

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DU  
DOCTORAT EN GÉNIE  
Ph. D.

PAR  
Mélanie LÉVESQUE

ÉTUDE DES FACTEURS INFLUENÇANT LE MÉCANISME DES DÉCHARGES  
PARTIELLES D'ENCOCHE

MONTREAL, LE 7 AOÛT 2012



Mélanie Lévesque, 2012



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Claude Hudon, codirecteur de thèse  
Département d'expertise des équipements électriques à l'Institut de recherche d'Hydro-Québec

M. Kamal Al-Haddad, président du jury  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Martin Viens, membre du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Masoud Farzaneh, examinateur externe  
Département des sciences appliquées à l'Université du Québec à Chicoutimi

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 27 JUILLET 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Premièrement, je désire sincèrement remercier mes deux directeurs Monsieur Claude Hudon et Monsieur Éric David pour avoir permis la collaboration entre l'ÉTS et l'IREQ menant à la réalisation de ce projet, pour leur implication, leur soutien ainsi que leur disponibilité. Je leur suis extrêmement reconnaissante pour l'expertise acquise ainsi que pour les nombreuses discussions et les judicieuses recommandations qu'ils m'ont faites tout au long de ce projet.

Je souhaite spécialement remercier Calogero Guddemi et Mario Bélec pour leur assistance et leurs judicieux conseils, sans eux ce projet n'aurait pas été le même. Je remercie également Normand Amyot, Arezki Merkouf, Jean Picard, Benedicto Navarrete, Stéphane Gingras et Daniel Jean pour leur soutien ainsi que pour les nombreuses discussions autour d'un bon café. Je désire aussi remercier Hélène Provencher pour sa grande écoute et son incommensurable soutien, j'espère avoir la chance de travailler avec elle dans le futur. Je remercie aussi Ana Aguiar qui a été ma compagne de bureau durant une bonne partie du projet.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel de l'unité d'expertise des équipements électriques de l'IREQ et celui du département de génie mécanique de l'ÉTS pour leur appui à la réalisation de ce projet.

Je tiens également à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies, l'Institut de recherche d'Hydro-Québec et l'École de technologie supérieure pour le soutien financier reçu sous forme d'une bourse BMP-Innovation, de stages en milieu industriel Accélération-Québec et de bourses de recherche.

Enfin, je ne peux passer sous le silence l'appui inestimable de mon conjoint Xavier Landry qui tout au long de ce projet n'a jamais cessé de m'écouter et de m'encourager. Je suis extrêmement chanceuse de t'avoir dans ma vie.



# ÉTUDE DES FACTEURS INFLUENÇANT LE MÉCANISME DES DÉCHARGES PARTIELLES D'ENCOCHE

Mélanie LÉVESQUE

## RÉSUMÉ

Les décharges partielles (DP) d'encoche surviennent sur l'enroulement du stator du côté haute tension dans les espacements d'air situés entre la surface des barres et celle du noyau magnétique. Ces DP qui sont très intenses sont depuis longtemps considérées comme étant dommageables pour le système d'isolation de masse. De ceci, une vaste étude en laboratoire a été démarrée en janvier 2007 avec comme objectif principal d'évaluer la contribution relative des différents paramètres qui influencent l'évolution de l'activité de DP d'encoche et la dégradation de l'isolation de masse des barres du stator.

Ce projet de recherche a été divisé en trois grandes étapes qui ont été l'implantation de deux montages de vieillissement en laboratoire et le développement d'un modèle de calcul du champ électrique. Un premier montage de vieillissement a été réalisé en laboratoire avec six barres de réserve du stator d'un alternateur et soumises à des DP d'encoche sous différentes combinaisons de contraintes électriques, thermiques et mécaniques. Ce montage expérimental a été soumis à un vieillissement de 25000 h et l'évolution de l'activité de DP d'encoche en fonction des combinaisons de contraintes a été caractérisée avec des mesures de DP, de conductivité des surfaces et des inspections visuelles. Par la suite, un deuxième montage de vieillissement en laboratoire a été réalisé avec deux barres de réserve soumises à des DP d'encoche à deux températures différentes et vieilles dans une chambre climatique sous trois séquences d'une durée de 230 h chacune à trois niveaux différents d'humidité. Des mesures de DP ont été effectuées tout au long du vieillissement et des inspections visuelles au début et à la fin de chacune des séquences ont permis de caractériser l'évolution de l'activité de DP d'encoche dans chacune des conditions. Finalement, la dernière étape de ce projet a été le développement d'un modèle de calcul du champ électrique dans une cavité d'air typique de celle où les DP d'encoche surviennent. Ce modèle a été conçu afin d'évaluer l'impact de la condition des surfaces sur le champ électrique en présence d'activité de DP.

Nous avons observé que les mécanismes de dégradation des barres soumises à des DP d'encoche sont dépendants de la présence des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales ainsi que de la condition des surfaces du site de décharges. Tous ces paramètres ont une influence significative sur l'évolution de l'activité de DP d'encoche et sont dans la plupart des cas reliés entre eux. De plus, nous avons confirmé que la présence de DP d'encoche combinée avec des vibrations mécaniques est la condition la plus critique et qu'il importe de bien reconnaître cette situation car, une rupture diélectrique de l'isolation de masse des barres du stator peut survenir rapidement.

**Mots clés:** décharges partielles d'encoche, vieillissement, dégradation, isolation de masse, alternateur hydraulique, humidité, température, vibrations mécaniques, champ électrique, modélisation





# ÉTUDE DES FACTEURS INFLUENÇANT LE MÉCANISME DES DÉCHARGES PARTIELLES D'ENCOCHE

Mélanie LÉVESQUE

## ABSTRACT

Slot partial discharges (PD) which take place on bars closer to the high voltage terminals of the stator winding in the air gap between the magnetic iron core of the stator and the winding insulation, are recognized as being harmful to the groundwall insulation. In order to determine the effect of the different parameters that affect the evolution of slot DP and the insulation degradation mechanism, an extensive study has been initiated in 2007.

This study was divided into three sections which have been the implementation of two laboratory aging experiments and the development of a PD model. A first accelerated aging laboratory experiment was conducted on six stator bars divided into three groups and subjected to slot DP under electrical stress alone, under electrical and thermal stresses and, finally under electrical, thermal and mechanical stresses. The aging experiment lasted for 25000 h and the changes in the detected phase resolved partial discharge patterns of slot PD were analyzed as a function of aging time for each stress condition while surface conductivity measurements as well as visual observations were carried out to complement the PD results. Subsequently, a secondary laboratory experiment was carried out using two stator bars placed in a climatic chamber and exposed to slot PD activity at two temperatures under three aging sequences of 230 h at three different humidity levels. The phase resolved partial discharge patterns were monitored throughout each aging sequence and visual observations of the surfaces were made at the beginning and at the end, in order to characterize the evolution of slot partial discharge under each condition. At last, a numerical partial discharge model was developed in order to evaluate the effect of the surface condition on the electric field distribution inside an air cavity typical of the one where slot PD occur.

Results confirm that insulation degradation mechanisms are dependent on the type of stress present but also on surface degradation (insulation and magnetic iron core). These parameters also significantly influence the evolution of slot PD and are usually interrelated. In addition, it was confirmed that the presence of the triple stress, namely electrical, thermal and mechanical is the worst condition and progresses much faster to cause failure than when only electrical and thermal stresses were actives and it is thus important to recognize this situation from the others.

**Keywords:** slot partial discharges, aging, degradation, groundwall insulation, air-cooled generator, humidity, thermal stress, mechanical vibrations, electrical field, modeling



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 LA REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	7
1.1 Les décharges partielles .....	7
1.2 Le système d'isolation de masse des barres du stator .....	10
1.3 L'apparition des décharges partielles d'encoche .....	12
1.3.1 La résistivité du revêtement semi-conducteur .....	13
1.3.2 La vibration des barres dans les encoches du stator .....	15
1.4 Le mécanisme des décharges partielles d'encoche .....	17
1.4.1 L'effet de la condition des surfaces .....	21
1.4.2 L'effet de la contrainte électrique seule .....	23
1.4.3 L'effet de la contrainte thermique .....	24
1.4.4 L'effet de la contrainte mécanique .....	26
1.4.5 L'effet de l'humidité .....	27
1.5 Conclusion .....	29
CHAPITRE 2 EFFECT OF SURFACE DEGRADATION ON SLOT PARTIAL DISCHARGE ACTIVITY UNDER ELECTRICAL, THERMAL AND MECHANICAL STRESSES .....	31
2.1 Abstract .....	31
2.2 Introduction .....	32
2.3 Experimental description .....	35
2.3.1 Accelerated aging test setup .....	35
2.3.2 PD measurements .....	39
2.3.3 Surface conductivity measurements .....	39
2.4 Results .....	40
2.4.1 Visual observations of surfaces .....	40
2.4.2 Surface conductivity measurements .....	44
2.4.3 PD measurements .....	46
2.5 Discussion .....	51
2.6 Conclusion .....	61
CHAPITRE 3 CONTRIBUTION OF HUMIDITY TO THE EVOLUTION OF SLOT PARTIAL DISCHARGES .....	63
3.1 Abstract .....	63
3.2 Introduction .....	64
3.3 Experimental description .....	67
3.3.1 Humidity aging test setup .....	67
3.3.2 Measurements techniques .....	69
3.4 Results .....	71

3.4.1	Visual observations of surfaces .....	71
3.4.2	PD measurements.....	75
3.5	Discussion.....	86
3.5.1	Slot PD process.....	87
3.5.2	Effects of surface condition .....	88
3.5.3	Effects of temperature.....	91
3.5.4	Effects of humidity .....	93
3.6	Conclusion .....	100
CHAPITRE 4    EFFECT OF SURFACE CONDITION ON THE ELECTRIC FIELD IN AIR CAVITIES.....		103
4.1	Abstract.....	103
4.2	Introduction.....	104
4.3	Slot PD model.....	107
4.4	Results and discussion .....	115
4.4.1	Electric field distribution .....	115
4.4.2	Effects of surface condition .....	117
4.5	Conclusion .....	128
CHAPITRE 5    RÉSULTATS SUPPLÉMENTAIRES.....		129
5.1	L’inspection visuelle des sites de DP d’encoche .....	129
5.2	La réponse diélectrique de la partie droite.....	137
5.3	L’essai de rupture diélectrique.....	141
5.4	Discussion.....	142
5.5	Conclusion .....	144
CONCLUSION.....		145
RECOMMANDATIONS .....		151
ANNEXE I        CALCUL DE LA DYNAMIQUE DES CHARGES APPLIQUÉES SUR LA SURFACE ISOLANTE.....		153
ANNEXE II      ORGANIGRAMME DU MODÈLE DE CALCUL DU CHAMP ÉLECTRIQUE.....		156
BIBLIOGRAPHIE.....		157

## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Table 2.1	Group identification and characteristics .....	37
Table 3.1	Level of humidity and experimental conditions .....	68
Table 3.2	PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.9 .....	76
Table 3.3	PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.10 .....	77
Table 3.4	PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.15 .....	82
Table 3.5	PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.16 .....	84
Table 4.1	Dimensions and electrical properties of the model.....	109
Tableau 5.1	Temps de vieillissement avant la rupture diélectrique des sites de DP des barres du groupe 3 .....	134
Tableau 5.2	Tension résiduelle des sites de DP des barres du groupe 1 et 2.....	142



## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Deux barres dans une encoche du noyau magnétique avec une vue sur l'isolation de masse et du système de calage radial .....	12
Figure 1.2	Représentation visuelle de l'activité de DP d'encoche qui survient entre la surface d'une barre du stator et celle du noyau magnétique .....	13
Figure 1.3	Une barre ayant été soumise à des DP d'encoche de nature purement électrique.....	14
Figure 1.4	Une barre soumise à des DP d'encoche avec de la vibration mécanique .....	16
Figure 1.5	La signature PRPD typique de l'activité de DP d'encoche .....	20
Figure 2.1	Six stator bars exposed to slot PD in the three locations per bar (A, B and C) under different stress conditions .....	36
Figure 2.2	Lamination stack used for mechanical abrasion .....	37
Figure 2.3	The time line for the periodic characterization of each bar .....	38
Figure 2.4	Surface deposit examined after 1200 h (top) and 5800 h (bottom) of aging on the insulation surface (left) and on the grounded electrode (right) of one site of bar 1B.....	41
Figure 2.5	Insulation surface (left) and grounded electrode surface (right) examined after 9800 h of aging of one site of bar 2A .....	42
Figure 2.6	Surface deposit and striation marks examined after 9800 h of aging on the insulation surface (left) and on the grounded electrode (right) of one site of bar 3A.....	43
Figure 2.7	Failures sites of one slot PD site of bar 3B (left) and one site of bar 3A (right) .....	43
Figure 2.8	Surface conductivity measurements of epoxy-mica insulation surface for each slot PD site of group 1 and 2 (left) and group 3 (right) .....	45
Figure 2.9	Surface conductivity measurements of the grounded electrode for each slot PD site of group 1 and 2 (left) and group 3 (right).....	46

Figure 2.10 Evolution of the NQS + of all six bars in parallel measured with the capacitive coupler at room temperature and with bars of groups 2 and 3 at 85°C .....47

Figure 2.11 PRPD patterns recorded at 8 kV with a capacitive coupler on bar 1A with the iron oxide powder (left) and after the iron oxide powder was removed from insulation surfaces (right).....48

Figure 2.12 PRPD patterns measured after 7200 h of aging time at 8 kV on bar 2A with the capacitive coupler at room temperature (left) and in front of one slot PD site of bar 2A with the directional antenna when the bar was at 85°C (right).....49

Figure 2.13 PRPD pattern measured at 8 kV in front of one slot PD site of bar 2A with the directional antenna at 85°C after 9800 h of aging time .....50

Figure 2.14 PRPD patterns measured on the entire bar 3A at 8 kV with the capacitive coupler and at room temperature condition, after 5800 h (left) and after 7200 h (right) .....51

Figure 2.15 Electric field calculation developed inside the groundwall insulation (E is the magnitude of the electric field).....57

Figure 2.16 Electric field and equipotential surface calculation inside an air gap between epoxy-mica surface insulation and grounded steel electrode (E is the magnitude of the electric field).....58

Figure 3.1 Evolution of the slot PD activity measured in front of two slot PD sites with a directional antenna at 8 kV and 85°C over a period of two years .....65

Figure 3.2 Two stator bars (A and B) exposed to slot PDs in a climatic chamber with an enlargement of the slot PD site without the grounded electrode .....68

Figure 3.3 Time line of the humidity and voltage aging sequence for bar A at 28°C and bar B at 85°C.....69

Figure 3.4 Arrangement for slot PD observation (a) a slot PD site without ground, (b) using a grounded steel wire mesh under room light, (c) with UV camera at 0 kV and (d) at 8 kV before surface degradation .....70

Figure 3.5 Pictures of the insulation surface (left) and grounded steel plate (right) of the slot PD site of bar A after sequence 1 (top), sequence 2 (middle) and sequence 3 (bottom) .....71



Figure 3.6	Pictures of the slot PD site of bar A taken at 8 kV in dry conditions (23°C and 5 g/m <sup>3</sup> ) with an UV camera and a grounded steel wire mesh after aging sequence 1 (left), sequence 2 (middle) and sequence 3 (right) .....	72
Figure 3.7	Pictures of the insulation surface (left) and the grounded steel plate (right) of the slot PD site of bar B after sequence 1 (top), sequence 2 (middle) and sequence 3 (bottom) .....	73
Figure 3.8	Pictures of the slot PD site of bar B taken at 8 kV in dry conditions (23°C and 5 g/m <sup>3</sup> ) with an UV camera and a grounded steel wire mesh after aging sequence 1 (left), sequence 2 (middle) and sequence 3 (right) .....	74
Figure 3.9	PRPD patterns measured at 8 kV on bar A before aging sequence 2, when the voltage was first applied at 28°C and 5 g/m <sup>3</sup> , measurement 0 (left) and after 18 h exposed to 8 kV at 28°C and 5 g/m <sup>3</sup> , measurement 1 (right) .....	76
Figure 3.10	PRPD patterns measured at 8 kV and 9 g/m <sup>3</sup> on bar B before aging sequence 2, after the conditioning period (measurement 2) at 28°C (left) and at 85°C (right) .....	77
Figure 3.11	Evolution of the NQS of the slot PD site of bar A measured at 8 kV and 28°C for all aging sequences.....	78
Figure 3.12	PRPD patterns measured at 8 kV and 28°C on bar A during the aging sequence 1 at 5 g/m <sup>3</sup> , (a) measurement 2 at 0 h, (b) measurement 3 at 65 h, (c) measurement 7 at 165 h and (d) measurement 8 at 230 h .....	80
Figure 3.13	PRPD patterns measured at 8 kV and 28°C on bar A at the end of aging sequence 1 at 5 g/m <sup>3</sup> , (measurement 8 at 230 h), 40-800 kHz (left) and 2-20 MHz (right).....	80
Figure 3.14	Evolution of the NQS of the slot PD site of bar B measured at 8 kV and 85°C for all aging sequences.....	81
Figure 3.15	PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C on bar B during aging sequence 1 at 5 g/m <sup>3</sup> , (a) measurement 2 at 0 h, (b) measurement 3 at 65 h, (c) measurement 7 at 165 h and (d) measurement 8 at 230 h .....	83
Figure 3.16	PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C on bar B during the aging sequence 3 at 13 g/m <sup>3</sup> , (a) measurement 2 at 0 h, (b) measurement 3 at 65 h, (c) measurement 7 at 165 h and (d) measurement 8 at 230 h .....	84

XVIII

Figure 3.17 PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C on bar B at the end of aging sequence 2, measurement 8, in all humidity conditions (a) 9 g/m<sup>3</sup>, (b) 13 g/m<sup>3</sup>, (c) 5 g/m<sup>3</sup> and (d) 13 g/m<sup>3</sup> .....85

Figure 3.18 Summary of the cause and effect relationship of the influence of surface degradation on the slot PD activity .....91

Figure 3.19 Summary of the cause and effect relationship of the influence of temperature on the slot PD activity.....93

Figure 3.20 Summary of the cause and effect relationship of the influence of humidity on the slot PD activity .....99

Figure 4.1 Slot PD activity in an air cavity between the insulation surface and the magnetic core .....107

Figure 4.2 The surface of a stator bar with a slot PD site (top) and the 2D geometry used in the PD model (bottom).....108

Figure 4.3 Surface charge density deposited on the insulation surface due to a single PD channel occurrence.....113

Figure 4.4 The magnitude of the electric field for an applied electric potential of 8 kV, at the insulation surface (left) and in the middle of the modeled air cavity (right) .....116

Figure 4.5 The electric field and PD events at one site in the modeled air cavity when the availability of electrons is high (left) and low (right) .....117

Figure 4.6 Distribution of PD events as a function of the applied voltage phase with  $\phi_{\text{cond}} = 1.55$  eV and  $\phi_{\text{insul}} = 1.3$  eV (top),  $\phi_{\text{cond}} = 1.45$  eV and  $\phi_{\text{insul}} = 1.3$  eV (middle) and  $\phi_{\text{cond}} = 1.45$  eV and  $\phi_{\text{insul}} = 1.2$  eV (bottom).....119

Figure 4.7 Surface deposits on the insulation surface and on the grounded electrode of one PD site .....121

Figure 4.8 Surface charges for insulation surface conductivity of  $10^{-16}$  S per square .....123

Figure 4.9 Surface charges decay for insulation surface conductivity of  $10^{-12}$  S per square .....124

Figure 4.10 The influence of the insulation surface conductivity at  $10^{-12}$  S per square on the electric field magnitude at the insulation surface (top) and in the middle of the cavity at 0.125 mm (bottom).....125

Figure 4.11	Distribution of PD events as a function of the applied voltage phase with $\varphi_{\text{cond}} = 1.5 \text{ eV}$ , $\varphi_{\text{insul}} = 1.3 \text{ eV}$ and $\gamma = 10^{-16} \text{ S per square}$ (top) ; $\gamma = 10^{-12} \text{ S per square}$ (bottom) .....	126
Figure 5.1	L'état du volume de l'isolation de masse observé au centre de la partie droite (gauche) et dans un coin (droite) sur un site de DP d'encoche de la barre 1B.....	130
Figure 5.2	L'état du volume de l'isolation de masse observé dans deux coins différents d'un échantillon relevé sur un site de DP d'encoche de la barre 1A. ....	130
Figure 5.3	Le début et la fin de l'arborescence électrique formée sur la barre 1A après 24700 h de vieillissement à l'extérieur de la barre (gauche) et sur le coin du brin de cuivre (droite).....	131
Figure 5.4	L'état du volume de l'isolation de masse observé dans deux coins situés près du site de la rupture diélectrique de la barre 1A. ....	131
Figure 5.5	L'évolution des mesures de DP effectuées avec un coupleur capacitif à 8 kV à la température ambiante .....	132
Figure 5.6	L'état de la surface isolante observé d'un site de DP d'encoche de la barre 2A (à gauche) et la partie droite du dessous de la barre 2A (à droite) après 25000 h de vieillissement .....	133
Figure 5.7	L'état du volume de l'isolation de masse observé sur un site de DP d'encoche de la barre 2A (à gauche) et des premières couches dégradées (à droite).....	133
Figure 5.8	La dissection du site de DP d'encoche de la barre 3B qui a subi une rupture diélectrique après 25000 h de vieillissement.....	135
Figure 5.9	L'état du volume de l'isolation de masse observé dans un coin près du point intérieur sur le brin de cuivre où il y a eu rupture diélectrique d'un site de la barre 3A.....	136
Figure 5.10	Signature PRPD mesurée sur la barre 3B à 7200 h avec un coupleur capacitif à 8 kV, à la température ambiante.....	137
Figure 5.11	Les résultats des mesures de la réponse diélectrique de la partie droite de la barre 2A à une tension de 5 kV et un temps de charge et décharge de 2000 s.....	138
Figure 5.12	Les résultats des mesures de la réponse diélectrique de la partie droite de la barre 1A à une tension de 5 kV et un temps de charge et décharge de 2000 s.....	139

Figure 5.13	Les résultats des mesures de la réponse diélectrique de la partie droite de la barre 3B à une tension de 5 kV et un temps de charge et décharge de 2000 s.....	140
Figure 5.14	Le montage utilisé lors de l'essai de rupture diélectrique.....	141

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AC	Alternating current
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEGB	Central Electricity Generating Board
CIGRÉ	Conseil des Grands Réseaux Électriques
DP	Décharges Partielles
ÉTS	École de Technologie Supérieure
EGR	Electron Generation Rate
FEM	Finite Element Method
FeO	Oxyde de fer
FeO(OH) <sub>2</sub>	Hydroxyde ferreux
FeO(OH) <sub>3</sub>	Hydroxyde ferrique
( $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Hématite
( $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Maghémite
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Magnétite
( $\alpha$ -FeOOH)	Goethite
( $\gamma$ - FeOOH)	Lépidocrocite
5·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O	Ferrihydrite
GVPI	Global Vacuum Pressure Impregnated
HNO <sub>x</sub>	Acide nitrique
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Péroxyde d'hydrogène
HQ	Hydro-Québec

HR	Humidité relative
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IREQ	Institut de Recherche d'Hydro-Québec
N <sub>2</sub>	Azote
NO <sub>x</sub>	Oxydes d'azote
O <sub>2</sub>	Oxygène
O <sub>3</sub>	Ozone
OH·	Hydroxyle radical
PD	Partial Discharges
PRPD	Phase Resolved Partial Discharge
RH	Relative Humidity
RMS	Root Mean Square
TEAM	Thermal, Electrical, Ambient, Mechanical
TDEI	Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
UV	Ultraviolets
VPI	Vacuum Pressure Impregnated
2D	Two Dimensional

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

### Symboles

A	Aire de la surface conductrice (m <sup>2</sup> )
a	paramètre géométrique du calcul de la distribution de charge (m)
B	constante caractéristique du gaz (8.6 Pa·m) <sup>(1/2)</sup>
b	distance du centre de la distribution de charge (m)
C <sub>th</sub>	constante universelle (1.2 x 10 <sup>6</sup> A/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )
d	la distance du centre de la barre (mm)
d <sub>1</sub>	le diamètre externe de l'électrode interne (mm)
d <sub>2</sub>	le diamètre interne de l'électrode externe (mm)
d <sub>t</sub>	l'intervalle de temps entre deux décharges (s)
Δx	la dimension du maillage horizontal (m)
deg	degré (°)
E	le champ électrique (kV/mm)
E <sub>inc</sub>	le champ électrique d'amorçage des DP (kV/mm)
E <sub>x</sub>	le champ électrique tangentiel (kV/mm)
(E/P) <sub>cr</sub>	constante caractéristique du gaz (24.2 V/ Pa·m)
e	la charge électronique (1.602176 x 10 <sup>-19</sup> C)
ε <sub>eff</sub>	la permittivité moyenne à l'interface de deux isolants (sans unité)
ε <sub>r</sub>	la permittivité relative du diélectrique (sans unité)
ε <sub>0</sub>	la permittivité du vide (F/m)
F(a,b)	une fonction qui dépend des paramètres géométriques a et b (sans unité)
k	la constante de Boltzmann (1.3806 x 10 <sup>-23</sup> J/K ou 8.617385 x 10 <sup>-5</sup> eV/K)
i <sup>th</sup>	la position sur le maillage horizontal (sans unité)
j <sup>th</sup>	l'itération (sans unité)
$\vec{n}$	un vecteur unitaire (sans unité)
N	le nombre de décharge (sans unité)
N+	le nombre de décharge positive (durant l'alternance négative) (sans unité)
N-	le nombre de décharge négative (durant alternance positive) (sans unité)
$\dot{N}_{es\_cond}$	le taux d'émission d'un électron par la surface conductrice (1/s)
$\dot{N}_{es\_ins}$	le taux d'émission d'un électron par la surface isolante (1/s)
NQS	le courant apparent moyen (μA)
NQS+	le courant apparent moyen positive (durant alternance négative) (μA)
NQS-	le courant apparent moyen négatif (durant alternance positive) (μA)
P	la pression (Pa)
π	pi (3.141592654)
φ	la fonction de travail (eV)
q	la charge déposée sur la surface isolante (C)
Q	la charge apparente (C)
Q+	la charge apparente positive (durant alternance négative) (C)
Q-	la charge apparente négative (durant alternance positive) (C)

## XXIV

$R_s$	la résistance de surface seule ( $\Omega$ )
$R$	rayon de la cavité (m)
$\rho$	la densité de charge volumique ( $C/m^3$ )
$\rho_s$	la résistivité de surface ( $\Omega/\text{carré}$ )
$\sigma$	la conductivité (S/m)
$\sigma$	la densité de charge surfacique ( $C/m^2$ )
$T$	la température ( $^{\circ}C$ )
$\tau_{es}$	le temps d'attente d'émission d'un électron (s)
$\gamma$	la conductivité de surface (S/carré)
$\gamma_s$	la conductivité de surface (S/carré)
$\nu_0$	la fréquence fondamentale du phonon (Hz)
$\omega$	la fréquence angulaire du réseau (377 rad/s)

### Unités de mesure

A	ampère
C	coulomb
$C/m^3$	coulomb par mètre cube
$C/m^2$	coulomb par mètre carré
$^{\circ}C$	degré celsius
$^{\circ}$	degré
eV	electron volt
F/m	farad par mètre
$g/m^3$	gramme par mètre cube
Hz	hertz
h	heure
K	kelvin
k $\Omega$	kilo ohm
kHz	kilohertz
kV	kilovolt
kV/mm	kilovolt par millimètre
kV/s	kilovolt par seconde
MW	megawatt
MHz	mégahertz
m	mètre
mm	millimètre
min	minute
nA	nanoampère
nC	nanocoulomb
nF	nanofarad
%	pourcentage
Pa	pascal
Pa·m	pascal mètre
pF	picofarad



S	siemens
S/carré	siemens par carré
s	seconde
$\mu\text{A}$	microampère
$\mu\text{m}$	micromètre
$\mu\text{m}^2$	micromètre carré
$\mu\text{s}$	microseconde
T	tesla
V	volt
V/Pa·m	volt par pascal mètre
$\Omega$	ohm
$\Omega/\text{m}$	ohm par mètre
$\Omega/\text{carré}$	ohm par carré



## INTRODUCTION

Les alternateurs hydrauliques sont parmi les équipements les plus importants de la production d'énergie sur le réseau électrique. De façon générale, ils sont caractérisés comme étant des machines tournantes éprouvées avec une espérance de vie théorique estimée à près de 50 ans, (Stone et Wu, 2009). Cependant, plusieurs mécanismes de dégradation reliés soit à la conception et la fabrication ou soit à l'opération et la maintenance peuvent occasionner une réduction significative de leur durée de vie. Une défaillance prématurée de ces machines engendre des coûts importants en pertes de production ainsi qu'en réparation ou en remplacement. Dans un contexte où un grand nombre de ces machines actuellement en service ont atteint un âge avancé, que les conditions d'opération sont de plus en plus exigeantes et que l'accès à une source d'énergie abondante et à faible coût est primordial, la fiabilité de ces machines tournantes est donc un sujet de première importance pour les exploitants de parcs de production.

Selon une étude publiée en 2003 par le Conseil des Grands Réseaux Électriques (CIGRÉ), les principales causes de défaillances des alternateurs hydrauliques, comme la plupart des équipements électriques opérants à haute tension, sont reliées à leur système d'isolation (CIGRÉ, 2003). Les décharges partielles (DP) qui sont toujours présentes dans le stator des alternateurs hydrauliques, sont reconnues depuis longtemps comme étant très dommageables pour l'intégrité de l'isolation de masse. Durant le fonctionnement normal de ces machines, il est donc possible d'en détecter plusieurs sources dont l'intensité diffère significativement (Hudon et Belec, 2005). Les DP internes dites normales, surviennent dans des cavités gazeuses situées dans le volume de l'isolation de masse; les DP de type délamination se produisent dans des cavités gazeuses formées entre la surface des conducteurs en cuivre et la surface de l'isolation de masse; des DP couronne surviennent dans l'air à la jonction entre le revêtement semi-conducteur et celui à gradient de potentiel; des DP inter-barres se produisent dans l'air au niveau des développantes; des DP dites effluves de surface surviennent dans l'air lorsque des dépôts conducteurs sont présents à la surface des barres au niveau des développantes; des DP d'encoche qui surviennent dans l'air entre la surface de l'isolation de

masse des barres et celle du noyau magnétique mis à la terre. En fonction de la source, l'activité de DP provoque à différents rythmes des changements irréversibles des propriétés physiques et chimiques du système d'isolation. L'isolation de masse du stator à base de mica est d'ailleurs conçue pour résister à l'attaque normale des DP internes. Cependant, l'activité de DP d'encoche est reconnue depuis longtemps comme étant beaucoup plus néfaste pour l'isolation (Johnson, 1951a). De plus, la présence de diverses contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales combinées à l'action continue des DP, contribue à accélérer significativement la dégradation du système d'isolation. À long terme, l'isolant de masse du stator devient de plus en plus vulnérable aux conditions normales d'opération, occasionnant des risques d'utilisation ainsi qu'une diminution de l'espérance de vie de ces machines.

La mesure des DP est utilisée depuis plus de 60 ans pour le diagnostic des machines tournantes (Johnson, 1951a). De nos jours, malgré le fait qu'il n'y a pas encore de procédure unique, les instruments de mesure de DP sont pour la grande majorité dotés d'analyseur capable d'afficher les signaux résolus dans la phase, PRPD (Phase Resolved Partial Discharge). Étant donné qu'une impulsion de DP est caractérisée par son amplitude, sa polarité et sa position dans la phase, ce type d'analyseur permet une représentation phase-amplitude-nombre sur un graphique en trois dimensions ou en deux dimensions avec un code de couleurs qui représente la troisième dimension. L'utilisation de cette technique permet non seulement une bonne quantification de l'activité de DP, mais aussi une bonne identification de chacune des différentes sources de DP actives dans la machine. L'interprétation de l'évolution de l'activité de DP et des changements de sa signature PRPD est assez complexe. Au cours des années, plusieurs études ont été réalisées concernant l'analyse et la compréhension des signaux de DP mesurés sur les machines. Une conception répandue dans l'industrie est que l'activité de DP mesurée augmente constamment en fonction de la dégradation de l'isolant. Il faut toutefois être très prudent, car comme plusieurs sources de DP peuvent survenir simultanément dans les machines durant leur fonctionnement normal, la signature PRPD superposée de tous ces types de DP combinés devient rapidement difficile à évaluer. De plus, des travaux ont démontré qu'en fonction de la dégradation des

surfaces, certaines sources de DP subissent des transitions qui favorisent une diminution de leur amplitude moyenne (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1993) pendant que d'autres peuvent augmenter. Ainsi, une partie de la complexité de l'analyse des changements de la signature PRPD vient du fait qu'il faut comprendre la physique de chacune des sources de DP en fonction de l'environnement dans lequel elles évoluent. Par exemple, les surfaces de cavités où siège l'activité de DP sont continuellement modifiées par l'action de celle-ci, mais en plus, l'activité de DP est conséquemment affectée par des changements irréversibles de l'état des surfaces. Les signatures PRPD doivent aussi être traitées rigoureusement selon les conditions présentes lors du fonctionnement des machines. Par exemple, des travaux réalisés sur le terrain ont démontré que l'amplitude des DP peut varier d'un facteur 100 selon la saison, c'est-à-dire suivant les variations du contenu d'humidité dans l'air (Younsi et al., 2001). Dans ce cas, l'augmentation des signaux de DP observée sur une courte période pourrait être interprétée comme l'apparition d'un défaut critique. Il a aussi été observé, qu'en augmentant la température de fonctionnement, les cavités ou les délaminations de faibles dimensions se referment avec la dilatation des matériaux, ce qui peut conduire à une diminution de l'activité de DP, tandis que cette même augmentation de température peut conduire à une augmentation de l'activité de DP dans le cas où des DP d'encoche sont présentes (Stone et al., 2004). Afin d'éviter les erreurs d'interprétations des mesures de DP effectuées périodiquement sur les alternateurs, il est donc fondamental de considérer la présence des différentes contraintes de fonctionnement et de bien comprendre tous les mécanismes enclenchés dans le processus de dégradation de l'isolant ainsi que leurs rôles respectifs dans l'évolution de l'activité de DP.

En conséquence, une vaste étude sur le phénomène des DP d'encoche a été démarrée en janvier 2007 et réalisée en étroite collaboration entre l'École de technologie supérieure (ÉTS) et l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ). L'objectif principal de cette étude est de contribuer à l'amélioration des connaissances d'un des mécanismes les plus néfastes pour les alternateurs, soit celui des DP d'encoche. Cette étude considère l'effet de paramètres tels que la condition des surfaces ainsi que la présence des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales présentes durant le fonctionnement des machines sur

l'évolution de sa signature PRPD et sur la dégradation de l'isolation de masse. La première grande étape de cette étude a été accomplie lors de travaux d'une maîtrise dont la soutenance et le dépôt final ont été complétés avec succès au cours de l'été 2008 (Lévesque, 2008). Par la suite, cette étude s'est poursuivie dans le cadre de cette thèse de doctorat dont les objectifs plus spécifiques sont :

1. d'évaluer la contribution relative des différentes contraintes de fonctionnement électriques, thermiques et mécaniques sur l'évolution de l'activité de DP d'encoche et sur la dégradation de l'isolation de masse des barres du stator.
2. de déterminer l'impact de l'humidité sur l'activité de DP d'encoche et sur l'évolution de sa signature PRPD.
3. de valider l'effet de la condition des surfaces sur la distribution du champ électrique ainsi que sur la disponibilité d'électrons dans une cavité d'air typique de celle rencontrée en présence de DP d'encoche.

Afin d'atteindre ces objectifs, cette étude a été divisée en trois grandes étapes. La première étape a été l'exploitation d'un montage de vieillissement accéléré en laboratoire. La planification, l'installation et la mise en route du processus de vieillissement ont été effectuées durant les travaux de maîtrise (Lévesque, 2008). Ce montage réalisé avec six barres neuves de stator d'alternateur qui ont été divisées en trois groupes de deux barres et soumises à des DP d'encoche sous trois différentes combinaisons de contraintes : électrique seule à la température ambiante, électrique et thermique et finalement, électrique, thermique et mécanique. Au total, les barres ont été soumises à un vieillissement de 25000 h et des mesures de DP, de la conductivité des surfaces, de la réponse diélectrique ainsi que des inspections visuelles ont été effectuées afin de caractériser leur état. Au terme du vieillissement, des essais de rupture du diélectrique ont été effectués sur les barres dont les sites de DP d'encoche étaient encore actifs et, par la suite, des dissections et analyses des sites de DP d'encoche ont été réalisées.

La seconde étape de l'étude a été la planification, l'installation et la réalisation d'un deuxième montage de vieillissement de courte durée en laboratoire. Ce montage a été réalisé avec deux barres de stator d'alternateur soumises à des DP d'encoche à deux températures différentes et placées sous humidité contrôlée dans une chambre climatique. Ces deux barres ont été soumises à trois séquences de vieillissement d'une durée de 230 h chacune sous trois différents niveaux d'humidité. L'activité de DP d'encoche a été évaluée en fonction de l'humidité, de la température et de la dégradation initiale des surfaces par des mesures de DP ainsi que par des inspections visuelles.

La dernière et troisième étape a été le développement d'un modèle de calcul du champ électrique dans une cavité d'air typique de celle où se forment des DP d'encoche en machine. L'effet de la condition des surfaces et de la dynamique des charges déposées sur la surface isolante sur le champ électrique a été évalué. Le modèle a été conçu à l'aide d'un logiciel de calcul par éléments finis interfacé avec un algorithme programmé dans le logiciel de calcul Matlab®. Le champ électrique en présence d'activité de DP a été simulé pendant une période de 10 cycles de la tension d'alimentation. Ce modèle a permis d'expliquer certains changements obtenus des signatures PRPD lors des deux expérimentations en laboratoire.

Ces travaux sont plus spécifiquement décrits dans la présente thèse sous forme d'articles scientifiques. Le chapitre 1 expose une revue de la littérature sur le sujet et permet de situer les travaux effectués dans le cadre de cette étude parmi les autres travaux connexes réalisés à ce jour. Les trois chapitres suivants (chapitre 2, 3 et 4) sont le cœur de cette thèse, et sont constitués respectivement de deux articles déjà publiés et d'un troisième soumis pour publication dans la revue Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (TDEI) de l'IEEE. Le chapitre 2 présente les résultats obtenus à la suite des inspections visuelles, de la mesure de la conductivité des surfaces et de l'évolution des signatures PRPD d'encoche après une séquence de 9800 h de vieillissement de la première expérimentation réalisée sur les six barres d'alternateur (Levesque et al., 2010). Le chapitre 3 traite des résultats de mesures de DP ainsi que des inspections visuelles de la seconde expérimentation réalisée dans une chambre climatique sous une humidité contrôlée sur deux barres d'alternateur

(Levesque et al., 2012). Le chapitre 4 présente les détails du développement et les résultats du modèle de calcul du champ électrique sous différentes conditions de surfaces dans une cavité d'air typique de celle où survient l'activité de DP d'encoche. Par la suite, le chapitre 5 présente des résultats supplémentaires obtenus de la première expérimentation qui n'ont pas été mentionnés dans l'article 1 au chapitre 2, mais qui contribuent à la compréhension du mécanisme des DP d'encoche. Un retour sur les principaux éléments ainsi qu'une synthèse des résultats avec des recommandations pour des travaux futurs sont présentés dans la section recommandation ainsi que dans la conclusion. Finalement, cette étude a permis de rédiger et publier les documents suivants :

1. M. Levesque, C. Hudon, M. Belec and E. David, "Evolution of Slot Partial Discharges under Electrical, Thermal and Mechanical Stresses", *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 153-157, Vancouver, 2008.
2. M. Levesque, "Étude des taux de dégradation de barres d'alternateur soumises à des décharges partielles d'encoche sous différentes contraintes" mémoire de maîtrise, École de technologie supérieur, 112 p, juin 2008
3. C. Hudon, M. Belec and M. Levesque "Study of Slot Partial Discharges in air-cooled generators", *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transaction on*, vol. 15, no.6, pp. 1675-1690, 2008
4. M. Levesque, C. Hudon, M. Belec and E. David, "Measurements of Slot Partial Discharges with an antenna during accelerated aging", *IEEE Electrical Insulation Conference*, pp. 458-462, Montreal, 2009.
5. M. Levesque, E. David, C. Hudon and M. Belec "Effect of Surface Degradation on Slot Partial Discharge Activity", *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transaction on*, vol. 17, no.5, pp. 1428-1440, 2010
6. M. Levesque, E. David, C. Hudon and M. Belec "Contribution of Humidity to the Evolution of Slot Partial Discharges", *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transaction on*, vol. 19, no.1, pp. 61-75, 2012



## CHAPITRE 1

### LA REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre traite de l'état de l'art concernant le mécanisme des DP d'encoche en commençant par une brève description de ce qu'est le phénomène de DP en général ainsi que du système d'isolation de masse du stator des machines tournantes. De plus, afin de situer les travaux de la présente thèse parmi ceux effectués au cours des années, la dernière partie du chapitre en expose les principales contributions.

#### 1.1 Les décharges partielles

Lorsqu'un milieu isolant est soumis à de fortes contraintes électriques, une rupture diélectrique ou un claquage peut se manifester dans ce milieu, celui-ci ne pouvant plus contenir totalement les charges électriques à ces bornes; il en résulte une transformation complète ou partielle du milieu isolant en milieu conducteur. Afin d'en arriver à cette situation, certaines conditions doivent être en place. Premièrement, le milieu doit être en présence d'un champ électrique important. La valeur maximum du champ électrique que celui-ci peut supporter est donnée par sa rigidité diélectrique. Étant donné que la rigidité diélectrique d'un isolant gazeux comme l'air est toujours inférieure à celle des isolants liquides ou solides, l'apparition du phénomène de DP est surtout susceptible de survenir dans les isolants gazeux. Par la suite, en plus d'être soumis à un champ électrique élevé, un électron initiateur doit être présent dans le gaz, qui pour les DP d'encoche est de l'air. Lorsque les conditions sont propices, il survient un phénomène d'ionisation enclenché par les collisions entre les électrons et les molécules. En effet, étant donné que le champ électrique transmet de l'énergie cinétique aux particules chargées et les oriente selon sa direction, ces particules dans leur libre parcours entrent en collision avec des molécules qui sont présentes dans l'air. Les électrons en raison de leur faible masse acquièrent beaucoup de cette énergie cinétique et en conservent la totalité lors de collisions élastiques avec les molécules. Ainsi, lorsqu'un électron initiateur soumis à un champ électrique élevé, acquiert assez d'énergie cinétique, il peut entrer en collision avec une molécule et réussir à arracher un électron à

cette molécule. Cette réaction arrache à la molécule neutre un électron qui devient libre en créant un ion positif. Ce nouvel électron qui est soumis au même champ électrique peut également acquérir assez d'énergie cinétique pour occasionner d'autres collisions ionisantes. Ce mécanisme appelé avalanche électronique se répète jusqu'à  $10^8$  fois dans une seule décharge, causant ainsi la rupture diélectrique de l'isolant gazeux (Bartnikas et McMahon, 1979). En raison de leur masse beaucoup plus importante que celle des électrons libres, les ions acquièrent beaucoup moins de vitesse. Ainsi, l'énergie cinétique reçue, lors de leur libre parcours est redistribuée à chacune des collisions avec d'autres molécules. L'ionisation par collisions ioniques est donc considérée comme étant beaucoup moins efficace que celle par collisions électroniques.

Les électrons initiateurs sont généralement présents en raison de ceux déposés sur les surfaces isolantes lors d'une activité de DP précédente et de ceux émis par les surfaces métalliques. Le délai avant l'apparition d'un électron initiateur dans un espacement d'air, lorsque le champ électrique occasionné par une tension alternative appliquée, a atteint la valeur maximum de la rigidité diélectrique, est un événement statistique, identifié comme étant le temps d'attente statistique. De plus, afin de soutenir l'activité de DP d'autres électrons doivent être fournis par des mécanismes d'ionisations secondaires. Ces mécanismes sont ceux par émission de surface (cathode) due à l'impact ionique ainsi qu'à la photoémission, et ceux par émission de volume dans la cavité d'air due à la photoionisation des molécules neutres et au photodétachement d'ions négatifs (Bartnikas et McMahon, 1979).

En présence d'une cavité d'air ayant des surfaces isolantes, une décharge affecte seulement une faible portion de la surface totale de la cavité ce qui permet à plusieurs sites de décharger simultanément ou consécutivement. Selon les conditions de champ électrique, la dimension de la cavité d'air et l'état des surfaces, différents régimes tels que des décharges impulsionnelles, luminescentes ou pseudoluminescentes peuvent se former. Les décharges impulsionnelles, qui sont celles détectées par les instruments de mesure conventionnels, se présentent sous deux formes, caractérisées par leur temps de montée et leur durée. Les

décharges de type Townsend de plus faible amplitude, ont une progression lente, leur temps de montée est relativement long et leur durée est courte tandis que les décharges de type Streamer, qui sont plus intenses, ont un temps de montée beaucoup plus rapide et une durée plus courte. La différence majeure entre ces deux types de décharges impulsionnelles se reflète dans les signaux électroniques générés et dépend de l'intensité du champ électrique à l'intérieur de la cavité ainsi que de la présence de charges formées dans l'air qui ont pour effet de créer une distorsion du champ électrique. Les décharges luminescentes n'ont pas un caractère impulsionnel, mais se présentent plutôt sous forme d'une activité continue tandis que les décharges pseudoluminescentes possèdent des caractéristiques de ces deux régimes, c'est-à-dire de petites impulsions superposées à un signal presque constant. Ces différents régimes de décharges peuvent survenir simultanément dans une cavité d'air et leur point commun est qu'ils participent tous à la dégradation des surfaces.

Le système d'isolation de l'enroulement du stator de machines tournantes opérant à haute tension, généralement 3 kV et plus, est toujours soumis à des DP. Par exemple, des cavités gazeuses sont formées lors des réactions de réticulation de la résine utilisée comme un des principaux matériaux de l'isolation de masse ou lors du fonctionnement normal des machines en raison de la présence de différentes contraintes thermomécaniques qui peuvent fissurer l'isolant et créer des cavités gazeuses. Il est donc nécessaire de décrire le système d'isolation de masse afin de bien comprendre les causes de l'initiation de l'activité de DP d'encoche. En conséquence, la section suivante présente brièvement le système d'isolation de masse de l'enroulement du stator d'un alternateur hydraulique. Tout dépendant de la puissance de la machine, l'enroulement du stator peut être constitué de barres ou de bobines. Étant donné que seules des barres ont été utilisées dans les travaux expérimentaux de la présente thèse, les sections suivantes font d'une façon générale plus souvent référence aux barres qu'aux bobines, même si les DP d'encoche peuvent affecter ces deux types de construction.

## 1.2 Le système d'isolation de masse des barres du stator

L'une des principales composantes du système d'isolation de masse est un minéral naturel appelé mica qui est extrêmement résistant à l'attaque des DP. Chimiquement, le mica est un composé complexe de silicate d'aluminium avec du potassium, magnésium, fer et autres traces d'éléments. Les principaux types de mica utilisés pour les systèmes d'isolation de masse sont la muskovite et la phlogopite (Stone et al., 2004). Le mica possède une structure sous forme de flocons ayant une mauvaise intégrité mécanique et doit être fixé à l'aide d'une résine sur un support mécanique qui est de la fibre de verre tissée, de la fibre textile de polyéthylène téréphtalate ou de la fibre textile de polyester.

