

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Sc. A.

PAR
Abdelghani MEROUCHI

CARACTÉRISATION DE REVÊTEMENT ANTI-EFFLUVE À BASE DE CARBURE DE
SILICIUM POUR LES MACHINES HAUTE TENSION

MONTRÉAL, LE 4 MARS 2016
©Tous droits réservés, Abdelghani Merouchi

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

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

M. Issouf Fofana, codirecteur de mémoire
Université du Québec à Chicoutimi

M. Christian Belleau, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

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

LE 16 FÉVRIER 2016

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

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

Le support financier a été assuré par le Fond de Recherche Nature et Technologie (FRQNT) dans le cadre d'un projet équipe dont le titulaire est le professeur Fofana de l'UQAC. Les matériaux utilisés dans ce projet ont été fournis par la compagnie Andritz.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Éric David, directeur de mémoire et professeur au département de génie mécanique, pour le choix du sujet et pour avoir dirigé avec beaucoup de dévouement ce travail. Un très grand merci aussi pour son aide et ses recommandations technologiques ainsi que son support moral et sa disponibilité durant toute la période du projet.

Je remercie aussi les techniciens M. Claude-Daniel Legault et M. Drouin Michel pour leurs conseils et suggestions techniques pour réaliser le travail expérimental dans les meilleures conditions.

CARACTERISATION D'UN REVÊTEMENT ANTI-EFFLUVE À BASE DE CARBURE DE SILICUM POUR LES MACHINES HAUTE TENSION

Abdelghani MEROUCHI

RÉSUMÉ

Dans les grandes machines tournantes de haute tension, le système d'isolation est continuellement soumis à des contraintes multiples provoquant des dégradations importantes de ses propriétés électriques réduisant ainsi la durée de sa vie utile. L'utilisation d'un revêtement anti-effluves dans les têtes de bobines, est l'une des techniques utilisées pour la suppression des décharges partielles de type couronne et assurer une meilleure protection de l'équipement.

Les composites époxy/SiC sont couramment utilisés comme matériau à gradient de potentiel résistif pour les applications haute tension telles que la protection contre les décharges couronne de la tête de bobine des enroulements du stator des grandes machines tournantes. En fonction de la taille des grains, de la concentration et de la composition des matériaux, une large gamme de paramètres électriques peut être atteinte pour les composites époxy/SiC. Dans cette recherche, les valeurs optimisées des caractéristiques électriques du matériau à gradient de potentiel (donnant la valeur la plus basse du champ électrique maximal) ont été calculées numériquement pour une géométrie donnée, et il a été constaté que ces valeurs optimales varient dans la gamme accessible par la technologie SiC. Une autre méthode de modélisation (FEM) a été utilisée pour modéliser la même géométrie afin de valider les résultats obtenus par la méthode analytique.

La température étant un facteur non négligeable dans la conception de ces systèmes, des mesures ont été réalisées sous différentes températures dans le but d'évaluer la performance du revêtement anti-effluve en présence de contraintes thermiques; il a été montré que l'augmentation de la température diminue la résistivité électrique du SiC mais le champ électrique développé à la sortie de l'encoche ne présente pas un risque potentiel de décharges partielles dans cette région.

Mots clés : Composites époxy/SiC, simulation numérique, gradient de potentiel résistif, revêtement anti-effluves.

CHARACTERISATION OF ANTI-CORONA COATING BASED ON SILICON CARBIDE FOR HIGH VOLTAGE MACHINES

Abdelghani MEROUCHI

ABSTRACT

In large high voltage rotating machines, the insulation system is continuously subjected to multiple stresses causing significant damage to its electrical properties and thereby reducing the duration of its useful life. The use of an anti-corona coating in the end-winding portion is one of the techniques used for the suppression of corona discharges and ensures a better protection of the equipment.

Epoxy/SiC composites are commonly used as resistive stress grading material for high voltage applications, such as for the corona protection of the end-winding of the stator windings of large rotating machines. Depending on the grain size, concentration and composition of materials, a wide range of electrical parameters can be reached for epoxy/SiC composites. In this document, the optimum values of the electrical characteristics of the stress grading material (yielding the lowest value of the maximum electrical field) were calculated numerically for a given geometry, and it was found that the optimum values lay in the range accessible by SiC technology. Another modeling method (FEM) was used to model the same geometry in order to validate the results obtained by the analytical method.

Since temperature is an important factor in the design of such systems, measurements were carried out under different temperatures in order to evaluate the behavior of the anti-corona coating in the presence of heat stresses; it was shown that the increase of temperature decreases the electric resistivity of epoxy/SiC composites but the electrical field developed at the exit from slot did not present a potential risk of partial discharges in this region.

Keywords: Epoxy-SiC composites, numerical simulation, resistive stress-grading, anti-corona coating.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT D'ART : SYSTÈMES D'ISOLATION, DÉCHARGES PARTIELLES ET REVÊTEMENT ANTI-EFFLUVE	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Motivation.....	6
1.3 L'enroulement statorique d'un générateur.....	8
1.4 Système d'isolation.....	9
1.4.1 Isolation des brins conducteurs.....	11
1.4.2 Isolation des spires.....	12
1.4.3 Isolation de masse.....	13
1.5 Matériaux utilisés dans le système d'isolation des barres	14
1.5.1 Mica	15
1.5.2 Résines d'époxy	16
1.5.3 Polyester.....	17
1.6 Contraintes dégradant le système d'isolation	18
1.6.1 Contraintes électriques.....	18
1.6.2 Contraintes thermiques	19
1.6.3 Contraintes mécanique.....	21
1.6.4 Contraintes environnementales.....	21
1.7 Les décharges partielles	22
1.7.1 L'activité de décharges couronne sur l'extrémité de la barre.....	23
1.7.2 Décharges partielles internes	23
1.7.3 Décharges dans l'encoche.....	25
1.8 Méthodes de suppression des décharges dans l'extrémité de la barre	26
1.8.1 Gradient de potentiel capacitif.....	27
1.8.2 Gradient de potentiel résistif non linéaire.....	28
1.9 Conclusion	28
CHAPITRE 2 MODÉLISATION ET RÉALISATIONS EXPÉRIMENTALES	29
2.1 Introduction.....	29
2.2 Calcul du champ électrique.....	30
2.2.1 Les équations de Maxwell	30
2.2.1.1 Lois fondamentales	31
2.2.2 L'équation de Laplace.....	33
2.2.3 Méthode analytique.....	34
2.2.3.1 Coordonnées cartésiennes.....	35
2.2.3.2 Champ uniforme	36
2.2.4 Méthode numérique	37
2.3 Modélisation de l'extrémité de la barre par un circuit équivalent	38
2.4 Le revêtement à gradient de potentiel.....	41

2.4.1	La poudre de SiC	41
2.4.2	La conductivité électrique du SiC.....	42
2.5	Travail expérimental	43
2.5.1	Techniques de mesure de la résistivité électrique de SiC	43
	2.5.1.1 Mesures courant-tension	44
	2.5.1.2 Mesures dans le domaine temporel.....	44
2.5.2	Montage expérimental	45
	2.5.2.1 La source haute tension.....	46
	2.5.2.2 Application LABVIEW	47
	2.5.2.3 La communication GPIB	48
	2.5.2.4 Électromètre & multimètre Keithley	49
	2.5.2.5 La carte d'acquisition.....	50
	2.5.2.6 Résistance en série & pont de diodes.....	50
2.5.3	Préparation des échantillons époxy/SiC.....	51
2.5.4	Réalisation des tests électriques.....	52
2.5.5	Caractérisation de la résistivité des échantillons époxy/SiC.....	55
2.6	Conclusion	57
CHAPITRE 3	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS DE SIMULATIONS ET DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	59
3.1	Introduction.....	59
3.2	Simulation numérique avec Matlab	59
3.2.1	Modèle de simulation.....	60
	3.2.1.1 Les conditions initiales	61
	3.2.1.2 Les conditions aux limites	61
3.2.2	Optimisation des paramètres électriques des composites époxy/SiC	65
	3.2.2.1 Variation de n	65
	3.2.2.2 Variation de ρ_0	66
	3.2.2.3 Évolution du champ et du potentiel électrique avec un revêtement à gradient de potentiel avec les périmètres optimisés	68
3.3	Simulation numérique sous COMSOL	72
3.3.1	Définition des paramètres de la géométrie.....	72
3.3.2	La configuration des matériaux	73
3.3.3	La sélection du module physique.....	74
3.3.4	Maillage	75
3.3.5	Résolution du problème	76
3.3.6	Visualisation des résultats.....	76
3.4	Comparaison entre la méthode analytique et la méthode des éléments finis.....	81
3.5	Résultats des tests électrique et caractérisation des paramètres de SiC.....	82
3.5.1	Tests à la température ambiante (23 °C).....	83
3.5.2	Tests avec variation de la température.....	85
	3.5.2.1 Résultats aux une température de 40, 60 et 80°C.....	85
3.6	Conclusion	92

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Évolution des matériaux dans l'isolation des machines14
Tableau 1.2	Composés principaux dans deux types de mica15
Tableau 3.1	Paramètres des matériaux utilisés dans la simulation74

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Les défauts majeurs des hydro générateurs	6
Figure 1.2	Les causes racines des défauts	7
Figure 1.3	Stator d'un générateur de haute tension présentant	8
Figure 1.4	Schéma de principe d'un enroulement statorique connecté en étoile avec deux circuits en parallèle par phase	9
Figure 1.5	Système d'isolation d'une barre d'alternateur de haute tension	10
Figure 1.6	Bobine d'un alternateur de haute tension.....	12
Figure 1.7	Structure chimique de la résine d'époxy bisphénol	16
Figure 1.8	Structure chimique d'une résine de polyester	17
Figure 1.9	Isolant dégradé à cause des décharges internes	24
Figure 1.10	Traces de décharges d'encoche sur la surface d'une barre	26
Figure 1.11	Système de gradient de potentiel utilisant	27
Figure 2.1	Coupe transversale d'une extrémité d'une barre.....	38
Figure 2.2	Circuit équivalent de l'extrémité de la barre de générateur haut tension	39
Figure 2.3	Circuit équivalent d'un élément de	39
Figure 2.4	Poudres de SiC	42
Figure 2.5	Mesure typique courant-tension pour des rubans époxy/SiC	44
Figure 2.6	Principe de la mesure dans le domaine temporel.....	45
Figure 2.7	Diagramme résumant le montage	46
Figure 2.8	Source de haute tension GLASSMAN (appareil du haut)	46
Figure 2.9	L'interface d'utilisateur de l'application LABVIEW	48
Figure 2.10	L'électromètre Keithley.....	49

XVIII

Figure 2.11	Mélange de SiC, résine et durcisseur	51
Figure 2.12	Échantillon de époxy/SiC contenant 7mg de SiC 400 G	52
Figure 2.13	Courant de charge et de décharge d'un échantillon d'époxy/SiC	53
Figure 2.14	Résistivité électrique versus le champ électrique d'un échantillon d'époxy/SiC	55
Figure 2.15	$\log(\rho)$ versus $E^{\beta=0,5}$	56
Figure 3.1	Illustration des conditions aux limites	61
Figure 3.2	Le potentiel électrique en fonction du temps et de la position x	62
Figure 3.3	Le champ électrique en fonction du temps et de la position x	62
Figure 3.4	Le potentiel électrique à la position initiale ($x = 0$)	63
Figure 3.5	Le champ électrique à la position initiale ($x = 0$)	63
Figure 3.6	Le potentiel maximal (sur toute la plage temporelle) en fonction de la position x	64
Figure 3.7	Le champ électrique maximal (sur toute la plage temporelle) en fonction de la position x	64
Figure 3.8	Le champ électrique maximal en fonction de la distance x	65
Figure 3.9	Le champ électrique maximal versus n	66
Figure 3.10	Le champ électrique maximal en fonction de la distance x et $\log(\rho_0)$	67
Figure 3.11	Le champ électrique maximal versus $\log(\rho_0)$	67
Figure 3.12	Le potentiel électrique en fonction du temps et de la position x	68
Figure 3.13	Le champ électrique en fonction du temps et de la position x	69
Figure 3.14	Le potentiel maximal en fonction de la position x	69
Figure 3.15	Le champ électrique maximal	70
Figure 3.16	Le potentiel électrique à la position initiale ($x = 0$)	70
Figure 3.17	Le champ électrique à la position initiale ($x = 0$)	71

Figure 3.18	Représentation spectrale du champ électrique	71
Figure 3.19	Géométrie de l'extrémité de la barre en 2D sous COMSOL	73
Figure 3.20	Matériaux utilisés.....	74
Figure 3.21	Le maillage.....	76
Figure 3.22	Le potentiel électrique en 2D	77
Figure 3.23	Le potentiel électrique versus la position x à l' instant t = 0.00417s.....	78
Figure 3.24	Le potentiel électrique V en fonction du temps pour 5 positions x	78
Figure 3.25	Le champ électrique en 2D	79
Figure 3.26	Le champ électrique versus la position x à l' instant t = 0.00417s	80
Figure 3.27	Le champ électrique E en fonction du temps pour 5 positions x	80
Figure 3.28	Le potentiel électrique maximal obtenu par Matlab et Comsol	81
Figure 3.29	Le champ électrique maximal obtenu par Matlab et COMSOL	82
Figure 3.30	La résistivité électrique en fonction du champ électrique pour différents échantillons d'époxy/SiC.....	83
Figure 3.31	ρ_0 versus la masse du SiC (Poudre 400 G)	84
Figure 3.32	n versus la masse du SiC (Poudre 400 G).....	84
Figure 3.33	Mesure avec variation de la température	85
Figure 3.34	La résistivité électrique en fonction de la racine carrée du champ électrique a la temperature T = 40 °C	86
Figure 3.35	La résistivité électrique en fonction de la racine du champ électrique a la temperature T = 60 °C.....	86
Figure 3.36	La résistivité électrique en fonction de la racine du champ électrique a la temperature T = 80 °C.....	87
Figure 3.37	ρ_0 versus n à différentes températures.....	88
Figure 3.38	La résistivité électrique versus le champ électrique aux différentes températures	89

Figure 3.39	ρ_0 versus la température pour deux échantillons d'une même poudre de SiC (400G)	89
Figure 3.40	n versus la température pour deux échantillons d'une même poudre de SiC (400G)	90
Figure 3.41	Le champ électrique maximal en fonction de la position avec la variation de la température	91
Figure 3.42	Le champ électrique à une distance $x = 0.01\text{m}$ en fonction du temps t et avec la variation de la température	91

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

SiC	Silicon Carbide
FEM	Finite Element Method
CIGRÉ	Conseil International des Grands Réseaux Électriques
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
GPIB	General Purpose Interface Bus
NI DAQ	National Instrument Data Acquisition

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

\vec{H}	Le champ magnétique en A/m.
\vec{E}	Le champ électrique en V/m.
\vec{D}	La densité de déplacement électrique en C/m ² .
\vec{J}	La densité de courant en A/m ² .
\vec{B}	La densité de flux magnétique dans Wb/m ² .
σ	La densité de charge en C/m ³ .
ϵ_0	La permittivité dans le vide = $8,854 \times 10^{-12}$ F/m.
ϵ_r	La permittivité relative aussi connu comme constante diélectrique.
ϵ	La permittivité du milieu.
μ	La perméabilité du milieu.
μ_0	La perméabilité du vide = $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.
μ_r	La perméabilité relative.
q	La charge électrique d'une particule.
u	Le potentiel électrique en V.
I	Le courant électrique en A.
R	La résistance électrique en Ω .
ρ	La résistivité électrique en Ω m.
n	Paramètre de non linéarité de la résistivité électrique du carbure de silicium.
β	Paramètre de non linéarité de la résistivité électrique du carbure de silicium.
l	La distance en m.
dx	Élément de longueur du revêtement anti-effluve

INTRODUCTION

Dans les grands générateurs des centrales électriques, l'isolation des enroulements statoriques est exposée à une combinaison de contraintes électriques, thermiques et mécaniques en service. À long terme, ces multiples contraintes provoquent le vieillissement de l'isolation, ce qui éventuellement conduit à la rupture définitive d'isolation. Le système d'isolation est l'un des composants les plus complexes dans les applications haute tension; il se compose de divers matériaux spécifiques permettant de faire face aux différentes contraintes et d'assurer une bonne performance de l'équipement.

Les tensions élevées dans les générateurs électriques modernes créent des champs électriques élevés non uniformes qui nécessitent des matériaux remplissant la fonction de réduction de la pente maximale du potentiel électrique à la surface de l'isolation du bobinage. Les champs électriques développés dans la région d'extrémité de la barre peuvent entraîner des décharges partielles dans l'air ambiant et conséquemment une dégradation potentielle du système d'isolation (en plus de générer de l'ozone dans la centrale, ce qui entraîne également des problèmes pour le personnel de la centrale).

Les composites époxy/SiC avec une charge élevée de SiC sont couramment utilisés pour produire des peintures pour des revêtements résistifs à gradient de potentiel dans les applications à haute tension comme dans les têtes de bobines dans les machines tournantes et les terminaisons des câbles HV. En vertu de l'augmentation des niveaux de tension et de la diminution de la taille des composants utilisés pour des applications haute tension, il y a un besoin de matériaux à gradient de potentiel permettant d'améliorer et d'optimiser la conception des systèmes d'isolation à haute tension.

Pour une concentration de SiC donnée dans un composite époxy/SiC, les propriétés électriques sont extrêmement dépendantes de la qualité de la charge de SiC et dans une moindre mesure de la taille des grains et la distribution de tailles, ce qui donne une large

gamme de paramètres électriques caractérisant la non-linéarité de la conductivité électrique des composites époxy/SiC.

Notre travail consiste à caractériser un revêtement anti-effluve (époxy/SiC), permettant de contrôler et d'optimiser le champ électrique dans l'extrémité de la barre d'alternateur haute tension. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître le comportement du champ électrique dans cette région critique de la bobine; plusieurs méthodes de calcul du champ électrique ont été développées et peuvent être utilisées pour des configurations plus complexes.

Dans le premier chapitre, nous présenterons un état d'art sur le système d'isolation utilisé dans les machines tournantes de haute tension, les matériaux utilisés et les différentes contraintes dégradant les systèmes d'isolation. À la fin du chapitre, nous aborderons le phénomène de décharges partielles dans les générateurs de haute tension, notamment la décharge de type couronne, son mécanisme et les différentes techniques permettant la suppression de cette dernière.

Le deuxième chapitre présentera les deux méthodes de modélisation du revêtement anti-effluve :

- la première méthode consiste à modéliser le revêtement par une ligne de transmission RC distribuée, cette dernière est définie par une équation différentielle à dérivées partielles qui peut être résolue sous Matlab;
- la deuxième méthode est basée sur la modélisation par éléments finis. En utilisant un logiciel de modélisation par éléments finis (COMSOL), nous allons configurer la géométrie réelle de l'extrémité de la barre avec un revêtement à gradient de potentiel.

La deuxième partie du chapitre, présentera le travail expérimental à réaliser, notamment la fabrication des échantillons époxy/SiC, la méthode utilisée pour mesurer la résistivité électrique et le matériel utilisé pour réaliser ces mesures.

Le dernier chapitre est dédié à la présentation des différents résultats obtenus. Dans un premier temps, nous allons présenter les résultats de simulation obtenus par les deux méthodes de modélisation avec une comparaison des résultats. Dans un deuxième temps, nous présenterons et discuterons des résultats expérimentaux obtenus.

CHAPITRE 1

ÉTAT D'ART : SYSTÈMES D'ISOLATION, DÉCHARGES PARTIELLES ET REVÊTEMENT ANTI-EFFLUVE

1.1 Introduction

Le système d'isolation des machines tournantes haute tension, représente un élément très important dans la conception en ce qui concerne son coût de fabrication, sa maintenance et son rôle par rapport à la durée de vie de la machine.

Dans le stator, la nécessité de poser la surface extérieure de la barre en contact direct avec l'encoche dans le noyau magnétique, augmente le risque de production de décharges électriques localisées, dites décharges partielles, le long de la barre dans tout vide entre la barre et le circuit magnétique statorique de la machine. Les décharges partielles ne produisent pas un arrêt intempestif de la machine, mais au cours de la durée de vie du stator, elles vont entraîner l'érosion progressive de l'isolation conduisant éventuellement à une défaillance de la machine (Allison, 2000; Rivenc et Lebey, 1999).

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter les différents éléments qui composent un système d'isolation pour les barres des générateurs haute tension, particulièrement les hydro-générateurs, ainsi qu'une petite revue sur les différentes contraintes qui peuvent dégrader l'isolation et sur les principaux matériaux utilisés. À la fin du chapitre, nous présenterons le phénomène de décharge partielle dans les différentes parties de la machine.

1.2 Motivation

Plusieurs statistiques ont été réalisées traitant des causes de défaillance des machines tournantes de haute tension en général, et en particulier pour le cas des générateurs électriques de haute puissance. L'une de ces études qui a été réalisée par un comité d'étude du CIGRE¹, fait la distinction entre le dommage qui a causé la défaillance de la machine et la cause racine qui produit ce dommage.

L'enquête menée par le comité sur 1199 hydro-générateurs, fournit les résultats détaillés de 69 incidents. (Brütsch et Chapman, 2010; Brutsch et al., 2008; Rusu-Zagar, Notingher et Stancu).

Les résultats sont présentés sur les figures 1.1 et 1.2 ci-dessous :



Figure 1.1 Les défauts majeurs des hydro générateurs
Tirée de Rusu-Zagar, Notingher et Stancu (2014)

¹ Conseil International des Grands Réseaux Électriques

Selon cette étude, les principaux défauts qui peuvent empêcher le fonctionnement de ce type de machines, sont les défauts liés principalement à leur système d'isolation avec un pourcentage assez élevé (56%). Les défauts d'origine mécanique se trouvent au deuxième rang avec un pourcentage de 24%. Les problèmes thermiques ainsi que les défauts de paliers représentent 20% des défaillances, ce qui est relativement négligeable devant les défauts de l'isolation.

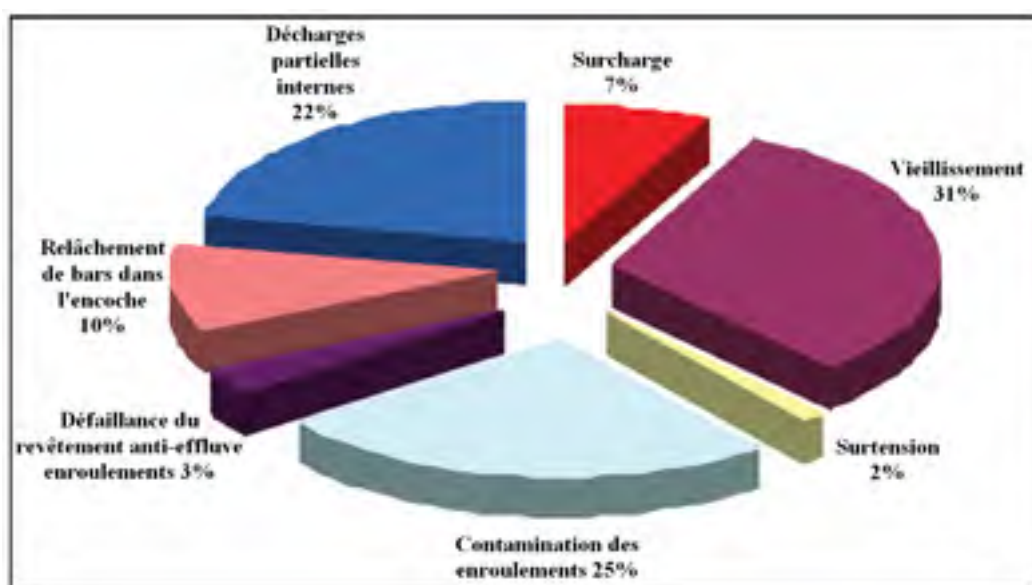


Figure 1.2 Les causes racines des défauts
Tirée de Rusu-Zagar, Notingher et Stancu (2014)

Les causes racines de la détérioration du système d'isolation sont divisées en 7 groupes; le vieillissement, la contamination des enroulements et les décharges partielles internes représentent les facteurs majeurs (plus de 75% de l'ensemble des causes) qui peuvent dégrader le système d'isolation des hydro-générateurs et des machines de hautes tension en général d'où la nécessité de développer et d'améliorer la conception des systèmes d'isolation.

1.3 L'enroulement statorique d'un générateur

L'enroulement de stator de générateurs haute tension est constitué de barres ou de bobines conductrices en cuivre bien isolées, elles sont distribués autour du diamètre intérieur du noyau de stator dans des encoches espacées de façon égale dans le circuit magnétique du stator, afin d'assurer la symétrie du flux avec le champ produit par le rotor. Chaque encoche comporte deux barres conductrices, l'une au-dessus de l'autre comme montre la figure 1.3 et la figure 1.4.

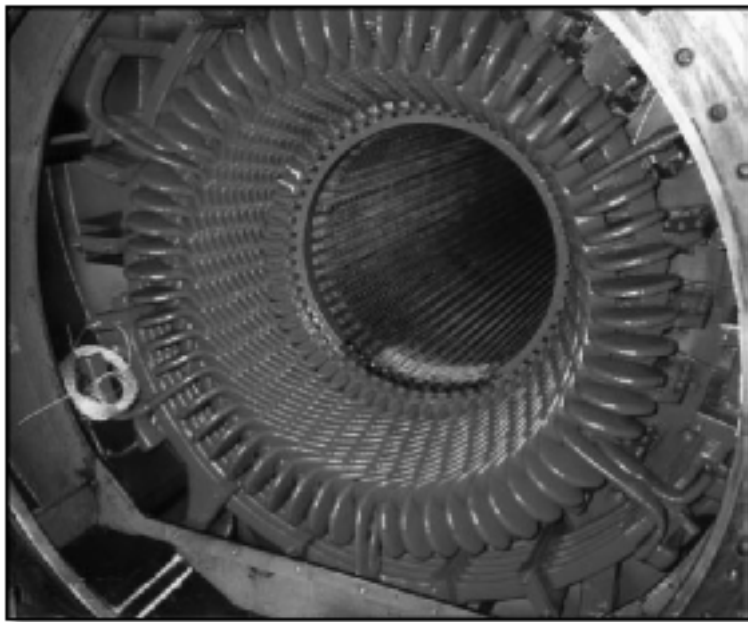


Figure 1.3 Stator d'un générateur de haute tension présentant la connexion des barres
Tirée de Klempner et Kerszenbaum (2004)

L'enroulement du stator est divisé en trois phases qui sont généralement connectées en étoile ou en triangle; elles sont reliées d'une manière à créer une symétrie entre elles dans un arc de 360 degrés dans le circuit magnétique statorique. La distribution de l'enroulement est effectuée de manière à produire un déphasage de 120 degrés dans les signaux de tension d'une phase par rapport à l'autre, d'où le terme "tension triphasée", comme montre la figure 1.4. (Klempner et Kerszenbaum, 2004; 2011; Stone et al., 2004).

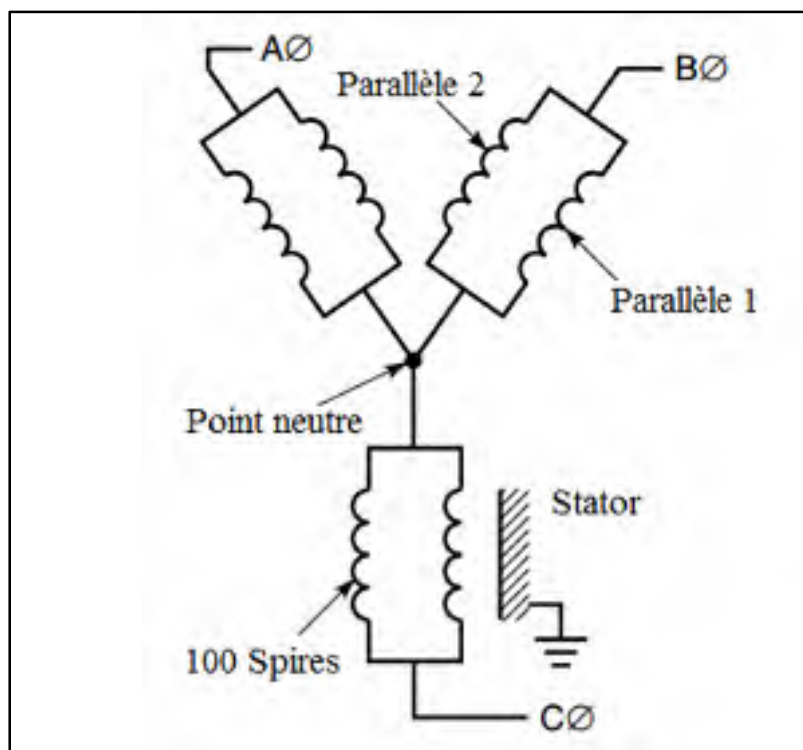


Figure 1.4 Schéma de principe d'un enroulement statorique connecté en étoile avec deux circuits en parallèle par phase
Tirée de Stone (2004)

1.4 Système d'isolation

Le système d'isolation du stator est l'un des composants les plus critiques de tous les types et les tailles de machine, notamment pour assurer le bon fonctionnement et la bonne performance durant la durée de vie de la machine. En effet, celui-ci est exposé directement et en permanence aux différentes contraintes, de telle sorte que la dégradation progressive de l'isolation est pratiquement inévitable. Les enquêtes industrielles montrent que les problèmes du bobinage statorique sont l'une des causes principales de défaillance des machines électriques (Azizi et Gholami, 2014; Lee et Yang, 2005).

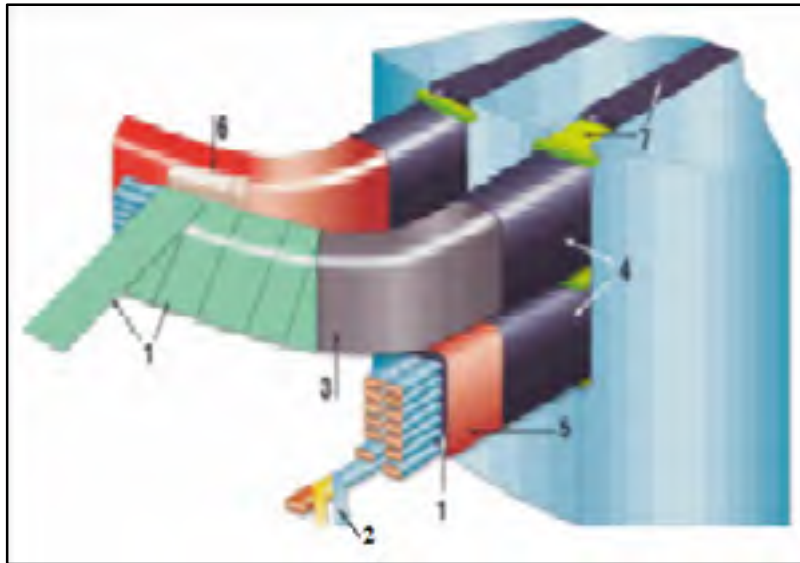


Figure 1.5 Système d'isolation d'une barre d'alternateur
de haute tension
Tirée de Kaufhold (2002)

- 1) isolant principal;
- 2) isolant du conducteur;
- 3) protection anti-couronne d'extrémités (revêtement anti-effluves);
- 4) protection anti-couronne de la partie droite (mur semi-conducteur de l'encoche);
- 5) peinture de protection;
- 6) renfort entre barres;
- 7) cales d'encoche.

