

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de génie électrique
Réf :



.....:

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

Doctorat en sciences

Spécialité : Electrotechnique

**Étude des décharges partielles et leurs influences sur
l'apparition des arborescences dans la couche isolante des
câbles haute tension**

Présentée par :

Tahar Seghier

Soutenue publiquement le 17 Février 2011

Devant le jury composé de :

Dr. Soury Mohamed MIMOUNE
Dr. Djillali MAHI
Dr. Ibn Khaldoun LEFKAIER
Dr. Abdenacer ABOUBOU
Dr. Cherif FETHA

Professeur
Professeur
Professeur
Maitre de conférences A
Maitre de conférences A

Président
Directeur de thèse
Examineur
Examineur
Examineur

Université de Biskra
Université de Laghouat
Université de Laghouat
Université de Biskra
Université de Batna

Dédicace

*À mes parents Fatima et Kaddour
À Ma femme Soufiane, mon fils Amine et ma fille Dania
À Mes frères Aïssa, Seddik, Nadir et Farouk
À mes sœurs Aïcha et Leïla
À tous ceux qui Me sont chers*

FATHA

REMERCIEMENTS

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein de l'équipe MDCE du Laboratoire PLAsmas et Conversion d'Energie (Laplace) de Toulouse. Ils ont été le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire d'étude et développement des matériaux semi-conducteurs.

Avant tout, je tiens à remercier pour son accueil au Laboratoire Laplace de Toulouse Monsieur Christian LAURENT, directeur de recherche au CNRS. Je remercie aussi monsieur Thierry Lebey, Directeur de Recherche au CNRS, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche.

Je tiens bien sûr à remercier monsieur Djilali Mahi, professeur à l'université Amar Telidji de Laghouat, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant de m'encadrer, malgré les difficultés liées à l'orientation de mon travail. Je le remercie pour sa présence et son aide efficace.

Par ailleurs, je souhaite remercier Monsieur Soury Mohamed Mimoune, Professeur à l'Université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à messieurs Ibn Khaldoun Lefkaier, professeur à l'Université de Laghouat, Abdenacer Aboubou, maître de conférences A à l'Université de Biskra, Fetha Cherif, maître de conférences A à l'université de Batna pour avoir eu la gentillesse d'accepter de participer au Jury

J'aimerais exprimer mes remerciements et mon respect aux enseignants, chercheurs et le personnel technique et administratif du département de génie électrique de l'université Mohamed Khider de Biskra pour leur gentillesse et aide durant mes années d'inscription. Je tiens à remercier messieurs Kamel Srairi, Mimoune Mohamed Soury, Ahmed Cheriat, Mekki Melas pour leurs aides et conseils précieux.

Durant mon séjour, j'ai pu côtoyer des enseignants compétents et passionnés. Je tiens à saluer, Pierre Bidan, Philippe Castelan, Marie Laure Locatelli ainsi que Jean Pascal Cambronne et à leur dire que ça a été une joie de travailler avec eux. En particulier Monsieur Vincent Bley pour m'avoir permis d'utiliser le logiciel Comsol Multiphysics ainsi que l'opportunité de participer aux ateliers et séminaire pour les utilisateurs de ce logiciel. Je tiens à remercier vivement, messieurs David Malec et Sorine Dinculescu, pour leur aide à réaliser la partie expérimentale.

Enfin, cet ouvrage aurait été rédigé dans un français peu stylé sans l'aide précieuse de Khadra Senouci, je la remercie infiniment.

Liste des travaux concernant le travail de la thèse

Publication Internationale

T.Seghier, D. Mahi «Investigation into partial discharge dependence in air gaps between high density polyethylene tapes» Journal ACTA Electrotehnica, Academy of technical sciences of Romania, ISSN 1841-3323, Volume 49, Number 1, 2008, pp. 3-13.

Publication nationale

T. Seghier, D. Mahi, T. Lebey, D. Malec «The Effect of space charge on partial discharges inception voltage in air gaps within high density polyethylene» Revue Courier du savoir, université Mohamed khider, Algeria, ISSN 1112-3338, N°10, April 2010, pp. 35-41.

Conférences nationales et internationales

T.Seghier, D. Mahi «Experimental study of temperature effect on partial discharge inception in power transmission cable» Revue périodique Dirassat Special Issue ISSN 1112-4652, Proceeding the second international conference on electrical and electronics engineering, Laghouat, April 2008, pp. 282-286.

T. Seghier, D. Mahi, D. Vatau « study by simulation the combined effect of space charge and cavities on electric field and potential distribution solid insulation containing cavities» Scientific Bulletin of polytechnic, Special Issue ISSN 1582-7194, 7th international power systems conference, Romania, 22-23 November. 2007, pp.597-602.

T.Seghier, D. Mahi, F. M. Frigura «effect of temperature and relative humidity on partial discharges activity in artificial air gap embedded in high density polyethylene» Scientific Bulletin of polytechnic, Special Issue ISSN 1582-7194, 7th international power systems conference, Romania, 22-23 November. 2007, pp.603-608.

T. Seghier, D. Mahi, T. Lebey and D. Malec « analysis of the electric field and the potential distribution in cavities inside solid insulating electrical materials» Conference proceeding ISBN 0-9766792-2-1, International Comsol conference, Paris, November 5-9, 2006, pp. 31-34.

T. Seghier, D. Mahi, A. Nouar, K. Lefkaier « The Effect of Temperature and the Mutual influence Between two Cavities on the Appearance of Partial Discharges in Gaseous Cavities Contained in the Insulator of High Voltage » IEEE proceeding, International Conference on Solid Dielectrics. Toulouse, France, July 5-9. 2004, pp.598-602

T. Seghier, D. Mahi, A. Nouar, K. Lefkaier « Study by simulation of the effect on temperature on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage cable » Power Tech. Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Italia. Volume 2, 23-26 June 2003.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Applications courantes de quelques polymères	P. 06
Tableau I.2 : Principales caractéristiques des polyéthylènes	P. 07
Tableau I.3 : Structures moléculaires d'antioxydants classiques	P. 11
Tableau I.4: Liste des principales origines de la charge d'espace	P. 20
Tableau II.1 : Caractéristiques physiques du câble simulé	P. 49
Tableau III.1 compositions des électrodes	P. 94

LISTE DES FIGURES

		p.
Chapitre I		
Figure I.1 :	Molécule d'éthylène	06
Figure I.2 :	Polymérisation de polyéthylène	07
Figure I.3 :	Fraction de polyéthylène	07
Figure I.4 :	Molécule de peroxyde de dicumyl	08
Figure I.5 :	Formation de radicaux cumyle	08
Figure I.6 :	Formation d'alcool cumylique à partir de radical cumyl	09
Figure I.7 :	Processus de réticulation	09
Figure I.8 :	Molécule d'alcool cumylique	09
Figure I.9 :	Molécules d' α -méthyl-styrène et d'eau	10
Figure I.10 :	Molécules d'acétophénone et de radical méthyle	10
Figure I.11 :	Molécules d'éthane et de méthane	10
Figure I.12 :	Représentation des sphérolites	12
Figure I.13 :	Relations entre la contrainte et la déformation pour les matériaux polymères	13
Figure I.14 :	Niveaux de polarisation en fonction de la fréquence de sollicitation	15
Figure I.15 :	Niveau d'énergie dans les matériaux	17
Figure I.16 :	Niveau d'énergie d'isolants	17
Figure I.17 :	Schématisation de la diffusion des électrons dans la bande continue et leur Piégeage dans des pièges situés dans la bande interdite.	19
Figure I.18 :	Synthèse des différents types de charge d'espace	20
Figure I.19 :	Scénario hypothétique d'un vieillissement électrique impliquant la charge d'espace, l'électroluminescence et cavités	21
Figure I.20 :	Distribution de charge d'espace dans un polyéthylène vieilli à 50kV /mm.	22
Figure I.21 :	Défauts dans un isolant	23
Figure I.22 :	Image des cavités visualisées dans le volume d'un polyéthylène vieilli	25
Figure I.23 :	Cavités en trois dimensions visualisées par microscope AFM	26
Figure I.24 :	Types de décharge partielle	27
Figure I.25 :	Répartition du champ électrique dans un isolant contenant une cavité d'air	29
Figure I.26 :	Courbe de Paschen pour l'air. Température 20°C	31
Figure I.27 :	Méthodes de détection des décharges partielles	32
Figure I.28 :	Impulsion de courant associée à la décharge partielle	34
Figure I.29 :	Les deux montages possibles pour la mesure des DP	35
Figure I.30 :	Représentation schématique du défaut du diélectrique et du circuit correspondant	36
Figure I.31 :	Tension aux bornes du défaut en présence de DP	37
Figure I.32 :	Synthèse des différents phénomènes de dégradation et de rupture et de l'hypothèse du vieillissement électrique, répertoriés selon le temps et le champ électrique auxquels ils peuvent avoir lieu	38
Figure I.33 :	Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy en configuration pointe/plan (respectivement en haut et en bas)	39
Figure I.34 :	Etape de dégradation provoquée par les DP d'après Temmen	40
Figure I.35 :	Gouttelettes couvrant la surface de l'époxyde après activité des DP	41
Figure I.36 :	Conductivité de la surface époxyde en fonction de la durée d'activité des DP	42
Figure I.37 :	Faisceau des cristaux après 100 h d'activité de DP dans une cavité en PE	42
Figure I.38 :	Formation des cristaux sur la surface d'une cavité.	43
Figure I.39 :	formation des arborescences dans un isolant	44
Chapitre II		
Figure II.1 :	Représentation d'un câble de transport	48
Figure II.2 :	Interface du choix du système physique	50
Figure II.3 :	Construction de la géométrie en trois dimensions	52
Figure II.4 :	Introduction des caractéristiques physiques	53
Figure II.5 :	Maillage du domaine d'étude	54
Figure II.6 :	le modèle dans le mode post-traitement	55
Figure II.7 :	Distribution radiale du potentiel du potentiel	56
Figure II.8 :	Distribution radiale du potentiel et champ électrique	57
Figure II.9 :	Distribution radiale de la température le long de la partie isolante	57
Figure II.10 :	Effet de la présence d'un défaut de 20 micron de diamètre sur le champ et potentiel électriques	58
Figure II.11 :	Répartition du champ électrique dans le câble en présence d'une cavité de 20 microns de diamètre	59
Figure II.12 :	Polarisation électrique dans le défaut et distribution de charge électrique calculée par logiciel Comsol	60

Figure II.13 :	Distribution du champ électrique dans un défaut de 20 micromètre pour différentes positions	60
Figure II.14 :	Représentation de la valeur maximale du champ électrique dans un défaut en fonction de la position	61
Figure II.15 :	Distribution du champ électrique pour différentes tailles du défaut	62
Figure II.16 :	Formes de défaut choisi	63
Figure II.17 :	Distribution du champ électrique pour différentes tailles du défaut	63
Figure II.18 :	Distribution du champ électrique dans deux défauts voisins et en interaction	64
Figure II.19 :	Champ disruptif et champ maximal dans des cavités de différentes tailles en fonction de leurs positions dans l'isolant.	66
Figure II.20 :	Modélisation d'un défaut dans un diélectrique selon Whitehead	67
Figure II.21 :	Circuit électrique réalisé pour modéliser les décharges partielles	68
Figure II.22 :	Activité des décharges partielles pour une tension de 500 V	69
Figure II.23 :	Absence de décharges partielles pour une tension de 220 V.	70
Figure II.24 :	Activité des décharges partielles pour une tension de 250 V	71
Figure II.25 :	Activité des décharges partielles pour une tension de 750 V	72
Figure II.26 :	Activité des décharges partielles pour une tension de 1000 V	72
Figure II.27 :	Représentation du nombre décharges partielles en fonction de la tension d'alimentation	73
Figure II.28 :	Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=100$ Hz	74
Figure II.29 :	Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=1000$ Hz	74
Figure II.30 :	Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=5000$ Hz	75
Figure II.31 :	Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=10000$ Hz	75
Figure II.32 :	Activité des décharges partielles pour une résistance $R=10^5 \Omega$	76
Figure II.33 :	Activité des décharges partielles pour une résistance $R=10^8 \Omega$	77
Figure II.34 :	Activité des décharges partielles pour une résistance $R_1=10^6 \Omega$	77
Figure II.35 :	Activité des décharges partielles pour $C_1=10^{-10}F$	78
Figure II.36 :	Activité des décharges partielles pour $C_1=10^{-12}F$	79
Figure II.37 :	Activité des décharges partielles pour $C_1=10^{-13}F$	79
Figure II.38 :	Activité des décharges partielles pour $C_2=10^{-10}F$	80
	Activité des décharges partielles pour $C_2=10^{-11}F$	80
Chapitre III		
Figure III.1 :	Schéma synoptique du dispositif expérimental	84
Figure III.2 :	Schéma de principe de la détection des DP	86
Figure III.3 :	Quadripôle CIL	87
Figure III.4 :	Impulsions des décharges partielles	88
Figure III.5 :	Dispositif de détection de DP (unité d'acquisition et accessoires)	89
Figure III.6 :	Editeur du logiciel de traitement des DP	90
Figure III.7 :	Exemple d'une acquisition des DP	91
Figure III.8 :	Cellule de mesure qui porte l'échantillon sandwich	92
Figure III.9 :	Photographie globale du banc d'essai	93
Figure III.10 :	Photographie de l'enceinte de pression et des électrodes	93
Figure III.11 :	Schéma synoptique du banc de test et du circuit de mesure en fonction de la pression	94
Figure III.12 :	Structure de l'échantillon type sandwich	95
Figure III.13 :	Structure de l'échantillon type sandwich utilisé dans le cas de l'étude de l'influence de charges d'espace sur les DP	96
Figure III.14 :	Echantillon de type câble	96
Figure III.15 :	Climatogramme de l'enceinte utilisée	97
Chapitre IV		
Figure IV.1 :	Schéma de montage pour la détection des DP dans un échantillon de câble	101
Figure IV.2 :	Tension seuil d'apparition et d'extinction des DP dans un échantillon de câble en fonction de la température	102
Figure IV.3 :	Champ disruptif dans le défaut en fonction de la température.	103
Figure IV.4 :	Distribution en trois dimensions des DP pour une température de $20^\circ C$	104
Figure IV.5 :	Distribution en trois dimensions des PDs pour une température de $80^\circ C$	105
Figure IV.6 :	La tension seuil PDIV et tension d'extinction en fonction de la température pour un échantillon de type sandwich (Taux d'humidité est fixé pour $RH = 50\%$)	106
Figure IV.7 :	L'influence de la température sur le nombre et l'amplitude des DP	107
Figure IV.8 :	Schéma de montage pour la détection des DP dans un échantillon de type sandwich	108
Figure IV.9 :	La tension seuil PDIV et tension d'extinction en fonction de D'humidité relative pour un échantillon de type sandwich (température est prise égale à $25^\circ C$)	109
Figure IV.10 :	Distribution des DPs pour une valeur de l'humidité de 20%	110
Figure IV.11 :	Distribution des DPs pour une valeur de l'humidité de 70%	111
Figure IV.12 :	Figure IV.12 : Impact de l'augmentation de la température et de l'humidité relative	112

Figure IV.13 :	l'évolution de la tension d'amorçage des DP en fonction de l'humidité combinée à une baisse de pression	113
Figure IV. 14 :	l'évolution de la tension d'amorçage des DP en fonction de la température combinée à une baisse de pression	114
Figure IV.15 :	Distribution du champ et du potentiel électrique en fonction de la distance qui sépare la charge d'espace et la cavité.	115
Figure IV.16 :	Application d'une tension continue pour créer une densité de charge	115
Figure IV.17 :	Dispositif de mesure des décharges partielles dans le cas d'un échantillon sandwich contenant une charge électrique	116
Figure IV.18 :	Circuit électrique équivalent en négligeant les résistances dans la partie cavité isolant-sein dans le modèle ABC	116
Figure IV.19 :	Distribution de la densité de charge surfacique pour une tension continue $U = 4 \text{ kV}$	117
Figure IV.20 :	Valeurs du potentiel et champ électrique dans l'échantillon et dans la cavité en fonction de la densité de charge.	118
Figure IV. 21:	Forme d'impulsion dans le cas de présence d'une densité de charge négative	119
Figure IV.22 :	Distribution du champ et du potentiel pour avoir un claquage de l'intervalle d'air pour différentes valeurs de densité de charge	121
Figure IV.23 :	Tension seuil d'apparition des DP en fonction de la densité de charge	122

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur les Isolants solides et les décharges partielles

Introduction.....	04
I.1 Les polymères dans le domaine du génie électrique.....	04
I.1.1 Introduction	04
I.1.2 Deux classes de polymères	05
I.1.3 Quelques polymères courants.....	05
I.1.4 Les polyéthylènes	06
I.1.4.1 Le processus de réticulation du PE	08
I.1.4.2 Réactions secondaires de la réticulation.....	09
I.1.4.3 L'antioxydant et ses produits de décomposition	10
I.1.5 Cristallinité dans les polymères.....	11
I.1.6 Propriétés mécaniques	12
I.1.7 Propriétés diélectriques.....	13
I.1.7.1. Polarisation des diélectriques	14
I.2 Transport et stockage de charges électriques dans les polymères.....	16
I.2.1 Structure de bande	16
I.2.2 Cas des polymères	17
I.2.3 Conduction électrique.....	18
I.2.4 Piégeage des charges	18
I.2.5 Charge d'espace dans les polymères.....	19
I.2.6 Charge d'espace et tension alternatif.....	22
I.3 Défauts dans les polymères	22
I.3.1 Formation des cavités dans un polymère.....	23
I.3.2 Méthodes de détection des cavités.....	24
I.4 Phénomène des décharges partielles.....	26
I.4.1 Définitions et terminologie.....	26
I.4.2 Classification	27
I.4.3 Différentes causes de décharges partielles	28
I.4.3.1 Particules conductrices libres	28
I.4.3.2 Composants à potentiel flottant	28
I.4.3.3 Décharges à l'intérieur d'un composant diélectrique solide	29
I.4.4 Théorie de Paschen et champ critique dans la cavité	30
I.4.5 Techniques de détection et de mesure des décharges partielles	31
I.4.5.1 Objectifs	32
I.4.5.2 Les différentes techniques de détection	32
I.4.5.2.1 Méthode de détection non électrique	32
a) Détection radio	33
b) Détection acoustique	33
c) Détection optoélectronique	33
I.4.5.2.2 Mesure et détection des DP's par la méthode électrique	34

I.4.6	Modèle électrique d'une décharge partielle.....	35
I.4.7	Grandeurs caractéristiques des décharges partielles.....	36
I.5	Du vieillissement électrique à la rupture.....	38
I.5.1	Rôle des décharges partielles.....	39
I.5.1.1	Réaction chimique entre un gaz et un diélectrique solide.....	40
a)	Sous produits gazeux.....	40
b)	Sous produits liquides.....	41
c)	Sous produits solides.....	42
I.5.1.2	Localisation des DP's.....	43
I.5.1.3	Initiation d'arborescences.....	43
I.5.2	Nano-structure et résistance contre les DP's.....	44
I.5.3	Interaction entre DP's et contrainte mécanique.....	45
I.6	Conclusion.....	45

Chapitre II : Identification par simulation de quelques facteurs influençant les DP's

Introduction.....	47	
II.1 Constitution et caractéristiques du câble.....	48	
II.2 Présentation du Logiciel Comsol Multiphysics.....	49	
II.3 Etapes concrètes appliquées pour le calcul du champ électrique dans un câble de haute tension.....	50	
II.3.1	Navigateur de modèle.....	50
II.3.2	Construction de la géométrie.....	52
II.3.3	Introduction des caractéristiques physiques.....	53
II.3.4	Maillage.....	54
II.3.5	Résolution et post-traitement.....	55
II.4 Démarches de calcul.....	55	
II.5 Calcul des contraintes électrothermique dans le cas sans défaut.....	55	
II.6 Calcul des contraintes électrothermiques dans le cas avec défaut.....	58	
II.7 Champ électrique en fonction de la position du défaut.....	60	
II.8 Champ électrique en fonction de la taille du défaut.....	61	
II.9 Champ électrique en fonction de la forme du défaut.....	62	
II.10 Influence mutuelle entre deux défauts voisins.....	64	
II.11 Qualification de l'apparition des décharges partielles.....	65	
II.12 simulation des DP's en utilisant le modèle ABC.....	67	
II.12.1	Cas référentiel.....	68
II.12.2	L'influence du niveau de la tension sur l'activité des décharges partielles.....	70
II.12.3	L'influence de la fréquence sur l'activité des décharges partielles.....	73
II.12.4	L'influence des résistances sur l'activité des décharges partielles.....	76
II.12.6	L'influence des capacités sur l'activité des décharges partielles.....	78
II.13 Conclusion.....	81	

Chapitre III : Équipements expérimentaux et procédures d'essais

Introduction.....	84
III.1 Présentation du dispositif expérimental.....	84
III.2 Dispositif d'application de la tension et de mesure des DP's.....	85

III.2.1 La source de tension.....	85
III.2.2 Cage de Faraday.....	85
III.2.3 Fonctionnement du mesureur.....	86
III.3 Dispositif d'acquisition et de traitement.....	88
III.3.1 Logiciel de traitement.....	89
III.4 Cellule d'étude.....	91
III.4.1 Cellule de température et d'humidité.....	91
III.4.2 Cellule de pression.....	92
III.5 Préparation d'échantillons.....	95
III.5.1 Echantillon type sandwich.....	95
III.5.2 Echantillon type câble.....	96
III.6 Mode opératoire et protocoles expérimentaux.....	97
III.6.1 Essais en température-humidité.....	97
III.6.2 Essais en pression.....	98
III.6.2.1 <i>Pompage</i>	98
III.7 Conclusion.....	98

Chapitre IV : *Identification expérimentale des contraintes influençant les DPs*

Introduction.....	100
IV.1 Influence de la température sur l'initiation des décharges partielles.....	100
IV.1.1 Tension seuil d'apparition des DPs (V_{DIV}).....	101
IV.1.2 Distribution de l'amplitude et le nombre des DPs dans la phase.....	103
IV.1.3 Cas du modèle de type sandwich.....	106
IV.2 Influence de l'humidité sur l'initiation des décharges partielles.....	108
IV.2.1 Distribution de l'amplitude et le nombre des DPs dans la phase.....	109
IV.2.2 Influence de l'humidité sur l'initiation des décharges partielles pour des différentes températures.....	112
IV.3 Influence de la pression sur l'initiation des décharges partielles.....	112
IV.4 Influence de la charge sur l'initiation des décharges partielles.....	114
IV.5 Discussion.....	122

Conclusion générale

Conclusion générale.....	126
--------------------------	-----

Références

Annexes

INTRODUCTION GENERALE

Introduction

La fiabilité des systèmes électriques dépend, entre autres, de la qualité des systèmes d'isolation électriques (SIE). De nombreuses contraintes, électrique, mécanique, chimique, thermique, environnementale et mode de fonctionnement, peuvent conduire à un vieillissement précoce et entraîner la perte partielle ou totale de la fonction d'isolation mettant en péril la disponibilité d'un système.