Les premiers systèmes d'isolation de type thermoplastique consistaient principalement en des flocons de mica imprégnés d'une résine naturelle, tels que l'asphalte ou le shellac (résine naturelle d'origine animale). Ces systèmes de faible rigidité diélectrique et de basse température de fonctionnement (classe thermique B, 105°C) étaient généralement surdimensionnés. Il est d'ailleurs encore possible de trouver des machines de faibles puissances, fonctionnant avec ce type de système d'isolation. L'introduction de nouveaux matériaux à la fin des années 1950 a permis d'augmenter considérablement la puissance des machines tout en diminuant l'épaisseur de l'isolant de masse.

De nos jours, les systèmes d'isolation de masse sont de type thermodurcissable, à base de résine synthétique polyester ou époxy et opèrent à plus haute température (classe thermique F, 155 °C). La résine époxy, qui est maintenant un standard dans l'industrie, est un matériau composé de matière organique (carbone, oxygène et hydrogène) qui, une fois polymérisé, possède d'excellentes propriétés mécaniques et thermiques. Ce système d'isolation peut être fabriqué selon deux procédés. Le premier consiste à utiliser un ruban de mica enrichi d'une résine époxy à l'état B, c'est-à-dire prépolymérisé (Resin-Rich). Suite à l'application du ruban sur les conducteurs de la barre, la polymérisation de la résine est terminée à haute température et haute pression. Le deuxième procédé consiste en un ruban de mica à faible contenu en résine (dry bands) qui est imprégné de résine sous vide dans une cuve, VPI

(Vacuum Pressure Impregnated), et ensuite polymérisé toujours à haute température. Ce second procédé peut s'effectuer sur les barres individuelles ou sur tout l'enroulement du stator GVPI (Global Vacuum Pressure Impregnated), lorsque les machines sont de plus faibles dimensions.

Dans le cas des alternateurs hydrauliques à 13.8 kV, l'isolation de masse des barres placées dans les encoches du noyau magnétique mis à la terre, doit être en mesure de supporter une tension maximale de 8 kV (phase-terre). Lorsque les barres sont soumises à cette tension, un champ électrique se développe dans le volume de l'isolant. Puisque l'interface entre la surface de l'isolant des barres et la surface laminée du noyau magnétique n'est pas parfaitement lisse et uniforme, des pointes microscopiques et des espacements d'air peuvent générer des concentrations locales du champ électrique entre ces deux surfaces et initier une activité de DP. Afin d'uniformiser les surfaces équipotentielles et d'enrayer les concentrations locales du champ électrique à l'interface entre ces deux surfaces, la partie droite de la barre, qui est la section à l'intérieur du noyau magnétique, est finie avec un revêtement semi-conducteur chargé de graphite ou de noir de carbone sous forme de peinture ou de ruban. Ce revêtement permet d'assurer un bon contact électrique avec le noyau magnétique et de mettre au même potentiel (la mise à la terre) toute la surface de l'isolation de masse et de celle du noyau magnétique. La section à l'extérieur du noyau magnétique (les deux développantes) est finie avec une protection anti-effluves, servant à créer un gradient de tension. Cette protection est aussi sous forme de ruban ou de peinture chargée d'oxyde de fer ou de carbure de silicium.

De plus, afin de ne pas endommager les barres (la barre de fond et la barre d'entrefer) lors de l'installation dans les encoches du noyau magnétique, celles-ci doivent être d'une dimension plus faible que les encoches. Pour enrayer l'excédent d'espace et ainsi éviter que les barres vibrent dans les encoches en suivant les forces électromagnétiques actives lors du fonctionnement normal de la machine, des systèmes de calages radiaux avec ressorts ondulés et de bourrages latéraux fabriqués avec des matériaux semi-conducteurs sont utilisés. La

Figure 1.1 illustre la disposition des barres dans une encoche du noyau magnétique avec une vue de leur isolation de masse et du système de calage radial.

Même avec l'application d'un revêtement semi-conducteur à la surface des barres, des décharges partielles nommées DP d'encoche peuvent survenir. Ce type de DP très intense se manifeste seulement sur les barres du côté haute tension de l'enroulement, qui représentent environ un tiers de l'enroulement du stator, dans les espacements d'air situés sur la partie droite entre la surface des barres et celle du noyau magnétique.

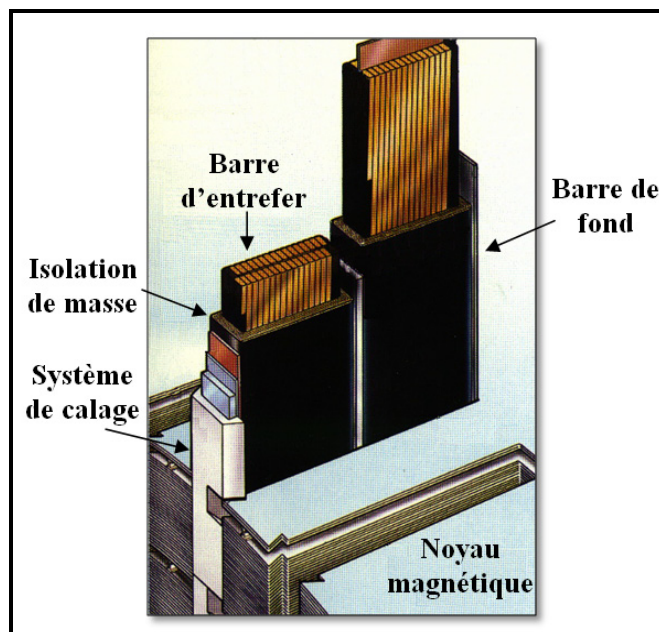


Figure 1.1 Deux barres dans une encoche du noyau magnétique avec une vue sur l'isolation de masse et du système de calage radial

### 1.3 L'apparition des décharges partielles d'encoche

L'apparition de l'activité de DP d'encoche survient à l'intérieur du noyau magnétique sur la partie droite des barres constituant l'enroulement du stator, lorsque la résistivité du revêtement semi-conducteur n'est pas adéquate ou lorsque le revêtement semi-conducteur est érodé en raison du mouvement des barres dans les encoches. La Figure 1.2 illustre un stator

d'alternateur hydraulique où se situe l'activité de DP d'encoche ainsi qu'une barre alimentée à sa tension nominale (8 kV) et placée dans une maquette d'un noyau magnétique avec deux sites de DP d'encoche créés artificiellement. L'image de l'activité de DP d'encoche a été prise dans un laboratoire de l'IREQ.

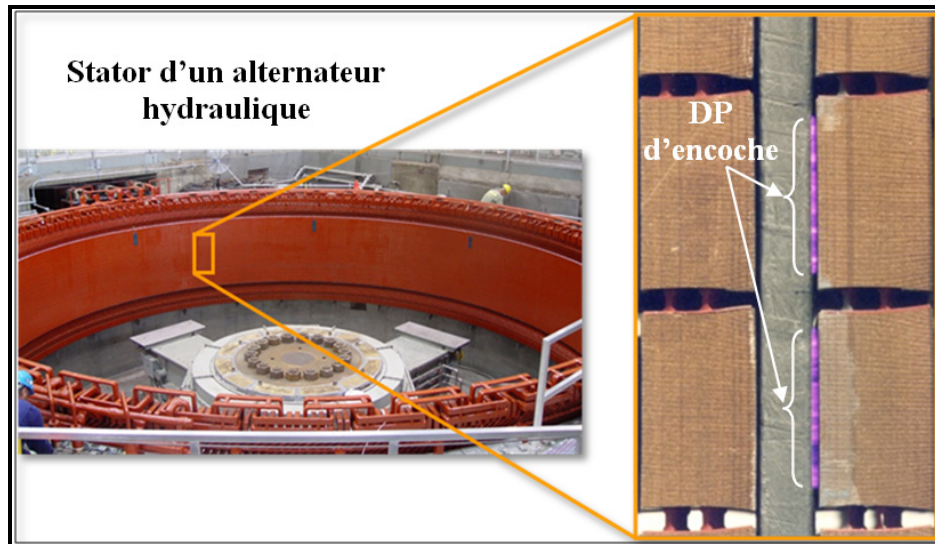


Figure 1.2 Représentation visuelle de l'activité de DP d'encoche qui survient entre la surface d'une barre du stator et celle du noyau magnétique

### 1.3.1 La résistivité du revêtement semi-conducteur

Le revêtement semi-conducteur prévient l'apparition des DP en assurant l'intégrité du contact électrique avec le noyau magnétique afin que le champ électrique développé dans les espacements d'air localisés entre la surface des barres et le noyau magnétique soit en dessous de la valeur maximum de la rigidité diélectrique de l'air. Pour ce faire, la résistivité de surface du revêtement semi-conducteur doit être d'une valeur appropriée qui, selon plusieurs ouvrages, doit être inférieure à 25 k $\Omega$  par carré (Jackson et Wilson, 1982; Thienpont et Sie, 1964) et supérieure à 5 k $\Omega$  par carré (Liese et Brown, 2008). Si la résistivité de surface du revêtement semi-conducteur est trop élevée entre deux points de contact avec le noyau magnétique, le courant de surface ne circule plus librement et un potentiel peut se développer entre les points de contact. En présence d'un espacement d'air, si les conditions sont réunies,

des DP intenses dites DP d'encoche peuvent se produire dans l'air entre la surface du revêtement semi-conducteur et le noyau magnétique. Si le revêtement semi-conducteur est trop conducteur et qu'il y a des pertes de contact avec le noyau magnétique, la circulation d'un courant intense peut générer des étincelles ou décharges de courant (Stone et al., 2008). Dans ces deux cas, l'énergie libérée dégage une chaleur intense qui accélère la dégradation du revêtement semi-conducteur. Lorsque ce revêtement est endommagé et que la surface de l'isolation de masse des barres sous tension fait face au noyau magnétique, l'activité de DP se produit entre ces deux surfaces et progresse latéralement en dégradant le revêtement semi-conducteur sur toute la surface de la barre. Dans ce cas, l'activité de DP d'encoche est de nature purement électrique. La Figure 1.3 illustre une barre d'alternateur qui a été soumise à des DP d'encoche de nature électrique. Le revêtement semi-conducteur appliqué sur la surface de cette barre a été érodé par l'activité de DP sur une grande section laissant paraître la surface de l'isolant.



Figure 1.3 Une barre ayant été soumise à des DP d'encoche de nature purement électrique

Ce type de DP d'encoche survient lorsque le revêtement semi-conducteur n'est pas conçu adéquatement. Une mauvaise qualité du dopage des particules de carbones ou de graphites peut en être la cause. Par contre, si tel est le cas, une mesure de la résistivité de surface effectuée lors des essais de qualification des barres avant l'installation dans la machine devrait le détecter. Lors de l'application sur la surface de l'isolation de masse d'un revêtement semi-conducteur sous forme de ruban, de petites cavités d'air peuvent se former sous le revêtement et, en présence d'un champ électrique important, peuvent aussi initier l'activité de DP. La présence de DP d'encoche détériore le système d'isolation de masse, mais en plus engendre de grandes quantités d'ozone ( $O_3$ ) qui peuvent être néfastes pour les



travailleurs et potentiellement endommager les pièces d'équipements exposées (Belec et al., 2007). Des méthodes peuvent être utilisées pour diminuer l'impact des DP d'encoche de nature électrique telles qu'injecter une peinture semi-conductrice par les canaux de ventilation du noyau magnétique (Hudon et al., 2002) ou échanger les barres du côté haute tension de l'enroulement avec celle du côté neutre. Ces méthodes ne permettent pas de corriger totalement l'activité de DP d'encoche, mais peuvent la diminuer considérablement jusqu'au remplacement complet de l'enroulement si nécessaire. Toutefois, certaines études évoquent que l'isolation de masse serait assez résistante à la présence de DP d'encoche de nature purement électrique et que les machines soumises à cette activité peuvent opérer durant plusieurs années avant de subir une défaillance (Stone et al., 2004; Wood et Hindmarch, 1990).

### **1.3.2 La vibration des barres dans les encoches du stator**

En fonctionnement normal, les barres sont soumises à des forces électromagnétiques qui sont engendrées par l'interaction de la circulation du courant dans leurs conducteurs et la densité de flux circulant dans le noyau magnétique. Dans le cas où les barres ont de l'espace, c'est-à-dire que l'installation ou la conception des systèmes de bourrages et de calages tels qu'illustrés à la Figure 1.1 n'est pas adéquate ou en raison de la contraction et la dilatation des matériaux provoquées par les contraintes thermomécaniques, elles vont se mettre à vibrer sous l'effet des forces électromagnétiques en direction du fond de l'encoche selon l'axe radial de la machine. Lorsque la surface des barres glisse le long de la surface laminée du noyau magnétique, le revêtement semi-conducteur s'érode, plaçant à l'air libre des portions de la surface de l'isolation de masse. Dans ce cas, si les conditions sont propices, des DP d'encoche vont s'initier. Lorsque les barres vibrent dans les encoches, le revêtement semi-conducteur s'érode en forme d'échelle, tel qu'illustré à la Figure 1.4, en raison de la présence des canaux de ventilation du noyau magnétique où l'usure ne se produit pas.

L'apparition des barres avec un système d'isolation thermodurcissable à base de résine époxy installées avec les anciens systèmes de calages dits durs a engendré beaucoup de problèmes

d'activité de DP d'encoche en raison de la vibration (Jackson et Wilson, 1982; Lonseth et Mulhall, 1976; Lyles, 1980). Au début des années 1980, une étude réalisée sur 456 alternateurs hydrauliques par un groupe de travail de l'IEEE concernant les problèmes avec les systèmes d'isolation thermodurcissables, a exposé que les DP d'encoche avec vibration des barres sont une des principales causes de rupture du système d'isolation de masse du stator de ces machines (Evans, 1981).



Figure 1.4 Une barre soumise à des DP d'encoche avec de la vibration mécanique

En conséquence, de nouveaux systèmes de calage des barres à base de ressort ondulé permettant un meilleur ajustement ont été introduits sur le marché. Malgré ceci, les résultats d'un autre sondage plus récent effectué par le CIGRÉ entre 1992 et 2002 sur des alternateurs hydrauliques ont indiqué que les DP d'encoche avec vibration des barres représentaient encore 10% des principales causes de défaillances de ces machines. L'action combinée des DP d'encoche avec la vibration des barres est beaucoup plus agressive pour l'isolant de masse que lorsque les DP d'encoche sont de nature purement électrique. Une étude effectuée sur des machines affectées par des DP d'encoche avec vibration des barres a exposé le cas d'une défaillance qui est survenue 8 ans après la mise en service de la machine (Stein, Laird et Watters, 2008) tandis qu'une autre étude un peu moins documentée a indiqué que des

défaillances dues à ce phénomène sont survenues après seulement 3 ans d'opération (Stone et al., 2008). Bien que l'activité de DP d'encoche se produise seulement sur les barres du côté haute tension de l'enroulement du stator, les forces électromagnétiques qui occasionnent la vibration des barres dans les encoches agissent sur tout l'enroulement, autant du côté haute tension que du côté neutre. Les mesures apportées pour corriger cette problématique nécessitent donc plus d'étapes, car c'est tout l'enroulement qui s'use. Au cours des années, différentes procédures ont été établies (Lonseth et Mulhall, 1976; Lyles, 1980) qui d'une façon générale mentionnent d'injecter une peinture semi-conductrice sur la surface des barres afin de restituer l'intégrité du contact électrique avec le noyau magnétique pour ensuite installer de nouveaux systèmes de calages et de bourrages latéraux. Par contre, étant donné que les coûts associés à ces corrections sont assez importants et selon l'état d'avancement de la dégradation, dans beaucoup de cas, un changement complet de l'enroulement du stator est la meilleure option (Stone et al., 2008).

En conséquence, les deux formes de DP d'encoche (purement électrique et avec de la vibration mécanique) ne présentent pas la même criticité. Il faut donc être en mesure de les reconnaître. L'utilisation d'outils tels que la mesure des DP permet d'identifier le type d'activité de DP et d'en suivre l'évolution. Cependant, l'interprétation de ces mesures est encore, à ce jour, assez difficile et nécessite une bonne compréhension des différents mécanismes actifs, du système d'isolation, des différents types de DP et du circuit de mesures. La section suivante présente plus spécifiquement les travaux réalisés afin d'améliorer l'interprétation des mesures de l'activité de DP d'encoche.

#### **1.4 Le mécanisme des décharges partielles d'encoche**

Lorsque le revêtement semi-conducteur est érodé laissant à l'air libre des portions de la surface isolante, un fort champ électrique se développe dans l'espace d'air situé entre cette surface isolante et celle du noyau magnétique mis à la terre. Ce champ électrique comprend deux composantes (Jackson et Wilson, 1982), une composante perpendiculaire à la surface isolante qui se développe dans le volume d'air et une autre composante tangentielle à

la surface isolante qui se développe près de la jonction avec le revêtement semi-conducteur. Suivant l'augmentation du potentiel entre le cuivre des barres et le noyau magnétique, le champ électrique local dans l'air augmente rapidement au-dessus du seuil critique d'initiation de l'activité de DP. Par la suite, il suffit de la présence d'un électron libre pour provoquer l'avalanche électronique décrite précédemment et soutenir l'activité de DP d'encoche. Le mécanisme physique qui se manifeste lors de l'apparition du phénomène de DP dans un espacement d'air situé entre une surface métallique et une surface isolante a été résumé dans des travaux datant du début des années 1950 (Friedlander et Reed, 1953).

Durant l'alternance positive du cycle de la tension, la surface conductrice du noyau magnétique devient l'électrode cathodique qui fournit les électrons libres nécessaires pour soutenir l'activité de DP. Sous l'influence du champ électrique, les ions positifs sont dirigés vers la surface conductrice et une série de réactions complexes se manifeste à l'interface métal/air dans la région de la chute de tension cathodique. Si les ions positifs acquièrent assez d'énergie pour traverser cette région, ils réagissent avec la surface métallique et créent d'autres ions et électrons libres. L'impact d'UV sur la surface métallique produit aussi des électrons libres par un mécanisme de photoémission et d'autres sont générés par photoionisation des molécules dans l'air. Comme la surface conductrice n'est pas parfaitement lisse et uniforme, des pointes microscopiques et des aspérités sur cette surface peuvent concentrer le champ électrique suffisamment pour permettre l'émission d'électrons libres à ces endroits. Les électrons et ions négatifs ainsi formés sont dirigés par le champ électrique vers la surface isolante, se déposent sur celle-ci et produisent un champ électrique en sens inverse du champ électrique initial occasionné par la haute tension et, lorsque le champ inverse créé par ces charges est suffisamment élevé, l'activité de DP s'éteint dans la cavité.

Durant l'alternance négative du cycle de la tension, la surface isolante devient l'électrode cathodique qui fournit les électrons. Lorsque le champ électrique local dans la cavité d'air atteint la valeur critique du seuil d'initiation, le nombre important d'électrons déposés à la surface par l'activité de DP survenue durant l'alternance précédente du cycle de la tension est

maintenant disponible pour initier les DP durant cette alternance. Le champ électrique local atteint la valeur du seuil critique d'initiation plus tôt dans le cycle que s'il n'y avait pas la contribution des charges négatives déposées sur la surface isolante qui, dans cette alternance, s'additionne au champ électrique initial. Le mécanisme de photoémission à la surface isolante et de photoionisation dans le volume d'air augmente encore une fois le nombre d'électrons disponibles pour soutenir l'activité de DP. Les électrons qui sont dirigés par le champ électrique en direction de la surface du noyau magnétique sont rapidement drainés par celle-ci tandis que les ions positifs qui sont dirigés vers la surface isolante vont se déposer sur celle-ci. Le déplacement de ces charges induit, dans ce cas également un champ électrique inverse qui diminue le champ électrique initial dans l'espace d'air et, par le fait même, éteint l'activité de DP d'encoche dans cette alternance.

Les premières mentions d'activité de DP d'encoche sur la surface des conducteurs du stator de machines tournantes de grande puissance remonte à 1920 (Wood et al., 1980). Par contre, c'est au début des années 1950 que les premières publications concernant des travaux relatifs aux DP d'encoche ont été effectuées par un groupe de recherche de Westinghouse Electric Corporation (Johnson, 1951a; 1951b; Johnson et Mead, 1951). En raison de la sévérité des DP d'encoche dans leurs machines, ce groupe a développé un analyseur de DP qui était capable de distinguer les DP d'encoche dont l'amplitude des impulsions était très élevée, des DP internes qui présentaient des impulsions dont l'amplitude était beaucoup plus faible. (Johnson, 1951b; Johnson et Mead, 1951). Cette méthode de détection des DP d'encoche était en contrepartie très sensible aux bruits environnants. Par la suite, Ontario Hydro (Kurtz et Lyles, 1979) a développé un instrument de mesure de DP, capable de déterminer l'amplitude, la polarité et le nombre des impulsions de DP suivant l'alternance du cycle de la tension. Cette technique de mesure a permis d'identifier que la signature de l'activité de DP d'encoche présente une asymétrie en faveur des décharges positives qui surviennent durant l'alternance négative du cycle de la tension d'alimentation (Lyles, Stone et Kurtz, 1988). Dès lors, des travaux spécifiques d'identification de l'initiation de l'activité de DP d'encoche ont été réalisés sur des machines en service (Fuhr et al., 1990) et sur des montages en laboratoire (Contin et Rabach, 1992; Holboll et al., 1994; Murray et Edwards, 1995; Sheehy, Blackburn

et Rungis, 1996). Dans tous les cas, une augmentation de l'amplitude moyenne des signaux de DP mesurés ainsi que la présence d'une asymétrie selon l'alternance du cycle de la tension indiquaient l'apparition de l'activité de DP d'encoche. Plus récemment, l'avancement de la technologie a facilité le développement d'appareils plus sophistiqués permettant de représenter avec une bonne qualité d'image la signature de l'activité de DP résolue dans la phase (PRPD). Grâce à cet outil, la signature typique de l'activité de DP d'encoche a été identifiée dans des travaux de laboratoire (Belec, Hudon et Guddemi, 2001; Farahani et al., 2005; Hudon et Belec, 2005) et sur des machines en service (Azuaje et Torres, 2006) comme étant triangulaire avec une montée rapide au début de la signature où des décharges positives surviennent durant l'alternance négative du cycle de la tension et montrant une asymétrie d'une alternance à l'autre telle que la signature illustrée à la Figure 1.5. Cette signature PRPD de DP d'encoche a été mesurée dans des conditions contrôlées en laboratoire où presque qu'aucune autre source de DP n'était présente.

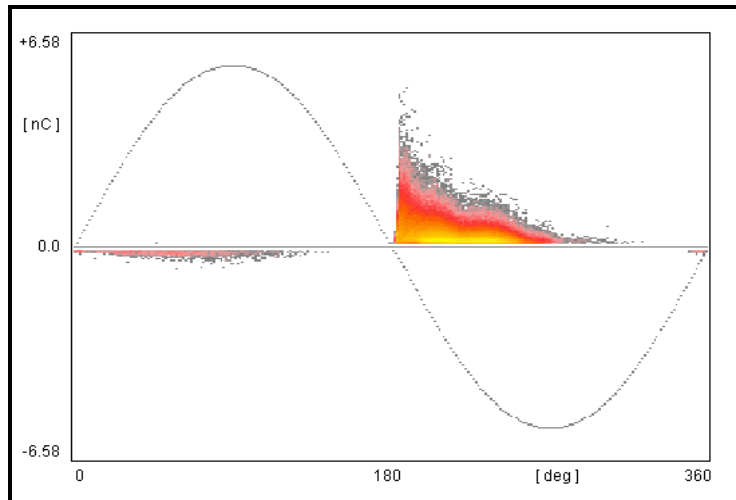


Figure 1.5 La signature PRPD typique de l'activité de DP d'encoche

La signature PRPD dépend de plusieurs paramètres tels que l'état des surfaces de la cavité d'air où les DP d'encoche surviennent ainsi que des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales qui sont présentes lors du fonctionnement normal de la machine. Afin d'interpréter efficacement cette signature, il est essentiel de bien comprendre

l'effet qu'à chacun de ces paramètres sur son évolution. Les prochaines sections décrivent les travaux effectués concernant l'impact des DP sur la condition des surfaces ainsi que la contribution des différentes contraintes actives lors du fonctionnement des machines sur l'activité de DP d'encoche.

#### **1.4.1 L'effet de la condition des surfaces**

De nombreux ouvrages ont été publiés sur les mécanismes de dégradation des isolants soumis à l'action continue des DP internes (Devins, 1984; Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1995; Morshuis, 2005; Tanaka, 1986; Temmen, 2000; Wolter, Johnson et Tanaka, 1978), mais très peu sur ceux impliquant la présence de DP d'encoche. De plus, les mécanismes de dégradation des surfaces conductrices en présence de DP sont aussi très peu documentés dans la littérature. Ainsi, en présence de DP, les surfaces impliquées sont bombardées d'ions, d'électrons et d'UV. De plus, l'activité de DP dans l'air ambiant, un mélange d'O<sub>2</sub> et de N<sub>2</sub>, produit des composés chimiques hautement réactifs, tels que l'O<sub>3</sub> ou les NO<sub>x</sub>, qui attaquent les surfaces (Wolter, Johnson et Tanaka, 1978).

Dans le cas des isolants, la conductivité de surface augmente très rapidement après l'apparition de l'activité de DP en raison de l'injection de charges sur la surface ainsi que des sous-produits créés par la dégradation de la surface (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1990; Temmen, 2000). Il a été démontré dans des travaux antérieurs que l'augmentation de la conductivité de surface a un effet direct sur l'activité de DP (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1995). Si la conductivité de surface augmente, les charges déposées à la base du canal de DP deviennent plus mobiles et peuvent s'éloigner sur une plus grande distance, contribuant ainsi à altérer le champ électrique résultant occasionné par ces charges. Il a été observé que, lorsque la conductivité de la surface isolante augmente, l'amplitude des impulsions de DP diminue de beaucoup et l'activité change de régime, passant des décharges impulsionnelles aux décharges pseudoluminescentes et éventuellement luminescentes, tandis que, lorsque la surface est parfaitement isolante, les décharges sont impulsionnelles et ont une plus grande amplitude (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1993; Morshuis, 2005). De

plus, la surface isolante s'érode en raison de son bombardement par les charges énergétiques impliquées (électroérosion) ainsi que par l'attaque chimique des sous-produits engendrés par les DP. Avec le temps, l'activité de DP mène à la formation localisée de sous-produits solides sous forme de cristaux identifiés comme étant de l'acide oxalique hydraté (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1991). Ces cristaux formés dans l'air où l'hydrogène, le carbone et l'oxygène sont présents, sont la conséquence de la dégénération de l'époxy et de la dissociation des molécules d'air. Le champ électrique local est alors renforcé au sommet de ces cristaux ce qui conduit à une intensification et à une localisation de l'activité de DP à ces endroits (Morshuis, 2005). Cette intensification locale de l'activité de DP résulte avec le temps en la formation de cratères localisés sur la surface isolante qui sont la conséquence d'une rupture des liaisons moléculaires des chaînes polymères de la résine époxy. Ces cratères vont subséquemment initier des arborescences électriques dans le volume de l'isolant. À mesure que ces arbres électriques croissent dans l'isolant, ils finissent par former un canal conducteur entre l'électrode de mise à la terre et celle de la haute tension pour finalement conduire à une rupture complète du diélectrique. Dans les systèmes d'isolation de masse à base de mica, il a été observé que la propagation des arbres électriques dans le volume de l'isolant se fait en contournant le mica, étant donné que celui-ci est très résistant à l'attaque des DP (Brutsch et al., 2008).

L'attaque des DP sur la surface conductrice du noyau magnétique entraîne une diminution de la conductivité de cette surface en raison de la formation d'une couche d'oxyde. Lorsque le niveau d'humidité est bas, en fonction de la structure de la surface conductrice qui, dans le cas des alternateurs hydrauliques est un acier au carbure de silicium contenant principalement du fer et d'autres d'éléments en plus faible quantité, des ions présents à l'interface métal/air et de la température, la couche d'oxyde sur cette surface peut prendre plusieurs formes telles que l'oxyde ferreux (FeO), l'hématite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la maghémite ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et la magnétite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (Cornell et Schwertmann, 2003). L'action continue de l'activité de DP agit comme une solution électrolyte qui fournit un chemin direct pour le transport des ions responsables de l'oxydation et de la corrosion des surfaces métalliques (Vijh, 1986). La formation de la couche d'oxyde sur la surface engendre des irrégularités et des aspérités qui concentrent le



champ électrique suffisamment pour influencer le mécanisme de DP en augmentant la probabilité d'injection d'électrons (Florkowska, 1995). Le champ électrique local dans la cavité d'air est aussi altéré en présence d'une couche d'oxyde sur la surface métallique, car celle-ci, qui est de nature beaucoup plus isolante, permet l'accumulation des charges à sa surface (Friedlander et Reed, 1953).

#### **1.4.2 L'effet de la contrainte électrique seule**

Il est important de mentionner qu'en machine, cette condition n'existe pas, car la température de fonctionnement est toujours supérieure à la température ambiante. En laboratoire, un essai sous contrainte électrique seule à la température ambiante a sa raison d'être, car il permet d'isoler la contribution de cette contrainte par rapport à la combinaison avec d'autres contraintes.

Durant les années 1980, une étude sur des bobines soumises à des DP d'encoche sous vieillissement électrique seul a été réalisée par une équipe du CEGB au Royaume-Uni (Jackson et Wilson, 1982; Wilson, 1990; 1996). L'expérimentation s'est effectuée sur six sections de bobines d'une machine de 1.7 MW d'où le revêtement semi-conducteur avait été érodé à quelques endroits, en service. Ces échantillons ont été installés dans une fausse encoche en acier, alimentés à leur tension nominale de 6.5 kV à deux fréquences différentes, 50 Hz et 400 Hz, et soumis à un flux continu de l'air ambiant du laboratoire. La durée totale de l'expérimentation a été de trois années. La caractérisation des surfaces s'est effectuée par des inspections visuelles à l'aide d'un microscope. De plus, des mesures de l'amplitude maximum des DP ont été effectuées durant le vieillissement. Au terme de l'expérimentation, les dommages occasionnés par l'activité de DP d'encoche n'ont pas occasionné de rupture diélectrique, mais des signes d'érosion superficielle ont été observés sur les premières couches de ruban avec des traces de piqûres plus prononcées aux jonctions de ces couches. L'activité de DP d'encoche a aussi érodé le revêtement semi-conducteur laissant à nu une plus grande surface de l'isolant. À l'air ambiant du laboratoire, une couche d'oxyde s'est formée sur la surface de la fausse encoche et des dépôts ont été observés sur l'isolant. Par

contre, ces dépôts ne sont pas réapparus à la suite d'essais avec un flux continu d'air sec. De plus, les résultats des mesures de l'amplitude des décharges tout au long de l'expérimentation ont indiqué de faibles variations. D'une façon générale, les conclusions obtenues de cette expérimentation ont révélé que lorsque le phénomène de DP d'encoche survient sans la présence d'autres contraintes que celle électrique, la dégradation de l'isolation de masse est très lente.

Bien que la rupture diélectrique du système d'isolation soit généralement de nature électrique, la contrainte électrique à elle seule n'est pas le facteur dominant d'un vieillissement prématuré de l'isolation. Selon de récents travaux (Brutsch et al., 2008), les contraintes thermiques et mécaniques sont les facteurs dominants du vieillissement de l'isolation de masse.

### **1.4.3 L'effet de la contrainte thermique**

Au début des années 2000, un groupe de recherche de l'université d'Hannover en Allemagne a réalisé une vaste étude concernant les DP dans les machines tournantes opérant à haute tension et une partie de leurs travaux concernait les DP d'encoche (Farahani et al., 2005). Ils ont simulé les DP d'encoche en enlevant une section du revêtement semi-conducteur sur un échantillon de barre d'alternateur de 10 kV et l'activité de DP a été mesurée à l'aide d'un instrument représentant la signature PRPD. Initialement, ils ont évalué l'effet de la dimension du site de DP d'encoche sur la signature PRPD à la température ambiante. En alimentant l'échantillon de barre à 10 kV, ils ont observé que l'amplitude ainsi que le nombre de DP augmentaient suivant l'élargissement du site de DP d'encoche. Par la suite, pour une dimension donnée, l'activité de DP d'encoche a été mesurée séquentiellement à la température ambiante de 20°C et à la température de 90°C. Les résultats ont démontré qu'avec l'augmentation de la température, l'amplitude et le nombre de DP augmentent aussi considérablement. Selon leurs travaux, une hausse de la température permet d'améliorer l'émissivité des électrons initiateurs pour faciliter le processus d'avalanche électronique

due à l'augmentation de l'énergie thermique des électrons et la réduction de la densité de l'air.

En 2006, un groupe de recherche de l'IREQ a investigué l'impact de la température et de la dilatation thermique des matériaux sur l'activité de DP d'encoche (Hudon, Belec et Levesque, 2008; Hudon et al., 2007). L'expérimentation s'est faite à partir d'une barre d'alternateur de 13.8 kV sur laquelle une section du revêtement semi-conducteur avait été enlevée. Les DP d'encoche ont été mesurées avec différents espacements d'air et à différentes températures : à l'ambient (22°C), 53°C, 70°C, 90°C et 132°C. Les résultats de cette expérimentation ont également démontré que, pour un espacement d'air donné, en augmentant la température, l'activité des DP d'encoche augmente significativement.

Les résultats d'une étude effectuée sur des machines en service affectées par des DP d'encoche sans la présence de vibration mécanique ont aussi démontré que la température influence significativement l'activité de DP d'encoche (Belec et al., 2007). Une inspection visuelle de barres retirées d'une machine a permis de corrélérer l'intensité de l'attaque des DP d'encoche en fonction du profil axial de la température de la machine. Il a été observé que la dégradation des barres était beaucoup moins prononcée au centre du stator où la température était plus basse qu'aux extrémités du stator où la température était plus élevée. Dans le même sens, une autre étude réalisée sur des alternateurs hydrauliques en service a démontré qu'en augmentant la puissance et par le fait même la température de la machine, l'activité de DP d'encoche augmente aussi significativement (Azuaje et Torres, 2006).

Des études sur l'effet de la température sur l'activité de DP dans une cavité d'air formée entre deux électrodes de résine époxy, ont démontré que la dégradation de l'époxy est plus importante à plus haute température (Di Lorenzo del Casale et Schifani, 2000; Gjaerde, 1997). Lorsque l'énergie thermique est suffisamment élevée, les chaînes moléculaires du matériau organique se brisent et en présence d'oxygène, la surface s'oxyde (Wilson, 1996). Il a aussi été démontré que l'augmentation de la température réduit la production d'O<sub>3</sub>, mais

accélère celle des  $\text{NO}_x$  (Odic et al., 2006) contribuant aussi à accélérer la dégradation des surfaces isolantes.

#### **1.4.4 L'effet de la contrainte mécanique**

Au début des années 1950, après la découverte du phénomène des DP d'encoche dans leurs machines, le groupe de recherche de Westinghouse Electric Corporation a entrepris d'étudier ce problème (Johnson, 1951a). Leurs travaux évoquent la construction d'une maquette d'un noyau magnétique dans le but de reproduire des DP d'encoche sur des bobines soumises à différentes contraintes électriques, thermiques et mécaniques. Par contre, rien n'est connu sur les résultats de leurs travaux.

En 2005, une équipe de recherche de l'université Xi'an Jiaotong en Chine a publié une étude concernant l'effet de la vibration mécanique sur les DP d'encoche (Kai et al., 2006). Par contre, leurs travaux analysaient l'effet de la variation du champ électrique occasionnée par la variation de l'espacement d'air due aux vibrations mécaniques plutôt que l'effet de la vibration des barres vers le fond des encoches et qui s'usent contre la paroi du noyau magnétique. Ils ont utilisé une bobine d'alternateur sous laquelle ils ont enlevé une section du revêtement semi-conducteur dans le but d'obtenir des DP d'encoche. Une plaque d'aluminium servant de mise à la terre a été attachée à un système de vibration afin de créer différents espacements d'air sans jamais entrer en contact avec la surface de la barre. Les changements observés dans la signature PRPD en fonction de l'amplitude et de la fréquence des vibrations ont été attribués aux variations du champ électrique dans l'espacement d'air. Les signatures PRPD de l'activité de DP d'encoche de leurs résultats ne sont pas très claires et il est très difficile d'en identifier les caractéristiques typiques, c'est-à-dire d'une forme triangulaire et asymétrique en faveur des décharges positives telle qu'illustrée à la Figure 1.5.

Un des paramètres importants dans l'étude de l'impact des contraintes mécaniques sur l'activité de DP d'encoche est l'influence de l'usure de l'isolation de masse occasionnée par le déplacement radial des barres dans les encoches. Ce paramètre a été évalué dans une étude

effectuée par un groupe de recherche de l'université de Tsinghua en Chine qui a soumis une barre neuve de stator à un vieillissement accéléré sous vibrations mécaniques seules (Peng et al., 2009). La barre a été fixée à l'aide d'un système de calage dans une encoche d'une maquette d'un noyau magnétique et soumise à des vibrations d'une amplitude de 2 mm à une fréquence de 100 Hz pendant 90 jours. Une mesure de DP à l'aide d'un oscilloscope a été effectuée à tous les 30 jours à plusieurs niveaux de tension. Au terme du vieillissement, les résultats obtenus ont indiqué que l'amplitude des impulsions à une tension donnée avait augmenté en fonction du temps et que la dégradation de l'isolation de masse était très importante. Il n'y a par contre aucune photo de la surface isolante et peu de détails supplémentaires publiés dans cet article.

#### **1.4.5 L'effet de l'humidité**

Suite à des résultats inattendus lors de mesures de DP réalisées sur des alternateurs à l'arrêt, un groupe de recherche de l'université technique de Graz en Autriche a publié en 1999, les résultats d'une expérimentation en laboratoire sur des échantillons de barres d'alternateurs soumises à des DP externes (DP d'encoche et couronne) sous différents niveaux d'humidité relative (Binder et al., 1999). Dans cette publication, il n'y a aucune explication du mécanisme et seuls les résultats des expérimentations sont présentés. Ils ont mesuré l'activité de DP d'encoche à une tension de 8 kV et à une température de 40°C en faisant varier l'humidité relative de 20% à 80%. Leurs résultats ont démontré que l'activité de DP d'encoche diminue significativement lorsque l'humidité relative augmente et disparaît lorsque l'humidité relative dépasse 50%. Les signatures PRPD de l'activité de DP d'encoche dans leur article ne sont encore une fois pas très claires et il est très difficile d'en identifier les caractéristiques typiques. Par contre, la signature devient de plus en plus symétrique dans les deux alternances suivant l'augmentation de l'humidité relative. De plus, ils ont aussi observé que la quantité d'O<sub>3</sub> diminuait avec l'augmentation de l'humidité relative.

D'autres travaux ont été publiés concernant l'influence de l'humidité sur l'activité de DP mesurée sur des machines en service. Des variations de l'amplitude moyenne des mesures de

DP avec un ratio de 100 en fonction des variations saisonnières du contenu d'humidité dans l'air ont été observées sur des machines (Younsi et al., 2001). D'autres observations ont aussi été faites sur des machines où des mesures en continu de l'activité de DP ont été corrélées avec des variations de l'humidité dans l'air (Fenger et Stone, 2005; Kane et al., 2004). Dans tous ces cas, lorsque le contenu d'humidité dans l'air augmentait, l'activité associée aux DP externes diminuait.

D'une façon générale, il est reconnu depuis longtemps que le contenu d'humidité dans l'air a un impact sur l'activité de DP. Principalement, l'humidité a pour conséquence de diminuer l'activité de DP et ce, en raison de sa nature électronégative (Kuffel, 1959). L'augmentation de la vapeur d'eau dans l'air augmente le coefficient d'attachement tandis que le coefficient d'ionisation reste constant (Verhaart et Van der Laan, 1984). Ainsi, la présence de molécules d'eau dans l'air favorise la capture des électrons libres qui sont nécessaires à l'initiation et au maintien de l'activité de DP et forme avec ceux-ci des groupements d'ions négatifs très stables où les électrons sont beaucoup plus difficiles à arracher lors des collisions subséquentes (MacAlpine et Zhang, 2003; Messaoudi et al., 1996). Il a aussi été observé qu'en augmentant la quantité d'eau dans l'air, le mécanisme de photoionisation dans le volume de l'air est significativement diminué (Aints et al., 2008). En plus d'influencer la production d'électrons libres, en raison de leur masse plus importante, la mobilité dans l'air de ces groupements d'ions est réduite (Fujioka et al., 1983), ce qui affecte le champ électrique local dans le volume d'air. L'augmentation de l'humidité dans l'air augmente aussi la conductivité de la surface isolante ce qui facilite le mouvement des charges déposées sur celle-ci et modifie aussi le champ électrique local dans l'air (Lutz et Kindersberger, 2009; Nawawi et al., 2006).

Malgré le fait qu'une augmentation de l'humidité dans l'air diminue de façon générale l'activité de DP, la dégradation des surfaces n'en est pas moins affectée. Il a été observé que la dégradation de la résine époxy en présence de DP est plus importante lorsque l'humidité dans l'air est élevée que lorsque l'air est sec (Hepburn et al., 2000). Dans ce sens, d'autres travaux ont démontré qu'une augmentation de l'humidité diminue la production d'O<sub>3</sub> et

favorise celle de l'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) ainsi que d'autres agents très réactifs tels que le peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (Chen et Wang, 2005; Peyrous, 1990). La dégradation de la surface métallique est aussi accélérée par l'humidité (Goldman et Goldman, 1989). La composition de l'oxyde de fer peut différer en fonction du niveau d'humidité et il est possible d'en observer d'autres types que ceux mentionnés précédemment tels que la goethite ( $\alpha$ - $\text{FeOOH}$ ), la lépidocrocite ( $\gamma$ - $\text{FeOOH}$ ), de l'hydroxyde ferreux ( $\text{FeO}(\text{OH})_2$ ), de l'hydroxyde ferrique ( $\text{FeO}(\text{OH})_3$ ) et de la ferrihydrite ( $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ) (Cornell et Schwertmann, 2003).

## 1.5 Conclusion

Bien que plusieurs travaux spécifiques aux DP d'encoche aient été effectués au cours des années, la corrélation de l'évolution de la signature PRPD de ce type de DP avec la dégradation de l'isolation de masse n'est pas encore une tâche simple à accomplir. Dans une optique plus générale de maintenance conditionnelle basée sur l'état de l'équipement, il est important d'être en mesure de diagnostiquer efficacement la condition des alternateurs hydrauliques. Le projet de recherche présenté dans cette thèse a donc été démarré afin d'améliorer les connaissances sur le phénomène de DP d'encoche qui depuis longtemps est reconnu comme étant dommageable pour le système d'isolation du stator de ces machines. Ces travaux, qui sont en grande partie le résultat d'expérimentations en laboratoire dans des conditions contrôlées, permettront de compléter les mesures périodiques de DP réalisées sur les alternateurs du parc de production d'Hydro-Québec. En effet, ces travaux aideront à évaluer la condition réelle des alternateurs soumis à des DP d'encoche en améliorant la compréhension des risques relatifs associés aux différentes contraintes de fonctionnement, ainsi qu'à soutenir le processus décisionnel dans le choix des interventions, c'est-à-dire s'il faut continuer d'effectuer de la surveillance en ajoutant d'autres outils de mesure ou s'il faut d'opter pour des corrections ou un remplacement de l'enroulement du stator de ces alternateurs.

De façon générale, les expérimentations en laboratoire réalisées au cours des années sur les DP d'encoche impliquent seulement un type de contraintes à la fois. L'originalité des travaux

de cette thèse se retrouve donc en grande partie dans l'étude des DP d'encoche sous une combinaison de contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales. Ces travaux contribueront également à valider l'effet de chacune des conditions de contraintes sur les mécanismes de dégradation en présence de DP d'encoche. L'influence de la condition des surfaces et des différentes combinaisons de contraintes sur le mécanisme de DP d'encoche ainsi que sur la forme et l'amplitude de sa signature PRPD a été évaluée dans les résultats obtenus des deux montages expérimentaux de vieillissements en laboratoire, et ceci, pour la première fois. De plus, un modèle de calcul a été développé afin de valider certains résultats expérimentaux de l'évolution des signatures PRPD. Ce modèle, qui considère la présence de plusieurs sites de DP et évalue l'effet de la condition des surfaces sur le champ électrique dans un espacement d'air typique de celui où les DP d'encoche surviennent, a aussi été présenté pour la première fois dans le cadre de ces travaux.



## CHAPITRE 2

### **EFFECT OF SURFACE DEGRADATION ON SLOT PARTIAL DISCHARGE ACTIVITY UNDER ELECTRICAL, THERMAL AND MECHANICAL STRESSES**

Mélanie Lévesque, Éric David  
École de technologie supérieure, ÉTS  
1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal  
Québec, H3C 1K3, Canada

and Claude Hudon, Mario Bélec  
Institut de recherche d'Hydro-Québec IREQ,  
1800 boul. Lionel Boulet, Varennes,  
Québec, J3X 1S1, Canada

#### **2.1 Abstract**

To improve our understanding of slot partial discharge (PD) mechanisms, an accelerated aging test was initiated in 2007. This long-term experiment is being performed on six stator bars subjected to slot PDs under electrical, thermal and mechanical stresses. It is well known that slot PD activity in air-cooled generators is harmful to the stator winding ground insulation. The degradation induced by slot PDs will modify the physical properties of the surfaces of the cavity where PDs take place and this in turn will influence the slot PD process. To understand the evolution of slot PD activity and the changes in its PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) pattern, it is therefore essential to recognize and understand the interdependence between surface modifications and PD signals. This paper presents results of visual observations of stator bar surface degradation, changes in surface conductivity and the effect on the evolution of PD signals in the presence of slot PD activity under conditions of electrical, thermal and mechanical stresses.

Index Terms — Slot partial discharges, generator, stator bars, insulation, semi-conducting coating, temperature, vibration, conductivity.

## 2.2 Introduction

The reliability of air-cooled generators is an important issue for power utilities not only to increase the availability of energy but also to respect supply offered on the energy market. Condition-based maintenance and asset management are essential to improve the knowledge of a generator fleet, but they must be supported by a good understanding of all degradation mechanisms in order to successfully diagnose the condition of these machines. Typically, the expected lifetime of generators, like other high-voltage equipment, is determined mainly by the condition of its insulating system (CIGRÉ, 2003). The last 60 years have seen many studies conducted in attempts to understand and identify the degradation mechanisms of the stator insulation system (Johnson, 1951a; Lonseth et Mulhall, 1976; Lyles, 1980). For a long time, partial discharge (PD) measurements have been recognized being a powerful tool to carry out diagnosis of generators. PDs are local electrical discharges which occur within and around an insulating system exposed to high voltage. This phenomenon is the result of local concentrations of electrical stress in excess of the breakdown field in cavities or around a bar due to the dielectric breakdown of the gas (Bartnikas et McMahon, 1979). Partial discharge activity is always present in the stator insulation of air-cooled generators because of the latter design and manufacturing process. During normal operation, it is possible to detect several sources of PDs such as internal, which are considered as normal, corona (at the junction of the field grading), bar-to-bar (in the end arms), delamination, surface tracking and slot PDs (Hudon et Belec, 2005), all revealing different risks of premature failure. Modern epoxy-mica insulations are designed to withstand normal PD attack for a typical expected life of 40 years and even longer. However, some sources of PDs, such as slot PDs, are recognized as more damaging to the insulation than normal internal PDs. Their presence, in addition to the contribution of different operating stresses (electrical, thermal and mechanical), may considerably accelerate degradation and reduce the unit's life expectancy. In-service failures of air-cooled generators subjected to slot PDs can occur after 10 years and even less (Stone et

al., 2004; Stone et al., 2008) but can also take longer, depending on the accelerating factors present.