Le système d'isolation de l'enroulement du stator contient plusieurs composants de différentes caractéristiques, qui garantissent ensemble une haute protection contre les courts-circuits, la transmission de la puissance perdue par l'effet joule du conducteur et la stabilité mécanique du conducteur par le biais de l'amortissement des vibrations causées par la force électromagnétique (voir figure 1.5). Les composants de base du système d'isolation statorique sont détaillés ci-dessous.

1.4.1 Isolation des brins conducteurs

La spire de la bobine des machines de haute tension est généralement formée d'un empilement de plusieurs conducteurs distincts de petites sections, pour deux principales raisons: mécanique et électrique.

D'un point de vue mécanique, un conducteur qui est assez grand pour transporter le courant nécessaire dans la bobine ou la barre pour une grande machine aura une section transversale relativement grande. Autrement dit, une grande section du conducteur est nécessaire pour atteindre le courant admissible souhaité. Un grand conducteur est difficile à plier et à mettre dans la forme bobine/barre requise. Une spire formée de petits conducteurs est plus facile à plier dans la forme requise.

D'un point de vue électrique, il y a des raisons pour faire des conducteurs de petites sections transversales et les isoler les uns des autres. Il est bien connu de la théorie électromagnétique que si un conducteur en cuivre a une grande section transversale, le courant aura tendance à circuler sur la périphérie du conducteur. Ceci est connu comme l'effet de peau. L'effet de peau engendre une profondeur de peau à travers laquelle la plupart des courants circulent. La profondeur de peau du cuivre est de 8.5 mm à 60 Hz.

Si le conducteur a une section transversale telle que l'épaisseur est supérieure à 8,5 mm, il y a une tendance pour le courant de ne pas circuler à travers le centre du conducteur, ce qui implique que le courant ne fait pas usage de toute la section transversale disponible. Cela se traduit par une résistance en courant alternatif efficace qui est supérieure à la résistance en courant continu. Cette résistance en courant alternatif donne lieu à une plus grande perte par effet Joule (RI^2) que si la même section transversale avait été faite à partir de fils isolés les uns des autres pour éviter l'effet de peau. De plus, les fils sont torsadés dans une transposition appelée la transposition Roebel de telle sorte que chaque fil occupe toutes les positions de la section sur la longueur d'une encoche.

La différence de potentiel entre les fils est inférieure à quelques dizaines de volts et par conséquent, l'isolation inter-brins peut être très mince. Toutefois, cette couche est exposée à des dommages au cours du processus de fabrication de la bobine ou de la barre. Elle doit donc avoir de bonnes propriétés mécaniques. Étant donné que l'isolation du brin est immédiatement adjacente aux conducteurs en cuivre qui transportent le courant statorique, lequel produit la perte de puissance par effet Joule, elle est donc exposée à des températures élevées dans le stator. Elle doit conséquemment avoir de bonnes propriétés thermiques.

Le dommage de cette couche ne cause pas vraiment la défaillance de l'enroulement, mais il augmente les pertes ce qui provoque des augmentations locales de températures dues aux courants circulants. (Klempner et Kerszenbaum, 2004; 2011; Stone et al., 2004)

1.4.2 Isolation des spires

L'objectif de l'isolation entre spires d'une même bobine (figure 1.6), est de protéger la bobine contre les court-circuits entre ses spires. Cette isolation est exposée à des contraintes mécaniques et thermiques. Les plus fortes contraintes mécaniques ont tendance à se produire dans le processus de formation de la bobine, qui exige aux tours d'isolation recouvert d'être pliés à travers de grands angles, ce qui peut étirer et fissurer l'isolation. De plus, de très grandes forces électromagnétiques transitoires agissent sur les spires lors du démarrage des moteurs ou à l'extérieur de phase de synchronisation dans les générateurs.



Figure 1.6 Bobine d'un alternateur de haute tension

Les contraintes thermiques sur l'isolation de spire sont essentiellement les mêmes que celles décrites ci-dessus pour l'isolation de brin. L'isolation est adjacente à son tour aux conducteurs en cuivre, qui produisent des pertes de puissance par effet Joule dans le bobinage.

1.4.3 Isolation de masse

L'isolation de masse est la composante de séparation entre les conducteurs et le noyau du stator qui est relié à la masse. Le dommage de cette isolation déclenche habituellement un relai de protection et met le moteur ou le générateur hors ligne. Pour une longue durée de vie, cette isolation doit supporter les rigueurs des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales auxquelles elle est exposée.

L'isolant de la masse devrait avoir la résistance thermique la plus faible possible, afin d'éviter des températures élevées dans le cuivre. Pour cela, il est nécessaire de choisir les matériaux de conductivité thermique élevée et des matériaux avec un minimum de bulles d'air, car les bulles d'air bloquent l'écoulement de la chaleur, de la même façon que deux couches de verre séparées par un petit espace d'air inhibent le flux de chaleur à travers une fenêtre. Par conséquent, l'isolant doit être capable de fonctionner à des températures élevées (dans le cuivre) et être fabriqué de manière à réduire au minimum la formation de bulles d'air à l'intérieur.

D'un point de vue mécanique, cette isolation a aussi la mission d'amortir les vibrations causées par les forces électromagnétiques. Si l'isolant contient des bulles d'air, les conducteurs en cuivre pourraient être libres de vibrer. Cela risque de provoquer des petites explosions dans l'isolation de la masse et, en permettant aux brins de cuivre de vibrer les uns contre les autres, cela conduit à l'usure de l'isolation. De ce fait, il est important de choisir un matériau non compressible entre le cuivre et la surface intérieure de l'encoche afin d'éliminer les vibrations des conducteurs de l'enroulement. (Stone et al., 2004)

1.5 Matériaux utilisés dans le système d'isolation des barres

La sélection des systèmes d'isolation électrique pour machines tournantes a toujours été dépendante des matériaux disponibles, de leur coût, des besoins techniques de l'application ainsi que des coûts relatifs aux divers procédés de fabrication disponibles à l'époque concernée.

Dans un environnement de plus en plus concurrentiel et avec le développement des connaissances des capacités et des limites des matériaux naturels existants, des combinaisons de matériaux ayant différentes propriétés physiques et chimiques ont été développées afin de concevoir des systèmes d'isolation qui pourraient être exploités pour protéger la machine contre les différentes contraintes (thermique, électrique, ambiante, et mécanique). Le tableau ci-dessous illustre l'évolution de l'utilisation des matériaux diélectriques dans les générateurs ainsi que l'évolution du niveau des contraintes électriques. (Klempner et Kerszenbaum, 2004; 2011; Stone et al., 2004)

Tableau 1.1 Évolution des matériaux dans l'isolation des machines
Tiré de McDermid (1993)

Matériaux	La tension de service des machines (kV)	La date d'application	Le champ électrique supporté (kV/mm)
Asphalte-Mica	11	1923	1.1
Asphalte-Mica	11	1931	1.4
Asphalte-Mica	13.8	1951	1.5
Asphalte-Mica	13.8	1964	1.3
Époxy-Mica	13.8	1963	2.3
Polyester-Mica	13.8	1970	2
Époxy-Mica	13.8	1977	2.5
Époxy-Mica	13.8	1989	2.4

Les paragraphes suivants présentent les principaux matériaux utilisés dans les systèmes d'isolation modernes dans les machines tournantes haute tension.

1.5.1 Mica

Le mica a été utilisé comme diélectrique et comme renfort diélectrique depuis près de 100 ans. Il a été utilisé en tant qu'un des premiers matériaux isolant solides pour machines tournantes en raison de ses propriétés diélectriques et de ses caractéristiques thermiques.

Les structures chimiques des micas sont des complexes de silicates d'aluminium contenant également du potassium, magnésium, fer, sodium, lithium, fluor, ainsi que des traces d'autres éléments. Les principaux types de mica sont les micas muscovite, $H_2KAl_3(SiO_4)_3$, phlogopite $[H, K(Mg, F)_3]Mg_3Al(SiO_4)_3$ et biotite, $(H, K)_2(Mg, Fe)_2(Al, Fe)_2(SiO_4)_3$. Les autres micas lépidolite et paragonite, sont moins connus et moins répandus. Le tableau suivant présente les pourcentages des principaux constituants de deux types de mica (muscovite et phlogopite).

Tableau 1.2 Composés principaux dans deux types de mica
Tiré de Shugg (1995)

	muscovite (%)	Phlogopite (%)
SiO₂	45-47	38-43
Al₂O	30-38	12-17
K₂O	9-12	9-11
MgO	traces	23-29

Le développement de papier de mica qui a commencé à la fin des années 1940 a conduit à des températures de fonctionnement plus élevées, à des machines plus efficaces, et pouvant opérer sous des contraintes électriques et mécaniques élevées. (Neal, 1999; Stone et al., 2004)

1.5.2 Résines d'époxy

Les mots «époxy» ou «époxyde» font référence à un composé contenant plus d'un groupe époxyde par molécule, qui est un atome d'oxygène uni à deux atomes de carbone déjà joints d'une autre façon. La résine époxy est l'un des groupes de résines contenant au moins un composé époxy.

La plupart des premiers époxydes étaient des thermoplastiques solides sans solvant à la température ambiante et ne sont pas très appropriés pour une utilisation comme résines d'imprégnation à faible viscosité. Les résines époxy solides peuvent être mélangées à des époxydes monofonctionnels de faible viscosité, comme les éthers glycidyliques, pour faire un liquide visqueux à la température ambiante.

La plus importante résine d'époxy utilisée comme matériau isolant électrique est de type bisphénol, c'est-à-dire qui provient de la réaction chimique entre l'acétone et le phénol. La structure chimique de cette résine est représentée sur la figure 1.7.

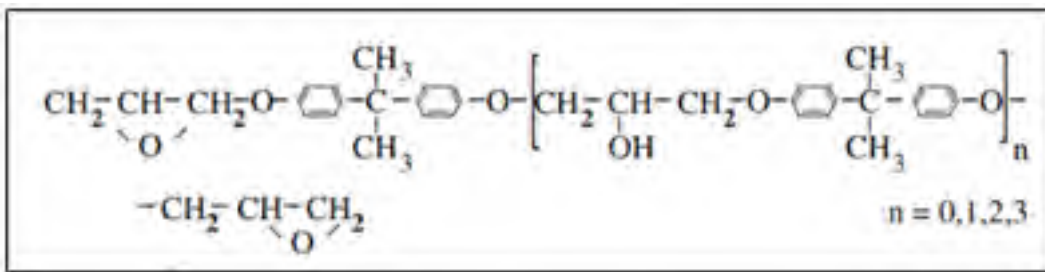


Figure 1.7 Structure chimique de la résine d'époxy bisphénol
Tirée de Kuffel, Kuffel et Zaengl (2000)

Lorsque $n = 0$, le produit est l'éther diglycidylique ayant un poids moléculaire de 340 g/mol. Lorsque $n = 10$, le poids moléculaire est d'environ 3000 g/mol, ce qui est relativement élevé pour les résines époxy. Par conséquent, on peut dire que, dans l'étape non durci, les résines époxy sont des polymères ayant un faible degré de polymérisation. (Azuaje et Torres, 2006;

Chen et al., 2006; Jia, Hao et Xie, 2006; Kuffel, Kuffel et Zaengl, 2000; Neal et Whitman, 1986)

1.5.3 Polyester

Les matériaux en polyester ont été utilisés pendant de nombreuses années en tant que matériaux de support dans des systèmes d'isolation pour les applications à basse tension. Ils ont été appréciés malgré le fait que leurs propriétés thermiques ne soient pas aussi bonnes que celles des époxyds. En effet, ils ont d'autres caractéristiques qui les rendaient extrêmement utiles.

Les matériaux en polyester sont également utilisés dans les systèmes d'isolation dans les dispositifs de haute tension, mais surtout en tant que base pour une gamme de vernis. Ils ont été considérés comme matériaux de support pour le papier de mica, dans les têtes de bobines en raison de leurs caractéristiques de dilatation à des températures élevées. La résine polyester est produite par estérification directe de l'éthylène glycol et de l'acide téréphtalique, ou par échange d'ester catalysé entre glycol et de téréphtalate de diméthyle, suivie par une polycondensation menant à un polymère de haut poids moléculaire, tel qu'illustré à la figure 1.8.

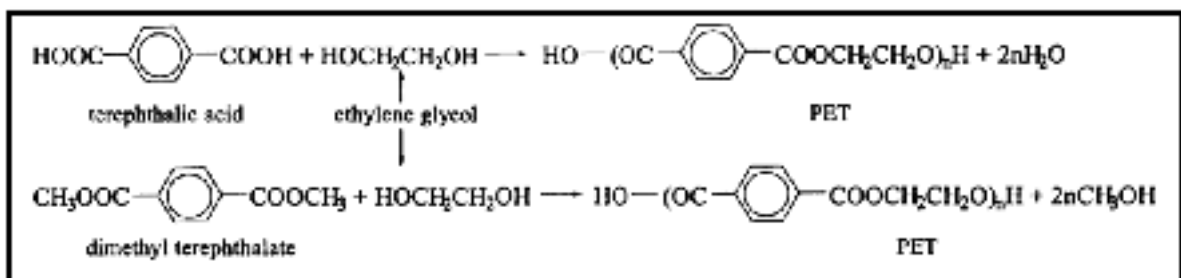


Figure 1.8 Structure chimique d'une résine de polyester
Tirée de Shugg (1995)

Le film de polyester est caractérisé par sa forte résistance à la traction et sa flexibilité, de bonnes propriétés diélectriques et une température utile variant entre -200 et 150 ° C. (Neal et Whitman, 1986; Shugg, 1995; Stone et al., 2004)

1.6 Contraintes dégradant le système d'isolation

L'isolation électrique dans l'enroulement statorique des machines haute tension, est l'une des applications les plus difficiles pour une isolation. Elle doit simultanément résister à des contraintes électriques, thermiques, mécaniques et environnementales continues et transitoires. Ces contraintes dégradent progressivement l'isolation, et elles sont très probablement la cause de la mise au rebut ou du rebobinage d'une machine tournante.

Le concepteur du système d'isolation doit déterminer et souligner toute application particulière du moteur, et de développer un système d'isolation qui ne se détériore pas de façon majeure au cours de la durée de vie du moteur. Avant de concevoir un système d'isolation de la machine tournante, il est très important de définir toutes les contraintes qui peuvent se présenter dans l'environnement de travail de la machine car la conception correcte assure habituellement que le vieillissement lié aux différentes contraintes ne réduit pas la durée de vie de la machine. Les paragraphes suivants présentent un aperçu sur différentes contraintes, et comment ces contraintes peuvent dégrader l'isolation de la bobine ou des barres du bobinage statorique. (Kuffel, Kuffel et Zaengl, 2000; Toliyat et Kliman, 2004)

1.6.1 Contraintes électriques

Une défaillance de la machine tournante est généralement la conséquence de la dégradation de l'isolant, de sorte que l'isolation ne peut plus empêcher les court-circuits entre les différentes parties de l'enroulement portées à des potentiels différents. Normalement, l'isolation est dans un premier temps affaiblie par des forces mécaniques ou thermiques. ce phénomène est suivie par une activité de décharges électriques entraînant une dégradation plus rapide du système d'isolation. Toutefois, il est possible qu'une contrainte électrique seule puisse provoquer une défaillance de l'enroulement. Une forte concentration localisée du

champ électrique produit une décharge électrique de surface. L'exposition de longue durée de l'isolant à ces décharges peut directement accélérer sa détérioration qui se termine par un échec complet du système d'isolation.

Ces décharges électriques peuvent se produire dans différentes régions de la barre. Une décharge partielle interne à l'isolation adjacente au conducteur ou dans la majeure partie de l'isolation de la masse peut produire une défaillance à la tension de service en érodant progressivement le mur isolant entre le cuivre et la masse. L'activité de décharges partielles sur la surface extérieure de l'isolation peut conduire à une décharge de très haute intensité à l'encoche, qui peut rapidement détériorer l'isolation de la masse de barres, et contribuer au détachement de la barre de l'encoche qui par la suite pourrait se mettre à vibrer sous l'action des forces électromécaniques. (El-Kishky, 2002; McDermid, 1993; Toliyat et Kliman, 2004)

1.6.2 Contraintes thermiques

L'isolation dans les applications industrielles est souvent employée significativement sous sa limite d'endurance thermique (par exemple, la classe thermique F est utilisée comme classe B). Les contraintes thermiques dans les systèmes d'isolation sont causées par la dilatation thermique et / ou la contraction et parfois provoquées par des changements de propriétés des matériaux. Elles peuvent être aussi dues à des différences de température locales ou à des variations de température en fonction du temps.

La température de fonctionnement dans un enroulement statorique est parfois plus élevée que celle normalement prévue pour l'une ou plusieurs des raisons suivantes.

- à cause d'une température élevée du fluide de refroidissement (généralement l'air) circulant dans les entrefers, sur les extrémités de l'enroulement ainsi qu'à travers les conduits dans le noyau du stator. Cette température élevée peut avoir pour origine les filtres bouchés, des blocages dans les événements de ventilation ou d'une quantité insuffisante de transfert thermique dans les échangeurs de chaleur;

- un fonctionnement en surpuissance de la machine tournante, ce qui augmente le courant dans l'enroulement du stator à des valeurs supérieures à la valeur nominale, et donc les pertes dans le cuivre. Ces pertes sont proportionnelles au carré du courant de ligne (dissipation de puissance par effet Joule);
- fréquences de démarrage bien au-dessus des valeurs définies dans la conception. Lors du démarrage d'un moteur, il y a des courants transitoires qui peuvent être dix fois plus grand que le courant normal de fonctionnement, étant donné que pendant le démarrage l'enroulement du stator ne développe pas de force contre-électromotrice importante. L'échauffement sous l'effet Joule supplémentaire engendré pendant le démarrage peut prendre plusieurs minutes à se dissiper. Si le moteur est démarré à nouveau avant que cette chaleur ne soit dissipée et que la température ne soit revenue à la normale, la chaleur supplémentaire créée à partir d'un deuxième départ va encore accroître la température de l'enroulement. Avec plusieurs démarrages dans un court laps de temps, la température du bobinage peut rapidement atteindre des niveaux dangereux;
- les courants de séquence négative dans des enroulements de stator sont dus à un déséquilibre de la tension de système d'alimentation entre les trois phases. Même si l'amplitude des tensions de la séquence négative est faible, ils peuvent provoquer des courants négatifs importants, en raison de l'impédance de séquence négative du moteur qui peut être seulement 20% de la valeur de son impédance de séquence positive. Ces courants inverses provoquent un échauffement supplémentaire dans certaines phases du moteur. Par exemple, un déséquilibre de tension de 3.5% peut produire une augmentation de 25% de la température de l'enroulement. La forme la plus grave de déséquilibre de tension est en monophasé, ce qui peut induire des courants de près de 200% de la valeur nominale dans les enroulements de phase qui restent connectés à l'alimentation électrique.

Les coefficients de dilatation thermique des empilements du noyau (en acier), du cuivre et du matériau isolant peuvent typiquement différer d'un facteur de 10 ou plus. Cette situation provoque des contraintes thermomécaniques en particulier aux interfaces macroscopiques intérieures et conséquemment, pour des conditions de température connues, le choix des

combinaisons de matériaux doit prendre cette problématique en considération lors de la conception du système d'isolation et dans le processus de fabrication de l'isolant. (Kaufhold et al., 2002; Toliyat et Kliman, 2004)

1.6.3 Contraintes mécanique

Pendant le service normal de la machine, les bobines ou bien les barres du stator sont exposés à des forces électromécaniques qui peuvent entraîner une érosion des matériaux d'isolation à cause des vibrations si le contenu de l'encoche n'est pas solidement fixé. Dans des conditions de court-circuit, il peut y avoir des forces électromécaniques très importantes qui peuvent conduire à la fissuration aux extrémités des barres du stator, ou la dilatation des brins du conducteur. Si une bobine peut se déplacer dans l'encoche sous l'influence de ces forces électromagnétiques, l'isolation du conducteur et la masse sera sous une contrainte de dilatation ou de compression.

L'isolation peut également être abrasée par le mouvement relatif entre les brins de la barre ou entre l'extérieur de l'isolant de la masse et l'encoche. Cela conduira aux mécanismes de défaillance suivants.

- fissuration de l'isolant de la masse conduisant à un défaut de masse;
- abrasion de l'isolant de brins ou de conducteurs causants défauts entre brins ou entre spires;
- l'abrasion de l'isolant de la masse entraînant une perte de contact entre la couche semi-conductrice et l'encoche et par conséquent apparition de décharges partielles qui détériorent progressivement le système d'isolation. (McDermid, 1993; Toliyat et Kliman, 2004)

1.6.4 Contraintes environnementales

L'environnement dans lequel fonctionne une machine tournante peut avoir une influence majeure sur la vie de l'enroulement du stator, si les extrémités des barres ou bobines sont

polluées par l'humidité, la poussière, l'huile, ou tout autre contaminant pouvant créer un film conducteur, lequel peut conduire à la circulation d'un courant ou de décharges de surface.

Les conditions ambiantes peuvent être partiellement isolées par la protection assurée par le boîtier de la machine ou par les systèmes d'isolation spéciaux, optimisés pour un paramètre de contrainte spécifique. Le système d'isolation doit être résistant aux différents facteurs environnementaux et doit posséder en particulier une bonne résistance aux courants de fuite dans ces conditions. (McDermid, 1993; Nurse, 1997; Toliyat et Kliman, 2004)

1.7 Les décharges partielles

La décharge partielle dans les machines tournantes haute tension, est le phénomène résultant de l'ionisation des molécules du gaz (air ou bien hydrogène) en présence d'un champ électrique ayant localement une intensité importante, habituellement au voisinage d'un conducteur électrique. Le terme décharge couronne s'applique aux lignes aériennes, traversée par des hautes tensions, autres appareils produisant de fortes concentrations de champ électrique (3 kV/mm environ (Azizi et Gholami, 2014; Emery, 2005)). Dans les machines tournantes, le terme décharge couronne est utilisé de manière interchangeable avec celui de décharge partielle. Il s'agit d'une décharge électrique fortement impulsionnelle, caractérisée par une large gamme de fréquences (de 40 kHz à 100 MHz).

L'intensité du champ électrique dépend de plusieurs facteurs comme

- la tension de fonctionnement de la machine ainsi que toutes surtensions qui peuvent survenir;
- la géométrie des conducteurs et de l'isolation qui peut produire une répartition non uniforme du champ électrique, et particulièrement des champs élevés dans les parties critiques de la machine (les coins de la barre conductrice, les surfaces des parties hors-fer, par exemple);
- les valeurs de permittivité diélectrique du gaz par rapport à l'isolation de l'enroulement impliquent que la valeur du champ électrique, est plus élevée dans les vides que dans l'isolation.

Les décharges partielles (DP) jouent un rôle majeur dans le vieillissement et la dégradation des systèmes d'isolation et elles sont souvent une première ou une étape intermédiaire avant l'apparition de la défaillance.

Dans les machines tournantes, on peut trouver trois types distincts d'activité de décharges partielles. Elles sont décrites dans les paragraphes suivants. (Chapman et Bruetsch, 2009; Farahani et al., 2005; Klemptner et Kerszenbaum, 2011)

1.7.1 L'activité de décharges couronne sur l'extrémité de la barre

L'ionisation du gaz dans la zone d'extrémité d'enroulement, est présente dans les machines fonctionnant avec des tensions de ligne de plusieurs milliers de volts, généralement dans les machines ayant des tensions de service de 4 kV ou plus. Ce phénomène dépend de la configuration géométrique des enroulements car les différentes conceptions produisent différentes concentrations de champs électriques pour la même tension de service. Cette activité dépend directement de la concentration de champ électrique réelle. Évidemment, les conceptions appropriées devraient être adaptées afin de minimiser ces concentrations élevées de champ électrique dans les machines haute tension.

L'activité de décharge de type couronne peut se produire dans les barres sur une surface de quelques centimètres à la sortie du stator, à la jonction entre la peinture de matériau semi-conducteur, utilisée sur la surface de la partie droite de la barre dans l'encoche, et de la peinture à gradient de potentiel utilisée à la fin de la barre ou sur la partie hors-fer de la barre. (Hudon et Belec, 2005; Klemptner et Kerszenbaum, 2011)

1.7.2 Décharges partielles internes

À la tension nominale (13.8 kV), la plupart des barres donneront lieu à une activité de décharges internes. Ceci n'est pas vraiment un grand problème pour la machine, parce que

les systèmes d'isolation époxy-mica modernes sont conçus pour résister à cette activité de décharge normale pendant plus de 40 ans sans aucune dégradation dramatique.

Cette décharge est définie comme une décharge électrique produite dans les cavités gazeuses à l'intérieur de l'isolation de masse, lorsque la tension dépasse la tension du claquage du gaz et elle n'est pas suivie par la création d'un arc électrique court-circuitant les électrodes.

Ces décharges se produisent généralement dans des vides à l'intérieur de l'isolation de la machine. Elles sont également présentes entre les couches d'isolation lorsque ceux-ci ne sont pas correctement liés, dans les lacunes (impuretés, bulles d'air) restées lors de la fabrication de la barre du stator ou créées pendant le fonctionnement de la machine. La tension à laquelle la décharge apparaît dépend de la taille et de la forme des espaces vides, ainsi que de la nature du gaz à l'intérieur. La figure 1.9 illustre une surface isolante dégradée par la présence de décharges internes.

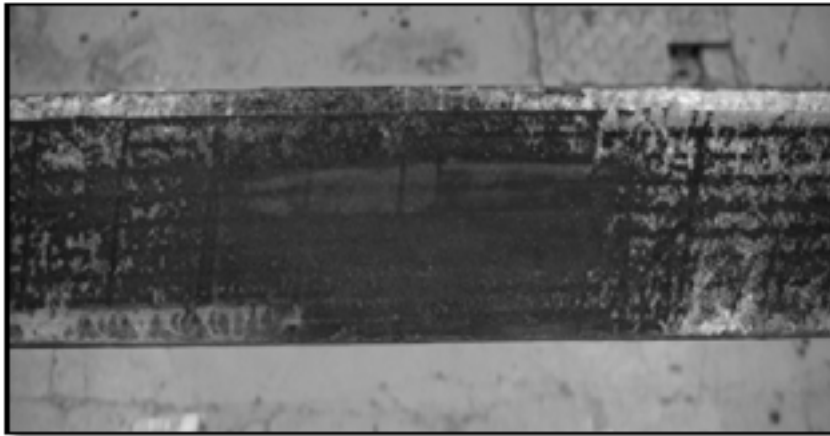


Figure 1.9 Isolant dégradé à cause des décharges internes
Tirée de Klempner et Kerszenbaum (2011)

Ces décharges peuvent également affaiblir l'isolation de brins du conducteur, et ainsi donner lieu à un court-circuit entre brins. Ce phénomène est plus courant dans la zone des développantes des barres de stator (zone hors-fer), où le processus de fabrication ne comprime pas les barres de stator aussi bien que dans l'encoche.

L'inspection visuelle de l'enroulement et de la connaissance du système d'isolation peut fournir une indication de la probabilité de l'activité de DP dans l'enroulement. Des enroulements gonflés, indiquant un desserrement interne, seront probablement soumis à une forte activité de décharges internes. (Hudon et Belec, 2005; Klempner et Kerszenbaum, 2011).

1.7.3 Décharges dans l'encoche

Cette forme de décharge partielle est le résultat de l'ionisation du gaz isolant entre barre du stator et l'isolation de la masse à la surface intérieure de l'encoche dans le circuit magnétique lorsque le mur semi-conducteur est érodé. Dans les machines à courant alternatif, la barre conductrice du stator et la face opposée de l'encoche se comporte ensemble comme un condensateur qui se charge et se décharge à la fréquence de ligne. Les plaques du condensateur sont séparées par l'isolation de la masse, des brins, des spires, ainsi que par l'isolation du fluide de refroidissement, normalement de l'air ou de l'hydrogène. Étant donné que la tension de claquage de l'air est d'environ 1/100 de celle de l'isolation solide (un rapport légèrement inférieur pour l'hydrogène), le gaz tend à se décomposer sous les contraintes de tension existant dans les machines à haute tension. L'avalanche ultérieure des ions attaque physiquement et chimiquement la surface de l'isolation, ce qui produit une détérioration de l'isolant tel qu'illustré à la figure 1.10. Dans la pratique, la plupart des machines fonctionnant à des tensions de 6.6 kV et peuvent présenter un certain degré de décharge d'encoche, généralement en raison de petits vides résiduels dans l'isolation qui permet aux décharges de surface de se produire. (Edwards, 1994; Klempner et Kerszenbaum, 2011)

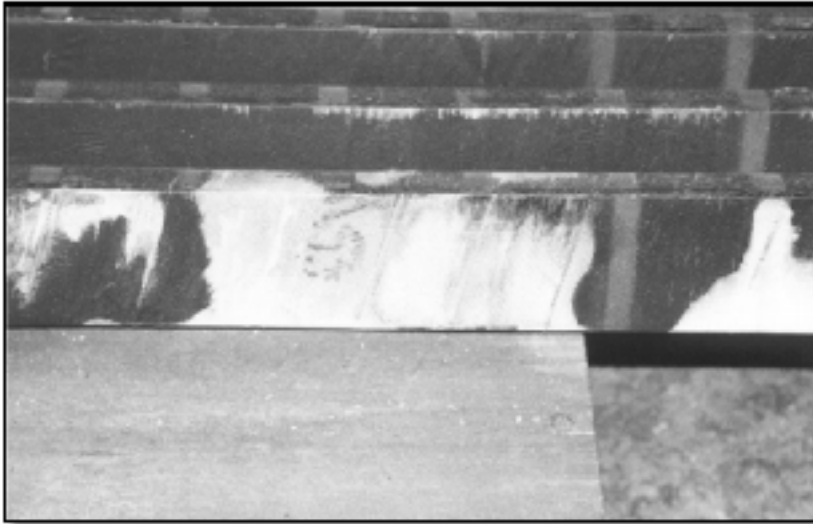


Figure 1.10 Traces de décharges d'encoche sur la surface d'une barre
Tirée de Klempner et Kerszenbaum (2011)

1.8 Méthodes de suppression des décharges dans l'extrémité de la barre

La méthode la plus simple afin de supprimer les décharges dans la partie hors-fer est de rajouter une couche isolante à la fin du revêtement semi-conducteur pour éliminer tout vide dans cette région. Bien que cela ne donne qu'une petite réduction du champ électrique, cette méthode permet d'exclure l'air dans cette région et donc augmente la tension d'apparition des décharges partielles et diminue son intensité.

Une approche inhabituelle qui a été utilisée sur certaines machines est de prolonger le revêtement semi-conducteur sur l'ensemble des surfaces et des connexions des têtes de bobines de l'enroulement. Cependant, l'approche la plus répandue, est de réduire la tension de surface de pointe sur chaque bobine. Il existe plusieurs méthodes par lesquelles ceci peut être réalisé, soit en utilisant des éléments résistifs ou capacitifs.