Dans le cas des contraintes électriques, les matériaux isolants subissent l'action d'un champ électrique. Cependant, la répartition instantanée du champ n'est pas homogène et ceci est en partie dû au fait que l'ensemble des isolants constitue un milieu assez souvent hétérogène et que ce milieu comprend des défauts. Il est possible ainsi, de définir en chaque point un gradient localisé qui peut atteindre la valeur disruptive lorsqu'il y a présence de bulles gazeuses (cavités). Dans ce cas, il apparaît à partir du seuil disruptif un arc de décharge locale qui neutralise le gradient. Cet arc de décharge locale se reproduit chaque fois que le gradient dépasse au point critique la valeur disruptive du gaz. Ce phénomène irréversible est dit décharges partielles ; car elles ne court-circuitent pas l'ensemble de l'isolation.

En effet, il est admis à ce jour que le phénomène de décharges partielles peut entraîner la destruction du matériel après un certain temps d'usage alors qu'il a subi avec succès les essais diélectriques. Il devient donc important de connaître et de mesurer sur un matériel, neuf ou en service, une grandeur représentative du phénomène de décharges partielles. Cette connaissance ne pourra pas entraîner directement une relation avec la durée de vie probable du matériel, mais elle donnera des renseignements intéressants.

L'objectif de la présente étude est de considérer le phénomène des décharges partielles dans les isolants solides. Nous essayons, plus particulièrement, de mettre en évidence les différents facteurs qui peuvent influencer et favoriser l'apparition de ce phénomène néfaste. A cet effet, nous classerons ces facteurs en deux grands ensembles : Les facteurs intrinsèques, comme l'existence de défaut de différentes tailles et forme et l'existence de charge d'espace dans le volume de l'isolant. Les facteurs extrinsèques ou imposés comme la fréquence, niveau de tension, température, humidité, pression..etc.

Pour aborder cette étude, nous rappellerons dans un premier chapitre les aspects fondamentaux de la structure des polymères ainsi que leurs caractéristiques. Nous portons une attention particulière aux facteurs, liés à la structure du polymère, qui contribuent à l'apparition du phénomène des décharges partielles. Ainsi, les définitions et les terminologies les plus usuelles et les grandeurs caractérisant ce phénomène y sont présentées. Les diverses causes pouvant donner lieu à un tel phénomène, les méthodes de détection actuellement utilisées sont aussi évoquées.

La partie simulation est présentée dans le deuxième chapitre. Pour situer le problème de l'influence des caractéristiques d'une cavité sur le phénomène des décharges partielles, nous déterminerons l'influence de la cavité elle-même sur la distribution des contraintes électrique et thermique. Une cavité est caractérisée par sa taille, sa forme géométrique, sa position, son orientation par rapport aux lignes de champ ainsi que sa présence ou pas avec d'autres cavités. Aussi l'influence de quelques paramètres imposés (fréquence, tension,...) sur le nombre des décharges partielles est étudiée. A la fin nous essayerons de qualifier l'apparition des décharges partielles en fonction de ces caractéristiques.

Le troisième chapitre est consacré principalement à la description de la méthode choisie pour la détection des décharges partielles et les dispositifs expérimentaux qui nous ont permis d'effectuer ce travail. Les différentes cellules utilisées ainsi que les modèles d'échantillons représentatifs de SIE sont aussi présentés.

Le dernier chapitre est consacré aux essais expérimentaux. Ces essais ont été effectués au Laboratoire LAPLACE de Toulouse. Nous essayerons d'étudier l'influence des conditions d'essais tels que la température, la pression et l'humidité sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles. A cet effet, un dispositif de détection, basé sur la méthode électrique nous a permis de présenter une décharge partielle en trois dimensions. Cela nous permettra de bien analyser ce phénomène en fonction de différentes grandeurs.

Enfin, dans la conclusion, nous dégagerons les résultats essentiels de cette étude ainsi que les perspectives de recherches qui en découlent.

Chapitre I

GENERALITES SUR LES ISOLANTS SOLIDES ET LES DECHARGES PARTIELLES

Introduction

Dans le vocabulaire Electrotechnique International ; un isolant est une substance qui a une conductivité suffisamment faible pour être utilisée afin de séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents. Il existe plusieurs types d'isolants selon la nature du processus physique considéré. Le développement des isolants solides, notamment les polymères, présente une importance considérable pour l'industrie des dispositifs électriques. Par suite des propriétés particulières qui s'attachent à ces matériaux: excellentes propriétés diélectriques caractérisées par une permittivité relative et une tangente de l'angle de perte faibles, combiné au fait que ces matériaux présentent une résistivité thermique nettement inférieure à celles d'autres isolants, confère à ces isolants une capacité d'isolement relativement meilleure.

Dans ce chapitre nous présentons une revue bibliographique sur les isolants solides les plus utilisés dans les systèmes d'isolation ainsi que leurs propriétés. Nous montrons aussi les facteurs intrinsèques qui contribuent à la fragilisation de ces matériaux. Dans une troisième partie nous présentons le phénomène des décharges partielles (origine, mécanisme, détection, mesure...). La dernière partie est consacrée à la dégradation et claquage de l'isolant solide sous l'effet des DPs.

I.1 Les polymères dans le domaine du génie électrique

I.1.1 Introduction

Les polymères sont une vaste classe de matériaux composés de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules. Ces dernières peuvent contenir des centaines, des milliers, voire des millions d'ensembles élémentaires appelés monomères. Les chaînes obtenues par la répétition de ces monomères vont avoir des tailles et des masses molaires très importantes, typiquement supérieures à 10000 g.mol^{-1} , masse à partir de laquelle les polymères vont donner un matériau au sens mécanique du terme. Pour les fabriquer, l'homme s'est inspiré de ce qu'il trouve dans son environnement. Différents polymères existent à l'état naturel. Le caoutchouc en est le meilleur exemple. Nous retrouvons des polymères naturels dans les cellules vivantes ! En effet, l'ADN, qui constitue les chromosomes du noyau cellulaire, est lui aussi considéré comme un polymère.

Les polymères sont dans l'ensemble peu dense, compte tenu de leur origine organique et par suite de la présence d'éléments constitutifs légers (Carbone, Oxygène, Hydrogène, Azote). La liaison covalente des carbones est à la base de la notion de polymère. Il s'agit d'une liaison forte d'environ 100 à 450 kJ/mol (348 kJ/mol pour la liaison carbone-carbone). Par

conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans le sens de la chaîne macromoléculaire.

I.1.2 Deux classes de polymères

Il existe deux classes générales de polymères, qui ont été nommées en fonction de leurs propriétés mécaniques les plus importantes. En effet, certains polymères sont déformables plastiquement dès qu'ils sont chauffés. Ils sont été nommés thermoplastiques. D'autres polymères, sous l'action de la chaleur, durcissent de plus en plus. Ce sont les thermodurcissables. Ces deux classes de polymères diffèrent essentiellement par leur structure moléculaire. Les thermoplastiques sont constitués de chaînes polymères enchevêtrées en pelotes alors que les thermodurcissables forment une matrice covalente. Cette matrice résiste à des températures importantes jusqu'à destruction des liaisons covalentes. Les longues chaînes des thermoplastiques sont par contre sensibles à tout apport calorifique et peuvent bouger de façon plus ou moins importante en fonction de la chaleur apportée.

I.1.3 Quelques polymères courants

Comme la plupart des matériaux organiques, les polymères sont en général de bons isolants électriques. Ils sont utilisés comme tels en raison de leurs propriétés diélectriques et thermomécaniques. La plupart des polymères utilisés aujourd'hui sont d'origine synthétique : polyéthylène, polyester, polystyrène, etc. Les principales utilisations sont les isolants pour l'électrotechnique, l'électronique et l'optoélectronique. Le tableau I.1 décrit quelques matériaux polymères courants, leurs abréviations et leurs utilisations principales.

Matériaux	Abréviation	Applications courantes
Polyéthylène (réticulé chimiquement)	PE (PRC)	Isolation électrique (câbles) Emballages
Polypropylène	PP	Boîtier d'appareil électrique
Polychlorure de vinyle	PVC	Boîtes, diapositives couleur, protections antipoussières, reliures de livres, câbles basse tension.
Polystyrène	PS	Disques d'enregistrement sonore et emballage.
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	Vitrines et cadres.
Polyamides	PA	Produit de doublage pour lamination à chaud,

		également modifié en fixateur soluble
Polyéthylène naphthalate	PEN	Isolation électrique et électronique
Polyéthylène téréphthalate	PET	Composants électroniques (condensateur), pellicules et bandes magnétiques, gaze pour réparations, pochettes pour encapsulation.
Polyacétate de vinyle	PVAC	Colle de latex pour les réparations et liant pour les peintures décoratives émulsionnées.
Polyuréthane	PU	Liant des oxydes des bandes magnétiques, isolation de transformateur.

Tableau I.1 : Applications courantes de quelques polymères

I.1.4 Les polyéthylènes

La fonction d'isolation électrique n'est pas exclusivement réservée au polyéthylène. D'autres polymères sont plus adaptés à certaines applications. Dans ce paragraphe, nous parlerons du polyéthylène sur lequel nous serons amenés à effectuer des expériences. Les polyéthylènes sont des polymères qui appartiennent à la famille des polyoléfines. Le polyéthylène est un polymère vinylique qui représente la plus grande famille de polymères en terme de volume de production. Le polyéthylène est issu de la polymérisation de l'éthylène gazeux aussi appelé éthane (figure I.1).

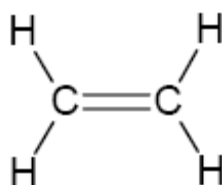


Figure I.1 : Molécule d'éthylène

La polymérisation nécessite l'ajout de réactifs chimiques (ou initiateurs). Ce sont habituellement des peroxydes (notés R sur la figure I.2). Ces initiateurs, sous l'effet de la température par exemple, se décomposent en deux radicaux. Ces derniers permettent d'ouvrir les doubles liaisons et se placent en tête ou en fin de chaîne. Le centre actif est déplacé en bout de chaîne et la réaction peut ainsi continuer.

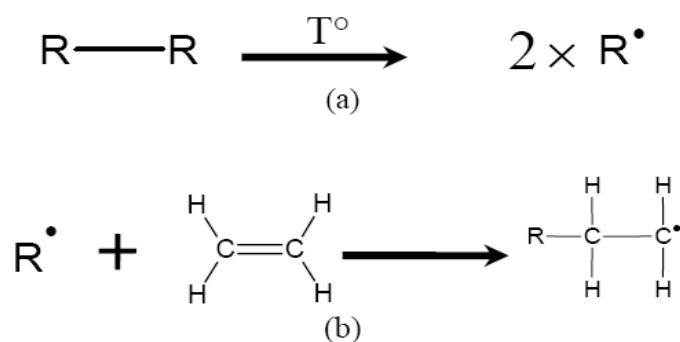


Figure I.2 : Polymérisation
 (a) Création de radicaux
 (b) Déplacement du centre actif

Après la polymérisation, les molécules d'éthylène sont attachées selon l'axe de leur double liaison pour former une longue chaîne contenant uniquement des liaisons simples entre les atomes de carbone (figure I.3).

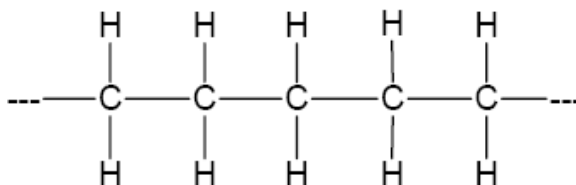


Figure I.3 : Fraction de polyéthylène

Selon la configuration des chaînes du polymère, le polyéthylène est classifié en deux groupes dont les caractéristiques principales sont énoncées dans le tableau I.2. Le polyéthylène basse densité (PEbd) est produit sous haute pression et il est très ramifié. Le polyéthylène haute densité (PEhd) est fabriqué sous une pression inférieure. Il est dit "linéaire" car peu ramifié, il est plus rigide que le PEbd.



	PEbd	PEhd
Structure	Ramifiée	linéaire
Aperçu		
Masse Volumique	0.915-0.935	0.945-0.96
Taux de cristallinité	55%-70%	65%-80%
Température max. de service	70°C	80°C
Température de fusion	110-120°C	128-135°C
Transition vitreuse	env. -110°C	env. -110°C
Indice de réfraction	1.51	1.54
permittivité à 1MHz	2.2-2.35	2.3-2.4
Résistivité (Ω.cm)	10 ¹⁵ -10 ¹⁸	10 ¹⁵ -10 ¹⁸

Tableau I.2 : Principales caractéristiques des polyéthylènes [Ded02]

1.1.4.1 Le processus de réticulation du PE

Afin d'améliorer les propriétés thermique et mécanique du polyéthylène, on procède à une opération dite de réticulation. Cette modification consiste à créer des "ponts" entre les macromolécules. Ceci est possible en particulier grâce à l'introduction d'un agent de réticulation qui peut être de nature organique ou inorganique. L'agent de réticulation le plus usuel est un agent organique : le peroxyde de dicumyl (DCP).

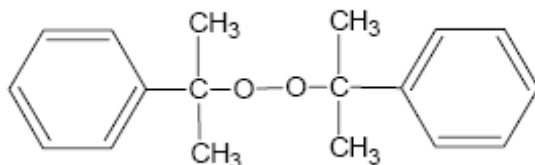


Figure I.4 : Molécule de peroxyde de dicumyl

Cependant, il existe d'autres peroxydes organiques tels que le peroxyde t-butyl cumyl ou le peroxyde di-t-butyl [Ish.99]. Ces derniers sont parfaitement utilisables en tant qu'agents de réticulation. Le principe de la réticulation est ici décrit à partir du DCP. Néanmoins, il est applicable à tout autre type d'agent de réticulation. Les câbles en polyéthylène réticulé sont fabriqués en extrudant un mélange de polyéthylène basse densité (PEbd) et de DCP. Cette opération se fait sous pression et à une température avoisinant les 180°C. Sous l'effet de la température, le DCP se décompose en deux radicaux cumyle (figure I.5).



Figure I.5 : Formation de radicaux cumyle

Ces radicaux sont instables chimiquement. Par conséquent, ils vont prendre un atome d'hydrogène de la chaîne polymère pour former une molécule d'alcool cumylique (figure I.6). La chaîne se trouve maintenant avec un atome de carbone insatisfait. Le processus de réticulation est ainsi amorcé.

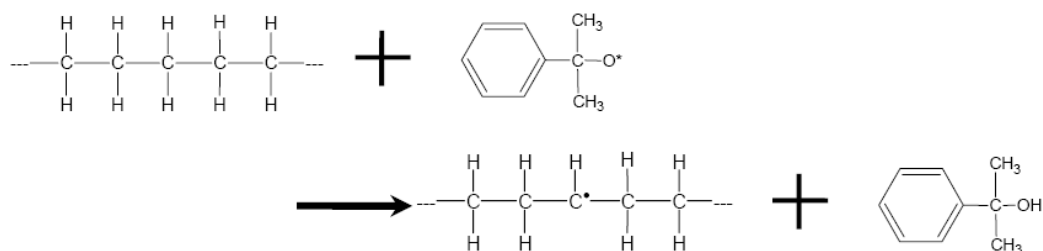


Figure I.6 : Formation d'alcool cumylique à partir de radical cumyl

Lorsque deux chaînes contenant des atomes de carbone, et dont les liaisons ne sont pas satisfaites, se trouvent assez proches, une liaison est créée entre ces deux atomes. Les chaînes se solidarissent comme cela est indiqué sur la figure I.7.

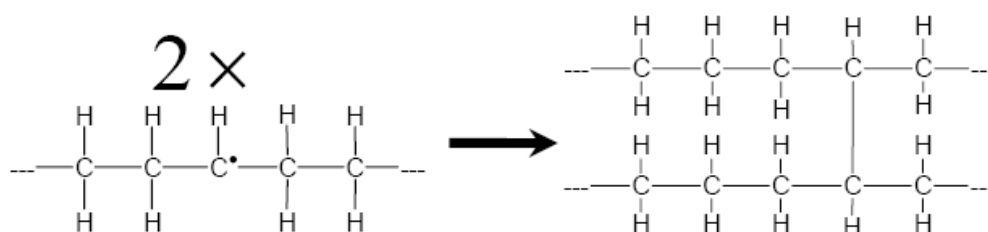


Figure I.7 : Processus de réticulation

Le taux de réticulation est théoriquement proportionnel à la dose de DCP. Cependant, les réactions de réticulation sont complexes et font apparaître des résidus.

I. 1.4.2 Réactions secondaires de la réticulation

Dans cette partie, nous décrirons simplement les réactions secondaires relatives au DCP, étant données sa large utilisation en milieu industriel. Les principes suivants sont applicables à d'autres agents de réticulation, mais les résidus produits peuvent être de nature autre ou en concentrations différentes. Le principal produit dérivé de la réticulation est bien entendu l'alcool cumylique, qui est le résidu attendu d'après la figure I.8 :

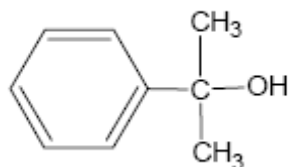


Figure I.8 : Molécule d'alcool cumylique

Toutefois, les conditions de la fabrication de polyéthylène réticulé font que d'autres résidus sont synthétisés pendant ce processus. Les chemins de réactions typiques peuvent être

formulés comme sur les figures I.9 à I.11, et donnent alors des molécules de : α -méthylstyène, acétophénone, eau, éthane et méthane.

