progressive sur la barre n°1 Outardes III (GE)
 a) Courant de charge mesuré
 b) Modélisation du courant mesuré

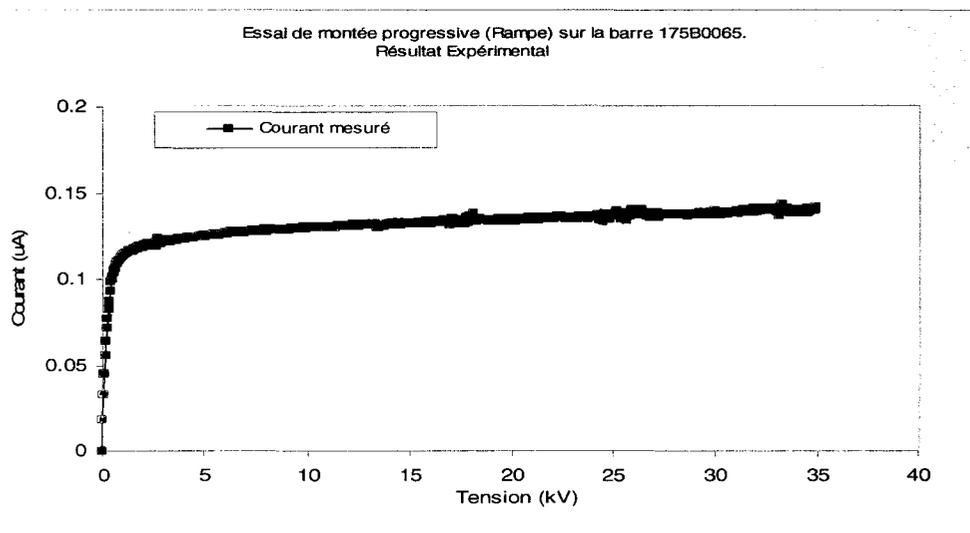


-a-

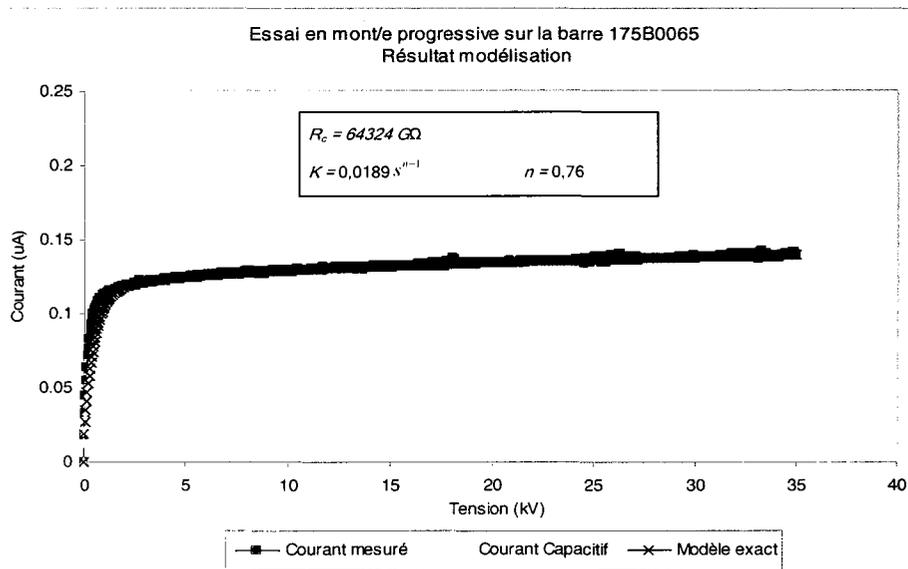


-b-

Figure 55 Essai de montée progressive sur la barre 175B0039 après vieillissement
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré

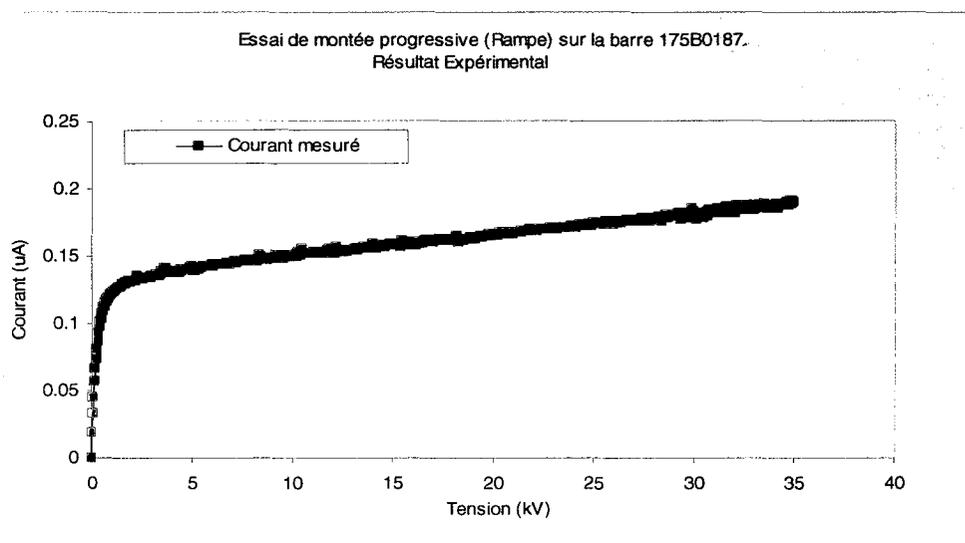


-a-

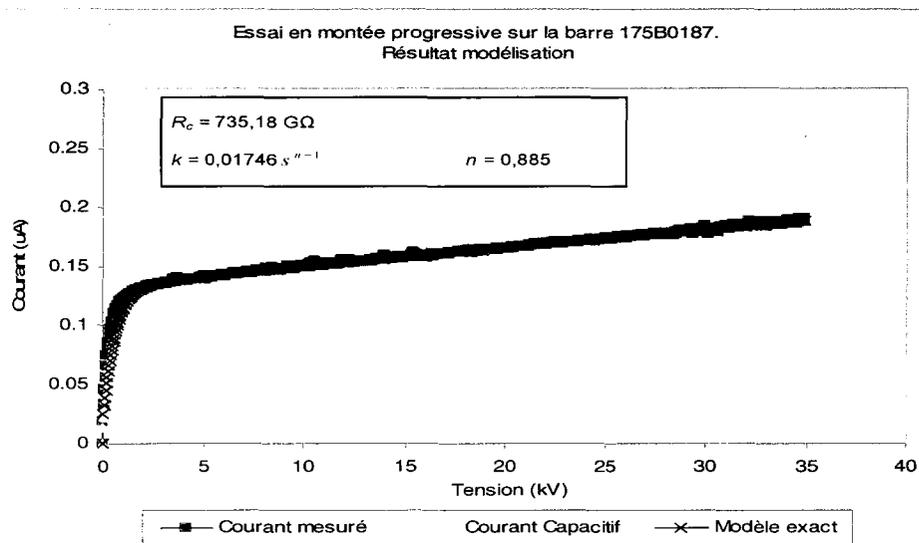


-b-

Figure 56 Essai de montée progressive sur la barre 175B0065 après vieillissement
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré



-a-



-b-

Figure 57 Essai de montée progressive sur la barre 175B0187 après vieillissement
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré

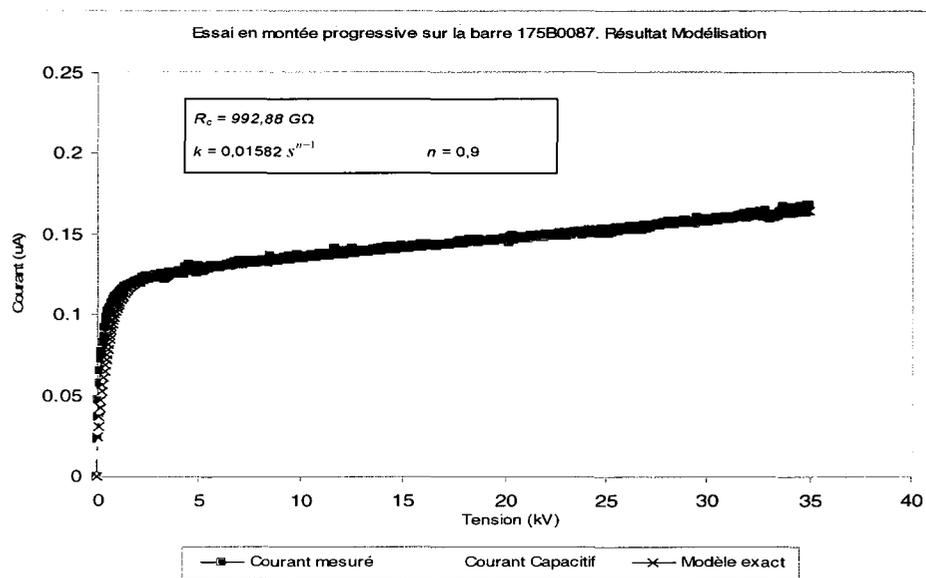
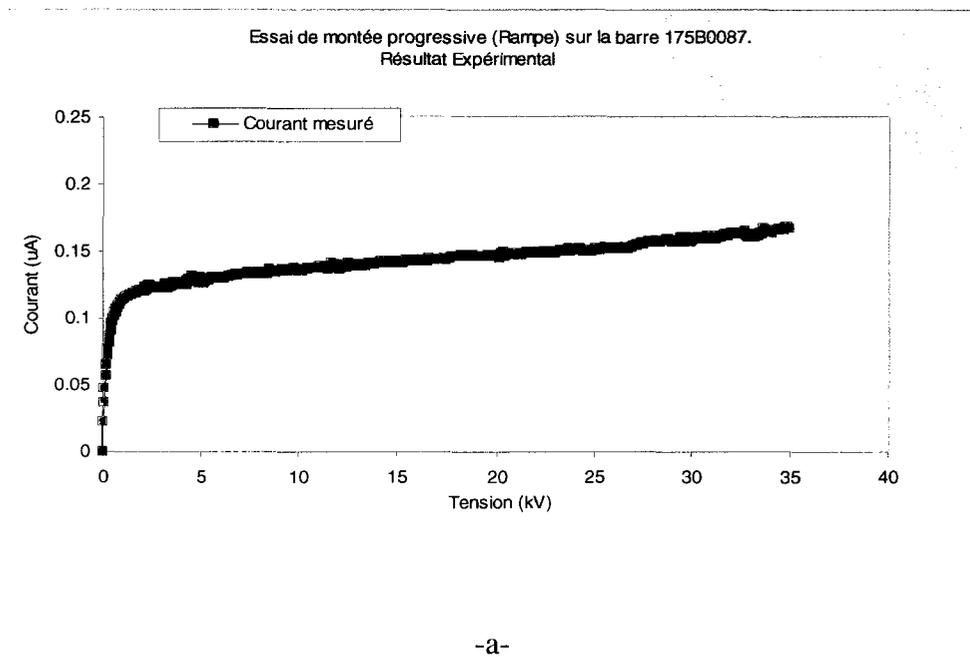
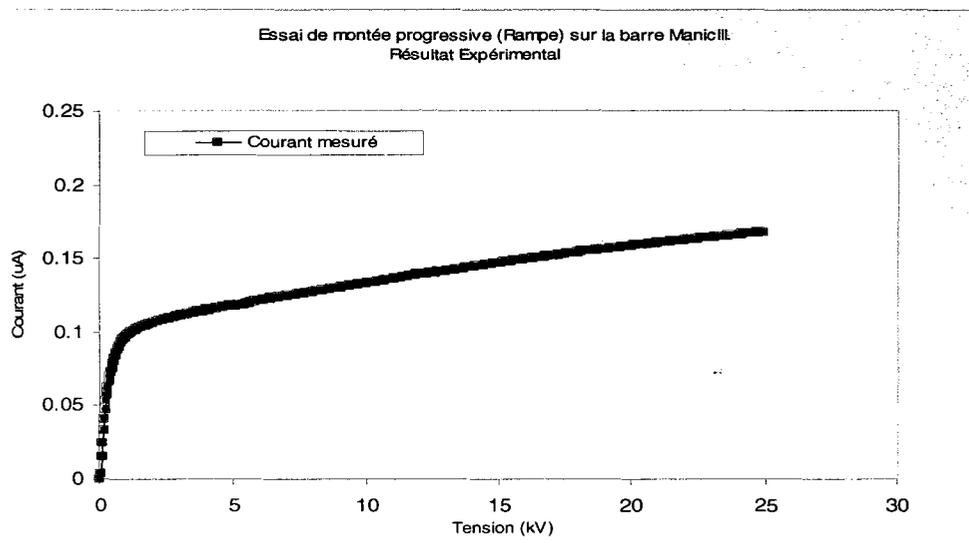
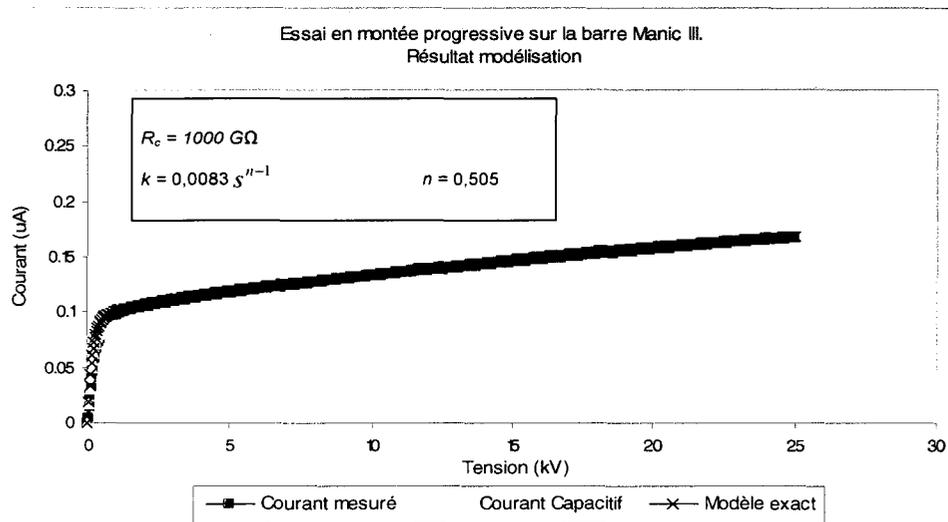