1.8.1 Gradient de potentiel capacitif

L'application d'une couche de matériau de constante diélectrique élevée sur la surface modifie l'impédance de surface et réduit la contrainte électrique. Les valeurs de la permittivité relative doivent être de l'ordre de 30 ou plus. Cette méthode est largement utilisée sur les terminaisons de câble, mais elle nécessite une couche relativement épaisse, ce qui est problématique dans le cas des enroulements d'un stator. En outre, les matériaux à haute constante diélectrique ayant une classe thermique F, adaptées pour les moteurs et les générateurs, ne sont pas largement disponibles.

Une autre méthode capacitive, est l'utilisation de feuilles conductrices à l'intérieur de l'isolant pour diffuser le potentiel interne de l'isolant (figure 1.11). Cette méthode est largement utilisée dans les traversées et a été utilisée dans les machines aussi. Cependant, il y a des difficultés pratiques importantes dans la fabrication d'un tel système, et donc, elle est rarement utilisée de nos jours. (Chapman et Bruetsch, 2009; Roberts, 1995)

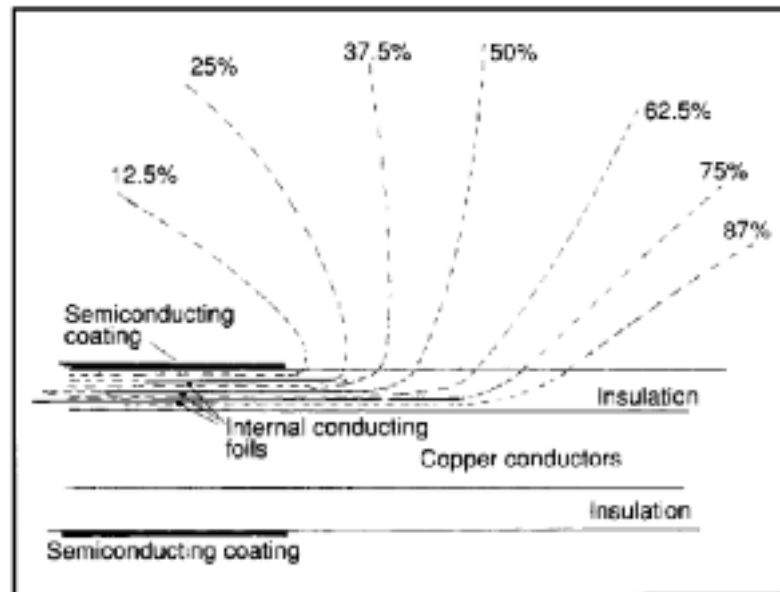


Figure 1.11 Système de gradient de potentiel utilisant des feuilles conductrices
Tirée de Roberts (1995)

1.8.2 Gradient de potentiel résistif non linéaire

Des premières utilisations ont déjà été faites de matériaux ayant des caractéristiques de résistance non-linéaires il y a plusieurs décennies, notamment l'utilisation de composite à base d'amiante pour le gradient de potentiel. Il a été constaté que les particules de carbure de silicium dans une peinture à base de résine, confèrent à ce composite une résistance non-linéaire et que diverses caractéristiques peuvent être obtenues en fonction du type, de la taille des particules, et des proportions. Toutefois, mécaniquement ces revêtements peuvent être endommagés par une abrasion, et leur efficacité pourrait être alors fortement réduite. Plus récemment, des matériaux ont été développés consistant en des particules de carbure de silicium avec une résine époxy portée sur un ruban de support, généralement en fibre de verre. Ce matériau peut être appliqué sur l'extrémité de la barre, pressé et durci avec l'isolant principal, ce qui donne une couche externe plus solide. (Christen, Donzel et Greuter, 2010; Donzel, Greuter et Christen, 2011; Espino-Cortes et al., 2006; Roberts, 1995)

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une brève revue des systèmes d'isolation utilisés dans les barres des générateurs haute tension, des différents facteurs ou contraintes qui peuvent dégrader et détériorer ces derniers ainsi que des matériaux utilisés afin de concevoir un système d'isolation résistant aux différentes contraintes.

À la fin du chapitre, nous avons vu le phénomène de décharges partielles dans les machines haute tension, les différents types de décharges ainsi que les méthodes permettant de protéger le bobinage statorique contre les décharges dans les extrémités des barres du stator.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION ET RÉALISATIONS EXPÉRIMENTALES

2.1 Introduction

Ce chapitre présente, la modélisation du revêtement à gradient de potentiel à base de carbure de silicium (SiC^2) et le travail expérimental effectué afin de caractériser les propriétés électrique des composites époxy/ SiC .

La modélisation consiste à présenter le modèle mathématique de l'extrémité de la barre du générateur avec un revêtement anti-effluves afin de pouvoir l'utiliser dans les méthodes de simulation, par résolution numérique d'équations différentielles sous Matlab, et par la méthode des éléments finis (FEM^3) sous COMSOL.

Le travail expérimental est divisé en deux phases principales. La première est de configurer les différents instruments pour réaliser les tests électriques pour caractériser les paramètres des composites époxy/ SiC et la deuxième phase est la préparation des échantillons composites époxy/ SiC et la réalisation des tests électriques afin de caractériser la résistivité des matériaux obtenus.

Les différents résultats seront présentés et discutés dans le dernier chapitre.

² Silicon Carbide

³ Finite Element Method

2.2 Calcul du champ électrique

Le champ électrostatique exerce une force \vec{F} sur des particules chargées, les électrons et les ions, suivant la relation :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \quad (2.1)$$

Avec

q est la charge électrique d'une particule (Coulomb).

\vec{E} est le champ électrique (V/m).

Les particules chargées mobiles sont accélérées dans le sens du champ appliqué, acquièrent de l'énergie cinétique, et initient des activités d'ionisation menant à des décharges partielles et, éventuellement, à la création d'une charge d'espace.

Le problème de calcul de champ électrique, nécessite l'élaboration des équations de base, de Maxwell et Laplace, avant de discuter des différentes méthodes de solution.

2.2.1 Les équations de Maxwell

L'électromagnétisme est essentiellement régi par un ensemble de lois fondamentales que Maxwell a intégré dans l'élaboration de la théorie de l'électromagnétisme. Voyons brièvement les lois fondamentales qui contribuent à l'établissement des équations bien connues de Maxwell, avec le système général d'équations différentielles définissant les fonctions potentielles et vectorielles, qui décrivent complètement le champ électromagnétique. On met l'accent sur le cas du champ électrostatique, généralement décrit par l'équation de Laplace ou de Poisson et les différentes méthodes de solution et par conséquent, la définition du champ électrique dans des configurations de la partie hors-fer des bobinages.

2.2.1.1 Lois fondamentales

La théorie de l'électromagnétisme repose sur quatre lois fondamentales que C. Maxwell a résumé dans un ensemble d'équations appelées équations de Maxwell:

$$\nabla \cdot \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \rho v \quad (2.2)$$

La loi d'Ampère pour les champs variables dans le temps tel que corrigé par Maxwell.

$$\nabla \cdot \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

La loi de Faraday de l'induction électromagnétique.

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.4)$$

La loi de Gauss.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.5)$$

Dans ces équations,

\vec{H} est le champ magnétique en A/m.

\vec{E} est le champ électrique en V/m.

\vec{D} est la densité de déplacement électrique en C/m².

\vec{j} est la densité de courant en A/m².

\vec{B} est la densité de flux magnétique en Wb/m².

ρ est la densité de charge en C/m³.

En plus des équations de champ précédentes, trois équations concernent les caractéristiques du milieu dans lequel les champs existent:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (2.6)$$

où $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ est la permittivité du milieu.

ε_0 est la permittivité dans le vide = 8.854×10^{-12} F/m,

ε_r est la permittivité relative aussi connue comme constante diélectrique.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.7)$$

où $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ est la perméabilité du milieu exprimée en termes de la perméabilité du vide $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, μ_r est la perméabilité relative du milieu.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.8)$$

où σ est la conductivité du milieu en S/m.

Les quatre équations de Maxwell sont trois équations aux dérivées partielles dans l'espace et le temps. Un potentiel vecteur magnétique \vec{A} peut être défini par:

$$\vec{B} = \nabla \cdot \vec{A} \quad (2.9)$$

Et un potentiel électrique scalaire u pour satisfaire:

$$\vec{E} = -\nabla u - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (2.10)$$

Le potentiel vecteur magnétique A doit également satisfaire:

$$\nabla \cdot \vec{A} = -\mu\epsilon \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.11)$$

Maxwell a montré que la solution ainsi obtenue est unique. En d'autres termes, il existe une seule fonction u de champ potentiel scalaire et un seul vecteur champ potentiel \vec{A} pour une configuration donnée de la charge et des densités de courant dans l'espace.

2.2.2 L'équation de Laplace

L'électrostatique est un cas particulier de l'électromagnétisme, lorsque la densité de courant est nulle, $\vec{J} = 0$, à tous les points dans l'espace et par conséquent, $\partial \vec{B} / \partial t = 0$.

Les équations de Maxwell se simplifient alors :

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (2.12)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.13)$$

Le champ électrique E est non rotatif; il peut donc être exprimé comme la dérivé d'une fonction du potentiel scalaire u de telle sorte que :

$$\vec{E} = -\nabla \cdot u \quad (2.14)$$

De plus

$$\nabla \cdot \vec{E} = \nabla \cdot (-\nabla u) \equiv 0 \quad (2.15)$$

Il en résulte que l'équation différentielle définissant la fonction du potentiel scalaire u est

$$\nabla^2 u = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (2.16)$$

Laquelle est généralement connue comme l'équation de Poisson.

Dans le cas particulier où il n'y a pas de charges dans l'espace, $\rho = 0$, l'équation précédente se simplifie et devient l'équation de Laplace:

$$\nabla^2 u = 0 \quad (2.17)$$

La solution de l'équation de Poisson ou de Laplace définit complètement la fonction du potentiel scalaire u , ce qui doit être conforme avec les conditions aux limites spécifiques à un problème donné.

Les différentes façons de résoudre l'équation de Laplace sont principalement deux méthodes :

- méthode analytique;
- méthode numérique.

2.2.3 Méthode analytique

La solution analytique de l'équation de Laplace est constituée des éléments suivants:

- simplifier autant que possible l'équation différentielle pour réduire le nombre de variables au minimum, à savoir, par l'adoption d'un système approprié de coordonnées qui tire parti de la symétrie naturelle de la configuration;
- décomposer l'équation de Laplace en un ensemble de plusieurs équations différentielles de la seule variable en utilisant la méthode de séparation des variables;
- trouver la solution générale à l'ensemble des équations différentielles;
- définir la solution particulière qui satisfait les conditions aux limites.

La méthode de séparation des variables consiste à séparer les équations différentielles multi variables en un ensemble d'équations différentielles. En supposant que la fonction du potentiel scalaire, u , est le produit de plusieurs fonctions, chacune d'une seule variable, selon la relation :

$$u(x_1, x_2, x_3) = F_1(x_1)F_2(x_2)F_3(x_3) = \prod F_i(x_i) \quad (2.18)$$

Les dérivées du premier et du second ordre du potentiel u sont données par

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} = \left[\prod_{j \neq i} F_j(x_j) \right] \frac{d}{dx_i} F_i(x_i) \quad (2.19)$$

Et

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = \left[\prod_{j \neq i} F_j(x_j) \right] \frac{d^2}{dx_i^2} F_i(x_i) \quad (2.20)$$

En remplacement les expressions précédentes des dérivées dans l'équation de Laplace et en divisant les deux côtés par $u(x_i)$, on trouve

$$\partial^2 u(x_i) = \sum \left(\frac{1}{F_i} \right) \left(\frac{d^2 F_i}{dx_i^2} \right) = 0 \quad (2.21)$$

Qui peuvent ensuite être séparés en plusieurs équations différentielles de la seule variable x_i .

2.2.3.1 Coordonnées cartésiennes

Dans les coordonnées cartésiennes X, Y, Z , les surfaces équipotentiels correspondant à $x =$ constante, $y =$ constante, et $z =$ constante, sont des surfaces planes perpendiculaires à la direction x, y et l'axe z , respectivement.

L'équation de Laplace est exprimée comme suit :

$$\nabla^2 u(x, y, z) = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad (2.22)$$

En appliquant le procédé de séparation de variables, la fonction de potentiel u devient

$$u(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z) \quad (2.23)$$

L'équation de Laplace devient

$$\nabla^2 u(x, y, z) = \frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \quad (2.24)$$

L'équation précédente peut être satisfaite que si

$$\frac{1}{Z(z)} \frac{d^2 Z}{dz^2} = p^2 \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{Y(y)} \frac{d^2 Y}{dy^2} = q^2 \quad (2.26)$$

$$\frac{1}{X(x)} \frac{d^2 X}{dx^2} + p^2 = -q^2 \quad (2.27)$$

où p^2 et q^2 sont des constantes positives. L'équation de Laplace est alors effectivement séparée en trois équations différentielles d'une seule variable. La solution générale des fonctions $Y(y)$ et $Z(z)$ est de type exponentiel alors que celle pour la fonction $X(x)$ est de type sinusoïdale.

2.2.3.2 Champ uniforme

Considérons un espace défini par deux électrodes planes parallèles de dimensions infinies, séparées l'un de l'autre d'une distance d , et soumises à une différence de potentiel de U . En raison de la symétrie du système d'électrodes, le champ électrique est fonction de la distance

le long de l'axe perpendiculaire à l'électrode seulement. En choisissant un système de coordonnées cartésiennes ayant le plan y-z qui coïncide avec l'une des électrodes, l'équation de Laplace ne dispose que d'une seule variable x.

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2.28)$$

L'intégration successive de l'équation différentielle précédente donne

$$\frac{du}{dx} = -E = \text{constante} \quad (2.29)$$

Et

$$u(x) = -Ex + \text{constante} \quad (2.30)$$

En appliquant les conditions aux limites en $x = 0$, $u = 0$, et $x = d$, $u = U$, on obtient les expressions suivantes pour le potentiel $u(x)$ et le champ électrique $E(x)$:

$$u(x) = \frac{U}{d}x \quad (2.31)$$

$$E(x) = -\frac{du}{dx} = -\frac{U}{d} \quad (2.32)$$

2.2.4 Méthode numérique

Au cours des dernières années, plusieurs méthodes numériques ont été développées pour la résolution d'équations aux dérivées partielles et donc les équations de Laplace et de Poisson. Il y a des difficultés inhérentes à la résolution d'équations aux dérivées partielles à deux ou en trois dimensions avec des conditions aux limites sophistiquées, ou pour les matériaux isolants avec des permittivités et / ou conductivités variables. Parmi ces méthodes on peut citer :

- la méthode des différences finies (FDM);
- la méthode des éléments finis (FEM);
- la méthode de simulation de charge (CSM);
- la méthode des éléments de frontière.

Cependant, chacune des différentes méthodes numériques, présente des avantages et des inconvénients inhérents, selon le problème réel à résoudre, et donc les méthodes sont dans une certaine mesure complémentaire.

Pour notre projet la méthode des éléments finis (FEM) est utilisée pour modéliser notre géométrie sous le logiciel COMSOL.

2.3 Modélisation de l'extrémité de la barre par un circuit équivalent

Une coupe transversale d'une barre le long de la partie hors-fer avec un revêtement à gradient de potentiel est montrée à la figure 2.1. Dans la modélisation, l'isolation de la masse est considéré comme un matériau isolant parfait et le revêtement semi-conducteur comme ayant une conductivité très élevée et une haute constante diélectrique (environ 100). Le revêtement à gradient de potentiel est présumé avoir une conductivité dépendante du champ électrique et une permittivité relative de 10 à 30. (Espino-Cortes et al., 2006; Okamoto et al., 2004)

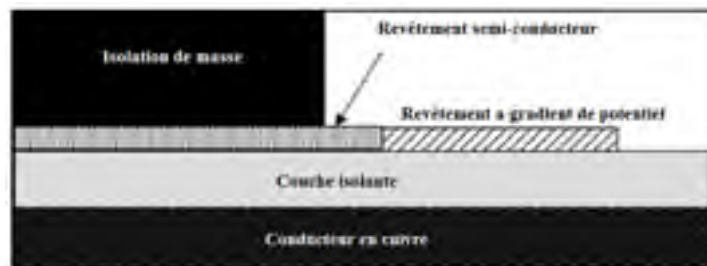


Figure 2.1 Coupe transversale d'une extrémité d'une barre de générateur de haute tension
Tirée de Espino-Cortes, Cherney et Jayaram (2005)

L'approche la plus couramment utilisée pour modéliser l'extrémité de la barre, implique l'utilisation d'un modèle d'impédances distribuées. Ce modèle a été utilisé dans plusieurs études précédentes, comme dans celle de (Kimura et al., 1984; Taylor et Edin, 2010) pour étudier les différentes propriétés électriques des revêtements appliqués dans cette région de la barre.

Dans ce travail, cette approche a été utilisée pour modéliser le revêtement à gradient de potentiel ainsi que la partie où l'isolation est mise à nu, en se basant sur une ligne de transmission d'éléments RC liés. Le circuit équivalent de l'extrémité de la barre peut alors être représenté par le circuit illustré à la figure 2.2.

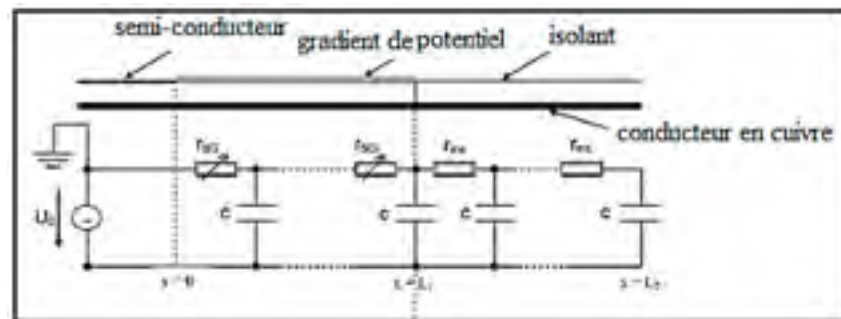


Figure 2.2 Circuit équivalent de l'extrémité de la barre
Tirée de David et Lamarre (2007)

Chaque élément de longueur dx , peut être représenté par le circuit suivant

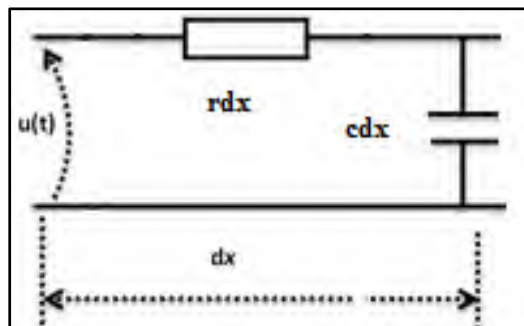


Figure 2.3 Circuit équivalent d'un élément de longueur (dx) du revêtement

En négligeant le courant de fuite à travers le diélectrique, les équations fondamentales de potentiel surfacique U et de courant électrique traversant le revêtement, sont les suivantes

$$-\frac{\partial U(x, t)}{\partial x} = ri \quad (2.33)$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = c \frac{\partial U(x, t)}{\partial t} \quad (2.34)$$

La dérivation de l'équation (2.33) par rapport à x donne

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \right) = r \frac{\partial i}{\partial x} \quad (2.35)$$

En remplaçant l'équation (2.34) dans (2.35), on obtient le modèle mathématique du circuit équivalent global :

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r(x)} \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \right) \quad (2.36)$$

Dans cette équation, U est le potentiel de surface en Volt, c est la capacité par unité de longueur en F/m, et r est la résistance par unité de longueur en Ω/m . Selon le modèle présenté à la figure 2.2, r peut s'écrire comme suit;

$$r(x) = \begin{cases} r_{SG} & , \quad 0 < x < L_1 \\ r_{ins} & , \quad L_1 < x < L_2 \end{cases}$$

Avec r_{SG} et r_{ins} , étant respectivement la résistance par unité de longueur du revêtement à gradient de potentiel et de l'isolant, et L_1 et L_2 étant respectivement la longueur du revêtement à gradient de potentiel et la longueur totale incluant la partie de l'isolant à nu.

2.4 Le revêtement à gradient de potentiel

Les matériaux à gradient de potentiel constituent un moyen établi pour contrôler efficacement et de manière fiable le champ électrique dans les applications haute et moyenne tension. Les composites polymériques à base de charges telles que le carbure de silicium, le noir de carbone, ou des mélanges de différents oxydes, par exemple, BaTiO_3 , Fe_3O_4 et SiO_2 etc. ont été utilisés pendant une longue période, tant pour la protection contre des décharges de type couronne pour les barres du stator des machines rotatives de haute tension que pour les accessoires de câbles. (Donzel, Greuter et Christen, 2011)

2.4.1 La poudre de SiC

Un revêtement à base de carbure de silicium (SiC), est utilisé dans les extrémités des barres des générateurs haute tension afin de régler la distribution du potentiel électrique sur la surface des barres à la sortie de l'encoche pour empêcher la production de décharges de surface qui peuvent détruire l'isolant. Il doit conserver cette capacité durant toute la durée de vie de la machine. (Allison, 2000; Malamud et Cheremisov, 2000)

La poudre de SiC utilisée dans ce type d'application est produite dans des conditions atmosphériques spécifiques. Après broyage et séparation des grains dans différentes gammes de taille, les poudres sont nettoyées chimiquement.

Trois poudres de SiC ont été utilisées dans le cadre de ce projet, dont deux fabriquées par Saint-Gobain de taille de 400 Grit ($18.3 \mu\text{m}$) et un mélange de 400 et de 1000 Grit ($5.8 \mu\text{m}$) et une fabriquée par G.F. Koch de taille de 800 Grit ($7.8 \mu\text{m}$).

Ces poudres sont caractérisées par une différence de couleur et de granulométrie, tel qu'illustré à la figure ci-dessous.

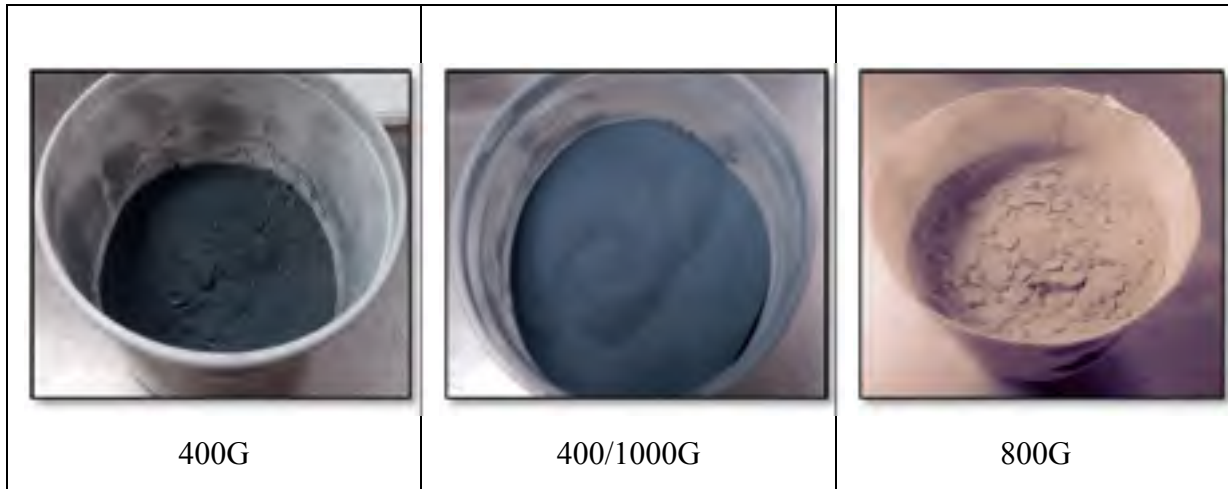


Figure 2.4 Poudres de SiC

2.4.2 La conductivité électrique du SiC

Les propriétés électriques du SiC sont mal définies par les fabricants de ce dernier et il en va de même pour les propriétés des composites époxy/SiC. La relation entre la conductivité électrique et le champ électrique du SiC et de ses composites dans les revêtements à gradient de potentiel reste donc pratiquement toujours une information à déterminer expérimentalement.

Beaucoup d'études ont été réalisées et de trouver une équation permettant de relier la conductivité électrique de composites à base de carbure de silicium et le champ électrique. Deux formes simples d'équation permettant de prédire la conductivité σ en fonction du champ électrique E sont largement trouvées dans les modèles publiés. L'une est la loi de la puissance ou l'équation des varistances de la forme $\sigma(E) = kE^{\beta}$. Cette équation a été utilisée dans les études d'isolateurs chargés au SiC dans (Refsum, 1988), et dans les terminaisons des câbles dans (Rhyner et Bou-Diab, 1997). Elle a été également utilisée pour les revêtements anti-effluves pour les extrémités des bobines dans (Roberts, 1995).

Une autre relation exponentielle, qui relie la conductivité électrique et le champ électrique E et qui a été utilisée par (Espino-Cortes, Cherney et Jayaram, 2005), (Rivenc et Lebey, 1999)

et (El-Kishky et al., 2003) pour les revêtements des extrémités des barres, est de la forme suivante :

$$\sigma(E) = k \exp(nE) \quad (2.37)$$

Finalement, une fonction hybride qui rassemble les deux formes précédentes (l'équation des varistances et la forme exponentielle) et qui a été utilisée pour modéliser le revêtement à gradient de potentiel des barres dans (Gully et Wheeler, 2000), est donnée par

$$\sigma(E) = \sigma_0 \exp(n|E|^\beta) \quad (2.38)$$

2.5 Travail expérimental

Le travail expérimental, consiste dans un premier temps, à définir les instruments à utiliser pour réaliser les tests électriques ainsi que la configuration et la réalisation d'une application LABVIEW qui permet de contrôler ce parc instrumental.

Dans un deuxième temps, le travail va consister en la préparation des échantillons à base de SiC et en la réalisation des tests électriques.

2.5.1 Techniques de mesure de la résistivité électrique de SiC

Parmi les techniques utilisées pour mesurer la résistivité électrique d'un matériau comme revêtement anti-effluve, on peut citer :

- mesures courant-tension ;
- mesures dans le domaine temporel.

2.5.1.1 Mesures courant-tension

Cette technique basée sur l'application d'une tension continue à travers l'échantillon. La tension peut varier linéairement entre 0 et quelques dizaines de kV tout dépendamment de la géométrie et des propriétés électriques de l'échantillon. Le courant est mesuré par un électromètre. La résistivité peut être calculée en divisant le courant mesuré par la tension appliquée et prenant en considération la géométrie des échantillons. La figure 2.5 ci-dessus illustre un exemple de cette méthode utilisée pour des rubans époxy/SiC.

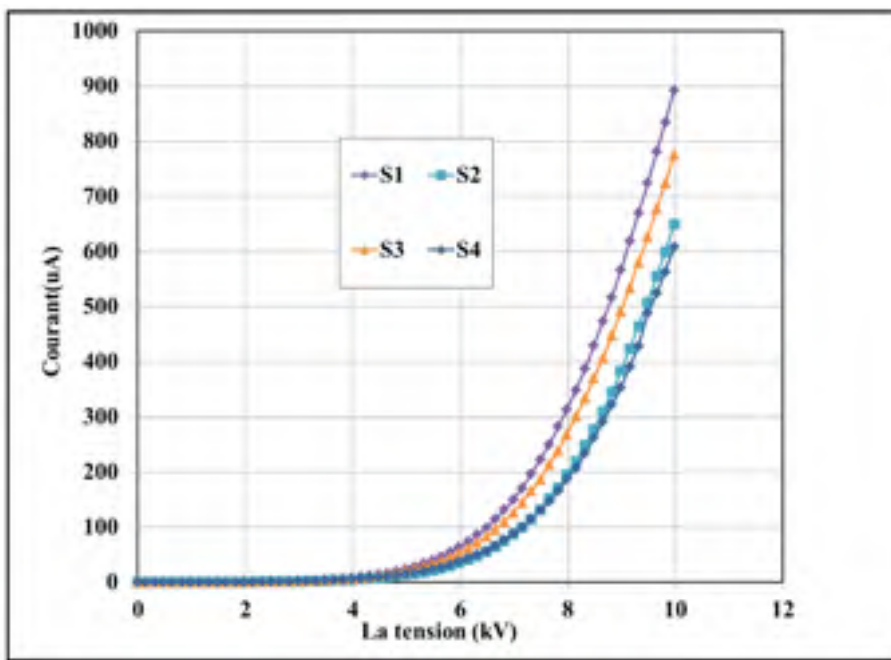


Figure 2.5 Mesure typique courant-tension pour des rubans époxy/SiC
David, communication privée

2.5.1.2 Mesures dans le domaine temporel

Pour cette technique, le courant de charge est mesuré comme une fonction du temps après l'application d'un échelon de tension en courant continu pour une durée définie. Une fois que l'échantillon est mis sous une tension nulle (0 volt), le courant de décharge est mesuré d'une

manière similaire (figure 2.6). En faisant varier l'échelon de la tension appliquée, on peut tracer le champ électrique en fonction de la résistivité ou la conductivité électrique.

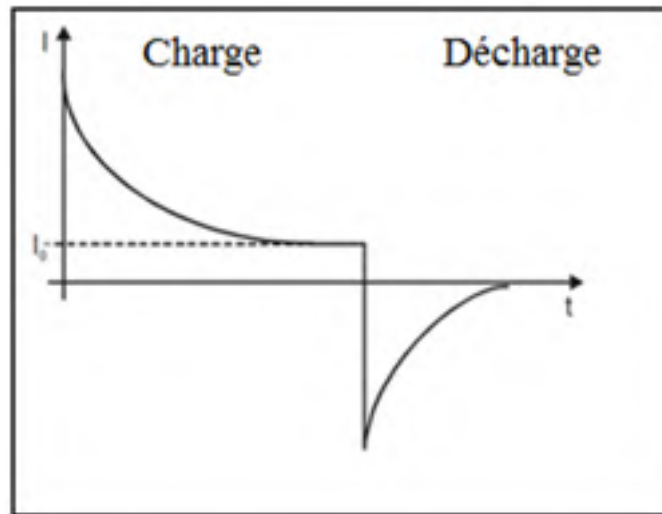


Figure 2.6 Principe de la mesure dans le domaine temporel

Pour ce projet, la méthode de mesure dans le domaine temporel est utilisée pour mesurer la résistivité des échantillons de composites époxy/SiC. Cette technique, quoique moins rapide que la technique I-V, permet d'obtenir plus d'informations sur les matériaux testés (caractéristiques du courant de décharge, stabilité dans le temps du courant de conduction).