- Formation d' α -méthylstyène et d'eau :

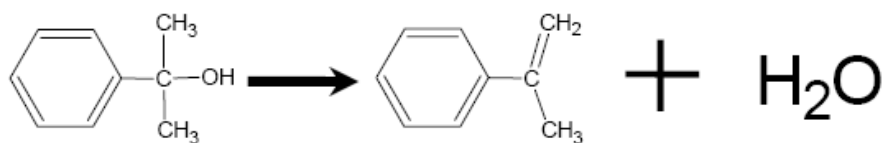


Figure I.9 : Molécules d' α -méthylstyène et d'eau

- Formation d'acétophénone et de radical méthyle :

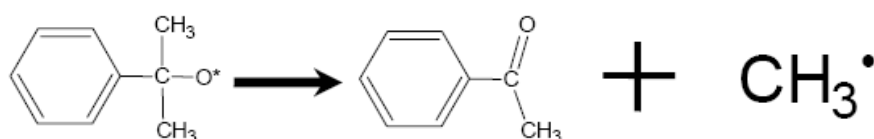


Figure I.10 : Molécules d'acétophénone et de radical méthyle

- Formation d'éthane et de méthane à partir du radical méthyle :

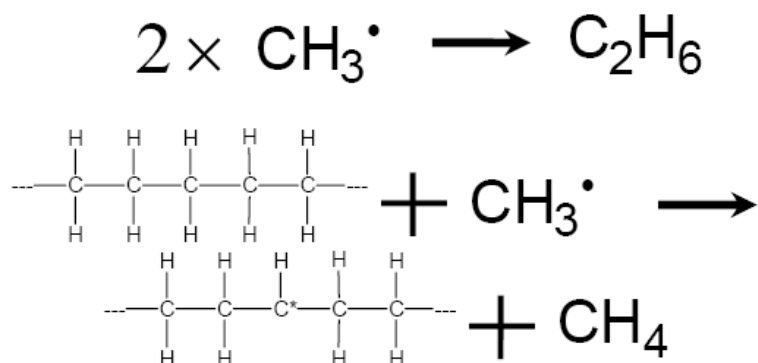


Figure I.11 : Molécules d'éthane et de méthane

Tous ces produits résidus de la réticulation sont plus ou moins volatiles. Ainsi, la présence d'eau, de méthane et d'éthane est négligeable (< 0.001 %). L'existence d' α -méthylstyène n'est pas conséquente mais non négligeable (≈ 0.02 %). En revanche, l'alcool cumylique et l'acétophénone sont bien plus présents (> 0.5 %). Leur concentration respective varie en fonction des conditions de la mise en forme du PRC, notamment au niveau de la température et de la dose de DCP [Kat.03].

1.1.4.3 L'antioxydant et ses produits de décomposition

Compte tenu des conditions de fabrication des polyéthylènes (température, oxygène, humidité, etc.), l'oxydation du matériau est inévitable. Pour contrer ce processus, les fabricants introduisent un composé antioxydant. L'ajout d'antioxydant (AO) se fait pendant la

phase d'extrusion. En effet, lorsque le polymère est mis à chaud et entre en contact avec l'air ambiant, les conditions d'oxydation du polymère sont favorisées grâce à l'action combinée de la température et de l'oxygène. L'antioxydant présent à ce moment-là permet de fixer la majeure partie de l'oxygène, et ainsi de prévenir la dégradation par oxydation du polymère. En présence d'antioxydant et après un vieillissement thermique, le taux de carbonyles reste constant à la périphérie du matériau. A l'inverse, dans les mêmes conditions, un matériau dépourvu d'antioxydant présente un taux de carbonyles sept fois plus élevé près de la surface [Old.01].

Il existe plusieurs types d'antioxydants dont les principales structures, données dans le tableau I.3, sont de type phénolique, amine et sulfure. Bien évidemment, ces différentes compositions vont entraîner des variations de proportion des produits dérivés issus de la réticulation [Sek.01].

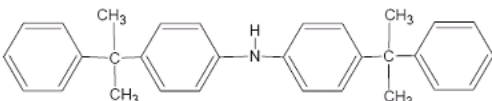
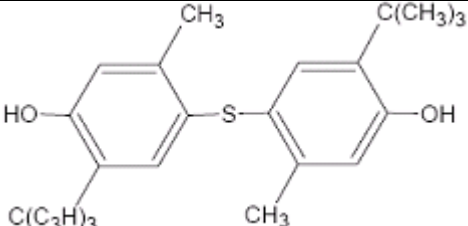
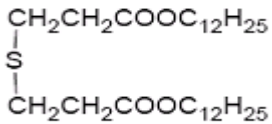
Type d'antioxydant	Structure moléculaire
Amine	
Phénolique (Santnox ®)	
Sulfure	

Tableau I.3 : Structures moléculaires d'antioxydants classiques

I.1.5 Cristallinité dans les polymères

La forme cristalline la plus fréquente est la lamelle qui résulte des replis successifs de chaînes polymères sur elles-mêmes. L'épaisseur d'une lamelle correspond en général à 10 motifs monomères soit environ 10 nanomètres. Une chaîne polymère peut participer à plusieurs lamelles, de la même façon qu'une lamelle peut être constituée de plusieurs chaînes différentes. Les lamelles ont la possibilité de s'organiser en une superstructure cristalline nommée sphérolite (Figure I-12). Les sphérolites peuvent atteindre des tailles d'environ 1mm. Elles sont constituées par un arrangement hélicoïdal des lamelles à partir d'un centre de nucléation. Bien que les sphérolites soient une superstructure cristalline, elles ne sont pas elles-mêmes totalement cristallines. Il y a toujours une phase amorphe présente, notamment

entre les lamelles constituant les sphérolites. La cristallisation va dépendre de la méthode de préparation du polymère ainsi que du type de chaîne formée. En effet, le polymère cristallisera plus facilement en cas de refroidissement lent après polymérisation. D'autre part, des chaînes peu ramifiées et ayant des groupements latéraux, peu encombrants, conduiront à des matériaux plus cristallins. Les polymères ne se cristallisent jamais totalement pour différentes raisons :

- la présence d'irrégularités structurales (ramification,...)
- la lenteur des réarrangements conformationnels.
- la présence d'enchevêtrements qui s'opposent à la cristallisation.

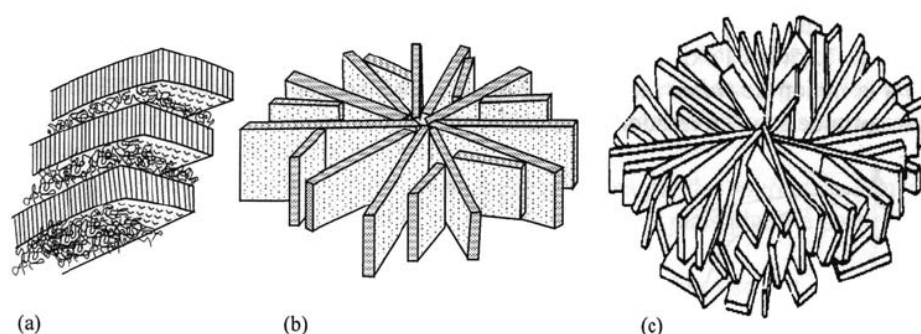


Figure I.12 : *Représentation des sphérolites*
a) *formation des chaînes moléculaires en lamelles cristallines.*
b) *orientation des lamelles dans le plan.*
c) *vue de la sphérolite dans son ensemble.*

Le taux de cristallinité d'un matériau modifiera son comportement notamment sous l'effet de la chaleur. En effet, les chaînes moléculaires sont plus liées dans un matériau cristallin, la température de fusion est donc supérieure. On distingue d'ailleurs une température de transition correspondant à la température de recouvrance structurale des zones amorphes d'un polymère (elle est appelée température de transition vitreuse) et la température de fusion des zones cristallisées, plus élevée, nommée température de fusion.

I.1.6 Propriétés mécaniques

Les polymères se comportent différemment en fonction de la vitesse à laquelle ils sont sollicités, pour des sollicitations de faible durée, ils se comportent comme des solides vitreux, alors que pour des expériences plus longues, ils se comportent comme des liquides. C'est pourquoi on a qualifié les polymères de matériaux « viscoélastiques ». Le terme élastique est attribué à la part vitreuse du polymère, le terme visqueux est attribué à sa part liquide.

Le comportement mécanique des polymères lie la déformation à la contrainte par deux comportements différents exprimés dans la figure I-13.

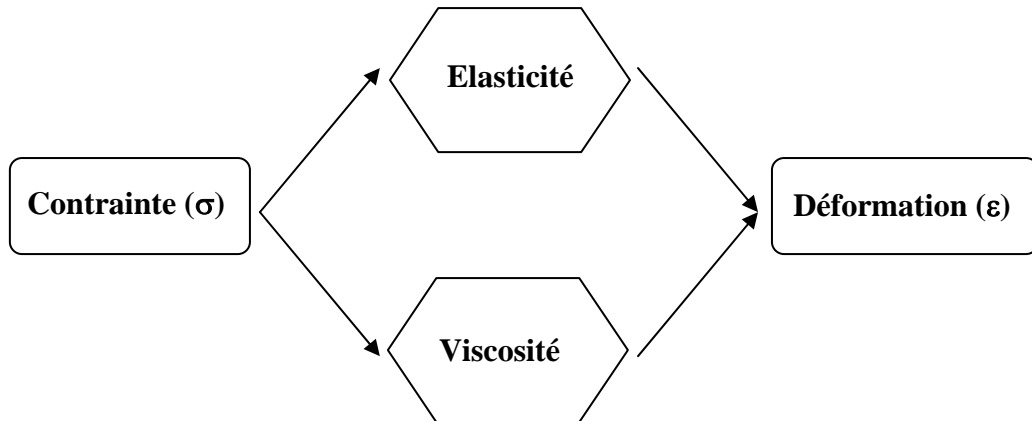


Figure I.13 : Relations entre la contrainte et la déformation pour les matériaux polymères

Ainsi, afin de décrire son comportement mécanique, on utilise deux fonctions décrivant chacune un comportement du polymère. La part de chaque comportement dépendra de la température ainsi que de la durée de sollicitation. La loi de Hooke décrit le comportement élastique. Elle relie la contrainte σ à la déformation ε par un coefficient E que l'on nomme « module d'élasticité » ou module d'Young :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \text{I-1}$$

Le comportement visqueux est décrit à partir de la loi de Newton selon laquelle la contrainte est proportionnelle à la vitesse de déformation. Le facteur de proportionnalité η est la viscosité du matériau.

$$\sigma = \eta \cdot \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right) \quad \text{I-2}$$

Les polymères ont des propriétés mécaniques particulières, qui diffèrent assez fortement d'un type de polymère à un autre. Globalement, on peut les classer dans deux catégories suivant les déformations réversibles et irréversibles qu'ils sont susceptibles de subir.

I.1.7 Propriétés diélectriques

Les polymères sont des isolants qui n'ont donc pas la capacité de conduire le courant électrique de façon spontanée. Ce sont des matériaux diélectriques. On définit les diélectriques de la façon suivante : « substance dont la propriété électromagnétique fondamentale est d'être polarisable sous l'effet d'un champ électrique ». Les polymères sont donc polarisables.

1.1.7.1. Polarisation des diélectriques

Dés que les théories modernes de la structure de la matière ont été introduites, en particuliers celles concernant les atomes et les molécules, on a pu justifier le concept de polarisation imaginé par FARADAY lorsqu'il a étudié le comportement des isolants dans un champ électrostatique. Pour désigner ces matériaux, il a employé le terme *diélectrique*. Les mots isolant et diélectrique peuvent être considérés comme synonymes. Néanmoins, le terme *diélectrique* est réservé aux substances polarisables, il est plus général que celui d'isolant. De ce fait, un diélectrique est une substance dont la propriété électromagnétique fondamentale est d'être *polarisable* par un champ électrique. En réalité tous les isolants sont un peu conducteurs.

L'existence des charges de polarisation apparait au sein d'un diélectrique sous l'action d'un champ électrique. Cela permet de ramener les charges comprenant des isolants à un système de charge dans le vide. Dans le cas d'un objet soumis à un champ électrique E , on désigne polarisation par le vecteur P :

$$P = \chi \cdot \varepsilon_0 \cdot E \tag{I-3}$$

Où χ est la susceptibilité diélectrique du matériau et ε_0 la permittivité absolue ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F.m}^{-1}$).

La susceptibilité diélectrique est reliée à la permittivité relative par la relation :

$$\chi - 1 = \varepsilon_r \tag{I-4}$$

Dans un diélectrique soumis à un champ alternatif, la constante de perméabilité est représentée par une grandeur complexe ε_r^* :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \tag{I-5}$$

La partie réelle caractérise les pertes par conduction tant que la partie imaginaire caractérise les pertes diélectriques par polarisation. La perte d'énergie est alors estimée par l'angle de perte δ tel que :

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \tag{I-6}$$

δ est aussi appelé facteur de dissipation diélectrique.

Les dissipations d'énergie en courant alternatif proviennent de la dissipation des diverses relaxations. Dans les polymères, Dubois [Dub.01] propose quatre types de polarisation ; électronique, atomique, d'orientation et interfaciale :

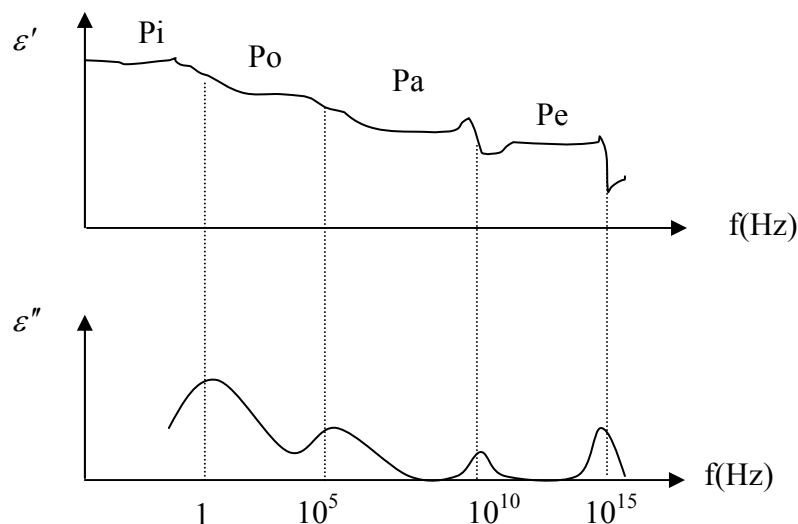


Figure I.14 : Niveaux de polarisation en fonction de la fréquence de sollicitation [Dub.01]

*Pi = polarisation ionique ; Po = polarisation de debye ;
Pa = polarisation atomique ; Pe = polarisation électronique*

1. Polarisation électronique : Elle correspond à la déformation du nuage électronique soumis à un champ électrique. On peut l'observer jusqu'à des fréquences de l'ordre de 10^{15} Hz.
2. Polarisation atomique : Dans le cas où deux atomes différents sont liés par une liaison covalente, les électrons qui les lient vont être légèrement déplacés du côté de l'atome le plus électronégatif. On a donc création d'un moment dipolaire induit de liaison. Lorsqu'on applique au dipôle induit un champ électrique, les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres, donnant naissance à une polarisation atomique. Les atomes étant beaucoup plus lourds que les électrons, la polarisation atomique cesse pour des fréquences plus faibles que la polarisation électronique. La valeur limite d'excitation atomique est d'environ 10^{12} Hz
3. Polarisation d'orientation, dite de Debye : Elle intervient pour les molécules possédant un moment dipolaire permanent. Ce type de molécule va s'orienter dans le sens du champ appliqué. Comme la polarisation d'orientation nécessite un moment dipolaire permanent, elle ne concerne que les polymères polaires. La polarisation d'orientation confère au polymère des valeurs de permittivité relative assez élevée : $\epsilon' = 4$ à 10 (poly(fluorure de vinyldène)). Elle entraîne aussi une forte variation du constant

diélectrique en fonction de la température puisque la capacité d'orientation est liée à la viscosité. Enfin, elle est souvent accompagnée d'un angle de perte important (10^{-3} à 10^{-2}). La polarisation d'orientation s'annule pour des fréquences supérieures à 10^5 Hz.

4. Polarisation interfaciale ou de charge d'espace : Ce type de polarisation intervient quand le polymère possède plusieurs phases de permittivités et conductivités différentes. Ce matériau hétérogène, soumis à un champ électrique, va voir apparaître des charges électriques à ses interfaces. Ce type de polarisation existe pour de basses fréquences (10^{-1} à 10^2 Hz).

A ces polarisations principales, Fournié et Coelho [Fou.00] ajoutent la polarisation ionique, qui résulte de la vibration sous l'effet du champ des ions résidants dans le polymère.

I.2 Transport et stockage de charges électriques dans les polymères

Les charges électriques peuvent être transportées. Elles peuvent aussi être piégées. Dès lors, le comportement de ces charges conduit au vieillissement et dégradation électrique de l'isolant. Nous allons tout d'abord voir la structure de bande des polymères. Nous expliquerons ensuite le phénomène de piégeage des charges. Nous montrerons aussi comment le stockage de charge conduit la formation de défauts.

I.2.1 Structure de bande

Le classement des matériaux vis-à-vis de leurs propriétés électriques est issu de la théorie quantique. Les fonctions d'ondes, solutions de l'équation de Schrödinger, permettent d'établir une carte des niveaux d'énergie accessibles aux électrons. Etant donné le très grand nombre de sites de même énergie situés à proximité les uns des autres dans le réseau, nous obtenons un recouvrement des fonctions d'onde. Ce recouvrement des fonctions d'onde a conduit à considérer les états d'énergie dans le matériau comme des bandes d'énergies continues (autorisées ou interdites) pour les électrons.

Pour résumer, les solides monocristallins se sont vu attribuer, deux bandes d'énergie autorisées, séparées par une bande d'énergie interdite. Les bandes d'énergies autorisées sont nommées bande de valence et bande de conduction. Elles sont respectivement limitées par leur niveau d'énergie supérieur (E_{nv}) et inférieur (E_{nc}).

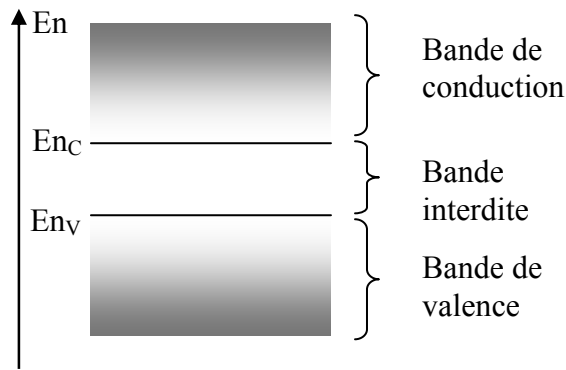


Figure I.15 : Niveau d'énergie dans les matériaux

I.2.2 Cas des polymères

Les matériaux isolants polymères, bien que très performants dans leur fonction, ne sont pas exempts de défauts. En effet, leur topologie est très éloignée de celle d'un isolant parfait, qui pourrait être assimilé à un réseau cristallin pur ayant une bande interdite (ou gap) dépourvue de tout niveau électronique (figure I.16.a). Un isolant réel, donc imparfait, possède plus ou moins de niveaux intermédiaires, ou d'états localisés, entre la bande de valence et la bande de conduction (figure I.16.b). L'énergie de cette bande interdite (E_{ng}) est généralement inférieure à 10 eV. Par exemple, pour un polyéthylène basse densité : E_{ng} est compris entre 7.7 eV et 9 eV [Bou.01, Dis.92].