Figure 58 Essai en montée progressive sur la barre 17B0087 après vieillissement
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré

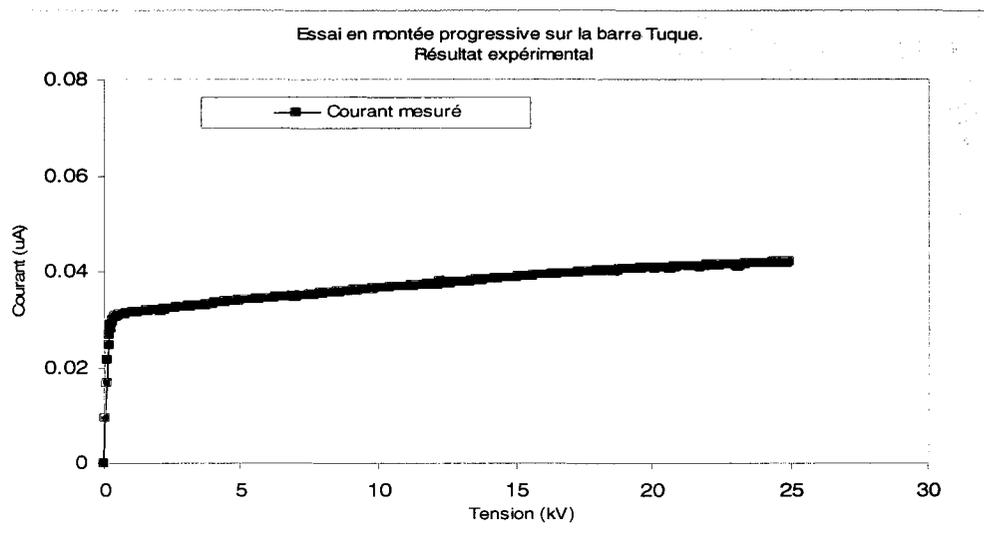


-a-

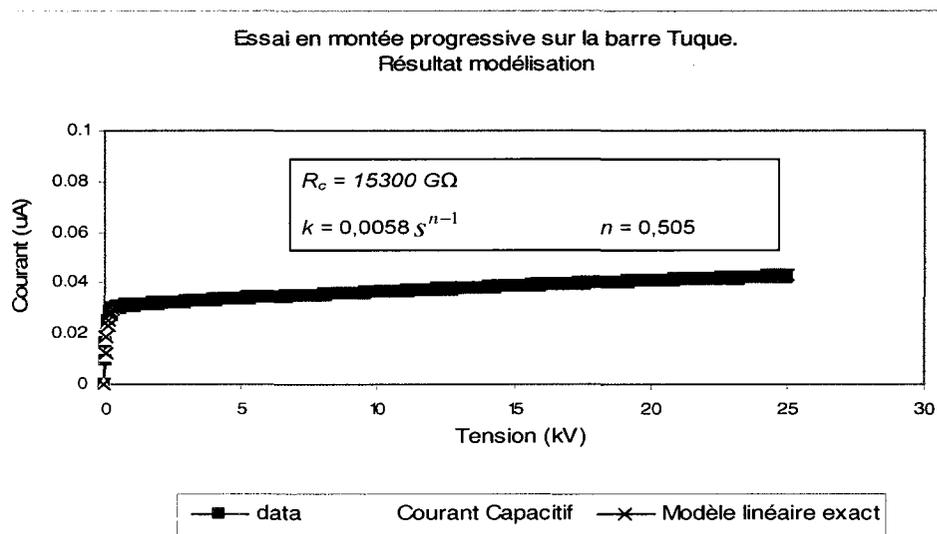


-b-

Figure 59 Essai de montée progressive sur la barre Manic III
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré

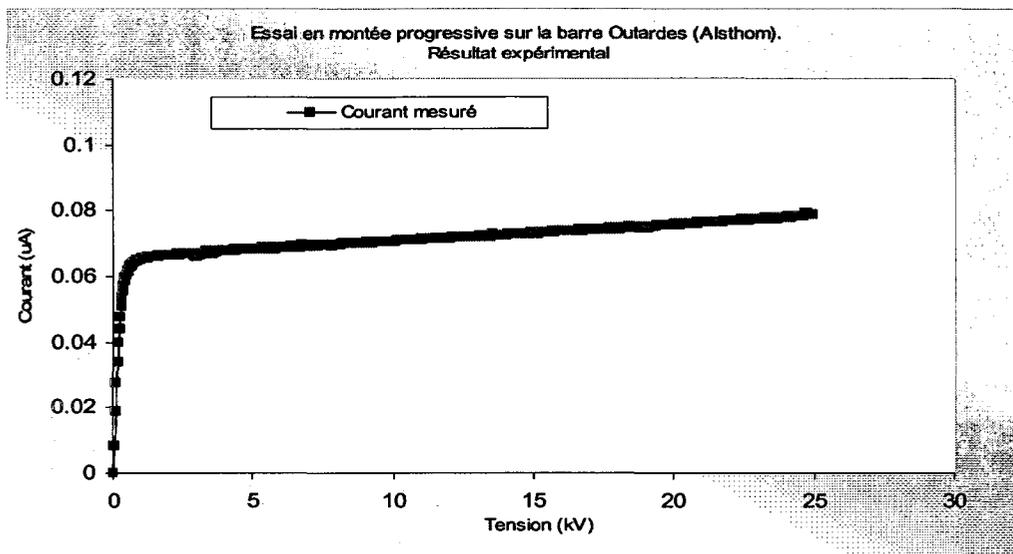


-a-



-b-

Figure 60 Essai de montée progressive sur la barre La Tuque
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré



-a-

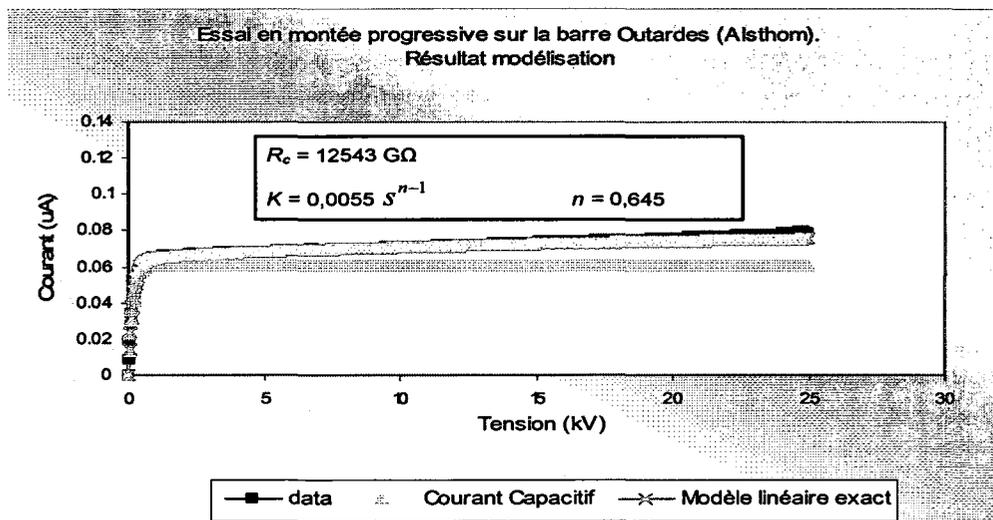


Figure 61 Essai de montée progressive sur la barre n°2 Outardes III (Alstom)
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré

6.2.2.2 Discussion

La figure 54-a représente le courant de charge mesuré sur une barre de réserve n°1 de la centrale Outardes III. Le système d'isolation de cette barre est à base d'époxy Micamat de technologie General Electric. Ce matériau est classé « Class F 155°C » et utilise la résine époxy comme matrice. Dans ce système le procédé de fabrication est le même que pour le mica enrobé de polyester sauf que la matrice utilisée est une résine époxy. Comme cette dernière a une caractéristique d'adhésion meilleure que la résine polyester, ce type d'isolement a moins de problème de délamination que le mica enrobé de polyester.

Les figures 55-a, 56-a, 57-a et 58-a représentent respectivement le courant de charge mesuré sur les barres de réserve 175b0039, 175b0065, 175b0187 et 175b0087. La mesure du courant de charge était faite après que ces barres ont été exposées pendant 168 heures à une température de 60°C et à une humidité relative de 75% (discuté en fin de ce chapitre). Ces échantillons sont à base d'une isolation en Hydromat de technologie General Electric. Cette substance est à base du mica enrobé de résine époxy [résine riche] appartenant également au « Class F 155°C ». Le procédé de fabrication est un peu différent de l'Epoxy Micamat. La résine d'imprégnation est une résine époxy renforcée par un oxyde métallique et d'autres renforts comme le mica, les fibres de verre...etc. Les barres sont imprégnées dans cette résine, puis elles sont cuites à haute température et haute pression pour que la résine époxyde durcisse. Cette élaboration permet d'obtenir un isolant sans aucune cavité et capable de fonctionner avec une endurance diélectrique très élevée.

Les figures 54-a, 55-a, 56-a, 57-a et 58-a montrent un courant de polarisation relativement petit par rapport au courant capacitif, confirmant la structure faiblement polaire des molécules d'époxy. De ce fait, le courant de polarisation ne contribue pas de manière significative au courant mesuré. On remarque sur ces figures que le courant

capacitif constitue la majeure partie du courant total mesuré, tandis que les composantes de surface et de conduction (courant de fuite) sont très faibles et négligeables jusqu'au niveau maximum de la tension d'essai, comme le montre les chiffres du tableau XII.

La figure 54-b, 55-b, 56-b, 57-b, 58-b illustrent les résultats obtenus après la modélisation du courant de charge. On voit sur ces figures une non-linéarité du courant de charge par rapport au model linéaire. Cette non-linéarité est bien distinguée qu'une fois le niveau maximum de tension ait atteint. La contribution du courant de fuite peut être facilement distinguée pour les barres Outardes III (n°1), 175B0039, 175B0087 et 175B0187, tandis que pour la barre 175B0065 cette contribution est à peine distinguée. Les trois critères discutés dans le paragraphe précédent sont bien respectés comme le montre tableau XII.

Tableau XII

Résultats des mesures selon différents critères pour le cas d'une isolation à base d'une résine en Époxy-mica (General Electric)

Barre	Outardes III n°1	175B0039	175B0065	175B0087	175B0187
I_{total} nA	53,3	135,8	131,2	143	160
$I_{\text{capacitif}}$ nA	41,4	92,8	99	98	105
$I_{\text{absorption}}$ nA	11,3	33,4	32,7	43,9	38
I_{fuite} nA	0,6	9,6	0,95	1	1,67
$I_{\text{fuite}} / I_{\text{total}}$ %	1,13	7	0,72	0,7	10,46
Classe Thermique	F	B	B	B	B
IP	6,23	2,61	5,44	4,43	2,24
K_T	0,33	0,33	0,33	0,307	0,307
$RI_{\text{min}} @ 40^\circ\text{C}$ GΩ	229,86	95,45	151,18	99,65	67,33
$R'I_{\text{min}} @ 40^\circ\text{C}$ GΩ	231,02	162,11	151,18	99,65	135,41
$R'I_{\text{min}}\text{C}$ s	1750,81	1100,76	1099,9	715,92	1121,9

Le courant de charge mesuré sur la barre Manic III est représenté sur la figure 59-a. La technologie d'isolation est à base d'Isotenax de classe thermique B. Cet isolant utilise seulement du papier mica et un nombre d'acide élevé du polyester. La résine époxydique d'imprégnation utilisée, contient des quantités significatives de mélanges de solvant. Ces mélanges seront enlevés par la suite une fois que le ruban adhésif est enroulé autour de la barre statorique.

La barre La Tuque, représentée sur la figure 60-a, est isolée à l'aide d'une isolation en Isotenax-N. Ce dernier est introduit en 1978 par Alsthom Electromécanique SA et il est fait avec peu de solvants, une résine d'époxy riche et du papier mica supporté par du verre. La résine d'imprégnation est de l'époxy novolac traitée partiellement avec du résitol (Stages). Il est de la classe « Class F 155°C ».

La figure 61-a, représente le courant de charge mesuré sur la barre de réserve n°2 Outardes III. Son système d'isolation est à base d'un isolant du nom commercial Duritenax classé « Class F 155°C ». Ce système d'isolation est employé dans l'industrie depuis 1992 qui se base sur des résines d'époxy novolac traitées avec un acide durcisseur de type Lewis [66].

Les données montrées sur les figures : 59-b, 60-b et 61-b sont des résultats obtenus après la modélisation du courant de charge de chaque barre en question. Bien que l'importance du courant de polarisation ne soit pas aussi grande que l'isolation en asphalte, on remarque une pente plutôt raide dans la réponse du courant, reflétant ainsi une polarisabilité relativement élevée du mica et de la résine. Les graphes des courants de charge sont légèrement arrondis au début et dans tout l'essai en raison de la résistance en série utilisée pour la mesure. Les deux barres Manic III et La Tuque ont été exposées dehors à l'IREQ (Institut de Recherche d'Hydro Québec). Elles ont absorbées de l'humidité lors de cette exposition. Le courant de fuite de ces deux barres est important comme le montre le tableau XIII, ce qui indique et confirme l'absorption de l'humidité.

L'indice de polarisation pour ces deux barres est supérieur à la valeur minimale recommandée mais il est assez faible. Les deux autres critères sont respectés comme l'indique le tableau XIII.