The detected PRPD patterns are typical for each of the different PD sources (Hudon et Belec, 2005). These patterns depend on the gas cavity configuration and the surface conditions where the discharges are occurring. The PD process, which is a statistical process, is also affected by the availability of primary electrons, initiating each discharge pulse. With time, the surfaces surrounding the PD site undergo irreversible changes and these changes will directly affect the shape of the PRPD patterns. The interaction between the PD formation, the surface and the gas conditions is quite complex. Part of the complexity comes from the fact that the surfaces are constantly being modified by the degradation induced by PDs but in addition the PD process will change overtime because of the irreversible modifications of the surfaces (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1993; Kim, Kondo et Mizutani, 2004; Morshuis, 1993; Van Brunt, von Glahn et Las, 1995).

The assumption that the known characteristic PRPD pattern of specific discharge sources will not change with degradation needs to be verified and one of the goals of the current study is to do that for slot partial discharges. Slot PD activity takes place in the air gap between the magnetic core of the stator and the winding insulation when the grounded plane is not adequate. It will occur only on the bars close to the high-voltage terminal of the winding and when the surface resistivity of the semi-conducting coating is inadequate or when abrasion has eroded it away due to mechanical vibrations of the bars in the slot. In the first case, if the surface resistivity of the semi-conducting coating is too high, a voltage could develop on the surface of the bar and, if the field conditions are fulfilled, a breakdown of air occurs between the bar and the core. In such a case, slot PDs are purely electrical, without mechanical vibrations. To avoid PD inception in this part of the winding, the surface resistivity of the semi-conducting coating must be less than 25 k $\Omega$  per square (Jackson et Wilson, 1982). Such electrical slot PDs are expected to last decades before causing failure (Stone et al., 2004).

In the second case, when radial wedging or side packing systems are not properly designed or installed, the bars will move in the slot as a result of the electromagnetic forces acting on them. They will then vibrate at twice the power frequency following the radial axis with force toward the bottom of the slot (Maughan, 1997). With time, mechanical vibrations of the bars will degrade the semi-conducting coating. When the insulation surface of the bars faces the grounded magnetic core and the field is sufficient, slot PDs will start to occur. Thereafter, the combined effect of slot PDs and mechanical vibrations are expected to progress much faster than in the case of a purely electrical mechanism. Some authors have seen failure after as little as 8 years and even shorter life has been reported (Stone et al., 2004).

To avoid misinterpretation of periodic PD measurements carried out on generators in the field, it is essential to understand the role that insulation degradation plays in the changes of PD activity. This insight can only come from laboratory experiments conducted under controlled conditions. To that end, this paper reports the results of long-term aging of slot PD activity in the laboratory where periodic measurements and surface characterization were carried out to better understand the differences in evolution under different stresses. The ultimate goal of the study is to evaluate the differences in the degradation rate in terms of the stress present.

Another alternative that would provide more insight into the understanding of the PD process would be numerical modeling of PDs in order to combine knowledge with empirical results and theoretical models. Earlier work has presented generalized models of the PD mechanisms for various types of insulating defects (Gutfleisch et Niemeyer, 1995; Niemeyer, 1995). Based on that work, many studies have been carried out to improve PD models and correlate interpretations of PD measurements with simulation results (Candela, Schifani et Romano, 2001; Fruth et Gross, 1995; Heitz, 1999; Wu, Okamoto et Suzuoki, 2000). The models have also been adapted to analyze the effect of frequency on the measurements of internal PDs (Cavallini et Montanari, 2006; Forssen et Edin, 2008a; 2008b; Illias, Chen et Lewin, 2009). In all these studies, laboratory experiments were always performed to validate the numerical models. The experimental study provides crucial information, e.g. about the

physical changes in surface conditions with aging, and this information are then used to feed the model. Since empirical data provide input for the models, it was decided to start experimentation before any detailed modeling.

The main contribution of this study is therefore to evaluate the differences in the insulation degradation rate for one specific type of discharges: slot PDs. The evolution of surface degradation was studied under different stresses and the ensuing changes in PRPD patterns were periodically recorded as a function of degradation time in each case. Three groups of spare stator bars were exposed to slot PDs from the onset of the aging test. One group of bars was subjected to voltage alone (electrical aging). A second group of bars was exposed to the same voltage and to heat (electrical and thermal) and, finally, the third group of bars was subjected to vibration in addition to voltage and heat (electrical, thermal and mechanical). The analysis of the surface degradation was based on visual observation, surface conductivity and PD measurements recorded periodically from the beginning of the aging until 9800 h. The results presented here will be used in future to feed and validate numerical models but at this point the study focuses on the experimental investigation of slot PDs and its effect.

## **2.3 Experimental description**

### **2.3.1 Accelerated aging test setup**

The accelerated aging test was performed on six 13.8 kV (phase-to-phase) epoxy-mica Roebel stator bars. Before the test began, the bars were inspected for any signs of surface irregularities and the semi-conducting coating was found to be in perfect condition. PD measurements were made on each bar and only typical symmetrical PRPD patterns of internal discharges were present (Hudon et Belec, 2005). Subsequently, slot PDs were induced in three locations per bar (referred to as A, B and C) by abrading identical sections of the semi-conducting coating and by exposing the bars to high voltage in a mock-up slot. Prior to starting the aging process, the PRPD patterns were recorded once again in the presence of slot discharges at 8 kV (nominal phase-to-ground voltage) and room temperature

condition. Then, all six bars were simultaneously exposed to the aging voltage, 16 kV AC (twice their nominal phase-to-ground voltage), to accelerate the degradation. The bars were divided into three groups of two bars as illustrated in Figure 2.1. Each group was subjected to either electrical stress alone (group 1) or a combination of electrical and thermal stresses (group 2) or electrical, thermal and mechanical stresses (group 3). These experimental conditions are also summarized in Table 2.1.

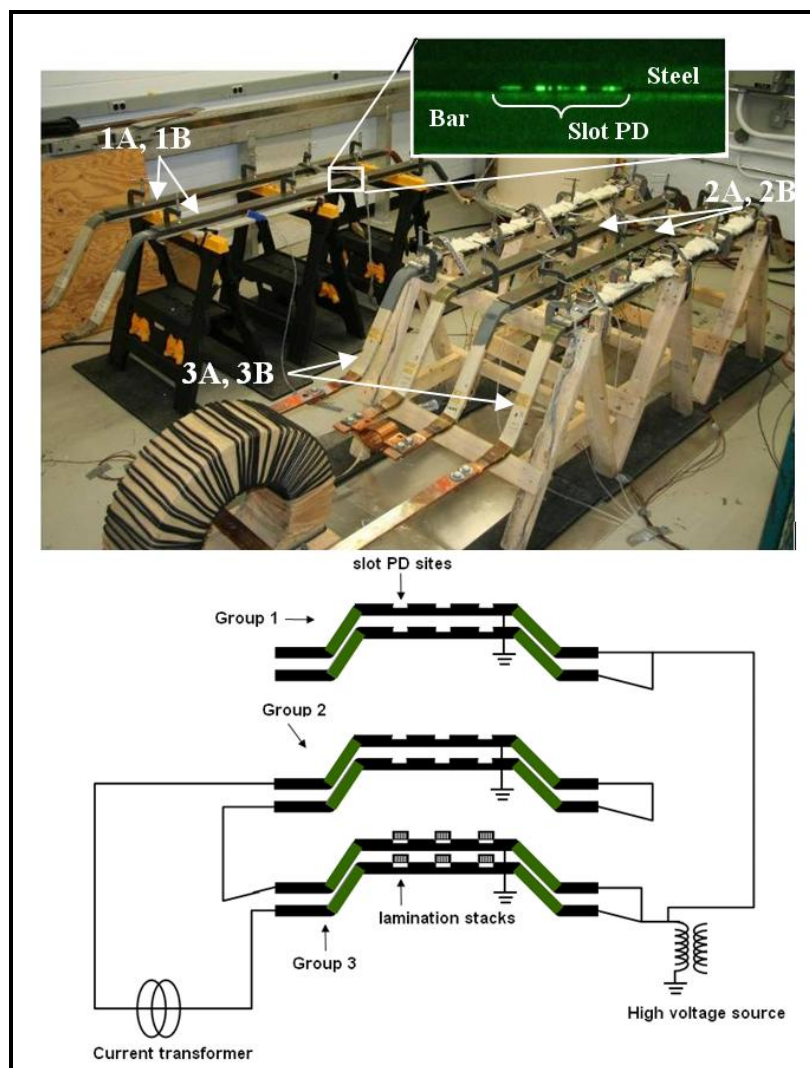


Figure 2.1 Six stator bars exposed to slot PD in the three locations per bar (A, B and C) under different stress conditions

Table 2.1 Group identification and characteristics

Group	Bar		Aging conditions
1	1A	1B	Electrically stressed at 16 kV at room temperature
2	2A	2B	Electrically stressed at 16 kV and thermally stressed at 85°C
3	3A	3B	Electrically stressed at 16 kV, thermally stressed at 85°C, and mechanically stressed by vibrations

To make sure that the slot PD chemistry was similar to that in the generator, the grounded electrode used as a mock-up slot in groups 1 and 2 was made out of steel. It should be pointed out that the steel grounded electrodes used in our experiment were continuous along the entire length of the bars in comparison with a real magnetic core where ventilation ducts divide the laminated stacks. The thermal stress applied to groups 2 and 3 was produced by a circulating current in a closed loop of the conductor of the bars and induced with a transformer (see Figure 2.1). The current was adjusted to obtain a temperature of 85°C at the surface of the insulation. This temperature is not considered to be an accelerating factor compared to normal operating conditions but should accelerate the degradation of groups 2 and 3 with respect to group 1. The mechanical stress on group 3 was produced by abrasion generated by the vibrations of lamination stacks on the surface of the bare insulation. The lamination stacks were made with tooth sections of regular magnetic core sheets bolted together as illustrated in Figure 2.2 and one of such assembly was placed in front of each of the three locations where the semi-conducting coating was already abraded away.



Figure 2.2 Lamination stack used for mechanical abrasion

The lamination stacks were mounted on the bars of group 3 with two permanent magnets of 1 T positioned on top of each stack. Interaction of the induced current in the bars with the magnetic stacks caused an electromagnetic force resulting in vibrations. This force is proportional to the perpendicular flux density created by the permanent magnets and the induced current magnitude. Unlike real machines, in our setup, the stator bars were fixed and the force was applied directly to the stacks, which were free to move. The erosion caused by stack vibrations replicates that expected in operation when the bars can move in a fixed slot. At the interface, the relative movement is similar. However, one major difference is that the interaction of the induced current at 60 Hz with the permanent magnets caused a force oscillating at 60 Hz, compared to 120 Hz in real generators (Maughan, 1997). Moreover, in machines, the amplitude of the movement resulting from the electromagnetic force depends on many factors such as winding design, types of fillers, radial wedging, side packing and current magnitude. For our experiment, the displacement of the magnetic stacks on the bare insulation was measured to about 50  $\mu\text{m}$  peak at 60 Hz. It is difficult to say if this magnitude of vibration is an acceleration factor because it depends on which machine you compare it with, but it should accelerate aging in comparison to group 1 and 2.

Based on a predetermined schedule, the aging test is periodically stopped to perform a characterization of each bar with respect to aging time. These characterizations are done using different measurement techniques, including PD and surface conductivity measurements as long as visual inspections. The time line for the aging of the three groups and the periodic measurements is shown in Figure 2.3.

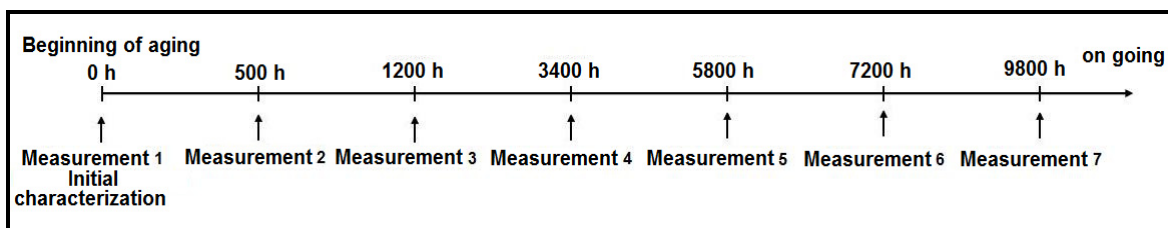


Figure 2.3 The time line for the periodic characterization of each bar



### **2.3.2 PD measurements**

To monitor the evolution of each discharge source and learn how degradation influences PD activity over time, PRPD patterns were periodically recorded throughout the accelerated aging. The PD measurements were made at nominal phase-to-ground voltage (8 kV) so the results would be comparable to those of on-line measurements on generators. The higher voltage stress was only intended to accelerate degradation between measurement series. PRPD patterns were recorded with a 1 nF capacitive coupler in a frequency range of 2-20 MHz for 30 s. The initial strategy was to perform PD measurements on each bar separately but unfortunately this situation required to break open the current loop used to heat the bars of groups 2 and 3. As a result, the bars could not be measured under their actual aging conditions. Thus, PD was measured periodically on individual bars at room temperature. The only way to obtain a PD reading with the capacitive coupler under the actual accelerated aging conditions was to measure all of the six bars in parallel (two bars at room temperature and four bars at 85°C). However, in this configuration, it is impossible to distinguish what portion of the overall pattern comes from each of the three groups. To circumvent this problem, after 5800 h of aging (measurement 5 of Figure 2.3) we started to perform PD measurements with a directional antenna placed just in front of the slot PD sites, and connected to the PRPD acquisition system. This made it possible to obtain specific details on the evolution of slot PD activity at individual sites for the different stress conditions. However, due to security issues, only the bars of group 2 (6 sites) and the three sites of bar 3A were measured with the antenna in a frequency range of 0.5-10 MHz as a function of the aging time.

### **2.3.3 Surface conductivity measurements**

The surface conductivity of the insulation at locations exposed to slot PD was periodically measured throughout the accelerated aging. This measurement was carried out using a high voltage direct current source, an electrometer and a circular concentric electrode with conductive rubber as recommended in the International ASTM D257 standard (American

Society for Testing and Materials, 1999). A voltage of 1 kV was applied for 1000 s on the inner electrode and the surface polarization current was measured as a function of time using the electrometer in series with the outer electrode. After 1000 s, the surface current was almost constant, showing a predominance of the direct conduction current which is used in the calculation of the surface conductivity. Furthermore, the surface conductivity of the ground electrode of the mock-up slot was also periodically measured using the same circular concentric electrode although a regular ohmmeter would suffice because the steel plate used as ground electrode was much more conductive than the insulation surface even after oxidation caused by slot PDs. All measurements were carried out at room temperature and ambient relative humidity. The mechanical pressure applied in order to have a good contact between the electrode and the surface measured was always the same and was provided by nothing more than the weight of the concentric electrode assembly.

## **2.4 Results**

### **2.4.1 Visual observations of surfaces**

It should be pointed out that the stress applied to the bars of group 1 (voltage alone) is not representative of normal operating conditions because the temperature inside a machine is always higher than room temperature. However, it was decided to include this condition in an attempt to identify the relative contribution of slot PDs under electrical stress alone and to compare it with what goes on at higher temperature.

After 9800 h of aging time, no indication of major insulation degradation was noted on bars of group 1, but a significant amount of iron oxide powder had been deposited on the insulation surface. Visual observation of the grounded electrode revealed signs of oxidation of the iron with the formation of a uniform coat of iron oxide. Over time, it was noted that, for bars from group 1, environmental changes in the laboratory influenced the amount and color of the oxide powder accumulated from one measurement sequence to the next. In summer, the quantity of iron oxide generally increased on the insulation surface and the color

tended to be light brown while in winter the quantity of iron oxide powder decreased and the color was darker. Figure 2.4 illustrates the iron oxide deposits observed on the insulation surface (left) and the oxidation of the grounded electrode (right) of one site of bar 1B after 1200 h (top) and 5800 h (bottom) of aging time. Visual inspection after 1200 h of aging time was performed during the month of November when the relative humidity was 27% in the laboratory and less oxide was observed. Measurements performed after 5800 h in August at a relative humidity of 45.5% showed a thicker deposit of oxide. At the end of each periodic monitoring, the oxide powder deposited on the insulation surface was removed before the setup was exposed again to voltage.

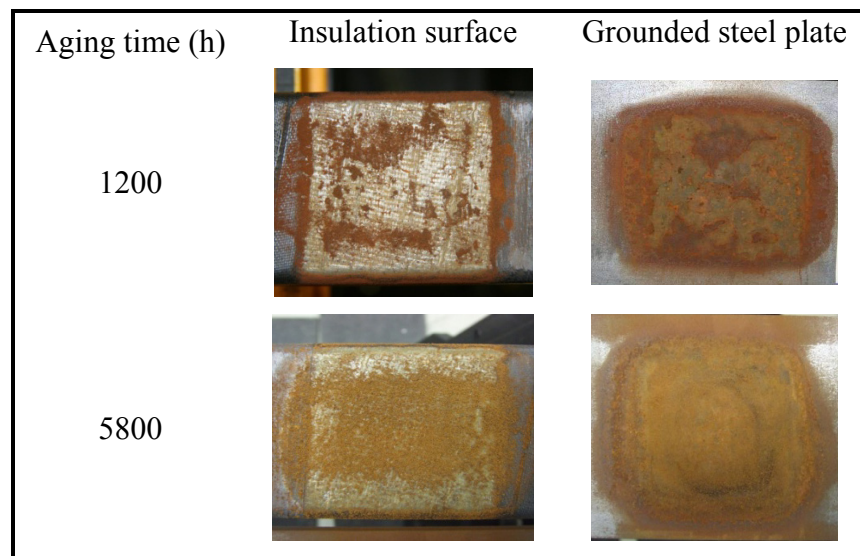


Figure 2.4 Surface deposit examined after 1200 h (top) and 5800 h (bottom) of aging on the insulation surface (left) and on the grounded electrode (right) of one site of bar 1B

In the case of bars from group 2, exposed to slot PDs under electrical and thermal stresses, the insulation degradation was clearly different from that on the bars of group 1. After 9800 h of aging time, considerable surface degradation was observed on the bare insulation. The organic portion of the insulating system (the epoxy resin) was eroded, which left flakes of what appeared to be mica at the surface of the bars. These loose flakes were coming only from the first layer of tape. The degradation was similar at each of the slot PD sites of both bars of group 2. The semi-conducting coating near the junction of the bare insulation began

to degrade and, as a result, extended the area originally exposed to slot PDs. Moreover, a uniform coat of iron oxide, different than that observed on bars from group 1, was created on the ground electrode surfaces. This iron oxide coat was reddish in color and was similar from one measurement sequence to the next. Figure 2.5 illustrates the insulation surface (left) and the oxidation of the grounded electrode (right) of one site of bar 2A after 9800 h of aging time.

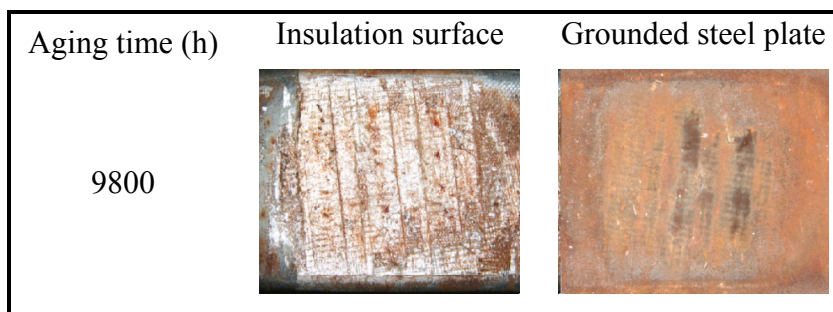


Figure 2.5 Insulation surface (left) and grounded electrode surface (right) examined after 9800 h of aging of one site of bar 2A

For the bars of group 3, exposed to slot PDs under electrical, thermal and mechanical stresses, characteristic striations and mechanical erosion of the insulation surfaces were observed at each slot PD site. Although this group was subjected to the same temperature as the bars from group 2, only few free mica flakes were present on the surfaces. The semi-conducting coating near the junction of the insulation surface also began to degrade and turn white but to a lesser extent than the slot PD sites of bars from group 2. A uniform coat of iron oxide was formed on the ground electrode surface made out of the lamination stacks and part of the iron oxide dust was attracted to the stack surfaces by the magnetic field of the permanent magnets. The color of the iron oxide created on the lamination surfaces was similar to that observed on group 2. Figure 2.6 illustrates the insulation surface (left) and the oxidation of the grounded electrode (right) of one site of bar 3A after 9800 h of aging time.

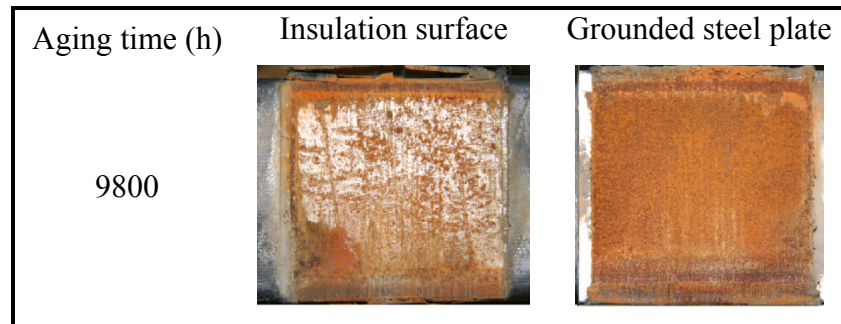


Figure 2.6 Surface deposit and striation marks examined after 9800 h of aging on the insulation surface (left) and on the grounded electrode (right) of one site of bar 3A

Based on field experience from actual machines, it was expected that the bars from group 3 would degrade faster than the other two groups. Before reaching 9800 h, out of the six slot PD sites of the 2 bars of group 3, one site from bar 3B (3B-B) and another from bar 3A (3A-C) had failed after 7800 h and 8800 h of aging time respectively. In these two events, the breakdown occurred at the corner of the bar, near the semi-conducting coating edge as illustrated in Figure 2.7.

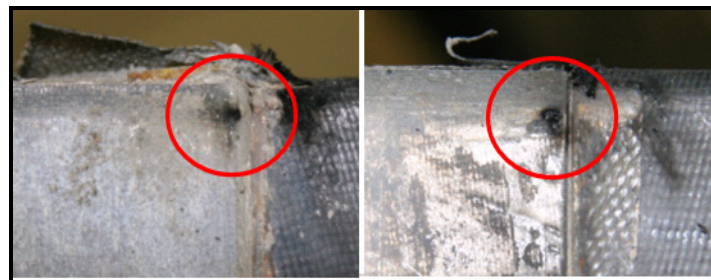


Figure 2.7 Failures sites of one slot PD site of bar 3B (left) and one site of bar 3A (right)

Prior to the failure, these two slot PD sites revealed considerable signs of mechanical erosion of their insulation surface. It was estimated that about 20% of the volume of the groundwall insulation was eroded. This will be confirmed at the end of the aging, when each breakdown site will be dissected in order to have more insight into the propagation path of the breakdown channels and about the exact thickness of the remaining insulation. Until then, in order to resume the aging with the two remaining sites on each bar, the semi-conducting

coating was abraded away from the breakdown channel and a stress grading coating was applied to relieve the field at the location of the failure. The vibrating lamination stacks were removed from these two sites, thus eliminating the proximity with a ground plane.

#### 2.4.2 Surface conductivity measurements

According to the geometry of the circular concentric electrodes used in the surface conductivity measurements, the surface resistivity  $\rho_s$  ( $\Omega$  per square) was calculated using the following expression (Lisowski et Kacprzyk, 2006):

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (2.1)$$

where  $d_1$  and  $d_2$  are respectively the diameter of the inner and outer concentric electrodes and  $R_s$  is the surface resistance, which is determined from Ohm's law (voltage-to-current ratio). Subsequently, using the surface resistivity calculation from equation (2.1), the surface conductivity  $\gamma_s$  (S per square) is determined using the inverse of the surface resistivity:

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s} \quad (2.2)$$

Figure 2.8 illustrates the results obtained from surface conductivity measurements of the epoxy-mica insulation for each slot PD site as a function of aging time. Before aging, the insulation surface conductivity was about of  $10^{-16}$  S per square whereas after 9800 h of aging, it had reached value of  $10^{-9}$  S per square. This general increase of about 7 orders of magnitude showed faster changes at the beginning of aging. This behavior is consistent with results observed by Hudon (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1990) in the case of insulation degradation exposed to internal discharges. The surface conductivity of all sites from group 1 (only electrically stressed) showed a less significant increase than that from group 2 (electrically and thermally stressed) and group 3 (electrically, thermally and mechanically

stressed). The magnitude measured for each site of group 3 showed more variations according to the degree of mechanical erosion at each site. Even if the vibrating stack assembly was the same at each location, the mechanical erosion was different. Measurements carried out after 7200 h, prior to the failure of one site of bar 3B (3B-B) and one of 3A (3A-C), indicated a decrease of their surface conductivity value ( $10^{-14}$  S per square) in both cases.

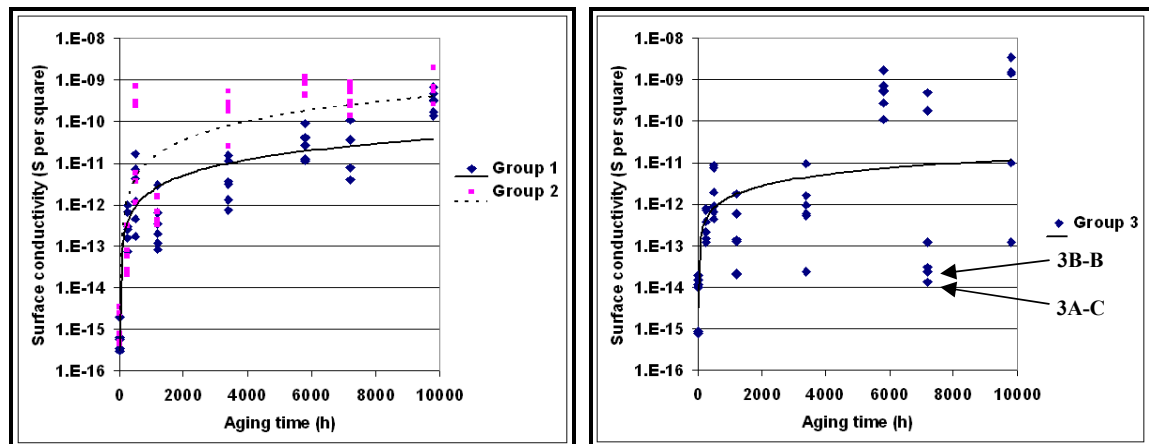


Figure 2.8 Surface conductivity measurements of epoxy-mica insulation surface for each slot PD site of group 1 and 2 (left) and group 3 (right)

In addition to the general increase in the surface conductivity of the insulation at all sites, surface conductivity measurements were also performed on the ground electrode, using the same circular concentric electrode system with an ohmmeter. The authors recognize that using an ohmmeter is not the most accurate way to determine the surface resistance, but, since degradation of the ground electrode was expected to manifest as a thin coat of iron oxide over the conductive steel, the same procedure as for the insulation surface could not be used. Consequently, the ohmmeter was used to quantify the changes in the surface conductivity of the ground electrodes. Figure 2.9 illustrates the results of surface conductivity measurements of the grounded electrode for each slot PD site. The initial value of  $10^{-1}$  S per square, resulting from a surface resistance of  $0.8 \Omega$  obtained before aging, includes the contribution of the assembly of concentric electrodes with conductive rubber and of the superficial layer of protective oil found on the steel plate. Overall, a decreasing trend was observed for all the ground electrodes in front of each slot PD site. The decrease was faster at

the beginning of aging and tended to saturate with degradation time. The originally conductive ground electrode when subjected to slot PD activity lost its conductivity because of the deposits of oxide, which is more resistive than steel.

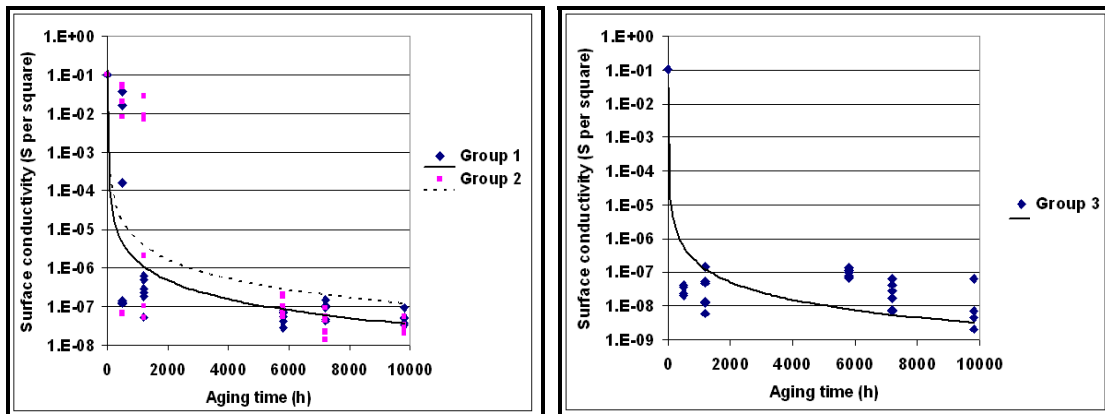


Figure 2.9 Surface conductivity measurements of the grounded electrode for each slot PD site of group 1 and 2 (left) and group 3 (right)

### 2.4.3 PD measurements

Before measuring the slot PD activity on individual bars at room temperature, it was possible to get a global signature of all six bars in parallel. In this configuration, PD measurements were done at 8 kV, with the capacitive coupler and with the bars of groups 2 and 3 at 85°C, while those of group 1 were at room temperature. This is the only way to measure the bars at high temperature with the capacitive coupler because when they are measured individually, the current loop used to heat the bar of groups 2 and 3 has to be opened up. Thus, in our experiment the comparison of activity at high and room temperature can only be made for the six bars measured together. Figure 2.10 illustrates the evolution of the positive apparent current (NQS +) as a function of aging time for all six bars in parallel at room temperature (condition 1) and also when the bars of group 1 were at room temperature and those of group 2 and 3 were at 85°C (condition 2). The NQS+ was selected as being the most significant parameter from the PRPD patterns characteristic of slot PDs. It can be seen in Figure 2.10 that the evolution of the NQS+ in condition 1 increased as a function of aging time but generally gave lower values than when the six bars were exposed to their aging condition



(condition 2). The only measurement point giving similar NQS + was the one recorded after 5800 h in August when the relative humidity was highest, e.g. 45.5%. This suggests that slot discharges are affected by the presence of moisture, even at temperature, typical of operating conditions.

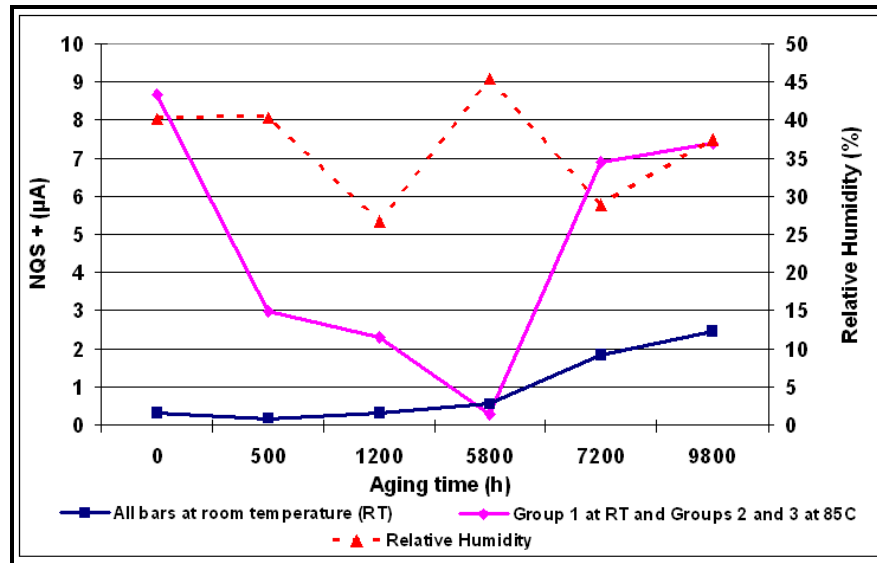


Figure 2.10 Evolution of the NQS + of all six bars in parallel measured with the capacitive coupler at room temperature and with bars of groups 2 and 3 at 85°C

At each measurement sequence, once PD measurements were completed on the six bars in parallel, they were disconnected in order to measure individual bars. For the bars of group 1, the presence of iron oxide powder on the insulation surfaces (see Figure 2.4) contributed to significantly reduce the slot PD activity when the amount of powder was important. The pattern of slot PDs could even disappear from the signature of the bars of this group. Since the aim for group 1 was to study the degradation of electrical erosion by slot PDs, it was decided that at each measurement sequence, the accumulated oxide deposit would be removed to reactivate full slot PDs. PD measurement on this bars was made before and after oxide removal. Figure 2.11 illustrates two PRPD patterns of bar 1A measured at 8.0 kV with the capacitive coupler and at room temperature, so all three slot PD sites were stressed during the measurement. The first PRPD pattern (left) is almost symmetrical and was measured in the presence of the iron oxide deposits at each of the sites (A, B and C), whereas the second

pattern (right) was measured just after the oxide was removed. In the first case, the pattern was dominated by the internal PD activity, but, after removal of the oxide, a strong asymmetry in favor of positive discharges during the negative voltage half-cycle clearly showed the presence of slot PDs and confirms the effect of surface deposit on the slot PD activity. In light of this, it can be said that both bars of group 1 most probably contribute very little to the overall NQS+ when the six bars were measured in parallel, as in Figure 2.10 (before oxide removal from group 1).

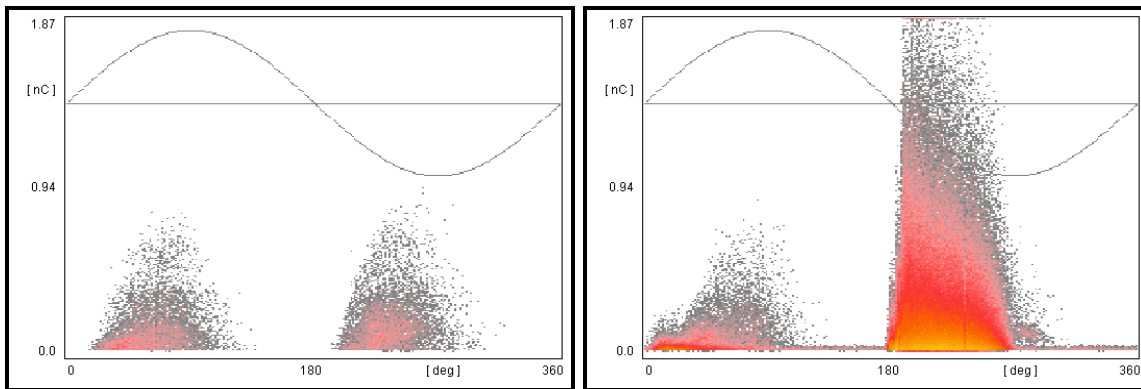


Figure 2.11 PRPD patterns recorded at 8 kV with a capacitive coupler on bar 1A with the iron oxide powder (left) and after the iron oxide powder was removed from insulation surfaces (right)

Unlike those on group 1, PD measurements performed on individual bars of group 2 at 8 kV were not representative of their aging condition because they were made at room temperature. The PD signals detected electrically with the capacitive coupler at room temperature always include the contributions of all types of discharge active. It is therefore difficult to study just the contribution of slot PD activity when other sources of activity are significant. To obtain more insight into slot PD activity, a directional antenna was used to measure the electromagnetic radiated signal in front of slot PD sites. The advantage of this technique is that it is directional and sensitive only to sources in proximity. Thus a better characterization of each slot PD site is possible and can be done with all the stresses present. One disadvantage of this measurement is that it cannot be calibrated and PD amplitude is very dependent on the antenna's position, distance from the site and angle. Thus the recorded patterns are mostly used for shape recognition. Figure 2.12 illustrates two PRPD patterns

recorded at 8 kV after 7200 h on bar 2A. The first one (left) was measured on the entire bar using a capacitive coupler at room temperature and the second one (right) was measured with the directional antenna in front of one slot PD site of bar 2A at its aging temperature (85°C). At room temperature, the dominant source of discharges was not slot PDs but rather internal PDs, as suggested by the almost symmetrical pattern with a rounded shape, while at 85°C the asymmetric triangular shape pattern clearly showed the presence of slot PDs. Thus one should be careful when performing off-line PD measurements on a generator and trying to compare them with on-line measurements. As it was the case here, higher temperatures were necessary to trigger slot PDs even though the semi-conducting coating removed from the three slot PD sites was a condition favorable to such activity.

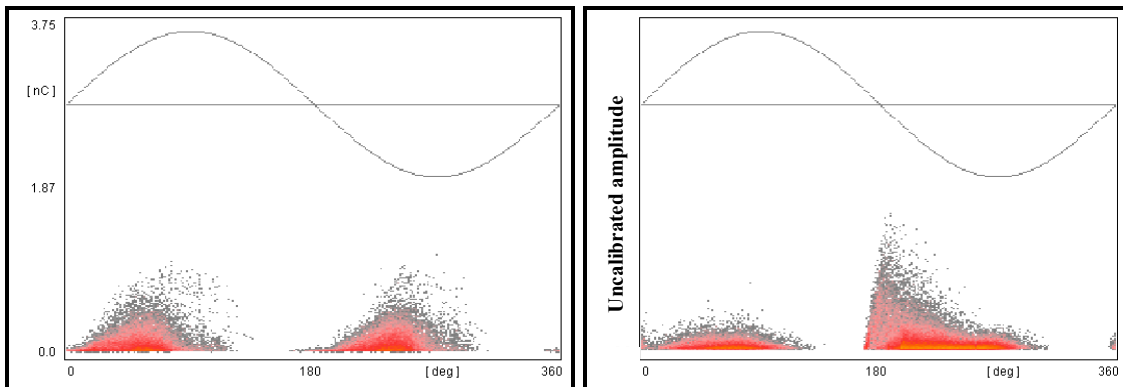


Figure 2.12 PRPD patterns measured after 7200 h of aging time at 8 kV on bar 2A with the capacitive coupler at room temperature (left) and in front of one slot PD site of bar 2A with the directional antenna when the bar was at 85°C (right)

After 9800 h, the analysis of the changes in the PRPD patterns of bars from group 2, measured at 8 kV with the directional antenna in front of each slot PD site in its aging condition, showed some features not present in the other groups. Figure 2.13 illustrates a PRPD pattern measured in front of the same site as in Figure 2.12 (right). The difference between these two patterns is due to an additional source of discharge in the PRPD pattern only present in Figure 2.13, not in Figure 2.12 (right). In both cases the typical pattern of slot PDs was observed but a contribution similar to internal PDs was superimposed on the pattern in Figure 2.13. Since there was flaking of the insulation of the bars of this group (see Figure

2.5), it is assumed that the new contribution may be associated with delamination of the first layers of tape.

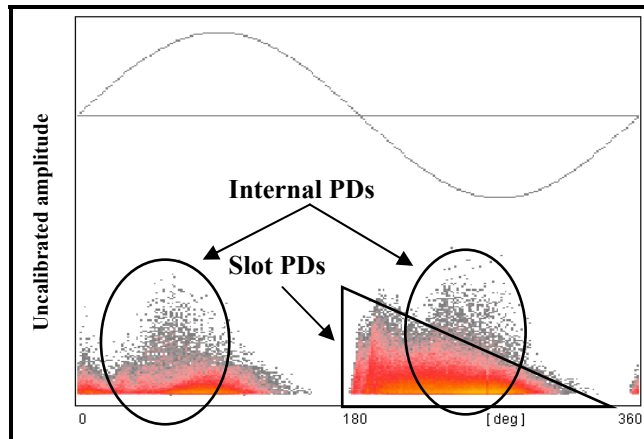


Figure 2.13 PRPD pattern measured at 8 kV in front of one slot PD site of bar 2A with the directional antenna at 85°C after 9800 h of aging time

As for the bars of group 3, they always showed slot PD activity on the full bars measured at 8 kV with the capacitive coupler and at room temperature except when the relative humidity in the laboratory was above 40%. Figure 2.14 (left part) illustrates the PRPD pattern recorded on bar 3A after 5800 h of aging when the relative humidity was the highest (45.5%) At this point, the pattern did not reveal the presence of any slot PD activity. For example, the pattern illustrated in the right part was measured in December after 7200 h when the relative humidity in the laboratory was 28.7%. A triangular shape, combined with an asymmetry in favor of positive discharges, typical of slot PDs, was clearly observed in this pattern (note that the vertical scales are not the same for both patterns).

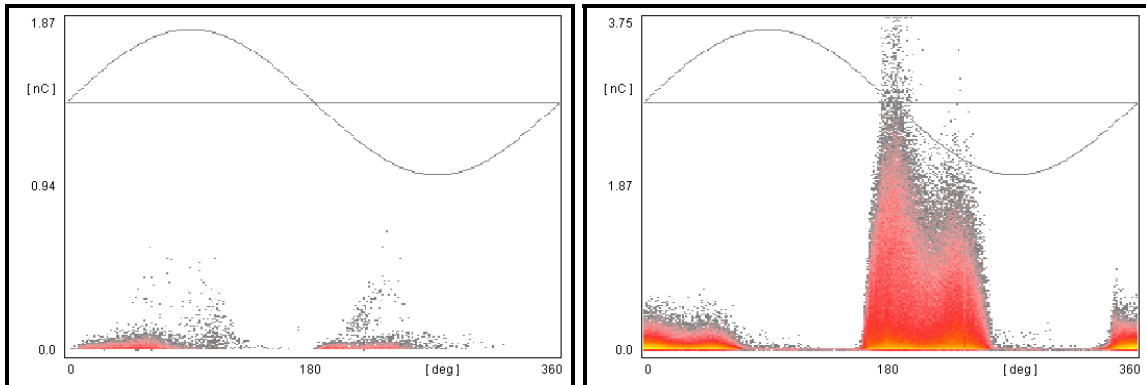


Figure 2.14 PRPD patterns measured on the entire bar 3A at 8 kV with the capacitive coupler and at room temperature condition, after 5800 h (left) and after 7200 h (right)

## 2.5 Discussion

To the authors knowledge, this is the first time that slot PDs have been studied in such detail as a function of aging time and for different stress conditions. In addition to the well controlled electrical, thermal and mechanical stress conditions, the relative humidity was monitored in the lab but was left free to follow seasonal changes. It was observed that both environmental changes and the surface degradation (insulation and ground) played a role in the evolution of the slot PD activity.

In order to better understand how slot PDs will change in a machine over time, the interdependence of slot PD attacks and surface conditions must be explained. To that end, it was decided to first decompose the phenomenon into different aging stresses. The main objective was to learn more about the relative contribution of electrical, thermal and mechanical stresses to the evolution of slot PD activity. The same aging voltage was applied to the three groups of bars (16 kV), but thermal and mechanical stresses were added to the electrical stress to include a synergic effect of combined stresses for each group. Although differences in degradation were observed, it is still too soon to draw any definitive conclusion with respect to the actual degradation rate under each type of stress or combination thereof. However, as expected, the two failures that have occurred so far were on bars with a triple stress of group 3, suggesting that this condition is much worse with regard to degradation than the others. This is consistent with what is observed on machines

but, since no failure occurred in the other groups, it is not yet possible to establish differences in degradation rates.

One of the premises of this study was that PD measurements at room temperature on individual bars would be representative of the insulation degradation for each of the three groups. After 9800 h of aging, things evolved in unsuspected ways. First, PD measurements recorded at room temperature on the six bars in parallel (Figure 2.10) do show a slow increase suggesting that it could indicate the level of degradation, but when they are compared with those on bars of groups 2 and 3, the conclusions are different. One of these conclusions is that the activity recorded at room temperature does not reveal the intensity of the slot PDs under aging conditions. The same could probably be said when comparing on-line and off-line measurements on generators affected by slot PDs. Another conclusion is that for the six bars in parallel in test condition 2 (group 1 at room temperature and the rest at 85°C), the bars of group 1 do not contribute much to the detected PD activity except when the relative humidity is high, as seen for the measurement time of 5800 h in Figure 2.10. The effect of humidity on slot PD activity at higher temperature is not something only seen in the lab because Younsi *et al* have already reported a behavior showing that PDs on generators can also be affected by seasonal changes in humidity with ratio of 100 in PD amplitude (Younsi et al., 2001). However, the humidity was not the dominant factor to influence the slot PD activity because, as seen in Figure 2.10, there was no direct relation between the slot PD activity and the relative humidity. This suggests that surface degradation also influences the intensity of the slot PDs.

The second unexpected result was that for the bars of group 1, aged at room temperature, a significant amount of iron oxide powder was produced compared to the other two groups. The presence of humidity in the air is most probably responsible for the large amount of surface deposit. It should be pointed out that the condition of group 1 was used to get a reference for the degradation rate of purely electrical slot PDs without any contribution of increased temperature, even though, this condition does not exist in a real generator always exposed to heat. The visual inspection of the PD sites from group 1 revealed that the quantity

and the color of the iron oxide deposits changed from one measurement sequence to the next. It should be pointed out that the moisture content of air fluctuated over time and the relative humidity measured at each PD measurement sequence followed the environmental conditions in the lab. This behavior was also observed by Jackson and Wilson (Jackson et Wilson, 1982), who reported that a rust deposit formed between the insulation surface and the steel slot mock-up subjected to slot PDs under room temperature and continuous flow of air in the laboratory. They suggested that these deposits were an amorphous form of iron oxide and that, when their laboratory experiment was carried out in a flow of dry air, the rust deposits did not occur. This indicates that laboratory measurements of slot PDs, especially long-term aging, may be affected by factors absent on an actual machine or at least less pronounced because the level of humidity in a machine at the discharge location is not well known. In order to determine the influence of humidity on slot PD activity in a generator, a separate laboratory study is currently being put together to examine the conditions in which the humidity starts to become a determinant factor in the overall degradation process and results will be published later.

In the current experiment, both bars of group 1 showed that the iron oxide powder produces a sufficient amount to fill up and short-circuit the air gap between the insulation and the ground electrode. The deposit alters the electric field distribution inside the gap and consequently reduces or entirely quenches the slot PD pulses. This was proven when comparing the PD signals on bars of group 1 just prior to and after removal of the deposit without any aging differences, as illustrated in Figure 2.11. This is also why there was no significant insulation degradation at each of the discharge sites (A, B, and C) for this group. In addition to testing under voltage alone, a condition non-existent in a generator, another important difference in this experiment was that the bars used in this configuration were laid horizontally with the slot PD sites facing ground plane, while in hydro machine the bars are installed vertically in the slot. This means that with the bars horizontal, oxide powder can accumulate on the insulation surface as opposed to the vertical position, where the powder will be more likely to fall by gravitation, if the gap size is sufficient. Overall, at room temperature, the contribution of the moisture content of air to the PD dynamics clearly

affected the amount and type of oxide deposited, to the point of making the slot PDs disappear for most of the aging time. If it had not been for regular intervention to remove the accumulated oxide, after initial degradation very little slot PD attack would probably have occurred on group 1.