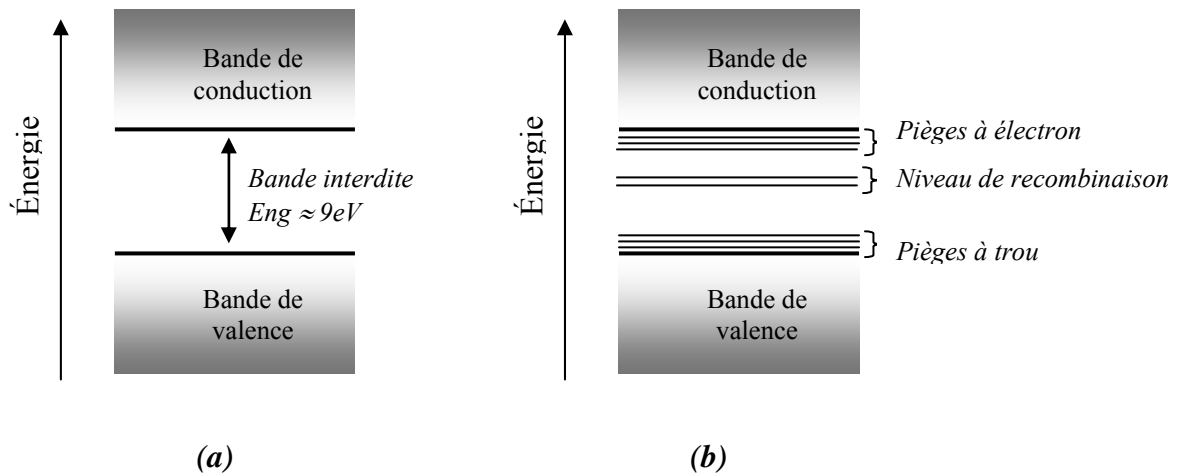


Figure I.16 : Niveau d'énergie d'isolants
Parfait(a) et réel (b)

Cette densité d'états d'énergie dans la bande interdite a pour conséquence de favoriser le déplacement des charges. Ces dernières peuvent alors franchir la bande interdite en utilisant ces niveaux comme une échelle, ou bien rester piégées plus longtemps sur des centres plus profonds [Meu.00, Ied.83].

I.2.3 Conduction électrique

La capacité d'un matériau à conduire l'électricité était corrélée à la mobilité des électrons au sein de ce même matériau. De nombreuses études ont été menées afin de déterminer la mobilité des porteurs de charges dans les isolants, et en particulier les polymères [Mar.72, Win.72]. Pour qu'un courant se forme dans un solide sous l'effet d'un champ électrique (conduction), il faut qu'il y ait des porteurs de charges électriques et qu'ils puissent se déplacer vers des positions disponibles et des niveaux énergétiques proches de leurs positions de départ [Wat.95, Bla.01].

Dans le cas des isolants, la bande de valence est pleine. On n'a pas de positions disponibles. La bande de conduction est vide, et elle ne possède pas ou très peu de porteurs électriques. Les isolants, tels les polymères, ne conduisent donc pas l'électricité intrinsèquement.

I.2.4 Piégeage des charges

Dans le paragraphe précédent nous avons considéré que les polymères utilisés pour l'isolation ne sont pas parfaits mais possèdent des sites énergétiques dans la bande interdite. En dehors de la conduction, ces sites peuvent stocker des charges ; c'est le phénomène de piégeage. Les sites de piégeages correspondent à une variation de la permittivité diélectrique du réseau. Ceci a pour effet de créer un trou de potentiel dans lequel l'électron, si son énergie est suffisamment faible, pourra être piégé.

Les sites de piégeage peuvent être de diverses natures. Dans le cas des matériaux monocristallins, des dislocations, impuretés, lacunes, interstitiels peuvent être à l'origine d'une variation de permittivité et donc d'un piégeage. Dans le cas des matériaux semicristallins ou des poly-cristaux, les joints de grains et les zones amorphes constituent des lieux ou interfaces propices à un piégeage des charges [Meu.01].

Dans les polymères, le niveau de piégeage moyen globalement accepté est compris entre 0,1 et 1 eV (figure 17) pour les électrons faiblement piégés, et jusqu'à 3 eV pour les pièges de forte énergie (défauts chimiques) [Meu.00]. Un électron piégé est susceptible d'être dépiégé, notamment s'il reçoit une énergie extérieure, par exemple thermique. Ainsi, on pourra considérer la mobilité des charges électriques dans le matériau en fonction du temps passé dans les pièges par rapport au temps passé à un niveau d'énergie suffisamment élevé pour considérer que l'électron est mobile.

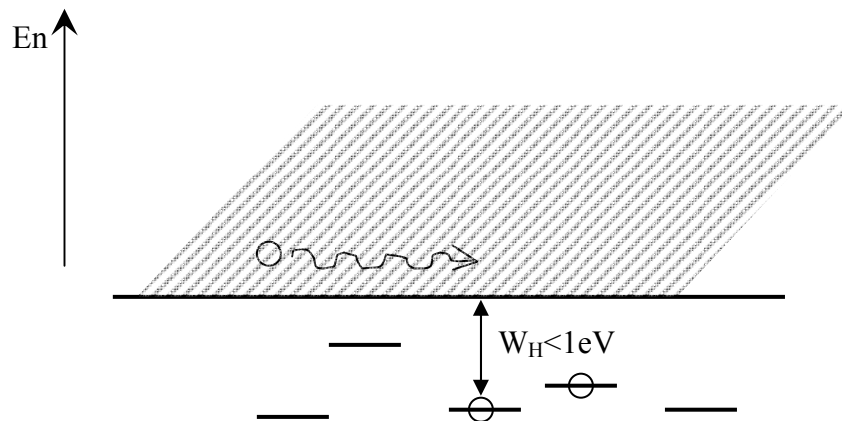


Figure I.17 : Schématisation de la diffusion des électrons dans la bande continue et leur piégeage dans des pièges situés dans la bande interdite. Les pièges ont généralement moins de 1eV de profondeur.[Meu.00]

I.2.5 Charge d'espace dans les polymères

Nous entendons par charge d'espace, l'ensemble des charges électriques positives ou négatives piégées dans un diélectrique. Les charges sont générées soit dans le volume -elles sont alors appelées charges intrinsèques soit aux interfaces -elles sont dites extrinsèques.

Les charges intrinsèques à l'isolant regroupent :

- ✓ dipôles d'orientation ou de déformation (Figure I .18 1, Tableau I.4 1),
- ✓ impuretés ioniques provenant du mode de fabrication (Figure I.18 2, Tableau I.4 2)
- ✓ charges issues d'un phénomène d'injection d'électrons / trou (Figure I.18 3, Tableau I.4 3).
- ✓ Charges issues d'une dissociation d'espèces initialement neutres (Figure I.18 4, Tableau I.4 4).

Les charges extrinsèques sont créées à partir de :

- ✓ en réponse aux dipôles et en vertu du déplacement électrique équivalent à une absence de matière inter-électrode (Figure I.18 5, Tableau I.4 5), on parle alors de charge de polarisation dipolaire et de déplacement électrique absolu.
- ✓ soit en réponse aux autres charges d'espace, on les nomme alors charge image (Figure I.18 6, Tableau I.4 6)
- ✓ enfin par décharge de surface (Figure I 18 7, Tableau I.4 7).

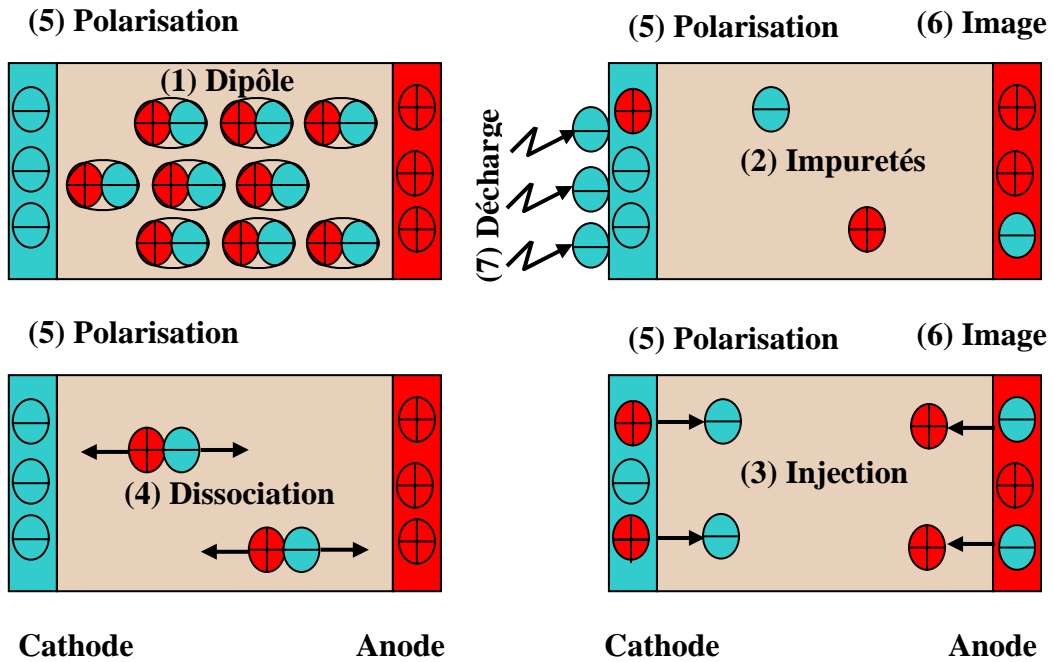


Figure I.18 : Synthèse des différents types de charge d'espace

Mécanisme	Exemples
(1) Dipôles	
Déformation du nuage électronique d'un atome ou d'un réseau ionique sous l'effet coulombien du champ électrique	Tout sauf le vide, et liaison à caractère ioniques C-O, Si-O, ...
Orientation de molécules polaires sous l'effet coulombien du champ électrique	H ₂ O, CO, HCl, CH ₃ -CH ₀ et autres liaisons covalentes
(2) Impuretés	
Diffusion ionique engendrée par la fabrication ou l'architecture du diélectrique	Diffusion d'une oxydation ou de matières telles que: Na ⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁻ , OH ⁻ , dendrites
(3) Injection	
Effets Schottky et Fowler-Nordheim assistés par le champ électrique	Electrons / trou
Faisceau de particules chargées (irradiation)	Irradiation au canon à électron
(4) Dissociation	
Electrodissociation	Groupeement amide, molécules diatomique (Na ₂ : 0.7eV, H ₂ : 4.48eV)
Rayonnement ionisants (UV, X et γ)	Rayonnement photo (Au: 5.1eV)
(5) Polarisation	
Influence totale avec le réseau de dipôle	Electrons ou anion à la surface du métal (électrode)
déplacement électrique absolu	vide
(6) Image	
Influence totale avec les charges d'espace autres que dipolaires	Electrons ou anion à la surface du métal (électrode)
(7) Décharge électrique	
Dépose d'électrons par décharge électrique en surface	Décharge plasma

Tableau I.4: Liste des principales origines de la charge d'espace

Le comportement de la charge d'espace et des phénomènes optiques pourrait constituer des marqueurs potentiels du vieillissement électrique. Beaucoup d'efforts ont été développés dans la compréhension de la corrélation entre charge d'espace et formations de cavités dans les isolants Gallot [Gal.04] à montré le scénario de vieillissement électrique qui passe par l'expression de phénomènes observables.

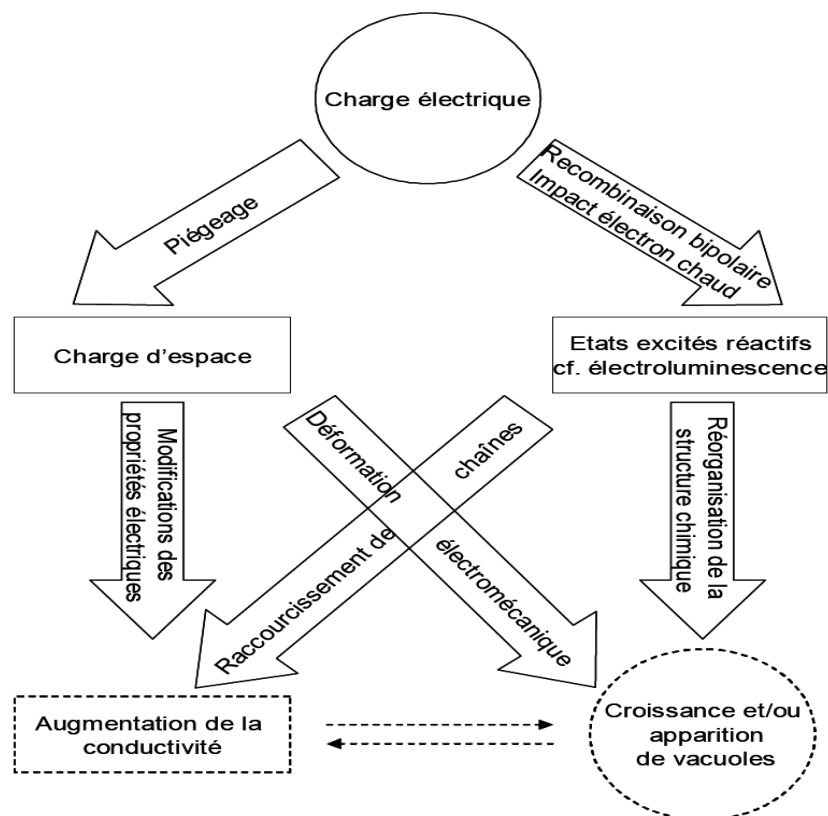


Figure I.19: Scénario hypothétique d'un vieillissement électrique impliquant la charge d'espace, l'électroluminescence et cavités.[Gal.04]

Selon ce scénario, une charge électrique qui serait piégée suivant une distribution particulière et une quantité critique (effet de seuil), pourrait notamment: (1a) donner lieu à une déformation électromécanique dont une conséquence directe et/ou indirecte serait la croissance et/ou l'apparition de cavités; (1b) modifier des propriétés électriques dans le sens d'une augmentation de la conductivité, par canaux chargés (à l'image du streamer), renforcement du champ électrique (hétérocharges et/ou homocharges), et augmentation du nombre de porteurs de charges. Toujours selon le même scénario, l'impact avec une structure chimique d'une charge électrique libre et pourvue d'une énergie cinétique suffisante (électron chaud), ou la recombinaison de charges électriquement opposées, impliquerait une réactivité chimique (radicaux libres induits par une ionisation par impact et/ou des états excités) critique (effet de seuil) qui pourrait mener à: (2a) une réorganisation de la structure chimique conduisant à la croissance et/ou l'apparition de cavités; (2b) un raccourcissement de chaînes

moléculaires ou une apparition de radicaux libres qui occasionnerait une augmentation de la conductivité.

I.2.6 Charge d'espace et tension alternative

Beaucoup de travaux ont traité le problème de formation de charge d'espace dans les systèmes électriques à tension continue. La plupart des systèmes à haute tension en électrotechnologie fonctionnent sous tensions alternatives. Cependant des travaux récents, en utilisant des nouvelles techniques [Not.99, Agn.99, Che.02], ont démontré la présence des charges d'espace dans la partie isolante des câbles de transport d'énergie. Ces charges sont distribuées aléatoirement en trois dimensions autour des inhomogénéités. G. Chen [Che.03] a étudié, expérimentalement, la présence des charges d'espace dans des échantillons de câble vieillissés pendant plusieurs heures, sous une tension alternative à 50 Hz. La figure montre bien que la quantité de charge augmente avec le temps de vieillissement.

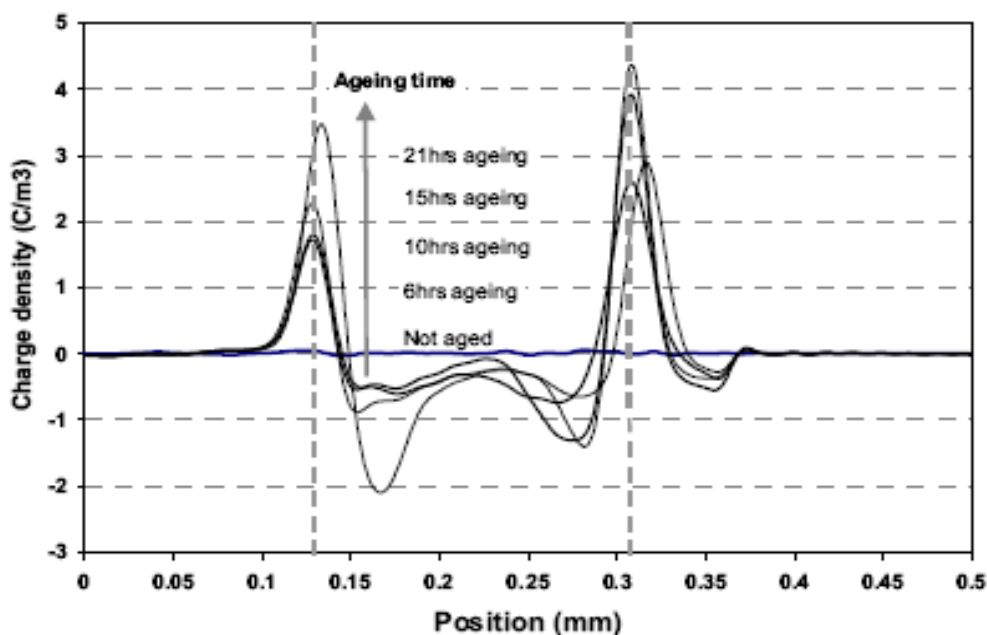


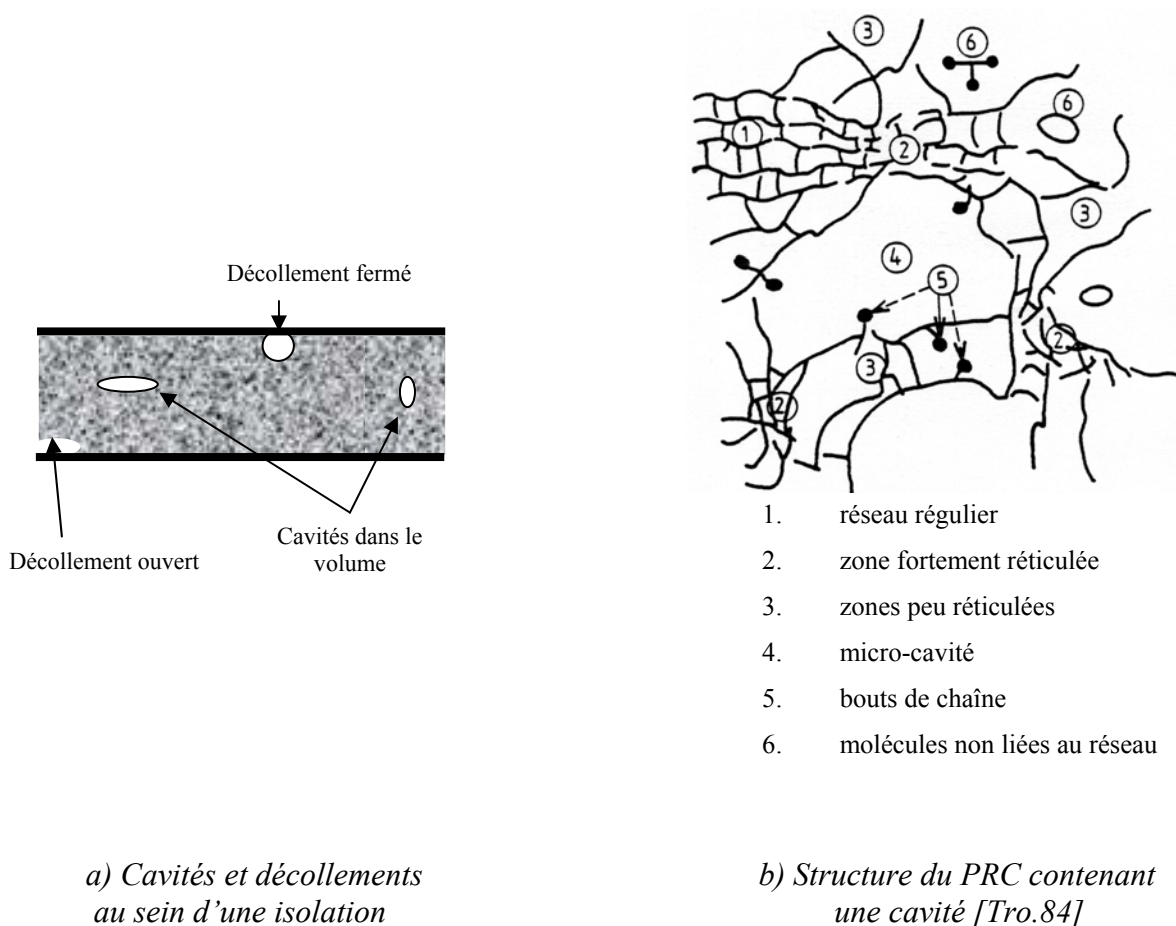
Figure I.20: Distribution de charge d'espace dans un polyéthylène vieilli à 50kV/mm. [Che.03]

I.3 Défauts dans les polymères

Un cristal parfait n'est jamais obtenu avec des matériaux isolants, et à plus forte raison avec les isolants polymères qui sont amorphes ou semi cristallins. Nous appellerons "défaut" dans un isolant tout ce qui l'écarte d'une structure cristalline parfaite. Dans ces matériaux, les défauts rencontrés ont des provenances diverses. Ceux d'origine topologique et ceux provenant de sources chimiques [Bla.01], et autres qui se forment sous l'effet du vieillissement de l'isolant pendant le service.