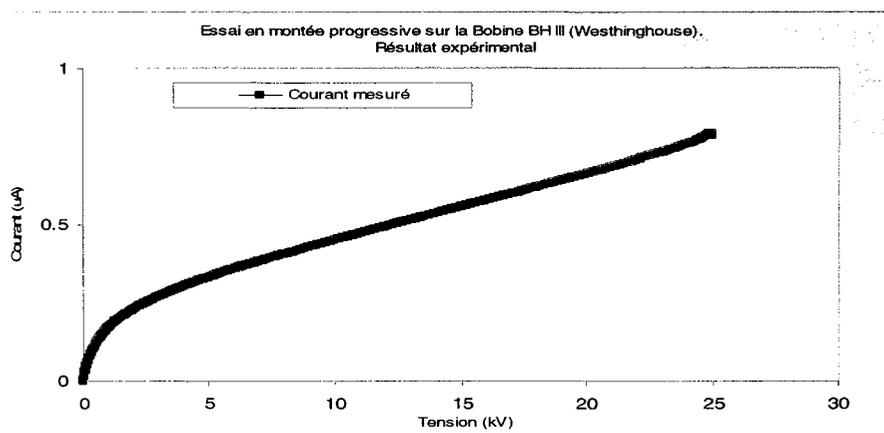
Tableau XIII

Résultats des mesures selon différents critères pour le cas
d'une isolation à base d'une résine en Époxy-mica
(Fabriquant : Alstom)

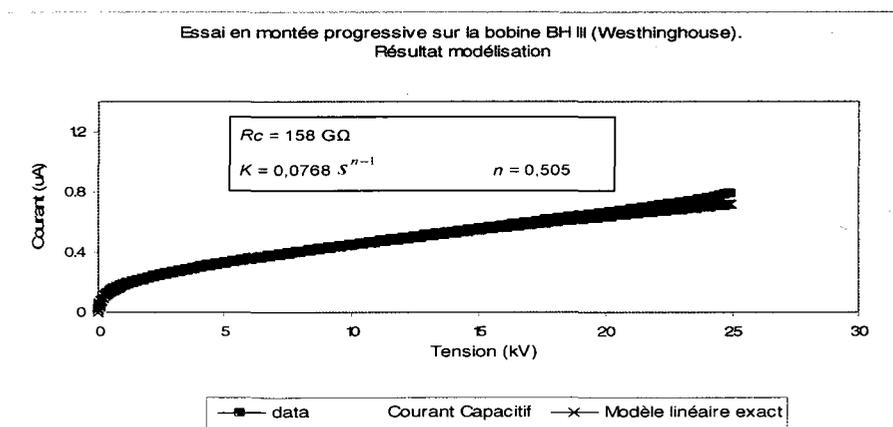
Barre / bobine	Manic III	Tuque	Outardes III n°2
\bar{I}_{total} nA	137	37,2	71,3
$\bar{I}_{capacitif}$ nA	87,8	28	60,4
$\bar{I}_{absorption}$ nA	22,1	4,9	9,2
\bar{I}_{fuite} nA	27,3	4,2	1,74
$\bar{I}_{fuite} / \bar{I}_{total}$ %	19,9	11,26	2,44
Classe Thermique	B	F	F
IP	2,7	2,9	4,04
K_T	0,33	0,33	0,33
$RI_{1min} @40^{\circ}C$ GΩ	50,17	312,38	221,04
$R'I_{1min} @40^{\circ}C$ GΩ	59,29	465,59	233,52
$R'I_{1min}C$ s	956,23	2387,27	2583,83

6.2.3 Polyester-mica: Thermalastic (Westinghouse), Polyester (National Electric Coil)

6.2.3.1 Mesures

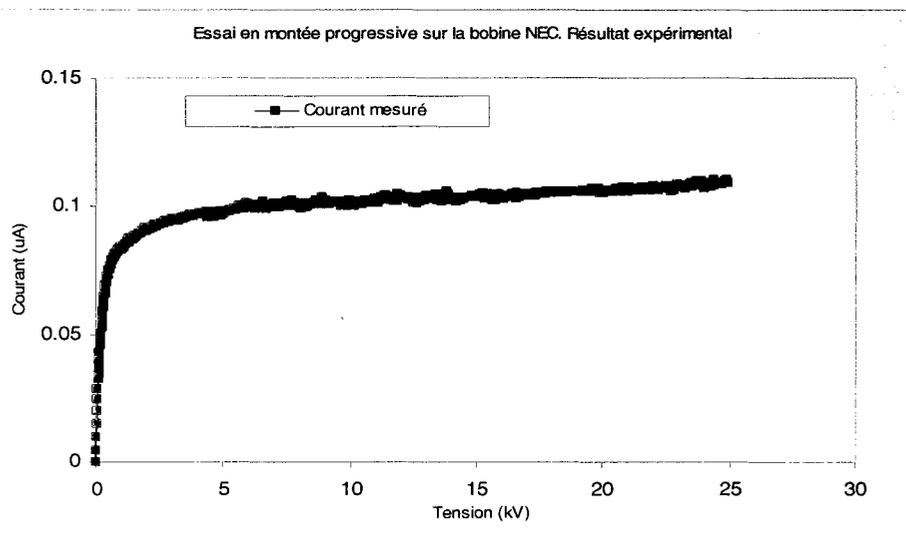


-a-

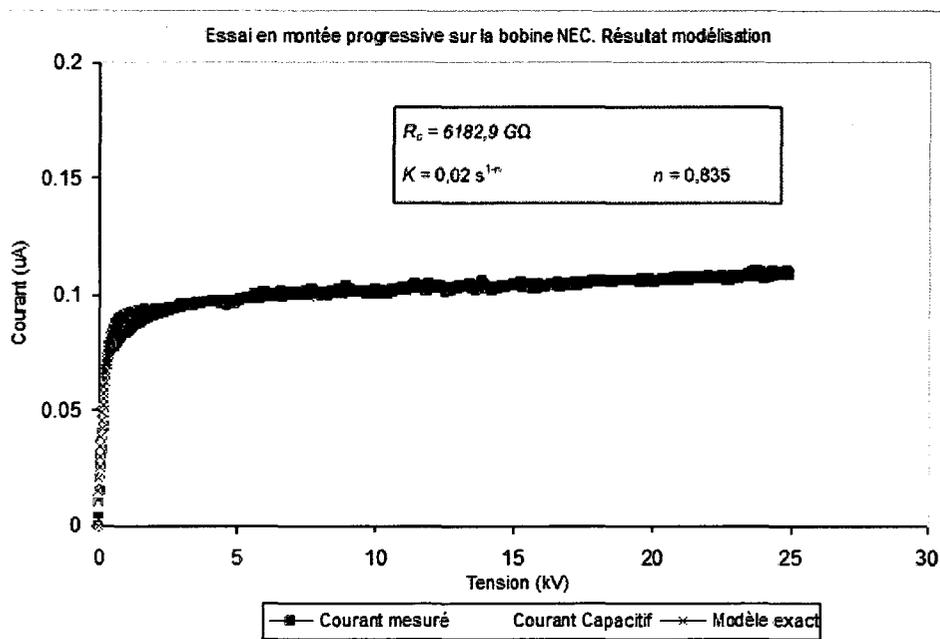


-b-

Figure 62 Essai de montée progressive sur la bobine n°1 Beauharnois (Westinghouse)
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré

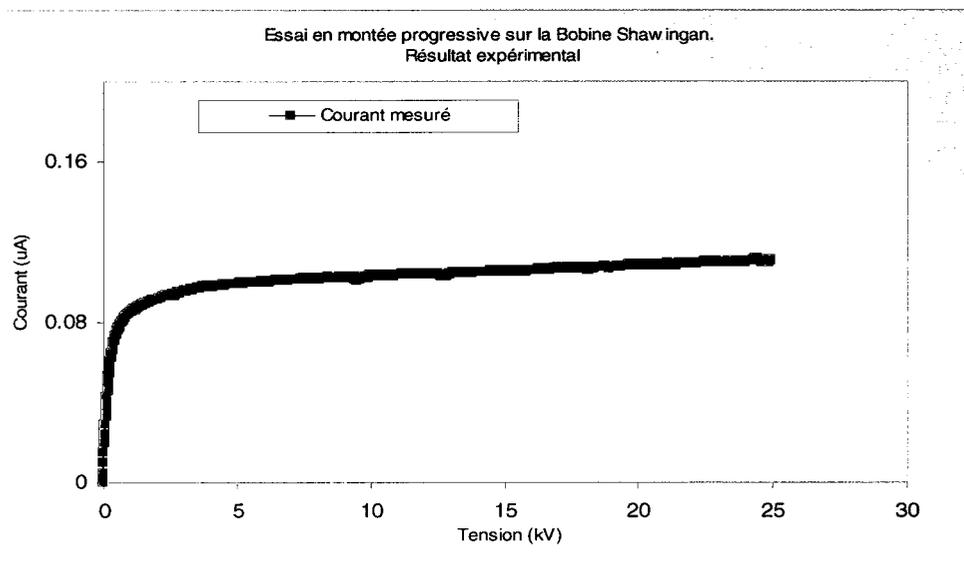


-a-

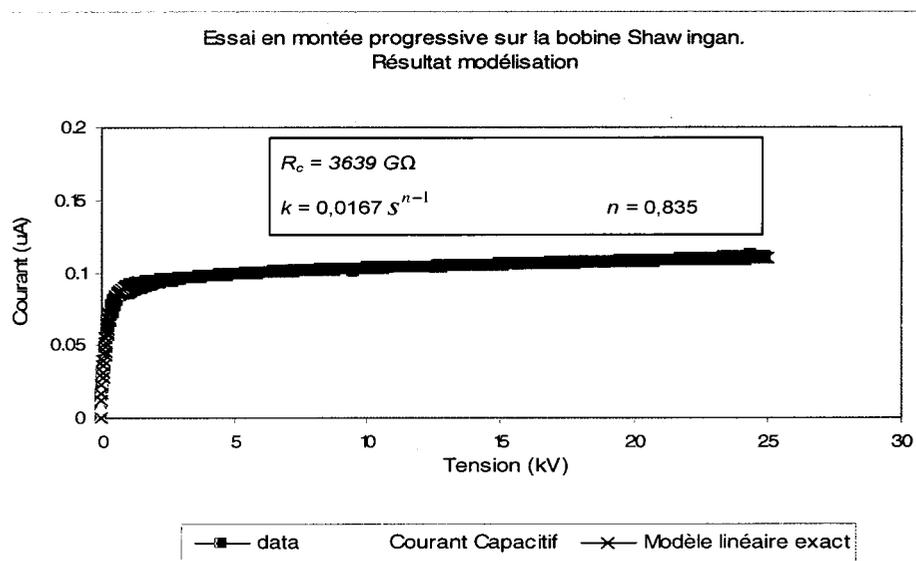


-b-

Figure 63 Essai de montée progressive sur la bobine n°2 Beauharnois (NEC)
 a) Courant de charge mesuré
 b) Modélisation du courant mesuré



-a-



-b-

Figure 64 Essai de montée progressive sur la bobine Shawingan (NEC)
a) Courant de charge mesuré
b) Modélisation du courant mesuré

6.2.3.2 Discussion

Dans les années 50 Westinghouse Electric Co, avait introduit un nouveau polyester sous le nom de Thermalastic. Il appartient à la classe thermique « Class B 130°C ». Les constituants principaux sont des lamelles de mica et une matrice de polyester. La technique utilisée pour la fabrication est du type Vacuum Pressure Impregnation (VPI). Les barres sont imprégnées dans un autoclave contenant la résine de polyester à haute température. La pression est ensuite appliquée afin d'obtenir l'imprégnation voulue. Un modèle de ce système d'isolation est représenté sur la figure 62-a.

Comme le montre les deux figures 62-a et 62-b (présentées ci-dessus), le courant mesuré prend une pente plus raide à mesure que la tension appliquée augmente. Mais quand cette tension s'approche du niveau maximal de l'essai le courant devient non linéaire et quelque peu erratique. Cette non-linéarité est indicative de l'augmentation non-ohmique du courant de fuite. En effet, sous l'influence du champ électrique appliqué, des porteurs de charge mobiles traversent ce matériau isolant dans le volume des parties droites et le long des parties hors-fer. Cette anomalie est exprimée par un courant de fuite important comme la montre le tableau XIV, présenté ci-dessous.

La situation est différente pour la bobine n°2 Beauharnois (NEC) et la bobine Shawingan (NEC) représentées respectivement sur les figures 63-a et 64-a. Ces deux figures montrent aussi de la non-linéarité dans les courbes courant versus tension sous forme de petites variations ascendante du courant mesuré par rapport au modèle linéaire (figures 63-b et 64-b). Mais la contribution des composants de surface et de conduction (courant de fuite) est très basse et négligeable. Le système d'isolation (*NeccobondTM*) utilisé pour ces deux bobines est de type polyester. Cet isolant est à base de résine de polyester à faibles solvants synthétiques et des lamelles de mica. Les critères de la norme IEEE 43-2000 [9] sont respectés comme le montre le tableau XIV présenté ci-dessous.

Tableau XIV

Résultats des mesures selon différents critères pour le cas
d'une isolation à base d'une résine en Polyester-mica
(Fabriquant : Westinghouse et National Electrical Coil)

Barre / bobine	Beauharnois n°1 Westinghouse	Beauharnois n°2 NEC	Shawinigan
\bar{I}_{total} nA	492,4	100,6	102,2
$\bar{I}_{capacitif}$ nA	82	73,6	77
$\bar{I}_{absorption}$ nA	320	28,4	25,7
\bar{I}_{fuite} nA	90	1,4	0,55
$\bar{I}_{fuite} / \bar{I}_{total}$ %	18,27	1,42	0,54
Classe Thermique	B	B	B
IP	2,82	5,58	5,6
K_T	0,33	0,33	0,33
$RI_{1min} @40^\circ C$ $G\Omega$	6,05	82,64	91,41
$R'I_{1min} @40^\circ C$ $G\Omega$	6,85	82,64	91,41
$R'I_{1min}C$ s	102,96	1114,74	1291,35

6.3 Création de défauts

Le succès des matériaux composites utilisés pour l'isolation des barres d'alternateur provient de plusieurs avantages combinés : bonnes propriétés spécifiques (rapport performance/masse volumique), bonnes propriétés diélectriques intrinsèques, excellentes propriétés mécaniques, faible coût... Pourtant, ces matériaux subissent des dégradations de leurs propriétés diélectriques qui sont entraînées par les contraintes appliquées ou induites dans des conditions de service [66-69].