2.5.2 Montage expérimental

Le montage expérimental utilisé pour la mesure de conductivité électrique des échantillons époxy/SiC est illustré dans le diagramme 2.7:

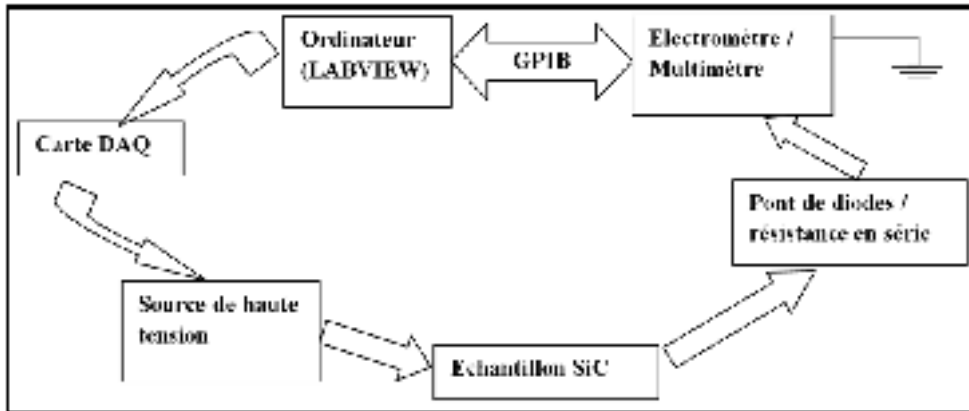


Figure 2.7 Diagramme résumant le montage

2.5.2.1 La source haute tension

La source haute tension utilisée pour nos tests, est une source haute tension à courant continu fabriquée par la compagnie GLASSMAN et permettant de fournir des tensions variant entre 0 V et 60 kV en courant continu avec courant de charge variant entre 0 et 20 mA. Cette source est alimentée par la tension alternative du réseau électrique de 120 V et une fréquence de 60 Hz et commandée par des signaux analogiques de commande dont l'amplitude varie entre 0 et 10 V.



Figure 2.8 Source de haute tension GLASSMAN (appareil du haut)

2.5.2.2 Application LABVIEW

LABVIEW⁴ est un logiciel de développement d'application en utilisant un langage de programmation graphique (le langage G), pour créer un programme sous forme de diagrammes, LABVIEW offrant des bibliothèques de fonctions (blocs programmés) capables de répondre à la plupart des besoins en programmation. Il comprend également des bibliothèques de fonctions spécifiques à l'acquisition de données et au pilotage d'instruments connectés sur une liaison parallèle comme une liaison de type GPIB, ou encore d'instruments connectés sur une simple liaison série (RS 232 par exemple). Il existe aussi des bibliothèques liées à la présentation, à l'analyse et au stockage des données.

LABVIEW intègre une collection complète d'outils de développement de programmes conventionnels, de telle sorte que l'on peut définir des points d'arrêts, animer l'exécution du programme en mettant en évidence le cheminement des données et exécuter pas à pas le programme. Le développement et la mise au point du programme s'en trouvent ainsi facilités.

Notre système d'acquisition des données est commandé à l'aide d'un ordinateur grâce à une application LABVIEW. La conception de cette application se fait sous forme graphique à l'écran, chaque tâche d'acquisition étant représentée par un icône, l'organisation des opérations dépendant des liaisons entre les icônes (plus quelques structures de base: boucles, choix conditionnels, ...etc.). L'interface utilisateur, dans l'application se fait sous forme d'un panneau virtuel d'appareils, représenté à l'écran et actionné par la souris. Cette interface nous a permis de sélectionner différentes configurations d'appareil par le biais de menus déroulants. Par exemple, on peut sélectionner le type de port de communication, RS232 ou GPIB, sélectionner les instruments de mesure, sauvegarder les données dans un dossier spécifique autres opérations connexes.

⁴ Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

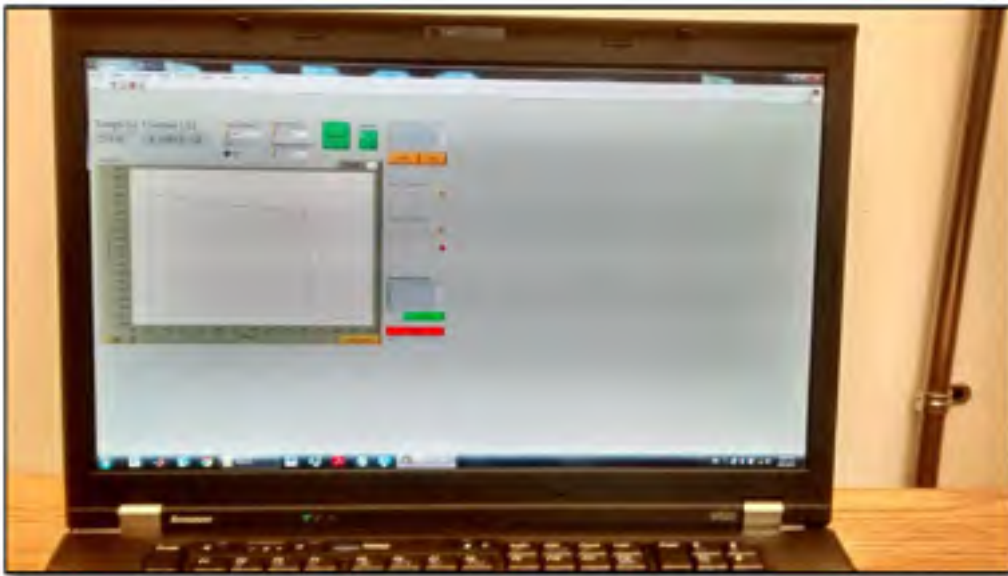


Figure 2.9 L'interface d'utilisateur de l'application LABVIEW

2.5.2.3 La communication GPIB⁵

L'acquisition des données de mesures à partir des appareils de mesures (électromètres et multimètre), nécessite un moyen de communication qui relie l'ordinateur et l'instrument de mesure, afin d'assurer un meilleur transfert de données et pour faciliter la sauvegarde et le traitement des données sur l'ordinateur. Pour ce faire, un bus GPIB externe a été utilisé.

L'utilisation des systèmes de mesures et de tests automatisés tel que l'utilisation des multimètres numériques, a été développée dans les années 1960 par Hewlett-Packard ; Ils ont développé l'interface Bus HP (HP-IB) pour permettre l'interconnexion facile entre les instruments et les contrôleurs (ordinateurs et autres instruments). Ce bus devenu populaire pour les différentes applications de contrôle automatisé et industrielle sous le nom de GPIB.

Le GPIB permet de relier jusqu'à 15 appareils, avec une longueur de câble de 20 mètres et une vitesse de transfert des données entre 400 kbytes/s et 1 Mbytes/s selon les fabricants.

⁵ General Purpose Interface Bus

2.5.2.4 Électromètre & multimètre Keithley

Les appareils de mesure de courant qui ont été utilisés pour nos tests électriques sont des appareils fabriqués par la compagnie Keithley. Ces instruments sont largement utilisés pour des mesures de courant, tension, résistance électrique et des mesures de température grâce à leur bonne sensibilité et à leur haute résolution. Ils peuvent être commandés par l'intermédiaire d'une interface de communication GPIB intégrée.



Figure 2.10 L'électromètre Keithley

Pour les plus faibles courants, l'électromètre Keithley (6517B), illustré à la figure 2.10, est privilégié car il offre une grande précision et une très haute sensibilité aux mesures par rapport au multimètre. Il offre des mesures de courant de 1fA à 20 mA. Le multimètre est utilisé pour mesurer des courants plus élevés lorsque la sensibilité de l'électromètre n'est pas requise et afin de ne pas endommager ce dernier si les courants sont plus importants.

2.5.2.5 La carte d'acquisition

La source de haute tension utilisée dans les tests expérimentaux, est commandée par des signaux de tension analogiques variant entre 0 et 10 V et générés par une carte d'acquisition de la famille NI DAQ.

Cette carte est une NI USB-6211 multifonction alimentée par un bus USB à travers un ordinateur de contrôle. Elle est optimisée et possède une bonne précision à des fréquences d'échantillonnage élevées. Elle offre 16 entrées analogiques, une fréquence d'échantillonnage sur une seule voie de 250 kéch./s, 2 sorties analogiques, 4 entrées numériques, 4 sorties numériques, 4 gammes d'entrées programmables ($\pm 0,2$ V à ± 10 V) par voie, ainsi qu'un déclenchement numérique et 2 compteurs. La carte est connectée à l'ordinateur de contrôle par un câble USB et, dans le présent projet, est utilisée afin d'envoyer les signaux de commande à la source de haute tension et ainsi générer les tensions désirées via l'application LABVIEW.

2.5.2.6 Résistance en série & pont de diodes

Un petit dispositif additionnel composé d'une résistance en série avec l'échantillon à tester avec un pont de diodes, est ajouté au circuit de mesure. Ce dispositif a deux principaux objectifs :

- le premier objectif, est de protéger l'instrument de mesure contre la possibilité de courants élevés, surtout l'électromètre qui est très fragile;
- l'autre objectif, est de lisser le signal du courant et réduire le bruit lors de la mesure.

La combinaison des diodes en série avec la résistance permet d'augmenter davantage l'impédance série lors des mesures à faible courant étant donné leur impédance non linéaire, donnant ainsi un bon rapport signal/bruit.

2.5.3 Préparation des échantillons époxy/SiC

Les échantillons époxy/SiC sont des mélanges entre trois produits différents, dont le composé principal, est la poudre de SiC à l'étude. La méthode de préparation utilisée pour fabriquer les échantillons, est la même que celle utilisée par les manufacturiers (procédure fournie et recommandée par l'usine d'Andritz à Lachine avant sa fermeture). Elle se divise en trois phases principales :

- la préparation d'un mélange composé d'une même quantité d'un durcisseur et de la résine (5 mg) avec des quantités différentes (variant de 3 à 12 mg) de poudre de carbure de silicium avec différentes tailles de grains (400, 800 et 400/1000). On mélange bien les trois ingrédients dans un petit récipient comme montre la figure 2.12;



Figure 2.11 Mélange de SiC, résine et durcisseur

Le mélange est appliqué sur des plaques de verre rectangulaires de dimension 75 mm x 50 mm et de 1mm d'épaisseur. Les couches de peinture sont uniformisées avec des épaisseurs variant entre 0.1 à 0.3 mm.

- après l'application de la peinture sur les plaques de verre, on laisse les échantillons dégazer sous une hôte, pendant 3 heures à la température ambiante;
- la dernière étape de la fabrication, est la cuisson ou réticulation des échantillons dans le four à une température de 118 °C pour une durée de 4 heures.

La figure 2.12, représente un échantillon de SiC préparé pour les tests de conductivité électrique (les deux rubans de cuivre servent d'électrodes).



Figure 2.12 Échantillon de époxy/SiC contenant 7mg de SiC 400 G

2.5.4 Réalisation des tests électriques

Le principe des tests consiste à appliquer des différences de potentiel variant entre 2 et 20 kV entre les électrodes de cuivre des échantillons et ce pour une durée de temps prédéterminée (en général 500 secondes pour le temps de charge et 300 secondes pour le temps de

décharge) sur une distance de 2.54 cm entre les deux électrodes. Pendant l'échelon de tension et le court-circuit, le courant est mesuré de façon continue par l'électromètre ou le multimètre selon l'ordre de grandeur du courant escompté.

La figure 2.13 représente un exemple du signal du courant électrique obtenu en utilisant l'électromètre lors d'un test.

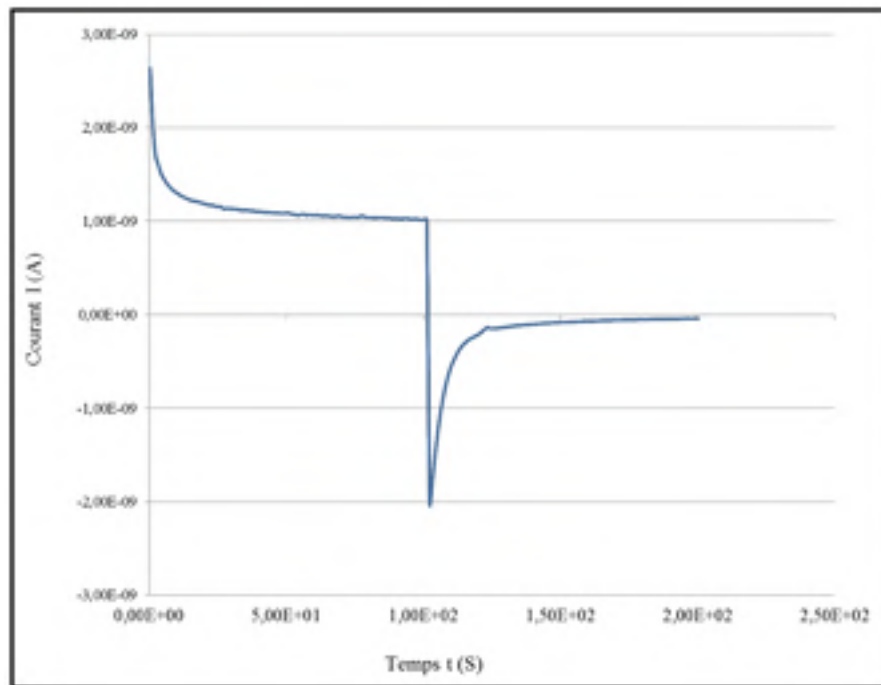


Figure 2.13 Courant de charge et de décharge d'un échantillon d'époxy/SiC

A partir de ces résultats, on calcule la résistance électrique en utilisant la loi d'Ohm comme suit

$$V = RI \Rightarrow R = \frac{V}{I} \quad (2.39)$$

Avec

V est la tension électrique appliquée en volts

R est la résistance électrique en Ω

I est le courant électrique mesuré en Ampères

La résistivité électrique est calculée par la formule suivante

$$R = \rho \frac{l}{S} \Rightarrow \rho = R \frac{S}{l} \quad (2.40)$$

Avec

ρ est la résistivité électrique en $\Omega \text{ m}$

l est la distance entre les deux électrodes en m

S est la section en m^2

Le champ électrique est calculé par la division de la différence de potentiel par la distance inter-électrodes, suivant la formule :

$$E = \frac{V}{l} \quad (2.41)$$

E est le champ électrique en V/m. La figure 2.14 illustre un exemple d'une mesure de la résistivité électrique en fonction du champ électrique.

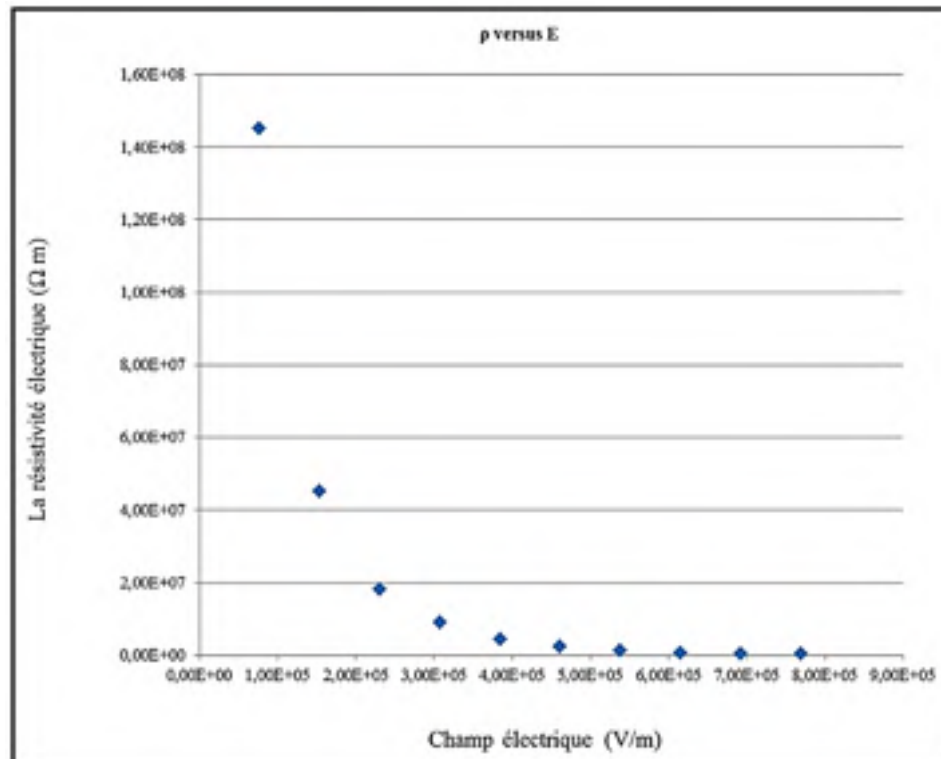


Figure 2.14 Résistivité électrique versus le champ électrique d'un échantillon d'époxy/SiC

2.5.5 Caractérisation de la résistivité des échantillons époxy/SiC

L'équation de la résistivité électrique que nous avons utilisée est donnée par :

$$\rho(E) = \rho_0 \exp(-n|E|^\beta) \quad (2.42)$$

Cette équation contient trois paramètres :

β que nous avons fixé à 0.5, ce qui donne une bonne corrélation avec les valeurs expérimentales.

n et ρ_0 à calculer à partir des données expérimentales.

Afin de calculer les paramètres n et ρ_0 de l'équation de résistivité des composites époxy/SiC, nous avons représenté le logarithme de la résistivité électrique en fonction du champ électrique exponentiel β ($\beta = 0.5$), comme montre la figure 2.15.

On aura donc, une fonction linéaire de type

$$y = Ax + B \quad (2.43)$$

Avec A étant la pente de la droite qui représente le paramètre $-n$ de l'équation de la résistivité et B représentant $\log(\rho_0)$.

Ces deux paramètres peuvent être obtenus par régression linéaire, c'est-à-dire par le calcul de l'équation de la droite des moindres carrés tel qu'illustré à la figure 2.15 ci-dessous. Le logiciel Excel effectue automatiquement ces calculs et permet d'obtenir les paramètres de la droite des moindres carrés par l'affichage de l'équation de la courbe de tendance.

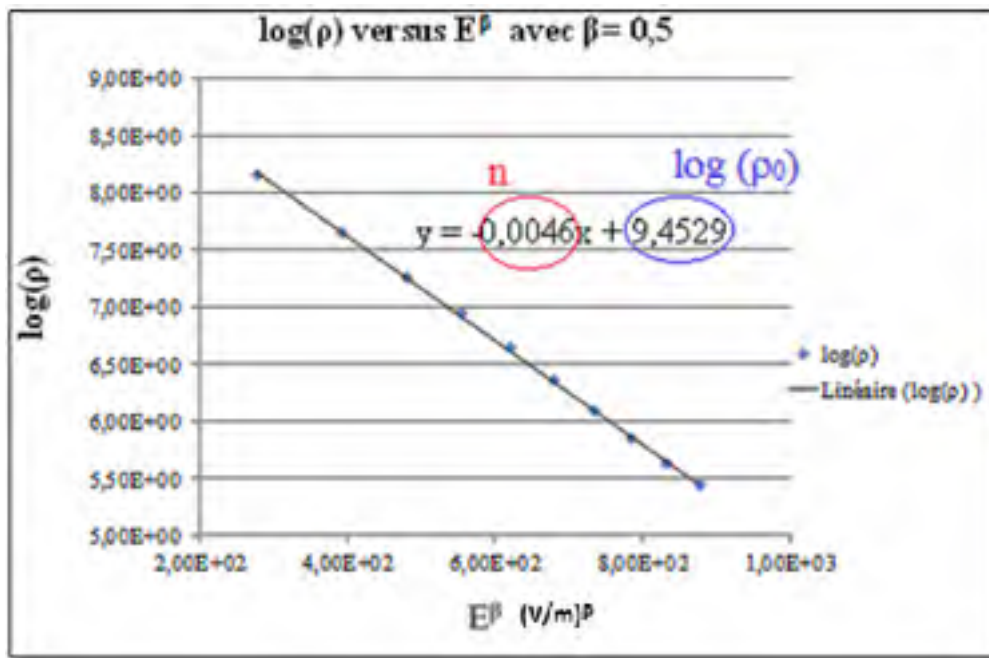


Figure 2.15 $\log(\rho)$ versus $E^{\beta=0,5}$

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une petite revue des méthodes permettant de calculer le champ électrique dans les machines électriques. Ainsi, nous avons présenté le circuit équivalent de l'extrémité de la barre d'un générateur haute tension avec un revêtement à gradient de potentiel et les équations mathématiques qui définissent ce système et qui pourront être utilisées pour les simulations numériques par la suite.

A la fin du chapitre, nous avons décrit le montage expérimental utilisé pour les mesures électriques ainsi que la méthodologie adoptée pour la fabrication et la caractérisation des paramètres électriques des échantillons époxy/SiC.

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DES RÉSULTATS DE SIMULATIONS ET DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Introduction

Les simulations numériques représentent un outil très efficace dans les différentes filières de l'ingénierie. Dans la conception des machines électriques, le passage par la simulation est inévitable, vu la complexité des modèles mathématiques à l'étude, le temps, et la précision des résultats.

L'évolution croissante des outils informatiques fournis au chercheur des logiciels et des applications informatiques très sophistiqués qui offrent un laboratoire virtuel pour la réalisation des différents tests et essais dans le but de faire une première validation, avant l'approbation expérimentale avec la réalisation du modèle réel.

La simulation numérique, représente un outil très économique en matière de temps et d'argent. Elle permet de réaliser plusieurs tests dans des délais relativement faibles et d'éviter le passage par les réalisations expérimentales sans prévoir les résultats.

Ce chapitre présente les résultats de simulation obtenus, pour les deux méthodes utilisées dans ce projet (la méthode analytique et la méthode des éléments finis) ainsi que les résultats expérimentaux obtenus des mesures effectuées.

3.2 Simulation numérique avec Matlab

Le logiciel Matlab reste un outil informatique très puissant, dans sa capacité et son temps de calcul. Avec une bibliothèque très riche en algorithmes mathématiques codés, qui peuvent être exploités dans des différents domaines, notamment dans le domaine de génie électrique. Il offre des outils pour résoudre numériquement des équations mathématiques de plus en plus

complexes, comme l'intégration numérique, le calcul matriciel et la résolution des équations différentielles compliquées, ...etc.

3.2.1 Modèle de simulation

Le modèle mathématique résultant de l'extrémité de la barre avec un revêtement anti-effluve est donné par l'équation suivante :

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r(x)} \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \right) \quad (3.1)$$

Avec

$$r(x) = \begin{cases} r_{SG} = r_0 \exp(-n|E|^\beta) , & 0 < x < L_1 \\ r_{ins} = \text{constante} , & L_1 < x < L_2 \end{cases}$$

La résistance r_0 peut être calculée en utilisant les dimensions du revêtement comme suit

$$r_0 = \frac{\rho_0}{ep \times p} \quad (3.2)$$

ep est l'épaisseur du revêtement anti-effluve (0.001 m)

p est le périmètre du revêtement anti-effluve (0.18 m)

Ce modèle représente une équation différentielle aux dérivées partielles, dont la solution est le potentiel électrique surfacique du revêtement anti-effluve. La résolution numérique de cette équation nécessite l'utilisation de la fonction Matlab *pdepe* qui appartient à la famille PDE⁶.

⁶ Partial Differential Equation

La fonction *pdepe*, permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles paraboliques et elliptiques, avec des conditions initiales et de limites bien définies. La résolution de ce type de problème se fait suivant une seule variable d'espace x et en fonction du temps t avec une bonne précision.

3.2.1.1 Les conditions initiales

La condition initiale dans notre problème, représente le potentiel électrique à l'instant $t = 0$ et celui-ci est assumé être uniformément nul.

3.2.1.2 Les conditions aux limites

À $x = 0$, nous avons pris une tension égale à deux fois la tension nominale de la machine (en considérant une machine dont la tension ligne-ligne de sortie de phase est 13.8 kV), avec une fréquence de 60 Hz sur quatre périodes.

$$U(0, t) = 16000 \sqrt{2} \sin(2 \pi \cdot 60 \cdot t) \quad (3.3)$$

La géométrie choisie pour le revêtement anti-effluve (épaisseur, longueur, périmètre de la barre) correspond à une barre de ce niveau de tension. La tension à la fin du revêtement anti-effluves (à $x = L_1 = 10$ cm), est égale à la tension de début de l'époxy (continuité du potentiel électrique) et le potentiel électrique à la fin de l'époxy (à $x = L_2 = 25$ cm) est nul.

La figure 3.1 illustre les conditions aux limites utilisées dans la simulation.

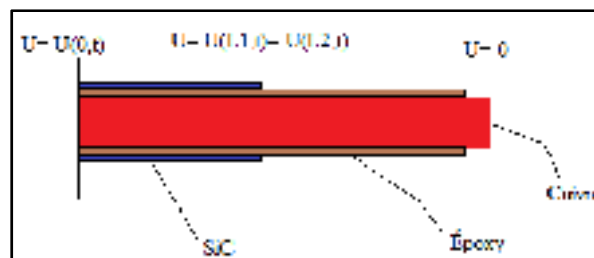


Figure 3.1 Illustration des conditions aux limites

Les résultats de simulation pour les paramètres expérimentaux mesurés sur échantillon de époxy/SiC ($n = 0.0035$ et $\rho_0 = 2.67 \times 10^6$), sont donnés par les figures 3.2 à 3.7

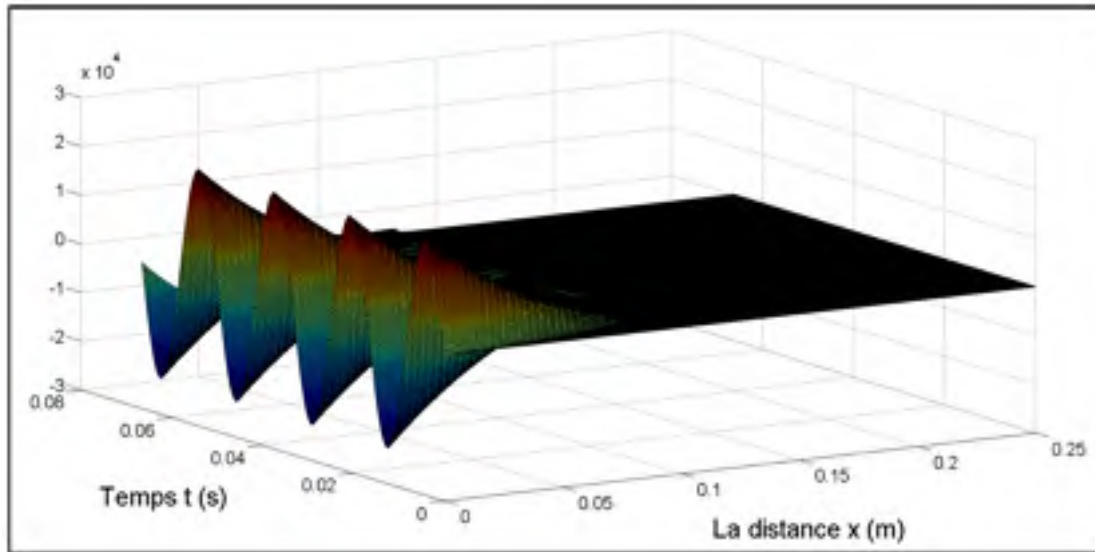


Figure 3.2 Le potentiel électrique en fonction du temps et de la position x

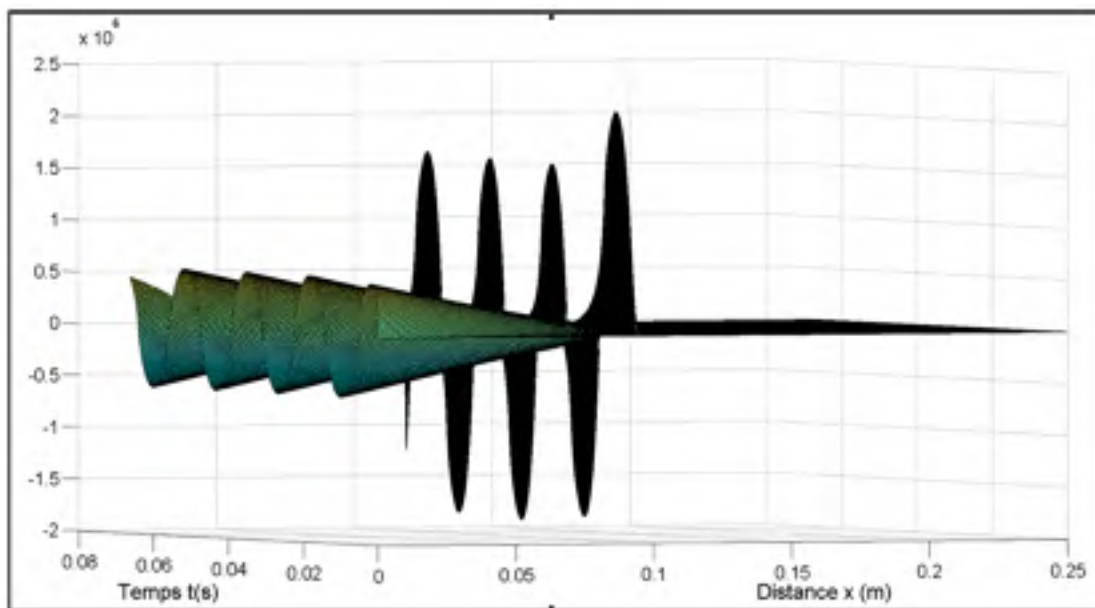


Figure 3.3 Le champ électrique en fonction du temps et de la position x

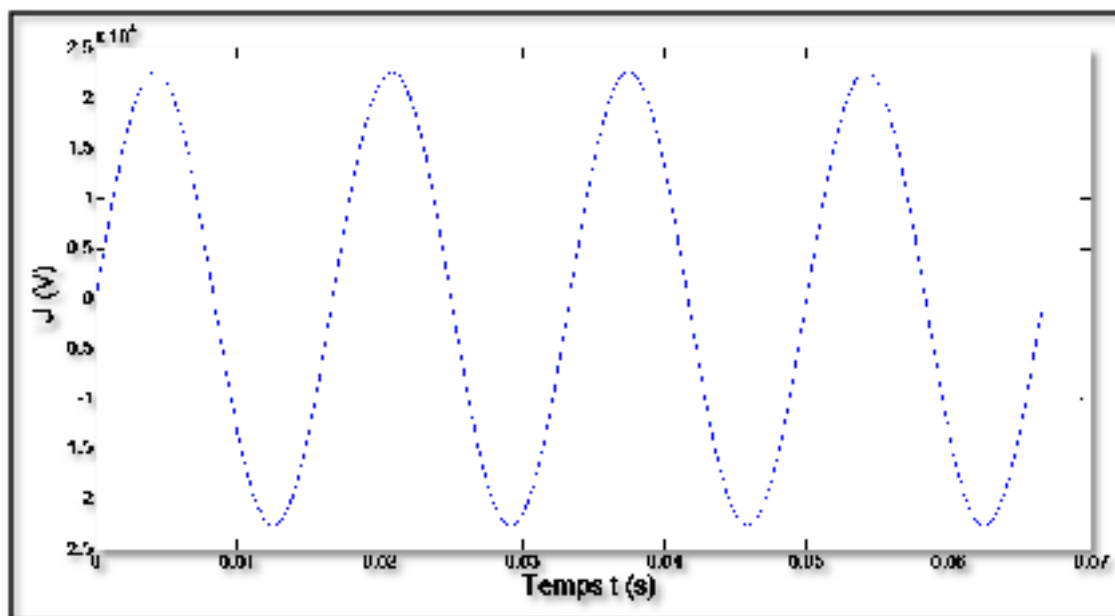


Figure 3.4 Le potentiel électrique à la position initiale ($x = 0$)