I.3.1 Formation des cavités dans un polymère

Les matériaux isolants utilisés dans le système d'isolation électrique (SIE) ne sont jamais parfaitement homogènes. D'une part, au cours de leur élaboration, de très faibles quantités de gaz se trouvent souvent emprisonnées au sein du matériau et forment des cavités de forme et de dimensions très diverses dont l'accès aux caractéristiques (dimension, pression, nature du gaz) est impossible. D'autre part, lors de la mise en place de l'isolant autour de pièces conductrices, ou encore sous l'action de contraintes thermique ou mécanique, des cavités proviennent de la différence qui existe entre les coefficients de dilatation thermique des deux matériaux en contact. En terme technique on parle du décollement, leur volume interne peut être ou non ouvert sur l'atmosphère extérieure. Ces occlusions peuvent être les sièges des phénomènes physiques caractérisant les décharges partielles (DP).



a) Cavités et décollements au sein d'une isolation

b) Structure du PRC contenant une cavité [Tro.84]

Figure I.21 : Défauts dans un isolant

En outre, en présence des combinaisons moléculaires de carbone, d'hydrogène et d'atomes d'oxygène, la structure du polymère se transforme lentement ; quand le polymère absorbe de l'énergie et en présence de l'oxygène ou de l'ozone, des radicaux et divers gaz sont produits. Certains ou plusieurs de ces produits (dioxyde de carbone, monoxyde de carbone, vapeur d'eau et d'autres molécules gazeuses volatiles) créeront de nouveaux sites de cavité ou

s'accumuleront aux voisinages des cavités déjà existantes et contribuant à une augmentation de la densité et de la taille. Il est également possible que des cavités seraient en plus formées pendant l'opération de réarrangement physique des molécules dues à la cristallisation pendant le vieillissement. [Hor.00]

Beaucoup d'efforts ont été développés pour mettre de la lumière sur les caractéristiques de ces défauts notamment : nombre, taille, forme, densité...[Mot.75, Tro.84, Dan.96]. Cependant, L'observation optique à été réalisée par Motoyuki et al. [Mot.75] sur des échantillons, de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur il a compté 10^6 cavités/mm³ s'étendant de 1 au μm 5. Les dimensions des cavités sont mesurées en utilisant le micromètre. Ces dimensions varient de un à vingt micromètres, tandis que le nombre de cavités est obtenu par la conversion du nombre trouvé dans le champ de vision du microscope au nombre par unité de volume.

Environ dix ans après, Ball [Bal.84] a montré que le processus de refroidissement de fabrication normale des câbles en XLPE (polyéthylène réticulé chimiquement) a mené à une densité de 10^3 à 10^7 cavités/mm³ dans la même classe de grandeur.

Les dimensions des cavités dépendent de l'opération de la mise en œuvre du matériau. Yoda [Yod.72] a qualifié l'effet de chacune des étapes de fabrication d'un câble de transport (extrusion, moulage, échauffement, réticulation et refroidissement) sur la naissance des cavités dans la partie isolante.

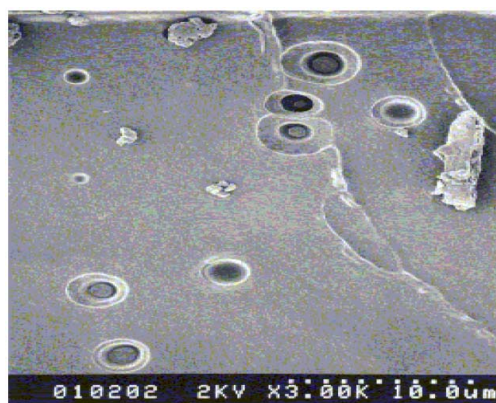
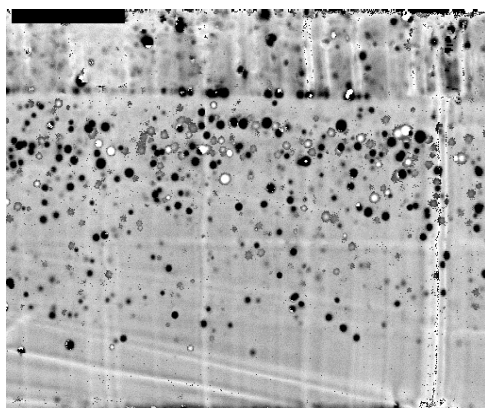
Plus récemment Namiki et autres [Nam.80], Laurent et Mayoux [Lau. 92], Mammeri et autres [Mam.95], [Hor.01] et d'autres ont évalué l'importance de l'influence de ces cavités sur la durée de vie des systèmes d'isolations.

I.3.2 Méthodes de détection des cavités

Des travaux récents ont permis avec succès l'observation et l'imagerie de cavités. La taille d'une cavité et la densité peuvent être observées en utilisant le :

- Microscope optique (Optical microscope)
- Ultrason conventionnel (Conventional ultrasound 200 kHz to 10 MHz)
- Microscope acoustique à balayage (Scanning Acoustic Microscopy SAM, 10 MHz to 1 GHz)
- Microscope électronique à balayage (Scanning electron microscope SEM).
- Microscope électronique à transmission (Transmission electron microscopy TEM).
- Microscope à force atomique (Atomic force microscopy AFM)

La première méthode est limitée ; une fréquence de 10 mégahertz, ne permet pas de détecter les cavités de diamètre allant de 50 à 100 micromètres. Cela revient au taux d'atténuation, seules les ondes supérieures à 10 mégahertz ont l'énergie suffisante pour pénétrer la gaine extérieure d'un câble électrique. Cependant, la microscopie acoustique s'est avérée plus fiable. La microscopie acoustique est l'une des méthodes de visualisation qui peut fournir des « images » de la structure interne des matériaux opaques à la lumière mais transparents aux ultrasons. Cette méthode est capable de filtrer les réflexions qui proviennent de la gaine du câble. On peut obtenir des images acoustiques d'échantillons de quelques centimètres carrés de surface sur quelques dizaines de micromètres d'épaisseur. Cependant cette technique est délicate à cause du problème de calibrage ; une fois le calibrage effectué, la microscopie acoustique est un outil prometteur pour la détection et les mesures in situ et pourrait être convenable pour l'essai non destructif de l'isolation de câble [Avi.00] (figure I.22 a).



a- cavités visualisées avec SAM à 50 MHz

b- cavités visualisées avec SEM (3000X)

Figure I.22 : Image des cavités visualisées dans le volume d'un polyéthylène vieilli [Avi.00]

Les techniques de microscopie optiques et SEM, bien qu'exigeant la préparation de l'échantillon dans le laboratoire, permettent l'identification des caractéristiques de cavité et joue, donc, un rôle essentiel en l'obtention d'une base de données des paramètres de cavité (taille et densité) et des corrélations entre la durée de vie de l'isolant et les contraintes environnementales [Avi.00]. On l'a constaté que le SEM était utile, en particulier, pour rechercher des cavités dans des nouveaux matériaux isolants où les cavités se sont avérées de taille relativement petite (0.3 à 12 microns) (figure I.22 b).

La microscopie électronique à transmission (TEM) a été employée récemment pour déterminer la distribution de concentration des cavités en fonction de la taille à l'échelle mesoscopique à un point quelconque de l'isolant. Dans un câble, les résultats indiquent

clairement qu'une concentration beaucoup plus grande des cavités se produit du semi-conducteur intérieur comparé au volume.

Le microscope à force atomique ou AFM, comme le montre la figure suivante, permet d'analyser les reliefs à l'échelle atomique.

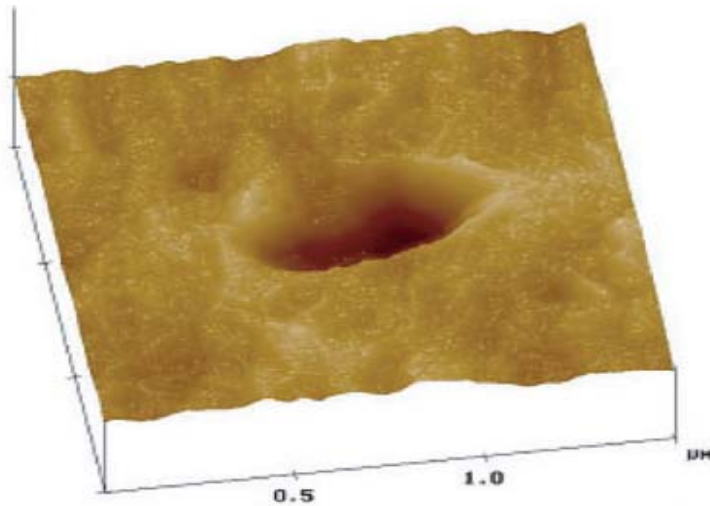


Figure I.23: Cavités en trois dimensions visualisées par microscope AFM [Mar.03]

I. 4 Phénomène des décharges partielles

I.4.1 Définitions et terminologie

Dans un milieu diélectrique, lorsqu'on applique une différence de potentiel entre les deux faces opposées de l'isolant, par le jeu de la répartition de la tension qui dépend du facteur de permittivité du matériau et des dimensions géométriques des défauts (cavités), il arrive qu'un déplacement local d'électrons et d'ions puisse avoir lieu soudainement lorsque le champ dans la cavité atteint la valeur du gradient disruptif du gaz occlus. Ce phénomène transitoire de déplacement de charges est une décharge partielle. Il existe parfois une confusion dans la terminologie. Ainsi on peut trouver des termes tels que : décharge de couronne, avalanche électronique, ionisation... au lieu de décharge partielle.

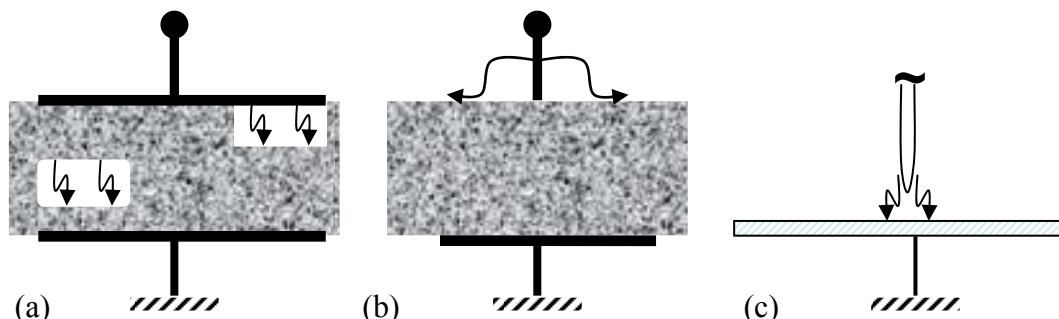
Dans le cadre de la spécification, voici la définition recommandée par la CEI :

Une décharge partielle est définie comme une décharge électrique qui ne court-circuite que partiellement un isolant placé entre deux électrodes et entre lesquelles une différence de potentiel est appliquée [CIE.83]. La décharge partielle peut avoir lieu près d'un conducteur ou à l'intérieur de l'isolant.

I.4.2 Classification

La classification des décharges partielles varie suivant le critère de sélection utilisé :

Kreuger [Kre.89] classe les décharges en fonction de leur localisation. Ainsi il définit quatre catégories.



(a) volume, interface conducteur-isolant ; (b) surface ; (c) couronne

Figure I.24 : Types de décharge partielle

- Décharges internes : (a) par exemple décharges dans les cavités gazeuses, décollements, fissures, etc. Les cavités peuvent exister dans le volume de l'isolant solide ou à l'interface électrode isolant.
- Décharges de surface : (b) elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe sur la surface d'un diélectrique.
- Décharges couronne « corona »: (c) elles se manifestent au niveau des points où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone très réduite entourant la pointe. Cet effet apparaît lorsque la valeur la plus élevée du champ électrique atteint celle du champ disruptif du gaz (air) entourant le conducteur. Il se manifeste sur toute la gamme de fréquence de la tension [Agu.89]. Ces décharges, considérées comme des décharges partielles, sont souvent inoffensives, mais elles produisent de l'ozone et NOx qui réduit la durée de vie des diélectriques.
- Arborescences : l'arbre électrique prend naissance sur un défaut de l'isolation. Il y a une croissance des différentes branches de l'arbre qui sont le siège de décharges.

Par ailleurs, l'aspect impulsionnel ou non de la décharge est utilisé comme autre critère de classification des décharges [Van.94]; le caractère impulsionnel de la décharge est la conséquence de l'accumulation de la charge d'espace qui réduit localement le champ au niveau insuffisant pour maintenir la multiplication des charges. Les décharges non

impulsionnelles (exemple : *glow discharges*) sont caractérisées par un courant qui est constant ou très peu variable en fonction du temps, pour une tension donnée.

Morshuis [Mor.93] propose une classification des décharges enregistrées dans des cavités de polyéthylène basée sur les différences constatées dans l'allure des courants de décharge (durée de l'impulsion, temps de montée, hauteur) et dans les observations de lumière. Il a mis en évidence la présence de trois régimes de décharges :

- *Le régime streamer like*
- *Le régime Townsend-like*
- *Le pitting discharges*

D'autres synthèses sur la terminologie relative aux décharges partielles ont été publiées [Dan.93, Bar.93]

I.4.3 Différentes causes de décharges partielles

I.4.3.1 Particules conductrices libres

Sous l'action d'un potentiel alternatif, des particules conductrices libres peuvent rebondir sur les parois du dispositif électrique. Ces mouvements dépendent de la taille, de la forme des particules, de la tension du système et du potentiel auquel se trouve la particule quand elle s'arrache de l'enveloppe. Si cette particule retombe sur la paroi lorsque le potentiel est différent de celui du « décollage », il existe alors une tension entre la particule et l'enveloppe, responsable de l'apparition d'une décharge.

I.4.3.2 Composants à potentiel flottant

Cette dénomination provient du fait qu'ils ne sont reliés ni au conducteur, ni à l'enveloppe. Ces composants se placent au potentiel qui existerait à cet endroit en leur absence, dit potentiel flottant. Il dépend donc de la distance du composant du conducteur haute tension. Un potentiel flottant n'est pas systématiquement source de décharges partielles, il faut réunir deux conditions pour avoir un tel phénomène :

- le potentiel le plus important doit se situer entre le composant flottant et l'enveloppe du dispositif.
- La présence d'un défaut est nécessaire dans l'espace compris entre le conducteur central et le composant.

1.4.3.3 Décharges à l'intérieur d'un composant diélectrique solide

On considère une cavité gazeuse dans un isolant solide placé entre deux électrodes. Si on applique une tension alternative aux électrodes, un champ électrique est créé dans la cavité. Ce champ électrique est plus élevé que celui de l'isolant, en vertu de la loi de continuité du vecteur de déplacement électrique : La figure 25 illustre la répartition du champ dans un isolant contenant une cavité gazeuse (air). Nous avons considéré en géométrie plane, un matériau isolant (Polyéthylène de permittivité $\epsilon_r=2.3$) contenant une cavité (air avec $\epsilon_0=1$).

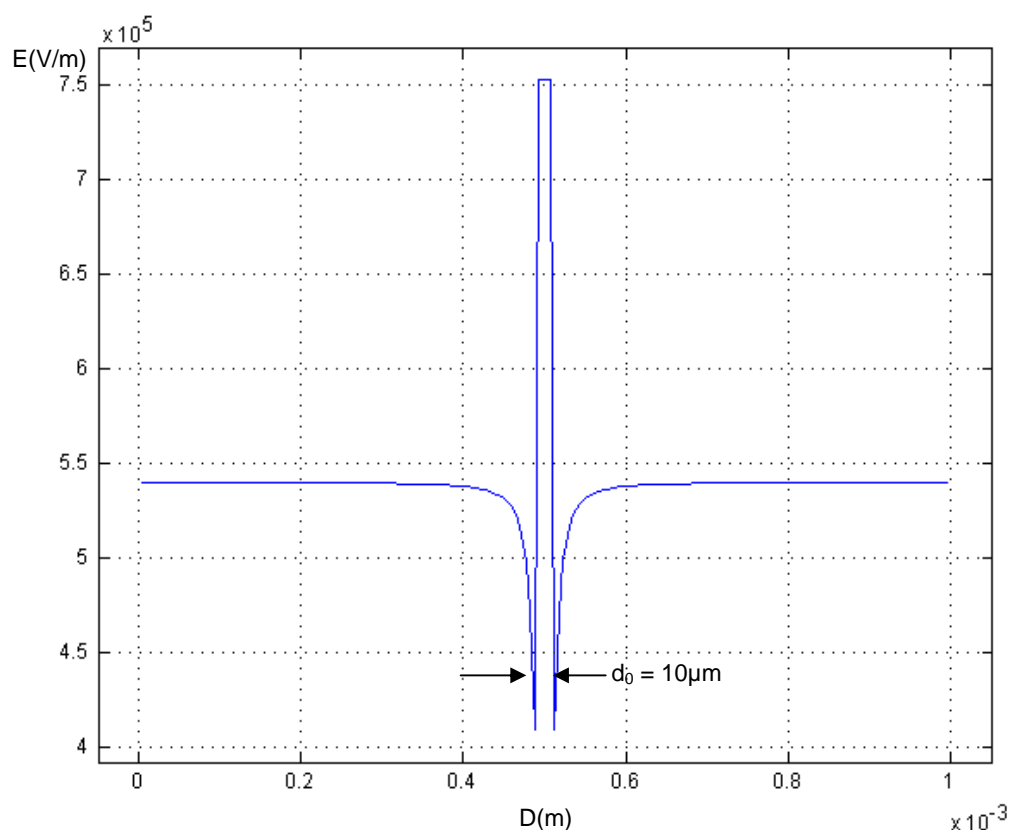


Figure I.25 : Répartition du champ électrique dans un isolant contenant une cavité d'air [Seg.01]

En tenant compte de la continuité du vecteur de l'induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial :

$$D_{isolant} = D_{cavité} \quad \text{alors} \quad E_v = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_v} \cdot E_i \quad \text{I-7}$$

Où E_i est le champ électrique dans l'isolant, E_v est le champ électrique dans la cavité, ϵ_i est la permittivité relative de l'isolant et ϵ_v est la permittivité relative de la cavité.

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants :

1. d'une part, la permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée que celle des gaz, le champ électrique dans les cavités est proportionnellement plus élevé.
2. d'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse que celle des solides

Lorsque le gaz est soumis à un champ électrique, les électrons libres présents dans le volume de la cavité s'orientent et acquièrent une énergie cinétique supplémentaire. Ils peuvent alors ioniser les molécules avec lesquelles ils entrent en collision. Des électrons secondaires sont libérés et l'ensemble des électrons participe alors par des collisions successives à la génération d'une avalanche électronique. Celle-ci a comme conséquence le développement d'un streamer, un canal conducteur à travers la cavité dans une durée de quelques nanosecondes. Cette décharge ne court-circuite pas les deux électrodes toujours isolées par le reste du matériau isolant, d'où le nom de décharge partielle (DP).