Afin de mieux étudier ces anomalies, on a simulé différents défauts pouvant survenir sur des barres et des bobines (figure 65), utilisant un système d'isolation à technologie General Electric et Westinghouse. La figure 66, ci-dessous, présente les différentes parties de bobines (Westinghouse) utilisées sur laquelle des défauts ont été simulés.



Figure 65 Photo de deux bobines Westinghouse utilisées pour des mesures en laboratoire

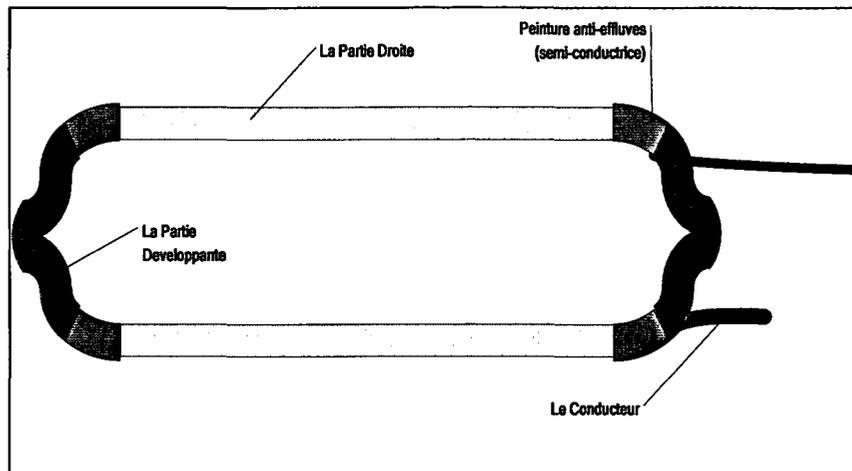


Figure 66 Différentes parties constituant une bobine

6.3.1 Contraintes Environnementales

Certaines machines peuvent fonctionner dans un environnement atmosphérique humide, contaminé par de l'huile ou des poussières. L'humidité contenue dans l'atmosphère peut agir comme un plastifiant pour la délamination du renfort dans les matériaux composites [70], en plus d'être absorbée par le matériau isolant et ainsi augmenter sa conductivité. Un autre problème est la combinaison de l'huile et des poussières qui peut bloquer les canalisations de ventilation et provoquer des surchauffes dans l'isolation [70].

De plus, la contamination conductrice (noir de carbone) peut encrasser les développantes et augmenter considérablement la conduction de surface.

Des défauts internes, tels que des décollements, dans l'isolation principale peuvent être créés par une accélération du vieillissement thermique ou thermomécanique. Pratiquement, ceci provient soit du maintien d'un régime permanent à température fixe au sein de la machine, soit des surchauffes ponctuelles associées à des défauts aléatoires. La durée de vie thermique (L) d'un matériau est souvent exprimée par la relation

d'Arrhenius $L=A*\exp (B/T)$ dans laquelle T est la température et A, B sont des constantes [71].

Un défaut simulé d'absorption d'humidité est présenté sur les figures 67 à 69. Les quatre barres 175B0039, 175B0065, 175B0087 et 175B0187, ont été exposées pendant 168 heures (1 semaine) à la contrainte environnementale suivante : 60°C et 75 % d'humidité relative [72]. Une mesure de montée de tension progressive avec une pente de 1 kV/min jusqu'à 35 kilovolts a été effectuée avant et après traitement environnemental. Cette dernière configuration était choisie pour pouvoir comparer nos mesures avec celles sur les barres non vieilles (figure 67).

Les conditions environnementales de mesure sur les quatre barres avant vieillissement sont de 23°C et 53 % d'humidité relative.

La figure 69, compare les résultats des quatre barres ensemble à une pente 1 kV/min avant et après vieillissement.

6.3.1.1 Mesures

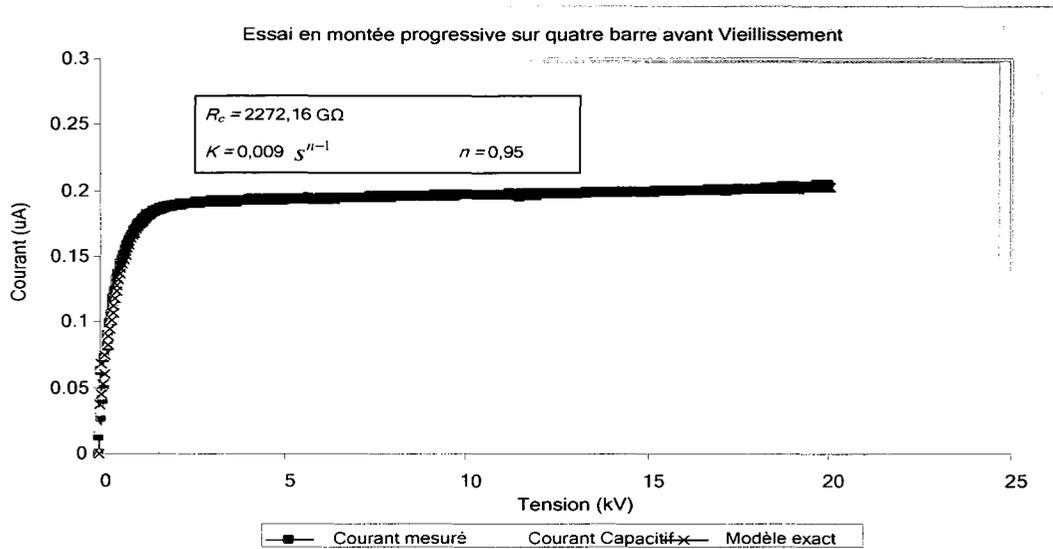


Figure 67 Courant de charge mesuré et modélisé avant vieillissement

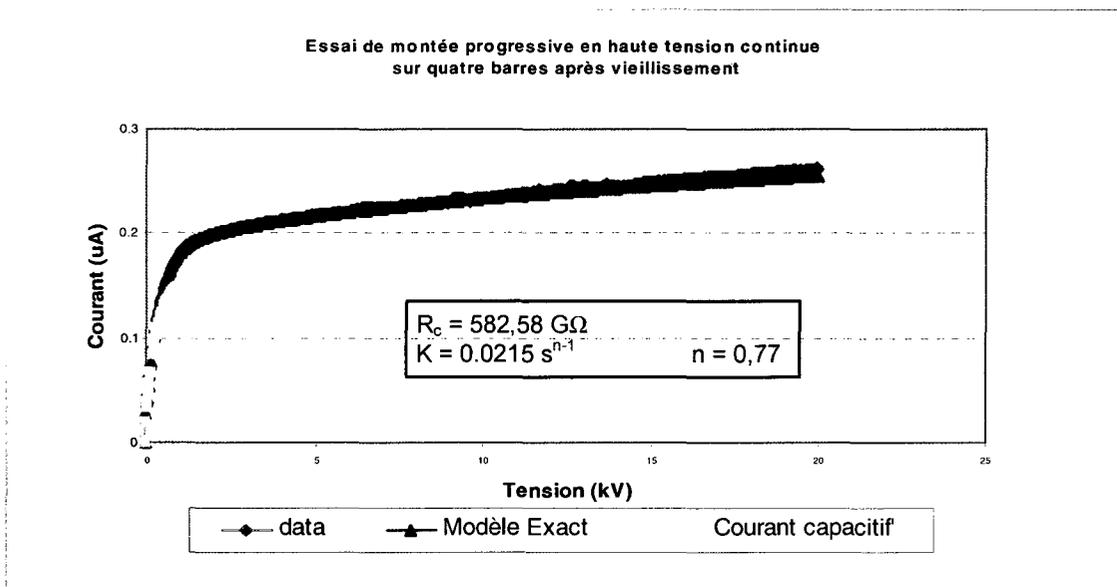


Figure 68 Courant de charge mesuré et modélisé après vieillissement

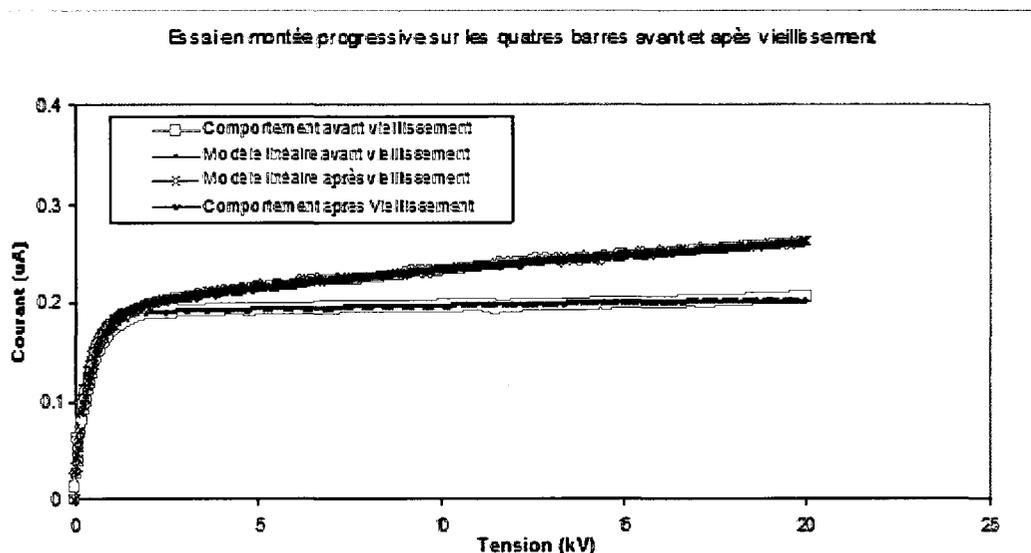


Figure 69 Comparaison des deux résultats avant et après vieillissement

6.3.1.2 Discussion

Le courant de charge après vieillissement, comme le montre la figure 68, prend une pente plus raide par rapport à ce qu'il était avant le vieillissement à mesure que la tension de l'essai augmente. Cette forme de pente est le résultat d'une augmentation du courant d'absorption et de fuite dû à la présence d'eau. Il en résulte des espaces de charge de polarisation et d'ionisation produisant ainsi un courant de fuite. Le tableau XV, montre un courant de fuite moyen faible et on voit bien l'effet du vieillissement sur les valeurs des normes IEEE qui sont toutefois supérieures aux valeurs minimales requises.

Tableau XV

Résultats des courants et critères IEEE mesurés
(Défaut : contrainte environnementale)

Courants et Critères IEEE	Avant vieillissement	Après vieillissement
I_{total} μA	0,192	0,23
I_{fuite} μA	0,0042	0,016
I_{fuite} / I_{total} %	2,18	6,95
IP (à U=5kV)	4,69	4,07
RI_{1mn} @ 40°C GΩ	153,33	32,28

6.3.2 Contraintes électriques

Cette contrainte peut générer des décharges partielles internes dans la matrice du matériau, à l'interface matrice/renfort ou à l'interface conducteur/isolant [71-73-74]. Les décharges s'accompagnent d'une ionisation du gaz causant la détérioration du matériau. Une autre conséquence sévère de la contrainte électrique est l'arborescence électrique qui se propage le long des interfaces matrice/renfort [74,76].

6.3.2.1 Décharge d'encoche

Les décharges les plus nocives à haute tension dans les machines tournante sont des décharges d'encoche (slot discharge) entre la tôle magnétique et une barre ou une bobine ou un enroulement statorique. Ce phénomène se produit quand le revêtement semi-conducteur (partie droite) de la barre perd partiellement le contact avec l'encoche. Si le

calage radial ou le matériau de bourrage sont desserrés, le mouvement des barres causera l'abrasion du revêtement semi-conducteur et par la suite une perte du contact électrique avec le circuit magnétique.

Pour simuler des activités de décharge d'encoche, des défauts extérieurs ont été fait au milieu de la partie droite d'une bobine. Comme il est montré sur les deux figures 70 et 71, une partie de la peinture semi-conductrice sur la partie droite avec deux dimensions différentes ($W_x * W_y$) a été sablée.



Figure 70 Zone de défaut sur la partie droite de la bobine

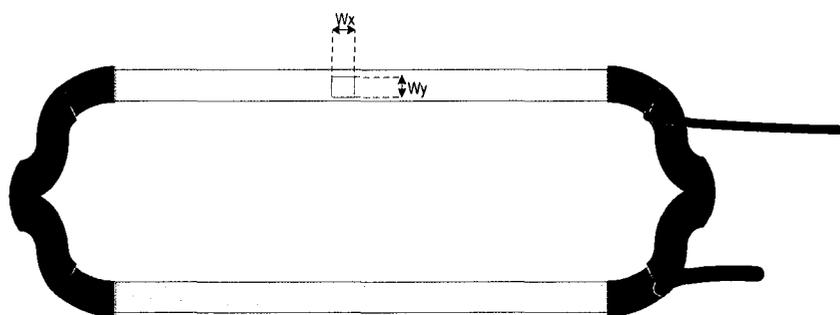


Figure 71 Dimensions du défaut

6.3.2.1.1 Mesures

Les résultats selon différentes dimensions sont portés sur la figure 72, utilisant une pente de 1kV/min jusqu'à un niveau de tension maximum de 25 kV.