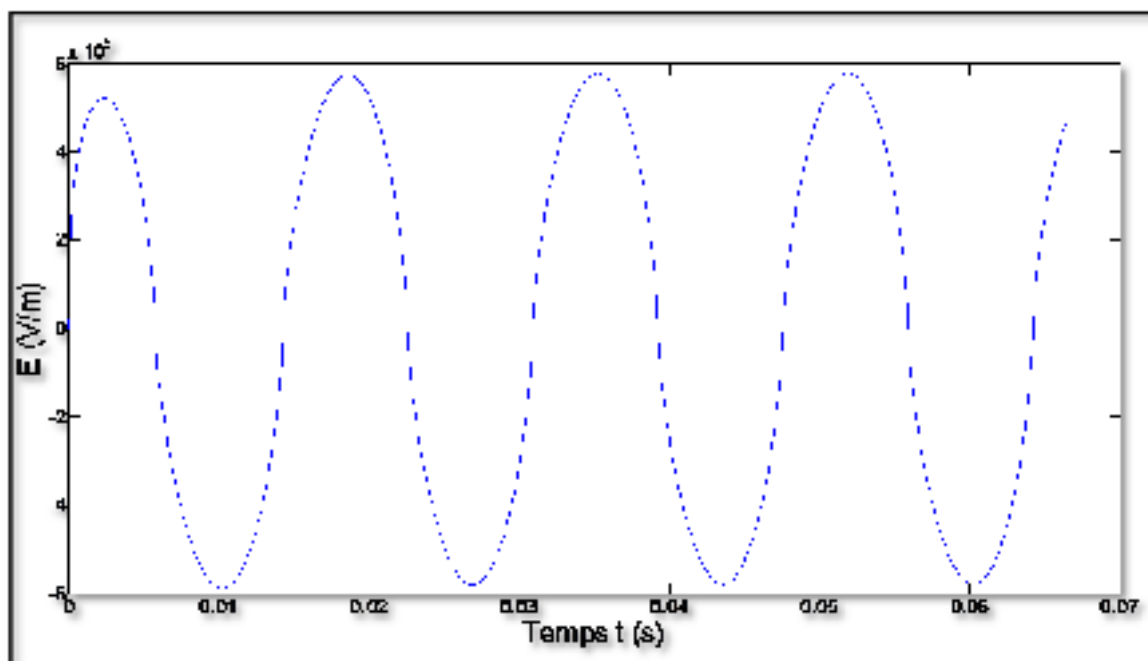


Figure 3.5 Le champ électrique à la position initiale ($x = 0$)

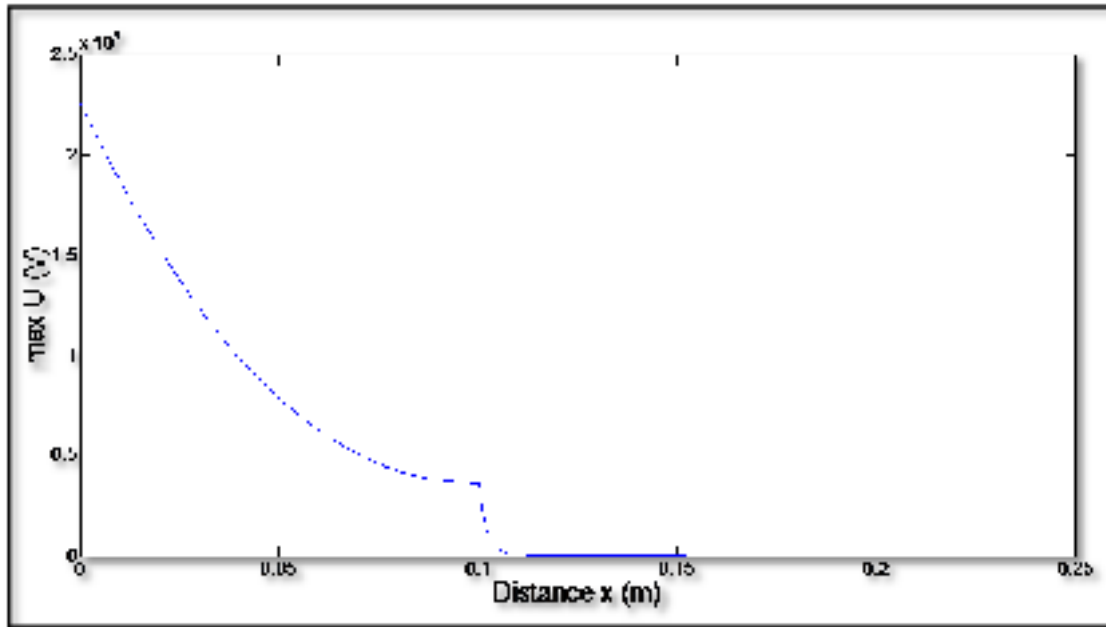


Figure 3.6 Le potentiel maximal (sur toute la plage temporelle) en fonction de la position x

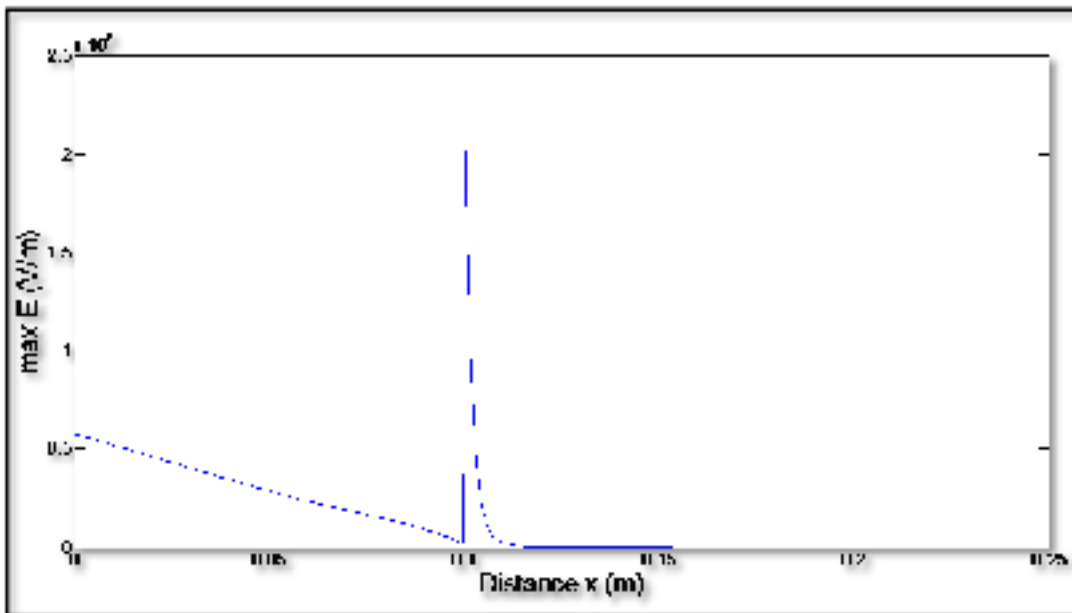


Figure 3.7 Le champ électrique maximal (sur toute la plage temporelle) en fonction de la position x

3.2.2 Optimisation des paramètres électriques des composites époxy/SiC

Le but de cette première partie de simulation est de voir la variation du champ électrique le long du revêtement époxy/SiC avec la variation des paramètres (n et ρ_0) du revêtement anti-effluve et déterminer les valeurs optimales qui correspondent à la plus faible intensité du champ électrique possible.

3.2.2.1 Variation de n

Dans une première étape, nous avons fixé β à 0.5, la résistivité ρ_0 à $1.0 \times 10^8 \Omega \text{ m}$ et nous avons réalisé une boucle de calcul sous Matlab permettant de varier le paramètre n de 0.001 à 0.014 avec un pas de calcul de 0.001.

La figure suivante représente le champ électrique maximal (valeur maximale en fonction du temps pour 4 cycles), tracé en fonction de la distance x et du paramètre n . Le champ électrique est relativement important à la fin du revêtement anti effluve par rapport à celui de la sortie de l'encoche.

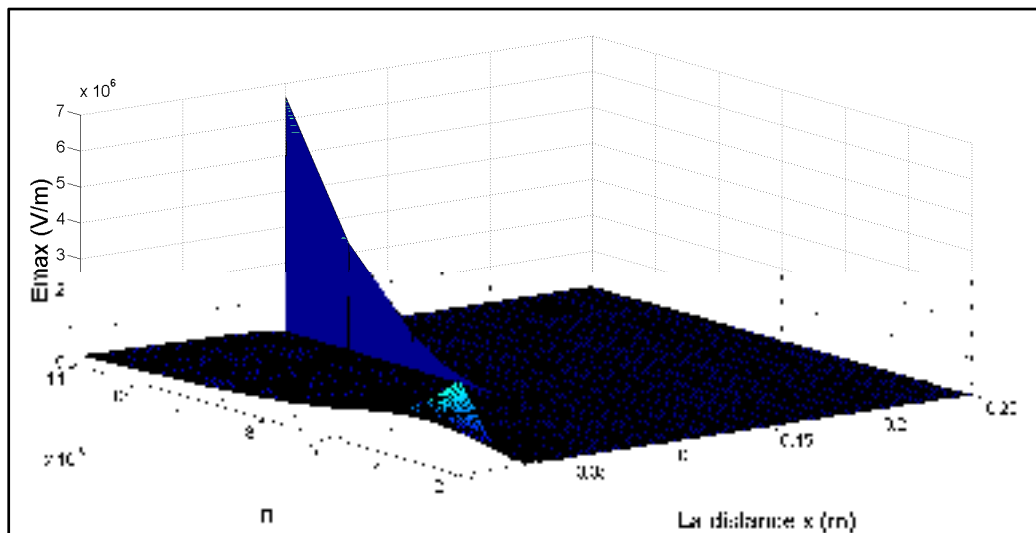


Figure 3.8 Le champ électrique maximal en fonction de la distance x et du paramètre n

Pour voir la valeur optimale de n qui correspond à un champ électrique minimal, on a tracé le champ électrique maximal en fonction de n et le résultat est présenté sur la figure 3.9. La valeur minimale du champ électrique est 5.15×10^5 V/m, et cette valeur correspond à $n = 0.009$. À gauche de ce minimum le champ maximal est situé à $x = 0$, à droite il est situé en $x = L_1$.

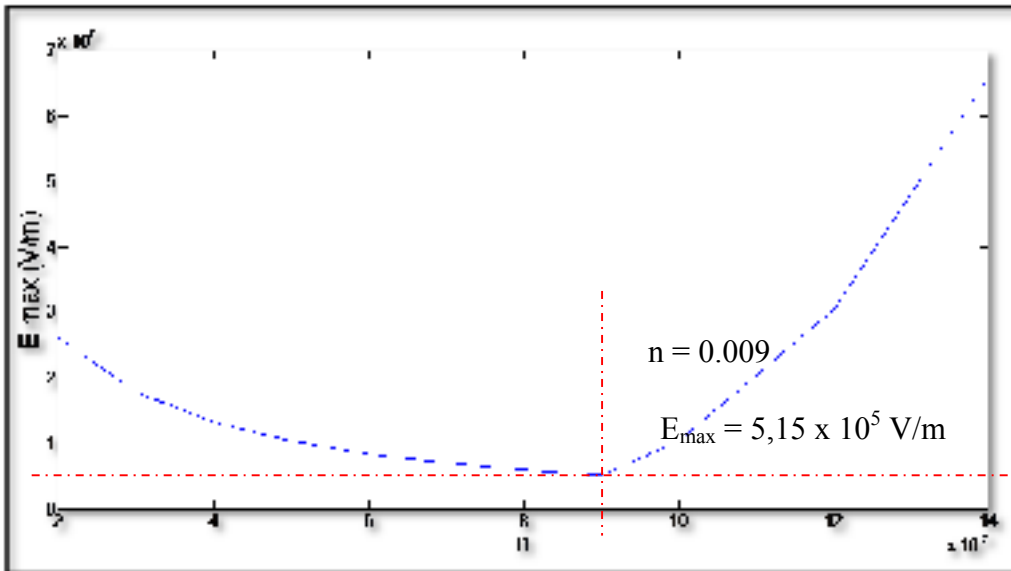


Figure 3.9 Le champ électrique maximal versus n

3.2.2.2 Variation de ρ_0

Dans cette seconde partie, nous avons fixé β à 0.5, le paramètre n à 0.009 et nous avons varié le $\log(\rho_0)$ entre 5 et 11 avec un pas de calcul de 1. Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous. Le champ électrique est toujours important à la fin du revêtement anti-effluve.

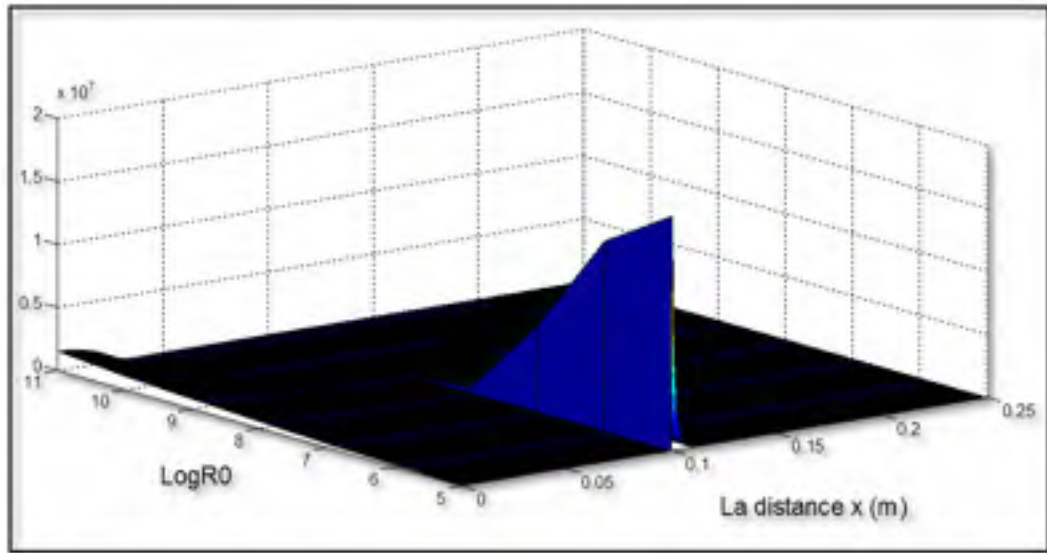


Figure 3.10 Le champ électrique maximal en fonction de la distance x et $\log(\rho_0)$

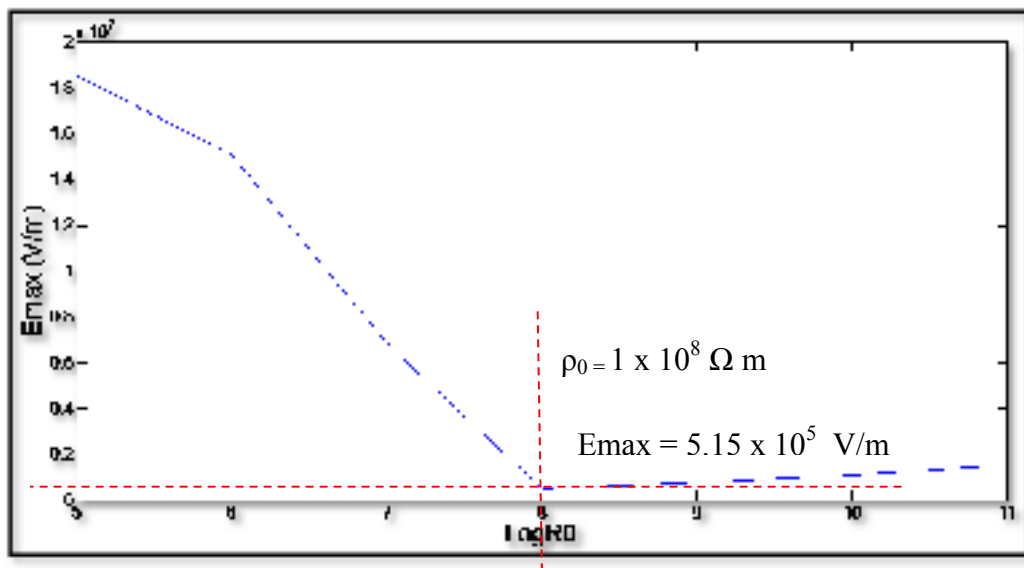


Figure 3.11 Le champ électrique maximal versus $\log(\rho_0)$

Sur la figure 3.11, nous pouvons constater qu'avec une résistivité $\rho_0 = 1.0 \times 10^8 \Omega \text{ m}$, on a évidemment la même valeur minimale du champ électrique $E_{\max} = 5.15 \times 10^5 \text{ V/m}$. Pour des valeurs plus faibles de ρ_0 , le champ maximal est situé à la fin du revêtement anti-effluve alors

que pour des valeurs plus élevées, il est situé au début du revêtement (en $x = 0$). Il y a donc un compromis à faire dans la conductivité et la non-linéarité des revêtements

Une optimisation plus rigoureuse a été faite dans le cadre d'une collaboration avec le laboratoire Laplace à Toulouse et est présentée en annexe. Une autre condition d'optimisation a été utilisée correspondant à la situation d'un potentiel complètement développé, c'est-à-dire en limitant la valeur du potentiel à la fin du revêtement anti-effluve.

3.2.2.3 Évolution du champ et du potentiel électrique avec un revêtement à gradient de potentiel avec les périmètres optimisés

Dans cette partie de simulation, nous avons simulé le revêtement à gradient de potentiel avec les paramètres optimisés ($\beta = 0.5$, $n = 0.009$ et $\rho_0 = 1.0 \times 10^8 \Omega \text{ m}$), afin de voir l'évolution du potentiel et du champ électrique le long du revêtement en gardant toujours les mêmes conditions initiales et aux limites définies précédemment.

La figure 3.12, représente le potentiel électrique tracé en trois dimensions, en fonction du temps t et la position x . Le champ électrique est présenté de la même façon sur la figure 3.13.

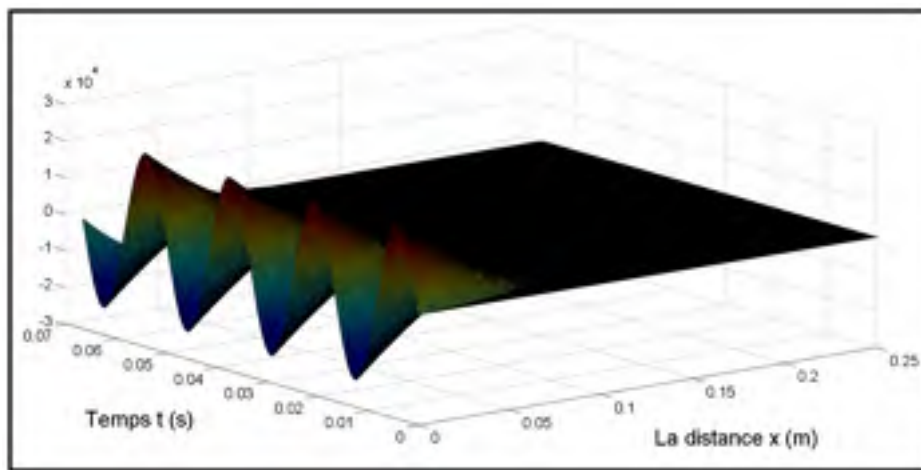


Figure 3.12 Le potentiel électrique en fonction du temps et de la position x

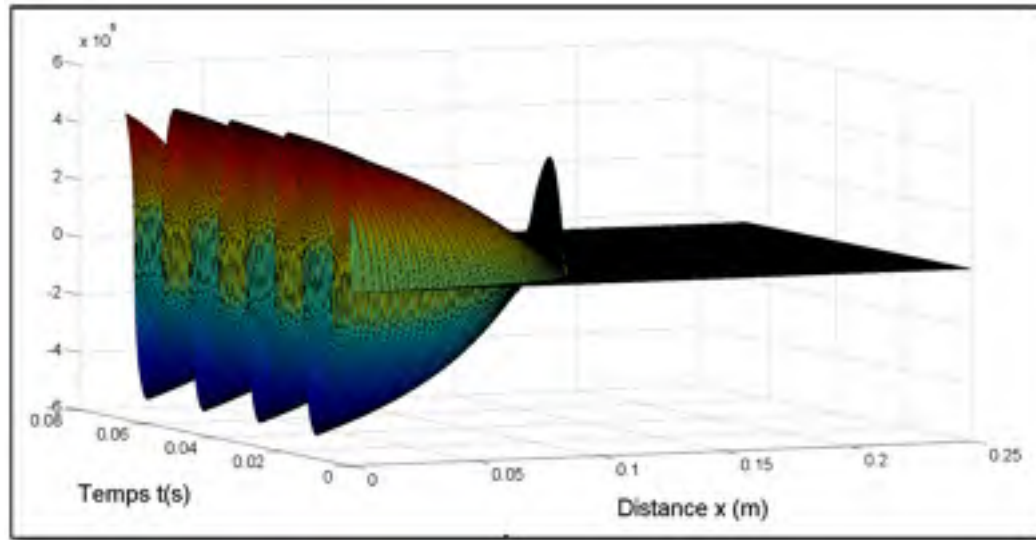


Figure 3.13 Le champ électrique en fonction du temps et de la position x

Les figures (3.14, 3.15), montrent respectivement le potentiel électrique maximal et le champ électrique maximal en fonction de la position x. La valeur maximale du potentiel électrique de 22 kV (correspondant à la valeur rms de 16 kV) au début du revêtement diminue le long du revêtement de SiC et atteint une valeur assez faible (0.7×10^3 V) au début de l'isolant.

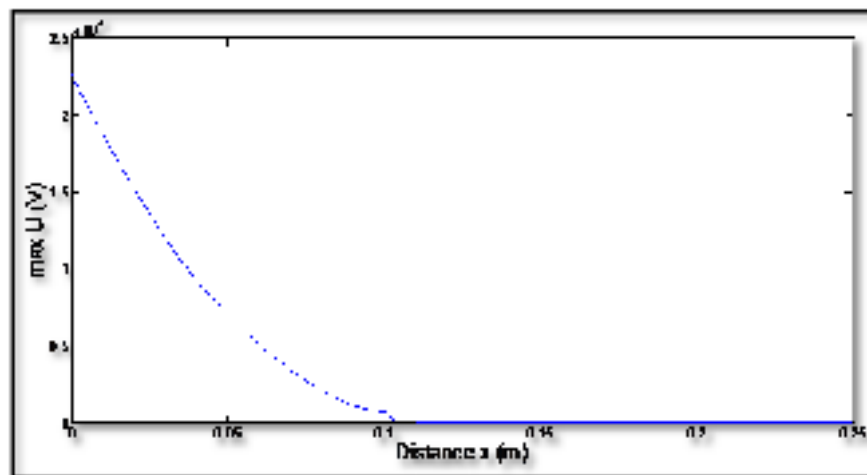


Figure 3.14 Le potentiel maximal en fonction de la position x

Avec les paramètres électriques optimisés, nous avons principalement deux pics de champ électrique (figure 3.15). Le premier est au début du revêtement à gradient de potentiel (5.15×10^5 V/m) et le deuxième pic est au début de l'époxy (4.03×10^5 V/m). Ces deux pics ne présentent pas vraiment de risque potentiel de décharges partielles, qui correspond à un champ électrique aux alentours de 3 kV/mm.

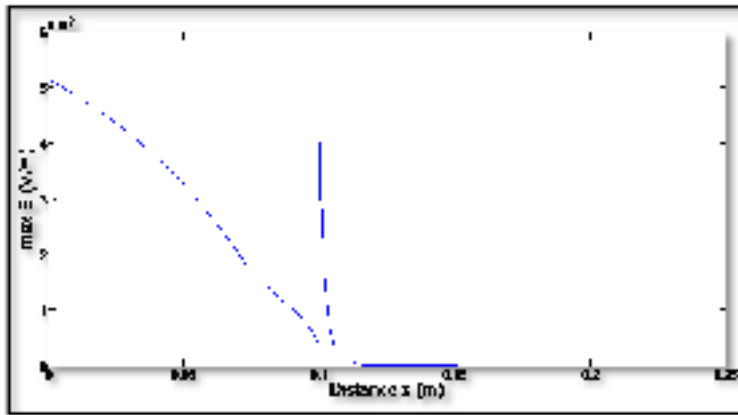


Figure 3.15 Le champ électrique maximal en fonction de la position x

La figure 3.16 représente le potentiel électrique à la position initiale ($x = 0$) en fonction du temps t tracé sur quatre périodes avec une fréquence de 60 Hz.

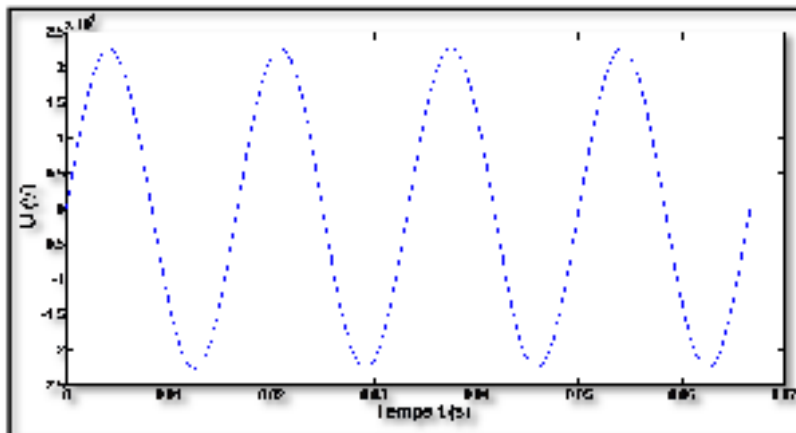


Figure 3.16 Le potentiel électrique à la position initiale ($x = 0$)

Le champ électrique à la position initiale ($x = 0$) est présenté sur la figure 3.17. La forme d'onde du champ électrique n'est pas purement sinusoïdale (sinusoïdale déformé (figure 3.17)) à cause du comportement non-linéaire du revêtement. Une représentation spectrale montrant l'existence des harmoniques d'ordres supérieurs dans le signal du champ électrique est présentée sur la figure 3.18.

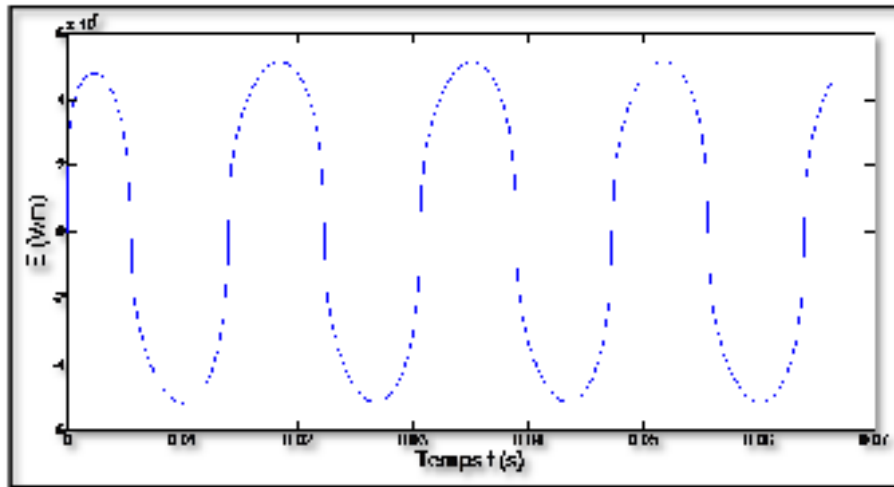


Figure 3.17 Le champ électrique à la position initiale ($x = 0$)

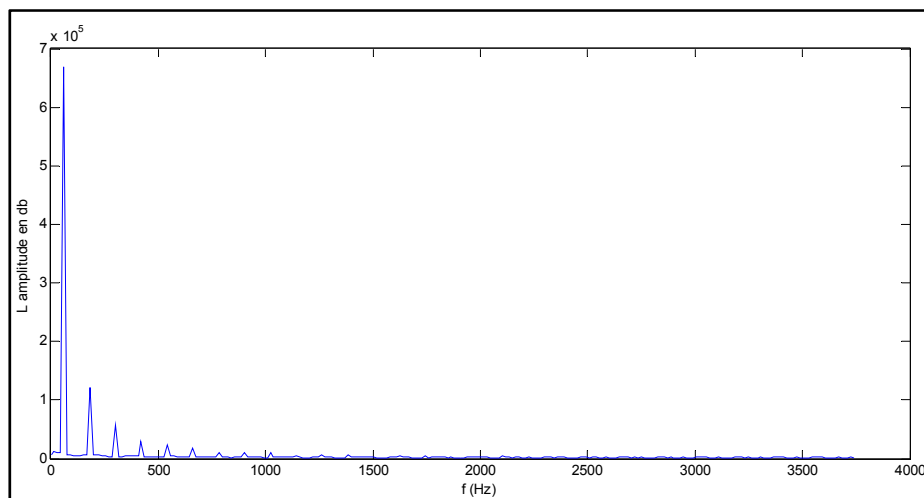


Figure 3.18 Représentation spectrale du champ électrique à la position initiale

3.3 Simulation numérique sous COMSOL

COMSOL est un environnement de simulation qui offre la possibilité d'ajouter différents phénomènes physiques au modèle à étudier. C'est un outil de calcul numérique par éléments finis modulaires, permettant de modéliser une grande variété de phénomènes physiques caractérisant le problème réel.

Sa bibliothèque offre plusieurs modules physiques, parmi lesquels on trouve le transfert thermique, la mécanique des fluides, l'électricité, l'électromagnétisme ... etc.

Pour notre problème, nous avons utilisé le module courant électrique, qui permet de calculer les différentes grandeurs électriques (potentiel électrique, champ, courant, conductivité ...etc) avec une géométrie en deux dimensions (2D). Les principales étapes de la modélisation sont les suivantes :

- la définition globale des paramètres et de la géométrie;
- la configuration des matériaux utilisés;
- La sélection du module physique approprié avec la précision des conditions initiales et aux limites;
- le maillage;
- la résolution du problème en utilisant le solveur approprié;
- la visualisation des résultats.

3.3.1 Définition des paramètres de la géométrie

La première étape dans la modélisation sous COMSOL consiste à définir tous les paramètres et les variables qui peuvent être utilisés dans la résolution du problème, comme les constantes de matériaux, les dimensions utilisées pour la géométrie et des variables telles la tension initiale et l'équations de non linéarité (comme l'équation de la résistivité électrique dans notre cas)...etc.

Après le recensement des différents paramètres, nous avons configuré la géométrie du problème. Cette géométrie définit quasiment l'espace de résolution des équations.

La figure 3.19 représente l'extrémité de la barre avec le revêtement anti-effluve en 2D. Les dimensions du système sont les mêmes que les dimensions utilisées pour la simulation sous Matlab.