I.4.4 Théorie de Paschen et champ critique dans la cavité

L'étude théorique de la tension de claquage d'un gaz pour des conditions atmosphériques connues a été réalisée par Paschen en 1889 [Leb.00]. La courbe de Paschen (Figure I.26) détermine la valeur minimale de la tension de claquage en fonction de la nature du gaz. Cette loi prouve que la tension de rupture d'un gap de gaz peut être décrite par une fonction du produit *pression-distance* (pd). Si on considère un gaz soumis à un champ électrique entre deux électrodes planes métalliques portées à des potentiels différents, la tension de claquage est définie par la relation :

$$V_c = \frac{B \cdot (pd)}{C + \ln(pd)} \quad \text{I-8}$$

Avec V_c la tension de claquage de l'air en V,

d la distance entre électrodes en cm,

p la pression en Torr (1Torr = 1mmHg),

B et C sont des constantes dépendantes entre autre de la nature du gaz, de la matière des électrodes (Pour l'air $B = 365 \text{ V.cm}^{-1}.\text{Torr}^{-1}$ et $C = 1.18$).

Le champ critique E_c peut se déduire de la courbe de Paschen par la formule approchée et qui reste valable dans le domaine des câbles [Ser.78] :

$$E_c = K \cdot p^{0.7} \cdot d^{-0.3} \quad \text{I-9}$$

où $K = 8.10^{-3}$ pour l'air [Ser.78], E_c (en kV/mm) est le champ disruptif de Paschen, p (en mm Hg) est la pression du gaz et d (en mm) est la distance entre électrodes.

Pour une distance inter électrodes donnée et pour des valeurs de pression plus élevée que celle du minimum de la courbe de Paschen, le niveau de tension de claquage augmente avec la pression. Le déclenchement de ces phénomènes nécessite d'être au moins au minimum de cette courbe plane (tension pression-distance). De nombreux travaux existent déjà concernant l'influence de la fréquence, de la température [Sal.03], de la pression [Kar.94] dans des géométries proche de celles utilisées par Paschen lui-même i.e des sphères métalliques placées à des distances et des environnements parfaitement contrôlés. Or, si le passage de cette géométrie à des décharges dans l'air de type « couronnes » est déjà un passage au limite (la nature des décharges dépend entre autres, de la capacité des électrodes à émettre des électrons secondaires dans le plasma et comme on s'en doute le coefficient d'émission secondaire ne sera pas le même entre un conducteur et un isolant) il va de soi que ce passage est encore plus forcé dans le cas de décharges internes, c'est-à-dire dans un volume.

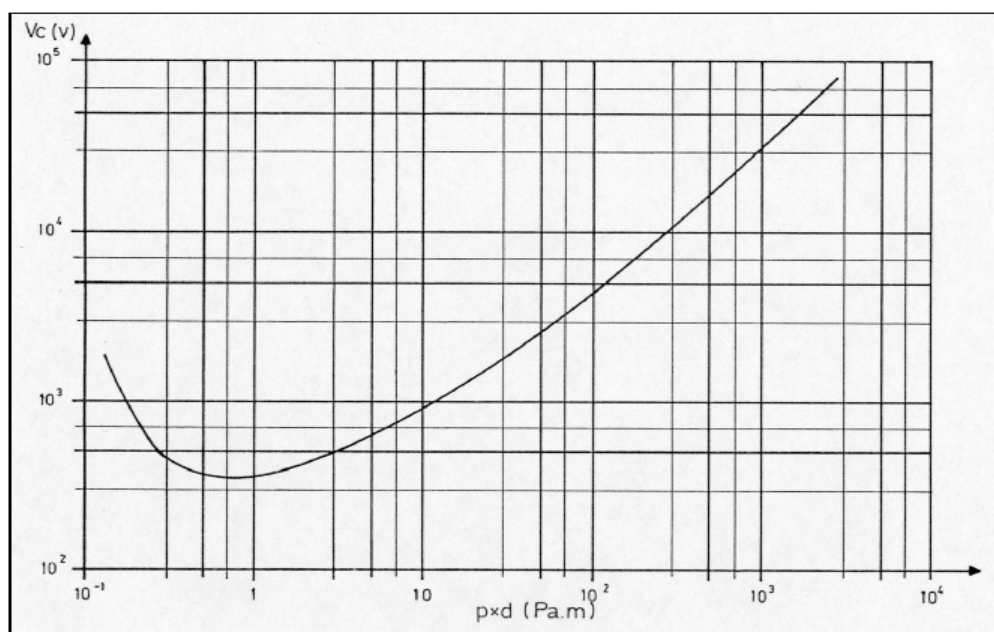


Figure I.26 : Courbe de Paschen pour l'air à une température de 20°C

I.4.5 Techniques de détection et de mesure des décharges partielles

Le phénomène des DP peut être limité lors de la fabrication de l'équipement par sa conception et par la qualité des matériaux utilisés. L'absence de décharge partielle peut être vérifiée par des méthodes de détection, aussi bien pendant la fabrication que pendant la durée de vie de l'installation. La prévention des décharges partielles constitue donc un enjeu capital pour les industries électriques en vue d'assurer un service de qualité sur le long terme.

1.4.5.1 Objectifs

L'objectif de la détection des décharges partielles est de déceler d'éventuels défauts dans un appareil afin d'évaluer sa durée de vie.

D'après Kreuger [Kre.89], quatre étapes doivent être remplies en vue d'atteindre cet objectif. Ces étapes sont :

- La détection : elle consiste à déceler la présence d'une décharge
- La mesure : elle doit permettre par un choix judicieux des grandeurs, de quantifier l'intensité de la décharge
- La localisation
- L'évaluation : déterminer le degré de nuisance des décharges afin de prévoir leur effet sur la durée de vie du matériau

1.4.5.2 Les différentes techniques de détection

La principale technique est celle qui consiste à mesurer le courant ou la charge d'une décharge : c'est la méthode électrique. Nous détaillerons cette technique après avoir passé en revue les autres méthodes de détections qui utilisent les phénomènes physico-chimiques qui se manifestent lors de l'apparition d'une décharge.

1.4.5.2.1 Méthode de détection non électrique

En effet les décharges partielles induisent différents phénomènes (non électriques) dans l'environnement voisin du défaut tel que : augmentation de la température, existence d'émission sonore, apparition de rayons UV visibles. Les méthodes non électriques peuvent être performantes ; elles permettent la localisation des décharges électrique mais elles sont plus coûteuses. Une recherche bibliographique nous a permis de répertorier différentes méthodes de détection.

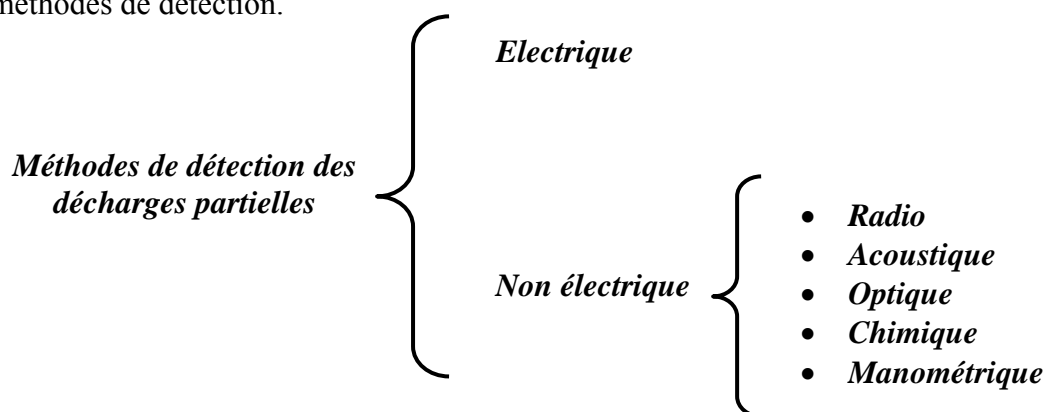


Figure I. 27 : Méthodes de détection des décharges partielles

a) Détection radio

Les ondes électromagnétiques générées par une décharge sont captées par un récepteur à l'aide d'une antenne. Cette méthode ne permet ni de localiser ni de mesurer la décharge.

On peut ajouter la nouvelle technique dite technique UHF utilisée dans le cas des postes blindés isolés au gaz [Sel.95]. Les décharges produisent une série d'impulsions dont la durée est inférieure à 1 ns. Chaque impulsion génère une onde électromagnétique qui se propage dans le domaine UHF (300 à 1500 Mhz).

b) Détection acoustique

La décharge est comparée à une explosion qui donne naissance à une onde acoustique émise qui va se propager à travers le matériau isolant et être captée par des capteurs piezo-électriques placés sur l'enveloppe du dispositif haute tension [Fuj.87]. Les signaux sont ensuite convertis en son audible, puis en signaux électriques pouvant être visualisés sur l'écran de l'oscilloscope. [Lun.92, Tia.01, Tia.02].

La méthode acoustique est peu sensible aux interférences électromagnétiques [Har.93], qui peuvent affecter la détection électrique [Lun.92]. La détection acoustique permet de localiser avec précision la source de DPs, et de mesurer également son énergie qui est proportionnelle au carré de l'intensité des signaux captés [Ben.93]. Quand à la sensibilité, elle dépend du type de détecteur, de la distance entre le capteur et la source de DPs ainsi que le milieu de transmission de l'onde sonore.

c) Détection optoélectronique

L'émission lumineuse produite lors d'une décharge a suscité un grand nombre d'études sur la détection optique de tel phénomène. Cette méthode est appliquée principalement pour la mesure des DPs en surface ou en volume dans le cas d'un diélectrique transparent. La plupart des méthodes proposées utilisent un photomultiplicateur, ce qui implique un coût non négligeable du système de détection. Une excellente sensibilité a été atteinte en utilisant un réseau de six fibres optiques plastiques visant le lieu de décharge et reliées à un photomultiplicateur [Day.84].

Dans cette méthode on peut utiliser trois moyens de détection :

- Détection visuelle
- Détection photographique
- En utilisant un photomultiplicateur

On peut atteindre une sensibilité de 5 pC dans des conditions idéales en utilisant la détection visuelle. La détection photographique permet de localiser les décharges avec précision mais la corrélation entre l'amplitude de la décharge et de la lumière émise est difficile à établir. On peut avoir dans ce cas une sensibilité inférieure à 1 pC [Kre.92]. Avec un photomultiplicateur, on arrive à corréler la lumière avec l'amplitude de la décharge et à détecter des impulsions isolées. Les équipes de Christian Laurent et Thierry Lebey, au sein du Laboratoire Laplace, ont réussi à mesurer des DP avec une sensibilité de 0.005 pC [Leb.90, Had.91].

I.4.5.2 Mesure et détection des DP par la méthode électrique

La détection des décharges partielles par mesure électrique repose sur la mesure de la charge apparente. La charge apparente d'une décharge partielle est la charge qui, si elle était injectée instantanément entre les bornes de l'objet en essais, changerait momentanément la tension entre ses bornes de la même quantité que la décharge elle-même. La valeur absolue de la charge apparente peut être appelée amplitude de décharge.

Lorsqu'une décharge partielle se déclenche dans un endroit indéterminé de l'isolant solide, elle met en circulation une faible quantité de charge. La quantité de charges associée aux impulsions de courant est donnée par la surface décrite par la courbe courant/temps en respectant l'équation 10. L'allure simplifiée de cette courbe est représentée par la figure I.28.

$$q = \int_0^{\infty} I(t) dt \quad \text{I-10}$$

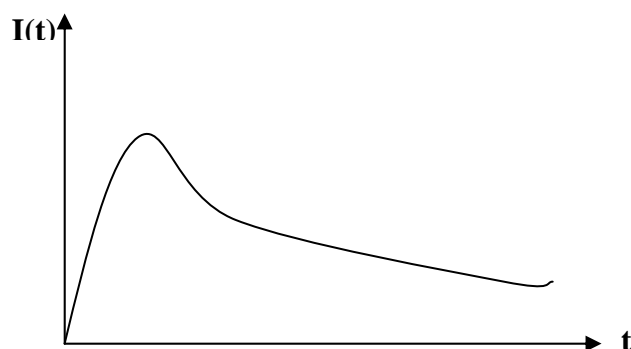


Figure I .28 : *Impulsion de courant associée à la décharge partielle*

Ces impulsions de courant dépendent de l'amplitude de la tension appliquée et des caractéristiques de l'objet à tester. Du point de vue pratique, le courant généré par cette circulation de charge se referme naturellement d'une part dans l'objet sous test (1) et d'autre

part dans le circuit de mesure (2). Détecter le décharge consiste à recueillir la totalité du signal propagé par ce courant de décharge voir figure I.29.

Deux configurations électriques sont utilisables pour réaliser le circuit de mesure des DP. Le choix de la configuration électrique s'effectue en fonction de la possibilité de connecter ou pas l'échantillon à la terre. Le principe reste le même dans les deux cas. La capacité de couplage associée à l'impédance de mesure apparaît comme de très faible impédance à haute fréquence ce qui permet de transmettre la totalité des impulsions électriques liées à la décharge partielle.

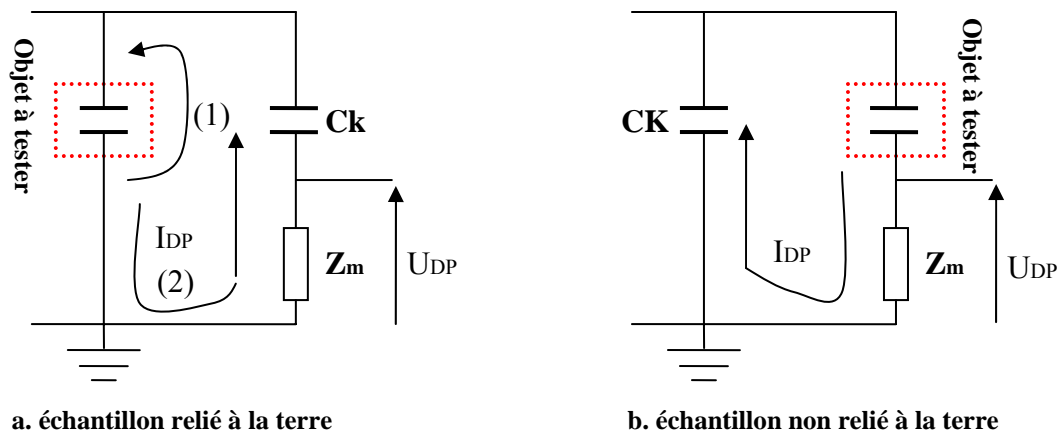


Figure I.29 : Les deux montages possibles pour la mesure des DP

L'appareil en essai peut être un condensateur, un transformateur, un câble, un moteur électrique ou tout autre appareil soumis à un fonctionnement sous tension électrique.

I.4.6 Modèle électrique d'une décharge partielle au sein d'un matériau isolant solide

Le comportement des décharges partielles dans un isolant solide (*Figure I.30*) est décrit par un circuit bien connu [Kre.00, Kre.01]. L'ensemble isolant-défaut peut être modélisé par deux branches en parallèle. Le défaut est représenté par une capacité C_c en parallèle avec un éclateur. L'éclateur est caractérisé par la tension de rupture du gaz occlus dans la cavité. La résistance R_c permet de modéliser le processus transitoire de formation des charges d'espace. Les deux colonnes de diélectrique entre le défaut et les électrodes sont représentées par un réseau (C_b, R_b) . La partie saine d'isolant en parallèle avec le défaut est représentée par le réseau (C_a, R_a) .

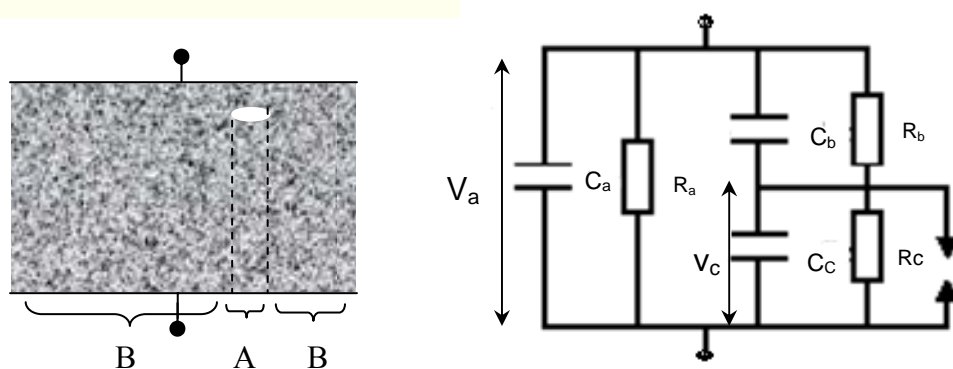


Figure I.30 : Représentation schématique du défaut du diélectrique et du circuit correspondant.

I.4.7 Grandeurs caractéristiques des décharges partielles

L'activité des décharges partielles est caractérisée par les paramètres suivants :

- 1) L'intensité des impulsions électriques liées aux décharges. Cette grandeur est faible et de durée réduite, ces courants sont difficiles à mesurer.
- 2) Le niveau de la tension externe pour produire des décharges partielles. En fait on définit deux seuils qui caractérisent la décharge :

Seuil d'apparition des Décharges Partielles V_{div} (Discharge Inception Voltage) représenté par U_a (figure I.31). C'est la tension seuil à partir de laquelle les décharges sont initiées dans le dispositif expérimental choisi lorsque la tension est augmentée graduellement à partir d'un niveau pour lequel aucune décharge n'est susceptible de se produire.

Seuil d'extinction des Décharges Partielles V_{dev} (Discharge Extinction Voltage) représenté par U_e voir (figure I.31). C'est la tension seuil à partir de laquelle les décharges s'éteignent dans le dispositif expérimental choisi lorsque la tension est diminuée graduellement à partir d'un niveau pour lequel des décharges étaient détectées.

- 3) L'énergie de la décharge (δW) : La décharge dans une cavité peut être assimilée à la décharge d'un condensateur. Elle correspond à la quantité de charges mise en jeu pendant la décharge.
- 4) Le nombre de décharges par cycle de fonctionnement (N/cycle) (sous une tension sinusoïdale).

$$N/\text{cycle} = 4 \left(1 + \frac{\alpha V_{\text{crete}} - V_{\text{DIV}}}{V_{\text{DIV}} - V_{\text{DEV}}} \right) \quad \text{I-11}$$

5) Le temps entre deux décharges successives

$$\Delta t = \frac{V_{\text{DIV}} - V_{\text{DEV}}}{\alpha \frac{\partial V}{\partial t}} \quad \text{I-12}$$

Avec $\frac{\partial V}{\partial t}$ gradient de la tension appliquée et $\alpha = \frac{Cb}{Cb + Cc}$;

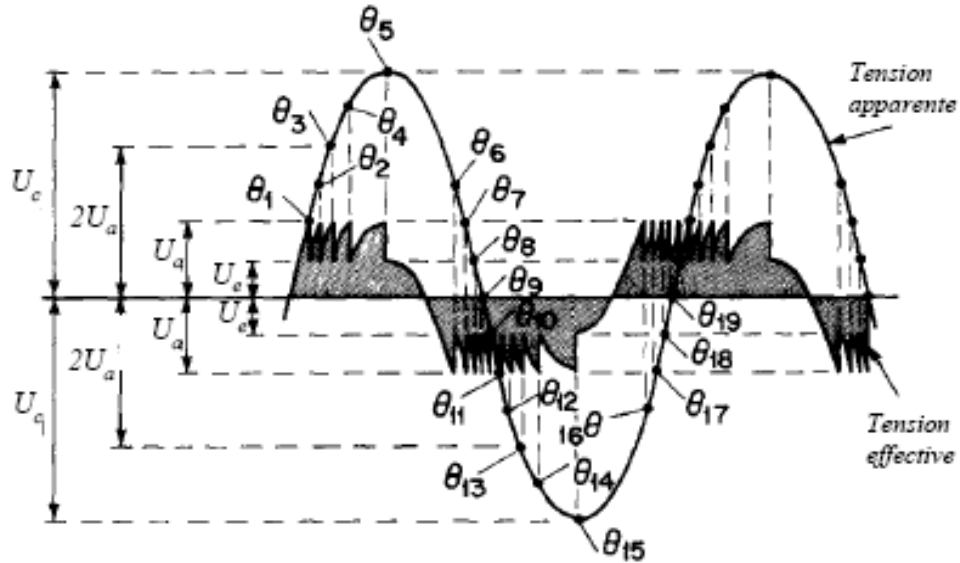


Figure I.31 : Tension aux bornes du défaut en présence de DP

On définit K le coefficient d'érosion du matériau : la résistance du matériau par rapport aux mécanismes de dégradation des DP.