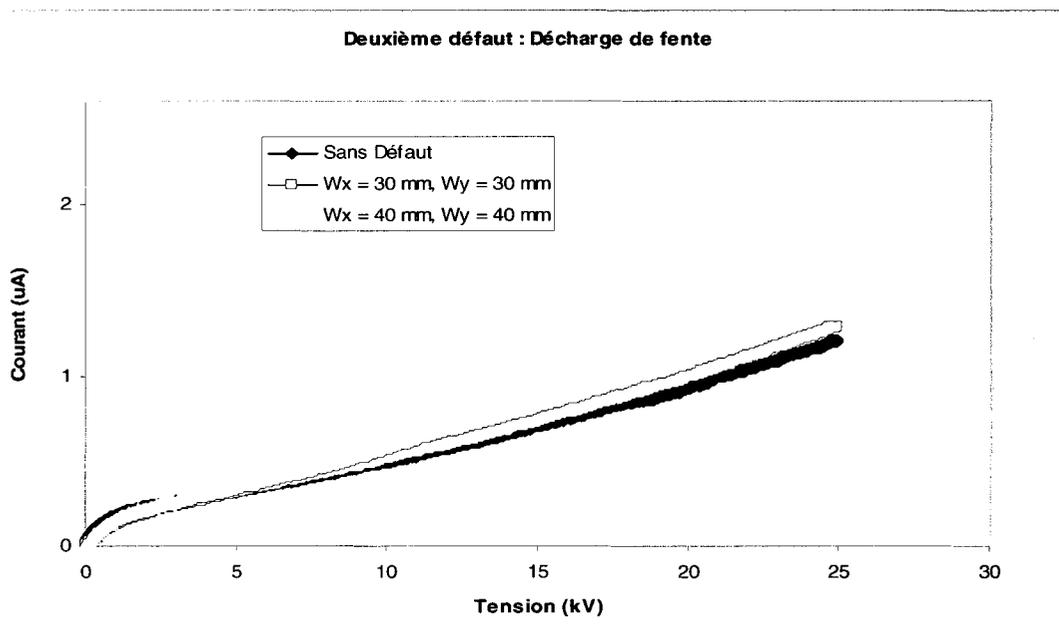


Figure 72 Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut

6.3.2.1.2 Discussion

On conclut, selon la figure 72, que le courant de fuite et le nombre de décharges partielles augmentent avec l'agrandissement de la taille du défaut. En service, ceci se produit dès que le contact électrique est perdu entre la barre et l'encoche. Les décharges d'encoche auront alors lieu, ce qui accélère la dégradation de l'isolation. Le tableau XVI montre que cet échantillon présentait, avant l'application du défaut, un courant de fuite important et un indice de polarisation inférieure à la valeur minimale requise. Les défauts simulés contribuent plus à la dégradation de l'isolation.

Tableau XVI
Résultats des courants et critères IEEE mesurés
(Défaut : décharge d'encoche)

Courants et Critères IEEE	Sans défaut	Dimensions 30mm-30mm	Dimensions 40mm-40mm
\bar{I}_{total} nA	0,63	0,65	0,77
\bar{I}_{fuite} nA	0,47	0,53	0,64
$\bar{I}_{fuite} / \bar{I}_{total}$ %	74,42	81	83,85
IP (à U=5kV)	1,17	1,07	1,07
RI_{1mn} @ 40°C GΩ	1,71	1,54	1,34

6.3.2.2 Défaut au niveau des extrémités de l'enroulement

Les décharges partielles au niveau des extrémités de l'enroulement peuvent également se produire à plusieurs endroits avec un champ électrique élevé. Habituellement, ces décharges se produisent aux interfaces entre les différentes composantes de la partie hors-fer de l'enroulement statorique. Si la protection des extrémités contre l'effet couronne devient inefficace en raison d'une mauvaise conception ou d'une mauvaise fabrication des interfaces, d'un décollement, d'une contamination, d'une porosité, ou d'autres effets, les décharges de surface se produiront et érodent graduellement le matériel isolant [77].

Pour simuler un défaut sur le revêtement anti-effluves aux niveaux des extrémités de l'enroulement, un ruban en cuivre à colle conductrice de dimensions (Dx, Dy) est utilisé et couvre tout le périmètre de la zone choisie près du revêtement anti-effluves comme il est montré sur les deux figures 73 et 74. Ce défaut simulera le cas où le revêtement anti-

effluves est mal conçu ou mal fabriqué. La figure 75 illustre les résultats avec et sans défauts selon différentes dimensions (D_x , D_y).

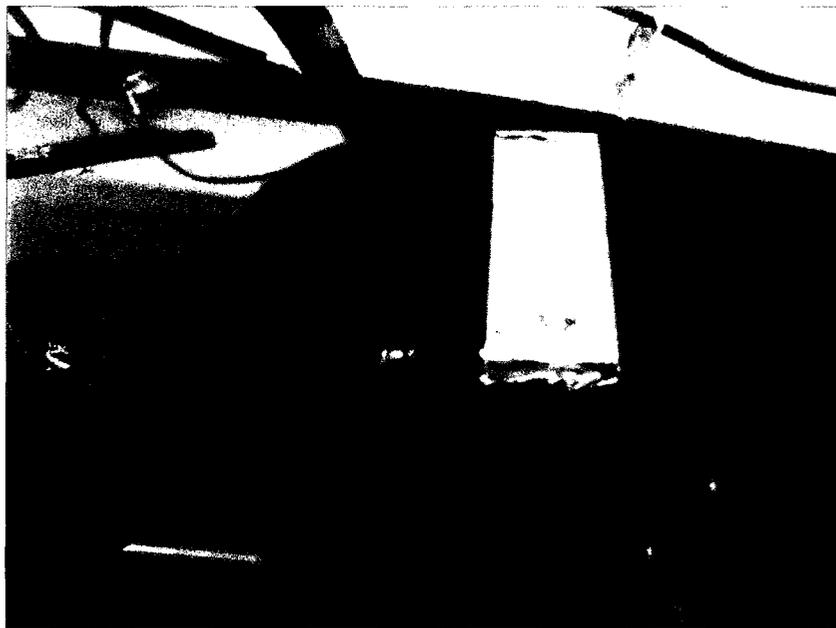


Figure 73 Photo du défaut sur l'extrémité de la bobine

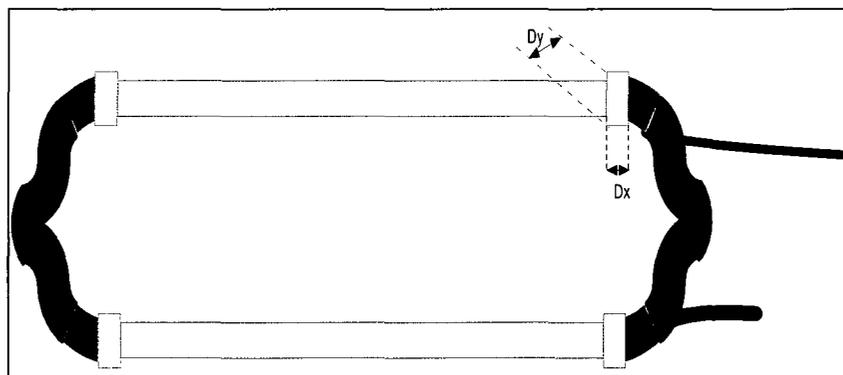


Figure 74 Dimensions du défaut

6.3.2.2.1 Mesures

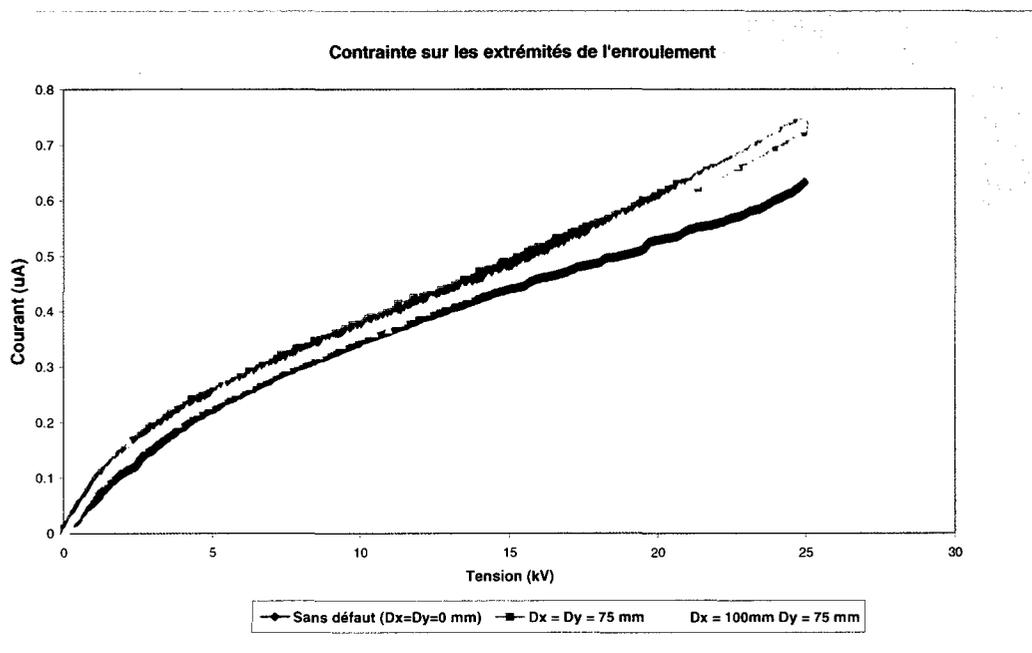


Figure 75 Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut

6.3.2.2.2 Discussion

En général, le nombre des décharges partielles augmente une fois qu'on augmente les dimensions du défaut. Ainsi l'amplitude du courant de charge ne change pas de manière significative avec l'augmentation de la taille du défaut. Cela est dû au fait que les défauts sur cette partie peuvent mener à des décharges de faible intensité se produisant au voisinage du conducteur, sans échauffement important de celui-ci, et n'intéressant qu'une faible zone, autour du conducteur, dans laquelle le champ électrique dépasse une certaine valeur. Ce phénomène est communément appelé : effet de couronne (Corona effect). Avant l'application des défauts, cette bobine présentait un courant de fuite important comme le mentionne le tableau XVII ci-dessous, malgré que son indice de polarisation indique une bonne valeur. D'où l'importance, d'un côté, de la méthode rampe qui nous permet de visualiser directement un comportement anormal du courant

de charge, et de l'autre coté, de procéder à d'autres types d'essai car chaque type d'essai apporte une nouvelle information sur l'état d'isolation. L'indice de polarisation est considérablement affecté par ces défauts comme le montre le tableau XVII.

Tableau XVII
Résultats des courants et critères IEEE mesurés
(Défaut au niveau des extrémités de l'enroulement)

Courants et Critères IEEE	Sans défaut	Dimensions 75mm	Dimensions 100mm
I_{total} μA	0,38	0,42	0,41
I_{fuite} μA	0,14	0,25	0,25
I_{fuite} / I_{total} %	37,36	59,98	62,52
IP (à U=5kV)	3,09	1,59	1,50
RI_{1mm} @ 40°C GΩ	0,19	1,88	1,98

6.3.3 Contamination et absorption d'humidité

Pour simuler un défaut de contamination ou d'absorption d'humidité, un ruban en cuivre à colle conductrice de longueur Z_x et de largeur Z_y est utilisé entre la partie droite (semi-conductrice) et la développante traversant ainsi le revêtement anti-effluves comme le montre les deux figures 76 et 77. Ceci peut simuler une présence de chemins humides ou contaminés sur le revêtement anti-effluves touchant une partie de la peinture semi-conductrice d'un coté et une partie de la développante d'un autre coté.