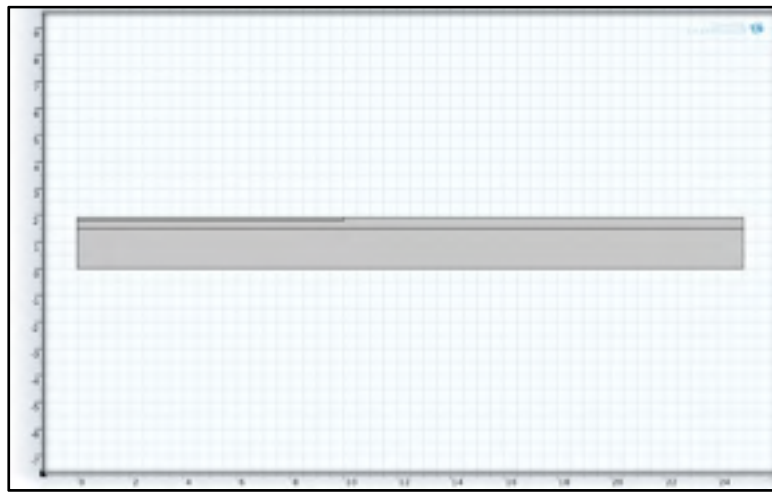


Figure 3.19 Géométrie de l'extrémité de la barre en 2D sous COMSOL

3.3.2 La configuration des matériaux

Trois principaux matériaux sont ajoutés à la géométrie, le cuivre comme conducteur, l'époxy/mica comme isolant et le composite époxy/SiC comme revêtement anti-effluve comme montre la figure 3.20. Les propriétés électriques de ces matériaux sont présentées dans le tableau 3.1.

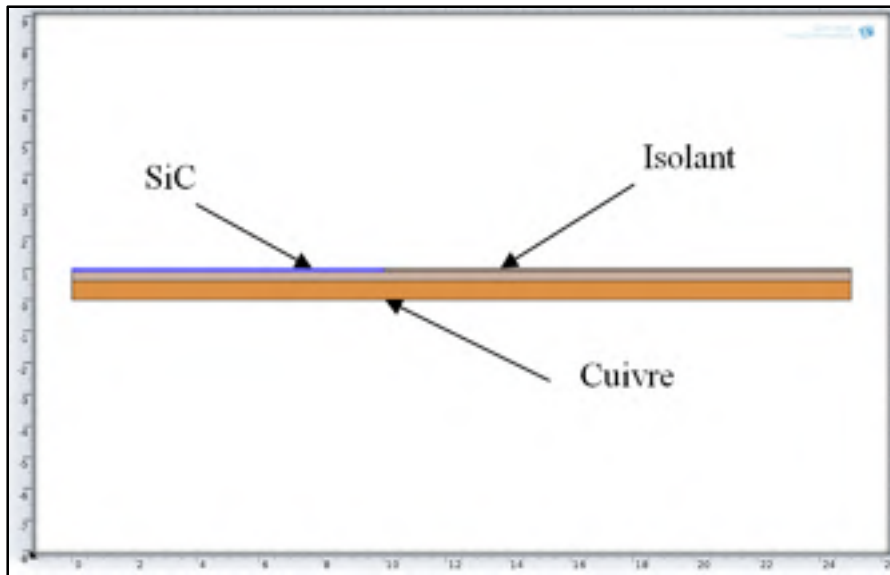


Figure 3.20 Matériaux utilisés

Tableau 3.1 Paramètres des matériaux utilisés dans la simulation

Domaine	Caractéristiques
Conducteur (Cuivre)	$\epsilon_r = 1$ $\sigma = 10^7 \text{ S/m}$
Isolant (époxy/mica)	$\epsilon_r = 4$ $\sigma = 1.5e^{-12} \text{ S/m}$
Revêtement à gradient de potentiel (SiC)	$\epsilon_r = 30$ $\sigma = 1e^{-8} * \exp(n * E ^\beta) \text{ S/m}$

3.3.3 La sélection du module physique

Dans cette section, nous avons précisé l'environnement physique de résolution des équations de notre problème. Le module courant électrique permet de résoudre les différentes équations de base de l'électrostatique avec la bonne configuration des conditions initiales et aux limites.

Nous avons appliqué une tension sinusoïdale avec une amplitude de 16 kV et une fréquence de 60 Hz au début de revêtement et 0 volt à la fin.

3.3.4 Maillage

Le maillage correspond à la discrétisation spatiale de la géométrie en surfaces élémentaires (appelés mailles) défini par des points (appelés nœuds). Ces nœuds constituent les connexions entre les mailles.

Le maillage peut se faire automatiquement par le logiciel. L'algorithme prend pour point de départ les éléments de la géométrie et crée des nœuds supplémentaires jusqu'à satisfaire des critères prédéfinis comme le nombre de mailles ou la taille maximale des mailles. On peut utiliser les tailles prédéfinies (extra grossier, grossier, normal, fine, extra fine...) par le logiciel ou agir sur les paramètres de génération du maillage, soit au niveau global, soit sur chaque élément de la géométrie, dans la fenêtre paramètre de maillage quadratique du menu maillage.

Dans notre cas, nous avons ajusté la taille du maillage afin d'obtenir une meilleur résolution et reproduire le même maillage que celui utilisé pour la simulation sous Matlab dans le but de comparer les résultats obtenus des deux méthodes. La figure 3.21 représente l'extrémité de la barre après le maillage.

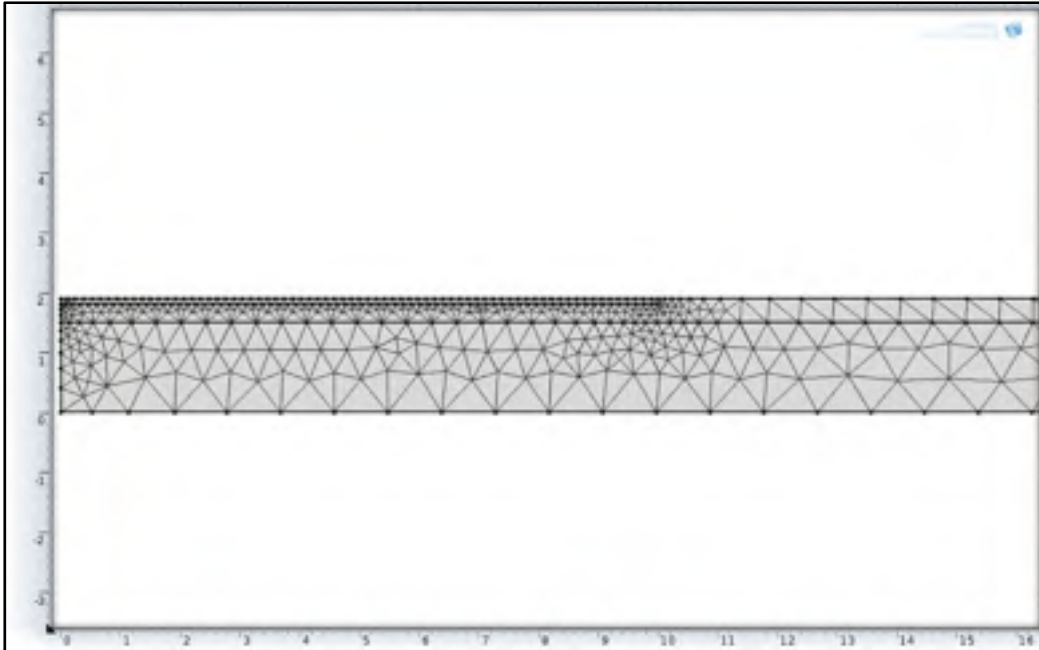


Figure 3.21 Le maillage

3.3.5 Résolution du problème

Comsol offre une variété de types d'analyse (temporelle, stationnaire, paramétrée...etc.), l'utilisation de chaque type d'analyse dépend de la nature du module physique utilisé.

Pour notre modélisation, nous pouvons utiliser une étude stationnaire, comme on peut utiliser une résolution dans le domaine temporel. Le but de la résolution dans le domaine temporel, est de comparer les résultats avec ceux obtenus par la résolution de l'équation différentielle sous Matlab.

3.3.6 Visualisation des résultats

Les grandeurs représentées en 1D, 2D peuvent également dépendre du temps. La figure 3.22, illustre le potentiel électrique de la géométrie représentée dans un plan XY à l'instant $t = 0.00417s$, correspondant au quart de la période, c'est-à-dire au premier maximum de la tension appliquée en $x = 0$ (voir figure 3.16).

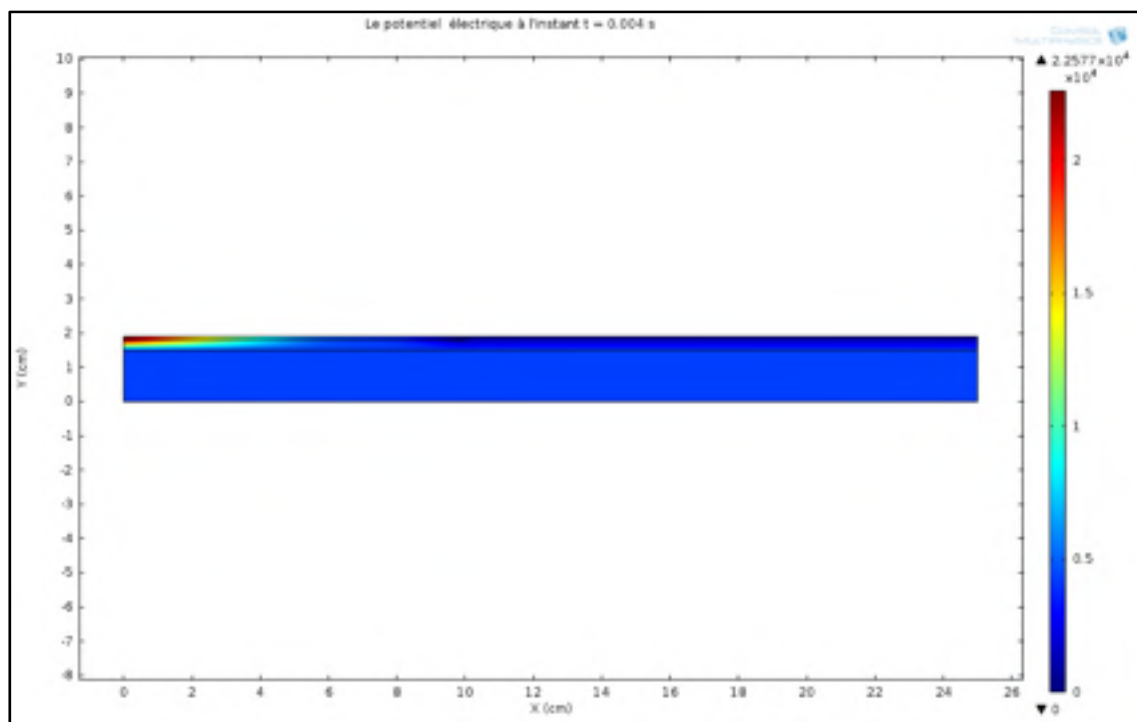


Figure 3.22 Le potentiel électrique en 2D

La figure 3.23, représente le potentiel électrique en fonction de la distance tracé selon une ligne au long de l'extrémité de la barre à l' instant $t = 0.00417s$. Le potentiel électrique diminue au long du revêtement anti-effluve jusqu'à une valeur aux alentours de 4 kV à une distance de 5 cm de la sortie de l'encoche. Par la suite, il s'annule dès le début de l'isolant.

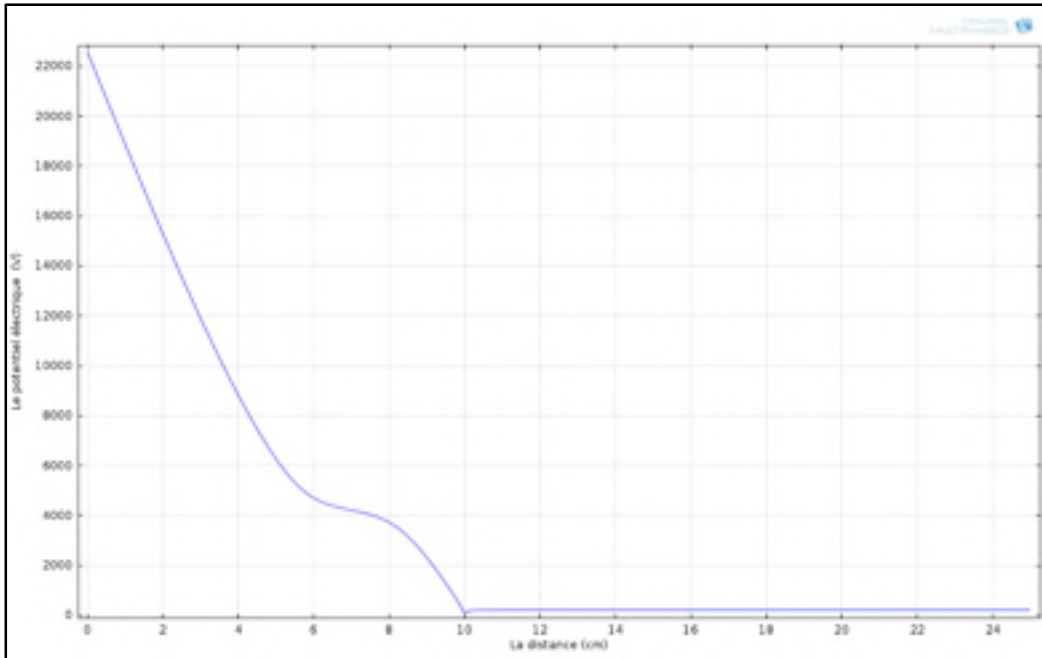


Figure 3.23 Le potentiel électrique versus la position x à l' instant $t = 0.00417s$

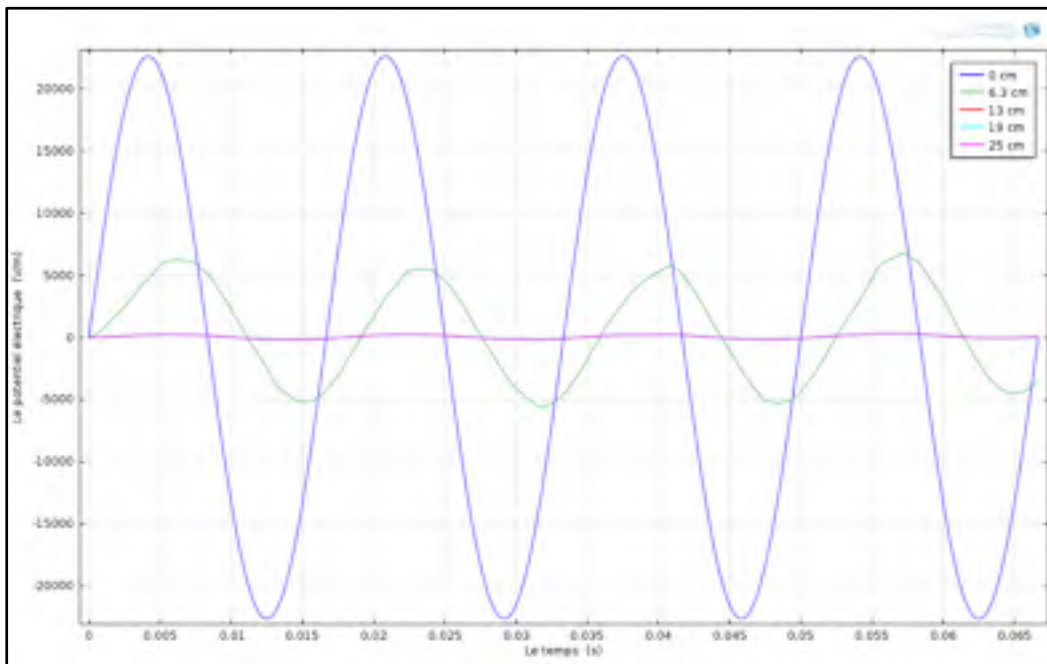


Figure 3.24 Le potentiel électrique V en fonction du temps pour 5 positions x

La figure 3.24 montre le potentiel électrique tracé en fonction du temps, pour cinq positions différentes ($x = 0, 6.3, 13, 19, 25$ cm).

La composante du champ électrique suivant l'axe x à l'instant $t = 0.00417$ s, présentée dans le plan XY , est donnée sur la figure 3.25.

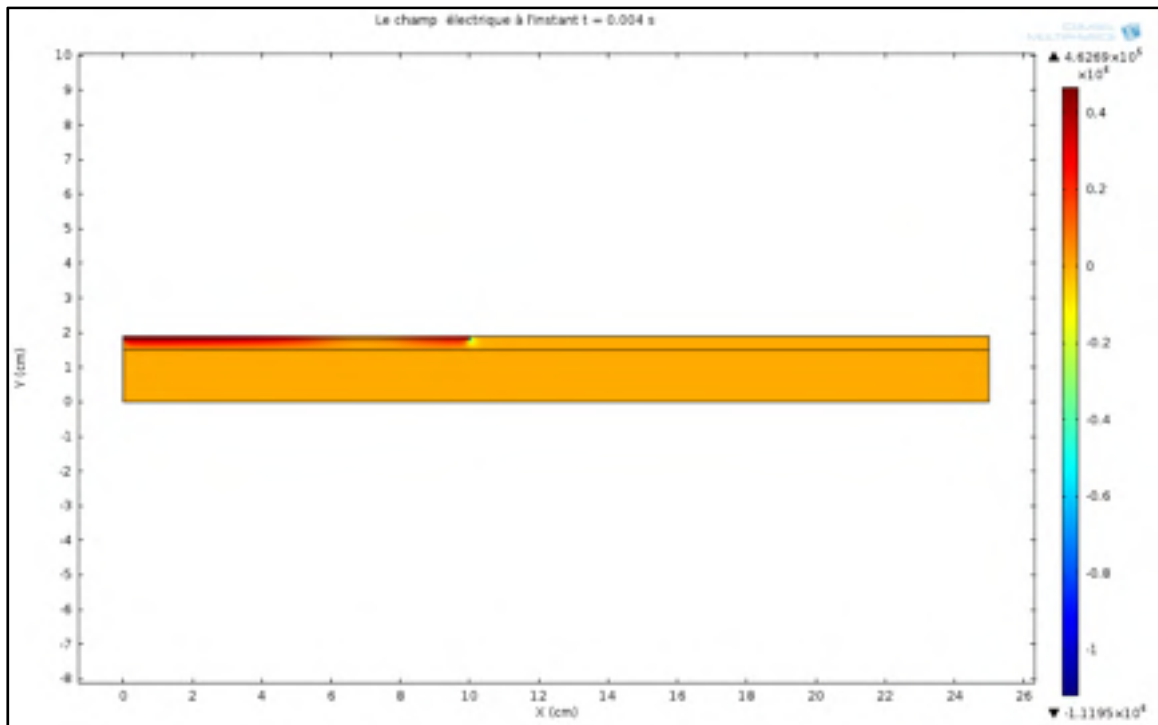


Figure 3.25 Le champ électrique en 2D

La figure 3.26, représente la composante du champ électrique suivant l'axe x en fonction de la distance à un instant t . Sur le graphique, nous voyons deux pics importants, le premier pic ayant une valeur de 4.5×10^5 V/m au début du revêtement SiC et le deuxième pic à la fin du revêtement a une valeur de 3×10^5 V/m.

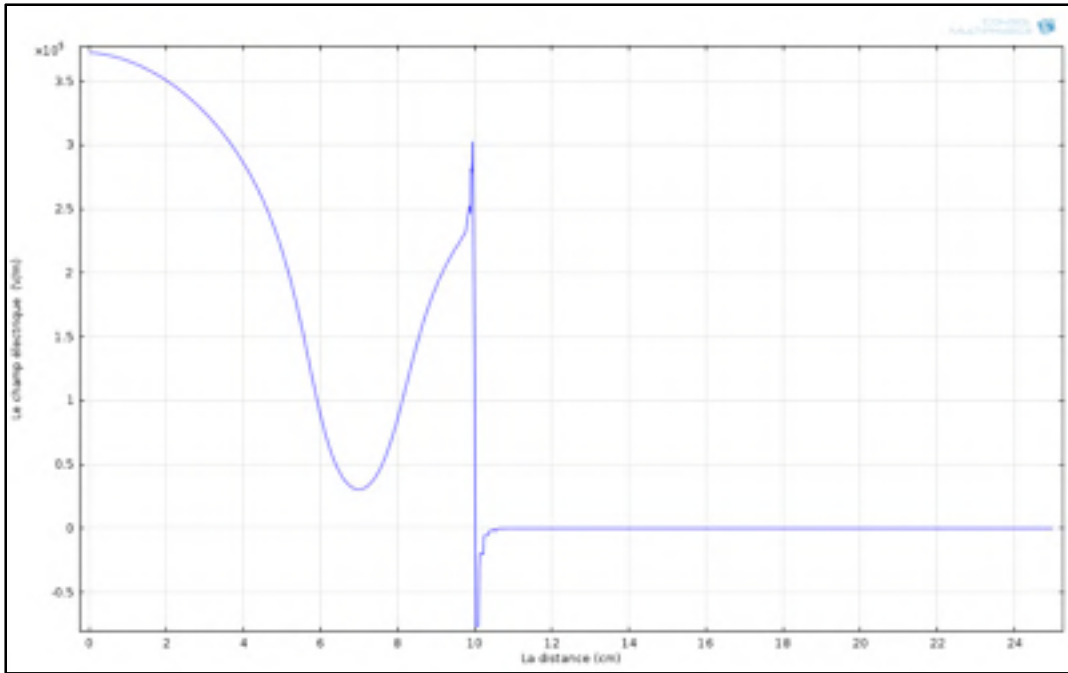


Figure 3.26 Le champ électrique versus la position x à l'instant $t = 0.00417s$

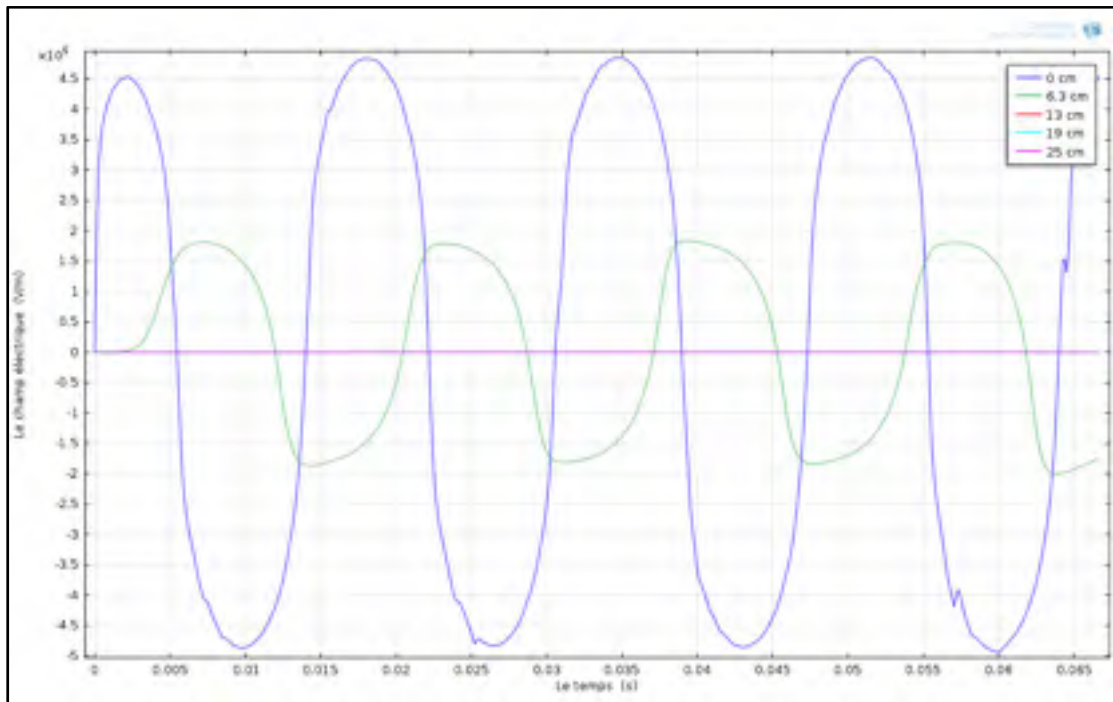


Figure 3.27 Le champ électrique E en fonction du temps pour 5 positions x

La figure 3.27 illustre la composante du champ électrique selon l'axe x en fonction du temps dans cinq positions différentes ($x = 0, 6.3, 13, 19, 25$ cm).

3.4 Comparaison entre la méthode analytique et la méthode des éléments finis

Le logiciel Comsol offre la possibilité d'exporter les données de calcul, et les traiter dans d'autres logiciels comme Excel et Matlab.

Nous avons fait quelques sous-programmes sous Matlab afin de calculer le potentiel électrique maximum et le champ électrique maximum des données issus de COMSOL. Les résultats sont présentés dans les figures 3.28 et 3.29

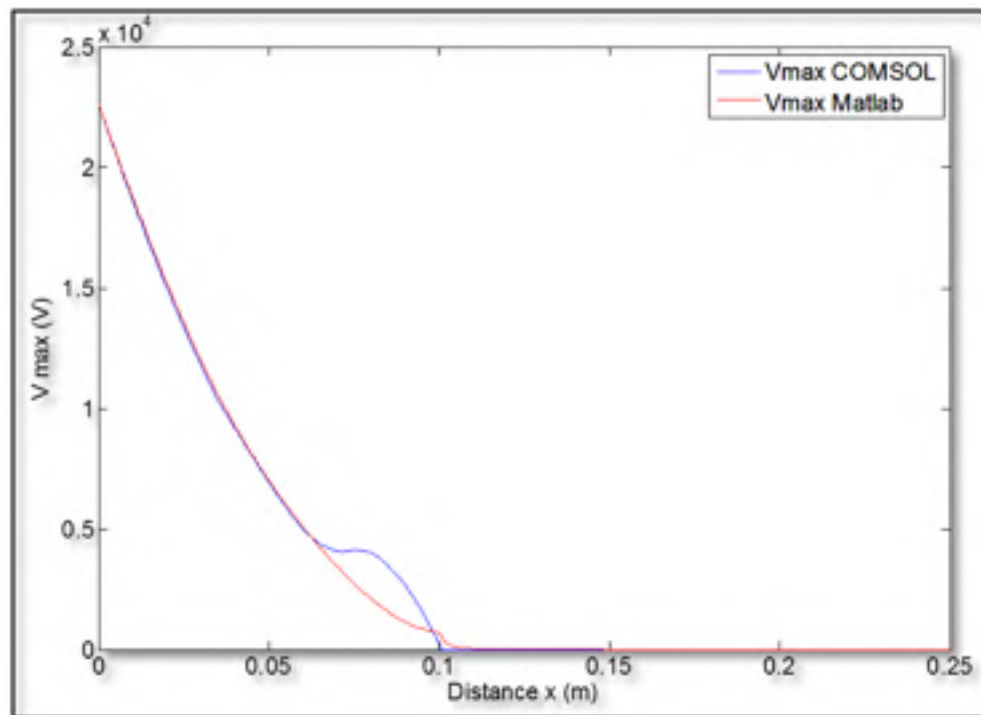


Figure 3.28 Le potentiel électrique maximum obtenu par Matlab et Comsol

Nous remarquons sur cette figure que le potentiel électrique obtenu par la méthode des éléments finis diminue le long du revêtement anti-effluve de la même allure que celui obtenu

par la méthode analytique sous Matlab. Puis il se stabilise autour d'une valeur fixe ($\sim 0.45 \times 10^4$ V) sur une distance de 2 à 3 cm du revêtement de SiC et ils s'annulent au même point (au début de l'isolant).

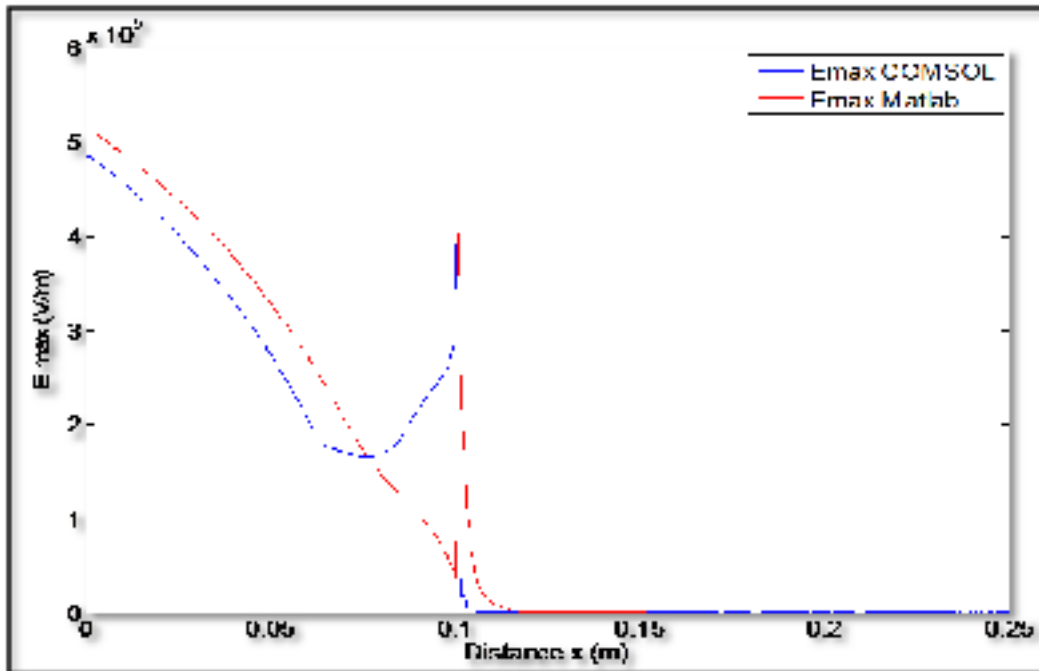


Figure 3.29 Le champ électrique maximum obtenu par Matlab et COMSOL

3.5 Résultats des tests électrique et caractérisation des paramètres de SiC

Les mesures électriques ont été réalisées au CTT⁷. Il s'y trouve un laboratoire aménagé pour réaliser des essais en haute tension dans les meilleures conditions de sécurité, notamment la sécurité des personnes, en effectuant ces tests dans une aire haute tension isolée de l'espace réservé à la personne réalisant les essais.

⁷ Centre de Technologies Thermiques

3.5.1 Tests à la température ambiante (23 °C)

Dans cette première partie de mesures électriques, nous avons mesuré la résistivité électrique pour tous les échantillons fabriqués. Les essais électriques sont effectués sous la température ambiante (23 °C), les résultats sont présentés dans la figure 3.30.

Les lignes bleue et rouge représentent respectivement la limite supérieure et inférieure de la résistivité électrique qu'on peut avoir avec l'utilisation du SiC. Le ruban est un ruban au carbure de silicium utilisé commercialement par les fabricants de barres.