In group 2, the bars electrically and thermally stressed exhibited more significant insulation degradation than the bars of group 1, as revealed by the visual observation of each site of this group (see Figure 2.5). Because of the heat, the insulation surfaces showed signs of thermal aging with changes in the color of the insulation. Previous work has revealed that an increase in temperature always leads to an increase in slot PD activity for short-term exposure (Hudon et al., 2007). Here, neglecting the influence of surface deposit, the sustained high energy of the PDs combined with the formation of ozone, which is a strong oxidizing agent, contributed to erode the insulation surfaces by degrading the organic compound of the epoxy resin and laterally damaged the semi-conducting coating, extending the bare insulation area exposed to high voltage. This lateral expansion was less pronounced in group 1 simply because there was less PD activity.

With the heat produced by the circulating current and the localized high temperature in the discharge channels, thermal degradation combined with electro-erosion induced molecular decomposition and oxidation of the polymeric epoxy resin. It has been reported in the literature that localized surface temperature due to PD activity could be high enough to generate thermal degradation (Las, 2000; Wilson, 1996). This degradation process results in a decrease of the bonding strength of the epoxy-mica interface. With time, thermal degradation leads to delamination of the epoxy-mica system creating new PD sites in the air between the layers of tape. For group 2, this created free mica flakes but only in the first few layers of insulation tape after 9800 h, at each site (A, B and C) of this group. Analysis of the change in PRPD patterns for this group showed some new features from a second source (see Figure 2.13) absent in the other groups and possibly related to tape delamination. The extent of this delamination will be verified at the end of the aging by performing bar dissections of the six sites of group 2. Results will be compared with the PRPD signatures for each group.



A significant difference with group 1 was that the quantity of iron oxide deposited on the insulation surfaces was much less abundant for the bars of group 2. Moreover, the iron oxide created on the ground electrode surfaces was more evenly distributed and the color of the coating was reddish compare to the brownish color of group 1. These differences suggest a different oxidative reaction in the presence of heat. This kind of deposit is more consistent with what is found in machines (Belec et al., 2007), where a generator with intense slot PD activity also gave a red deposit on the magnetic core in locations where slot PDs were active. Both the temperature and the lower moisture content in air are responsible for the differences in the oxidation of the ground electrode and the reduced amount of oxide on the insulation.

The aging conditions of bars in group 3 were expected to be the most severe as the slot PD sites were exposed to mechanical erosion in addition to the same electrical and thermal stresses as group 2. The six areas under slot PD aging revealed patterns of mechanical erosion similar to those found on machines and were caused by the relative movement of the bar with respect to the lamination stacks. Here, an important difference with bars from group 2 was that the motion of the vibrating stacks constantly brushed away the degradation products from the insulation surfaces and, as a result, only a few loose mica flakes were found on the surfaces. This is consistent with white powder spilling over in the ventilation ducts of the core of generators, close to intense slot PD sites. This observation is sometimes used during visual inspection to detect the presence of loose bars (Stone et al., 2004). Furthermore, it explains why the surface conductivity of the insulation for this group did not present a monotonic increase as a function of degradation time, unlike the two other groups which showed a continuous increase in the surface conductivity of the insulation. Over time, the surface conductivity of the bar insulation from group 3 revealed cyclic variation because of the combined effect of mechanical erosion and slot PD attack. As for the other groups, slot PDs are expected to cause oxidation of the ground electrode and degrade the insulation, causing its conductivity to increase. As the degradation products form on the surface, they tend to reduce the slot PDs. However, for the bars of group 3, even though slot PDs are minimal, the mechanical vibration will erode the deposit away. As insulation becomes less conductive, slot PDs will increase again, oxidizing the surface faster than it is abraded by

vibration until discharges diminish and the cycle starts over again. In fact the PRPD patterns measured on the bars of group 3 at 8 kV with a capacitive coupler at room temperature, revealed an asymmetry in favor of positive discharges with a triangular shape that was more pronounced when the surface conductivity of the insulation decreased and the surface became more insulating. On the contrary, when the insulation surface showed an increased conductivity because of an iron oxide deposit, the PRPD patterns were predominantly symmetric with a more rounded shape. The patterns measured at room temperature alternated between an asymmetric triangular shape typical of slot PDs and a symmetric rounded shape depending on the variations in the surface conductivity of insulation due to mechanical erosion.

On machines, this cyclic mechanism will be somewhat different because, in the configuration used here, the stack always sat on the bar surface with minimal gap increase over time whereas for bars standing vertically in their slots, the gap can grow continuously with degradation. In addition, the cycles between periods of high and low slot PD activity were measured only on the bars of group 3 during the room temperature characterization. Under the aging conditions, at higher temperature it was found that the PRPD patterns measured with the directional antenna in front of each slot PD site always had a triangular shape with an asymmetry in favor of positive discharges. This was the case for all sites of the three bars measured with the antenna (two bars of group 2 and the three sites of bar 3A). This confirms that temperature is a major contributor in the slot PD process. This behavior is consistent with results of previous findings where the slot PD activity always increased proportionally with temperature (Hudon, Belec et Levesque, 2008; Hudon et al., 2007). Thus, both temperature and surface degradation play a role in the evolution of slot PDs over time. The modifications in the surface conditions will directly affect the electric field developed inside the air gap and also the availability of electrons to start and sustain the PD process, whereas the thermal energy gained by electrons will reduce the amount of kinetic energy each electron has to acquire to produce a successful ionizing collision during the electronic avalanche. This also explains why slot PDs were always present when recorded with the

antenna at 85°C but dominant at room temperature only when the surface conductivity of the insulation was low.

After 9800 h only two failures had occurred, one on each bar of group 3 (3A and 3B), supporting the assumption that the presence of vibration leads to faster failure. However, aging resumed with the last four, out of the six sites of bars 3A and 3B, and the complete bars of group 1 and 2, to confirm this trend, but also to determine the relative severity of the aging in the two first groups. Both failure locations were similar to what is often found on machines in that they occurred at the corner of the bar, where the electric field in the insulation is largest, as depicted in Figure 2.15.

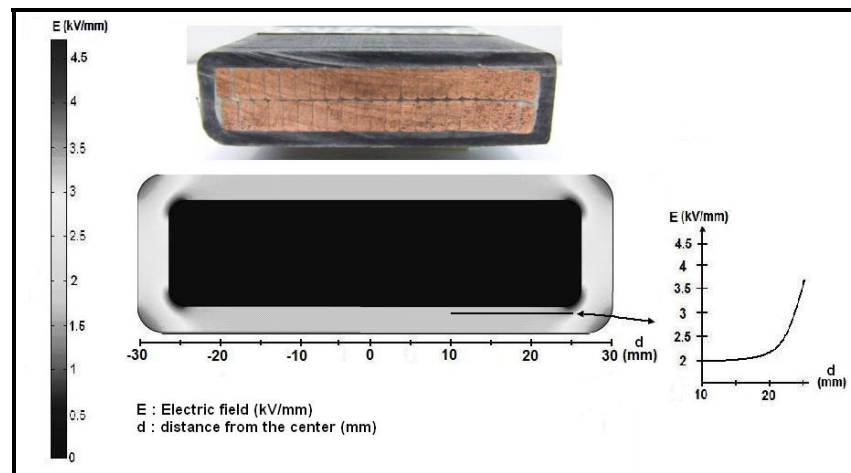


Figure 2.15 Electric field calculation developed inside the groundwall insulation (E is the magnitude of the electric field)

Prior to the failure, each site showed mechanical erosion with a reduction in the insulation thickness of about 0.7 mm, representing about 20% of the groundwall insulation. This led to an increase of the electrical field in the insulation but also helped to amplify the electrical stress of the slot PD sites of group 3. The larger stress and more intense slot PDs with temperature explain why bars from group 3 started to fail, whereas the bars from groups 1 and 2 did not show any significant thickness reduction of their groundwall insulation, even after 9800 h.

In addition to being at the corner of the bar, the two failure locations were also close to the semi-conducting coating limiting the slot PD area. Calculation of the local electric field inside the air gap at this location shows that, near the junction of the semi-conducting coating and the insulation surface, this field can be four times larger than at the center of the slot PD area, as seen in Figure 2.16.

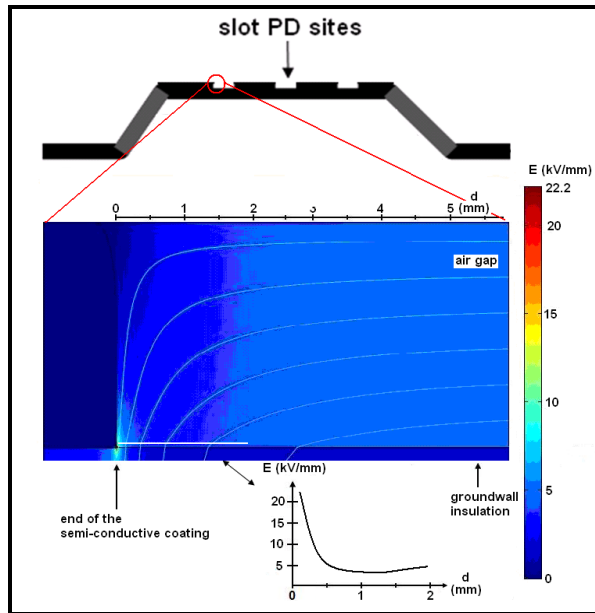


Figure 2.16 Electric field and equipotential surface calculation inside an air gap between epoxy-mica surface insulation and grounded steel electrode (E is the magnitude of the electric field)

It should be pointed out that this calculation shows that the electric field is higher than the breakdown strength of air which is 3 kV/mm at atmospheric pressure (Stone et al., 2004), everywhere inside the air gap. The electric field has two main components. The first one is the high electric field developed near the junction of the insulation surface and the semi-conducting coating, and is tangential to the insulation surface. It is where the magnitude of the field is highest, which also explains the erosion on the edge of the semi-conducting coating appearing as a lateral progression of the white surface in the direction of this field. Moving toward the center of the air gap, the field rapidly decreases to make way for the

second contribution. The latter is due to the field that is perpendicular to the insulation surface, which increases slightly at the center of the gap. It should be pointed out that this preliminary field calculation did not include the effect of surface deposit.

The region near the corner of the bar at the edge of the semi-conducting coating is highly stressed and this, combined with the mechanical erosion, explains why the two failures occurred at this location for bars of group 3. Moreover, the PRPD patterns measured on the bars of group 2 at 8 kV with a capacitive coupler at room temperature always indicated symmetrical patterns with a rounded shape (see the left part of Figure 2.12). The disappearance of the typical slot PRPD patterns at room temperature for bars of group 2 could be explained by the electro-erosion of the edge of the semi-conducting coating at the junction with the insulation surface, which alters the field distribution. The lateral progression of the discharges that eroded the semi-conducting coating contributed to reduce the high tangential component of the electric field in this region.

Slot PD mechanism is very complex and cannot rely solely on experimental data. Field calculation and discharge behaviour derived from it also plays an important part in the understanding because it takes into account the physics of the process. The next step of the project will be to build a model that will use field calculations but combine them with all the parameters evaluated here: high voltage, temperature, relative humidity, surface degradation and mechanical erosion. Overall, it is known that two conditions must be fulfilled in order to have PD inception: the local electric field must exceed a critical value given by the breakdown strength of air (considering pressure, humidity and temperature), and an initial free electron must be available. The magnitude of the local electric field at a slot PD site depends on many factors such as the nature, geometry and condition of the electrodes surrounding the PD site, the relative permittivity of the insulating materials, the gas pressure and charges deposited by the previous PD activity. To determine the real value of the electric field inside the air gap, it is necessary to include the contribution of the field distortion due to charges deposited by previous PD activity. This is not trivial information because it depends on the physical conditions of the surfaces surrounding the air gap and charges will decay

over time. Surface conductivity measurements of each slot PD site indicated that degradation caused by previous PD activity and iron oxide deposits increased the conductivity of the insulation surface, whereas oxidation of the grounded electrode reduced its surface conductivity.

The charge decay mechanisms, which reduce the electrical field contribution from space charges as a function of time, are generally due to surface conduction, recombination and diffusion into the bulk materials (Niemeyer, 1995). As a result, these decay mechanisms are influenced by surface conductivity, which is associated with surface degradation. In addition to the high electric field, there must be availability of an initial electron to start the ionization process. Initial electrons are generated by background radiation or surface emission from conductive materials such as the magnetic core or detachment of electrons from insulating surfaces (epoxy-mica) deposited by previous PDs. This value is influenced by temperature and pressure inside the air gap, the electric field at the gap surface and also surface conductivity and degradation due to aging (Niemeyer, 1995).

Oxidation of the grounded electrode is assumed to reduce the availability of electrons since the surface became more resistive and the continuous increase in the surface conductivity of the insulation contributed to the charge decay mechanisms by surface conduction; this probably caused a reduction in the availability of electrons. Furthermore, the relative humidity can also influence the avalanche process. Since water vapour is electronegative, it will capture some electrons and reduce the availability of initial electron. This explains the reduction of PDs for higher relative humidity. Although the PD process is influenced by temperature, surface conductivity and degradation due to aging, the exact interaction of each of these parameters is still unclear. It is expected that the results provided here combined with a numerical model of the field calculation will improve this understanding. All of this effort is intended to better evaluate the degradation of generators affected by slot PDs and make maintenance decisions based on the correlation of PD measurements, the degradation process and the actual condition of the equipment.

## 2.6 Conclusion

An accelerated aging test of bars in the laboratory was carried out to evaluate the effect of several factors on the long-term behaviour of stator bars under slot PDs. Bars subjected to slot PDs under electrical, thermal and mechanical stress showed that the degradation mechanisms were dependent on the type of stress present, but also on humidity and surface degradation (insulation and ground). All these factors had a drastic influence on the evolution of the PD signal. In addition, it was found that room temperature PD measurements cannot be used to determine what goes on at higher temperatures such as during normal generator operation. Surface conditions at the slot PD sites were also found to play a major role in the PD process and affected the shape and intensity of the PRPD patterns. For instance, after 9800 h, bars subjected to electrical stress only accumulated a large amount of oxide on their surface but did not reveal significant insulation degradation because the PD activity was quenched by the surface deposit formed at higher humidity. In the case of bars under electrical and thermal stresses we can observe an important surface degradation due to sustained attacks of slot PDs at higher temperature, although so far temperature and voltage were not sufficient to cause failure. The only two failures that occurred were on bars subjected to a combination of electrical, thermal and mechanical stresses. It comes as no surprise that degradation is more severe in the presence of mechanical erosion. However, to find that even in this case the electrical erosion from slot PDs had a cyclic behaviour related to surface oxidation by discharges, reduction of PDs, mechanical erosion of the deposit and so on was a first step that will help to better understand how slot PDs evolve. This will need to be known by those conducting PD measurement on generators. Even if the failures on bars submitted to electrical, thermal and mechanical stresses confirm that the triple stress is the worst condition, aging is still underway and there is hope that it will be possible, eventually, to determine the relative risk of each condition.





## CHAPITRE 3

### CONTRIBUTION OF HUMIDITY TO THE EVOLUTION OF SLOT PARTIAL DISCHARGES

Mélanie Lévesque, Éric David  
École de technologie supérieure, ÉTS  
1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal  
Québec, H3C 1K3, Canada

and Claude Hudon, Mario Bélec  
Institut de recherche d'Hydro-Québec IREQ,  
1800 boul. Lionel Boulet, Varennes,  
Québec, J3X 1S1, Canada

#### 3.1 Abstract

The effect of humidity on the slot partial discharge (PD) process was evaluated in a laboratory experiment conducted in a climatic chamber under constant humidity and temperature. Two stator bars, subjected to slot PDs at two temperatures (28°C and 85°C), were aged at twice their nominal phase-to-ground voltage (16 kV) under three absolute humidity levels (5 g/m<sup>3</sup>, 9 g/m<sup>3</sup> and 13 g/m<sup>3</sup>). The phase resolved partial discharge (PRPD) patterns were monitored during short aging sequences and visual observations of the surfaces were made at the beginning and end of each aging sequence. Observation confirms that humidity has a significant effect on the discharge phenomenon but other parameters, such as surface condition and temperature, affected the discharge process just as much. This paper presents the way slot PD activity evolves and affects the related PRPD pattern under different conditions of humidity, temperature and surface degradation.

Index Terms — Slot partial discharges, phase resolved partial discharge, generator, stator bars, insulation, humidity, temperature, surface degradation.

### 3.2 Introduction

Partial discharge (PD) measurements performed on air-cooled generator are very useful for evaluating the integrity of the stator winding main insulation and the semi-conducting and stress control coatings of stator bars. The phase resolved partial discharge (PRPD) pattern allows quantification of the PD activity but, even better, allows each type of PD source active in a machine during normal operation to be identified. Suitable recognition of the PD activity is essential for improving the diagnosis of generators, reducing the risk of in-service failure and better planning maintenance actions. Sometimes, identification of PD sources is not straightforward and requires a good knowledge of the insulation system, the machine construction, the different types of PDs and the measuring circuitry. The PRPD pattern detected depends on many parameters such as the PD site location, the surface conditions and the different operating stresses of the machine referred to TEAM (Thermal, Electrical, Ambient and Mechanical). To add to this complexity, most of the time multiple PD sources are simultaneously active in a machine and are superimposed in the PRPD pattern. In order to improve our understanding of the different PD mechanisms, PD measurements carried out on actual generators in the field must therefore often be complemented by laboratory experiments under well-controlled conditions, where PD sources are easier to isolate and where the effect of individual parameters can be more easily determined.

The relative contribution of PD activity to insulation degradation depends on the type of activity. It is common knowledge that the presence of slot PDs, which occur in air cavities between stator bars and the magnetic core, represents a serious threat to the insulation and the machine operation (Johnson, 1951b; Johnson et Mead, 1951). This activity will occur on bars closer to the high-voltage terminals when the semi-conducting coating is inadequate or when, as a result of mechanical vibrations, this coating has been eroded leaving the bare insulation surface facing the magnetic grounded core surface. The typical PRPD pattern resulting from slot PDs has been identified in the past as being triangular with a sharp slope at the onset of the pattern, and asymmetric in favor of positive discharges occurring during the negative voltage half-cycle (Hudon et Belec, 2005). However, this PRPD pattern is expected to evolve

as a function of time and surface degradation, although it will also be affected by other factors such as temperature, mechanical vibrations and humidity in air.

A previous accelerated-aging experiment was initiated in 2007 on six stator bars divided into three groups and subjected to slot PDs under electrical stress alone, under electrical and thermal stresses and, finally, under electrical, thermal and mechanical stresses (Levesque et al., 2010). This experiment was conducted in order to evaluate the differences in the insulation degradation rates in the presence of slot PDs under different stress combinations. The changes in the detected slot PRPD patterns were analyzed as a function of degradation time for each condition while surface conductivity measurements as well as visual observations were carried out to support the PD results. This long-term experiment confirmed that the evolution of the slot PD activity was dependent on the type of stress but was also significantly affected by the humidity content. At that time, the humidity in the laboratory was monitored during periodic measurements but was left free to follow environmental changes. Figure 3.1 illustrates the evolution of the slot PD intensity at two of the sites measured with an antenna over a two-year period.

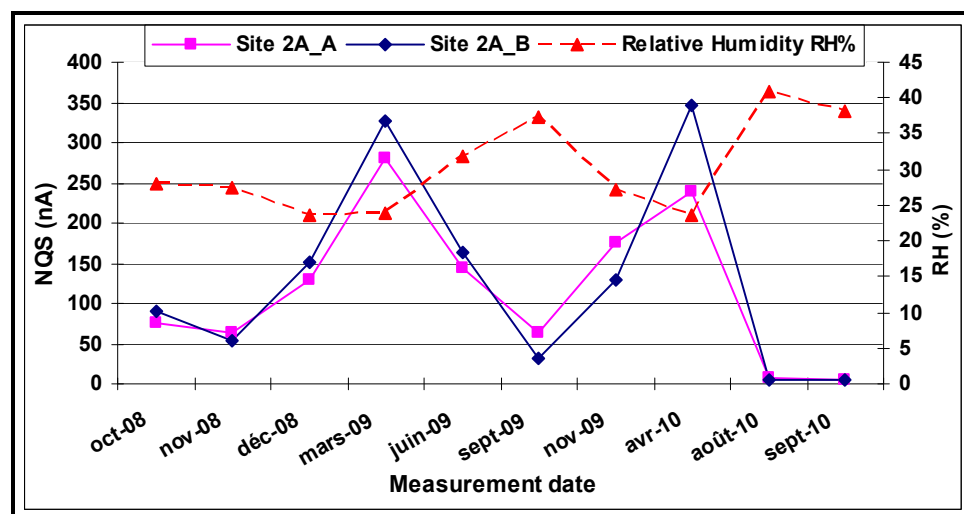


Figure 3.1 Evolution of the slot PD activity measured in front of two slot PD sites with a directional antenna at 8 kV and 85°C over a period of two years

It can be seen in this figure that the intensity of the slot PD activity is inversely proportional to humidity. In generators affected by slot PDs and exposed to yearly humidity variations, the PD reading could also give significantly different results depending on the time of year when the recording is made. It was previously reported in (Levesque et al., 2010) that, although higher humidity leads to lower discharge activity, under certain conditions oxide deposits from the grounded metallic electrode could be more substantial than in drier air when PD activity is greater.

Because of this apparent contradiction, it was decided to start a secondary laboratory experiment in order to better understand how humidity affects the evolution of slot PD activity. The investigation presented here was carried out using two stator bars placed in a climatic chamber and exposed to slot PDs right from the beginning of the test. These bars were subjected to different humidity levels at twice their nominal phase-to-ground voltage (16 kV) for a period of 100 h in order to accelerate surface degradation and study its change as a function of humidity. The bars were also subjected to two temperatures (28°C and 85°C) to see the combined effect of humidity and temperature. The paper presents the results of this investigation designed mainly to study the influence of humidity variation on slot PRPD pattern changes, but also on the effect of temperature and surface degradation, since all three factors usually combine to give complex reactions at the discharge site. Although it was our intent to isolate the effect of each factor, as we will see, this was not always possible. In addition to the measured slot PD activity, visual observations of the surfaces were used to characterize the discharge activity and the changes it underwent with degradation. The results presented here complement those of the more extensive long-term aging study of stator bars subjected to slot PDs under electrical, thermal and mechanical stresses.

### **3.3 Experimental description**

#### **3.3.1 Humidity aging test setup**

The experiment was performed on two 13.8 kV (phase-to-phase) epoxy-mica stator bars. An initial visual inspection of the surface of the bars revealed no sign of damage or imperfection. An initial PD measurement was performed at 8 kV on each bar separately, which showed the typical symmetrical PRPD patterns of internal discharges (Hudon et Belec, 2005). After that, one slot PD site per bar was made by abrading a section of the semi-conducting coating and positioning a grounded steel plate in front of the bare insulation, and thus acting as the stator core in this mock-up slot. The steel plates were slightly larger than the bare insulation of the slot PD site, just overlapping the semi-conducting coating for a few millimeters. This arrangement gave a maximum electrical stress at the slot PD site, while the rest of the bar was exposed to a smaller electrical stress, since the semi-conducting coating is not conductive enough to ensure a perfect constant zero voltage all along the bar under the 60 Hz applied voltage. In fact, the semi-conducting surface voltage increases with the distance from the grounded steel plate. The bars (identified as A and B) were placed in a climatic chamber in each of the three aging sequences at different humidity levels for a total of 230 h in each condition. The climatic chamber was equipped with a controlled humidifier and a dehumidifier to maintain the humidity constant throughout each aging sequence. Due to technical limitations, the room temperature inside the climatic chamber was set at 28°C. The slot PD site of bar A was kept at room temperature (28°C) while the site of bar B was locally heated up to 85°C with two heater plates mounted on each side of the slot PD site. The bars, illustrated in Figure 3.2, were simultaneously exposed to humidity and were electrically stressed at 16 kV AC, twice their nominal phase-to-ground voltage. These experimental conditions are also summarized in Table 3.1.

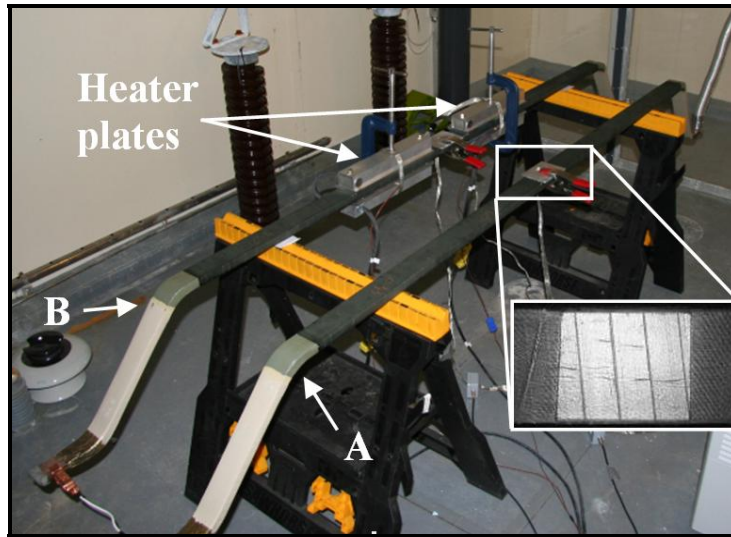


Figure 3.2 Two stator bars (A and B) exposed to slot PDs in a climatic chamber with an enlargement of the slot PD site without the grounded electrode

Table 3.1 Level of humidity and experimental conditions

Aging sequences	Humidity conditions (g/m <sup>3</sup> )	Aging voltage (kV)	Temperature of the slot PD site (°C)	Temperature in the climatic chamber (°C)
1	5	16	Bar A = 28 Bar B = 85	28
2	9			
3	13			

Prior to each aging sequence, the grounded steel plate was replaced by an undamaged one and, because the same two bars were used in the three sequences, the insulation surface of each site was cleaned to wipe away any sign of surface degradation from previous sequences. At the beginning of each sequence, both bars were conditioned at 8 kV ac, 28°C and 5 g/m<sup>3</sup> of humidity for a period of 18 h, as shown in the time line in Figure 3.3. At the end of the conditioning, a second PD measurement was taken to see the effect of short-duration surface degradation (measurement 1). The first step of each aging sequence was then to set the humidity and temperature and immediately take another PD measurement at 8 kV (measurement 2). Subsequently, the humidity was kept constant for a period of 65 h without any voltage to see the effect of humidity on the slot PD activity when the voltage was

switched back on again at 8 kV at the end of the 65 h. The only difference between PD measurements 2 and 3 was the long exposure to constant humidity, but with no contribution in surface degradation from voltage stress. The next step of each aging sequence was to accelerate the surface degradation by slot PD erosion by applying 16 kV for another 100 h under the same humidity conditions. All PD measurements performed during this sequence were taken at 8 kV (see Figure 3.3). After 165 h of constant humidity exposure, the aging voltage was reduced to 8 kV for PD measurement 7 and then turned off, leaving only the humidity level constant for a final 65 h. At the end of the sequence, a last PD measurement (measurement 8) was made at 8 kV, as depicted in Figure 3.3.

To understand the impact of humidity on slot PD activity, PD measurements were carried out throughout the aging sequence while visual inspections of the surfaces were made only at the beginning and at the end of the sequence (see Figure 3.3).

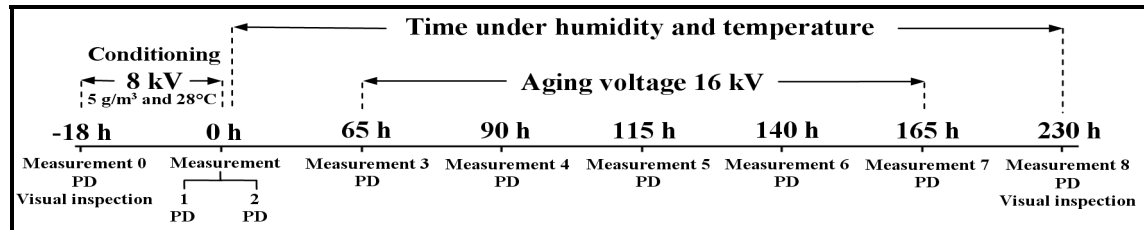


Figure 3.3 Time line of the humidity and voltage aging sequence for bar A at 28°C and bar B at 85°C

### 3.3.2 Measurements techniques

Partial discharge measurements were useful in monitoring the evolution of slot PD activity over each aging sequence. The acquisition time for all PRPD patterns was 30 s and recordings was made separately on each bar at 8 kV after 20 min of conditioning, using a 500 pF capacitive coupler in the frequency range of 40-800 kHz. When the aging voltage was applied, between 65 h and 165 h, PRPD patterns were recorded every 25 h after reducing the voltage to 8 kV for 20 min to measure the evolution of slot PDs under nominal voltage and with the humidity set at the condition of each sequence (cf. Table 3.1). These patterns are

identified as measurements 3 to 7. The quantification of the PRPD pattern was done using the total apparent current (NQS) in  $\mu\text{A}$  and the number of discharges (N). The NQS was the most significant parameter from the slot PRPD pattern because it includes both N and the amplitude (Q) of each pulse. It was calculated using the sum of the  $\text{NQS}^-$ , taken during the positive voltage half-cycle, and the  $\text{NQS}^+$ , taken during the negative half-cycle. In some cases, the amplitude (Q) and number of discharges (N) did not increase or decrease together and these cases required the analysis of both N and NQS.

As part of the visual inspection, pictures of each slot PD site were taken using a UV camera while the bar was at 8 kV. In order to see the discharges during this inspection, the grounded steel plate was temporarily replaced by a grounded steel wire mesh positioned in front of the bare insulation. The steel wire mesh provided an almost uniform ground plane while allowing us to view the PD activity, as illustrated in Figure 3.4. Pictures were taken outside the climatic chamber in dry condition at  $23^\circ\text{C}$  with an absolute humidity of  $5 \text{ g/m}^3$ .

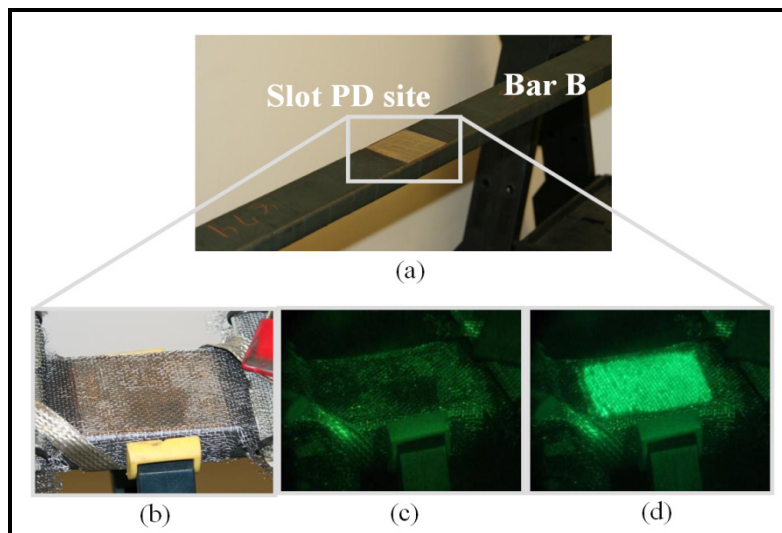


Figure 3.4 Arrangement for slot PD observation (a) a slot PD site without ground, (b) using a grounded steel wire mesh under room light, (c) with UV camera at 0 kV and (d) at 8 kV before surface degradation



### 3.4 Results

#### 3.4.1 Visual observations of surfaces

A first visual observation was made at the beginning of each aging sequence (see Figure 3.3) to make sure that no degradation products were left on the surfaces. A visual observation of the grounded steel plate and insulation surface was made after 230 h (at the end of the sequence). For the slot PD site of bar A at room temperature, after each aging sequence ( $5 \text{ g/m}^3$ ,  $9 \text{ g/m}^3$  and  $13 \text{ g/m}^3$ ), the steel plate revealed a uniform coat of light brown iron oxide as can be seen in Figure 3.5.

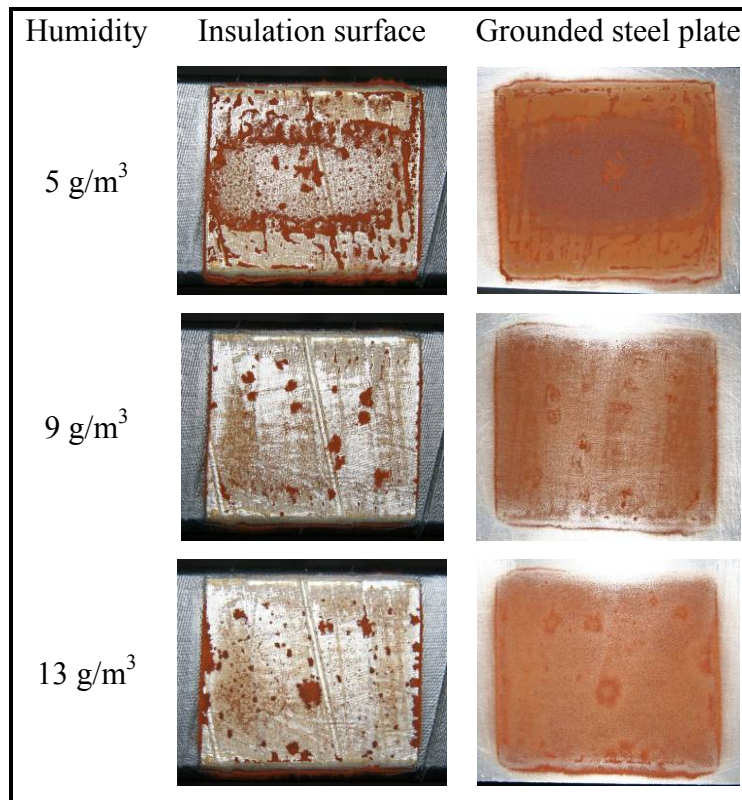


Figure 3.5 Pictures of the insulation surface (left) and grounded steel plate (right) of the slot PD site of bar A after sequence 1 (top), sequence 2 (middle) and sequence 3 (bottom)

The color of the deposit on the steel plate was similar after aging at  $9 \text{ g/m}^3$  and  $13 \text{ g/m}^3$ , but was darker in the central area after the aging at  $5 \text{ g/m}^3$ . There was no indication of degradation of the insulation surface but the iron oxide powder from the steel plate oxidation did deposit on the insulation surface. The iron oxide deposits on the insulation surface and the oxidation of the grounded steel plate after sequence 1 at  $5 \text{ g/m}^3$  (top), sequence 2 at  $9 \text{ g/m}^3$  (middle) and sequence 3 at  $13 \text{ g/m}^3$  (bottom) are shown in Figure 3.5. The amount of oxide and its spatial distribution on the insulation surface depended on both the insulation surface irregularities and the humidity level. There was more oxide after sequence 1, in which the humidity condition was the lowest.

In addition to the visual inspection of the surfaces, the PD activity at the end of each aging sequence was observed using a UV camera after replacing the grounded steel plate by the steel mesh. Figure 3.6 shows UV pictures taken on bar A at 8 kV at the end of sequence 1 (left), sequence 2 (middle) and sequence 3 (right).

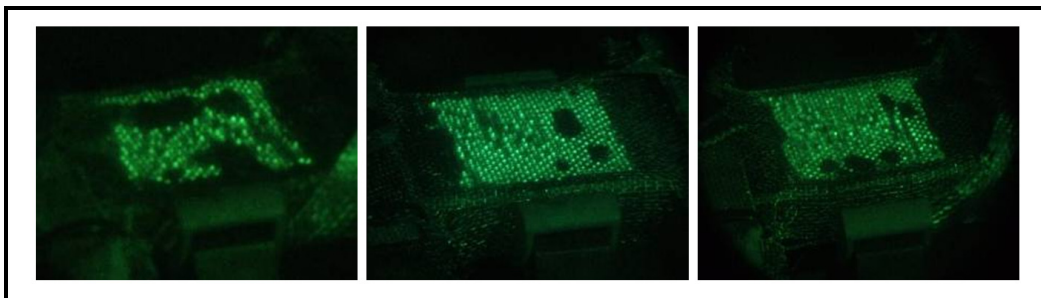


Figure 3.6 Pictures of the slot PD site of bar A taken at 8 kV in dry conditions ( $23^\circ\text{C}$  and  $5 \text{ g/m}^3$ ) with an UV camera and a grounded steel wire mesh after aging sequence 1 (left), sequence 2 (middle) and sequence 3 (right)

These pictures clearly show that the iron oxide deposit alter the PD activity. Darker areas are due to large iron oxide deposits on the insulation surface, causing local extinction of PD activity. In contrast, the rest of the insulation, without apparent deposits, gave rise to sustained PD activity, as revealed by the UV emission in Figure 3.6. The disappearance of slot PDs due to the iron oxide deposits on the insulation surface was more widespread after sequence 1 and more localized after sequences 2 and 3. This is consistent with visual

observations presented above in Figure 3.5 (left) where the amount of iron oxide deposited on the insulation surface was larger after sequence 1. It should be pointed out that darker areas in Figure 3.6 do not exactly match the iron oxide deposits on the insulation surface shown in Figure 3.5 (left) because the free iron particles shifted somewhat on the surface when the steel plate was being replaced by the steel mesh, thus spatially affecting the PD activity.

Figure 3.7 illustrates the insulation surface (left) and oxidation of the steel plate (right) in the case of the slot PD site of bar B, following sequence 1 at  $5 \text{ g/m}^3$  (top), sequence 2 at  $9 \text{ g/m}^3$  (middle) and sequence 3 at  $13 \text{ g/m}^3$  (bottom).

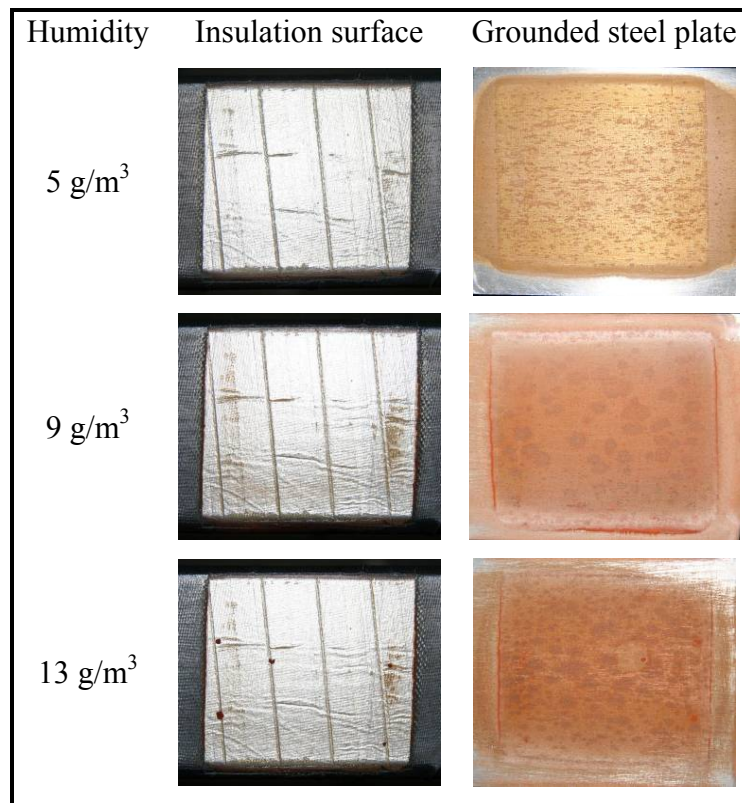


Figure 3.7 Pictures of the insulation surface (left) and the grounded steel plate (right) of the slot PD site of bar B after sequence 1 (top), sequence 2 (middle) and sequence 3 (bottom)

After each aging sequence, the insulation surface degradation was clearly different from that on bar A (see Figure 3.5 (left)). Here, there was no evidence of iron oxide powder on the insulation surface with the exception of aging sequence 3 at  $13 \text{ g/m}^3$  where a few spots were observed. After all three sequences, the insulation surface was brighter than before aging, suggesting that at higher temperature the first layer of tape had begun to undergo modifications due to slot PD attack. In addition, an iron oxide coating entirely covered the grounded steel surface with randomly distributed spots, after all aging sequences. When compared with what was seen in Figure 3.5 (right), the oxidation illustrated in Figure 3.7 (right) was not limited to the area of the bare insulation but extended to cover almost the entire surface of the steel plate. After aging sequences 2 ( $9 \text{ g/m}^3$ ) and 3 ( $13 \text{ g/m}^3$ ), the oxide was reddish in color while it was light brown after aging sequence 1 at ( $5 \text{ g/m}^3$ ).

Pictures made with the UV camera on bar B at 8 kV are illustrated in Figure 3.8 after aging sequence 1 (left), sequence 2 (middle) and sequence 3 (right). After aging sequence 1, the PD activity was more restricted and irregularly dispersed over the insulation surface. In contrast, after sequences 2 and 3, an almost uniform PD activity was observed over the insulation surface. Even if the pictures of the insulation surface in Figure 3.7 (left) appear similar after all aging sequences, the PD activity in Figure 3.8 after sequence 1 (left), which was the driest condition, was clearly different.

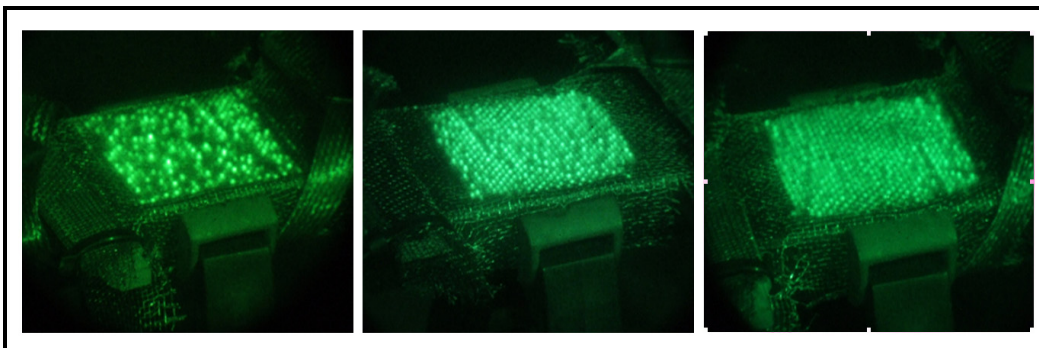


Figure 3.8 Pictures of the slot PD site of bar B taken at 8 kV in dry conditions ( $23^\circ\text{C}$  and  $5 \text{ g/m}^3$ ) with an UV camera and a grounded steel wire mesh after aging sequence 1 (left), sequence 2 (middle) and sequence 3 (right)

### 3.4.2 PD measurements

The beginning of each aging sequence (measurement 0), after the insulation surface was cleaned and the grounded steel plate replaced, always saw very intense PD activity with an almost symmetrical triangular shape in both polarities of the applied voltage, as shown by the PRPD pattern recorded on bar A in Figure 3.9 (left). Quantification of this pattern, presented in Table 3.2, indicates a slight asymmetry in favor of negative discharges, occurring during the positive half-cycle of the voltage, where the number of negative discharges was somewhat larger than that of positive discharges. This unusual asymmetry of the PRPD pattern is the opposite of that generally accepted for slot PDs, namely in favor of positive discharges during the negative voltage half-cycle (Hudon et Belec, 2005). However, within 18 h of conditioning to continuous slot PD activity at 8 kV in the same dry condition (28°C and 5g/m<sup>3</sup>) and just prior to setting the humidity level for the aging sequence (see Table 3.1), the recorded PRPD pattern (measurement 1) had changed substantially showing a more typical asymmetric shape for slot PDs in favor of positive discharges, as reported in Table 3.2. This change between measurement 0 and 1, and illustrated in the PRPD patterns in Figure 3.9 measured on bar A at 8 kV, 28°C and 5 g/m<sup>3</sup>, was similar for all sequences at the end of conditioning for both bars and just before measurement 2. The sharp increase of the pattern at the onset of each voltage half-cycle was similar before and after conditioning, as may be seen at the left and right of Figure 3.9, but the shape of the PRPD pattern was slightly different. After conditioning, there was a decrease in the number of large discharges with an increased number of low-magnitude pulses. Even though the magnitude of the negative discharge during the positive voltage half-cycle was lower after 18 h at 8 kV in Figure 3.9 (right), a large number of small negative discharges was still present and was almost identical to the number of positive discharges occurring during the negative voltage polarities. This change in behavior was caused solely by surface degradation due to PD attack during the short conditioning time at 28°C and a humidity of 5 g/m<sup>3</sup>.

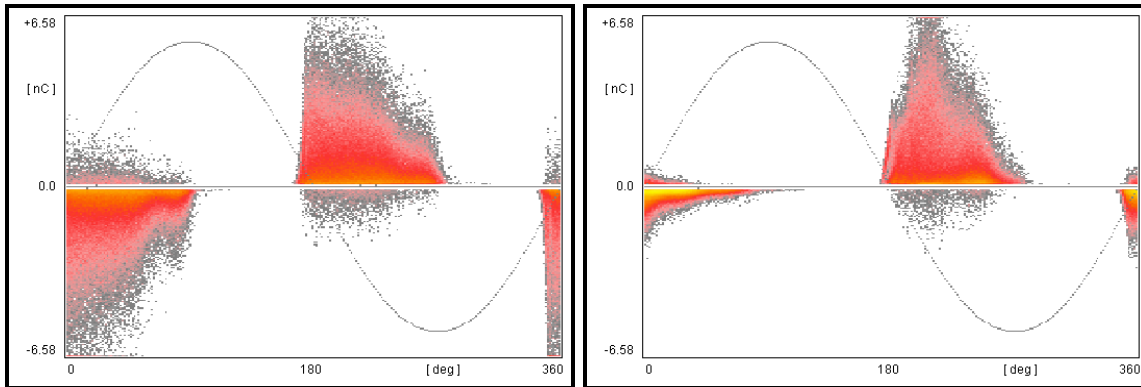


Figure 3.9 PRPD patterns measured at 8 kV on bar A before aging sequence 2, when the voltage was first applied at 28°C and 5 g/m<sup>3</sup>, measurement 0 (left) and after 18 h exposed to 8 kV at 28°C and 5 g/m<sup>3</sup>, measurement 1 (right)

Table 3.2 PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.9

	Figure 3.9	
	(left)	(right)
N <sup>-</sup>	156690	104520
N <sup>+</sup>	140998	103436
NQS <sup>-</sup> (μA)	5.54	1.28
NQS <sup>+</sup> (μA)	5.33	4.28

For bar B, the PRPD pattern at 28°C was also symmetrical before the 18 h conditioning at 8 kV for the three aging sequences. After conditioning, an asymmetry similar to that in Figure 3.9 was observed as a result of surface degradation. Immediately after conditioning (measurement 1), the voltage was turned off and the humidity was set to the specific value of the sequence (see Table 3.1) and reached equilibrium within 2 h. At this point, a PD measurement was made at 8 kV (measurement 2) just before increasing the temperature to 85°C. The PRPD pattern measured for sequence 2 of bar B at 8 kV, 28°C and 9 g/m<sup>3</sup> is illustrated in Figure 3.10 (left). Note that the vertical scale is different than in Figure 3.9. This PRPD pattern is still almost triangular in shape with a sharp increase at its onset, with the asymmetry in favor of positive discharges being more pronounced than at lower humidity. The NQS and number of discharges extracted from the PRPD pattern of Figure

3.10 (left) are presented in Table 3.3. After this PD measurement at room temperature, the temperature of the slot PD site of bar B was raised to 85°C and another PD measurement was made at 8 kV (which is a subset of measurement 2). The temperature increase caused a significant change in the PRPD pattern, as illustrated in the right part in Figure 3.10. The pattern stayed triangular in shape with a sharp slope and an asymmetry in favor of positive discharges but the negative PD count increased considerably compared to the low temperature measurement (Figure 3.10 (left) and Table 3.3).