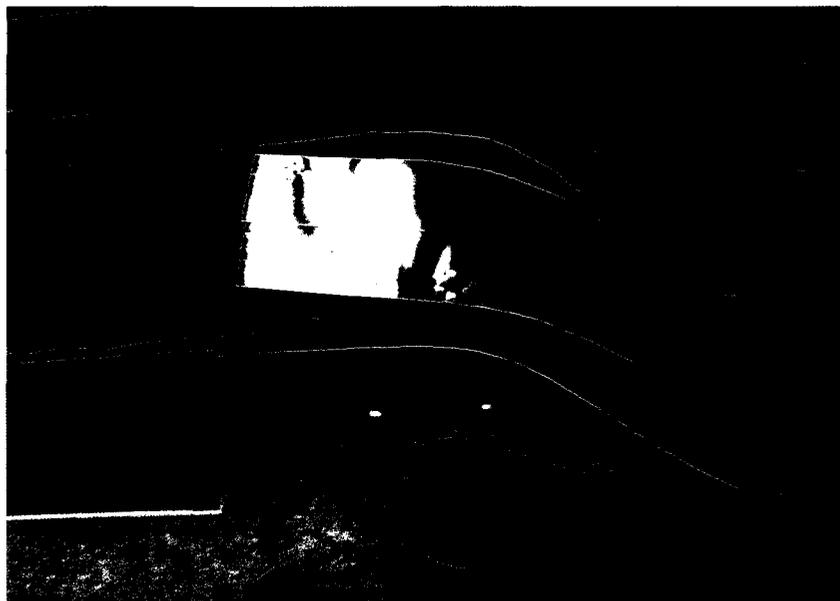


Figure 76 Ruban du cuivre couvrant la peinture anti-effluves

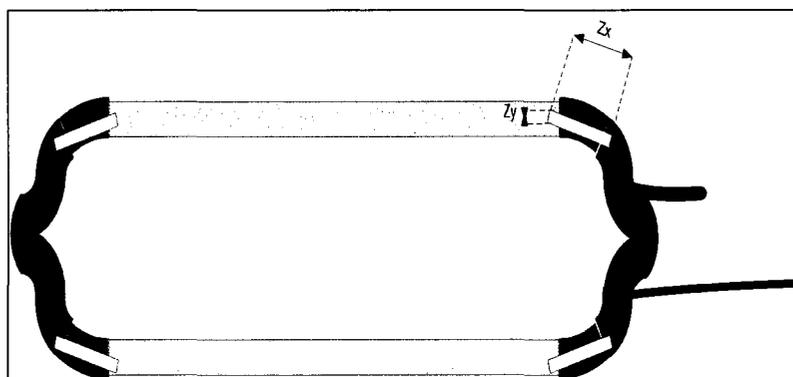


Figure 77 Dimensions du défaut

6.3.3.1 Mesures

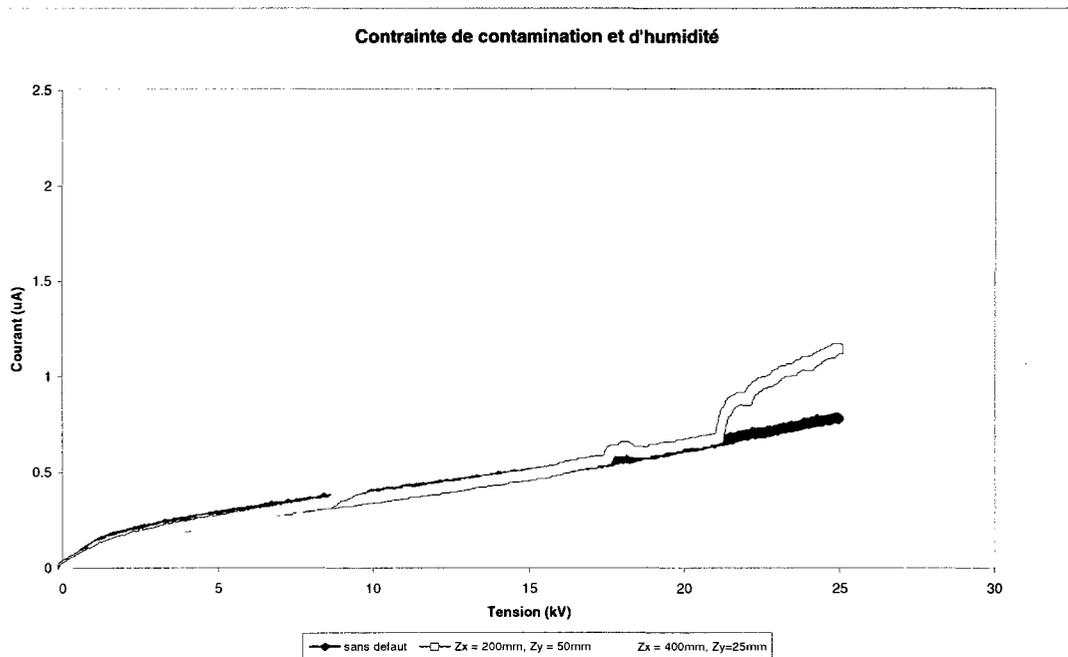


Figure 78 Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut

6.3.3.2 Discussion

La réponse courant versus tension, montrée sur La figure 78, semble au commencement normale mais à mesure que la tension et les dimensions du défaut augmentent, le courant de charge commence à prendre une forme non-linéaire et erratique.

Cette caractéristique est indicative de la conduction anormale, dans ce cas-ci, à travers la surface de l'enroulement. Les contaminants tels que le huile, le carbone, la poussière, la saleté, et les insectes combinés avec l'humidité peuvent causer un indésirable accroissement dans le courant de conduction.

Le tableau XVIII, présenté ci-dessous, nous apprend que la bobine utilisée présentait déjà un courant de fuite important avant l'application des défauts. La dégradation de l'isolation, en présence des défauts, continue à prendre forme comme le confirme les valeurs du tableau XVIII.

Tableau XVIII
Résultats des courants et critères IEEE mesurés
(Défaut de contamination et d'absorption d'humidité)

Courants et Critères IEEE	sans défaut	dimensions 200mm-50mm	dimensions 400mm-25mm
\bar{I}_{total} nA	0.44	0.48	0.77
\bar{I}_{fuite} nA	0.19	0.26	0.68
$\bar{I}_{fuite} / \bar{I}_{total}$ %	43.19	55.22	88.75
IP (à U=5kV)	2.15	1.94	1
RI_{1mm} @ 40°C GΩ	1.6	1.77	1.93

6.3.4 Endommagement de la jonction des peintures

Durant le fonctionnement de l'alternateur, le stator subit des forces électromécaniques qui entraînent des vibrations conduisant à une érosion suite aux frottements [71]. Les différences de coefficient de dilatation des matériaux peuvent également engendrer des contraintes internes [70, 71]. Si le serrement est insatisfaisant, les barres ou les enroulements commenceront à vibrer. Ainsi, l'enroulement ou l'isolation de la barre peut subir des fissures au-dessus de l'encoche causant des ruptures phase-terre.

Pour simuler un défaut du même type, on a causé une fissure de dimensions (H_x , H_y , H_z) sur une extrémité d'un enroulement en utilisant une scie, tel qu'illustré sur les deux figures 79 et 80.

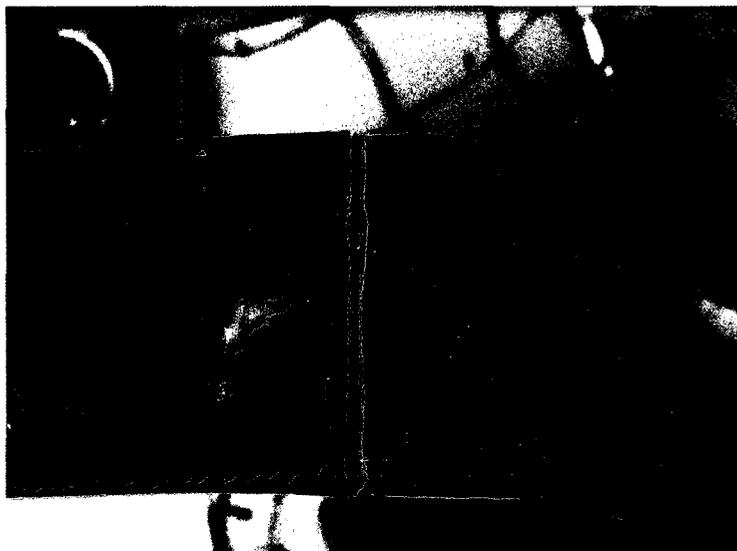


Figure 79 Fissure sur l'extrémité de la bobine

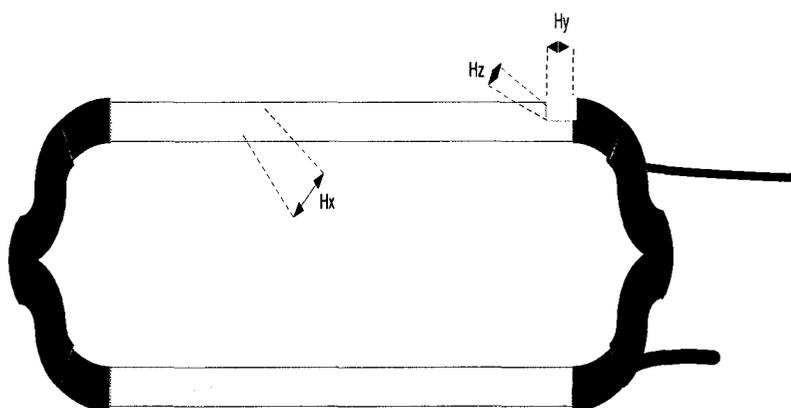


Figure 80 Dimensions du défaut

6.3.4.1 Mesures

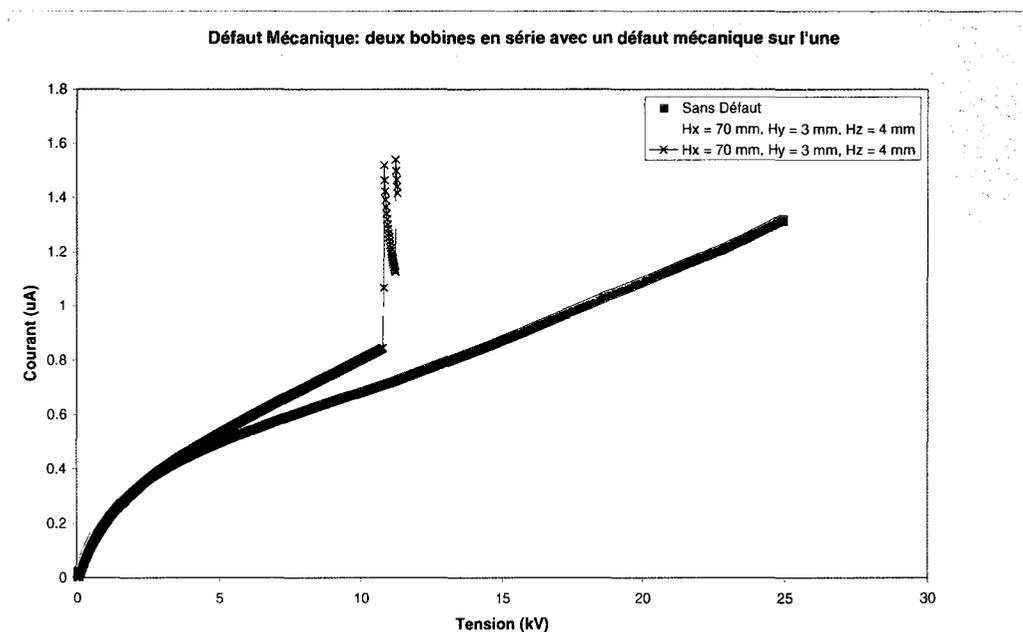


Figure 81 Courant de charge mesuré en absence et en présence du défaut

6.3.4.2 Discussion

La figure 81, ci-dessous, illustre le résultat sur une bobine présentant un défaut mécanique de différentes dimensions. Cette bobine, à son tour, présentait un courant de fuite important en absence du défaut mécanique. Cependant, l'impact du défaut a une influence considérable sur la courbe courant versus tension.

On remarque que plus la profondeur de la fissure augmente, plus le courant de charge devient erratique avec une pente très raide. En effet, pendant l'augmentation de la tension d'essai, le courant croit presque asymptotiquement en raison d'un chemin conducteur entre le conducteur de l'enroulement et le noyau de la masse statorique.

Pour éviter des pannes et des dommages permanents à l'isolation, l'essai a été arrêté avant d'atteindre son niveau maximal de tension, d'où l'avantage de la méthode rampe.

CONCLUSION

Les principaux buts de cette recherche étaient de développer une explication théorique permettant de modéliser la courbe de courant versus tension mesurée lors des essais de montée progressive en haute tension continue et de démontrer que la méthode de montée progressive en tension continue est valable comme outil pour l'évaluation de l'état d'isolation des enroulements statoriques sans causer d'endommagements de ces enroulements. Ces objectifs ont été atteints. Premièrement, à partir d'un développement théorique du courant de charge traversant un enroulement statorique utilisant la transformée de Laplace, on a pu séparer les trois contributions du courant qui forme le courant de charge total, en l'occurrence le courant capacitif, le courant d'absorption et le courant de fuite. La transformée de Laplace a été d'une utilité et d'une importance majeure lors du développement du modèle théorique. On a vu qu'à partir de la détermination de la résistance de l'échantillon R_c et de la fonction de la réponse diélectrique $f(t)$ propre à l'isolant, le courant de fuite peut être facilement isolé.

Les résultats du modèle linéaire suite à la modélisation du courant de charge ainsi que ceux mesurés se sont avérés très proches, confirmant la bonne qualité de la modélisation. Deuxièmement, nous avons pu constater que lorsque l'on applique raisonnablement une pente de tension très lente lors d'un essai de montée progressive à haute tension continue, le courant capacitif est faible permettant la visualisation des petits changements dans les courants de polarisation, de conduction et d'ionisation. Une isolation de haute qualité montrera une réponse de courant versus tension linéaire sur toute la gamme de tension appliquée. Pour une isolation dégradée une réponse non-linéaire de la courbe courant versus tension sera observée. Par exemple, cette non-linéarité a été observée dans le cas des deux barres de réserve de la centrale Manic III et de la centrale La Tuque. Dans ces cas, l'absorption de l'humidité a contribué directement à l'accroissement du courant de fuite. Un milieu humide peut aussi causer des décollements internes dans l'isolation principale puisque l'humidité contenue dans

l'atmosphère peut agir comme un plastifiant pour la délamination du renfort dans les matériaux composites. De plus, l'effet couronne peut se produire si ces défauts de décollements et de contaminations apparaissent sur les extrémités de l'enroulement statorique. Conséquemment, il est souhaitable qu'un équipement électrique opère dans un environnement peu pollué et peu humide. Il est à noter qu'il est indispensable que le calage radial ou le matériau de bourrage de l'équipement électrique soit bien serré pour éviter des vibrations des bobines/barres au niveau des encoches et conséquemment éviter des fissures au long de la surface de l'enroulement statorique. Ces anomalies causeront éventuellement des décharges d'encoches qui sont nocives aux machines tournantes.

Tous les défauts et les anomalies présentés ci-dessus ont été détectés lors de nos essais de montée progressive en tension continue effectués en laboratoire sur différents échantillons de différentes technologies de fabrication. Il ressort de ces essais de laboratoire que la méthode de montée progressive en haute tension continue semble efficace pour la détection de fissures, de fentes, des problèmes d'absorption d'humidité, de décollements, de contamination sur les surfaces et de problèmes de manque polymérisation de la résine. Les résultats et les analyses fournies dans ce mémoire de maîtrise offrent une illustration pratique des capacités de cette méthode à distinguer les problèmes d'une isolation dégradée et à identifier la cause et l'ampleur de ces problèmes. En conclusion, la méthode de montée de tension progressive en haute tension continue présente les avantages suivants :

1. La méthode est performante et sécuritaire.
2. Elle donne de bon diagnostic et des résultats pertinents sur l'état des enroulements statoriques d'alternateurs.
3. Une modélisation appropriée permet de séparer les composantes du courant total.
4. Une seule personne est requise pour réaliser l'essai.

5. En cas de déviations importantes du courant de fuite durant l'essai, l'expérimentateur peut arrêter l'exécution de l'essai avant que le système d'isolation soit endommagé.
6. L'exécution de l'essai de montée progressive en tension prend moins de temps que les autres types d'essai.
7. Cette méthode utilise une pente de tension de 1 kV/min, ce qui est moins susceptible d'endommager l'isolation par rapport aux autres méthodes qui utilisent des pentes de tension d'ordre 1 kV/s.
8. Ce type d'essai utilise une instrumentation facilement transportable.

Cette méthode présente aussi quelques inconvénients suivants :

1. C'est un essai de C.C et il ne pas être exécuté en plein fonctionnement de la machine électrique (online test).
2. Une expertise est recommandée pour interpréter correctement les résultats d'essai.