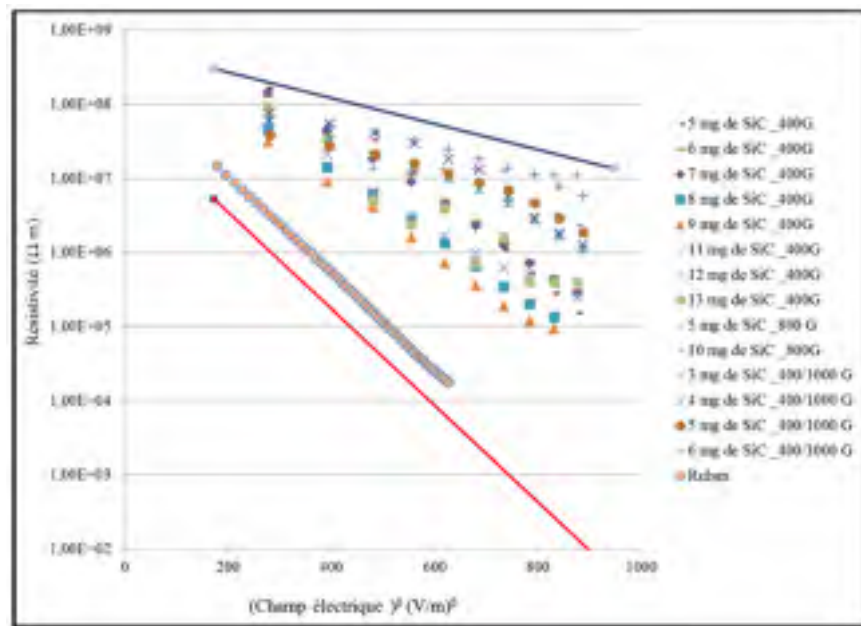


Figure 3.30 La résistivité électrique en fonction du champ électrique pour différents échantillons epoxy/SiC

Les deux figures suivantes (3.31, 3.32) représentent l'évolution des paramètres (ρ_0 et n) des échantillons de la même poudre SiC (400 G) en fonction de la masse de SiC (en mg), la masse de résine étant toujours de 10 mg.

La première figure montre que ρ_0 diminue avec l'augmentation de la concentration de SiC jusqu'à atteindre une valeur relativement stable pour une quantité de plus de 8 mg de SiC

(> 80 phr). Par contre, les résultats présentés sur la deuxième figure, montrent qu'il n'y a pas de corrélation claire entre le paramètre n et la concentration de SiC.

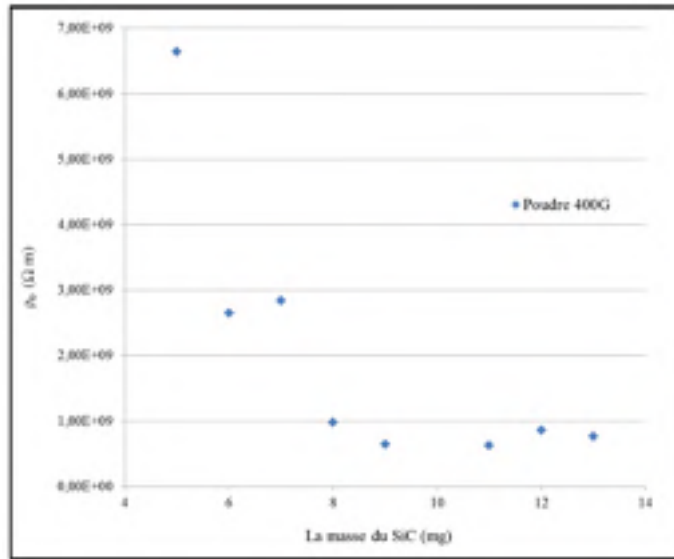


Figure 3.31 ρ_0 versus la masse du SiC (Poudre 400 G)

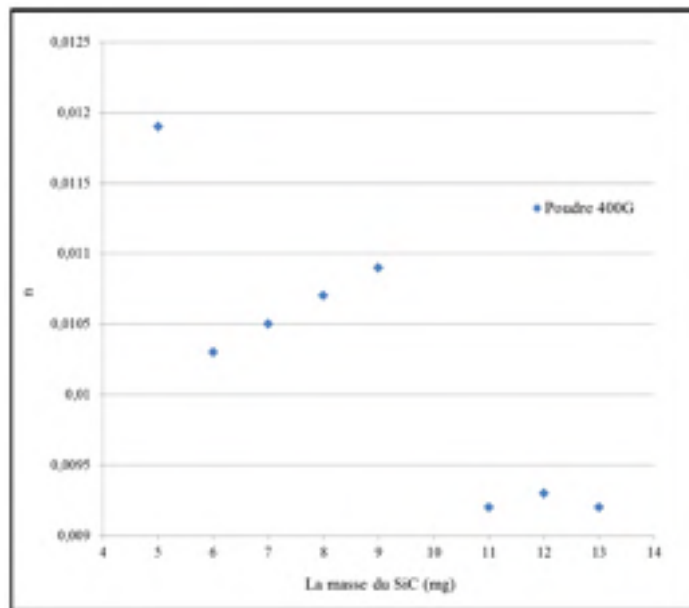


Figure 3.32 n versus la masse du SiC (Poudre 400 G)

3.5.2 Tests avec variation de la température

Le but de cette section de tests est de voir l'effet de la température sur la résistivité électrique du SiC, puisqu'en opération ces revêtements fonctionnent généralement à des températures supérieures à la température de la pièce. Le principe de la mesure est le même que celui utilisé précédemment sauf que cette fois-ci, nous avons mis l'échantillon dans un four comme le montre la figure ci-dessous.

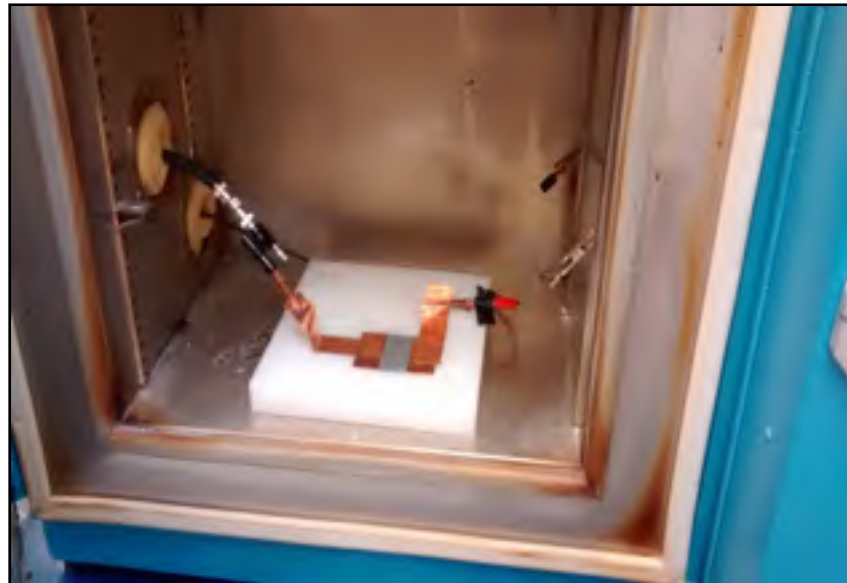


Figure 3.33 Mesure avec variation de la température

Les tests sont réalisés pour deux échantillons (5 et 7 mg de SiC) de chaque poudre sous trois différentes températures (40°C, 60°C et 80°C).

3.5.2.1 Résultats aux températures de 40, 60 et 80°C

Les résultats de la résistivité électrique en fonction de la racine carrée du champ électrique pour les mesures sur les échantillons #4 et #6, contenant respectivement 50 et 70 phr de SiC sont présentés aux figures 3.34, 3.35 et 3.36 pour les températures de 40, 60 et 80°C respectivement.

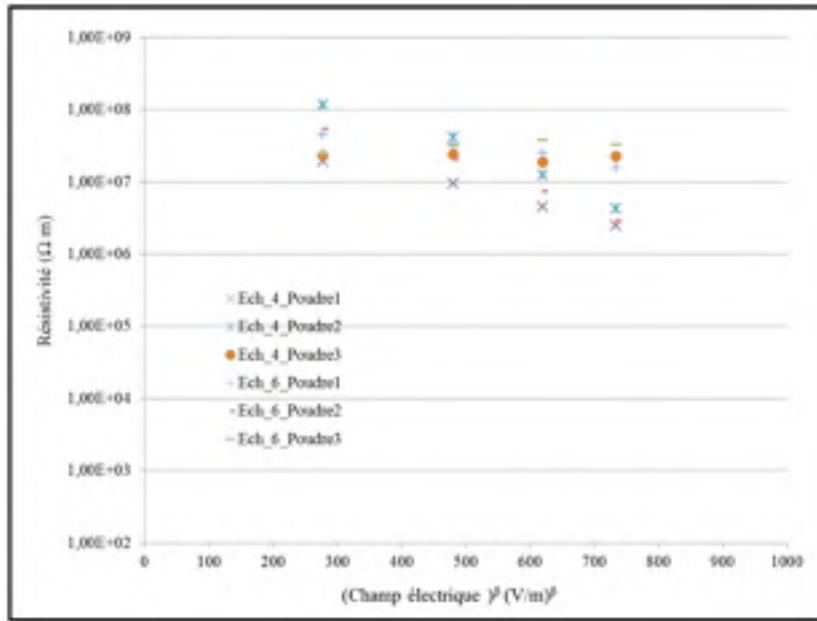


Figure 3.34 La résistivité électrique en fonction de la racine carrée du champ électrique à la température $T = 40^\circ\text{C}$

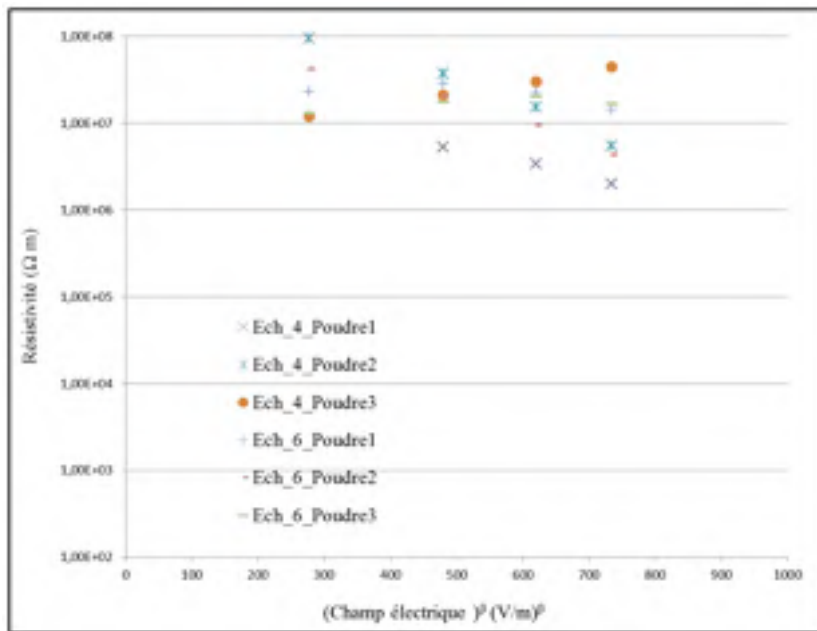


Figure 3.35 La résistivité électrique en fonction de la racine carrée du champ électrique à la température $T = 60^\circ\text{C}$

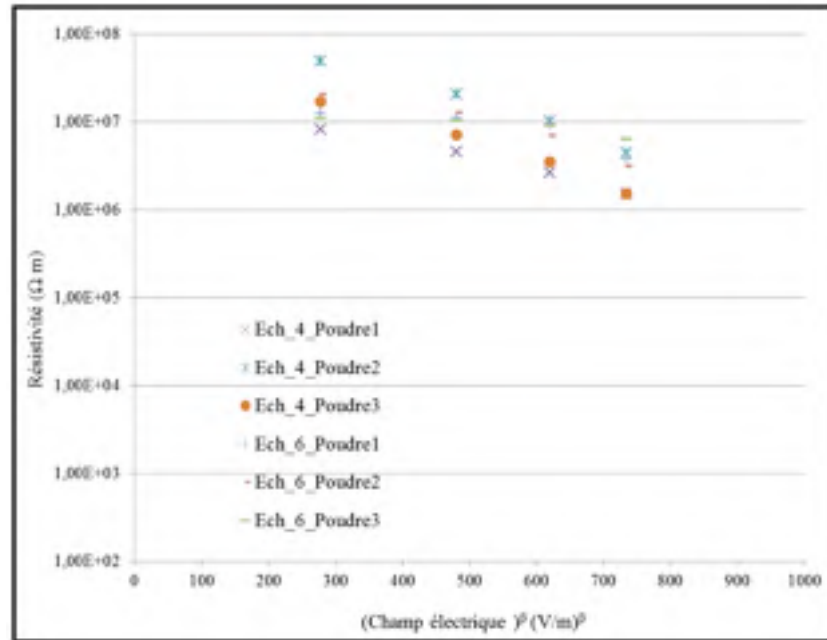


Figure 3.36 La résistivité électrique en fonction de la racine carrée du champ électrique à la température $T= 80^{\circ}\text{C}$

Les figures ci-dessus présentent les résistivités électriques obtenues pour les différentes températures, ces résultats montrent que la résistivité électrique varie avec le changement de la température mais cette variation reste toujours au-dessus de la limite définie précédemment.

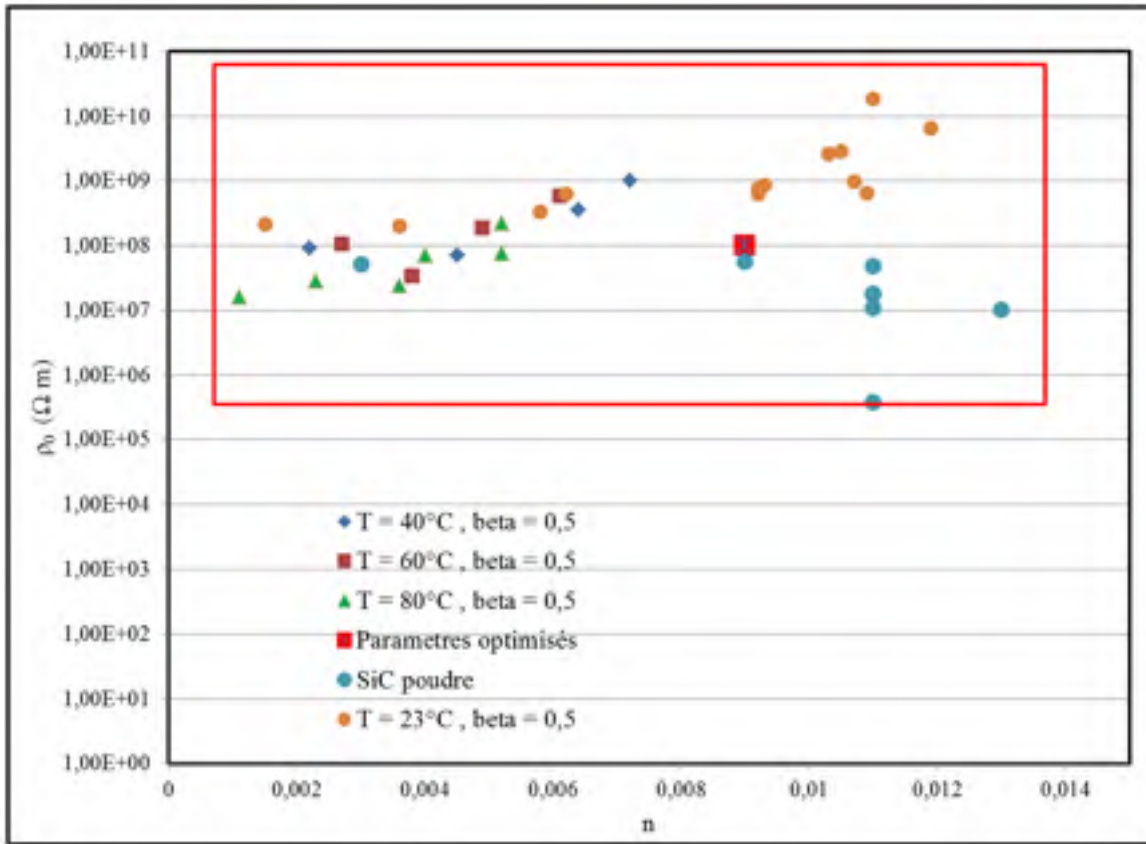


Figure 3.37 ρ_0 versus n à différentes températures

La figure 3.37 présente les paramètres de SiC issues des mesures expérimentales (ρ_0 versus n). Le rectangle en rouge présente une approximation des intervalles de variations des paramètres de SiC qu'on peut avoir avec le changement de la taille, de la qualité et de la concentration des grains de la poudre et la variation de température. On voit que la situation optimisée obtenue par calcul se situe à l'intérieur des valeurs atteignables par la technologie à base de carbure de silicium.

La figure 3.38 illustre la résistivité électrique d'un échantillon (7 mg de SiC de 400 G) obtenue pour les différentes températures. Les résultats montrent que la résistivité électrique diminue avec l'augmentation de la température.

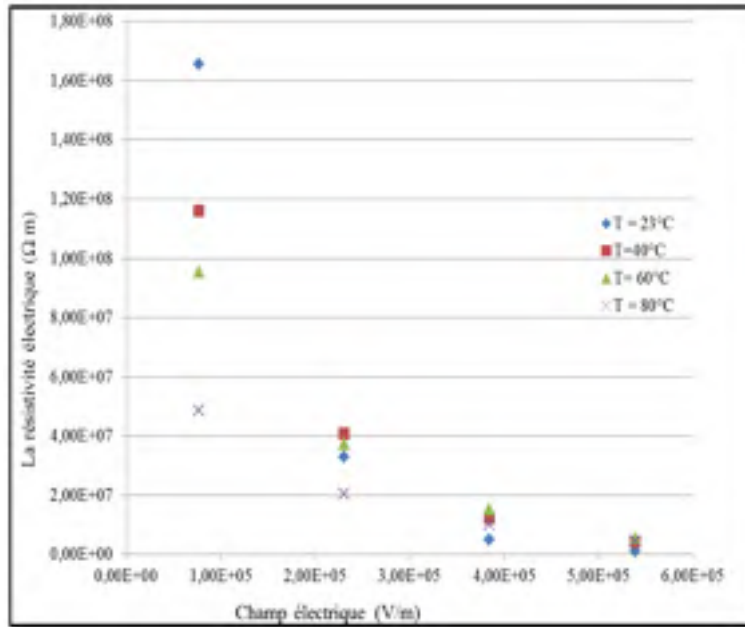


Figure 3.38 La résistivité électrique versus le champ électrique à différentes températures

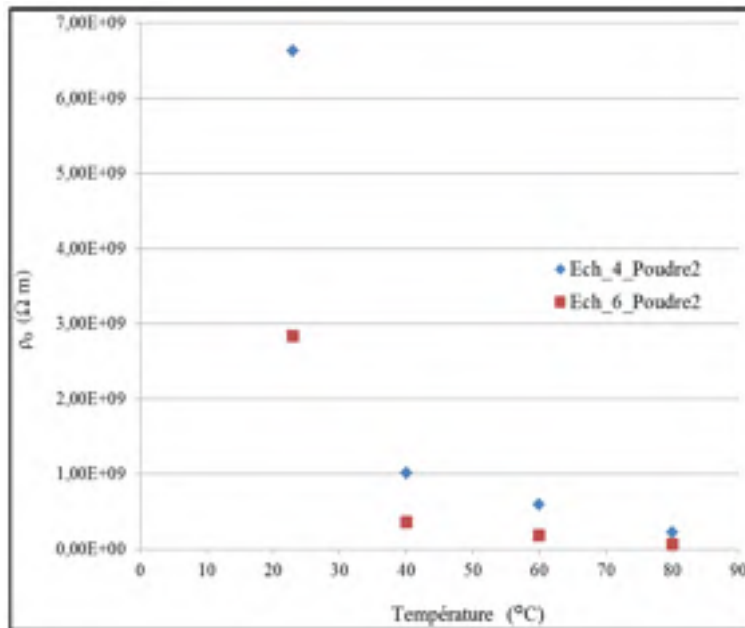


Figure 3.39 ρ_0 versus la température pour deux échantillons d'une même poudre de SiC (400 G)

Les résultats présentés sur la figure 3.39 ci-dessus montre la variation du paramètre ρ_0 avec la variation de la température pour les deux échantillons (5 et 7 mg) de poudre du SiC (400 G). On voit sur la figure que le paramètre ρ_0 diminue avec l'augmentation de la température et cette variation reste dans les limites définies à la figure 3.37.

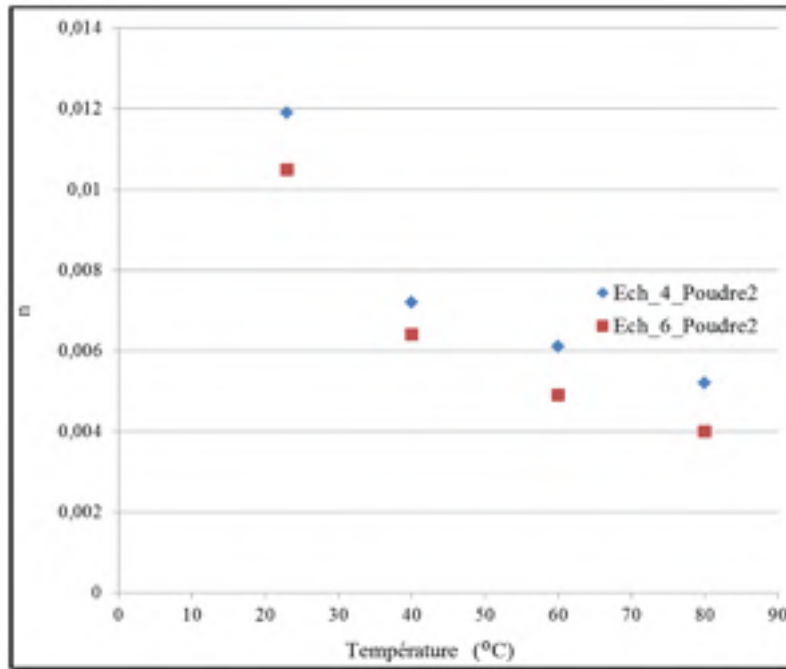


Figure 3.40 n versus la température pour deux échantillons d'une même poudre de SiC (400 G)

La figure 3.40 illustre la variation du paramètre n avec le changement de la température pour les deux échantillons de la poudre SiC de 400 G. Selon ces résultats, on voit clairement que le paramètre n diminue aussi avec l'augmentation de la température ce qui se traduit par une diminution de la non-linéarité des composites en fonction de l'augmentation de la température.

Les figures suivantes (3.41 et 3.42) présentent les résultats de simulation sous Matlab en utilisant les paramètres obtenus à différentes températures pour un même échantillon (7 mg de

SiC de 400 G), afin de voir l'effet de la température sur la performance du revêtement anti-effluves.

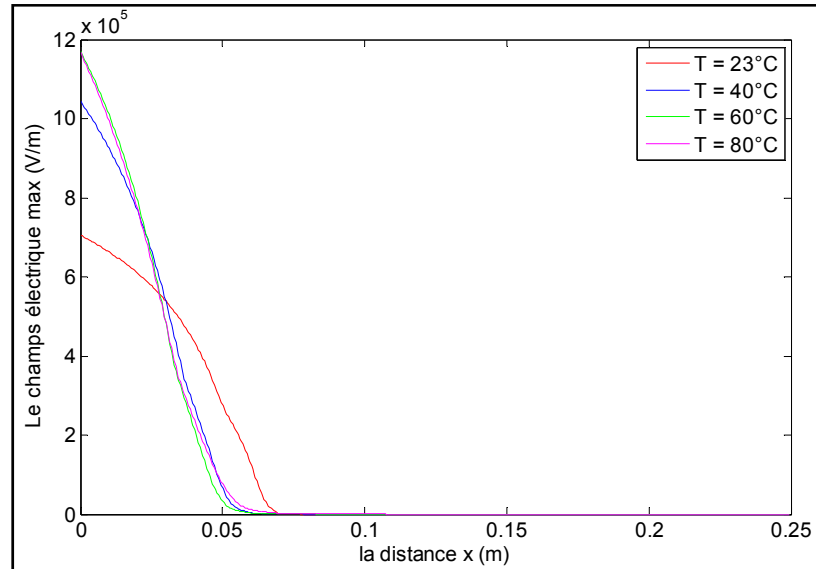


Figure 3.41 Le champ électrique maximum en fonction de la position avec la variation de la température

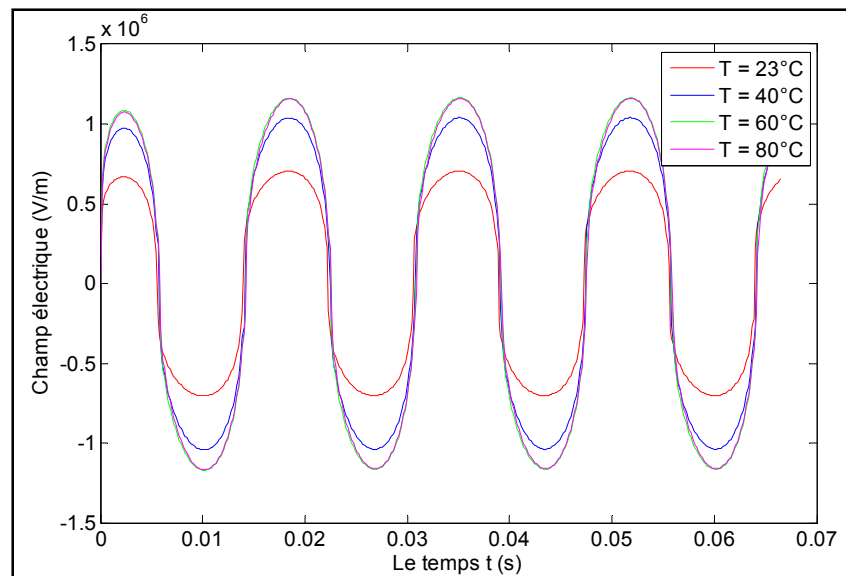


Figure 3.42 Le champ électrique à une distance $x = 0.01\text{m}$ en fonction du temps t et avec la variation de la température

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation des deux méthodes utilisées, la méthode basée sur la résolution de l'équation différentielle sous Matlab et la méthode des éléments finis sous COMSOL, avec une comparaison des résultats des deux méthodes.

Dans une seconde partie, nous avons présenté les résultats expérimentaux obtenus des mesures effectuées sur les échantillons époxy/SiC ainsi les différents graphiques permettant de mieux voir le changement de la résistivité électrique des composites/SiC avec la taille des grains des poudres, la concentration du SiC et la variation de la température.

CONCLUSION

L'un des principaux objectifs de cette étude était de modéliser un revêtement anti-effluve à base de composites époxy/SiC pour l'extrémité d'une barre d'alternateur haute tension avec les différentes méthodes permettant de calculer le champ électrique dans cette région de la barre, notamment la méthode analytique basée sur la résolution des équations différentielles et la méthode des éléments finis.

Cet objectif a été atteint avec succès. Nous avons résolu sous Matlab l'équation différentielle définissant le circuit équivalent du revêtement et nous avons aussi optimisé et déterminé les valeurs optimales des paramètres de non-linéarité de la résistivité électrique du revêtement à gradient de potentiel, permettant de réduire le champ électrique à la valeur la plus faible possible le long de la partie hors-fer du bobinage à la sortie de l'encoche afin d'éviter les décharges partielles dans cette région.

Dans la deuxième phase de modélisation, nous avons introduit la géométrie réelle de l'extrémité de la barre avec un revêtement anti-effluve (époxy/SiC) dans un logiciel de modélisation par éléments finis (COMSOL). Les résultats de simulation obtenus pour les mêmes paramètres de non linéarité de la résistivité électrique du SiC sont presque identiques à ceux obtenus par Matlab.

Le deuxième objectif était l'étude de la poudre de SiC utilisée dans les revêtements à gradient de potentiel. Nous avons réalisé plusieurs mesures sur des échantillons fabriqués de trois poudres de différentes tailles de grains et nous avons vu que le paramètre ρ_0 de la résistivité électrique diminue avec l'augmentation de la concentration du SiC. Par contre, la relation entre le paramètre n avec la concentration du SiC n'était pas vraiment claire, ce paramètre variant sans apparente relation avec la concentration en SiC des composites époxy/SiC.

Un dernier objectif de cette recherche était de voir l'effet du changement de la température sur la résistivité électrique du carbure de silicium. Pour cela nous avons effectué plusieurs mesures en variant la température. Ces tests ont montré que la résistivité électrique des composites époxy/SiC diminue avec l'augmentation de la température et reste toujours non linéaire en fonction du champ électrique, quoique cette non-linéarité semble diminuer en fonction de l'augmentation de la température. Par conséquent, le changement des paramètres de la résistivité des composites époxy/SiC influe sur la performance du revêtement anti-effluve; avec les températures élevées, on a un champ électrique relativement important à la sortie de l'encoche par rapport à celui obtenu aux plus faibles températures.

Finalement, nous avons montré que les paramètres optimum pour un revêtement anti-effluve résistif, tels qu'obtenus par simulation numérique, pouvaient être atteints par la technologie à base de carbure de silicium. En effet, pour la géométrie simulée, le couple (ρ_0 , n) optimal se trouve dans la zone des valeurs atteignables par les composites époxy/SiC.

ANNEXE I

OPTIMIZATION OF THE ELECTRICAL PROPERTIES OF EPOXY-SiC COMPOSITES FOR STRESS-GRADING APPLICATION

A. Merouchi ^a, E. David ^b, F. Baudoin ^c, D. Mary ^c et I. Fofana ^d

^aDépartement de génie électrique, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^bDépartement de génie mécanique, École de Technologie Supérieure,
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

^cLaboratoire Laplace, 2 Rue Charles Camichel, 31500 Toulouse, France

^dDépartement de génie électrique, Université du Québec à Chicoutimi,
555 Boulevard de l'Université, Chicoutimi, Québec, Canada G7H 2B1

Ce document a été soumis pour publication pour la conférence CEIDP de l'IEEE sur l'isolation électrique et le phénomène de diélectrique à Michigan, USA, entre 18-21 Octobre, 2015

I.1 Abstract

Epoxy-SiC composites are commonly used as resistive field grading material for high voltage applications such as corona protection of the end-windings of the stator windings of large rotating machines. As a function of grain size, concentration and material composition, a wide range of electrical parameters can be reached for epoxy-SiC composites. In this paper, the optimized values of the electrical characteristics of the field-grading material (yielding the lowest maximum electrical field) were numerically calculated for a given geometry and it was found that these optimum values lay in the reachable range by SiC technology.

Keywords—Epoxy-SiC composites, resistive field-grading, numerical simulation

I.2 Introduction

Epoxy-SiC composites with a high loading of SiC (usually around 50% phr) are commonly used to produce tapes and paints for resistive field-grading coatings in high-voltage applications such as in end-windings of rotating machines and HV terminations (Donzel, Greuter et Christen, 2011; Mårtensson, Gäfvert et Lindefelt, 2001). Since voltage levels are increasing and size of the components used for high-voltage applications, and particularly the thickness of insulation walls, are decreasing, there is a need for appropriate field-grading material allowing to improve and optimize the design of high-voltage insulation systems. For a given SiC concentration, the resistivity characteristics of epoxy-SiC composites are tremendously dependent upon the quality of the SiC filler and to a less extent upon the grain size and size distribution, yielding a wide range of electrical parameters characterizing the non-linear conductivity of the epoxy-SiC composites. Since rotating machine manufacturers have little control on the quality of the raw SiC material, to conduct qualification tests of different batches of SiC powder provided by the different available suppliers is a common procedure to select the appropriate material in order to achieve the desire electrical properties. Mixture of different grain sizes can also be done to somewhat tune the values of the electrical parameters. In this paper, experimental measurements of the electrical properties of epoxy-SiC composites with different grain sizes and concentrations are presented. Numerical calculations allowing predicting the resulting electrical field for a typical application as end-winding coating are also presented and the optimum values of the non-linear parameters were calculated by solving the typical partial differential equation of resistive field-grading material in one dimension.