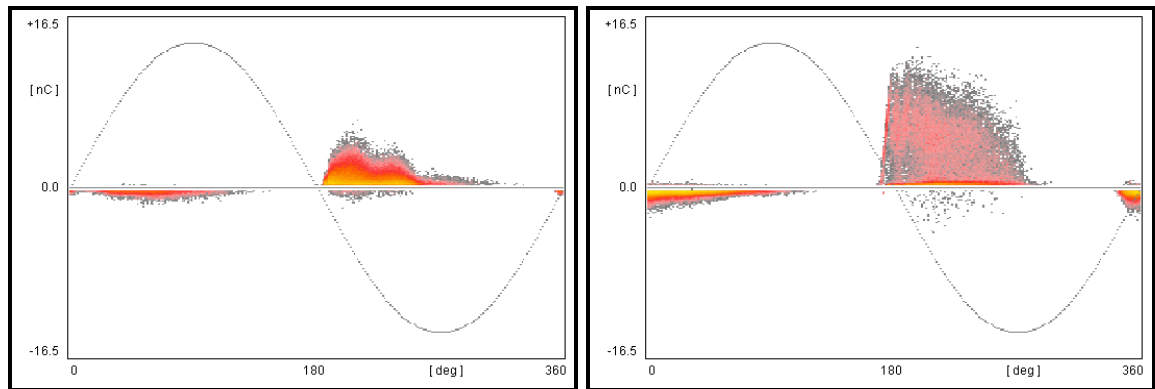


Figure 3.10 PRPD patterns measured at 8 kV and  $9 \text{ g/m}^3$  on bar B before aging sequence 2, after the conditioning period (measurement 2) at 28°C (left) and at 85°C (right)

Table 3.3 PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.10

	Figure 3.10	
	(left)	(right)
$N^-$	8583	66290
$N^+$	90014	38172
$NQS^- (\mu\text{A})$	0.179	1.50
$NQS^+ (\mu\text{A})$	3.31	4.47

As the state of surface degradation of the slot PD site and humidity inside the chamber was the same in both PRPD patterns in Figure 3.10, the difference between them has to come from the temperature effect, which is consistent with results published earlier (Hudon, Belec

et Levesque, 2008). The parameters extracted from Figure 3.10 (right) and shown in Table 3.3 reflect the higher values for the  $N_{QS}^+$ ,  $N_{QS}^-$  and  $N^-$  but there was a considerably lower number of positive discharges  $N^+$ , which drops below the number of negative discharges, an unexpected feature for a slot PRPD pattern.

The evolution of the total NQS measured at 8 kV as a function of time (measurements 2 to 8) for all aging sequences is illustrated in Figure 3.11 for bar A.

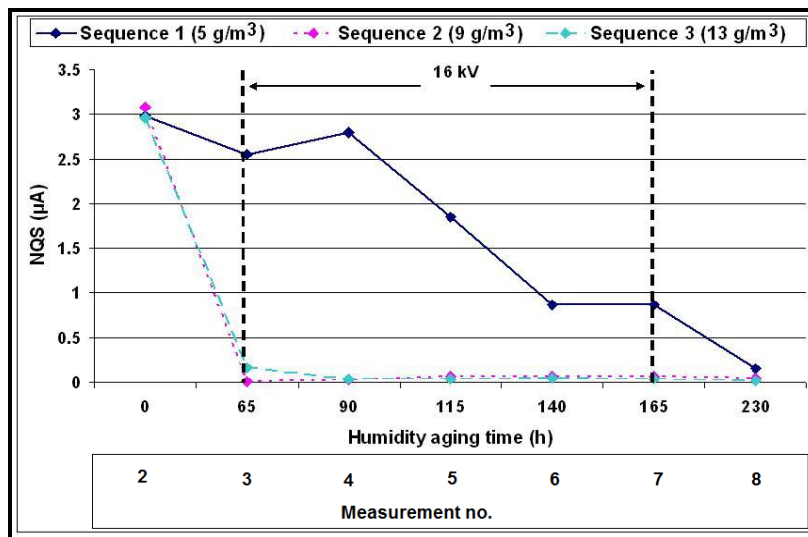


Figure 3.11 Evolution of the NQS of the slot PD site of bar A measured at 8 kV and 28°C for all aging sequences

The main feature observed in this graph was the rapid decrease in the NQS to very low values at the high humidity levels of sequence 2 and 3, after only 65 h in their respective humidity condition and before applying the aging voltage of 16 kV. For those two sequences, the slot PD activity decreased considerably and even disappeared completely soon after the aging voltage was applied and never reappeared throughout the whole aging sequence, even in the presence of energized bare insulation facing ground. All the PRPD patterns recorded from measurement 3 and on revealed mostly low-intensity internal PD activity. In the case of sequence 1, the driest condition, the NQS showed a continuous reduction, albeit with the slot PD activity staying active until the end of the aging sequence. This is consistent with the visual observations presented above where the amount of iron oxide powder was much



higher at the end of sequence 1 than for the two other sequences. It should be pointed out that, in the case of sequences 2 and 3, even though the slot PD activity rapidly disappeared at the end of the sequences, a layer of oxide covered the entire surface of the steel plate. This oxide layer most probably came from the short initial conditioning and normal atmospheric oxidation under high humidity.

Four of the PRPD patterns recorded at 8 kV, 28°C and 5 g/m<sup>3</sup> during sequence 1 of bar A are illustrated in Figure 3.12a, 3.12b, 3.12c and 3.12d. The PRPD patterns in this figure are respectively those of measurements 2, 3, 7 and 8. The one measured after 65 h (Figure 3.12b) of humidity and temperature exposure without voltage shows the same triangular and asymmetric shape in favor of positive discharges as that measured at 0 h after 18 h of conditioning at 8 kV (Figure 3.12a) but with a reduced intensity. The 15% decrease in the slot PD intensity due to humidity alone can also be seen in Figure 3.11. From 65 h and for the next 100 h, the slot PD site was subjected to the aging voltage of 16 kV while maintaining the same humidity, which caused a continuous attack of slot PD activity and consequent surface degradation. After a small increase in NQS, (reading at 90 h), the intensity decreased continuously. Figure 3.12c illustrates the PRPD pattern measured after 165 h when the aging voltage was dropped to 8 kV. The NQS of this pattern was 66% lower than that at 65 h and, even though the pattern still shows an asymmetry characteristic of slot PDs, its shape was more rounded after aging and at this gain setting. At this point, the degraded slot PD site was once again subjected to the humidity condition alone for another 65 h up to 230 h and, at the end, the PRPD pattern measured after 230 h is illustrated in Figure 3.12d. The interaction of humidity with the already degraded surfaces caused yet another significant reduction of the slot PD intensity with a reduction of 82% in the NQS compared to the reading at 165 h in Figure 3.12c. However, at the end of sequence 1, although attenuated, the characteristics of slot PDs are still present in the PRPD pattern. Figure 3.13 illustrates PRPD patterns corresponding to the one in Figure 3.12d but recorded with a different gain (left) and in a higher frequency range (right). As we can see in those PRPD patterns, the triangular shape with a sharp slope at the onset of the pattern and asymmetric in favor of positive discharges are clearly visible.

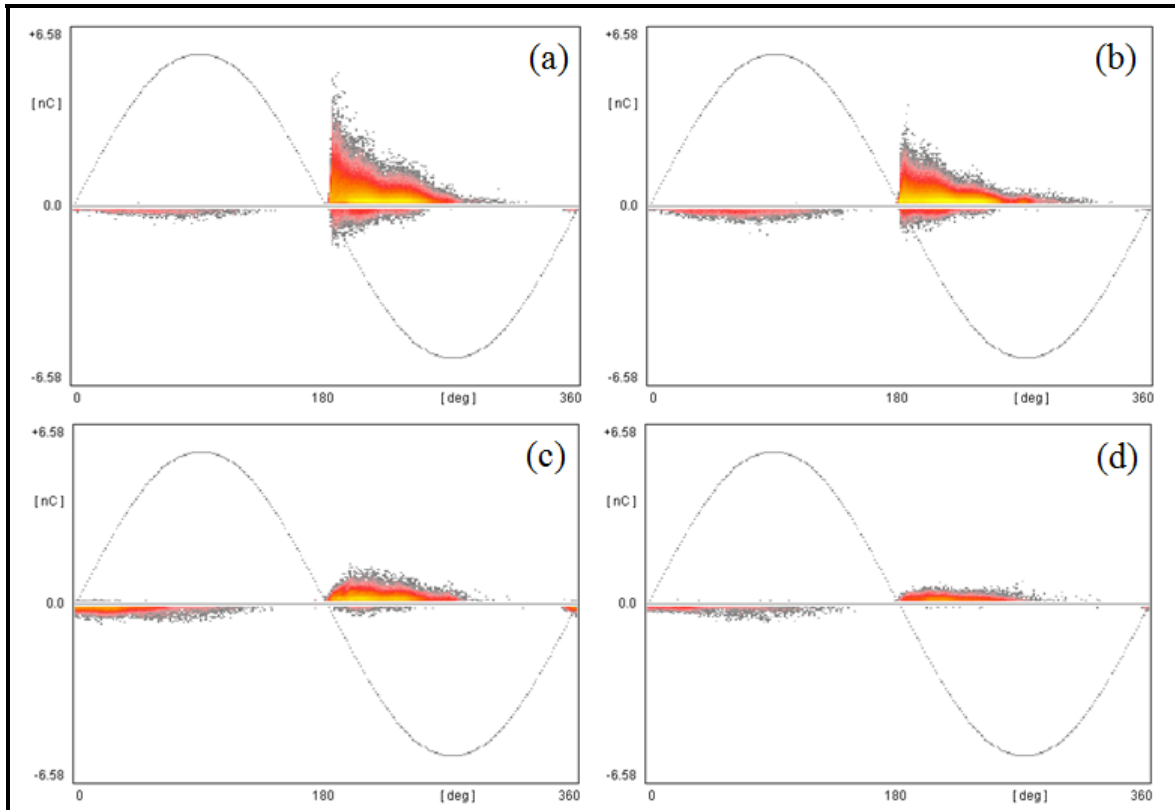


Figure 3.12 PRPD patterns measured at 8 kV and 28°C on bar A during the aging sequence 1 at 5 g/m<sup>3</sup>, (a) measurement 2 at 0 h, (b) measurement 3 at 65 h, (c) measurement 7 at 165 h and (d) measurement 8 at 230 h

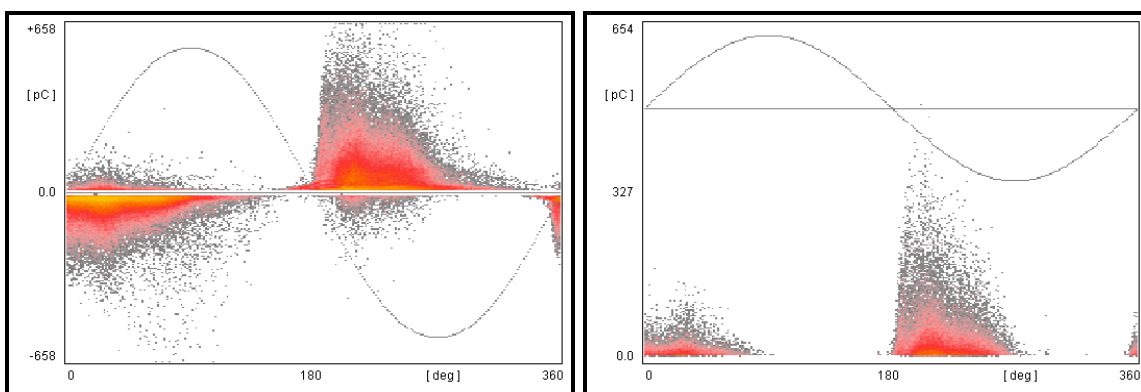


Figure 3.13 PRPD patterns measured at 8 kV and 28°C on bar A at the end of aging sequence 1 at 5 g/m<sup>3</sup>, (measurement 8 at 230 h), 40-800 kHz (left) and 2-20 MHz (right)

The evolution of the NQS as a function of time for bar B at higher temperature and illustrated in Figure 3.14 shows that slot PD activity was present during all aging sequences. As before,

the lower humidity generally gave higher NQS but levels were much higher than at lower temperature. The inverse influence of humidity on the NQS became obvious only after switching on the aging voltage (16 kV), indicating that the presence of water vapor influenced the slot PD activity even when the bar is at a temperature typical of normal operation. The discharge intensity was again higher for sequence 1 than for 2 and 3, mainly because of the higher magnitudes of the negative slot PD activity during the positive voltage half-cycle. Under both humidity and voltage, between 65 h and 165 h, there was a general decrease in slot PDs for all sequences. After turning off the voltage at 165 h, but keeping the humidity and temperature constant for the next 65 h, the effect on slot PDs measured at the end of the three sequences revealed a significant increase in the NQS, a behavior not seen on bar A at lower temperature.

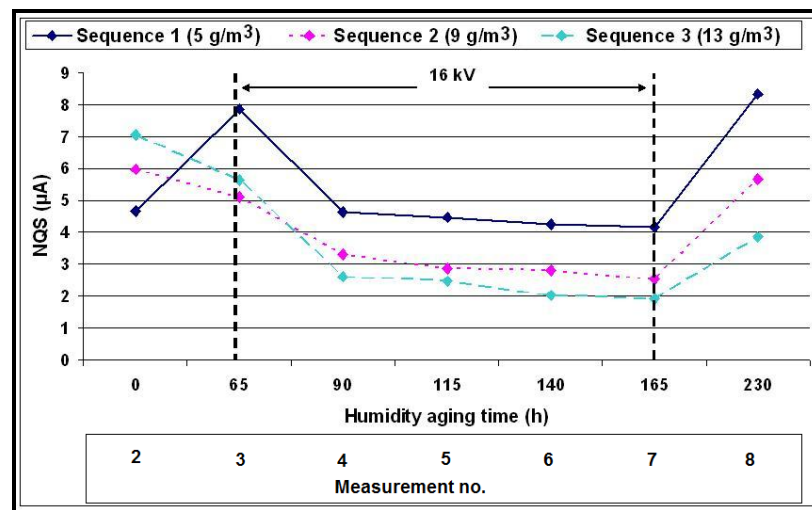


Figure 3.14 Evolution of the NQS of the slot PD site of bar B measured at 8 kV and 85°C for all aging sequences

The four PRPD patterns illustrated in Figure 3.15a, 3.15b, 3.15c and 3.15d were measured during the aging sequence 1 for bar B at 8 kV and 85°C and correspond to measurements 2, 3, 7 and 8. Only temperature and humidity were present between measurement 2 (Figure 3.15a) and measurement 3 (Figure 3.15b). The quantification of these patterns is summarized in Table 3.4. The minor surface damage from the conditioning period at 8 kV was the same for both conditions, and the triangular shape with a sharp slope characteristic of slot PDs was

similar in the two patterns. After 65 h at 85°C and 5 g/m<sup>3</sup>, in Figure 3.15b the NQS<sup>+</sup> increased slightly and the one of negative discharges increased significantly compared to the pattern in Figure 3.15a, (see Table 3.4). The NQS ratio of the positive to negative discharges was greater than 1.0 but the N<sup>-</sup> was higher than N<sup>+</sup> in Figure 3.15b mainly because of the presence of a large number of small-amplitude discharges during the positive voltage half-cycle. When the 16 kV aging voltage was applied, there was a sharp decrease in slot PD activity, as can be seen in Figure 3.14, then the NQS decreased continuously over time. The slot PRPD pattern kept a triangular shape with the sharp slope at its onset but became almost symmetrical in both voltage polarities. The parameters extracted from the PRPD pattern in Figure 3.15c and presented in Table 3.4, revealed a decrease in the NQS<sup>+</sup>, NQS<sup>-</sup> and of N<sup>-</sup> when compared with the PRPD pattern in Figure 3.15b, but an increase of N<sup>+</sup> now larger than N<sup>-</sup>. After the voltage was switched off at 165 h in sequence 1, the degraded slot PD site was subjected only to humidity and temperature. The PRPD pattern measured at the end of this condition (Figure 3.15d) is almost symmetrical but there was a significant increase in intensity and number of discharge pulses, as depicted in Table 3.4. This symmetry in the slot PRPD pattern at elevated temperature was seen only when the humidity was low (5 g/m<sup>3</sup>). At the end of the other two sequences (2 and 3) at higher humidity condition, there was also an increase in the NQS but the slot PRPD pattern always stayed asymmetrical.

Table 3.4 PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.15

	Figure 3.15			
	(a)	(b)	(c)	(d)
N <sup>-</sup>	28983	92461	77238	92590
N <sup>+</sup>	64964	51789	88155	92708
NQS <sup>-</sup> (μA)	0.57	3.44	1.98	4.01
NQS <sup>+</sup> (μA)	4.16	4.42	2.18	4.31

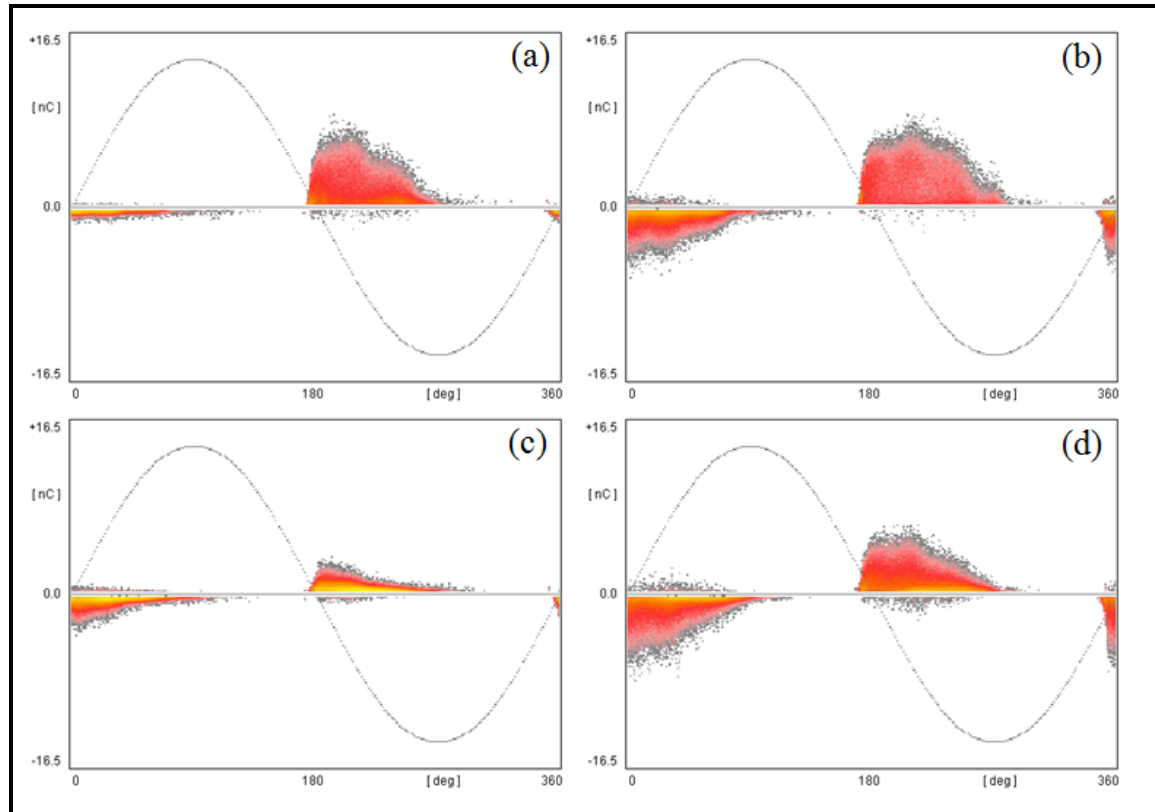


Figure 3.15 PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C on bar B during aging sequence 1 at 5 g/m<sup>3</sup>, (a) measurement 2 at 0 h, (b) measurement 3 at 65 h, (c) measurement 7 at 165 h and (d) measurement 8 at 230 h

Figure 3.16 illustrates four PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C (measurements 2, 3, 7 and 8) in the case of sequence 3. The parameters extracted from these patterns are also reported in Table 3.5. In Figure 3.16, the slot PD magnitude during the positive voltage half-cycle remained low throughout the sequence and never increased as it did in sequence 1 at 5 g/m<sup>3</sup>. The same behavior was also observed in the case of sequence 2. The common features at high temperature for all three aging sequences were that the slot PRPD pattern kept a triangular shape and a sharp slope at its onset during the negative voltage half-cycle.

Table 3.5 PD parameters extracted from slot PRPD patterns in Figure 3.16

Figure 3.16				
	(a)	(b)	(c)	(d)
$N^-$	90024	52330	9174	18691
$N^+$	38598	42165	73069	97748
$NQS^-$ ( $\mu A$ )	2.29	1.16	0.173	0.355
$NQS^+$ ( $\mu A$ )	4.78	4.47	1.75	3.51

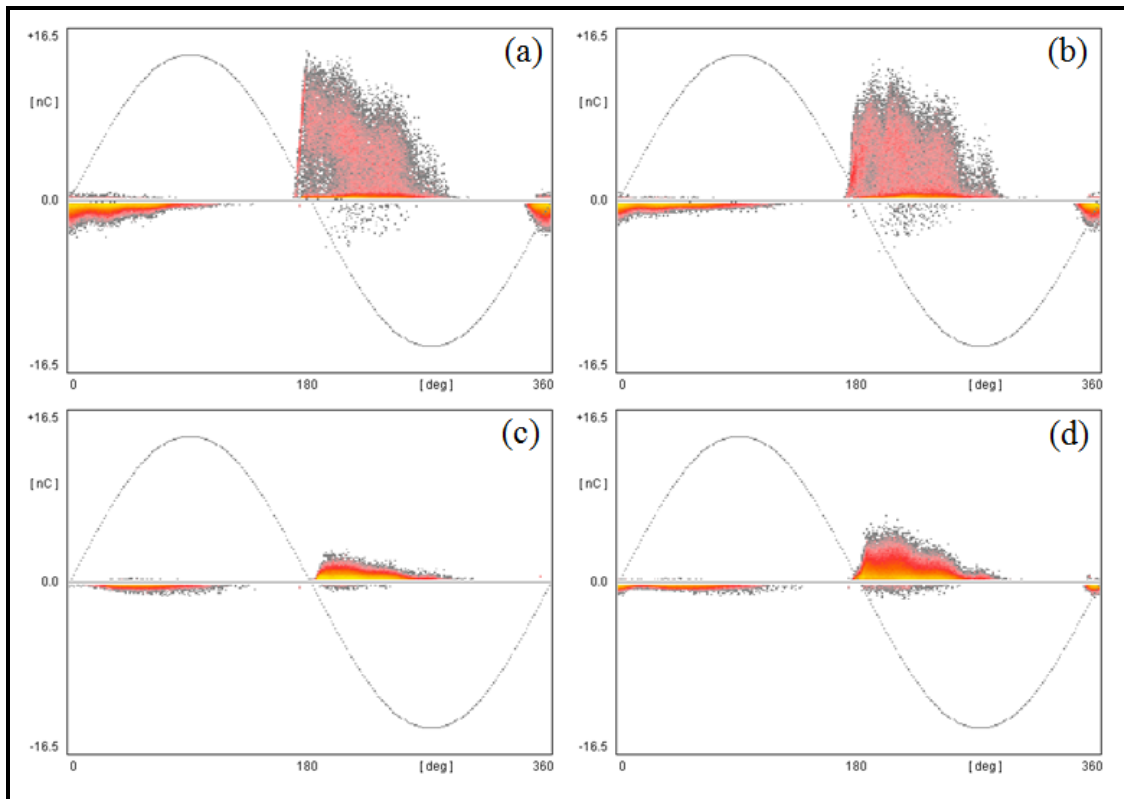


Figure 3.16 PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C on bar B during the aging sequence 3 at 13 g/m<sup>3</sup>, (a) measurement 2 at 0 h, (b) measurement 3 at 65 h, (c) measurement 7 at 165 h and (d) measurement 8 at 230 h

In addition to the measurement sequence of the time line in Figure 3.3, after each aging sequence (measurement 8), the PRPD pattern was measured under the three humidity conditions (5 g/m<sup>3</sup>, 9 g/m<sup>3</sup> and 13 g/m<sup>3</sup>) in order to determine the influence of humidity on the PD activity in each of the three states of surface degradation. Figure 3.17 shows the slot

PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C on bar B after aging sequence 2 under different humidity conditions. The first pattern (a) was the one recorded right at the end of the aging sequence 2 at 9 g/m<sup>3</sup>, then the humidity was raised at 13 g/m<sup>3</sup> (b) and reduced to 5 g/m<sup>3</sup> (c). To make sure that the change observed in the slot PRPD patterns in Figure 3.17 were caused only by humidity effects, after the measured at 5 g/m<sup>3</sup> (c) the humidity was raised once again, to 13 g/m<sup>3</sup> (d).

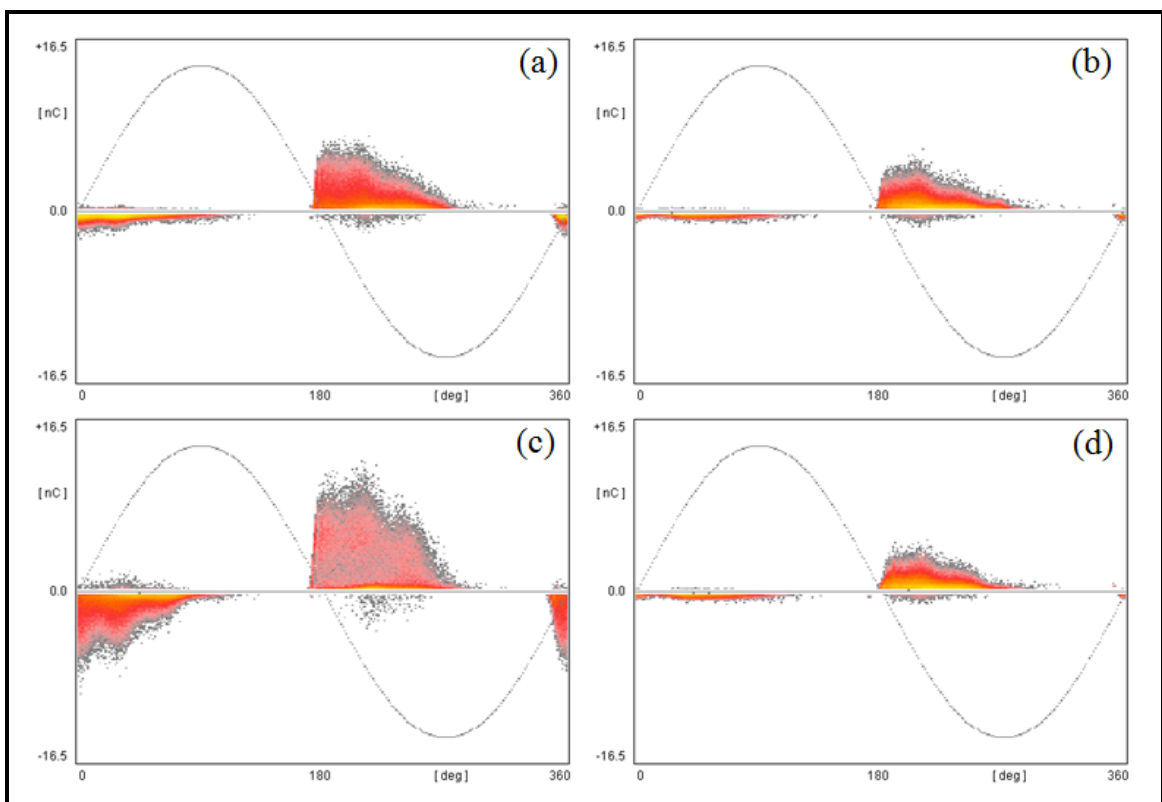


Figure 3.17 PRPD patterns measured at 8 kV and 85°C on bar B at the end of aging sequence 2, measurement 8, in all humidity conditions (a) 9 g/m<sup>3</sup>, (b) 13 g/m<sup>3</sup>, (c) 5 g/m<sup>3</sup> and (d) 13 g/m<sup>3</sup>

When the slot PD site is exposed to humidity above 9 g/m<sup>3</sup>, the PRPD pattern always assumes an asymmetrical shape typical for slot PDs, as is the case in Figure 3.16. The main difference observed between the patterns in Figure 3.17a and 3.17b is that the increase in humidity caused a reduction in the slot PD activity. However, under a drier condition such as in Figure 3.17c at 5 g/m<sup>3</sup>, the PRPD pattern became more symmetrical, particularly because

of the increase in intensity during the positive voltage half-cycle. This behavior is also observed in the patterns in Figure 3.15b and 3.15d. In Figure 3.17c, there were more negative discharge pulses ( $N^+ = 47158$  and  $N^- = 89847$ ) and the intensity was almost the same in both voltage polarities ( $NQS^+ = 4.54 \mu A$  and  $NQS^- = 4.24 \mu A$ ) clearly showing the impact of a dry condition on the slot PRPD pattern for a constant temperature and a given surface condition. To prove that this effect was caused only by humidity content, the humidity was raised from  $5 \text{ g/m}^3$  to  $13 \text{ g/m}^3$ , giving the PD activity illustrated in pattern (d). In this pattern, the slot PD activity decreased in both voltage polarities and came back to values very close to those measured just before, in Figure 3.17b, at the same humidity level. This humidity cycling procedure was done at the end of each aging sequence and showed that, regardless of the surface degradation from slot PD attack, different for each sequence, the effect of humidity change was always the same and reproduced the same PRPD pattern when the condition was cycled from one setting to the next and back.

### 3.5 Discussion

The asymmetry of the slot PRPD pattern has long been recognized (Farahani et al., 2005; Hudon et Belec, 2005; Sheehy, Blackburn et Rungis, 1996; Zondervan et al., 1998) but very little has been published on the change of this signature with degradation. In an effort to determine the role of degradation of slot PDs under different combinations of electrical, thermal and mechanical stresses and the ensuing PRPD pattern changes, a long-term aging experiment (Levesque et al., 2010) was initiated few years ago. The evolution of the pattern with degradation could not be explained entirely by the stresses themselves. Apparently, other contributions influenced the discharge mechanisms and, from observations made over the years, changes in humidity play a major role in the dynamics of slot PDs. The current secondary experiment was designed precisely to study the influence of humidity on slot PDs. Unfortunately, slot PD activity is even more complex than initially anticipated and is influenced by several factors such as the nature and condition of the gas between the stator core and insulation surface, the humidity, the temperature, the electric field and the surface condition. From the results presented above for different conditions of humidity, temperature



and state of degradation, we have tried to infer the influence of each of these parameters on the degradation mechanism of slot PDs. Analysis of the results was difficult because of the interdependence of each factor.

### 3.5.1 Slot PD process

Before discussing the surface condition, temperature and humidity results, it should be mentioned that the local electric field resulting from the phase-to-ground voltage and the field from space charges will drive the initiation and progression of the discharges in the gas. As a result, the local electric field will develop in a cavity of a few micrometers over an area of several square centimeters, typical of those where slot PDs occur, to become higher than the breakdown strength of air. In our experimental setup, the conductive steel plate simulating the stator core acted as the cathode during the voltage positive half-cycle and, upon the impact of positive ions, additional free electrons are supplied to sustain the PD activity. As a result, a complex set of reactions takes place at the metal/air interface in the cathode fall region. If the positive ions acquire sufficient energy to cross the potential barrier of the cathode fall and reach the steel surface, they will react with it, creating other ions and free electrons in a dynamic equilibrium, or they will simply recombine to become neutral (Vijh, 1986). In addition, ultraviolet (UV) radiation emitted from recombination and/or deexcitation of gas molecules will also produce new electrons by photoemission at the cathode steel surface and by photoionization in the air cavity volume (Bartnikas et McMahan, 1979). These free electrons together with the negative ions present in the cavity will be drawn by the electric field toward the insulation and will be trapped at its surface. A negative surface charge then builds up leading to a reduction of the local electric field and, as soon as it gets below the extinction field, the slot PD activity ends at this site. Since the surface conductivity of the insulation is low ( $\approx 10^{-16}$  S per square), surface charges will not spread over the insulation surface and other electronic avalanches will be initiated at other sites during this voltage half-cycle, depositing electrons and negative ions at multiple sites.

As the AC voltage decreases and inverts to the negative voltage half-cycle, the local electric field due to the phase-to-ground nominal voltage and the field induced by insulation surface charges will accumulate to become higher than the breakdown strength of air. Since in this half-cycle the insulation surface is now acting as the cathode, the large number of electrons deposited in shallow traps will be released and become available to initiate slot PDs at several sites. The slot PD activity will be further reinforced by photoionization in the air cavity volume. In this voltage polarity, the electrons and negative ions will be accelerated both by the perpendicular field toward the conductive steel plate and by the tangential field toward the edge of the bar's semi-conducting coating. As the electrons reach these surfaces, they will be drained to ground while the negative ions will react with the metallic surface to begin oxidizing it. On the other side of the cavity, the positive ions will strike the insulation surface inducing incremental degradation and depositing a positive surface charge, thus lowering the electric field and causing the extinction of the slot PD avalanche at this site.

### **3.5.2 Effects of surface condition**

The slot PRPD pattern illustrated in Figure 3.9 (left) was recorded under dry conditions at 28°C, after the first few minutes at 8 kV and before any surface degradation took place. The sharp increase at the onset in each half-cycle of this PRPD pattern is indicative of the rapid increase in the electric field, especially of its tangential component, which is much larger than the perpendicular one (Levesque et al., 2010), and of the availability of free electrons. What is unusual about this PRPD pattern compared to what is generally accepted is that it is fairly symmetrical and even slightly more intense during the positive voltage half-cycle, a result that is systematically reproducible. This contradicts the general knowledge that the metallic/insulator bounded gap would necessarily produce an asymmetric PRPD pattern. Apparently, this is not the case for undamaged surfaces, where the surface of the highly conductive steel plate supplies a large number of electrons in one voltage polarity, whereas in the other, electrons in shallow traps on the insulation are easily released. Thus, the initial discharge process appears to be driven by the availability of electrons and, as long as they are

plentiful in both half-cycles of the applied voltage and the conductivity of the insulation surface stays close to its initial value, the PRPD pattern will remain symmetrical.

After 18 h of conditioning at 8 kV, the change in the PRPD pattern illustrated in Figure 3.9 (right) is a behavior previously reported in (Hudon et Belec, 2005) and attributed in part to a conditioning of the surfaces bounding the cavity due to continuous PD activity. As the two PRPD patterns illustrated in Figure 3.9 have been measured and conditioned under the same dry condition (28°C and 5 g/m<sup>3</sup>), the change in pattern, namely the loss of symmetry, can be attributed to a rapid superficial degradation of both the metallic and the insulation surface.

It is generally recognized that PD activity in air (a mixture of O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>) induces the formation of reactive oxygenated species such as O<sub>3</sub> and NO<sub>x</sub>. These species and other ions impacting on the surfaces will degrade them, causing observable oxidation of the metallic surface. With time, these reactive oxygenated species will form a layer of oxide on the steel that will completely cover the surface of the plate (see the right-hand side of the three pictures in Figure 3.5 and 3.7). In these pictures, most of the changes in surface condition came from the continuous attack of slot PDs under the accelerated aging voltage at 16 kV, but surface conditioning already had influenced the PRPD pattern giving rise to a change in discharge pulses. The continuous oxidizing reaction leads to constant modifications of the oxide layer as the ionized air reacts like an electrolyte solution providing an easy path for ion transport responsible for oxidation and corrosion of the steel surface (Vijh, 1985). The oxide layer on the steel plate will grow non-uniformly and electron emission, which can depend on oxide composition, will still take place at asperities and protrusions but their number will fall dramatically. In addition, even though positive ions trapped on the oxide surface can cause an electric field high enough to initiate surface emission during the negative voltage half-cycle, these ions will capture part of the generated electrons. As the metallic surface oxidizes, it will become less conductive with a drop to as low as 10<sup>-8</sup> S per square, as reported in previous work (Levesque et al., 2010). This will significantly reduce the effectiveness of photoemissions at the metallic electrode during the positive voltage half-cycle.

Slot PDs during the positive half-cycle will originate more from the edge of the semi-conducting coating and develop along the insulation surface driven by the tangential field. With degradation time, the conductivity of the insulation surface increases because of negative ions reacting during the positive voltage half-cycle. It was reported earlier that the increase in the conductivity of the insulation surface can be as large as seven orders of magnitude and reach  $10^{-9}$  S per square for discharges occurring in both metallic and insulation gaps (Levesque et al., 2010) or insulation/insulation gaps (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1990). The increased conductivity will enhance the mobility of electrons deposited on the insulation surface which will then move more freely over a larger area of the insulation surface. Initially, the very low conductivity of the insulation surface rapidly reduces the local field as the electrons are deposited on the insulation at the base of the discharge channel. In other areas not affected by this surface charge, the local field will continue to grow as the phase-to-ground voltage increases; thus a large overvoltage will result in large-discharge pulses (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1993). With degradation and the increased conductivity of the insulation surface, electrons will not remain trapped at the base of the discharge channel but rather spread over larger area (Wu et al., 2005). Because of the spread of electrons, the local field in other locations will decrease compared to the condition of lower surface conductivity, and will thus generate smaller discharge pulses during the positive voltage half-cycle. This is consistent with the change observed in Figure 3.9.

The situation is quite different during the negative voltage half-cycle where the electrons that were trapped at the insulation surface from the several previous small discharges will be released to initiate slot PDs simultaneously at multiple sites over the entire insulation surface. Regardless of whether the steel plate is oxidized or not, the electrons will still be drawn by this anode and rapidly disappear into ground. In addition, since the local field induced by space charges on the insulation surface adds with the one of the phase-to-ground voltage, the pulse amplitudes will stay larger than during the positive voltage half-cycle, as illustrated in Figure 3.9 (right). The small decrease in amplitude was attributed to the presence of the negatively charged ions that can now be trapped on the oxide layer at the surface of the steel

plate. This space charge will cause a reduction in the electric field compared to the previous conditions when these ions reacted with the conductive surface to quickly be neutralized while oxidizing it. The transition from oxidation of the steel plate surface to ionic charge trapping is a gradual process evolving with exposure time and is not uniform over the entire area affected.

The condition of surfaces has a significant effect on the discharge formation and on the shape of the PRPD pattern as summarized in Figure 3.18.

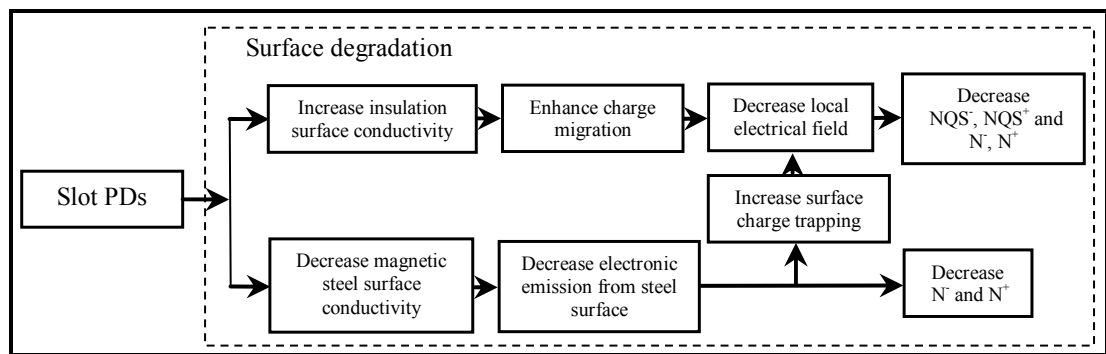


Figure 3.18 Summary of the cause and effect relationship of the influence of surface degradation on the slot PD activity

### 3.5.3 Effects of temperature

The temperature significantly affects slot PD activity. It was recognized in previous work that for a short exposure time to voltage, slot PDs increased with temperature (Farahani et al., 2005; van Breen et al., 2002). This behavior was explained by the increase in the electron's thermal energy, making ionization more effective and also providing a large number of initial electrons (van Breen et al., 2002) by photoemission. The decrease in air density also helps electrons to acquire enough energy to induce more ionizing collisions. Other known temperature effects are the reduction in ozone production when the temperature of the gas increases and increased nitrous oxide formation (Odic et al., 2006) also leading to surface degradation. Over time, thermal acceleration of surface degradation will increase the surface conductivity of the insulation and reduce that of the metallic ground, thus lowering the

availability of electrons and changing the distribution of the electric field inside the air cavity. This indicates that any long-term exposure to slot PDs will always include the effect of surface degradation and increase activity with temperature, and most of the time it will be very difficult to discriminate which one of the two affects more the change in the PRPD pattern.

In our controlled setup, the effect of temperature was one of the parameters we could isolate, as illustrated in Figure 3.10, where slot PRPD patterns were measured on bar B under the same humidity and surface conditions but at different temperatures, 28°C (left) and 85°C (right). This figure clearly shows that the intensity of slot PDs did in fact increase with temperature in both voltage polarities. In the case of the positive voltage polarity, the NQS and the number of negative discharges increased, whereas during the negative voltage polarity, the NQS increased but the number of positive discharges significantly decreased. There were fewer positive discharges of large amplitude, as revealed in the right pattern in Figure 3.10 compared to the left pattern. This phenomenon confirms previous work by Di Lorenzo and Schifani who studied the effect of temperature on PD aging of epoxy resin (Di Lorenzo del Casale et Schifani, 2000). They also observed that an increase in temperature leads to a smaller number of large-amplitude pulses. They attributed this behavior to the increased epoxy resin work function with temperature, which causes a reduction in the availability of electrons, becoming harder to extract from the insulation surface (Schifani, Candela et Romano, 2001). This effect would lead to a longer statistical time lag and give fewer and larger discharge pulses because of the larger gap overvoltage, as seen in Figure 3.10 (right) during the negative voltage half-cycle. In contrast, the temperature rise increased the thermal energy of the electrons on the conductive steel plate, making them easier to extract and leading to an increase in both NQS and the number of negative discharges during the positive voltage half-cycle, as seen in Figure 3.10 (right) while maintaining the amplitude of pulses lower than the positive ones because they occur at a lower overvoltage.

These results confirm the effect of temperature on the change in the slot PRPD pattern. The cause and effect relationship of the influence of temperature on slot PD activity is summarized in Figure 3.19.

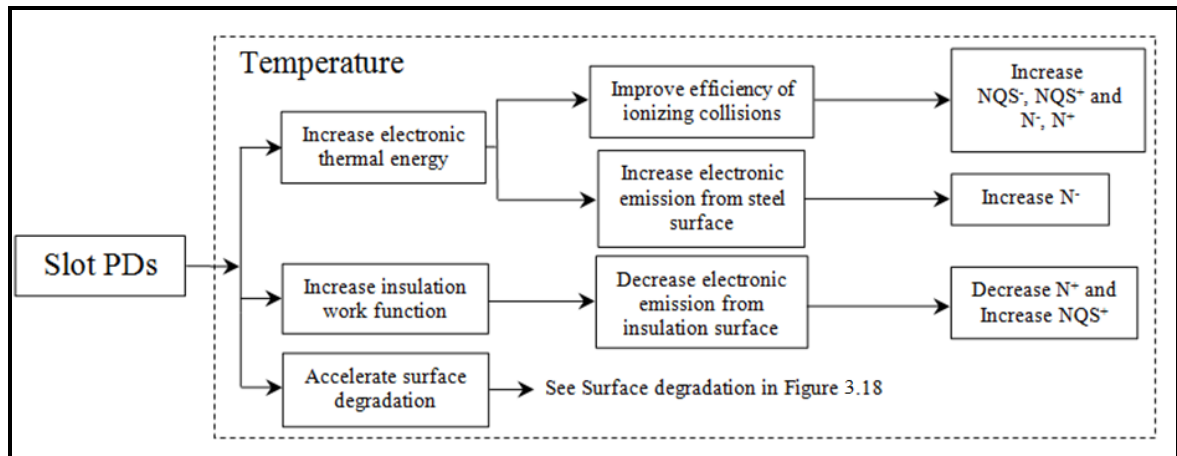


Figure 3.19 Summary of the cause and effect relationship of the influence of temperature on the slot PD activity

### 3.5.4 Effects of humidity

It has long been recognized that humidity has an influence on the PD process, mostly because of the electronegative nature of water vapor in air (Kuffel, 1959; Verhaart et Van der Laan, 1984). This is why a higher humidity leads to a reduction in the number of free electrons initiating and sustaining PD activity. Once water molecules capture electrons, they form stable ion clusters, consequently reducing the effectiveness of the electronic avalanche process. It can be found in the literature that it is very difficult to detach electrons from these clusters during molecular collisions (MacAlpine et Zhang, 2003; Messaoudi et al., 1996). In addition, the mobility of these large clusters of ions is reduced (Aints et al., 2008; Fujioka et al., 1983) thus inducing local variation of the electric field distribution inside the air cavity. Water molecules also absorb the irradiated photons and weaken photoionization in the air (Aints et al., 2008). All these humidity effects will cause a general decrease in the PD activity in air.

Lower PD activity in the presence of higher humidity does not necessarily translate into less surface damage, as reported by Hepburn et al. where they observed that degradation of epoxy resin subjected to PDs was more pronounced in humid air than in dry air (Hepburn et al., 2000). Other work has shown that water molecules in air, in the presence of discharges, reduce the production of ozone and favor the formation of nitrous oxides with its related acids ( $\text{HNO}_x$ ) (Chen et Wang, 2005; Peyrous, 1990). Humidity will also increase the formation of other reactive species such as hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) and hydroxyl radical ( $\bullet\text{OH}$ ). These oxidizing species trigger several complex reactions at the insulation surface, leading to irreversible modifications of the polymer chains. Work done on degradation products induced by PDs indicates that the presence of water molecules accelerates the formation of impurities such as nodules or crystals at the insulation surface (Foulon-Belkacemi et al., 1995; Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1995). In addition, water vapor in air deposited on the bare insulation surface may react with surface charges and facilitate their motion even when PDs are inactive. Degradation products resulting from PD activity together with the presence of humidity on the insulation surface enhance conductivity, which can cause a faster local charge decay of electrons diffusing over a larger area (Lutz et Kindersberger, 2009; Nawawi et al., 2006) and, as we saw, initiate a transition to smaller pulses.