6) Charge apparente :

La variation de charge entraînée par une décharge partielle n'est, en général, pas directement mesurable. On utilise donc la *charge apparente* (q) qui est déduite de la variation de tension qu'entraîne, aux bornes de l'installation, la présence d'une décharge partielle. En effet, lorsqu'une décharge se produit, une quantité de charge libérée se déplace dans l'espace inter électrodes. Ce mouvement de charge de l'isolant induit une baisse de tension aux bornes de la cellule sous test.

$$q = C_b \Delta(V_c) \quad \text{I-13}$$

La charge apparente est affectée par la géométrie des électrodes, par les propriétés intrinsèques du matériau ainsi que par toutes les capacités parasites qui entourent le montage de mesure.

I.5 Du vieillissement électrique à la rupture

L'hypothèse du vieillissement électrique (croissance et/ou apparition de cavités, augmentation de la conductivité...etc), est sensée conduire à la dégradation (arborescence humide, arborescence électrique et décharges partielles) susceptible à son tour de conduire l'isolant à sa mort: rupture diélectrique (rupture thermique, rupture électronique, rupture électromécanique).

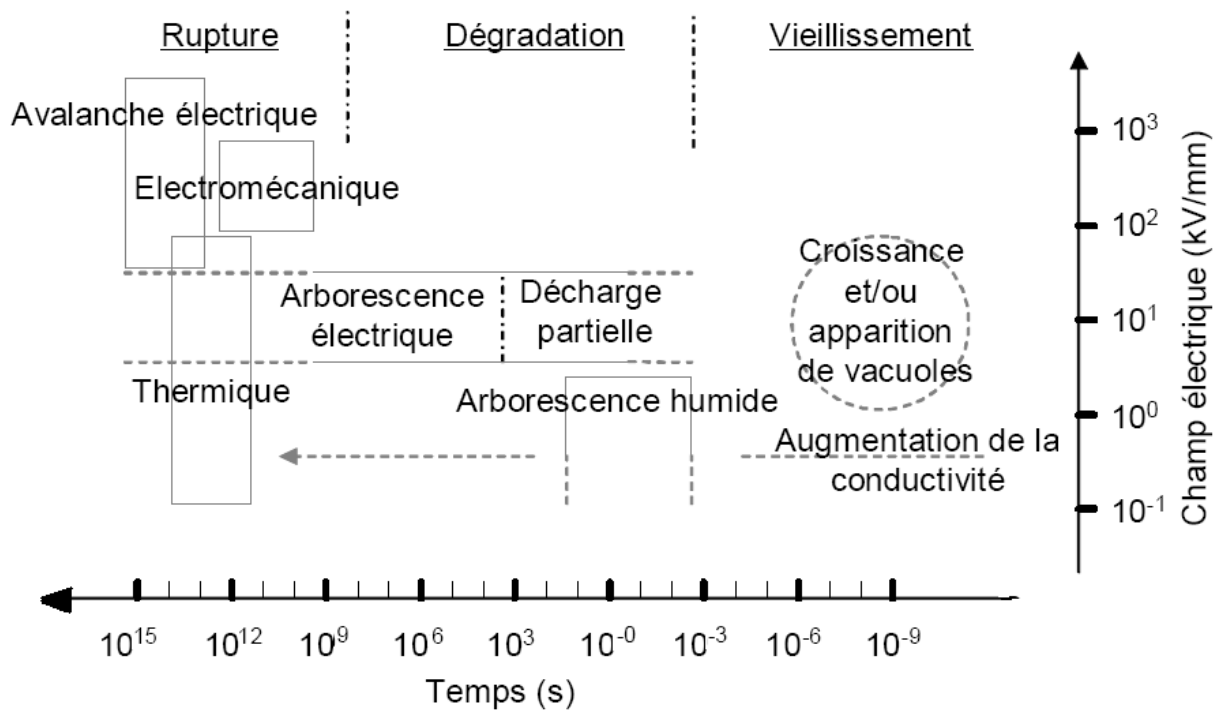


Figure I.32: Synthèse des différents phénomènes de dégradation et de rupture et de l'hypothèse du vieillissement électrique, répertoriés selon le temps et le champ électrique auxquels ils peuvent avoir lieu [Gal.04]

Il est tout à fait concevable que l'isolant soit dans plusieurs états à la fois ou bien encore que certains états en entraînent d'autres: ainsi, un vieillissement électrique qui aurait pour conséquence la création de cavités pourrait entraîner l'apparition de décharges partielles dans un isolant initialement parfait (sans cavités ou trop petites) lesquelles finiraient par constituer des segments ionisés préférentiels pour la croissance d'une arborescence électrique (par percolation) qui s'achèverait par une rupture électronique et/ou thermique dès que les conditions respectives seraient remplies (champs fort, excédant de charges électriques, forte conductivité ionique et instabilité thermique). La Figure I.33, imaginé par Gallot [Gal.04], illustre bien la mort d'une résine époxy à partir de sa phase de dégradation. Elle suppose que des cavités ont déjà été formées ou développées à l'occasion d'un vieillissement électrique. Il s'agit d'une illustration du concept de percolation proposé par R. Lacoste et A. K. Jonscher

[Jon.84]. Ce concept impliquerait que l'arborescence croît de façon préférentielle au travers des zones où se trouvent des cavités en voie d'élargissement par décharges partielles.

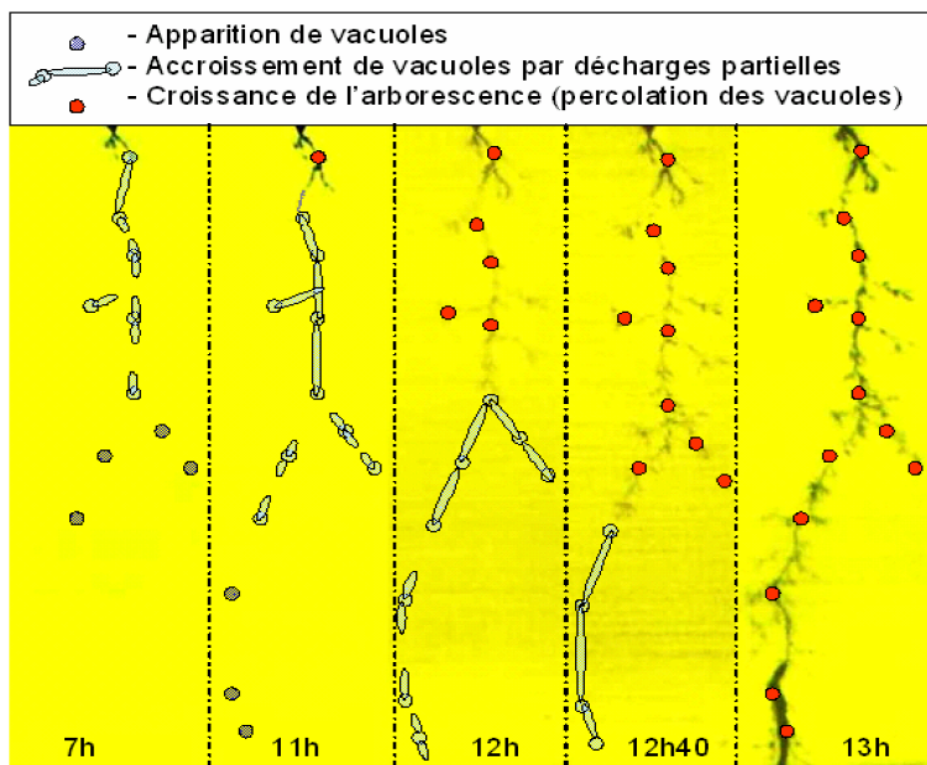


Figure I.33 : Arborescence électrique observée dans le volume d'une résine époxy en configuration pointe/plan (respectivement en haut et en bas) [Gal.04].

I.5.1 Rôle des décharges partielles

La dégradation provoquée par l'activité des DP est essentiellement due à deux processus ; dégradation chimique et érosion mécanique des parois de la cavité par le bombardement d'ions d'azote et d'électrons. Cette érosion est le résultat de la dégradation provoquée par l'action répétée des décharges partielles. En effet, Garton [Gar.62] considère pour le polyéthylène que 10^9 décharges sont nécessaires pour créer des sites d'érosions visibles, dus aux impacts de ces décharges.

L'interaction entre DP dans une cavité et le diélectrique environnant est complexe et beaucoup d'effets ont été identifiés et étudiés. Une partie de la complexité provient du fait que l'état du diélectrique change avec l'activité des DP et en même temps le mécanisme de ces décharges est affecté par le diélectrique vieillissement [Mor.93, Tem.00].

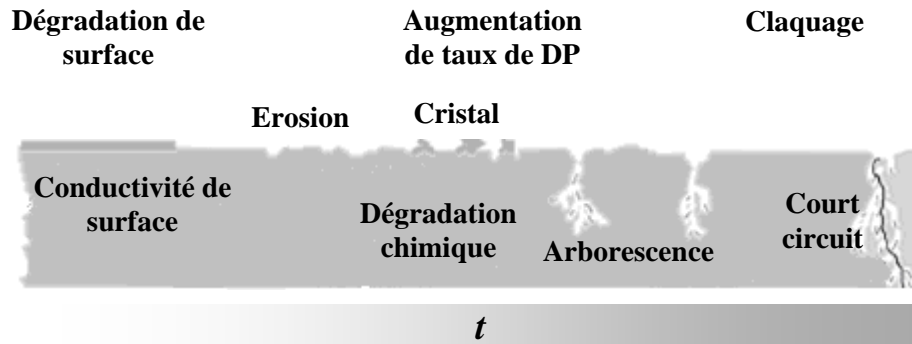


Figure I.34 : Etape de dégradation provoquée par les DP d'après Temmen [Tem.00].

1. La conductivité de la surface de la cavité augmente à cause des processus de réaction entre l'humidité et les composants produit par la dissociation de l'air provoqué par les DP. En effet, beaucoup d'auteurs ont détecté une augmentation de la conductivité de surface après l'initiation des DP [Mor.90,Hud.90]. L'observation de prêt de la surface de cavité montre une couche de liquide ou la présence de gouttelettes.
2. La rugosité de la surface augmente sous l'effet du bombardement de porteur de charge et du dépôt des sous-produits des décharges partielles.
3. Dans un stade avancé les DP mènent à la formation des sous-produits solides (acide oxalique hydraté) qui ont été identifiés [Hud.91].
4. L'augmentation de champ électrique au niveau des pointes d'un cristal conduit à une autre intensification et localisation du processus de DP. Des nouvelles cavités dans ce stade sont observées et par conséquent l'initiation d'un arbre est lancée.
5. Eventuellement, la croissance d'un arbre peut conduire à la rupture.

1.5.1.1 Réaction chimique entre un gaz et un diélectrique solide

Initialement, l'humidité et les produits de la dissociation de l'air jouent un rôle important dans les réactions chimiques. Les réactions chimiques ont comme conséquence les sous-produits gazeux, liquides et solides.

a) Sous produits gazeux

Garcia [Gar.80] a étudié, par des techniques de chromatographie en phase gazeuse, des gaz produits dans une cellule en XLPE vieillie et exposés à l'activité de DP. Une grande quantité de mono oxyde de carbone et dioxyde de carbone a été trouvée et un peu d'hydrogène. Dans une autre expérience la composition gazeuse des arbres électriques dans lesquels les DP se manifestent a été analysée par une méthode spectroscopique.

Les principaux gaz dans cette expérience étaient encore les oxydes de carbone et l'hydrogène de carbone. Ces résultats ont été confirmés par Wolter et autres [Wol.78, Wol.82] qui ont étudié les sous-produits gazeux du polyéthylène de faible densité exposé aux décharges de couronne. Les produits principaux se sont avérés hydrogène, mono oxyde de carbone, méthane et dioxyde de carbone. La formation de l'hydrogène s'est avérée le résultat direct de l'interaction entre le polymère et l'énergie radiative de la décharge. L'oxydation des fragments des chaînes de polymère mène à la formation des oxydes de carbone.

b) Sous produits liquides

Le dépôt des sous-produits liquides a été rapporté par beaucoup d'auteurs, principalement pour le polyéthylène [Mor.91A,Mor.91B,Dej.92,Gol.95,Mor.95] et époxyde [Chr.85,Hud.92,Hud.93,Hud.94,Hud.95]. Gamez-Garcia et autres [Gar.87] ont prouvé que des gouttelettes ont été formées sur la surface de XLPE seulement quand une atmosphère contenant l'eau et de l'oxyde de carbone. Les gouttelettes se sont avérées un mélange des composés organiques simples, comme les acides formiques, acétiques et carboxyliques. Morshuis a prouvé que si un des constituants H, C ou O est absent, les gouttelettes n'apparaissent pas [Mor.95].

Hudon [Hud.95] a examiné les gouttelettes liquides, qui se forment sur une surface époxyde après activité de DP. La nature de ces gouttelettes est avérée acide et avec du glycolate de chromatographie d'ion, le glucolate et le formiate ont été détectés.

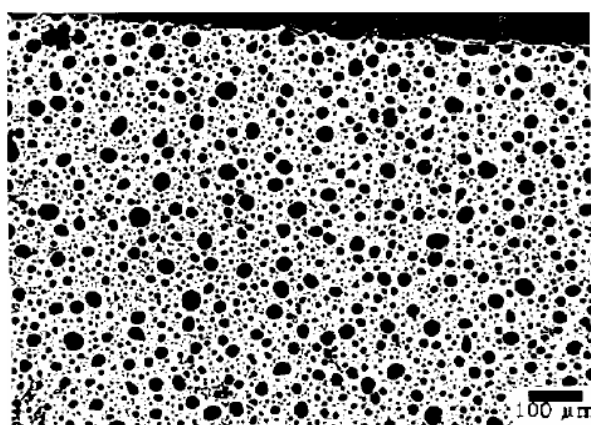


Figure I.35: *Gouttelettes couvrant la surface de l'époxyde après activité des DP [Hud.90].*

Un des effets principaux de la formation des sous-produits liquides est la forte augmentation de la conductivité des parois de la cavité. Ceci est provoqué par le fait que des produits de dégradation sont dissous dans l'eau et créent une couche électrolytique acide.

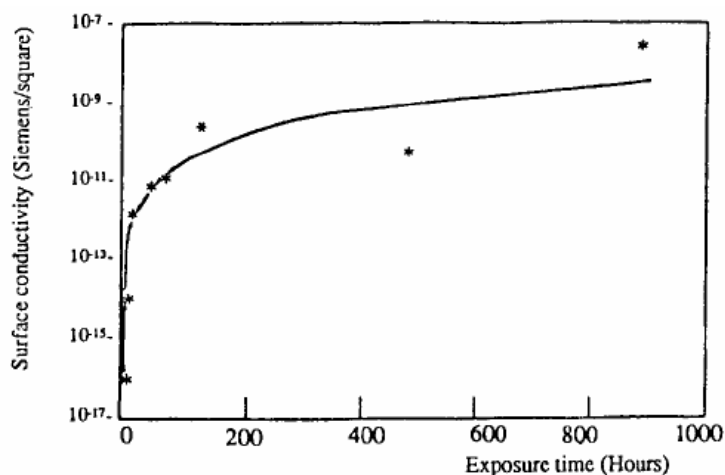


Figure I.36: Conductivité de la surface époxyde en fonction de la durée d'activité des DP's [Hud.93].

c) Sous produits solides

Après quelques centaines d'heures d'activité de décharges partielles des dépôts locaux des sous-produits solides sont trouvés. Ces sous-produits apparaissent sous forme de cristaux qui ont été identifiés en tant qu'acide oxalique hydraté ($C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$) par Hudon et autres [Hud.91] pour époxyde. Sur le schéma un exemple est montré des cristaux observés en cas de polyéthylène.

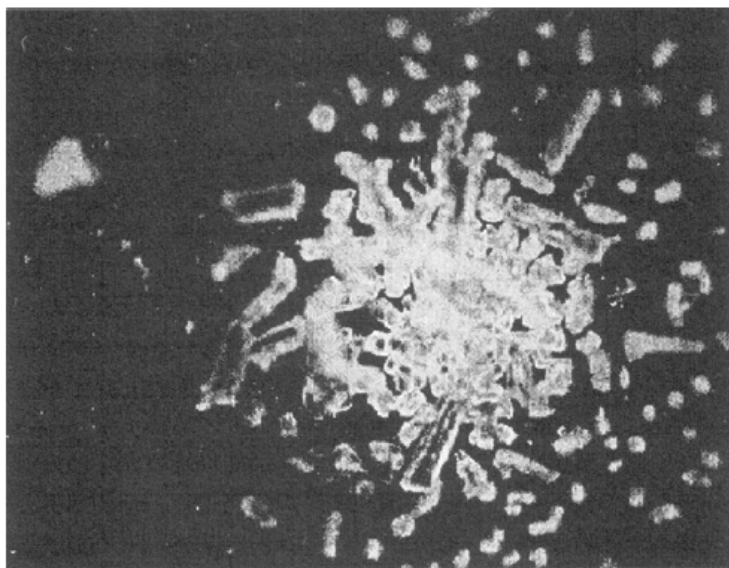


Figure I.37: Faisceau des cristaux après 100 h d'activité de DP's dans une cavité en polyéthylène [Mor.93]

Il s'est avéré que des cristaux apparus seulement dans une atmosphère en laquelle H, C et O étaient présents [Wol.78]. Il est évident que les gouttelettes déposées en une première phase sont cristallisées comme impact de DP's. [Mor.93, Fou.95, Hol.92].

Hudon a étudié la dégradation possible du matériel [Hud.94] au-dessous de la surface d'un échantillon en époxyde. Il a trouvé une région colorée jaune foncée de 300µm de profondeur. Quelques canaux fins se sont avérés. Il n'était pas possible de confirmer si les canaux étaient des arbres électriques ou un résultat de la perforation de l'échantillon.

1.5.1.2 Localisation des DPs

Initialement, dans une cavité vierge, les DPs n'ont aucun point préférentiel d'impact si nous supposons qu'il n'y a aucune aspérité sur la surface de la cavité et que la cavité est de forme sphéroïdale aplatie aux pôles avec un champ uniforme à l'intérieur. Ceci est confirmé par les enregistrements visuels qui ont été faits du processus de DPs dans une cavité [Mor.93].

Quand des aspérités comme les cristaux apparaissent, le champ local sera renforcé dans ces régions et le phénomène de DPs est plus accentué.

1.5.1.3 Initiation d'arborescences

Sous un champ de service, de nouveaux défauts se créent dans l'isolant par décharges partielles à partir des défauts initiaux (cavités). Par conséquent, une augmentation de la densité de charges au sein de l'isolant s'établit par polarisation. Après une certaine durée et sous l'action du champ électrique, les défauts se regroupent. Les porteurs de charges (les électrons) vont alors voir leur libre parcours moyen augmenter de plus en plus, et par conséquent, ils acquièrent plus d'énergies. Ces porteurs seront par la suite susceptibles de produire des défauts de dimensions plus importantes ; ainsi une arborescence commence à se développer [Shi.98].

Dans une cavité de forme étroite, ces conditions sont toujours remplies. Pour des cavités de formes plates, la croissance des aspérités est localisée dans les régions de forte activité de DPs ce qui donne une grave dégradation de ces régions.

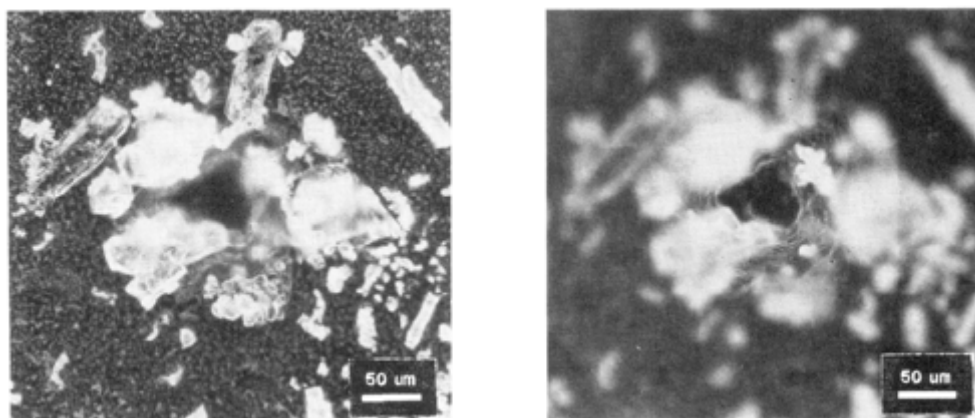


Figure I.38: *Formation des cristaux sur la surface d'une cavité. [Mor.93].*

Maintenant, des puits pointus ont été observés, augmentant le champ électrique dans l'isolation et lançant un arbre électrique. Pour les cavités plates c'est confirmé, par des mesures optiques, que la croissance d'arbre commence toujours à proximité directe des cristaux.