RECOMMANDATIONS

Bien qu'aucun essai de diagnostic jusqu'à nos jours ne soit idéalement capable de détecter tous les problèmes ou les défauts propres à l'isolation de masse d'un enroulement statorique, les résultats et les analyses fournies dans ce mémoire offrent une illustration pratique des capacités de la méthode de montée progressive en haute tension continue de distinguer entre une isolation en bon état et une isolation dégradée par certains types de défaut. Donc, à la suite de ce travail, on recommande les points suivants pour la suite du projet :

- ✓ Mise au point d'un appareil d'essai de montée progressive en haute tension continue de terrain se basant sur l'instrumentation utilisée lors de cette recherche.
- ✓ Additionner à cet essai un essai de décharge pour mesurer le courant de décharge après l'application de l'essai de montée progressive en tension. Cette mesure renforce l'interprétation des résultats puisque le courant de décharge est porteur d'une information émanant du système d'isolation seulement.
- ✓ Cet appareil doit être facilement transportable pour pouvoir réaliser des essais en laboratoire ou sur site (souvent dans des endroits très éloignés). Ceci est possible puisque les essais à courant continu demandent beaucoup moins de puissance (toute l'instrumentation utilisée lors des essais pendant cette recherche est facilement transportable) contrairement aux essais à courant alternatif qui exigent de l'instrumentation volumineuse ce qui rend très difficile à transporter l'appareillage requis.
- ✓ Amélioration et développement du logiciel du traçage automatique des courbes utilisé lors de cette recherche afin de faire des interprétations et des rapports sur place pour ces clients.
- ✓ Étendre le champ d'application de cette méthode aux transformateurs de puissance (papier-huile) et aux câbles souterrains HT et MT.

ANNEXE 1

Les essais hors service les plus utilisés pour le diagnostic des enroulements statoriques

Nom	Description	Difficulté d'exécution	Efficacité	Normes Appropriées
Résistance d'isolation (RI)	Application de la tension c.c pendant 1 minute pour la mesure du courant de fuite	Facile	Seulement pour la détection de la contamination de ou de sérieux défauts	IEEE 43
Indice de polarisation (IP)	Rapport de la résistance d'isolation entre la mesure de 1min et de 10 min	Facile	Seulement pour la détection de la contamination de ou de sérieux défauts	IEEE 43
Haute tension c.c (Hipot)	Application de la tension c.c pendant 1 min	Facile	Seulement pour la détection des défauts sérieux	IEEE 95
Haute tension c.a (Hipot)	Application de la tension c.a pendant 1 min	Modérée, en raison du besoin d'un grand transfo	Plus efficace que la haute tension c.c	NEMA MGI ou IEC 60034
Capacité	Application de la HT ou BT tension pour la mesure de la capacité d'enroulement à la masse	Modérée	Modérément efficace pour trouver des problèmes de fuite d'eau ou de température	
Facteur de dissipation (puissance)	Application de la haute ou la basse tension pour la mesure des pertes d'isolation	Modérée	Modérément efficace pour trouver des problèmes de fuite d'eau ou de température	IEEE 286 ou CEI 60894
La montée du facteur de puissance	Des différences dans la perte d'isolation entre la haute à la basse tension	Modérée	Efficace pour trouver des problèmes thermique ou de contamination sévère pour les enroulements préformés	IEEE 286 ou IEC 60894
Décharges partielles hors service	Valable pour la détection des impulsions de décharges partielles	Difficile	Trouve la plupart des problèmes à l'exception des vibrations des extrémités des enroulements préformés seulement	IEEE1434
Comparaison de la surtension	Application d'une surtension	Difficile de déterminer si une perforation s'est produite dans l'enroulement	Efficace pour trouver des problèmes répétitifs d'isolation pour les enroulements préformés et à fils jetés	IEEE 522
Desserrement des cales statoriques	Utilisation d'un marteau pour voir si l'isolation se lâche	Modérée	Efficace pour trouver des enroulements (préformés) à isolation desserrée	
Distance d'isolation de la fente	Insertion des jauges d'épaisseur sur le coté bas de la fente	Facile, après avoir insérer les jauges	Efficace pour trouver des enroulements (préformés) à isolation desserrée	



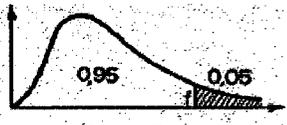
ANNEXE 2

La table de la transformée de Laplace

	Functions of time, $f(t)$	Laplace Transforms of $f(t)$, $L\{f(t)\}$
1	$f(t)$	$F(s)$
2	$x(t) + y(t)$	$X(s) + Y(s)$
3	$k.f(t)$	$K.F(s)$
4	$df(t)/dt$	$sF(s) - f(0)$
5	$d^n f(t)/dt^n$	$s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - s^{n-2}f'(0) - \dots - f^{(n-1)}(0)$
6	$\int_0^t f(t).dt$	$F(s)/s$
7	1	$1/s$
8	t	$1/s^2$
9	e^{-a}	$1/(s+a)$
10	te^{-a}	$1/(s+a)^2$
11	$1-e^{-at}$	$a/s(s+a)$
12	$f(t-a), t > 0$	$e^{-as}F(s)$

ANNEXE 3

**Les valeurs de F de la variable de Fisher-Snédecor $F(v_1, v_2)$
ayant la probabilité 0,05 d'être dépassées**



$\nu_2 \backslash \nu_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246	246	247	247
2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4
3	10.1	9.35	9.28	9.22	9.17	9.12	9.07	9.04	9.00	8.97	8.94	8.91	8.88	8.85	8.81	8.78	8.74	8.71
4	7.77	6.94	6.79	6.69	6.60	6.52	6.44	6.37	6.30	6.24	6.18	6.12	6.06	6.00	5.94	5.88	5.82	5.77
5	6.61	5.79	5.61	5.49	5.39	5.30	5.22	5.14	5.07	4.99	4.92	4.85	4.78	4.71	4.64	4.57	4.50	4.43
6	5.99	5.14	4.94	4.79	4.67	4.56	4.46	4.37	4.29	4.21	4.13	4.05	3.97	3.90	3.82	3.74	3.66	3.58
7	5.59	4.74	4.52	4.35	4.22	4.10	3.99	3.89	3.80	3.71	3.62	3.54	3.45	3.37	3.28	3.20	3.11	3.02
8	5.32	4.46	4.22	4.03	3.89	3.76	3.64	3.53	3.43	3.34	3.25	3.16	3.07	2.98	2.89	2.80	2.71	2.62
9	5.13	4.26	3.99	3.78	3.63	3.49	3.36	3.24	3.13	3.03	2.93	2.84	2.74	2.65	2.55	2.46	2.36	2.27
10	4.99	4.10	3.81	3.58	3.42	3.27	3.13	2.99	2.87	2.76	2.65	2.55	2.45	2.35	2.25	2.15	2.05	1.95
11	4.84	3.93	3.62	3.37	3.20	3.04	2.89	2.74	2.61	2.49	2.37	2.26	2.15	2.04	1.93	1.82	1.71	1.60
12	4.73	3.80	3.47	3.20	3.02	2.85	2.69	2.52	2.37	2.24	2.11	1.99	1.87	1.75	1.63	1.51	1.39	1.27
13	4.65	3.71	3.36	3.07	2.88	2.70	2.52	2.34	2.18	2.03	1.89	1.75	1.62	1.49	1.36	1.23	1.10	0.97
14	4.59	3.64	3.27	2.96	2.76	2.57	2.38	2.19	2.01	1.85	1.70	1.55	1.41	1.27	1.13	0.99	0.85	0.71
15	4.54	3.58	3.19	2.87	2.66	2.46	2.26	2.06	1.87	1.69	1.52	1.36	1.21	1.06	0.91	0.76	0.61	0.46
16	4.49	3.53	3.13	2.80	2.58	2.37	2.16	1.95	1.75	1.56	1.38	1.21	1.04	0.88	0.72	0.56	0.40	0.24
17	4.45	3.49	3.08	2.74	2.51	2.29	2.07	1.85	1.64	1.44	1.25	1.07	0.89	0.71	0.54	0.37	0.21	0.05
18	4.41	3.45	3.03	2.68	2.44	2.21	1.98	1.75	1.52	1.30	1.10	0.91	0.72	0.53	0.35	0.18	0.02	-0.14
19	4.38	3.42	2.99	2.63	2.38	2.14	1.90	1.66	1.42	1.18	0.96	0.75	0.55	0.35	0.16	0.00	-0.16	-0.32
20	4.35	3.39	2.95	2.58	2.32	2.07	1.82	1.56	1.30	1.04	0.81	0.59	0.36	0.13	-0.07	-0.24	-0.40	-0.56
21	4.32	3.37	2.92	2.54	2.27	1.99	1.73	1.45	1.17	0.89	0.64	0.39	0.14	-0.10	-0.28	-0.44	-0.60	-0.76
22	4.29	3.34	2.88	2.49	2.21	1.92	1.64	1.35	1.05	0.76	0.49	0.22	-0.06	-0.31	-0.47	-0.62	-0.77	-0.92
23	4.28	3.32	2.86	2.46	2.17	1.87	1.58	1.28	0.96	0.66	0.38	0.10	-0.17	-0.41	-0.56	-0.70	-0.84	-0.98
24	4.26	3.30	2.84	2.43	2.13	1.82	1.52	1.21	0.89	0.58	0.28	-0.02	-0.27	-0.50	-0.64	-0.77	-0.90	-1.03
25	4.24	3.29	2.82	2.40	2.09	1.78	1.47	1.15	0.82	0.50	0.19	-0.11	-0.35	-0.57	-0.70	-0.82	-0.94	-1.06
26	4.23	3.27	2.80	2.37	2.05	1.73	1.41	1.08	0.74	0.41	0.10	-0.18	-0.41	-0.62	-0.74	-0.85	-0.96	-1.07
27	4.21	3.25	2.78	2.34	1.99	1.66	1.33	0.99	0.64	0.30	0.00	-0.21	-0.43	-0.63	-0.74	-0.84	-0.94	-1.04
28	4.20	3.24	2.76	2.31	1.95	1.62	1.28	0.93	0.57	0.23	-0.07	-0.28	-0.48	-0.67	-0.77	-0.86	-0.95	-1.04
29	4.18	3.23	2.74	2.28	1.91	1.57	1.22	0.86	0.50	0.15	-0.15	-0.35	-0.54	-0.72	-0.81	-0.89	-0.97	-1.05
30	4.17	3.22	2.72	2.25	1.87	1.52	1.16	0.80	0.43	0.08	-0.22	-0.41	-0.59	-0.76	-0.84	-0.91	-0.98	-1.05
32	4.15	3.20	2.70	2.21	1.81	1.46	1.09	0.71	0.34	0.00	-0.29	-0.47	-0.64	-0.80	-0.87	-0.93	-0.98	-1.03
34	4.13	3.18	2.68	2.17	1.75	1.40	1.01	0.62	0.24	0.00	-0.31	-0.48	-0.64	-0.79	-0.84	-0.89	-0.93	-0.97
36	4.11	3.16	2.66	2.13	1.69	1.34	0.94	0.54	0.16	0.00	-0.33	-0.49	-0.64	-0.78	-0.82	-0.86	-0.90	-0.93
38	4.10	3.14	2.64	2.09	1.65	1.29	0.88	0.48	0.09	0.00	-0.34	-0.49	-0.63	-0.76	-0.79	-0.82	-0.85	-0.88
40	4.08	3.12	2.62	2.05	1.61	1.24	0.82	0.42	0.03	0.00	-0.35	-0.49	-0.62	-0.74	-0.77	-0.80	-0.82	-0.84
42	4.07	3.11	2.60	2.01	1.57	1.19	0.76	0.36	0.00	0.00	-0.35	-0.48	-0.61	-0.72	-0.74	-0.76	-0.78	-0.80
44	4.06	3.10	2.58	1.97	1.53	1.14	0.70	0.30	0.00	0.00	-0.35	-0.47	-0.59	-0.70	-0.71	-0.72	-0.73	-0.74
46	4.05	3.09	2.56	1.93	1.49	1.09	0.64	0.24	0.00	0.00	-0.35	-0.46	-0.57	-0.67	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69
48	4.04	3.08	2.54	1.89	1.44	1.04	0.58	0.18	0.00	0.00	-0.35	-0.45	-0.55	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65
50	4.03	3.07	2.52	1.85	1.39	0.99	0.52	0.12	0.00	0.00	-0.35	-0.44	-0.53	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
55	4.02	3.06	2.50	1.81	1.34	0.94	0.46	0.06	0.00	0.00	-0.35	-0.43	-0.51	-0.60	-0.60	-0.60	-0.60	-0.60
60	4.00	3.05	2.48	1.77	1.29	0.89	0.40	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.42	-0.49	-0.57	-0.57	-0.57	-0.57	-0.57
65	3.99	3.04	2.46	1.73	1.24	0.84	0.34	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.41	-0.47	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54	-0.54
70	3.98	3.03	2.44	1.69	1.19	0.79	0.28	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.40	-0.45	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51	-0.51
80	3.96	3.01	2.42	1.65	1.14	0.74	0.22	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.39	-0.43	-0.48	-0.48	-0.48	-0.48	-0.48
90	3.95	3.00	2.40	1.61	1.09	0.69	0.16	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.38	-0.41	-0.45	-0.45	-0.45	-0.45	-0.45
100	3.94	2.99	2.38	1.57	1.04	0.64	0.10	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.37	-0.39	-0.42	-0.42	-0.42	-0.42	-0.42
125	3.92	2.97	2.35	1.51	0.99	0.59	0.04	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.36	-0.37	-0.39	-0.39	-0.39	-0.39	-0.39
150	3.90	2.96	2.33	1.47	0.94	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.35	-0.35	-0.36	-0.36	-0.36	-0.36	-0.36
200	3.89	2.94	2.30	1.41	0.89	0.49	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.34	-0.33	-0.34	-0.34	-0.34	-0.34	-0.34
300	3.87	2.93	2.28	1.37	0.84	0.44	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.33	-0.32	-0.32	-0.32	-0.32	-0.32	-0.32
500	3.86	2.91	2.25	1.31	0.79	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.32	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31	-0.31
1000	3.85	2.90	2.23	1.27	0.74	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.31	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30	-0.30
∞	3.84	2.90	2.20	1.21	0.69	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.35	-0.30	-0.29	-0.29	-0.29	-0.29	-0.29	-0.29