The degradation of steel surface will also be accelerated in the presence of reactive oxygenated species due to discharge activity and water molecules. Goldman et al. have reported that the pitting corrosion of aluminum subjected to corona discharges was only seen in humid air because this process is produced in an aqueous layer formed at the surface of the metallic electrode where the oxidizing species are grouped (Goldman et Goldman, 1989). However, dry corrosion or oxidation of metallic surfaces in humid air (Bailon, 2000) can occur even in the absence of PD activity. Oxidation of the steel plate and the deposited iron oxide on the insulation for sequences 2 and 3 at  $28^\circ\text{C}$ , illustrated in Figure 3.5 (middle and bottom), confirms that chemical reactions continue to occur even if slot PDs are inactive during all aging at 16 kV. These reactions take place at a slower rate than when PD activity is present (see Figure 3.5 (top) for sequence 1) but are sufficient to change the surface



condition. In the case of steel, the presence of water molecules changes the composition of iron oxide products. This explains the difference between the grounded plate of bar A at 28°C (see Figure 3.5 (right)) and bar B at 85°C (see Figure 3.7 (right)) in the color and quantity of iron oxide formed. The presence of a higher temperature dried the surfaces and reduced the contribution of water molecules in the composition of iron oxide.

In the current study, the rapid decrease to a very low value of the NQS, for bar A at room temperature, after only 65 h under the higher humidity for sequences 2 and 3, without aging voltage and presented in Figure 3.11, confirms that the humidity alone leads to a substantial decrease of the slot PD activity even where a surface of bare insulation faces a grounded conductive steel plate and the bar is subjected to twice its nominal voltage. This behavior was also reported by Binder et al. for slot PDs measured in a laboratory setup at 8 kV and 40°C under different humidity levels (Binder et al., 1999). They observed that the activity of external PDs such as slot discharges decreases when the humidity in air increases and could disappear as the relative humidity goes beyond 50%. In our case, even if the slot PDs were still active on bar A until the end of aging sequence 1 (the driest condition), the intensity of the slot PDs soon decreased between measurements 2 and 3 when subjected to humidity alone for 65 h (see Figure 3.12a and 3.12b) and at the end of the sequence when the bar was once again exposed to humidity alone between measurements 7 and 8 (see Figure 3.12c and 3.12d). The reduction of PD activity with humidity is more pronounced at room temperature because of the lower thermal energy of electrons which allows water molecules to capture free electrons more easily.

At temperatures typical of operating conditions (85°C), the evolution of the NQS for bar B illustrated in Figure 3.14 clearly reveals a decrease in the intensity of slot PD activity as the humidity level increased. These results indicate that the effect of humidity in air is present even at higher temperature and influences the slot PD mechanism. This situation was seen not only in our laboratory experiment but also during online PD measurements of generators as Younsi et al. observed during seasonal changes in humidity. They reported that the PD amplitude on generators can change by as much as a factor of 100 (Younsi et al., 2001). This

is also supported by Kane et al. who observed a decrease in PD activity during continuous PD monitoring on air-cooled rotating machines as the humidity content in air increased (Kane et al., 2004). In our case, the influence of humidity is obvious when comparing the three curves in Figure 3.14, where the NQS is inversely proportional to humidity. However, the reduction in slot PD activity with time, noticed as soon as the aging voltage (16 kV) was switched on at 65 h, has to come from the degradation of surfaces because for any given sequence the impact of humidity stays constant over time.

The reactive effect of humidity on an insulation surface and on the steel plate was more significant at room temperature than at higher temperature, even if the intensity of PD activity was lower at 28°C. The marked asymmetry related to the low intensity of negative discharges during the positive voltage half-cycle observed in all PRPD patterns in Figure 3.12 is caused by the humidity on the insulation surface and the increased oxidation of the steel plate. Room temperature was not sufficient to dry the surface and the insulation superficially absorbed humidity until saturation was reached, enhancing the conductivity of the insulation surface and producing small-amplitude negative pulses. Moreover, the oxide layer at the surface of the steel plate reduced the availability of electrons which resulted in a reduction of the number of negative discharges. The presence of iron oxide powder on the insulation surface, illustrated in Figure 3.5 (top), contributed to the reduced PD intensity, as seen in Figure 3.6 (left). The shape of the positive discharges in the PRPD patterns as a function of the aging time became more rounded during the negative voltage half-cycle as illustrated in Figure 3.12c and 3.12d. These patterns could be mistaken for patterns of corona PD activity which occurs at the junction of the semi-conducting coating and stress control coating (Hudon, Belec et Levesque, 2008). However, caution is required because, when increasing the gain of the PRPD acquisition unit or using a different frequency range (see Figure 3.13), although attenuated, the shape was still triangular with a sharp increase at the onset of the pattern and typical of slot PDs. The attenuation in the shape of the PRPD patterns is believed to be caused by the iron oxide deposited at the junction of the semi-conducting coating and the insulation surface. The iron oxide powder can alter the tangential

component of the electric field in the cavity, which would reduce the sharp increase at the onset of the PRPD pattern.

At higher temperature, the only significant difference between PRPD patterns recorded on bar B during each aging sequence was that at lower humidity (sequence 1), the PRPD patterns became almost symmetric after subjecting the bar for 65 h to humidity and temperature. This feature was kept throughout the aging process, as illustrated in Figure 3.15b, 3.15c and 3.15d. The combined effect of higher temperature and lower humidity reduced the reactive effect of water molecules on the insulation surface and did not increase its surface conductivity, leading to the formation of larger-amplitude negative pulses during the positive half-cycle. Since the surface conductivity was lower and the surface charge did not spread as much over the surface, the discharge channel tended to be more restricted. This was confirmed by the UV picture illustrated in Figure 3.8 (left) where the slot PD activity was not uniform over the entire insulation surface and was more intense in localized spots. The oxidation of the steel surface at lower humidity (see Figure 3.7 (top)) level was also less extensive, resulting in easier electron emissions due to photoemission. On the contrary, at higher humidity levels, the temperature was not sufficient to completely dry the insulation surface so the humidity started to affect local charge migration on the surface, resulting in a lower negative discharge intensity, as illustrated in the four PRPD patterns in Figure 3.16 for aging sequence 3. This gave more widespread discharges uniformly distributed over the entire insulation surface, as revealed by the UV pictures taken after sequences 2 and 3 in Figure 3.8 (middle and right).

One strange behavior observed on bar B for all three sequences and not seen at lower temperatures on bar A was the increase of NQS at the end of the sequences from 165 to 230 h. During this period, the voltage had been turned off so there were no PDs and the humidity was kept constant. Under the driest condition (sequence 1), the increase of the NQS was symmetric in both voltage half-cycle (see Figure 3.15d) and at higher humidity, the increase of the NQS was noticed only for the positive discharges during the negative voltage half-cycle (see Figure 3.16d), which suggests that the influence of humidity was still present.

The change in the NQS must thus come from an interaction with the surface that was not present or dominant during the previous period when there were slot PDs and the NQS continued to decrease. We believe that the increase of NQS was caused by the recombination of surface charges. This relaxation mechanism was more pronounced at higher temperatures because of the increase in the thermal energy of the charges, thus enhancing their motion. The consequent reduction in surface charges increased the local electric field distribution in the air cavity when the voltage was applied at 230 h, causing discharges to occur under higher overvoltage.

When we tried to isolate the effect of humidity on the slot PD activity, at the end of each sequence, it was seen that the pattern changes were predictable and reproducible. For instance, the four PRPD patterns in Figure 3.17a, 3.17b, 3.17c and 3.17d measured at the end of sequence 2 on bar B for a constant temperature and a given surface condition in different humidity levels clearly indicate that as the humidity increased from  $9 \text{ g/m}^3$  (see Figure 3.17a) to  $13 \text{ g/m}^3$  (see Figure 3.17b) the intensity of the slot PD activity decreased due to the combined effects of the electronegativity of water molecules in air and the increase in the insulation surface conductivity with humidity. The opposite behavior occurred when the humidity was reduced from  $13 \text{ g/m}^3$  to  $5 \text{ g/m}^3$  (Figure 3.17b to 3.17c). It can be seen in the pattern in Figure 3.17c that there was in fact an increase in PD intensity in both voltage polarities, as explained by the larger amount of free electrons. In addition, at this higher temperature and low humidity ( $5 \text{ g/m}^3$ ), the insulation surface could dry enough to lower the insulation surface conductivity and lead to a transition from small to larger and more localized negative amplitude pulses. At the end of the cycle when the humidity was increased back from  $5 \text{ g/m}^3$  to  $13 \text{ g/m}^3$  (Figure 3.17c to 3.17d), the decrease in intensity of the PD activity to the same level as before and with a pattern almost identical to the one in Figure 3.17b at the same setting clearly confirms the effect of humidity on slot PDs.

The changes of humidity are an important parameter in the evolution of slot PD activity, even at temperatures typical of operating conditions. In the presence of humidity, the slot discharge mechanism is affected and surface degradation is accelerated. A summary of the

cause and effect relationship of the impact of humidity on slot PD activity is presented in Figure 3.20.

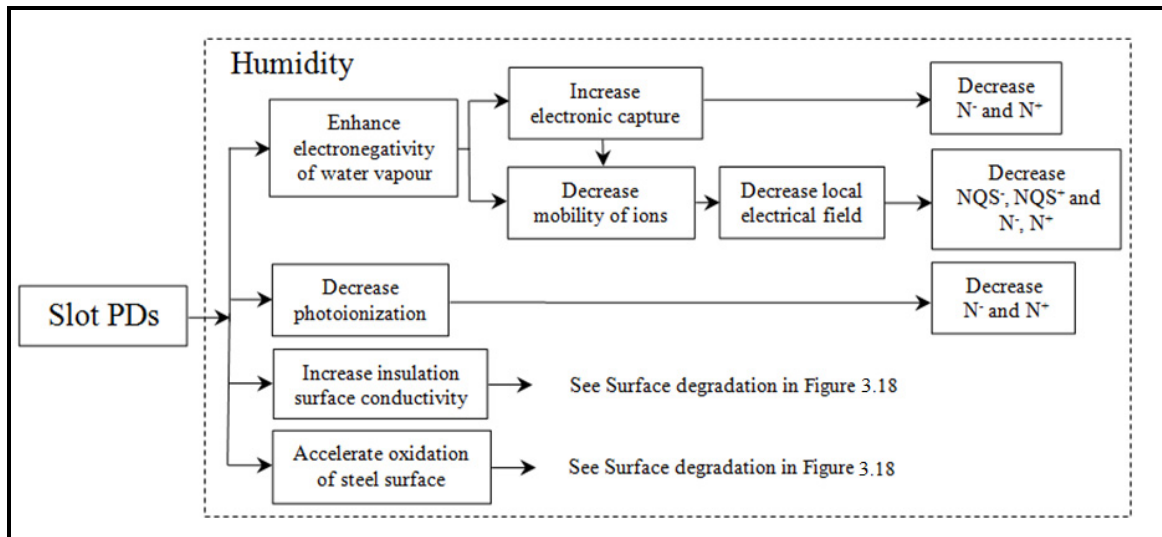


Figure 3.20 Summary of the cause and effect relationship of the influence of humidity on the slot PD activity

To the author's knowledge, this is the first time that the influence of humidity on slot PDs has been studied in different stages of degradation and at different temperatures. The results presented above have the advantage of being obtained under a limited set of well controlled laboratory conditions. However, even though we have tried to reflect as much as possible realistic operating conditions, clearly not all possible stress combinations occurring on actual generators could be covered and the variations in shapes of the PRPD pattern could be even greater than what we presented here. Interpretation of PD measurements in real life will be even more complex because any combination of surface degradation, humidity and temperature can exist. In some cases, the opposite effect could manifest at the same time: increase of the NQS with temperature and decrease of NQS with surface degradation. It is therefore very difficult to know at any given time what is causing a change in slot PRPD patterns on actual machines. As we have seen, in some cases where humidity was high and temperature low (see sequences 2 and 3 of bar A), there could even be a complete extinction of slot PDs even when bare insulation surface is facing a grounded steel plate and the bar is at twice its nominal voltage. Although the characteristic triangular shape of larger PDs during

the negative voltage half-cycle can still be attributed with confidence to slot PDs, we have just seen that in other instances the PRPD pattern can change substantially and even show symmetrical or inverse symmetrical features. Caution should therefore be used with automatic recognition of slot PDs. Moreover, from previous observations, it can be said that estimation of the severity of slot PDs with degradation is not straightforward but, hopefully, the cause and effect relationship presented in this paper will help to improve our understanding of how slot PRPD patterns change in actual machines.

### **3.6 Conclusion**

A laboratory experiment was conducted on stator bars subjected to slot PDs under controlled humidity and temperature conditions in order to evaluate the relative contribution of these parameters to the degradation mechanism. It revealed that surface degradation, temperature and humidity in air considerably affect the evolution of the slot PD activity and are usually interrelated. The effect on the recorded PRPD patterns explains why generator diagnosis still requires the judgment of specialists.

However, some of the observations presented here may be used to facilitate understanding. For instance, it was observed that superficial modifications of the surfaces produced rapid changes in the PRPD pattern, even after short-term conditioning. The increase in the insulation surface conductivity and the formation of an oxidation layer at the steel surface directly affects the PD process by inducing a transition to smaller negative discharge pulses and by reducing the availability of electrons. In addition, it was confirmed that the temperature is a major factor leading to changes in the PRPD pattern of slot discharges. The temperature increase leads to a general increase in the slot PD activity. However, temperature also increases the insulation work function, which reduces the availability of electrons and results in a lower number of large-amplitude pulses during the negative voltage half-cycle. Because temperature also increases surface degradation, both of these parameters must be evaluated together in the analysis of ensuing change in the PRPD pattern. Finally, humidity in air causes a general decrease in the slot PD activity mostly because of the electronegativity

of water molecules, which capture electrons and thus reduce their availability. This influence was also observed at temperatures typical of generator operating conditions. The presence of humidity accelerated the oxidation of the steel surface, which also reduces the availability of electrons and enhances the conductivity of the insulation surface, causing a transition to smaller discharge pulses. One other factor that now needs to be studied more closely is the impact of all of these changes on the perpendicular and tangential electric field developed in the air cavity.





## CHAPITRE 4

### EFFECT OF SURFACE CONDITION ON THE ELECTRIC FIELD IN AIR CAVITIES

Mélanie Lévesque, Éric David  
École de technologie supérieure, ÉTS  
1100 rue Notre-Dame Ouest, Montréal  
Québec, H3C 1K3, Canada

and Claude Hudon, Mario Bélec  
Institut de recherche d'Hydro-Québec IREQ,  
1800 boul. Lionel Boulet, Varennes,  
Québec, J3X 1S1, Canada

#### 4.1 Abstract

A numerical PD model was developed to obtain more insight into the understanding of the evolution of slot Partial Discharge (PD) activity. This model, in which multiple PD channels were simultaneously active, was used to evaluate the influence of the surface condition on the electric field distribution inside an air cavity typical of the one where slot PDs occur. It was observed that the insulation degradation induced by slot PD activity increases its surface conductivity, which in turn modifies the dynamic of the surface charges deposited by previous PDs and directly affects the electric field and the slot PD behavior itself. The experimental results of surface conductivity measurements and observations of physical changes in surface conditions obtained from previous laboratory experiments were used to feed the PD model. This paper reports the result of the electric field calculation in the presence of PD activity under different surface conditions.

Index Terms — Slot partial discharges, insulation, electric field calculation, modeling, surface degradation.

## 4.2 Introduction

Partial discharge (PD) activity is always present in the stator winding insulation of air-cooled generators. During operation, it is normal to detect internal PDs that occur in voids within the groundwall insulation, but in some machines other PD sources, such as delamination PDs in voids between the copper conductors and the insulation surface, corona discharges in the air at the junction between the semi-conducting and the stress control coating, bar-to-bar or gap PDs in the air in the end winding area, surface tracking when conductive contamination is deposited on the surface of bars, and slot PDs in cavities formed between the surface of bars and the magnetic iron core (Hudon et Belec, 2005). Each of these PD sources reveals different degradation mechanisms and represents a different threat to the winding insulation and the generator operation. The recognition of each of these sources is possible when PD measurements are carried out using the phase resolved partial discharge (PRPD) pattern. The detected PRPD pattern is typical for each PD source, as it mainly depends on the configuration of the PD site, i.e. on the electric field distribution and the availability of free electrons, but also on other parameters such as the nature of the gas and the state of surface degradation of the PD sites, as well as the different operating stresses (electrical, thermal, mechanical and environmental). In order to successfully diagnose the integrity of the stator winding insulation, which is recognized as being the weakest part of the generator (CIGRÉ, 2003), it is necessary to understand the effect of each parameter that has an influence on the different PD sources and consequently on their typical PRPD pattern.

Laboratory aging experiments are a useful approach for studying each parameter independently under controlled conditions. However, experimental results should be complemented by on-line and off-line PD measurements performed on actual generators to be sure that laboratory studies are coherent with reality and to aid in interpreting laboratory data. To improve our understanding of slot PD activity, which is recognized as being very harmful to the stator winding insulation (Jackson et Wilson, 1982; Johnson, 1951b; Johnson et Mead, 1951), an extensive study was initiated in 2007. The initial strategy of that study was to implement two laboratory aging tests of stator bars subjected to slot PDs and aged

under different stress conditions. The first experiment was conducted on six spare stator bars divided into three groups of two and subjected to slot PDs under electrical stress alone (group 1), electrical and thermal stresses (group 2) and finally electrical, thermal and mechanical stresses (group 3) (Levesque et al., 2010). Three slot PD sites were induced by abrading away three identical sections of the semi-conducting coating on each bar, giving a total of six PD sites per group of bars. The main contribution of this experiment was the evaluation of the relative risk of each stress combination to the groundwall insulation in the presence of slot PD activity during long-term aging. The differences in the insulation degradation rate were assessed based on the correlation observed in the changes in the slot PRPD patterns and in the surface conductivity measurements, as well as in the recorded visual observations of surface damage. The results confirmed that degradation mechanisms depended on the type of stress present as a function of aging time, and also significantly depended on the ambient humidity in the laboratory. Because of this unexpected strong influence of ambient conditions, another laboratory experiment was initiated to assess the influence of humidity on the evolution of slot PD activity (Levesque et al., 2012). This second experiment was conducted on two stator bars subjected to slot PDs at two different temperatures and placed in a climatic chamber under constant humidity. PD measurements as well as visual observations were made throughout a short-term aging process in order to characterize the evolution of the slot PD activity.

Experimental data resulting from these two laboratory aging experiments were subsequently used to develop a theoretical explanation of the evolution of slot PDs. This result analysis was a complex task, because the different stress conditions affected the slot PD activity in different ways and were generally interrelated. The changes in the surface condition significantly affected the electric field developed inside the air cavity and the availability of electrons to start and sustain the PD activity. The results revealed that the well-recognized asymmetric PRPD pattern typical of slot PD activity change is dependent upon the surface conditions and could even show symmetrical features. To validate these results and improve our understanding of the evolution of slot PD activity, the next step of this study was to develop a numerical PD model replicating the change in a surface's condition in order to

evaluate its influence on the electric field distribution within the air cavity where slot PDs take place.

Partial discharge modeling is often used to gain additional insight into complex PD process. Numerical models based on the physical mechanism of discharge behavior are generally used to validate experimental assumptions by combining empirical data with simulation results. Over the past few years, several attempts have been made to develop a theoretical model and explain the specific aspect of this process. For example, a streamer-type PD model that included several of the details of discharge mechanisms was presented and used to compare the experimental results of PD activity in spherical voids with simulation results (Gutfleisch et Niemeyer, 1995; Niemeyer, 1995). Based on that work, another model of PD activity within spherical voids was adapted to evaluate the experimental results of the PD process at higher temperature (Schifani, Candela et Romano, 2001). More generalized models have also been built based on a stochastic approach to reproduce the PRPD pattern of internal discharges in voids, corona discharges with a needle in air, and surface discharge in oil (Heitz, 1999). More recently, a PD model of cavities within insulation material was further developed to study the influence of the frequency of the voltage applied to the model on PD behavior (Cavallini et Montanari, 2006; Forssen et Edin, 2008b; Illias, Chen et Lewin, 2009). All of these studies have helped to improve the general understanding of PD behavior by evaluating different parameters and establishing basic mechanisms. However, some parameters, such as the influence of the surface condition and the dynamics of charges deposited on insulation surfaces on the local electric field distribution in the case of slot PD activity are still not well understood and need to be assessed. Such a study should help to explain how slot PRPD patterns change with degradation.

This paper presents the results of a numerical PD model that uses the finite element method (FEM) to calculate the electric field distribution in a large air gap typical of the ones where slot PDs occur. This model was designed to take into account the dynamics of the charges deposited on the insulation surface in the presence of multiple localized PD channels simultaneously active in the cavity, but each with its own initiation time. The experimental

results of surface conductivity measurements as well as observations of the physical changes of surfaces were used as input parameters to the model.

### 4.3 Slot PD model

The PD model was defined using a two dimensional (2D) geometry of an air cavity bound between an insulation surface on one side and the magnetic iron core on the other. Multiple localized PD channels were allowed to take place as illustrated in Figure 4.1. This model does not use continuity equations for the motion of free electrons, positive and negative ions, as was the case in another study (Novak et Bartnikas, 2000) but mainly focuses on the effect of surface charges deposited on the insulation surface on the local electric field distribution inside the air cavity. The model was developed using the finite element method (FEM) to perform electric field calculation with a Matlab® programming code.

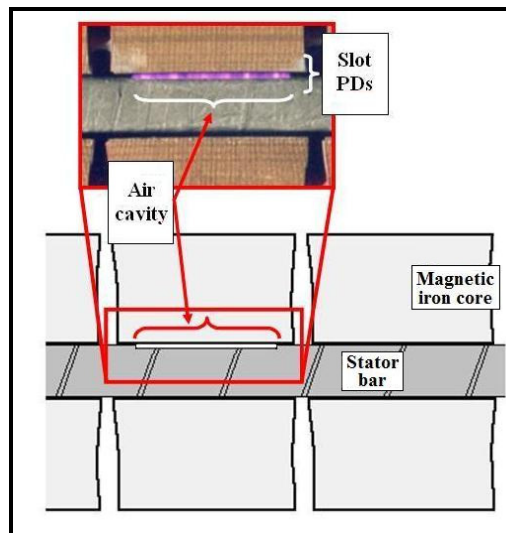


Figure 4.1 Slot PD activity in an air cavity between the insulation surface and the magnetic core

The overall dimension of the modeled air cavity was much smaller than the actual one induced on stator bars in both previous laboratory experiments (Levesque et al., 2010; 2012) in order to keep calculation time reasonable. Figure 4.2 (top) a view of the surface of a stator

bar where the location and dimensions of the modeled air gap were superimposed on one of the actual slot PD gaps induced by abrading away a section of the semi-conducting coating (note that dimensions are not to scale). The 2D geometry considered here for electric field calculation is constituted by an insulating material with the electrical properties of epoxy-mica in series with an air cavity, as depicted in Figure 4.2 (bottom).

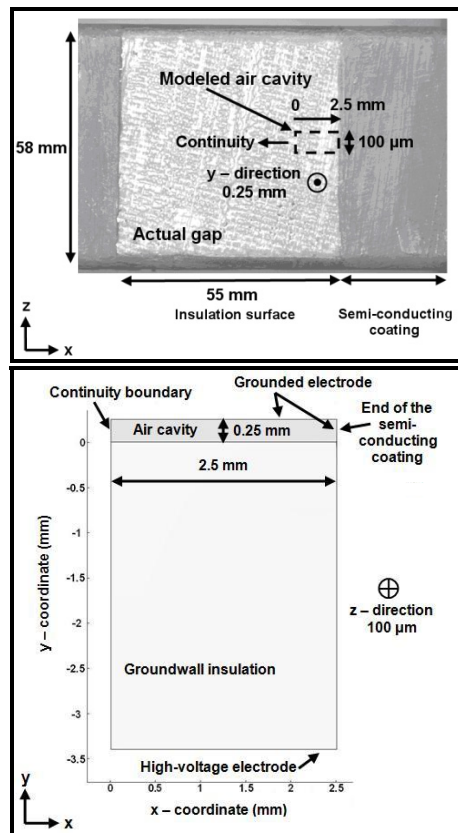


Figure 4.2 The surface of a stator bar with a slot PD site (top) and the 2D geometry used in the PD model (bottom)

The dimensions and properties of the material used are summarized in Table 4.1. The thickness of the epoxy-mica insulating material was set to the same value as that of the groundwall insulation of the stator bars used in both previous laboratory experiments, and the air cavity value was set by the measured thickness of the semi-conducting coating applied on the bars, as it was only this coating that was abraded away to form the air gap. An alternating

voltage of 8 kV rms at 60 Hz, which is the nominal phase-to-ground voltage, was imposed in the model between the high-voltage electrode (copper conductors) and the grounded electrode (magnetic iron core and semi-conducting coating).

Table 4.1 Dimensions and electrical properties of the model

Model	Dimensions			Relative permittivity $\epsilon_r$	Volume conductivity (S/m)
	Thickness (mm) y - coordinate	Width (mm) x - coordinate	Depth ( $\mu\text{m}$ ) z - coordinate		
Air cavity	0.25	2.5	100	1	0
Groundwall insulation	3.4	2.5	100	4	$1 \times 10^{-16}$

The electric field distribution in the modeled gap was numerically calculated using the FEM, which solved the electrostatic partial differential equations. The time-dependent variable solved for each time step was the electric potential  $V$  defined by the following equation in the absence of space charges:

$$-\bar{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \bar{\nabla} V) = 0 \quad (4.1)$$

and by the Poisson's equation in presence of charges:

$$\bar{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \bar{\nabla} V) = -\rho \quad (4.2)$$

where  $\epsilon_0$  is the vacuum permittivity and  $\epsilon_r$  is the relative permittivity of the insulating material and  $\rho$  is the volume charge density in  $\text{C/m}^3$ . At the dielectric-air interface the electrostatic boundary conditions express as a function of the free charges are given by:

$$\bar{n} \cdot [(\epsilon_0 \epsilon_r \bar{\nabla} V)_+ - (\epsilon_0 \epsilon_r \bar{\nabla} V)_-] = -\sigma \quad (4.3)$$

where the subscripts + and – refer to the limits of  $V$  on each side of the interface,  $\vec{n}$  is a unit normal vector directed away from the - side and  $\sigma$  is the free surface charge density in  $C/m^2$ . The electric field  $\vec{E}$  is calculated from the electric potential using the following equation:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (4.4)$$

In order to have PD inception inside the air cavity, two conditions must be satisfied. First, the electric field must exceed a critical value given by the breakdown strength of air, and second, an initial electron must be available to begin the ionization process. The critical value of the electric field at which PD activity is initiated,  $E_{inc}$ , depends on many parameters such as the geometry of the cavity, the nature of the gas within the cavity, pressure, temperature and humidity. In the case of streamer-type PD inside a spherical void for a non-attaching gas such as air (Crichton, Karlsson et Pedersen, 1989), the critical value is given by:

$$E_{inc} = \left(\frac{E}{P}\right)_{cr} P \left(1 + \frac{B}{\sqrt{2rP}}\right) \quad (4.5)$$

where  $(E/P)_{cr}$  and  $B$  are constant characteristic of the gas which are for air  $24.2 \text{ V}/(\text{Pa}\cdot\text{m})$  and  $8.6 (\text{Pa}\cdot\text{m})^{1/2}$ , respectively,  $P$  is the pressure inside the cavity and  $r$  is the radius of the cavity. This equation was used in several studies to calculate the inception field in a spherical void inside an insulating material (Cavallini et Montanari, 2006; Gutfleisch et Niemeyer, 1995; Illias, Chen et Lewin, 2009; Schifani, Candela et Romano, 2001). Even if the geometry in the current model was not a spherical void, this equation was used to obtain a suitable approximation of the PD inception field with the radius of the modeled cavity defined by the width in Table 4.1.

In addition, the presence of free electrons inside the air cavity is required to begin the avalanche process. These electrons are generated by volume ionization and surface emission. The electron generation rate (EGR) was modeled using the Richardson-Schottky formula for thermionic emission (Niemeyer, 1995). During the positive voltage half-cycle, when the



conductive magnetic iron core is acting as the cathode and so supplying free electrons, the EGR,  $\dot{N}_{es\_cond}$  is calculated using the following equation:

$$\dot{N}_{es\_cond} = \left(\frac{A}{e}\right) C_{th} T^2 e^{-\left(\frac{\left(\varphi - \left(\sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}\right)\right)}{kT}\right)} \quad (4.6)$$

where  $A$  is the area of the conductive surface,  $e$  is the electronic charge,  $C_{th}$  is an universal constant,  $k$  is the Boltzmann's constant and  $T$  is the temperature (all calculations were performed at room temperature). The work function  $\varphi$  characterizes the potential barrier for emission of electrons and the Schottky term  $\left(\sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}\right)$  is the lowering of that potential barrier due to the presence of an electric field  $E$ .

During the negative voltage half-cycle, the insulation surface acts as the cathode and supplies electrons. The EGR due to the insulation surface  $\dot{N}_{es\_ins}$  is calculated by:

$$\dot{N}_{es\_ins} = \left(\frac{q}{e}\right) \cdot \nu_0 e^{-\left(\frac{\left(\varphi - \left(\sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}\right)\right)}{kT}\right)} \quad (4.7)$$

where  $q$  is the deposited charges on the insulation surface due to previous PD activity and  $\nu_0$  is the fundamental phonon frequency which is  $\approx 10^{14}$  Hz (Gutfleisch et Niemeyer, 1995). The average electron emission delay  $\tau_{es}$  is given by the following equation for both conductive and insulating surface:

$$\tau_{es} = \frac{1}{\dot{N}_{es}} \quad (4.8)$$

The probability of occurrence of a PD is calculated using the average emission delay  $\tau_{es}$  as the time constant in a classical Poisson's distribution given by:

$$PD_{occ} = 1 - e^{-\left(\frac{dt}{\tau_{es}}\right)} \quad (4.9)$$

where  $dt$  is the time interval between two successive PDs. When the electric field in the middle of the cavity is higher than the PD inception field, the probability of occurrence is calculated and compared with a random number generated between 0 and 1. A discharge event occurs only if the value of  $PD_{occ}$  is greater than the random number. This technique was used earlier (Forssen et Edin, 2008b; Illias, Chen et Lewin, 2009) to introduce the effect of the statistical time lag in the model. The statistical time lag is defined by the time delay after the inception field has been reached and before the occurrence of a PD event.

Inside the modeled air cavity, multiple PD channels (which can be active simultaneously) are allowed, each having a constant width of 100  $\mu\text{m}$ . The width of the PD channel was set to the same value as the radius of rapid microdischarges occurring on a dielectric barrier system (Wertheimer, Radu et Bartnikas, 2005). In this model, only the PD activity developed across the volume of the air cavity (in the  $y$ -coordinate) was considered. The discharge process was simulated by a sudden drop of the local electric field associated with the release of a charge distribution on the insulation surface. The depth of the geometry in the  $z$ -direction, normal to the plane in the bottom part of Figure 4.2 has been set at 100  $\mu\text{m}$  so that a PD event releases a surface charge that distributes over a 100  $\mu\text{m}^2$  square. Figure 4.3 illustrates a positive charge density deposited on the insulation surface due to a single PD that occurred in the center of the modeled gap.

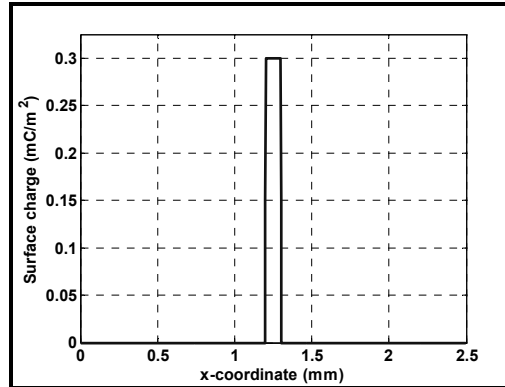


Figure 4.3 Surface charge density deposited on the insulation surface due to a single PD channel occurrence

The electrical field in the direction of vector  $\vec{n}$  (y-coordinate) at a distance  $b$  from the center of a square of side  $2a$  having a surface charge density  $\sigma$  deposited on a dielectric interface is given by:

$$E_y = \frac{\sigma}{\pi \epsilon_{\text{eff}} \epsilon_0} F(a, b) \quad (4.10)$$

$\epsilon_{\text{eff}}$  is the average permittivity of the two dielectric media on each side of the interface (see (Somerville et Vidaud, 1985) and (Griffiths, 1999) for the detailed calculation of the electrical potential produced by a charge located at the interface between two infinite plane of dielectric media).  $F(a, b)$  is a function solely dependent on the geometric parameters  $a$  and  $b$  and is defined by the following equation:

$$F(a, b) = ab \int_0^a \frac{dx}{(b^2 + x^2) \sqrt{b^2 + x^2 + a^2}} \quad (4.11)$$

At each site, the magnitude of the deposited surface charge density due to a PD event was proportional to the difference between the electric field magnitude before the PD event, which is above the inception field, and the residual field after the PD extinction. The value of

the field at the moment of the initiation of a PD event depends on the statistical time lag. The surface charge density calculated using Equation 4.10 was used in the model as the starting value of an iterative function to determine the real surface charge magnitude deposited on the insulation surface due to a PD event. The function iterates until the value of the residual field range is between 0.25 kV/mm and 0.75 kV/mm. This iterative function was implemented because Equation 10 was defined without considering the effect of the induced charges on the grounded electrode and did not take into account the effect of multiple PD sites that could simultaneously deposit a surface charge on the insulation surface. Each site has its own initiation time, but is influenced by other discharge sites as a function of their proximity and surface conductivity.

The charges deposited on the insulation surface produce an alteration of the electric field distribution within the cavity that decays with time. Depending on the condition of the surface, the charge decay mechanisms, which are due to surface conduction along the insulation surface, recombination and diffusion into the bulk material, reduce the electric field contribution from these charges. The dynamic of charges deposited on the insulation surface was numerically calculated using the following equation:

$$\sigma(x_i, t_j) = \frac{dt \cdot \gamma}{2 \cdot \Delta x} \left[ E_x(x_{i-1}, t_{j-1}) - E_x(x_{i+1}, t_{j-1}) \right] + \sigma(x_i, t_{j-1}) \quad (4.12)$$

where  $\sigma(x_i, t_j)$  is the magnitude of the surface charge in C/m<sup>2</sup> at the  $i^{\text{th}}$  position along the horizontal mesh (x-coordinate) and for the  $j^{\text{th}}$  time iteration,  $\gamma$  in S per square is the surface conductivity,  $\Delta x$  is the mesh dimension and  $E_x$  is the tangential electric field developed along the insulation surface due to these deposited charges. It should be pointed out that charge motion is only allowed along the x-coordinate in the 2D model. Inside the air cavity, the mesh consists of a uniform quadrilateral distribution where each element has a side of 5  $\mu\text{m}$ . The simulation was performed for 10 cycles of the applied voltage and the time stepping was set at 50  $\mu\text{s}$  in order to have a good compromise between simulation time and precision in the calculation of the electric potential and surface charge variation.

## 4.4 Results and discussion

### 4.4.1 Electric field distribution

The magnitude of the electric field at the insulation surface for an electric potential of 8 kV rms applied between the high voltage electrode and the grounded electrode, in the absence of space charges, is illustrated in Figure 4.4 (left). This field distribution is composed of two components. The first one is a high field region tangential to the insulation surface (in the x-coordinate) which is developed close to the end of the semi-conducting coating, at the edge of the modeled air cavity. The high magnitude of this tangential component mainly depends on the edge of the semi-conducting coating and is responsible for the inception of surface discharges between the insulation and the semi-conducting coating (Jackson et Wilson, 1982). This PD activity causes the erosion of the semi-conducting coating which increases the area of bare insulation. Degradation of the semi-conducting coating, which appears as a lateral progression of white surfaces, alters the tangential field component which in turn affects the surface discharge activity itself. This high tangential field component rapidly decreases in the direction of the origin of the modeled air cavity (in the x-coordinate, 0 mm) where the second component of the field dominates, as illustrated in Figure 4.4 (left). This other component is perpendicular to the insulation surface (y-coordinate) and is developed across the air cavity. When moving away from the end of the semi-conducting coating, the magnitude of this perpendicular component increases to reach a maximum value close to the origin of the modeled air cavity in the x-coordinate. In this model, only PD activity developed in the volume of the air cavity due to the perpendicular component of the electric field is considered.

Across the cavity, the tangential component reduces with distance from the insulation surface, and at 0.125 mm in the y-coordinate direction, the field is dominated by the perpendicular component as illustrated in Figure 4.4 (right). The magnitude of the electric field in the middle of the cavity also increases toward the origin of the modeled air cavity (0 mm in the x-coordinate) to reach the same value (9.94 kV/mm) as at the insulation surface at

the same x-coordinate in Figure 4.4 (left). This figure illustrates that the electric field distribution inside the modeled air cavity for that particular geometry becomes higher than the PD inception field, calculated using Equation 4.5 at a value of 3.4 kV/mm, and, if the conditions are fulfilled, discharges initiate in the volume of the air cavity between the insulation surface and the grounded magnetic iron core surface.

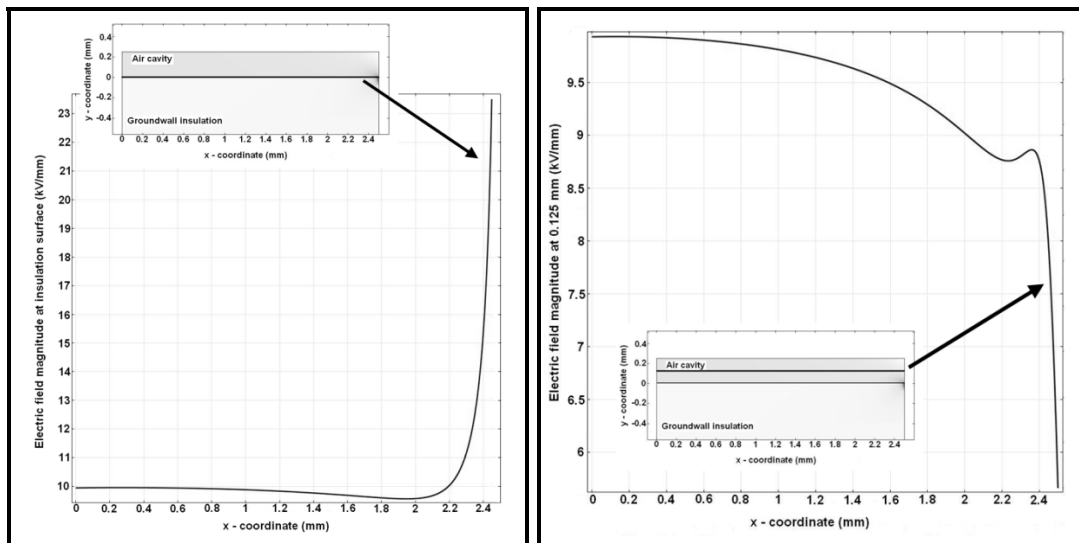


Figure 4.4 The magnitude of the electric field for an applied electric potential of 8 kV, at the insulation surface (left) and in the middle of the modeled air cavity (right)

The electric field as a function of time at each discharge site is dependent on its own PD activity, on the discharge activity of the other discharge sites, and on the presence of free electrons. Figure 4.5 illustrates the electric field as a function of time between 40 ms and 80 ms at one specific PD site within the modeled air cavity with two different availabilities of electrons. In the presence of PD events, the electric field distribution within the air cavity is the sum of the electric field due to the applied voltage between the copper conductor and the grounded electrode and the field due to surface charges generated by each PD event. This electric field is significantly affected by the availability of electrons to initiate PD events. When the emission of electrons is high, as illustrated in Figure 4.5 (left), each PD event takes place soon after the inception field is reached, resulting in a larger number of small amplitude PD events as shown in the bottom part of Figure 4.5 (left). Although the number of PD

events at the considered site is five, the other electric field drops at this site in Figure 4.5 (left) were due to the PD events occurring at other sites within the modeled air cavity. Their influence on the electric field at this site was mainly dependent on their proximity to the site. In contradistinction, when the availability of electrons is low, PD events reduce in number and occur at a higher electric field as illustrated in Figure 4.5 (right). The number of PD events in this case is therefore decreased to two, and with fewer PD events at other sites the electric field undergoes less distortion.

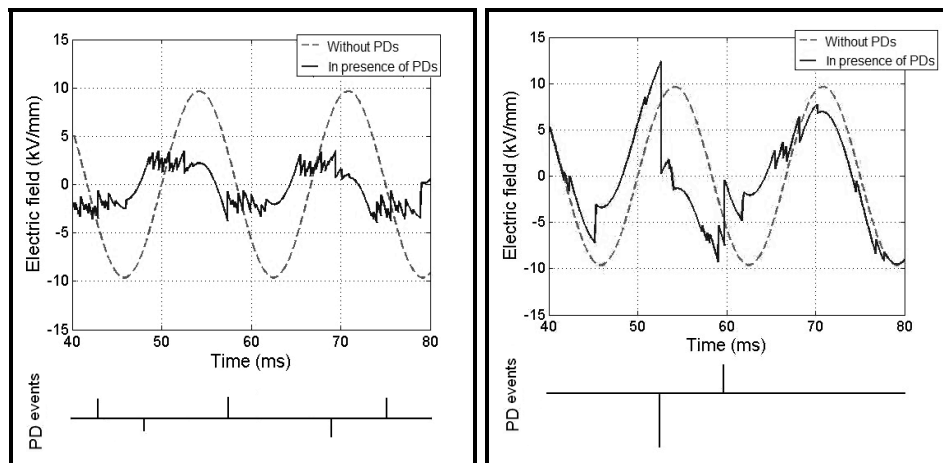


Figure 4.5 The electric field and PD events at one site in the modeled air cavity when the availability of electrons is high (left) and low (right)

#### 4.4.2 Effects of surface condition

Slot PD activity in air induces considerable modifications on the surfaces due to the formation of highly reactive species, in addition to thermal degradation and electro-erosion which cause the oxidation and molecular decomposition of surfaces. As surfaces change there will be significant effects on the formation and evolution of PD activity. The availability of free electrons is directly affected by the surface condition, as the work function of a surface changes with surface modifications. The value of the work function is thus critical in the EGR calculation because a small variation of the work function leads to a significant change in the production of electrons.

Figure 4.6 illustrates the distribution of PD events as a function of the voltage phase angle with different work function values of the conductive and insulating surfaces calculated over 10 cycles. The absolute charge amplitude (pC) of each PD event was calculated from the deposited surface charge density determined using Equation 4.10 and is dependent on geometrical parameters of the modeled air cavity as well as on the defined PD channel. These values are significantly smaller than what is usually measured on actual stator bar where slot PD activity is active and mainly depends on the hypothesis of the model. The calculated amplitude should only be used to compare the relative effect of different surface conditions. Before performing calculation, a sensitivity study was done in order to choose adequate values of the work function for both conductive and insulation surfaces. In all three distributions illustrated in Figure 4.6, the PD events in both voltage half-cycles began before the zero crossing because of the contribution of the electrical field due to the charges deposited on the insulation surface. Large-amplitude PD events took place in both polarities of the applied voltage as illustrated in Figure 4.6 (top) when the work function value of the conductive surface was at 1.55 eV and the value of the insulating surface was 1.3 eV. In that case, the distribution in amplitude and number of the negative PD events during the positive voltage half-cycle was almost symmetric to the distribution of the positive PD events occurring during the negative voltage half-cycle. A transition from these large-amplitude PD events to a higher number of small-amplitude events during the positive voltage half-cycle was observed in Figure 4.6 (middle) when the work function value of the conductive surface was reduced from 1.55 eV to 1.45 eV (making it easier to extract electrons) while that of the insulating surface was kept constant at 1.3 eV. The same transition occurred during the negative voltage half-cycle when the work function of the insulating surface was decreased from 1.3 eV to 1.2 eV and the work function of the conductive surface was kept constant at 1.45 eV, as indicated in Figure 4.6 (bottom).



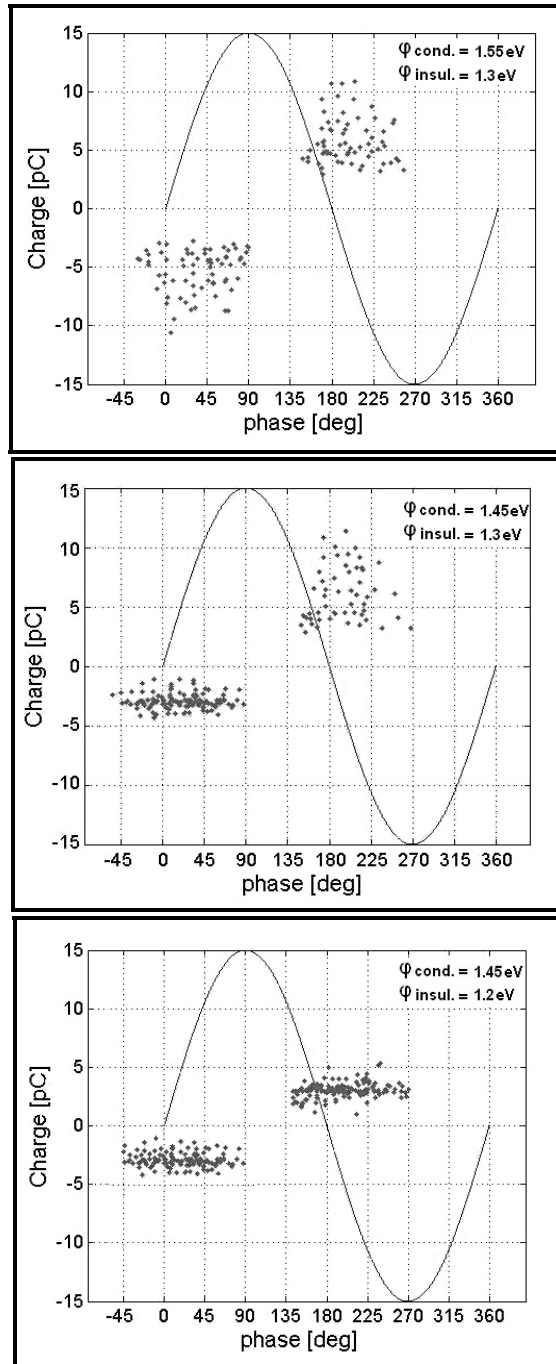


Figure 4.6 Distribution of PD events as a function of the applied voltage phase with  $\varphi_{\text{cond}} = 1.55\text{ eV}$  and  $\varphi_{\text{insul}} = 1.3\text{ eV}$  (top),  $\varphi_{\text{cond}} = 1.45\text{ eV}$  and  $\varphi_{\text{insul}} = 1.3\text{ eV}$  (middle) and  $\varphi_{\text{cond}} = 1.45\text{ eV}$  and  $\varphi_{\text{insul}} = 1.2\text{ eV}$  (bottom)

This last distribution is reminiscent of what has been observed, in the past, to be caused by gap-type discharges. For a generator, this often occurs in the end winding area and sometimes between the side of a bar and the pressure finger. Our model indicates that in order to have horizontal clouds forming in the PRPD patterns, the work functions of both surfaces must be low. However, this transition from the condition in Figure 4.6 (middle) to Figure 4.6 (bottom) seldom occurs for slot PDs and was not previously observed during laboratory aging tests (Levesque et al., 2010; 2012). This suggests that for slot PDs, the reduction of the work function would be more pronounced for the conductive surface than for the insulating one.