I.3 Nonlinear behaviour

Various epoxy-SiC paints were fabricated using a glass plate as backing material. After curing, two copper foil electrodes were applied on each side of the sample with an inter-electrode distance of 25.4 mm (one inch) for a 50.8 mm width. The resistance was measured by applying DC voltage steps followed by short-circuit while the polarization and the

depolarization currents were continuously monitored. The resistance was calculated using the stable portion of the charging current curve and the average electrical field was simply assumed to be the applied voltage divided by the inter-electrode distance. An alternate technique would be to linearly increase the DC voltage while monitoring the current yielding the typical I-V plot of non-linear materials (Vanga-Bouanga et al., 2013). The resistivity was then calculated taking into account the sample geometry. Fig (A I-1) presents results obtained on various epoxy-SiC composites. Different equations have been proposed to fit the nonlinear behaviour of SiC composites including (Donzel, Greuter et Christen, 2011; Taylor et Edin, 2010)

$$\rho = \rho_o \exp[-nE^\beta] \quad (\text{A I-1})$$

$$\rho = AE^\alpha \quad (\text{A I-2})$$

where, in both cases, E is the absolute value of the electrical field, ρ the material resistivity and ρ_o , n , β , A and α are adjustable parameters. Since experimental data, when plotted in a log-log graph invariably lead to rounded shape curves (Donzel, Greuter et Christen, 2011; Wang et al., 2010), (2) does not provide a good fit. Equation (1) usually leads to a much better fit of the experimental data over the desired range of electrical field (~ 0.01 to 10 kV/mm) with β around 0.5 . $\beta = 2/3$ was used in (Taylor et Edin, 2010), while $0.48 < \beta < 0.54$ was found in (Vanga-Bouanga et al., 2013) for the fitting of the resistivity characteristics of 8 different SiC powders. Accordingly, the β exponent used for the horizontal axis of Figure-A I-1 was 0.5 and it led to near straight lines of the experimental data. The various points were samples fabricated as described previously with different grain sizes, concentrations and SiC quality while the sample labelled “tape 1” was a sample with the same geometry fabricated from a commercial resin-rich SiC tape. The solid black lines represent the approximate limits of the electrical parameters reachable for silicon-carbide technology.

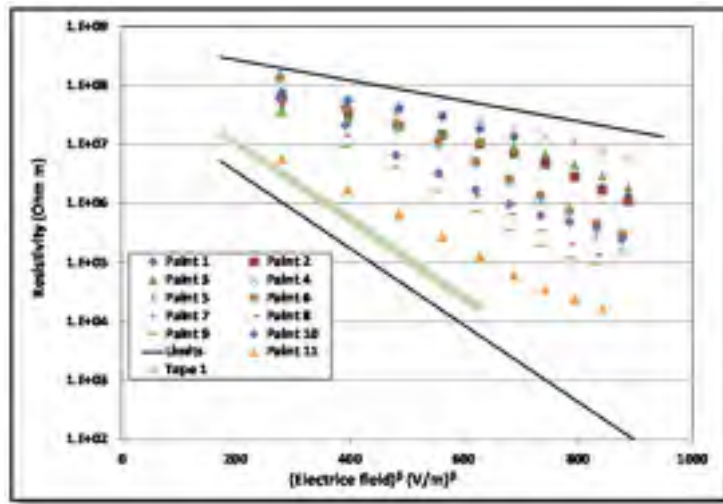


Figure-A I-1 resistivity characteristics of various epoxy-SiC composites

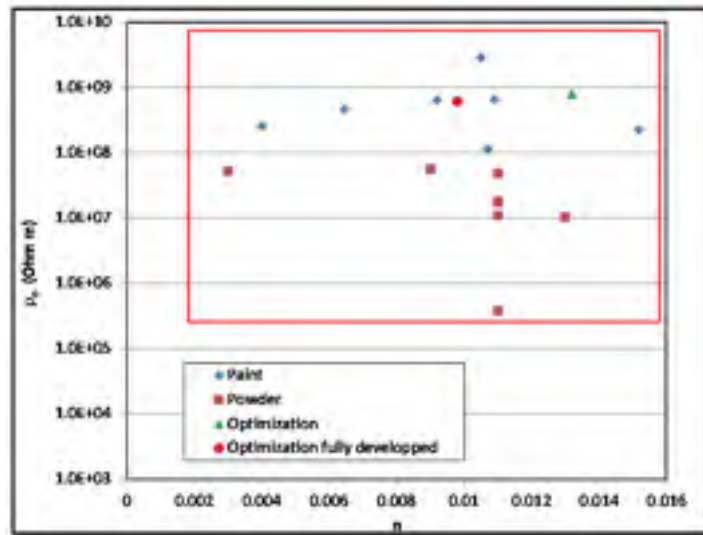


Figure-A I-2 ρ_0 and n parameters for the data presented in Fig. 1 and in (Vanga-Bouanga et al., 2013) plot in a XY representation for $\beta = 0.5$

Figure-A I-2 presents the resistivity characteristics of various composites obtained from (1) when fitted to the data presented in Figure-A I-1 and in (Vanga-Bouanga et al., 2013). As it can be seen, there is no particular correlation between these two parameters. The red rectangle approximately represents the values available for SiC technology.

I.4 Numerical calculations

Numbers of reports are available on the numerical methods allowing the calculation of the electrical field along a resistive stress-grading layer. They can be essentially divided into two approaches, the first one being finite elements method (FEM) analysis that can be extended in 2 or 3 dimensions (Staubach et al., 2011). This technique is very powerful since commercial FEM software allows solving the electrical-thermal coupled partial differential equations for complex geometries. A more simple approach is the use a one-dimensional distribution of shunt capacitors and field-dependant series resistance as illustrated in Figure-A I-3 (David et Lamarre, 2007; Taylor et Edin, 2010; Vanga-Bouanga et al., 2013). In this case, the transmission line equations lead to the following partial differential equation:

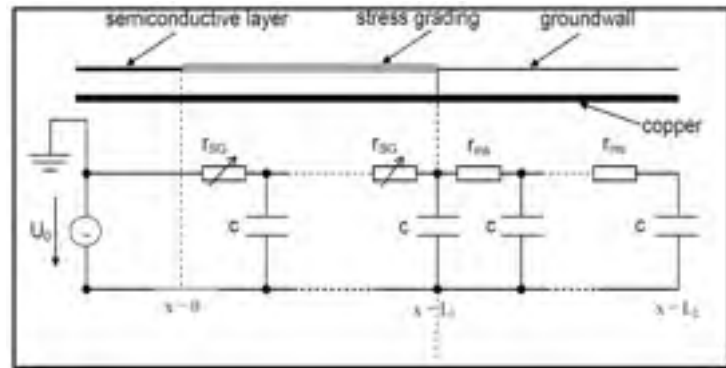


Figure-A I-3 Equivalent one-dimensional model for a stress-grading system (adapted from (Vanga-Bouanga et al., 2013))

$$\frac{\partial U(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{r(x)} \frac{\partial U(x, t)}{\partial x} \right) \quad (\text{A I-3})$$

where c is the capacitance per unit of length, U is the surface potential and r is the resistance per unit of length. According to (1), r can be written:

$$r = \begin{cases} r_0 \exp \left[-n \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|^\beta \right], & 0 < x < L_1 \\ r_{ins}, & L_2 < x < L_2 \end{cases} \quad (\text{A I-4})$$

where L_1 is the length of the stress-grading coating and r_{ins} is the equivalent resistance per unit of length of the bare insulation.

For simplicity, the boundary conditions were $U(0, t) = \sqrt{2}U_o \sin(\omega t)$, $U(L_2, t) = 0$ and $U(x, 0) = 0$ instead of having the ground apply at $x = 0$ and the high voltage at $x = L_2$. The magnitude of the electrical field along the termination surface remains the same in both cases. Figure-A I-4 shows the electrical field distribution for $\rho_o = 1 \times 10^8 \Omega\text{m}$, $n = 0.008$ (an average position in the box of Figure-A I-2) with the following geometry: 1 mm of thickness of the stress-grading coating for a perimeter of 18 cm, a length of 10 cm, a total length (from the conductive armor tape to the copper) of 25 cm, a capacitance of 2 nF/m and $r_{ins} = 1.5 \times 10^{12} \Omega/\text{m}$. The applied voltage was 16 kV rms ($U_o = 16 \text{ kV}$) at a frequency of 60 Hz. (3) was then solved for the first 10 cycles with the previously mentioned boundary conditions with a spatial meshing of 500 using a commercial partial differential equation solver from MATLAB[®]. The maximum value of the electrical field and the surface potential over the investigated time period as a function of the position is given in Figure-A I-4. The small peak in the electrical field at $x = 0.1\text{m}$ results from the potential not being exactly zero at the end of the stress-grading coating under the given parameters. Figure-A I-5 shows the field and the potential as a function of time at $x = 0$. Fixing $n = 0.008$, the value of ρ_o was varied from 10^5 to $10^{11} \Omega\text{m}$ (approximately corresponding to a vertical sweep across the red rectangle of Figure-A I-2) and the maximum value of the electrical field was calculated and plotted in Figure-A I-6a. Similarly, fixing $\rho_o = 10^8 \Omega\text{m}$, the value of n was varied from 0.002 to 0.014 and the maximum value of the electrical field was calculated and plotted in Figure-A I-6b. It can be seen in both cases that an optimum value, yielding the lowest field, can be observed. On each side of this optimum value, the maximum field is located either at $x = 0$ or at $x = 0.1 \text{ m}$.

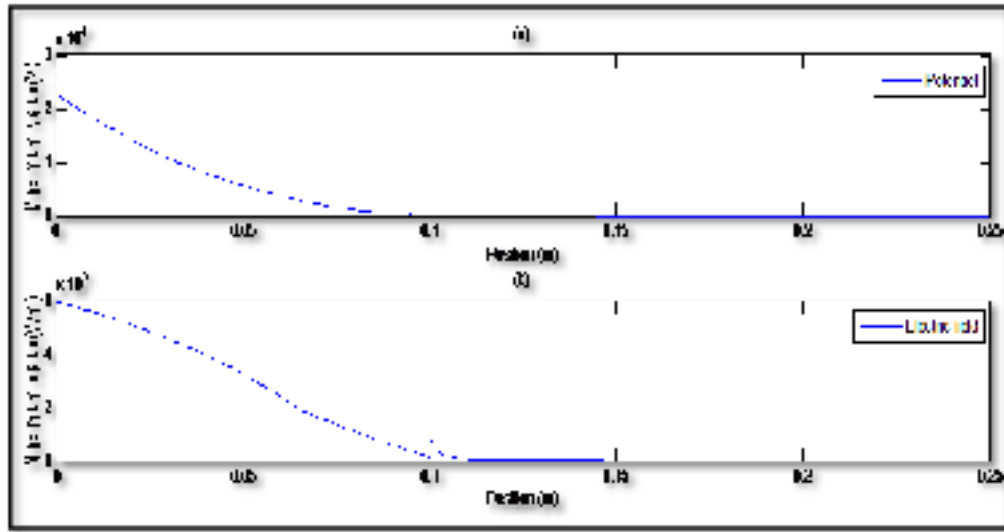


Figure-A I-4 Maximum value of (a) the potential
 (b) the electrical field as a function of position

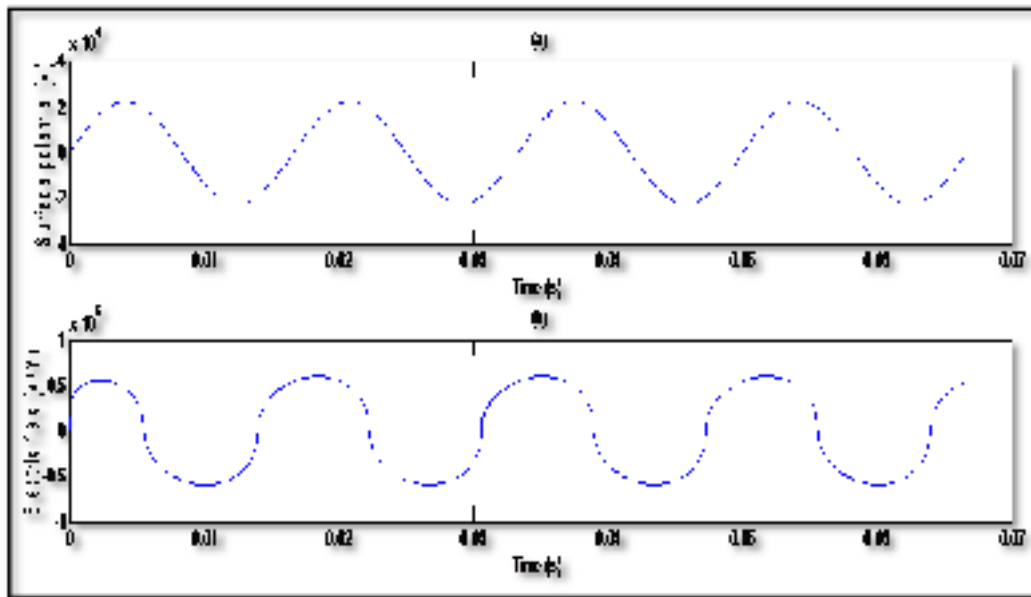


Figure-A I-5 a) Potential and b) electrical field as a function of time at $x = 0$

3.7 Optimization

The optimization of the electrical parameters (ρ_o , n , β) yielding the lowest maximum field for the geometry previously mentioned was undertaken through the use of a method based on Levenberg-Marquardt algorithm (LMA). The algorithm is a combination of the Gauss-Newton algorithm, GNA, and the method of gradient descent. The LMA is more robust than the GNA, which means that in many cases it finds a solution even if it starts very far off from the final minimum. On the other hand, for well-behaved functions and reasonable parameters, the LMA tends to be a bit slower than the GNA. Like other numerical minimization algorithms, the Levenberg-Marquardt algorithm is an iterative procedure used especially for nonlinear problems. In our case, this algorithm is used to minimize, with constraints, the sum of the squares of the deviations between experimental data and simulation data. Figure-A I-7 depicts the principle of the optimization approach. Following the definition of parameters given in Figure-A I-7, the quantity to be minimized is expressed as:

$$C(\theta) = \sum_{t=0}^T (f(t) - \tilde{f}(\theta, t))^2 \quad (\text{A I-5})$$

$$\theta_i = \theta_{i-1} - [H_{i-1} + \lambda_{i-1}I]^{-1} \nabla C(\theta_{i-1}) \quad (\text{A I-6})$$

with θ parameter vector, C error function, H Hessian matrix, λ damping factor.

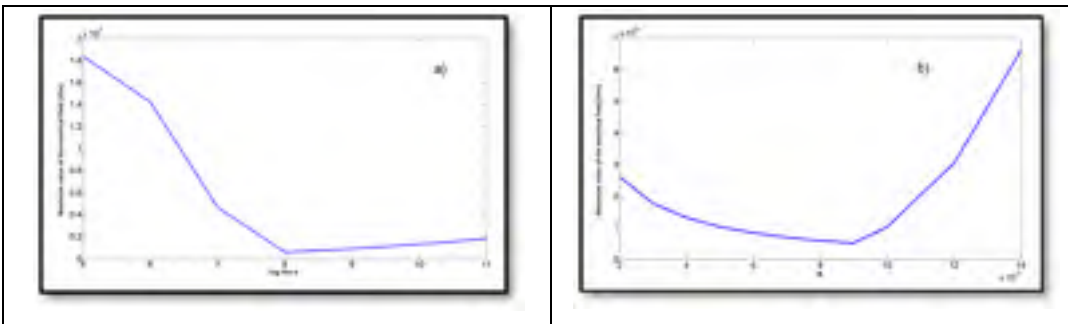


Figure-A I-6 Maximum value of the electrical field as a function of
 a) ρ_o with $n = 0.008$ and b) n with $\rho_o = 10^8 \Omega\text{m}$

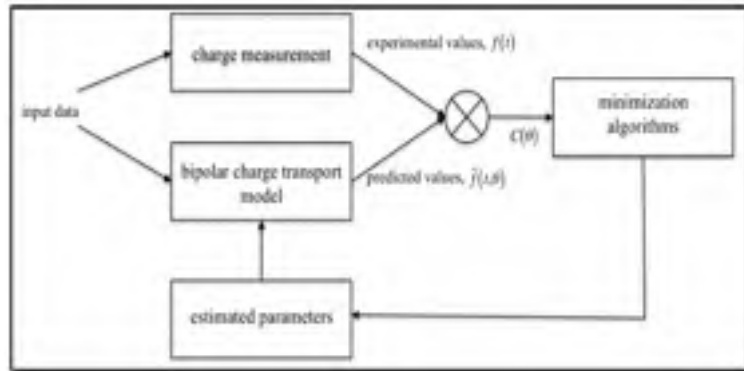


Figure-A I-7 Principle of the optimization technique

The damping factor is variable, depending on the behavior of iteration process. If a reduction of the residual sum of squares $C(\theta)$ is observed, a smaller value of λ can be used (λ is divided by $\mu = 10$) and the LMA then approaches the GNM. To the contrary, if an iteration provides an insufficient reduction of the residual, λ can be increased (λ is multiplied by $\mu = 10$), giving a step closer to the gradient method. Optimizing ρ_o and n in (3) with $\beta = 0.5$ in order to get the lowest maximum electrical field yields $\rho_o = 8.1 \times 10^8 \Omega\text{m}$ and $n = 0.0132$ which corresponds to the green triangle in Figure-A I-2 and a maximum field (at $x = 0$) of 0.44 kV/mm. Figure-A I-8 shows the field (maximum value as a function of time) and the potential (maximum value as a function of time) as a function of the position along the grading layer.

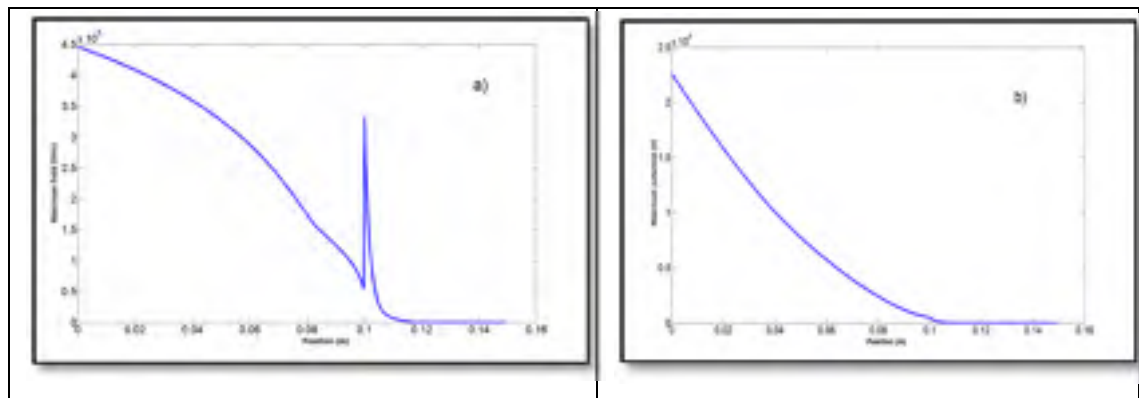


Figure - A I-8 Maximum value of (a) the electrical field and b) the potential as a function of position for $\rho_o = 8.1 \times 10^8 \Omega\text{m}$ and $n = 0.0132$ in (1)

Adding to the optimization algorithm the constraint that the potential should close to zero at $x = 0.1$ (the end of the grading layer) yields rather $\rho_o = 6.09 \times 10^8 \Omega\text{m}$ and $n = 0.0098$ and the field and potential distribution shown in Figure-A I-9. These values are indicated in Figure - A I-2 by the red circle and again fall within the range of values reachable by SiC technology.

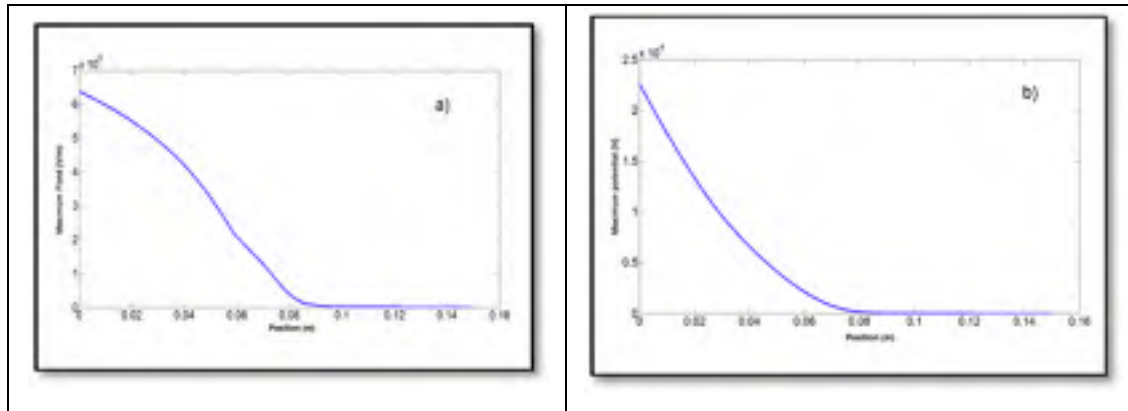


Figure-A I-9 Maximum value of (a) the electrical field and b) the potential as a function of position for $\rho_o = 6.09 \times 10^8 \Omega\text{m}$ and $n = 0.0098$ in (1)

I.5 Conclusions

Depending upon grain size, size distribution, chemical composition and concentration a wide range of electrical parameters can be obtained describing the non-linear conductivity of epoxy-SiC composites. The calculation of the optimum electrical parameters for a typical end-winding geometry has been performed in this paper and the optimized electrical parameters were found to lay within the range reachable by SiC technology.

I.6 Acknowledgment

The authors are grateful for the financial support received from the Fonds de Recherche Nature et Technologie (FQRNT).

RÉFÉRENCES

- Donzel, Lise, Felix Greuter et Thomas Christen. 2011. « Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 2, n° 27, p. 18-29.
- Mårtensson, E, U Gäfvert et Ulf Lindefelt. 2001.« Direct current conduction in SiC powders». *Journal of Applied Physics*, vol. 90, n° 6, p. 2862-2869.
- Vanga-Bouanga, C, Thomas F Heid, E David, MF Frechette et S Savoie. 2013. « Tailoring of the electrical properties of silicon carbide for field grading application ». In *Electrical Insulation Conference (EIC), 2013 IEEE*. p. 263-266. IEEE.
- Taylor, Nathaniel, et Hans Edin. 2010. « Stator end-winding currents in frequency-domain dielectric response measurements ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, n° 5, p. 1489-1498.
- Christen, Thomas, Lise Donzel et Felix Greuter. 2010. « Nonlinear resistive electric field grading part 1: theory and simulation ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, n° 26, p. 47-59.
- Wang, X, JK Nelson, LS Schadler et H Hillborg. 2010. « Mechanisms leading to nonlinear electrical response of a nano p-SiC/silicone rubber composite ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, n° 6, p. 1687-1696.
- Staubach, Christian, Stefan Kempen, Friedhelm Pohlmann et Frank Jenau. 2011. « Computer aided design of an end corona protection system for accelerated voltage endurance testing at increased line frequency ». In *Electrical Insulation Conference (EIC), 2011*. p. 170-174. IEEE.
- David, Eric, et Laurent Lamarre. 2007. « Low-frequency dielectric response of epoxy-mica insulated generator bars during multi-stress aging ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 14, n° 1, p. 212-226.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allison, JA. 2000. « Understanding the need for Anti-corona materials in High Voltage Rotating Machines ». In *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000. Proceedings of the 6th International Conference on*. vol. 2, p. 860-863. IEEE.
- Azizi, Diako, et Ahmad Gholami. 2014. « Optimization of semiconductive coating and groundwall insulation layers in stator slot of HV generator ». *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 57, p. 384-391.
- Azuaje, CJ, et WJ Torres. 2006. « Experiences in identification of partial discharge patterns in large hydrogenerators ». In *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES*. p. 1-6. IEEE.
- Brütsch, Rudolf, et Michael Chapman. 2010. « Insulating systems for high voltage rotating machines and reliability considerations ». In *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on*. p. 1-5. IEEE.
- Brutsch, Rudolf, Makoto Tari, Klaus Froehlich, Tilman Weiers et Ruben Vogelsang. 2008. « Insulation failure mechanisms of power generators ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, n° 4, p. 17-25.
- Chapman, M, et R Bruetsch. 2009. « Suppression of partial discharges in high-voltage rotating machines ». In *Electrical Insulation Conference, 2009. EIC 2009. IEEE*. p. 338-342. IEEE.
- Chen, Xiaolin, Yonghong Cheng, Bo Yue et Hengkun Xie. 2006. « Study of epoxy/mica insulation deterioration in generator stator using ultra-wide band partial discharge testing technique ». *Polymer testing*, vol. 25, n° 6, p. 724-730.
- Christen, Thomas, Lise Donzel et Felix Greuter. 2010. « Nonlinear resistive electric field grading part 1: theory and simulation ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, n° 26, p. 47-59.
- Donzel, Lise, Felix Greuter et Thomas Christen. 2011. « Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 2, n° 27, p. 18-29.
- Edwards, DG. 1994. « Planned maintenance of high voltage rotating machine insulation based upon information derived from on-line discharge measurements ». In *Life Management of Power Plants, 1994., International Conference on*. p. 101-107. IET.

- El-Kishky, H, Mazen Abdel-Salam, H Wedaa et Y Sayed. 2003. « Time-domain analysis of nonlinear stress-grading systems for high voltage rotating machines ». In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on*. p. 482-485. IEEE.
- El-Kishky, Hassan. 2002. « Experience with development and evaluation of corona-suppression systems for HV rotating machines ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 9, n° 4, p. 569-576.
- Emery, FT. 2005. « Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 2, p. 347-361.
- Espino-Cortes, Fermin P, Edward Cherney et Shesha Jayaram. 2005. « Effectiveness of stress grading coatings on form wound stator coil groundwall insulation under fast rise time pulse voltages ». *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 20, n° 4, p. 844-851.
- Espino-Cortes, FP, Y Montasser, SH Jayaram et EA Cherney. 2006. « Study of stress grading systems working under fast rise time pulses ». In *Electrical Insulation, 2006. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on*. p. 380-383. IEEE.
- Farahani, Mohsen, Hossein Borsi, Ernst Gockenbach et Martin Kaufhold. 2005. « Partial discharge and dissipation factor behavior of model insulating systems for high voltage rotating machines under different stresses ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 21, n° 5, p. 5-19.
- Gully, AM, et JCG Wheeler. 2000. « The performance of aged stress grading materials for use in electrical machines ». In *Dielectric Materials, Measurements and Applications, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 473)*. p. 392-396. IET.
- Hudon, Claude, et Mario Belec. 2005. « Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, n° 2, p. 297-319.
- Jia, Zhidong, Yanpeng Hao et Hengkun Xie. 2006. « The degradation assessment of epoxy/mica insulation under multi-stresses aging ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 13, n° 2, p. 415-422.
- Kaufhold, M, K Schafer, K Bauer, A Bethge et J Risse. 2002. « Interface phenomena in stator winding insulation-challenges in design, diagnosis, and service experience ». *IEEE Electrical insulation magazine*, vol. 2, n° 18, p. 27-36.

- Kimura, K, M Tsukiji, T Tani et S Hirabayashi. 1984. « Suppression of local heating on a silicon carbide layer by means of divided potentials ». *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, n° 4, p. 294-302.
- Klempner, Geoff, et Isidor Kerszenbaum. 2004. *Operation and maintenance of large turbo-generators*, 14. John Wiley & Sons.
- Klempner, Geoff, et Isidor Kerszenbaum. 2011. *Handbook of large turbo-generator operation and maintenance*, 38. John Wiley & Sons.
- Kuffel, John, E Kuffel et Walter S Zaengl. 2000. *High voltage engineering fundamentals*. Newnes.
- Lee, Sang Bin, et Jinkyu Yang. 2005. « An on-line groundwall and phase to phase insulation quality assessment technique for AC machine stator windings ». In *Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005*. Vol. 1, p. 10-19. IEEE.
- Malamud, R, et I Cheremisov. 2000. « Anti-corona protection of the high voltage stator windings and semi-conductive materials for its realization ». In *Electrical Insulation, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on*. p. 32-35. IEEE.
- McDermid, W. 1993. « Insulation systems and monitoring for stator windings of large rotating machines ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 9, n° 4, p. 7-15.
- Neal, J, et A Whitman. 1986. « The Role of Backing Materials in Micapaper-Based Insulations for HV Rotating Machines ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 4, n° 2, p. 30-34.
- Neal, JE. 1999. « The development of micaceous conductor/turn insulation for HV rotating machines ». In *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, 1999. Proceedings*. p. 53-59. IEEE.
- Nurse, JA. 1997. « The development of modern high voltage insulation systems for large motors and generators ». In *Electrical Machines and Drives, 1997 Eighth International Conference on (Conf. Publ. No. 444)*. p. 304-308. IET.
- Okamoto, Tetsushi, Inoue Yoshiyuki, Makoto Kawahara, Toshimitsu Yamada et Shuhei Nakamura. 2004. « Development of potential grading layer for high voltage rotating machine ». In *Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on*. p. 210-215. IEEE.

- Refsum, A. 1988. « Characterisation of SiC loaded insulators ». In *Dielectric Materials, Measurements and Applications, 1988., Fifth International Conference on.* p. 147-150. IET.
- Rhyner, J, et MG Bou-Diab. 1997. « One-dimensional model for nonlinear stress control in cable terminations ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 4, n° 6, p. 785-791.
- Rivenc, Jean P, et Thierry Lebey. 1999. « An overview of electrical properties for stress grading optimization ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, n° 3, p. 309-318.
- Roberts, A. 1995. « Stress grading for high voltage motor and generator coils ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 11, n° 4, p. 26-31.
- Rusu-Zagar, Catalin, Petru V Notingher et Cristina Stancu. « AGEING AND DEGRADATION OF ELECTRICAL MACHINES INSULATION ».
- Shugg, W Tillar. 1995. *Handbook of electrical and electronic insulating materials*, 995. IEEE press New York.
- Stone, Greg C, Edward A Boulter, Ian Culbert et Hussein Dhirani. 2004. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*, 21. John Wiley & Sons.
- Taylor, Nathaniel, et Hans Edin. 2010. « Stator end-winding currents in frequency-domain dielectric response measurements ». *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 17, n° 5, p. 1489-1498.
- Toliyat, Hamid A, et Gerald B Kliman. 2004. *Handbook of electric motors*, 120. CRC press.