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Greg C. Stone, Edward A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani (2004). *Electrical Insulation For Rotating Machines*. IEEE Press Series on Power Engineering.
- [2] U. Gäfvert (1996). *Condition Assessment of Insulation Systems. Analysis of Dielectric Response methods*. Nordic Insulation Symposium, pp. 1-20.
- [3] M. Farahani, H. Borsi, E. Gockenbach (2004). *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain on Insulation System of High Voltage Rotating Machines*. International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France.
- [4] E. David, R. Taghizad, L. Lamarre, D.N. Nguyen (2003). *Investigation on the low frequency dielectric response of ground-wall insulation of rotating machine windings*. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [5] B.L. McHenry (1964). *New Techniques in High Voltage Generator Insulation Tests*. Ontario Hydro Research Quarterly, Vol. 16, fourth quarter.
- [6] B.L. McHenry (1967). *Generator Insulation Testing by Continuous Time-function Application of Direct Voltage*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, pp. 1329-1333.
- [7] N.E. Nilsson (1997). *Report on the Working Group to Review IEEE Std. 95-1977*. IEEE Panel Session on High Voltage Testing of Rotating, 97TP119-0, pp. 18-20.
- [8] IEEE Std. 95-2002 (2002). *Recommended Practice for Insulation Testing of Large Rotating Machinery with High Direct Voltage*. IEEE, Piscataway, NJ, 08855.
- [9] IEEE Std 43-2000 (2000). *IEEE Recommended Practice for Testing of Insulation Resistance of Rotating Machinery*.
- [10] L.M.Rux (1997). *High-Voltage DC Tests for Evaluating Stator Winding Insulation: Uniform Step, Graded Step, and Ramped Test Methods*. IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 0-7803-3851-1, pp. 258-262.
- [11] L.M. Rux, P.E (2004). *Advantages of the Ramped Direct High-Voltage Method of Assessing Stator Winding Insulation Condition*. HCI Publications.

- [12] L. M. Rux (1997). *Ramped High-Voltage DC Testing: A Refined Method of Evaluating Stator Winding Insulation*. IEEE Panel Session on High Voltage Testing of Rotating, 97TP119-0, pp.21-24.
- [13] L.M. Rux, D. R. Bertenshaw (2003). *The Ramped Direct High-Voltage Method of Generator Stator Winding Insulation Testing*, Proceedings of Hydro 2003 Conference, pp. 539-545.
- [14] CIGRÉ Working Group 15.01 Task 09 (June 2002). *Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers*. Electra, pp.24-37.
- [15] *IDA 200 Insulation Diagnostic System*. Programma Electric AB.
- [16] B.V. Hamon (1952). *An approximate Method for Deducing Dielectric Loss Factor from Direct-current Measurements*. Proc. IEE, Vol. 99, pp. 151-5.
- [17] E. David, L. Lamarre (2005). *Low-Frequency Dielectric Response of Epoxy-Mica Insulated Generator Bars During Multi-Stress Aging*.
- [18] R. Morin, R. Bartnikas, P. Ménard (2000). *A Three-Phase Multi-Stress Accelerated Electrical Aging Test Facility for Stator Bars*. IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 15, pp. 149-156.
- [19] R. Bartnikas, R. Morin (2004). *Multi-Stress Aging of Stator Bars with Electrical, Thermal, and Mechanical Stresses as Simultaneous Acceleration Factors*. IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 19, pp. 702-714.
- [20] E. David, A. Nair, T. Godin, J. Bellamare (2006). *Modeling of generator I-V curve from the Ramped Direct Voltage Method*. ISEI 2006, to be published.
- [21] T. Godin, E. David, J. Bellamare (2006). *Experience with the Ramped Direct Voltage Method to assess stator winding insulation condition*. Hydro Vision 2006, to be published.
- [22] F. Cottet, préface de J. Kodosky (2001). *LabView: programmation et applications*. Paris: Dunod.
- [23] N. Amyot, E. David, D. Jean (2001). *Techniques de diagnostic pour lignes Souterraines, volet diagnostic des câbles extrudés : état de l'art*. IREQ 2001, 119c, pp.28.
- [24] Keithley Instruments, Inc. *Data Acquisition and control*. Handbook 2001.

- [25] L. Lamache. *SYS-838 systèmes de mesures*. Notes de cours, École de Technologie supérieure, département génie mécanique.
- [26] Keithley Instruments, Inc. “www.keithley.com”.
- [27] V.V. Daniel (1967). *Dielectric Relaxation*. Academic Press, London, New York, 277 p.
- [28] A.K. Jonscher (1983). *Dielectric Relaxation in Solids*. Chelsea Dielectric Press, London, 380 p.
- [29] J. D. Jackson (1975). *Classical Electrodynamics*. Second Edition, John Wiley & Sons Inc., USA.
- [30] A. Helgeson, U. Gäefvert (1998). *Dielectric Response Measurements in Time and Frequency Domain on High Voltage Insulation with Different Response*. Proc. Of international Symposium on Electrical Insulation Material, pp. 393-398.
- [31] V. Der Houhanessian (1998). *Measurement and Analysis of dielectric response in Oil-Paper Insulation System*. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, ETH, No. 12832, Zurich.
- [32] E. David, L. Lamarre, T. Godin (2000). *Méthode ITERG*. Rapport IREQ-2000-095.
- [33] F.I. Mopsik (1987). *The Transformation of Time-Domain Relaxation Data into the Frequency Domain*. IEEE Trans. On Electrical Insulation. Vol. EI-20, pp.957-964.
- [34] H. St-Onge (1976). *Electrical Conduction in 3-Percent Carbon-Filled Polyethylene – Part I: Low-Field Results*. IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. EI-11, pp. 20-27.
- [35] G.E. Johnson, E.W. Anderson, G.L. Link, D.W. McGall (1975). *Fourier Transform Dielectric Spectrometer*. Am. Chem. Soc. Div. Org. Coat. Plast. Chem. Pap., Vol. 35, pp. 404-409.
- [36] S. A. Boggs and G. C. Stone (April 1982). *Fundamental Limitations in the Measurements of Corona and Partial Discharge*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 143-150.

- [37] A. Fukuda (1997). *The Influence of Water Absorption on Dielectric Properties of Cycloaliphatic Epoxy Resin*. International Conference on Properties and Application of Dielectric Materials, Seoul, Korea, pp.58-61.
- [38] L.M. Rux (1996). *Ramped High Voltage DC Testing of Large Rotating Machine Stator Windings*. Proceedings of the Sixty-Third Annual International Conference of Doble Clients, pp. 7-8.1 to 8.8.
- [39] Bureau of Reclamation (1991). *Testing Solid Insulation of Electrical Equipment*. Facilities Instruments, Standards & Techniques, Vol. 3-1, Denver, Colorado.
- [40] Hepburn, D.M, et al, “Mica” IEEE Electrical Insulation Magazine September/October 2000, Vol.16, No. 5, pp. 19-24.
- [41] C. Hudon, M. Bélec, C. Gueddemi, S. Lamothe, S. and D.N. Nguyen (2002). *Restoration of Groundwall Armor of Stator bars exposed to slot discharges*. Conference recorded of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Boston, MA USA, April 7-10.
- [42] Deer, W.A., et al (1966). *An Introduction to the Rock forming minerals*. Wiley, New York, pp. 191-210.
- [43] L. Rux (May 2004). *The Physical Phenomena Associated With Stator Winding Insulation Condition As Detected By The Ramped Direct High-Voltage Method*. Thesis, May 2004.
- [44] Roberts, F.L., et al (1991). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture, Design, and Construction*. NAPA Education Foundation, Maryland, pp. 70-84.
- [45] Freemantle, M. (1999). *Asphalt*. Chemical &Engineering News, Nov 1999, pg.81.
- [46] R. Sillars (1973). *Electrical Insulating Materials and Their Application*. Steveng, England, Peter Peregrinus for the insulation of Electrical Engineers, pp. 180-191.
- [47] R. Bartnikas, “Engineering Dialectical, Volume IIA, Electrical Properties of solid Insulating Materials: molecular Structure and Electrical Behavior,” ASTM Special Technical Publication 783, New
- [48] R. Sillars, *ibid*, pp. 1992-1979

- [49] M. Tari et al (2002). *Impacts on turbine Generator Design by the Application of Increased Thermal Conducting Stator Insulation*. CIGRE, Paper 11-105, August 2002.
- [50] M. Tari, N. Iwata, H. Hatano, H. Matsumoto, Y. Inoue and T. Yoshimitsu (1998). *Advanced Technology of Stator Coil Insulation System For Turbo-Generator*. in Proceedings of Insucon/ISOTEC'98-The 8th BEAMA International Electrical Conference and Exhibition, pp. 79-86, May, 1998.
- [51] W. McDermid (1993). *Insulation Systems and Monitoring of Stator Windings of Large Rotating Machines*. IEEE Electrical Insulation Magazine Vol.9 (4), pp.7-14, 1993.
- [52] Ken Kimura (1993). *Progress of Insulation Ageing and Diagnostic of High Voltage Rotating Machine Winding in Japan*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.9 (3), pp.13-20, 1993.
- [53] Helgeson Anders (2000). *Analysis of Dielectric Response Measurement Methods and Dielectric Properties of Resin Rich Insulation During Processing*. Thèse de Royal Institute of Technology (KTH), Suède.
- [54] E. David, C. Guddemi, L. Lamarre (2004). *Rapport sur les essais de laboratoire ITERG-10 kV*. Institut de Recherche Hydro Quebec, pp. 14-15.
- [55] ANSI/IEEE Std 433-1974. *IEEE Recommended Practice for Insulation Testing of Large AC Rotating Machinery with High-Voltage at Very Low Frequency*.
- [56] R. Bartnikas (1987). *Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Measurement Techniques*. Engineering Dielectrics Vol. IIB, ASTM Publication STP 926.
- [57] A. Kutil, K. Fröhlich (1995). *Partial Discharge Phenomena in Composite Insulation Materials*’, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach VA USA, pp.343-346.
- [58] Y.J. Kim, J.K. Nelson (1992). *Assessment of Deterioration in Epoxy/Mica Machine Insulation*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.27 (5), pp.1026-1039.
- [59] W. Ziomek, W. Moscicka-Grzesiak (1996). *Assessment of the State of Mica-Resin Insulation using PD Charge Analysis and Dielectric Loss Measurements*.

- Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, USA, pp.492-495.
- [60] A. Contin, al. (1996). *Diagnostic of HV Stator Bar Insulation in the Presence of Multi Partial-Discharge Phenomena*. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, San Francisco, USA, pp.488-491.
- [61] A. Audoli, J. L. Drommi (1991). *Analysis of Partial Discharges Measurements and Generator Technology Evolution* » Proceeding of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, pp.687-690.
- [62] S. A. Higgins, J. P. Reynders (1999). *Experience with insulation condition monitoring on a 1050 MW Generator* », High Voltage Engineering Symposium, London, United Kingdom, pp. 5.352.P5.
- [63] Wetzler, al. (2000). *Diagnostic and Condition Assessment- Techniques for Condition Based Maintenance*. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria BC, Canada, pp.47-50, 2000.
- [64] A. Jeffery (2002). *Advanced Engineering Mathematics*, Manuel, 2002.
- [65] G. Baillargeon (1996). *Méthodes Statistiques De L'ingénieur*. Manuel volume 2, 1996.
- [66] J. A. Nurse 1998. *Evaluation of Impregnation Resins for Large High Voltage Rotating Electrical Machines*. In Proceedings of INSUCON/ISOTEC 98—The 8th BEAMA International Electrical Insulation Conference and Exhibition, pp. 10—19, Harrogate, May 12-14.
- [67] Vijendra K. Agarwal (1989). *Aging of Multistressed Polymeric Insulators*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.24 (5), pp.741-763.
- [68] Agarwal, al. (1995). *The Mysteries of Multifactor Ageing*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.11(3), pp.37-43.
- [69] J. W. Mackersie (2000). *Ageing of Composite Machine Insulation with a Non-Linear Response* », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria BC, Canada, pp.756-759.

- [70] Ken Kimura (1993). *Progress of Insulation Ageing and Diagnostic of High Voltage Rotating Machine Winding in Japan*. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.9 (3), pp.13-20.
- [71] W. McDermid (1993). *Insulation Systems and Monitoring for Stator Windings of Large Rotating Machines*. IEEE Electrical Insulation Magazine Vol.9 (4), pp.7-14.
- [72] E. David, C. Paynot, R. Taghizad (2005). *Polarization / depolarization current measurements and ramped voltage test on 4 hydro generators bars*. EXACT DMI Technical Report.
- [73] A. Audoli, J. L. Drommi (1991). *Analysis of Partial Discharges Measurements and Generator Technology Evolution*. Proceeding of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Tokyo, Japan, pp.687-690.
- [74] A. Kutil, K. Fröhlich (1995). *Partial Discharge Phenomena in Composite Insulation Materials*”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach VA USA, pp.343-346.
- [75] R. Vogelgang, al. (2003). *Effect of electrical tree propagation on breakdown in mica Insulation*. 13th International Symposium on High Voltage Engineering, Rotterdam, Netherlands, pp.1-4.
- [76] B. R. Varlow, D.W. Auckland (1996). *Mechanical Aspect of Electrical Treeing in Solid Insulation*”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.12 (2), pp.21-26.
- [77] Hoof and S. Lanz (1999). *PD diagnostics on rotating machines – Possibilities and limitation*. In Porc. Elect. Insul. Conf. And Elect. Manufact. Coil Winding Conf. pp. 195-200.