In the case of a pure clean steel surface, the work function value is very high, and a considerable electric field is required to lower the barrier of the steel surface and extract free electrons. In general, because a metallic surface always contains microscopic impurities such as roughness and protrusions where the electric field can concentrate, electron emission takes place more easily than for a perfect surface. The impacts of positive ions on the conductive surface as well as photoemissions contribute to facilitate the generation of free electrons from a metallic surface. Electronic extraction and ionic reactions with the surface cause observable oxidation. In addition, the presence of humidity in air, in opposition to its electronegative nature, accelerates oxidation reactions at the conductive surface which tends to increase the availability of electrons. Moreover, the oxide layer grows non-uniformly on the steel surface which contributes to enhance electron emission, but in a confined area where the electric field is concentrated. Figure 4.7 illustrates surface deposits on the insulation surface and on the grounded electrode of one PD site of a bar from a previous laboratory experiment (Levesque et al., 2010), aged under electrical stress alone at twice the nominal voltage. The oxidation pattern of the steel surface is reflected on the insulation surface and was caused by slot PD activity restricted to areas as a function of the non-uniform electronic emissions of the steel surface.

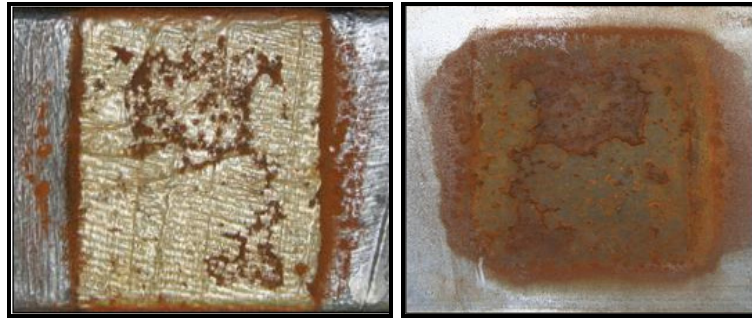


Figure 4.7 Surface deposits on the insulation surface and on the grounded electrode of one PD site

Before the oxidation takes place, the work function of the conductive steel surface is larger and electron generation at that surface is low. In this case, PD activity is initiated under a higher electric field, resulting in large amplitude events during the positive voltage half-cycle as illustrated in Figure 4.6 (top). The rapid formation of the oxide layer on the steel surface due to the continuous PD attack reduces its work function value and induces an increase of electron emission. This surface degradation results in a transition from a lower number of large-amplitude PD events to a higher number of small-amplitude events for the positive voltage polarity as shown in Figure 4.6 (middle). This transition toward smaller amplitudes of the positive PD events is in good agreement with previously reported experimental results (Levesque et al., 2012). Initially, when the insulation surface revealed no sign of damage and the grounded steel was clean and very conductive, the slot PRPD pattern showed intensive PD activity with an almost symmetrical triangular shape in both polarities of the applied voltage. Subsequently, as superficial surface degradation of the grounded steel surface began, the slot PRPD pattern changed to become asymmetric with large positive discharges during the negative voltage half-cycle, but reduced PD amplitudes in the positive half-cycle. This transition from an almost symmetric PRPD pattern to an asymmetric one in favor of positive PD pulses, which is often considered characteristic for slot PDs, was previously attributed to the fact that the presence of positive ions captured electrons at the surface of the oxide layer and reduced the electric field within the air gap (Levesque et al., 2012). However, although the presence of charges trapped at the surface of the oxide layer was not considered in this model, the results obtained in Figure 4.6 (top) and (bottom) suggest that the contribution of the increased availability of electrons due to the continuous oxidizing reactions at the steel

surface is probably the most significant factor explaining the transition from large-amplitude PD pulses to smaller amplitude pulses during the positive voltage half-cycle and in the consequent asymmetry of the slot PRPD pattern.

The work function of the insulating surface is also dependent on its condition. PD activity induces overtime degradation of the insulation surface which increases its conductivity. Charges deposited on the surface will become more mobile and recombine more easily or go into deeper traps where they are more difficult to extract. The presence of electronegative molecules on the insulation surface contributes to electron capture, resulting in a reduction of the emission of free electrons. In the degradation process, oxidizing species can form new reaction products on the insulation surface where the electric field can be concentrated, leading to an increase in electron generation. As was the case for the conductive surface, both of those effects can coexist dynamically, but one of the two should dictate the discharge process. This study showed that reduction of the work function value of the insulating surface from 1.3 eV to 1.2 eV contributed to reduce the amplitude and increase the number of PD events during the negative voltage half-cycle, as was observed by comparing the distribution of PD events in Figure 4.6 in middle and of those in the bottom part of the figure.

In addition to the effect on electron generation, insulation surface conductivity also influences the PD activity by affecting the electric field at sites in the vicinity of deposited surface charges. Insulation surface conductivity was found to be  $10^{-16}$  S per square in the previous laboratory experiment before any aging took place (Levesque et al., 2010). Overtime, experimental results showed value of the surface conductivity as high as  $10^{-9}$  S per square (Levesque et al., 2010) but in this model, to avoid divergence of the electric field calculation, the insulation surface conductivity was limited to  $10^{-12}$  S per square. The change in surface conductivity of the grounded steel electrode was not considered in this model but will be added in a future improvement. Figure 4.8 illustrates the influence of the initial insulation surface conductivity as a function of time on the dynamics of a surface charge density of  $300 \mu\text{C}/\text{m}^2$  deposited on the insulation surface in the middle of the modeled cavity at 1.25 mm in the x-coordinate. Without degradation, surface charges stay trapped at the base

of the PD channel as seen in Figure 4.8. The electric field induced by these charges stayed almost the same and did not decay as a function of time.

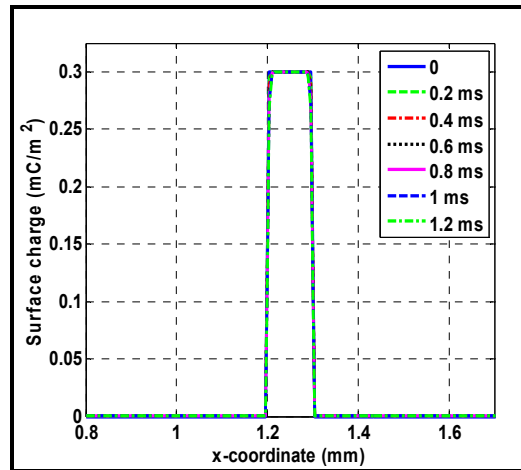


Figure 4.8 Surface charges for insulation surface conductivity of  $10^{-16}$  S per square

With time, under the continuous action of PDs the conductivity of the insulation surface increases with surface degradation. This also increases the charge mobility and influences the electric field close to sites and thus the initiation of subsequent PD event. Figure 4.9 illustrates the surface charge dynamic for the same density as used in Figure 4.8, but for a surface conductivity of  $10^{-12}$  S per square. The increase of insulation surface conductivity affected the calculated PD process by enhancing the mobility of surface charges, which in this case did not remain trapped at the base of the discharge channel but rather spread over a larger area on the insulation surface as a function of time, as can be seen in Figure 4.9.

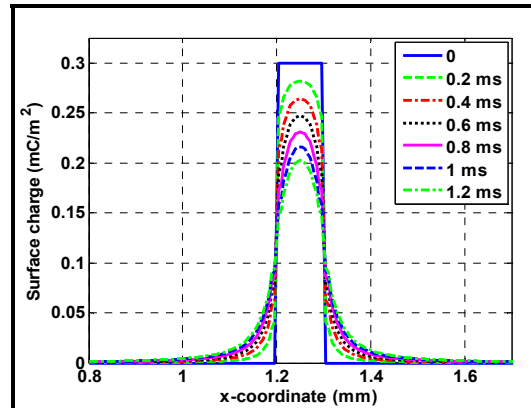


Figure 4.9 Surface charges decay for insulation surface conductivity of  $10^{-12}$  S per square

The dispersion of charges directly affects the magnitude of the electric field induced by these charges. After 1 ms, the electric field developed at the insulation surface shown in Figure 4.10 (top) due to the surface charges in Figure 4.9 decreased by 25% of its initial magnitude but laterally increased over the insulation surface. This mechanism affects subsequent PD events at the PD sites, and also on each side at sites adjacent to the discharge channel. The change of the electric field distribution in the middle of the cavity at 0.125 mm in the y-coordinate due to charge motion is shown in Figure 4.10 (bottom) 1.2 ms after a discharge occurred in the center of the modeled cavity. It is obvious that the amplitude of the electrical field in the middle of the cavity was less affected than the field at the insulation surface, but after 1 ms it did decrease, by 10% of its initial magnitude. However, the spatial effect on the field in the middle of the cavity was spread over a larger area.

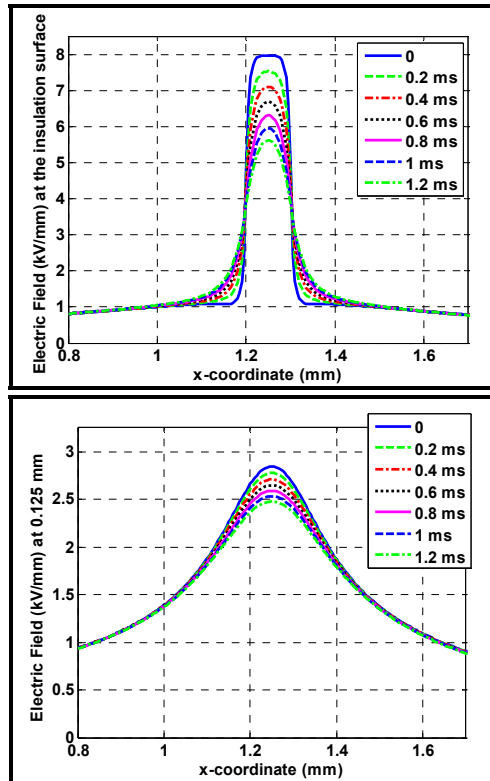


Figure 4.10 The influence of the insulation surface conductivity at  $10^{-12}$  S per square on the electric field magnitude at the insulation surface (top) and in the middle of the cavity at 0.125 mm (bottom)

Figure 4.11 two distributions of PD events as a function of the voltage phase angle calculated over 10 consecutive cycles with two different insulation surface conductivity values while keeping the work function value constant for both surfaces (1.5 eV for the conductive surface and 1.3 eV for the insulating surface). In both voltage half-cycles, the distribution of PD events was influenced by the change in insulation surface conductivity. A phase shift to the right was observed for positive PD events when the insulation surface conductivity was increased to  $10^{-12}$  S per square in Figure 4.11 (bottom). The number of negative PD events stayed almost the same but their amplitude decreased slightly, while the number of positive PD events decreased by 10 % and their amplitude increased somewhat with an increase of the insulation surface conductivity.

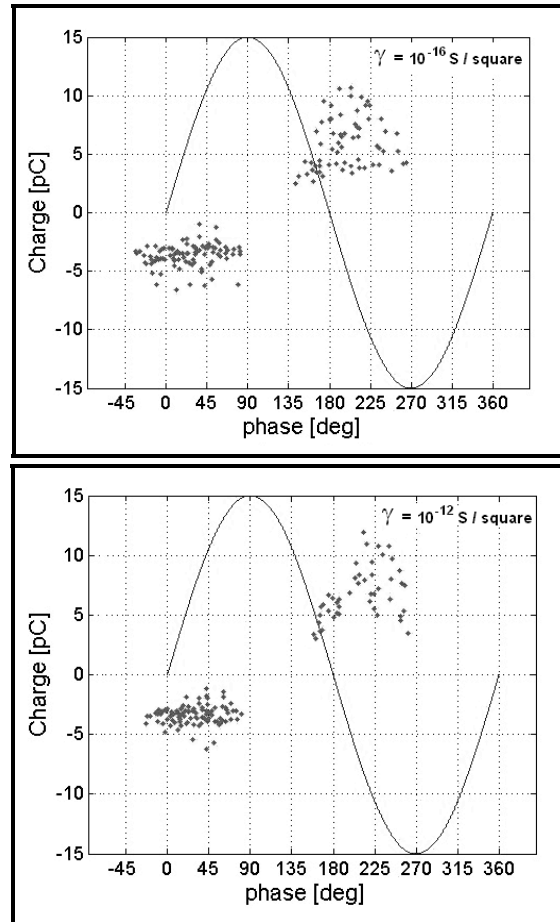


Figure 4.11 Distribution of PD events as a function of the applied voltage phase with  $\phi_{\text{cond}} = 1.5 \text{ eV}$ ,  $\phi_{\text{insul}} = 1.3 \text{ eV}$  and  $\gamma = 10^{-16} \text{ S per square}$  (top);  $\gamma = 10^{-12} \text{ S per square}$  (bottom)

The surface conductivity influences the dynamic of PD events by affecting the electric field distribution as a function of time. An increase of insulation surface conductivity produces a reduction, as a function of time, of the electric field due to charges deposited on the insulation surface immediately after the occurrence of a PD event (see Figure 4.10). The phase shift to the right observed in the distribution of PD events in Figure 4.11 (bottom) is caused by the reduction of the field due to these charges. When the electric field decreases with time, to the point of changing polarity, the continuous decay and migration of charges on the insulation surface reduces the field produced by them so much that after some time the electric field distribution within the air cavity is only caused by the applied voltage between



the copper conductor and the grounded electrode. In addition, charge decay mechanisms caused by the increase of the insulation surface conductivity contribute to decrease the availability of electrons during the negative voltage half-cycle. The reduced presence of electrons causes a decrease in the number of positive PD events as well as an increase in their amplitude during the negative voltage half-cycle, as shown in Figure 4.11 (bottom).

These results suggest that the degradation of an insulation surface can produce two opposite effects. A diminution of its work function value due to the formation of degradation products on the insulation surface tends to increase electron emission leading to an increase in the number of small amplitude PD events. At the same time, surface degradation induces an increase of the insulation surface conductivity and produced fewer PD events of larger amplitude. Observations of the experimental results reported in (Levesque et al., 2010; 2012) showed that degradation caused a transition of positive PD to smaller discharge pulses during the negative voltage half-cycle, revealing that the change in surface conductivity of the insulation has more effect on the PD mechanism than the change in the work function. This change was modeled here using a FEM, but it has been observed to cause a transition from pulse to pulseless PD type (Hudon, Bartnikas et Wertheimer, 1993). Although our model also predicts a transition of positive PD to a lower magnitude PD, it cannot consider the physics of the PD pulse required to explain a transition to pulseless discharges. This transition is much more complex than what has been included in our model, where all PD channels have the same constant width of 100  $\mu\text{m}$  and each PD event was considered as instantaneous, simulated by a sudden drop of the electric field. The results presented here indicate that the change of positive PD activity can depend on several parameters, and although the model can be used for sensitivity analysis of each parameter and the resulting effect on the PRPD pattern, some sets of variables may not represent actual discharge conditions. Therefore, the modeled PD behavior must be compared with experimental results. It is obvious that the current model cannot answer all questions but did make it possible to study the contributions of work function and insulation surface conductivity independently, two factors resulting from PD degradation. This kind of insight would be impossible without a model. Further refinement of the PD model combined with laboratory experiments under controlled

conditions is still underway and will likely continue to improve our understanding of the exact contribution of each parameter that affects the evolution of slot PD activity.

#### **4.5 Conclusion**

A PD model was developed to evaluate the effect of surface conditions on the electric field distribution within an air cavity where slot PD activity takes place. This model, in which multiple PD sites could be simultaneously active, was used to validate experimental results obtained from previous laboratory aging tests.

The electric field distribution within the cavity was found to be significantly affected by the availability of electrons that control the initiation of PD activity. It was observed that the condition of surfaces influences the production of electrons and lead to changes in PD patterns characteristic of what has been observed experimentally. Oxidation of the steel surface due to the continuous action of PD increases the availability of electrons during the positive voltage half-cycle and induces transitions from a small-number of large amplitude PD events to an increased number of smaller ones. This mechanism is responsible for the typical asymmetry observed in the slot PRPD pattern, but requires oxidation to be present. The situation was found to be more complex when the condition of the insulation surface changed. Degradation of the insulation surface altered the availability of electrons, which affects the amplitude and number of PD events but at the same time increases the conductivity of this surface which also influences the amplitude and number of PD events in an opposite relationship.

## CHAPITRE 5

### RÉSULTATS SUPPLÉMENTAIRES

Ce chapitre présente des résultats supplémentaires obtenus de la première expérimentation décrite dans l'article 1 au chapitre 2 (Levesque et al., 2010). Ces résultats ont été obtenus des inspections visuelles ainsi que des dissections des sites de DP d'encoche, des mesures de DP, de la réponse diélectrique de la partie droite de chacune des barres et de l'essai de rupture diélectrique. Ce chapitre apporte des précisions supplémentaires quant à la compréhension du vieillissement de l'isolation de masse en présence de DP d'encoche sous différentes contraintes.

#### 5.1 L'inspection visuelle des sites de DP d'encoche

Après 25000 h de vieillissement, la dégradation de la surface isolante des barres du groupe 1 soumises à une contrainte électrique seule, à la température ambiante, était superficielle. Le revêtement semi-conducteur n'a pas été considérablement endommagé et de l'oxyde de fer sous une forme poudreuse s'est déposé au cours du vieillissement sur la surface de chacun des sites de DP d'encoche. De plus, des analyses effectuées à l'aide d'un microscope sur des tranches prises sur les sites de DP d'encoche de la barre 1B n'ont pas révélé de modifications du volume de l'isolation. La Figure 5.1 illustre, à gauche, le volume de l'isolation observé sur la partie droite au centre d'un site de DP d'encoche de la barre 1B et, à droite, un des quatre coins observé sur le même échantillon. D'une façon générale, l'échantillon observé sur la Figure 5.1 ainsi que tous les échantillons observés sur la barre 1B n'ont pas présenté de signes de vieillissement, ni de cavités importantes ou de traces d'activité de DP internes et ceci, autant dans le volume de la partie droite que dans tous les coins des échantillons. Par contre, dans le cas de la barre 1A, tous les échantillons observés au microscope ont révélé la présence d'importantes cavités localisées dans les coins de la barre. La Figure 5.2 illustre deux coins observés d'un échantillon prélevé lors de la coupe d'un site de DP d'encoche de la barre 1A. Les cavités sont formées entre les couches de ruban et alignées directement dans le coin de la barre. De plus, les couches d'isolation ont une couleur différente près des cavités

ce qui laisse croire à une augmentation de la température en raison de la présence d'activité de DP internes.

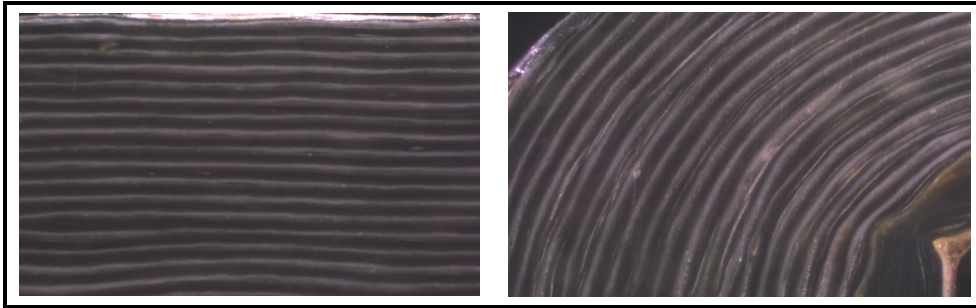


Figure 5.1 L'état du volume de l'isolation de masse observé au centre de la partie droite (à gauche) et dans un coin (à droite) sur un site de DP d'encoche de la barre 1B

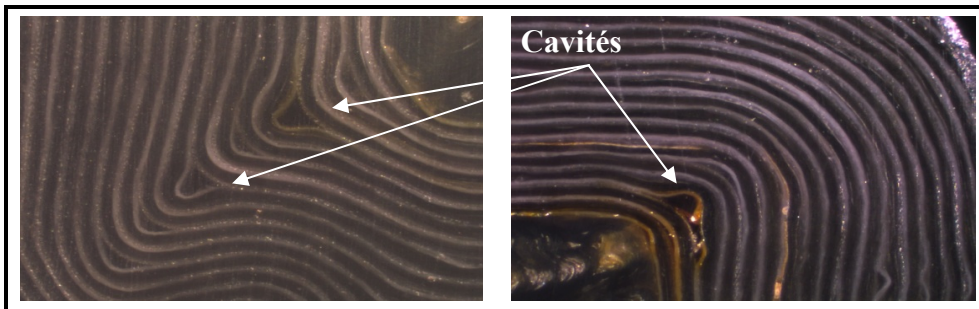


Figure 5.2 L'état du volume de l'isolation de masse observé dans deux coins différents d'un échantillon relevé sur un site de DP d'encoche de la barre 1A.

La rupture diélectrique de la barre 1A est survenue d'une manière inattendue après 24700 h de vieillissement. Il a été intéressant de constater que le claquage était localisé non pas à un des trois sites de DP d'encoche, mais sur un coin de la partie droite près d'une développante, tel qu'illustré à la Figure 5.3 à gauche. L'arborescence électrique s'est propagée entre les couches de ruban de l'isolation de masse et la distance entre le point extérieur sur le revêtement semi-conducteur mis à la terre, illustré sur la Figure 5.3, à gauche, et le point intérieur situé sur le brin de cuivre au coin de la barre, sur la Figure 5.3, à droite, est d'environ 30 mm. L'observation des échantillons représentés à la Figure 5.4 dans le volume de l'isolation au coin entre les points de rupture à l'intérieur et à l'extérieur indique la

présence d'importantes cavités décolorées. L'arborescence a longé le semi-conducteur interne jusqu'au brin de cuivre le plus près, à partir de la cavité située dans le coin intérieur du volume de l'isolation telle qu'illustrée sur la Figure 5.4, à droite.

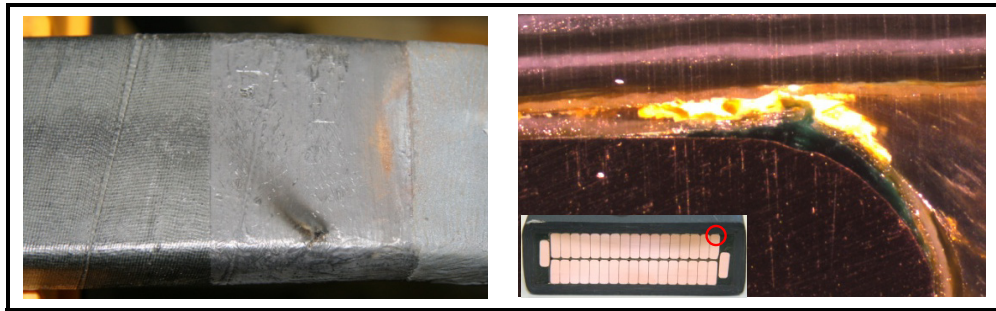


Figure 5.3 Le début et la fin de l'arborescence électrique formée sur la barre 1A après 24700 h de vieillissement à l'extérieur de la barre (à gauche) et sur le coin du brin de cuivre (à droite)

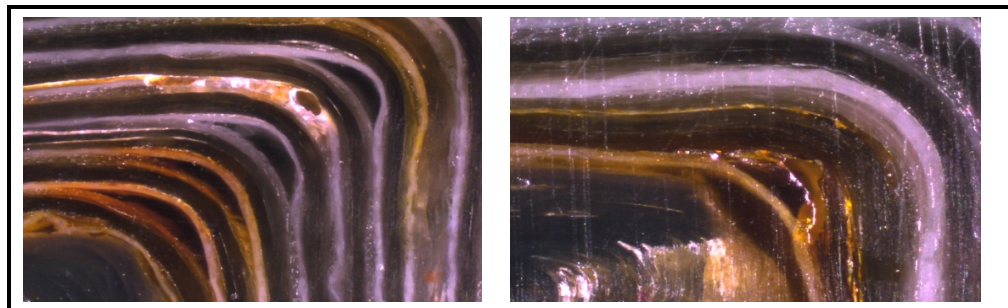


Figure 5.4 L'état du volume de l'isolation de masse observé dans deux coins situés près du site de la rupture diélectrique de la barre 1A.

La Figure 5.5 représente l'évolution des mesures de DP effectuées périodiquement sur les barres du groupe 1 avec un coupleur capacitif à 8 kV, à la température ambiante, jusqu'à 17100 h de vieillissement. Les signatures PRPD de la barre 1A ont indiqué une activité de DP majoritairement de type interne et plus importante que celle mesurée sur la barre 1B. L'évolution de l'activité de DP de la barre 1A illustrée à la Figure 5.5, sur la courbe en rose, a présenté des variations importantes durant le vieillissement qui ont possiblement été occasionnées par la contribution des dépôts d'oxyde sur la surface isolante à l'activité de DP d'encoche. Cependant, aucune augmentation significative de l'activité de DP n'a été

observée sur la barre 1A après 17100h de vieillissement, laissant présager une rupture diélectrique.

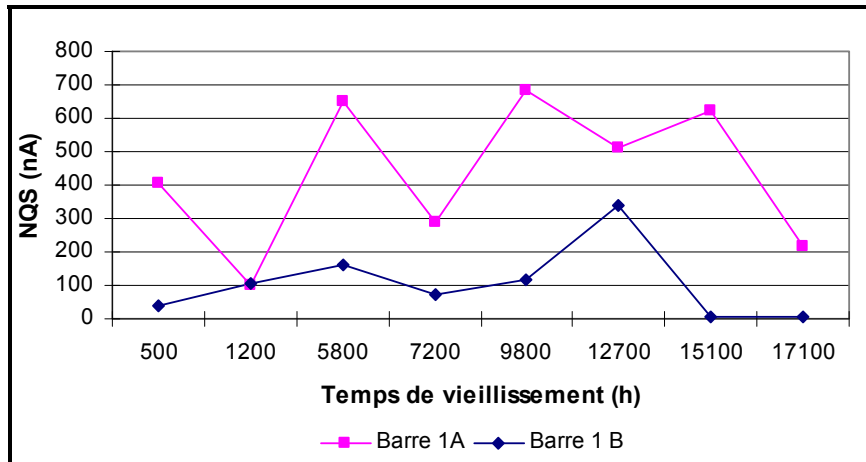


Figure 5.5 L'évolution des mesures de DP effectuées avec un coupleur capacitif à 8 kV à la température ambiante

Dans le cas des barres du groupe 2, aucune rupture diélectrique n'est survenue au terme du vieillissement. Par contre, la dégradation de l'isolation de masse était très importante sur tous les sites de DP d'encoche, telle qu'illustrée sur la Figure 5.6, à gauche. La résine époxy s'est décomposée sur les premières couches de ruban laissant des flocons de mica libres et des morceaux de fibres de verre sur la surface. Le revêtement semi-conducteur a aussi été significativement dégradé près des sites de DP d'encoche. De plus, de nouveaux sites de DP, illustrés à la Figure 5.6 à droite, sont apparus sur presque toute la partie droite de ces deux barres. Ces nouveaux sites ont probablement été occasionnés par le vieillissement thermique du revêtement semi-conducteur et par l' $O_3$  produite par l'activité de DP d'encoche.

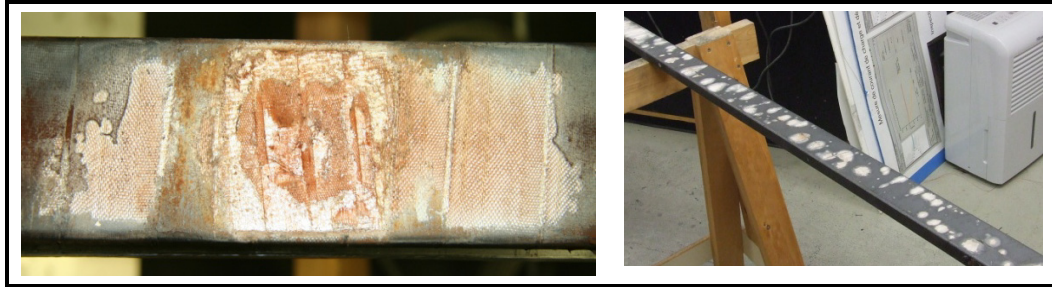


Figure 5.6 L'état de la surface isolante observé d'un site de DP d'encoche de la barre 2A (à gauche) et la partie droite du dessous de la barre 2A (à droite) après 25000 h de vieillissement

Des échantillons relevés sur des sites de DP d'encoche des deux barres du groupe 2 et analysés au microscope ont montré que la dégradation observée en surface s'est propagée sur les premières couches du volume de l'isolation de masse. La Figure 5.7 illustre les premières couches à partir de la surface de la barre du volume de l'isolation de masse au centre d'un site de DP d'encoche de la barre 2A. Une délamination importante s'est formée sous la première couche en surface de l'isolation qui a complètement perdu son intégrité mécanique lors du vieillissement. D'autres cavités entre les couches de ruban telles que celles illustrées sur la Figure 5.7, à droite, ont été observées et ceci, sur tous les échantillons des barres du groupe 2. Mis à part les premières couches de ruban observées sous la surface des sites de DP d'encoche, le reste du volume de l'isolation de masse ainsi que les coins des échantillons analysés n'ont pas exposé de cavités importantes telles que celles observées dans les coins de la barre 1A.

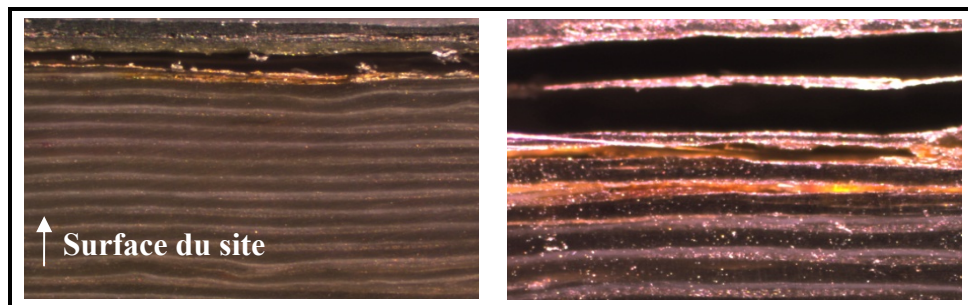


Figure 5.7 L'état du volume de l'isolation de masse observé sur un site de DP d'encoche de la barre 2A (à gauche) et des premières couches dégradées (à droite)

Tous les sites de DP d'encoche des barres du groupe 3 ont subi une rupture diélectrique avant la fin du vieillissement. Dans tous les cas, la rupture s'est produite près du coin de la barre et de la jonction avec le revêtement semi-conducteur, telle qu'illustrée à la Figure 2.7 du chapitre 2. Le Tableau 5.1 présente le temps de vieillissement de chacun des sites de DP des barres du groupe 3 avant la rupture diélectrique. La dispersion du temps de vieillissement au moment des ruptures est assez importante, de sorte que 17200 h séparent la première rupture de la dernière qui est survenue au moment où le vieillissement allait être arrêté, c'est-à-dire après 25000 h. Cette dispersion vient probablement de la différence d'érosion à chacun des sites de DP d'encoche.

Tableau 5.1 Temps de vieillissement avant la rupture diélectrique des sites de DP des barres du groupe 3

Identification du site	Temps de vieillissement (h)
3B-B	7800
3A-C	8800
3A-A	12700
3A-B	12890
3B-C	15100
3B-A	25000

Les dissections effectuées sur les sites de DP d'encoche des barres du groupe 3 ont démontré que la propagation de l'arborescence entre le cuivre, à la haute tension, et le revêtement semi-conducteur, mis à la terre, s'est effectuée sur de petites distances à travers le volume de l'isolation dans le coin des barres où le champ électrique est le plus concentré. Étant donné que la progression latérale est faible, le mode de défaillance a été occasionné par la réduction mécanique de l'épaisseur de l'isolant. La Figure 5.8 illustre le chemin parcouru à travers le volume de l'isolation sur un site de DP d'encoche de la barre 3B. Selon la position dans le volume de l'isolation, les traces de carbonisation sont plus ou moins importantes et indiquent la présence de cavités ou de délaminations entre les couches de ruban. Plus près des brins de cuivre, plusieurs traces de carbonisation ont été observées en raison de la chaleur importante dégagée lors de la rupture diélectrique.



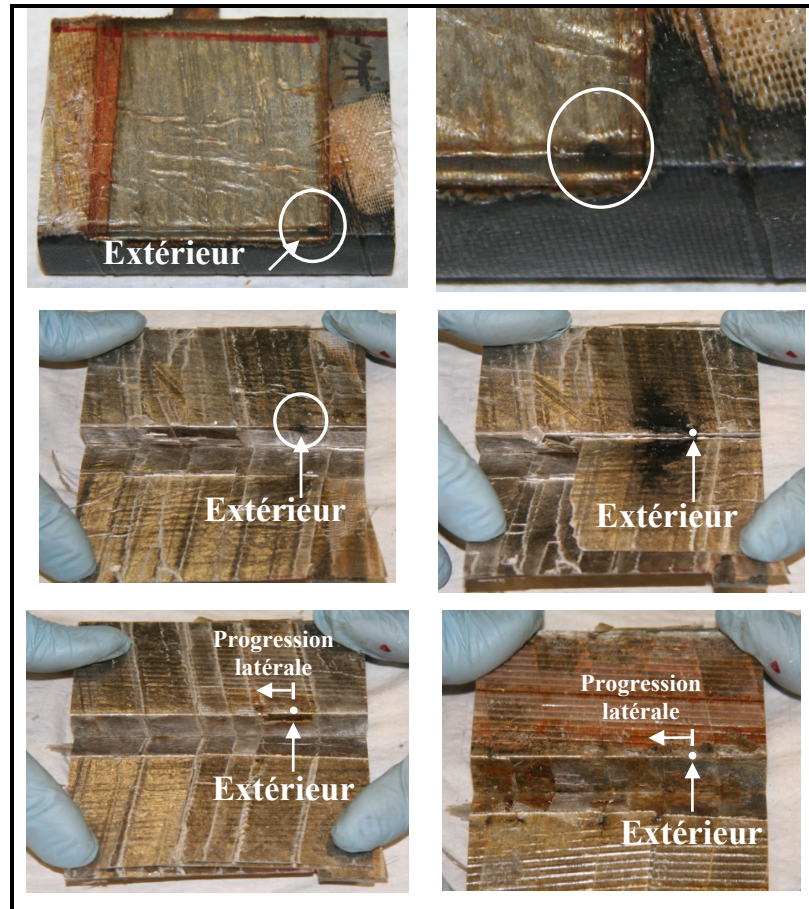


Figure 5.8 La dissection du site de DP d'encoche de la barre 3B qui a subi une rupture diélectrique après 25000 h de vieillissement

La Figure 5.9 expose l'état du volume de l'isolation de masse dans un coin d'un site de DP d'encoche de la barre 3A. Il est aussi possible d'observer sur cet échantillon que les dommages effectués par la rupture diélectrique ne sont pas identiques sur toutes les couches de ruban. D'importantes cavités et délaminations ont été observées à l'endroit où le chemin a atteint un brin du cuivre et la décoloration observée entre les couches de ruban confirme qu'une augmentation localisée de la température est survenue, possiblement lors de la rupture diélectrique. L'observation des échantillons n'a pas révélé la présence de cavités ou de délaminations ailleurs dans le volume de l'isolation et dans les autres coins, sauf sous les sites de DP d'encoche près de la rupture diélectrique.

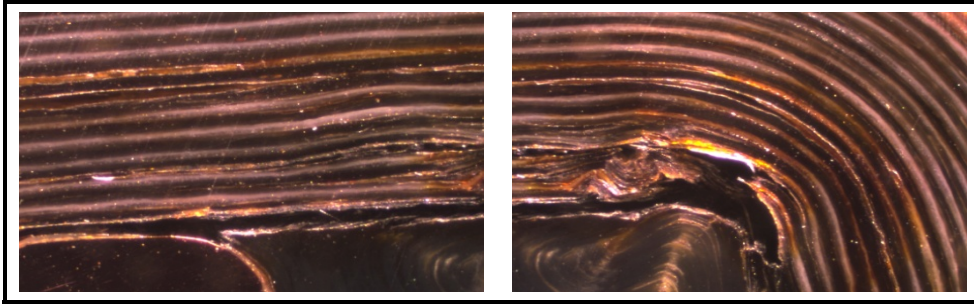


Figure 5.9 L'état du volume de l'isolation de masse observé dans un coin près du point intérieur sur le brin de cuivre où il y a eu rupture diélectrique d'un site de la barre 3A.

La signature PRPD illustrée à la Figure 5.10 a été mesurée 600 h avant que le premier site de la barre 3B subisse une rupture diélectrique. Cette signature, mesurée avec un coupleur capacitif à 8 kV, à la température ambiante, présente une faible activité de DP d'encoche et une activité de DP de type interne dont l'amplitude est plus élevée. Bien qu'un comportement cyclique de la signature PRPD des barres du groupe 3 ait été observé dans les résultats des mesures de DP au chapitre 2, peu de temps avant la rupture diélectrique, l'activité de DP de type interne dans cette signature mesurée à la température ambiante indique la présence de cavités ou de délaminations internes qui sont des signes de la formation d'une arborescence électrique dans le volume de l'isolation. Cette signature confirme que l'activité de DP d'encoche, contrairement aux croyances dans l'industrie, diminue avant une rupture diélectrique tandis que l'activité de DP de type interne augmente. Ce mécanisme a aussi été observé avant la rupture diélectrique d'autres sites de DP d'encoche des barres du groupe 3 dont les signatures PRPD ont été continuellement mesurées à l'aide d'une antenne au cours du vieillissement.

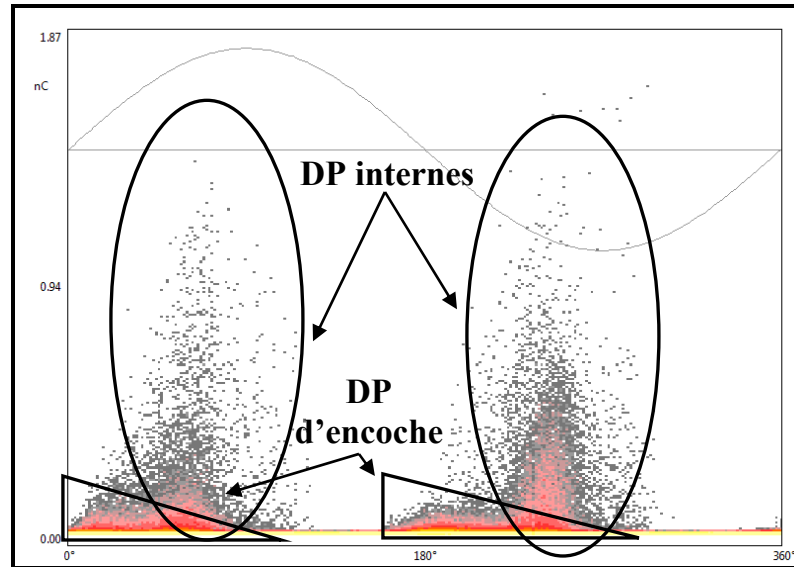


Figure 5.10 Signature PRPD mesurée sur la barre 3B à 7200 h avec un coupleur capacitif à 8 kV, à la température ambiante

## 5.2 La réponse diélectrique de la partie droite

La mesure de la réponse diélectrique est une technique qui permet d'évaluer les courants de polarisation (en charge) et dépolarisation (en décharge) et de détecter les changements des propriétés physiques des matériaux isolants. Cette mesure a été effectuée sur la partie droite seule de chacune des barres à l'aide de deux électrodes de garde en caoutchouc conducteur afin d'éliminer la contribution des revêtements anti-effluves appliqués sur les développantes dans les courants en charge et en décharge. Les détails du montage expérimental sont présentés dans le mémoire de maîtrise de l'étudiante (Lévesque, 2008).

Les mesures ont été effectuées à trois niveaux de tension continue, 1 kV, 5 kV et 10 kV, pour un temps en charge et en décharge fixé à 2000 s, à la température ambiante. La Figure 5.11 présente les résultats obtenus entre 500 h et 25 000 h de vieillissement, pour la barre 2A du groupe 2, à une tension de 5 kV. Les résultats obtenus pour cette barre vieillie sous une contrainte électrique et thermique présentent la caractéristique typique du courant d'absorption propre au mécanisme de polarisation lente du volume de l'isolation de masse. Les courants en charge et en décharge sont pour ainsi dire très similaires tout au long du

vieillessement et n'indiquent pas de modifications considérables des propriétés du volume de l'isolation de masse.

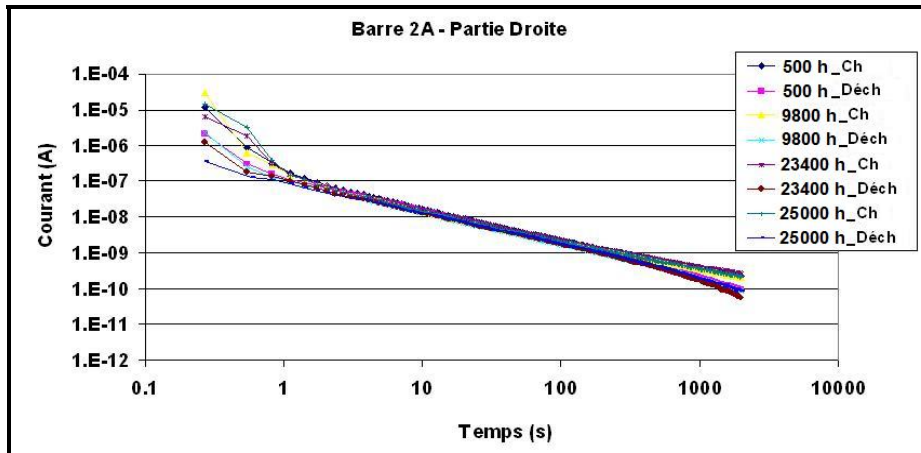


Figure 5.11 Les résultats des mesures de la réponse diélectrique de la partie droite de la barre 2A à une tension de 5 kV et un temps de charge et décharge de 2000 s

Ces résultats sont identiques pour les deux barres du groupe 2 ainsi que pour la barre 1B du groupe 1 (électrique) et révèlent que l'apport de l'activité de DP d'encoche à la dégradation de l'isolation de masse est négligeable sous une contrainte électrique et thermique ou une contrainte électrique seule à la température ambiante. Pourtant, l'inspection visuelle des sites de DP d'encoche pour les deux barres du groupe 2 a exposé une dégradation de la surface isolante très importante sur les premières couches du volume de l'isolant et l'attaque des DP s'est même répandue à toute la partie droite de la barre, telle qu'illustrée à la Figure 5.6 à droite. Cette technique de mesure n'est donc pas un bon indicateur de la présence ni de l'évolution de l'activité de DP d'encoche et ceci, même lorsque la dégradation semble assez importante dans des zones spécifiques en surface de l'isolation de masse.

Par contre, dans le cas de la barre 1A, qui possédait un grand nombre de cavités dans les coins et où une arborescence électrique menant à la rupture diélectrique s'est formée en raison du vieillissement sous une contrainte électrique seule, la mesure de la réponse diélectrique de la partie droite a été sensible au mécanisme de dégradation telle qu'illustrée à la Figure 5.12.

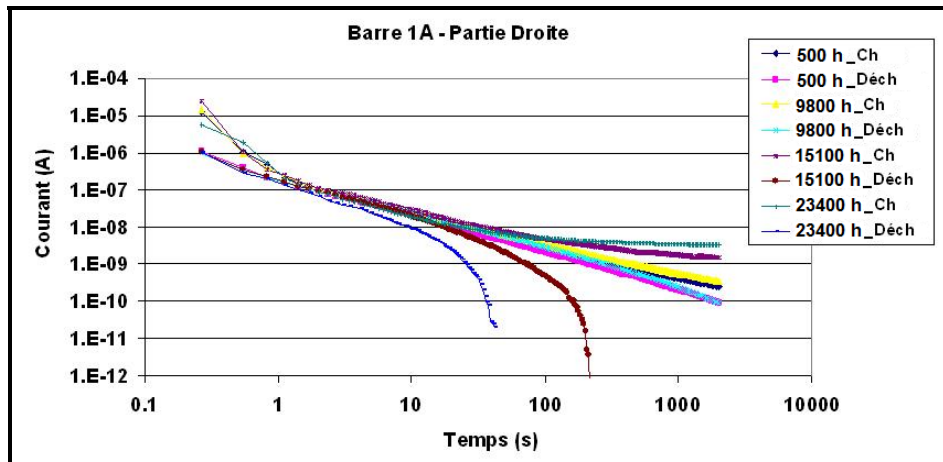


Figure 5.12 Les résultats des mesures de la réponse diélectrique de la partie droite de la barre 1A à une tension de 5 kV et un temps de charge et décharge de 2000 s

Les résultats obtenus à 15100 h de vieillissement présentent une contribution supplémentaire due à un courant de conduction dans le volume de l'isolation de masse, observable par un relèvement à la fin de la droite du courant en charge. Cette contribution s'est maintenue, et a même augmenté dans la mesure suivante, effectuée à 23400 h. De plus, le courant en décharge de ces deux mesures à 15100 h et à 23400 h, a effectué une inversion de polarité, reconnaissable par une diminution rapide du courant en décharge. L'inversion de polarité du courant en décharge se manifeste lorsqu'une arborescence électrique croît dans le volume de l'isolation. En charge, lorsque la tension continue est appliquée à l'échantillon contenant une arborescence électrique, des charges sont injectées par les électrodes, pénètrent profondément dans le volume de l'isolation et s'influencent en occasionnant un courant de conduction. Lorsque la tension est enlevée et que le cycle de décharge commence, ces charges, profondément piégées à la tête de l'arborescence électrique et qui sont à proximité les unes des autres, continuent de s'influencer en occasionnant un courant de conduction dans le même sens qu'en charge. De ce fait, lorsque le courant en décharge, principalement occasionné par le courant d'absorption, devient plus faible que ce courant de conduction, la polarité du courant en décharge s'inverse et devient positive.

L'accroissement d'une arborescence en présence d'un champ électrique seul est un phénomène lent qui, dans le cas de la barre 1A, a occasionné une rupture diélectrique après 24700 h de vieillissement au double de la tension nominale (16 kV). Dans le cas des ruptures diélectriques survenues sur les sites de DP d'encoche des barres du groupe 3 en présence d'une contrainte électrique, thermique et mécanique, l'accroissement de l'arborescence s'est effectué beaucoup plus rapidement et n'a pas pu être observé avec la mesure de la réponse diélectrique de la partie droite de ces barres, telle qu'illustrée à la Figure 5.13 pour la barre 3B à une tension de 5 kV. En effet, cette figure qui illustre la mesure des courants en charge et en décharge n'indique aucune différence majeure entre les résultats obtenus à 500 h et ceux à 5800 h, même si une rupture diélectrique est survenue sur le site B de cette barre à 7800 h.

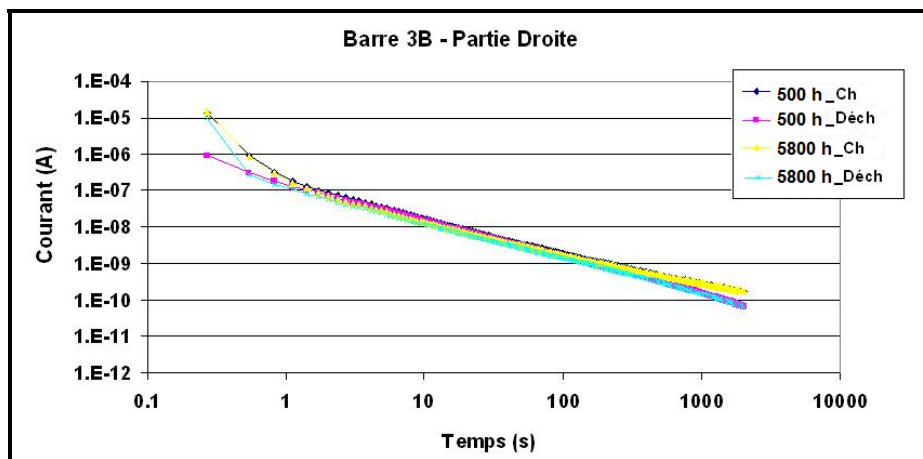


Figure 5.13 Les résultats des mesures de la réponse diélectrique de la partie droite de la barre 3B à une tension de 5 kV et un temps de charge et décharge de 2000 s

D'une façon générale, l'indication de la formation d'une arborescence dans le volume de l'isolation de masse, telle que celle observée sur la barre 1A n'est pas un phénomène facilement détectable sur des machines. En effet, lorsque cette mesure est effectuée sur l'enroulement complet du stator d'un alternateur, la présence de la contribution du revêtement anti-effluves des développantes et de certains paramètres tels que l'humidité est

tellement importante que la contribution de l'accroissement d'une arborescence électrique sur une barre de l'enroulement serait probablement perdue dans tout le signal.

### 5.3 L'essai de rupture diélectrique

Afin d'établir la tenue diélectrique résiduelle des sites de DP d'encoche des barres du groupe 1 et 2 qui n'ont pas subi de claquage au cours du vieillissement, un essai de rupture diélectrique a été effectué à la fin du vieillissement. Pour ce faire, le revêtement semi-conducteur a été enlevé sur toute la longueur des barres et de chaque côté des trois sites de DP d'encoche, une peinture à gradient de potentiel a été appliquée afin que la contrainte électrique soit localisée seulement sur un site de DP à la fois. Les barres ont été placées dans un bain d'huile illustré à la Figure 5.14 afin d'éviter les contournements dans l'air. La haute tension AC a été appliquée sur le cuivre avec une tresse de mise à la terre sur le site de DP d'encoche soumis à l'essai et la montée en tension s'est effectuée à un taux de 1 kV/s.



Figure 5.14 Le montage utilisé lors de l'essai de rupture diélectrique

Malgré toutes ces précautions, il n'a pas été possible de soumettre tous les sites de DP à l'essai de rupture diélectrique. Lorsque le site de DP à l'essai était trop près d'un site ayant subi une rupture précédemment, un chemin de contournement sur la surface de la barre dans l'huile se formait jusqu'à la rupture diélectrique de l'autre site avant que le site de DP à l'essai ne subisse une rupture à son tour. Les résultats de la tension résiduelle des quelques

sites de DP qui ont subi une rupture diélectrique lors de l'essai de montée en tension progressive sont présentés au Tableau 5.2.

Tableau 5.2 Tension résiduelle des sites de DP des barres du groupe 1 et 2

Identification du site	Tension résiduelle (kV)
1A-A	77.5
1B-A	82.2
1B-B	82.9
2A-A	84.8
2A-C	75.9
2B-A	87.9
2B-C	83.7

Bien que les sites de DP d'encoche des barres du groupe 2 présentaient une dégradation de l'isolation beaucoup plus importante que les sites de DP d'encoche des barres du groupe 1, la tenue diélectrique résiduelle des barres de ces deux groupes est sensiblement la même. Les résultats de l'essai de rupture diélectrique n'indiquent donc pas de différences majeures dans le vieillissement entre les sites de DP d'encoche des barres de ces deux groupes. Pour des fins de comparaison, une barre neuve de la même fabrication que celles utilisées pour le montage expérimental a aussi été soumise à l'essai de rupture diélectrique. Un claquage est survenu sur cette barre à une valeur de 81.3 kV non pas sur la partie droite, mais sur une développante de cette barre. Étant donné ceci, il est difficile de comparer cette valeur de tension résiduelle avec les valeurs obtenues des sites de DP d'encoche. Par contre, nous pouvons affirmer que la tenue résiduelle de la partie droite de cette barre est au-dessus de 81.3 kV.

#### 5.4 Discussion

Le vieillissement sous DP d'encoche de l'isolation de masse des six barres utilisées dans cette expérimentation en laboratoire s'est effectué différemment selon le type de contraintes appliquées. Les inspections visuelles et les dissections des sites de DP d'encoche des barres du groupe 1 n'ont pas exposé de changements majeurs de l'intégrité de l'isolation de masse



tandis que celles du groupe 2 ont révélé une dégradation importante des premières couches de l'isolation de masse. À l'exception de la barre 1A, il n'y a eu aucune différence importante de soulevée entre ces deux groupes par les mesures de la réponse diélectrique ainsi que par l'essai de rupture diélectrique. Les résultats obtenus des mesures de la réponse diélectrique de la partie droite des barres du groupe 2 ne se sont pas montrés sensibles à la dégradation superficielle de l'isolation de masse aux sites de DP d'encoche. Ces résultats combinés au fait qu'aucune rupture diélectrique n'est survenue sur les sites de DP d'encoche de ces barres après 25000 h de vieillissement et que leur tenue diélectrique résiduelle est demeurée élevée, confirment que la présence de l'activité de DP d'encoche dite électrique pure sous une température constante n'est pas nécessairement critique pour l'intégrité à court terme de l'isolation de masse.

La présence des vibrations mécaniques combinée aux contraintes thermiques et électriques sur les barres du groupe 3 a engendré une dégradation beaucoup plus rapide de l'isolation de masse. Cette condition de contraintes a évidemment été celle la plus dommageable avec des ruptures diélectriques qui sont survenues sur tous les sites de DP d'encoche des barres du groupe 3. Ce mécanisme est survenu suite à l'usure mécanique de l'isolation de masse lorsque l'épaisseur a été suffisamment diminuée. Les dissections effectuées sur les sites de DP d'encoche de ces barres ont démontré que l'arborescence électrique croît sur le coin des barres où le champ électrique est le plus concentré et ne se propage pas sur une grande distance. Les mesures de DP effectuées peu de temps avant la rupture diélectrique ont indiqué des changements de la signature PRPD avec une diminution de l'activité de DP d'encoche et une augmentation de l'activité de DP de type interne confirmant la progression de l'arborescence électrique. Dans ce cas, les mesures de la réponse diélectrique sur la partie droite n'ont pas démontré de changements des propriétés du volume de l'isolation avant la rupture diélectrique du premier site de DP d'encoche de chacune des deux barres, attestant de la rapidité de la formation et de la propagation de l'arborescence électrique.

Les dissections effectuées sur barre 1A ont démontré la présence d'importantes cavités dans le volume de l'isolation de masse. La présence de ces cavités a éventuellement conduit à une

rupture diélectrique complète non pas sur un site de DP d'encoche, mais ailleurs sur la partie droite. Ce phénomène, beaucoup plus lent que celui des ruptures diélectriques survenues sur les sites de DP d'encoche des barres du groupe 3, a été détecté par la mesure de la réponse diélectrique de la partie droite. Bien que l'évolution de l'activité de DP mesurée sur cette barre a été effectuée jusqu'à 17100 h de vieillissement, aucune augmentation significative n'a laissé croire à la formation d'une arborescence électrique dans le volume de l'isolation. Dans ce cas, ces résultats qui variaient beaucoup ont démontré la difficulté de diagnostiquer l'état de l'isolation en se basant seulement sur des mesures de DP. Ces résultats attestent donc de la nécessité d'utiliser plusieurs outils afin de déterminer la condition réelle de l'isolation de masse. Finalement, cet événement inattendu a permis de confirmer que dans certaines conditions, la présence de DP de type interne occasionnée par un grand nombre de cavités dans le coin des barres peut être plus critique que celle des DP d'encoche.

## **5.5 Conclusion**

Les résultats présentés dans ce chapitre, qui sont complémentaires à ceux du chapitre 2, ont fourni des précisions supplémentaires sur le taux de dégradation de l'isolation de masse en présence de DP d'encoche. Ils ont permis de confirmer que le vieillissement de l'isolation de masse engendré par l'activité de DP d'encoche sous une contrainte triple (électrique, thermique et mécanique) est la condition la plus dommageable et que dans ce cas, une rupture diélectrique peut survenir rapidement.

Nous avons confirmé dans ce chapitre, qu'il est nécessaire d'utiliser plusieurs outils de mesure afin d'obtenir un diagnostic plus complet de la condition de l'isolation de masse. La compréhension des mécanismes de dégradation est essentielle à l'interprétation de l'évolution des signatures PRPD de l'activité de DP. Ces efforts pourront par la suite servir à raffiner le diagnostic des machines tournantes affectées par des DP d'encoche en se basant sur des corrélations obtenues des différentes mesures effectuées sur les machines, de la reconnaissance des mécanismes de dégradation ainsi que des conditions d'opération.

## CONCLUSION

Bien que le phénomène de DP d'encoche soit connu depuis plus de 60 ans, il est encore à ce jour difficile d'obtenir un diagnostic de la condition réelle des alternateurs hydrauliques affectés par cette activité de DP. L'étude présentée dans cette thèse a donc été initiée dans l'optique plus générale d'améliorer les connaissances sur le mécanisme des DP d'encoche et plus spécifiquement d'évaluer la contribution relative des différents paramètres qui affectent l'évolution de la signature PRPD de cette activité de DP ainsi que la dégradation de l'isolation de masse des barres du stator. Afin d'atteindre ces objectifs, cette étude a été initialement divisée en trois grandes étapes qui ont été respectivement l'implantation de deux montages de vieillissement en laboratoire dans des conditions contrôlées et le développement d'un modèle de calcul du champ électrique dans une cavité d'air en présence de multiples sites de DP.

Le premier montage de vieillissement long terme en laboratoire a été mis en place avec six barres de réserve du stator d'un alternateur soumises à des DP d'encoche sous différentes combinaisons de contraintes, électrique seule à la température ambiante, électrique et thermique et finalement électrique, thermique et mécanique. Ce montage expérimental a été soumis au vieillissement pendant un total de 25000 h et l'évolution de l'activité de DP d'encoche en fonction des différentes combinaisons de contraintes a été caractérisée périodiquement avec des mesures de DP, de la conductivité des surfaces (isolante et acier), de la réponse diélectrique et des inspections visuelles. À la suite du vieillissement, des essais de rupture diélectrique ont été effectués sur les sites de DP d'encoche des barres qui n'avaient pas subi de claquage pendant le vieillissement et des dissections des sites de DP d'encoche ont été réalisées.

En fonction du vieillissement, les inspections visuelles de chacun des sites de DP ont révélé qu'une couche d'oxyde s'est formée sur toutes les surfaces des électrodes de mise à la terre en acier, dont les caractéristiques variaient selon le type de contraintes actives. Nous avons observé que dans le cas du vieillissement sous une contrainte électrique seule à la

température ambiante (groupe 1), la dégradation de la surface isolante est restée superficielle tandis qu'à plus haute température (groupe 2), la dégradation de la surface isolante a été nettement plus importante sur les premières couches de ruban de l'isolation de masse et s'est même généralisée sur toute la surface des deux barres. Malgré la grande différence de dégradation, la conductivité de la surface isolante a augmenté de façon similaire pour tous les sites de DP de ces deux barres jusqu'à une valeur maximale de  $10^{-9}$  S par carré. En présence de la contrainte mécanique (groupe 3), tous les sites de DP d'encoche ont montré des signes d'érosion avec des stries caractéristiques occasionnées par la surface laminée de l'électrode d'acier. Dans ce cas, l'augmentation de la conductivité de la surface isolante ne s'est pas effectué d'une façon continue, mais plutôt selon les variations du degré d'érosion de chacun des sites de DP d'encoche. Ce comportement semblable à celui en machine a des impacts sur l'évolution des DP d'encoche. Tous les sites des barres du groupe 3 ont subi une rupture diélectrique avant la fin du vieillissement de 25000 h alors qu'il y a eu une seule rupture diélectrique sur les sites des barres du groupe 1 et 2, soit sur la barre 1A où une rupture est survenue sur la partie droite de la barre loin des sites de DP d'encoche. L'essai de rupture diélectrique effectué sur quelques sites des barres de ces deux groupes n'a pas révélé de différences majeures indiquant que dans ces deux conditions de contraintes, le volume de l'isolation de masse s'est très peu altéré. Ces résultats ont démontré que dans certains cas, des DP de type interne peuvent être plus dommageables que des DP d'encoche sans vibration.

Les mesures de DP effectuées sur chacune des barres individuelles à la température ambiante ont confirmé qu'elles n'étaient pas représentatives des conditions de vieillissement à plus haute température. Dans le cas des barres du groupe 1, vieilles à la température ambiante, l'humidité a affecté la quantité et la composition de l'oxyde déposée sur la surface isolante à un point tel que l'activité de DP a complètement disparue pendant une bonne partie du vieillissement. De plus, nous avons confirmé que l'augmentation de la température engendre une augmentation de l'activité de DP d'encoche et cette augmentation a dominé la dégradation de la surface isolante des barres du groupe 2. Finalement, des mesures de DP effectuées durant le vieillissement avec une antenne ont indiqué que l'évolution de l'activité

de DP d'encoche varie beaucoup suivant les variations saisonnières de l'humidité dans le laboratoire et ceci, même pour les sites à plus haute température. Dans le cas des barres du groupe 3, l'évolution de la signature PRPD suggère que des variations cycliques suivant les variations mesurées de la conductivité de la surface isolante sont dues à l'érosion mécanique. Même en présence de température, l'activité de DP d'encoche des barres du groupe 3 est donc dominée par la contrainte mécanique. La mesure des DP peu de temps avant la rupture diélectrique a indiqué un changement dans la signature PRPD avec une diminution de l'activité de DP d'encoche et une augmentation de celle des DP de type interne, confirmant la propagation d'une arborescence électrique dans le volume de l'isolation. Ce phénomène doit être pris en considération lors de l'interprétation des mesures de DP d'encoche sur des machines en service, car selon l'évolution, ce changement peut indiquer l'approche imminente d'une défaillance. Par contre, il est primordial avant tout, d'analyser plusieurs mesures de DP obtenues sur des machines, afin de s'assurer que ce phénomène existe vraiment.

Ces résultats obtenus du premier montage expérimental ont validé que l'évolution de l'activité de DP d'encoche dépend du type de contraintes actives ainsi que du contenu d'humidité dans l'air. Ils ont aussi démontré que lorsque l'activité de DP d'encoche est dite purement électrique à une température fixe, le système d'isolation de masse est très résistant à leur attaque et que même si la dégradation en affecte considérablement les premières couches, son intégrité n'est pas beaucoup modifiée. D'autre part, en présence de vibrations mécaniques, une rupture diélectrique peut survenir rapidement et c'est une condition critique qu'il ne faut pas négligée.

Pour le deuxième montage de vieillissement court terme en laboratoire, des mesures de DP ont été effectuées tout au long des séquences de 230 h pour trois niveaux d'humidité et deux températures. De plus, des inspections visuelles au début et à la fin de chacune des séquences ont permis de caractériser l'évolution de l'activité de DP d'encoche selon la condition d'humidité.

Les résultats obtenus de cette deuxième expérimentation ont démontré l'effet de la condition des surfaces, de l'humidité et de la température sur l'évolution de l'activité de DP d'encoche. Bien que la signature PRPD typique de l'activité de DP d'encoche ait généralement été considérée dans l'industrie comme étant asymétrique en faveur des DP positives qui surviennent durant l'alternance négative du cycle de la tension, nous avons démontré que dans certaines conditions, cette signature PRPD peut changer considérablement au point de présenter des caractéristiques symétriques. Au début de chacune des séquences, lorsque la surface isolante ne présentait aucun signe de dégradation et que la surface de l'électrode d'acier était intacte et très conductrice, la signature PRPD de l'activité de DP d'encoche présentait une activité triangulaire intense et presque symétrique dans les deux alternances de la tension d'alimentation. Par la suite, suivant la dégradation initiale de ces surfaces cette signature a rapidement changé afin de prendre les caractéristiques asymétriques typiques de l'activité de DP d'encoche. De plus, nous avons observé que l'augmentation de l'humidité diminue d'une façon générale l'activité de DP d'encoche en raison de la nature électronégative de la vapeur d'eau et cet effet se combine à celui de la condition des surfaces et ceci même à la haute température de fonctionnement des machines. L'oxydation de la surface de l'électrode d'acier ainsi que la conductivité de la surface isolante ont été modifiées par les variations de l'humidité dans l'air occasionnant par le fait même des changements de l'activité de DP. Selon la condition des surfaces, à plus basse humidité, la signature PRPD de l'activité de DP d'encoche a présenté des caractéristiques plus symétriques dans les deux alternances tandis qu'à plus haute humidité, la signature PRPD est devenue fortement asymétrique en faveur des DP positives durant l'alternance négative du cycle de la tension d'alimentation. Ces résultats démontrent que lors de mesures en centrale sur des machines, il est fortement recommandé de prendre en note l'humidité, car son effet peut grandement affecter l'activité de DP d'encoche et sa signature PRPD.

Afin de valider certains résultats obtenus des expérimentations en laboratoire, la dernière étape de cette étude a été le développement d'un modèle de calcul du champ électrique par la méthode des éléments finis dans une cavité d'air typique de celle où l'activité de DP d'encoche survient. Ce modèle a été conçu afin de comprendre l'effet de la condition des

surfaces ainsi que la dynamique des charges déposées sur la surface isolante en présence de multiples événements de DP qui peuvent être simultanément actifs.

Les résultats de ce modèle combinés à ceux obtenus des montages expérimentaux ont démontré que la distribution du champ électrique dans la cavité d'air est beaucoup affectée par la disponibilité des électrons qui varie selon la condition des surfaces. En effet, la couche d'oxyde formée sur la surface de l'électrode d'acier en raison des espèces oxygénées augmente la résistivité de la surface conductrice et piège les ions à sa surface. La distribution du champ électrique à l'intérieur de l'espacement d'air en est affectée. Ces charges vont en plus, activer l'émission d'électrons de la surface d'acier. Les électrons émis par la surface oxydée sont en partie recombinaison avec les ions présents à la surface, mais d'une façon générale, la couche d'oxyde tend à augmenter la production d'électrons. Le modèle a démontré que lorsque ce mécanisme d'émission électronique se produit, il en résulte une transition vers un nombre important de petites décharges négatives qui surviennent durant l'alternance positive du cycle de la tension. Du côté de la surface isolante, la dégradation de la surface produit deux effets inverses. L'augmentation de la conductivité de la surface altère le champ électrique en raison du mouvement des charges et diminue l'émission d'électrons, tandis que les produits de dégradation formés à la surface isolante activent l'émission d'électrons. Il en résulte que les mécanismes de dégradation qui surviennent sur la surface isolante sont beaucoup plus complexes. Ainsi, pour expliquer les variations de l'activité de DP durant l'alternance négative du cycle de la tension d'alimentation, il faudrait considérer la physique de la décharge. Néanmoins, même sans inclure le mouvement des charges dans le volume d'air, notre modèle de calcul du champ électrique a démontré que lorsque le taux d'émission d'électrons engendré par la surface oxydée de l'électrode d'acier est considérablement supérieur à celui de la surface isolante, ceci donne un grand nombre de petites DP négatives durant l'alternance positive du cycle de la tension. Ce serait donc l'accroissement de l'émission électronique de la plaque de masse qui expliquerait l'asymétrie typique de la signature PRPD de l'activité de DP d'encoche.

Le mécanisme des DP d'encoche s'est avéré être beaucoup plus complexe qu'initialement anticipé. La contribution de chacune des différentes contraintes, électriques, thermiques, mécaniques et environnementales présentes lors du fonctionnement de la machine ainsi que la condition des surfaces à l'évolution de l'activité de DP d'encoche n'a pas été simple à déterminer. En effet, il a souvent été difficile de séparer les effets combinés de chacun des paramètres et dans bien des cas, leurs effets contraires changeaient de proportions en fonction des conditions de vieillissement et de la dégradation. Néanmoins, nous avons réussi à démontrer que la condition des surfaces est un paramètre qui domine l'évolution des DP d'encoche et que ce paramètre varie en fonction de l'activité de DP d'encoche et de l'une ou l'autre des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales. Évidemment, l'interprétation des mesures de DP d'encoche sur un alternateur en service sera encore plus complexe, car toutes les combinaisons de contraintes peuvent survenir simultanément à des intensités différentes et la condition des surfaces n'est jamais connue ni même identique à tous les sites de DP d'encoche actifs sur l'enroulement. Cependant, les résultats de cette étude permettent déjà d'aider à la compréhension du phénomène et d'établir certaines corrélations entre des mesures de DP dans différentes conditions de fonctionnement.

Étant donné le nombre élevé de paramètres qui influencent le vieillissement, il n'est malheureusement pas encore possible d'expliquer toutes les phases d'évolution de l'activité de DP d'encoche, mais nous sommes néanmoins arrivés à déterminer les conditions dans lesquelles les DP d'encoche sont dangereuses ou pas. Nous avons aussi expliqué comment reconnaître certaines différences dans les signatures PRPD qui permettront de savoir si des vibrations sont présentes ou non et d'en déduire la dégradation de l'isolation.



## RECOMMANDATIONS

Dans le futur, il serait intéressant d'élargir cette étude afin d'évaluer l'effet des contraintes thermomécaniques occasionnées par les arrêts et les démarrages sur le vieillissement de l'isolation de masse sous DP d'encoche. Ce phénomène qui n'a pas été caractérisé dans cette thèse, peut avoir une grande influence sur le taux de dégradation de l'isolation de masse ainsi que sur l'évolution de l'activité de DP d'encoche. Lors du démarrage, la température du cuivre augmente rapidement occasionnant une dilatation thermique du matériau, tandis que le système d'isolation qui est à une température beaucoup plus basse, est retenu par le noyau magnétique et ne suit pas le mouvement de dilatation du cuivre. Il en résulte une contrainte sévère de cisaillement qui favoriserait la création de délaminations et de cavités dans le volume de l'isolant. Ce mécanisme, combiné à l'action des DP d'encoche, pourrait se révéler plus sévère pour l'isolation de masse que lorsque la température est constante.

De plus, bien que le fait de chauffer les barres en faisant circuler un courant élevé dans une boucle en court-circuit s'apparente aux conditions de service des machines, cette approche ne permet pas de mesurer les DP sur les barres individuelles dans leurs conditions de vieillissement. Ainsi, l'utilisation de plaques chauffantes telles que celles recommandées lors des essais d'endurance en tension selon la norme IEEE 1043 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1997) permettrait une telle analyse et les mesures de DP seraient plus représentatives de celles effectuées sur des machines en service.

Le modèle de calcul du champ électrique développé ici, pourrait aussi être raffiné afin d'inclure une couche d'oxyde sur la surface conductrice mise à la terre. La dynamique des charges piégées à cette surface pourrait ainsi être modélisée afin de mieux représenter les conditions réelles du changement des surfaces de la cavité d'air.

Finalement, les résultats des mesures de DP obtenus de ces deux montages de vieillissement en laboratoire doivent être comparés avec des mesures de DP effectuées sur des machines en service afin de valider si les changements observés sont représentatifs de la réalité.



## ANNEXE I

### CALCUL DE LA DYNAMIQUE DES CHARGES APPLIQUÉES SUR LA SURFACE ISOLANTE

Le mécanisme de DP est modélisé par une diminution du champ électrique associée au dépôt d'une distribution superficielle de charge sur la surface isolante. Le calcul du champ électrique produit par une surface chargée carrée de dimension  $2a$  telle qu'illustrée à la Figure-A I-1, à une distance  $b$  par rapport au centre est détaillé dans cette section. Afin de simplifier le développement du calcul, le carré ayant une densité de charge superficielle  $\sigma$  est divisé en plusieurs lignes ayant une densité linéaire de charge  $\lambda$  de longueur  $2a$  et de largeur  $dz$ .

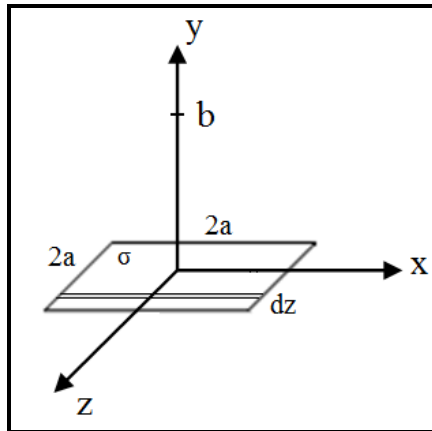


Figure-A I-1 La décomposition d'un carré de charge en plusieurs lignes de charge

Le calcul du champ électrique radial pour une ligne ayant une densité linéaire de charge  $\lambda$ , est donné par :

$$dE_y = \frac{\lambda dx}{4\pi\epsilon(x^2 + b^2)} \cos \theta = \frac{\lambda dx}{4\pi\epsilon(x^2 + b^2)} \frac{b}{\sqrt{x^2 + b^2}}$$

$$E_y = \frac{2\lambda b}{4\pi\epsilon_0} \int_0^a \frac{dx}{(x^2 + b^2)^{3/2}}$$

$$E_y = \frac{\lambda a}{2\pi\epsilon b \sqrt{(a^2 + b^2)}}$$

Par la suite, pour effectuer le calcul du champ électrique produit par une densité de charge superficielle  $\sigma$  carrée, il faut intégrer la contribution de plusieurs lignes de largeur  $dz$  :

$$dE_y = \frac{\sigma a dz}{2\pi\epsilon b \sqrt{(a^2 + b^2)}} \sin \theta = \frac{\sigma a dz}{2\pi\epsilon \sqrt{z^2 + b^2} \sqrt{(a^2 + z^2 + b^2)}} \frac{b}{\sqrt{z^2 + b^2}}$$

$$E_y = \frac{2\sigma a b}{2\pi\epsilon} \int_0^a \frac{dz}{(z^2 + b^2) \sqrt{(a^2 + z^2 + b^2)}}$$

$$E_y = \frac{\sigma}{\pi\epsilon} F(a, b)$$

$$\sigma = \frac{\pi\epsilon}{F(a, b)} E_y$$

$$F(a, b) = ab \int_0^a \frac{dz}{(z^2 + b^2) \sqrt{(a^2 + z^2 + b^2)}}$$

où  $F(a, b)$  est une fonction sans unité qui dépend seulement des dimensions  $a$  et  $b$  et qui est calculée numériquement,  $\epsilon$  est égale au produit de  $\epsilon_0$  avec  $\epsilon_{\text{eff}}$ . La valeur de  $\epsilon_{\text{eff}}$  étant la moyenne des permittivités des deux diélectriques, l'air et l'isolation de masse qui sont de chaque côté de l'interface où est déposé le profil de charge superficielle, c'est-à-dire la surface de l'isolation de masse.

Le calcul de la dynamique de la densité de charge superficielle  $\sigma$  déposée sur la surface isolante est donné par les équations de continuité suivantes en 2D, où  $\vec{K}$  est la densité de courant de surface et  $\gamma$  est la conductivité de surface :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{K} + \frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \vec{K} = \gamma \vec{E}_x$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = -\frac{d}{dx} (\gamma E_x)$$

La position selon le maillage en  $x$  est donnée par  $i$  et l'itération par  $j$ . Le calcul du déplacement des charges de façon discrète est donné par l'équation suivante où  $dt$  est le pas de temps et  $dx$  la dimension d'une maille :

$$\frac{\sigma(x_i, t_j) - \sigma(x_i, t_{j-1})}{dt} = -\gamma \left[ \frac{E_x(x_{i+1}, t_{j-1}) - E_x(x_{i-1}, t_{j-1})}{2dx} \right]$$

$$\sigma(x_i, t_j) = \frac{\gamma dt}{2dx} [E_x(x_{i-1}, t_{j-1}) - E_x(x_{i+1}, t_{j-1})] + \sigma(x_i, t_{j-1})$$

## ANNEXE II

### ORGANIGRAMME DU MODÈLE DE CALCUL DU CHAMP ÉLECTRIQUE

La Figure-A II-1 illustre d'une façon simplifiée, l'organigramme du programme développé à l'aide de Matlab® afin de calculer la distribution du champ électrique dans une cavité d'air où plusieurs sites de DP peuvent être simultanément actifs.

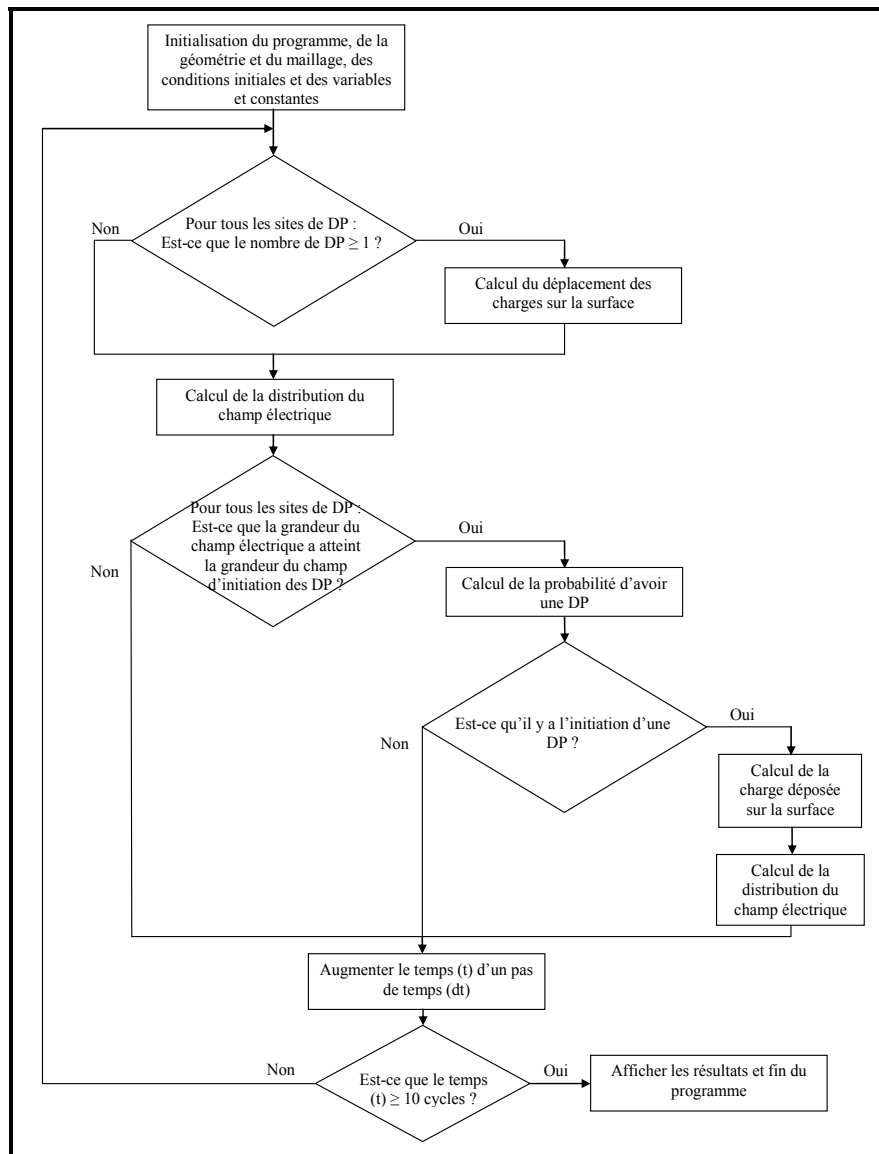


Figure-A II-1 L'organigramme du modèle de calcul du champ électrique

## BIBLIOGRAPHIE

- Aints, M., A. Haljaste, T. Plank et L. Roots. 2008. « Absorption of Photo-Ionizing Radiation of Corona Discharges in Air ». *Plasma Processes and Polymers*, vol. 5, p. 672-680.
- American Society for Testing and Materials. 1999. *Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials*. Norme Internationale, ASTM D257-99. American National Standard, 13 p.
- Azuaje, C.J., et W.J. Torres. 2006. « Experiences in Identification of Partial Discharge Patterns in Large Hydrogenerators ». *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America TDC'06 IEEE/PES*, p. 1-6.
- Bailon, J-P and Dorlot, J-M. 2000. *Des Matériaux*, 3rd ed. Montréal: Les presses internationales Polytechniques, 736 p.
- Bartnikas, R., et E. J. McMahon. 1979. *Engineering Dielectrics Volume 1 : Corona Measurement and Interpretation* (February 1979). VI. Baltimore: American Society for Testing and Materials ASTM, 520 p.
- Belec, M., C. Hudon et C. Guddemi. 2001. « Laboratory study of slot discharge characteristic PRPD patterns ». *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*, p. 547-550.
- Binder, E., A. Draxler, M. Muhr, S. Pack, R. Schwarz, H. Egger et A. Hummer. 1999. « Effects of air humidity and temperature to the activities of external partial discharges of stator windings ». *IEE Conference Publications*, vol. 5, n° 467, p.264-267.
- Brusch, R., M. Tari, K. Frohlich, T. Weiers et R. Vogelsang. 2008. « Insulation Failure Mechanisms of Power Generators [Feature Article] ». *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, vol. 24, n° 4, p. 17-25.
- Cavallini, A., et G. C. Montanari. 2006. « Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 13, n° 1, p. 111-121.
- Chen, J, et P Wang. 2005. « Effect of relative humidity on electron distribution and ozone production by DC coronas in air ». *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 33, n° 2, p. 808-812.
- CIGRÉ, Le Conseil International des Grands Réseaux Électriques. 2003. *Hydrogenerator failure- Results of the survey*. 129 p.

- Contin, A., et G. Rabach. 1992. « Identification and detection of slot discharges during accelerated aging tests ». *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Conference on*. p. 415-420.
- Cornell, R.M., et U Schwertmann. 2003. *The iron oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. New-York: Wiley-VCH, 664 p.
- Crichton, G. C., P. W. Karlsson et A. Pedersen. 1989. « Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 24, n° 2, p. 335-342.
- Devins, J. C. 1984. « The 1984 J. B. Whitehead Memorial Lecture the Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. EI-19, n° 5, p. 475-495.
- Evans, D. L. 1981. « IEEE Working Group Report of Problems with Hydrogenerator Thermoset Stator Windings Part I-Analysis of Survey ». *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. vol. PAS-100, n° 7, p. 3284-3291.
- Farahani, M., H. Borsi, E. Gockenbach et M. Kaufhold. 2005. « Partial discharge and dissipation factor behavior of model insulating systems for high voltage rotating machines under different stresses ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*. p. 5-19.
- Fenger, M., et G. C. Stone. 2005. « Investigations into the effect of humidity on stator winding partial discharges ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 2, p. 341-346.
- Florkowska, B. 1995. « Assessment of temperature influence on partial discharges in epoxy/mica insulation ». *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1995. ICSD'95.*, p. 356-360.
- Forssen, C., et H. Edin. 2008a. « Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 1: measurements ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, n° 6, p. 1601-1609.
- Forssen, C., et H. Edin. 2008b. « Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 2: measurements and modeling ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, n° 6, p. 1610-1616.
- Foulon-Belkacemi, N., M. Goldman, A. Goldman et J. Amouroux. 1995. « Transformation of nodules into crystals on polymers submitted to corona discharges with streamers ». *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 142, n° 6, p. 477-481.



- Friedlander, E., et J. R. Reed. 1953. « Electrical Discharges in Air-Gaps Facing Solid Insulation in High-Voltage Equipment ». *Proceedings of the IEE - Part IIA: Insulating Materials*, vol. 100, n° 3, p. 121-131.
- Fruth, B. A., et D. W. Gross. 1995. « Modelling of streamer discharges between insulating and conducting surfaces ». *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1995. ICSD'95.*, p. 350-355.
- Fuhr, J., M. Haessig, D. Kraenkel et P. Bruehlmeier. 1990. « Method for unambiguous recognition of slot discharge in rotating machines ». *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Conference on.* p. 331-336.
- Fujioka, Nobuhiro, Yoshihiro Tsunoda, Akira Sugimura et Kenji Arai. 1983. « Influence of Humidity on Variation of Ion Mobility with Life Time in Atmospheric Air ». *Power Engineering Review, IEEE*, vol. PER-3, n° 4, p. 32-33.
- Gjaerde, A.C. 1997. « The Combined Effect of Partial Discharges and Temperature on Void Surfaces ». In *IEEE Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena (CEIDP) (Minneapolis, october 19-22).* p. 550-553.
- Goldman, A., et M. Goldman. 1989. « Corrosion and Ageing Mechanisms Investigated by Corona Discharge ». *19th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, (Belgrade),* p. 322-331.
- Griffiths, David J. 1999. *Introduction to Electrodynamics* 3rd ed. Upper Saddle River (New Jersey): Prentice-Hall, 383 p.
- Gutfleisch, F., et L. Niemeyer. 1995. « Measurement and simulation of PD in epoxy voids ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 2, n° 5, p. 729-743.
- Heitz, C. 1999. « Physical modelling and mathematical description of PD processes with application to PRPD patterns ». *IEE Conference Publications*, vol. 1999, n° CP467, p. v5-356-v5-356.
- Hepburn, D. M., I. J. Kemp, A. J. Shields et J. Cooper. 2000. « Degradation of epoxy resin by partial discharges ». *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 147, n° 3, p. 97-104.
- Holboll, J.T., M. Henriksen, A. Jensen et F. Sorensen. 1994. « PD-pulse Characteristics in Rotating Machine Insulation ». *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (June),* p. 322-326.
- Hudon, C., R. Bartnikas et M. R. Wertheimer. 1990. « Surface conductivity of epoxy specimens subjected to partial discharges ». *Electrical Insulation, Conference on.* p. 153-155.

- Hudon, C., R. Bartnikas et M. R. Wertheimer. 1993. « Spark-to-glow discharge transition due to increased surface conductivity on epoxy resin specimens ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 28, n° 1, p. 1-8.
- Hudon, C., R. Bartnikas et M. R. Wertheimer. 1995. « Effect of physico-chemical degradation of epoxy resin on partial discharge behavior ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 2, n° 6, p. 1083-1094.
- Hudon, C., et M. Belec. 2005. « Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, p. 297-319.
- Hudon, C., M. Belec, C. Guddemi, S. Lamothe, S. Nguyen et D. N. Nguyen. 2002. « Restoration of ground-wall armor of stator bars exposed to slot discharges ». *Electrical Insulation, IEEE International Symposium on*. p. 497-501.
- Hudon, C., M. Belec et M. Levesque. 2008. « Study of slot partial discharges in air-cooled generators ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, n° 6, p. 1675-1690.
- Hudon, C., M. Chaaban, M. Bélec et D.N. Nguyen. 2007. « Effect of Temperature and Thermal Expansion on Slot Partial Discharge Activity ». *Electrical Insulation, 2007. IEEE International Symposium on*, (Nashville, Octobre 22-24), p. 122-126.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1997. *IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils*. Norme internationale, IEEE Std 1043-1996. 19 p.
- Jackson, R.J., et A. Wilson. 1982. « Slot-discharge activity in air-cooled motors and generators ». *Proc. IEE*, vol. 129, p. 154-167.
- Johnson, John. S. 1951a. « A Maintenance Inspection Program for Large Rotating Machines ». *Winter General Meeting*, vol. 70, p. 749-755.
- Johnson, John. S. 1951b. « Slot discharge Detection between coil surface and core of high-voltage stator winding ». *Fall General Meeting* vol. 70, p. 1993-1997.
- Johnson, John. S., et Warren. Mead. 1951. « Detection of Slot Discharges in High-Voltage Stator Winding during Operation ». *Fall General Meeting*, vol. 70, p. 1998-2000.
- Kai, Wu, M. Kanegami, T. Takahashi, H. Suzuki, T. Ito, T. Okamoto et H. Yano. 2006. « Effect of mechanical vibration on the behavior of partial discharges in generator windings ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*. vol. 13, n° 2, p. 345-352.

- Kim, C. S., T. Kondo et T. Mizutani. 2004. « Change in PD pattern with aging ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 11, n° 1, p. 13-18.
- Kuffel, E. 1959. « Electron Attachment Coefficients in Oxygen, Dry Air, Humid Air and Water Vapour ». *Proceedings of Physical Society*, vol. 74, p. 287-308.
- Kurtz, M., et J.F. Lyles. 1979. « Generator insulation diagnostic testing ». *Transaction on Power Apparatus and System*. vol. 98, n° 5, p. 1596-1603.
- Lévesque, M. 2008. « Étude des taux de dégradation de barres d'alternateurs soumises à des décharges partielles d'encoche sous différentes contraintes ». Montréal, École de technologie supérieur, 112 p.
- Levesque, M., E. David, C. Hudon et M. Belec. 2010. « Effect of surface degradation on slot partial discharge activity ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, n° 5, p. 1428-1440.
- Levesque, M., E. David, C. Hudon et M. Belec. 2012. « Contribution of humidity to the evolution of slot partial discharges ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 19, n° 1, p. 61-75.
- Liese, M., et M. Brown. 2008. « Design-Dependent Slot Discharge and Vibration Sparking on High Voltage Windings ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, n° 4, p. 927-932.
- Lisowski, M., et R. Kacprzyk. 2006. « Changes proposed for the IEC 60093 Standard concerning measurements of the volume and surface resistivities of electrical insulating materials ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 13, n° 1, p. 139-145.
- Lonseth, P., et V.R. Mulhall. 1976. « High intensity slot spark discharge, its cause and cure ». IEEE International Symposium on Electrical Insulation.
- Lyles, J.F., G.C. Stone et M. Kurtz. 1988. « Experience with PDA diagnostic testing on hydraulic generators ». *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 3, n° 4, p. 824-832.
- Lyles, John F. 1980. « Slot Discharge Damage in Hydraulic Generator Winding ». CEA International Symposium on Generator Insulation Tests, p. 12-16.
- MacAlpine, J. M. K., et C. H. Zhang. 2003. « The effect of humidity on the charge/phase-angle patterns of AC corona pulses in air ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 10, n° 3, p. 506-513.

- Maughan, C.V. 1997. *Maintenance of Turbine-Driven Generators*. Schenectady: Maughan Engineering Consultants.
- Messaoudi, R., A. Younsi, F. Massines, B. Despax et C. Mayoux. 1996. « Influence of humidity on current waveform and light emission of a low-frequency discharge controlled by a dielectric barrier ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 3, n° 4, p. 537-543.
- Morshuis, P. H. F. 1993. « Partial Discharge Mechanisms ». Ph.D Thesis, Delft, Netherlands, Delft University of Technology. 170 p.
- Morshuis, P. H. F. 2005. « Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 5, p. 905-913.
- Murray, A. C., et D. G. Edwards. 1995. « Slot discharge signal patterns in high voltage machines ». *Electrical Machines and Drives, 1995. Seventh International Conference on* (Conf. Publ. No. 412). p. 161-165.
- Niemeyer, L. 1995. « A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 2, n° 4, p. 510-528.
- Novak, J. P., et R. Bartnikas. 2000. « Effect of dielectric surfaces on the nature of partial discharges ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 7, n° 1, p. 146-151.
- Odic, E., E. Jouseau, G. Vivien et C-S. Maroni. 2006. « Characterization of Medium Voltage Equipment Ageing by Monitoring of Partial Discharges Chemical and Acoustical Emission ». In *Electrical Insulation Conference Insucon 10th* (Birmingham). p. 24-29.
- Peng, X., Z. Jia, S. Gao, L. Wang et Z. Guan. 2009. « Study on Stator Winding Degradation under Bar Vibration ». *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP '09* 18-21 Oct. 2009. p. 100-103.
- Peyrous, R. 1990. « The Effect of Relative Humidity on Ozone Production by Corona Discharge in Oxygen or Air - A Numerical Simulation Part II Air ». *Ozone Science & Engineering*, vol. 12, p. 41-64.
- Schifani, R., R. Candela et P. Romano. 2001. « On PD mechanisms at high temperature in voids included in an epoxy resin ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 8, n° 4, p. 589-597.

- Sheehy, R. C., T. R. Blackburn et J. Rungis. 1996. « Accelerated aging of high voltage stator bars using a power electronic converter ». *Electrical Insulation*, 1996., IEEE International Symposium on. vol. 1, p. 230-234.
- Somerville, I., et P. Vidaud. 1985. « Surface Spreading of Charge Due to Ohmic Conduction ». *Proceedings of the Royal Society of London. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 399, n° 1817 (June 8, 1985), p. 277-293.
- Stone, G. C., E. A. Boulter, I Culbert et H. Dhirani. 2004. *Electrical Insulation for Rotating machines*. Coll. « IEEE Press Series in Power Engineering ». Piscataway, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 370 p.
- Stone, G. C., C. V. Maughan, D. Nelson et R. P. Schultz. 2008. « Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators ». *IEEE, Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, n° 5 (September/October), p. 14-21.
- Stone, G.C, et R Wu. 2009. « Examples of Stator Winding Insulation Deterioration in New Generators ». *Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009. ICPADM 2009 IEEE 9th International Conference on the. p. 180-185.
- Tanaka, T. 1986. « Internal Partial Discharge and Material Degradation ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. EI-21, n° 6, p. 899-905.
- Thienpont, J., et T.H. Sie. 1964. *Suppression des décharges superficielles dans les bobinages statoriques des machines tournantes haute tension*. Cigré, 25 p.
- Van Brunt, R. J., P. von Glahn et T. Las. 1995. « Nonstationary behaviour of partial discharge during discharge induced ageing of dielectrics ». *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 142, n° 1, p. 37-45.
- Verhaart, H. F. A., et P.C.T. Van der Laan. 1984. « The Influence of Water Vapor on Avalanches in Air ». *Journal of Applied Physics*, vol. 55, p. 3286-3292.
- Vijh, A.K. 1985. « An Electrochemical Approach to the Interface in Metal-Vacuum-Metal Arcs; Comparison and Contrast with Metal-Electrolyte-Metal Situation ». *Surface Technology*, vol. 25, n° 4 (August), p. 335-341.
- Vijh, A.K. 1986. « Perspectives in Electrochemical Physics ». In *Modern Aspects of Electrochemistry*. New York and London: Plenum Press, 404 p.
- Wilson, A. 1990. « High and low intensity slot discharge ». *Electrical Insulation*, IEEE International Symposium on, p. 363-366.
- Wilson, A. 1996. « Slot Discharge Activity in Stator Winding Insulation ». *Sixty-Third Annual International Conference of Doble Clients*, (March).

- Wolter, K. D., J. F. Johnson et J. Tanaka. 1978. « Degradation Product Analysis for Polymeric Dielectric Materials Exposed to Partial Discharges ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. EI-13, n° 5, p. 327-336.
- Wood, J. W., et R. T. Hindmarch. 1990. « Deterioration of slot stress control materials on generator stator conductors by non-mechanical mechanisms ». *Electrical Insulation, IEEE International Symposium on*. p. 367-370.
- Wood, J.W., R.T. Hindmarch, F. Frame et C. Halsall. 1980. « Slot Discharge in class B and F stator insulation systems ». *CEA International Symposium on Generator Insulation Tests*, p. 17-23.
- Wu, K., T. Ijichi, T. Kato, Y. Suzuoki, F. Komori et T. Okamoto. 2005. « Contribution of surface conductivity to the current forms of partial discharges in voids ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 6, p. 1116-1124.