Garcia Colon [Gar.88], employant les sondes micro charge, a constaté qu'au niveau de ces puits une forte injection d'électrons a lieu. Ceci soutient la théorie qu'à partir de ces puits un processus d'arborescence peut commencer. Dans l'opinion des auteurs il n'y a aucun rapport concluant portant sur l'effet de la température sur le vieillissement induit par les DP, et cela avant le déclenchement d'une arborescence électrique.

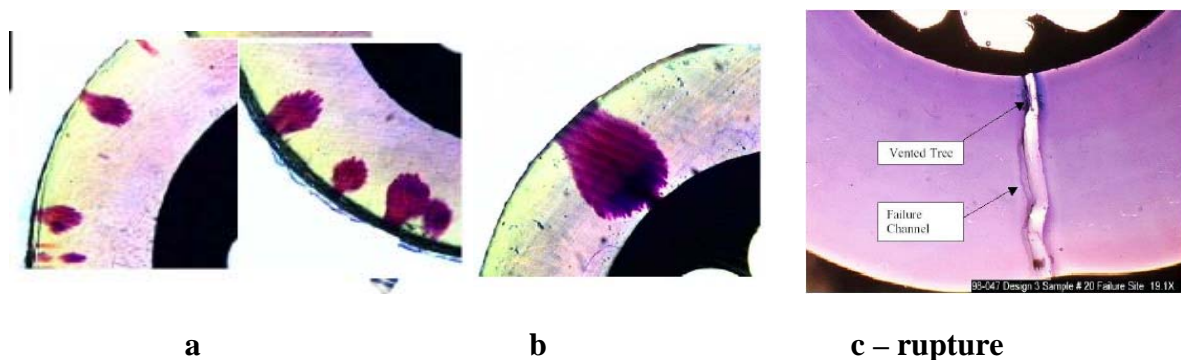


Figure I.39 : *formation des arborescences dans un isolant*

Les arborescences sont des chemins de conduction électrique dans la partie isolante et qui se manifestent sous forme d'arbre. Ce n'est qu'après un temps de gestation, appelé aussi temps d'incubation, plus au moins long que les arborescences se manifestent. Le temps d'incubation dépend de la nature du défaut d'où elle est issue.

On distingue trois phases dans l'évolution du phénomène d'arborescence [Vah72, Lau79] :

- la phase de formation
- la phase de propagation qui est toujours accompagnée de décharges partielles.
- la phase de claquage qui se produit rapidement lorsque les branches de l'arbre traversent complètement la couche isolante. (Figure I.37 c)

I.5.2 Nano-structure et résistance contre les DP

Les recherches sur les nano structures des diélectriques et la résistance envers les DP sont très récentes [Koz.04A,Koz.04B,Tan.04]. Il semble que quelques combinaisons de nano filler et de diélectrique améliorent remarquablement la résistance aux DP.

Il a été montré que l'introduction de 2-5% de nano filler dans un polyamide a fortement réduit l'augmentation de la rugosité de la surface provoquée par DP. [Koz.04A,Koz.04B, Koz.03, Koz.04C, Tan.05].

I.5.3 Interaction entre DPs et contrainte mécanique

Il a été montré pendant quelques années que les contraintes mécaniques ont un effet sur le processus de vieillissement induit par DPs, les contraintes de tractions accélèrent la croissance des arborescences alors que les contraintes de compression la retardèrent [Gha.04]. Mécaniquement la précontrainte de l'isolation peut certainement avoir un effet bénéfique sur la résistance d'isolation aux DPs. L'effet des contraintes mécaniques sur l'activité des DPs est souvent négligé et mérite encore plus d'attention.

I.6 Conclusion

Le développement des isolants solides, notamment les polymères s'est accompagné d'un intérêt grandissant pour la compréhension et la prévision des phénomènes qui conduisent au claquage des appareils. Cependant, beaucoup de phénomènes physiques intrinsèques et fortement liés contribuent à la fragilisation de ces matériaux. En effet, les charges électriques qui peuvent être transportées (phénomène de conduction) peuvent aussi être piégées. Dès lors, le comportement de ces charges conduit à la formation de défauts et au vieillissement et dégradation électrique de l'isolant.

Lors du fonctionnement de l'isolant de très faibles quantités de gaz se trouvent souvent emprisonnées dans ces défauts formant ainsi des cavités de formes et de dimensions très diverse dont l'accès aux caractéristiques (dimension, pression, nature du gaz, température,..) est difficile. Ces facteurs associés aux charges électriques font que des décharges partielles apparaissent.

A de leur tour, les décharges partielles induisent différents phénomènes (dans l'environnement voisin du défaut) tel que : augmentation de la température, existence d'émission sonore, apparition de rayons UV, apparition des contraintes mécaniques....etc. A ce stade l'isolant sera siège de multiples phénomènes de vieillissement dont le plus important est l'apparition des arborescences.

Chapitre II

IDENTIFICATION PAR SIMULATION DE QUELQUES FACTEURS INFLUENCANT LES DECHARGES PARTIELLES

Introduction

Afin de mieux appréhender l'influence des défauts sur le phénomène des décharges partielles, plaçons-nous dans le cas de l'isolation synthétique utilisée dans les câbles de transport d'énergie haute tension. L'étude des distributions de champ électrique, notamment la valeur maximale, dans et autour du défaut, a un intérêt considérable pour qualifier les phénomènes des DPs.

En effet pour situer le problème de l'influence des caractéristiques d'une cavité sur le phénomène des décharges partielles, il est important de déterminer l'influence de la cavité elle-même sur la distribution des contraintes électrique et thermique. Une cavité est caractérisée par sa taille, sa forme géométrique, sa position, son orientation par rapport aux lignes de champ ainsi que sa présence ou pas avec d'autres cavités.

Cependant, si on doit tenir compte de tous ces paramètres, en envisageant une étude qui traite tous les cas qu'on peut imaginer de se produire dans l'industrie, ce serait quasiment impossible du point de vu pratique, aussi les solutions analytiques de l'équation de Laplace sont très difficiles, vu que l'isolant solide présente des hétérogénéités. A cet effet, les méthodes numériques s'avèrent plus adéquates pour résoudre de tels problèmes. Toute fois, ces méthodes nécessitent des moyens pour réduire les temps de calcul et améliorer la précision des résultats. De nos jours, des logiciels très performants ont été établis comme plate forme pour résoudre des problèmes physiques aux conditions et aux limites par la méthode des éléments finis, tel que Ansys, Flux 3D, Algor, Comsol Multiphysics.

Une modélisation par un schéma électrique équivalent pourrait apporter une contribution aux études relatives à la détection des décharges partielles. En effet Germant et Philipoff ont proposé un circuit modélisant l'effet d'une cavité présente dans un défaut. Le modèle, appelé modèle ABC, a été développé par Whitehead. [Kre.00, Kre.01]. Dans notre étude, en simulant le circuit électrique équivalent par simulink, nous essayerons d'étudier l'activité des décharges partielles dans le défaut en fonction des paramètres du circuit.

II.1 Constitution et caractéristiques du câble

La figure suivante montre bien un schéma de configuration classique d'un câble.

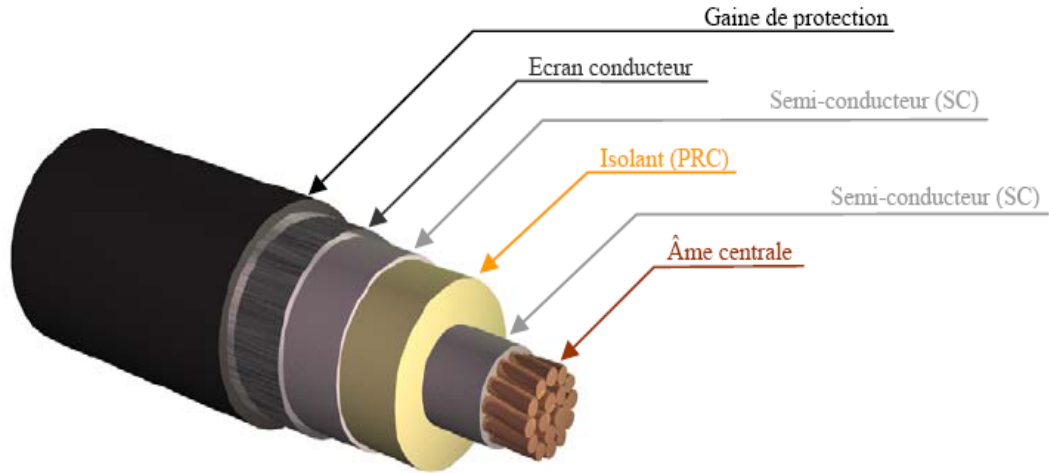


Figure II.1 : Représentation d'un câble de transport

L'âme centrale conductrice est composée de plusieurs conducteurs habituellement en cuivre ou en aluminium. Autour de cet ensemble de conducteurs se trouve un matériau semi-conducteur (SC) destiné à homogénéiser le champ électrique à l'interface entre le semi-conducteur et l'isolant. Puis, se trouve la partie essentielle qui est le matériau isolant. Dans notre exemple, ce dernier est un polyéthylène haute densité (PEHD). Le tout ainsi formé est recouvert d'une seconde couche de matériau semi-conducteur. L'ensemble est recouvert d'un écran conducteur relié à la terre, dont le rôle est multiple : il sert de blindage afin d'empêcher la propagation du flux électromagnétique, il assure également le retour du courant en cas de court-circuit, et il permet aussi d'éviter l'intrusion d'humidité. La dernière couche est une gaine de protection qui est généralement faite à partir de polyéthylène haute densité. Sa fonction est double: elle isole l'environnement de la partie conductrice extérieure et elle protège le câble des agressions extérieures telles que la corrosion ou bien l'usure mécanique.

Habituellement, la fabrication des câbles haute tension se fait en co-extrudant l'ensemble des trois couches SC/PRC/SC sous forte pression, de façon à obtenir un matériau le plus homogène possible et surtout exempt de cavités.

L'isolation du câble est en polyéthylène haute densité. Les caractéristiques physiques du câble choisi, sont présentées dans le tableau suivant :

Valeur efficace de la tension nominale	12 kV
Rayon de l'âme	3 mm
Epaisseur de la couche S/C sur l'âme	1 mm
Epaisseur de l'enveloppe isolante	7 mm
Epaisseur de la couche S/C sur l'isolant	1 mm
Ecran métallique	20x0.1 mm
Epaisseur de la gaine de protection en PVC	2.5 mm
Facteur de pertes diélectriques	$4 \cdot 10^{-3}$
Conductivité électrique	$10^{-12} \Omega \text{ cm}^{-1}$
Conductivité thermique	0.286 W/(m.°K)
Chaleur spécifique	2.08 J/(cm ³ .°K)

Tableau II.1 : *Caractéristiques physiques du câble utilisé*

II.2 Présentation du Logiciel Comsol Multiphysics

Comsol Multiphysics est basé sur les équations aux dérivées partielles (EDP). Ce sont les équations qui décrivent la majorité des phénomènes physiques. Le logiciel traduit n'importe quel système d'EDP couplées en une forme adéquate pour son analyse numérique et le résout en utilisant la méthode des éléments finis, associée à des solveurs.

Pour des systèmes complexes, avec une simulation réaliste, Comsol Multiphysics prend en compte les couplages entre différents phénomènes physiques dans un seul modèle. Le logiciel offre une interface unique avec tous les outils nécessaires à l'implémentation et à la résolution de modèle. Comsol Multiphysics utilise les nouveaux microprocesseurs 64 bits pour traiter des problèmes de taille encore plus importante. Les solveurs sont extrêmement performants ; ils résolvent des modèles de dix millions de degrés de liberté. Leur vitesse et leur précision sont au meilleur rang des benchmarks indépendants.

La génération des maillages est automatique et interactive. Combiné avec une variété d'éléments d'ordre élevé, il conduit à une excellente précision numérique, pour laquelle Comsol Multiphysics est une référence. Le maillage mobile est traité de façon élégante et efficace par la méthode ALE. Il est directement utilisable pour modéliser les couplages multiphysiques de dispositifs en rotation.

II.3 Etapes de travail concrètes appliquées pour le calcul du champ électrique dans un câble de haute tension

Dans cette étude nous traitons essentiellement la résolution numérique de la distribution du potentiel, de la température et du champ électrique le long d'une isolation hétérogène d'un câble unipolaire de 12 kV comme valeur efficace de tension nominale. L'épaisseur de la couche d'isolateur est de 7 millimètres. Les dimensions de ce câble permettent l'établissement d'un champ électrique de valeur maximale de 3,11 kV/mm, valeur qui est loin d'être critique à la rupture diélectrique du câble [Seg.01]. Ce câble est souterrain, donc soumis à la température interne du sol. Cette température qu'on estime en moyenne égale à 288°K, constitue la première condition aux limites du câble. La seconde condition est la température créée au sein de la partie conductrice du câble par effet Joule. Elle est estimée égale à 363°K.

II.3.1 Navigateur de modèle

Les différentes physiques sont disponibles dans le Navigateur de modèles comme le montre la figure II.2.

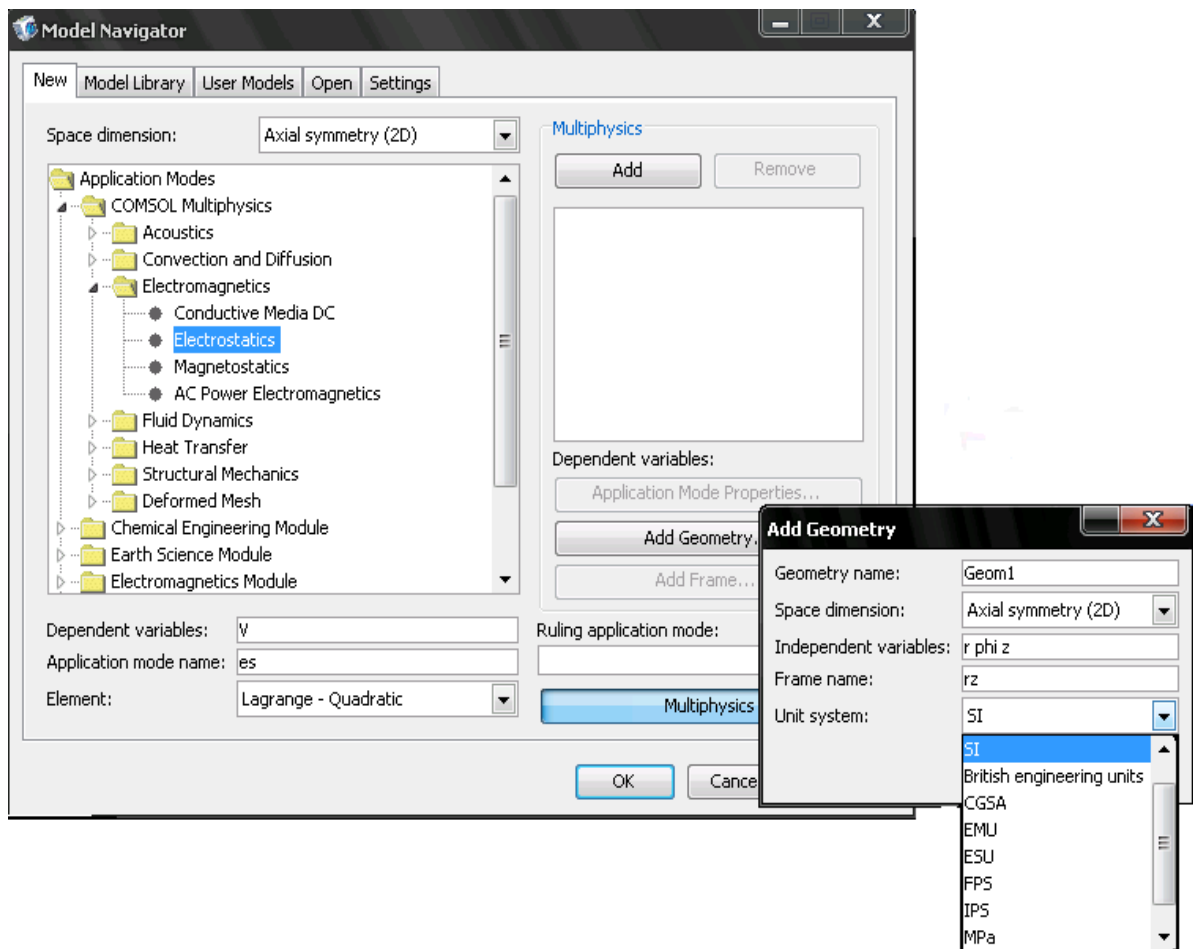


Figure II.2 : Interface du choix du système physique

Il suffit de sélectionner un nombre arbitraire d'équations pour construire un modèle multiphysique, ou bien choisir une application multiphysique prédéfinie. Avec cette interface débute la modélisation et la définition des paramètres globaux : module, physique en jeu, dimension de l'espace, système d'unités, ainsi que la langue de l'interface graphique.

Le navigateur de modèle nous permet également de démarrer ou d'ouvrir un modèle déjà construit, ou un exemple de la bibliothèque de modèles. Les modules fournissent la terminologie, les bibliothèques matériaux, les solveurs, les éléments spécifiques et les outils de post-traitement appropriés à un domaine donné. Dans notre étude, nous avons choisi le module électromagnétisme. Il couvre l'électrostatique, la magnétostatique, et l'électromagnétisme en régime quasi-statique, avec des possibilités de couplage illimitées. En effet, dans notre cas, nous aurons besoin de revenir au navigateur pour ajouter le module transfert de chaleur par conduction. Le modèle est en mode électrostatique couplé avec le mode transfert de chaleur, en trois dimensions à symétrie axiale.

Le calcul du champ électrique se fait par la résolution des équations couplées (II.1) et (II.2), ceci revient à résoudre numériquement l'équation de Laplace et l'équation thermique de Wagner :

$$-\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla V) = 0 \quad \text{II-1}$$

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - k \cdot \Delta T = (\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \text{tg} \delta + \sigma) \cdot E^2 \quad \text{II-2}$$

$\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \text{tg} \delta \cdot E^2$: chaleur produite par les pertes diélectriques
σE^2	: chaleur produite par les pertes de conduction
$k \cdot \Delta T$: chaleur dissipée
$C_v \frac{\partial T}{\partial t}$: chaleur emmagasinée
$\text{tg} \delta$: facteur de pertes diélectriques
C_v	: chaleur spécifique
K	: conductivité thermique
σ	: conductivité électrique
ε_0	: permittivité électrique du vide
ε_r	: permittivité électrique relative
T	: température
t	: temps
Δ	: l'opérateur Laplacien

II.3.2 Construction de la géométrie

Dans cette étape, on dessine l'objet à l'aide des outils qui s'affichent dès que l'on clique sur menu **Draw**. Pour bien expliquer les étapes du travail, nous allons présenter les démarches principales utilisées dans notre étude.

Dans le menu **Draw** on choisi « **Work plane setting** » pour tracer deux cercles ; le premier est de 3.5 mm de rayon et le deuxième est de 10.5 mm. Ensuite on sélectionne les deux cercles et puis on clique sur bouton **Difference** ; cela nous permet d'avoir une géométrie en deux dimensions qui représente la partie isolante du câble. Afin de passer à la géométrie en trois dimensions on utilise l'option **Extrude**, tout en précisant l'épaisseur de notre volume. Dans une dernière étape on trace un cube de dimension suffisante pour inclure notre nouvelle géométrie et puis on clique sur le bouton **Intersection**. On obtient à la fin, comme le montre la figure II.3, notre domaine d'étude qui représente un tronçon de la partie isolante. Notons bien ici que notre domaine présente une symétrie axiale selon l'axe Z et l'axe X. Pour cette raison notre domaine d'étude est limité.

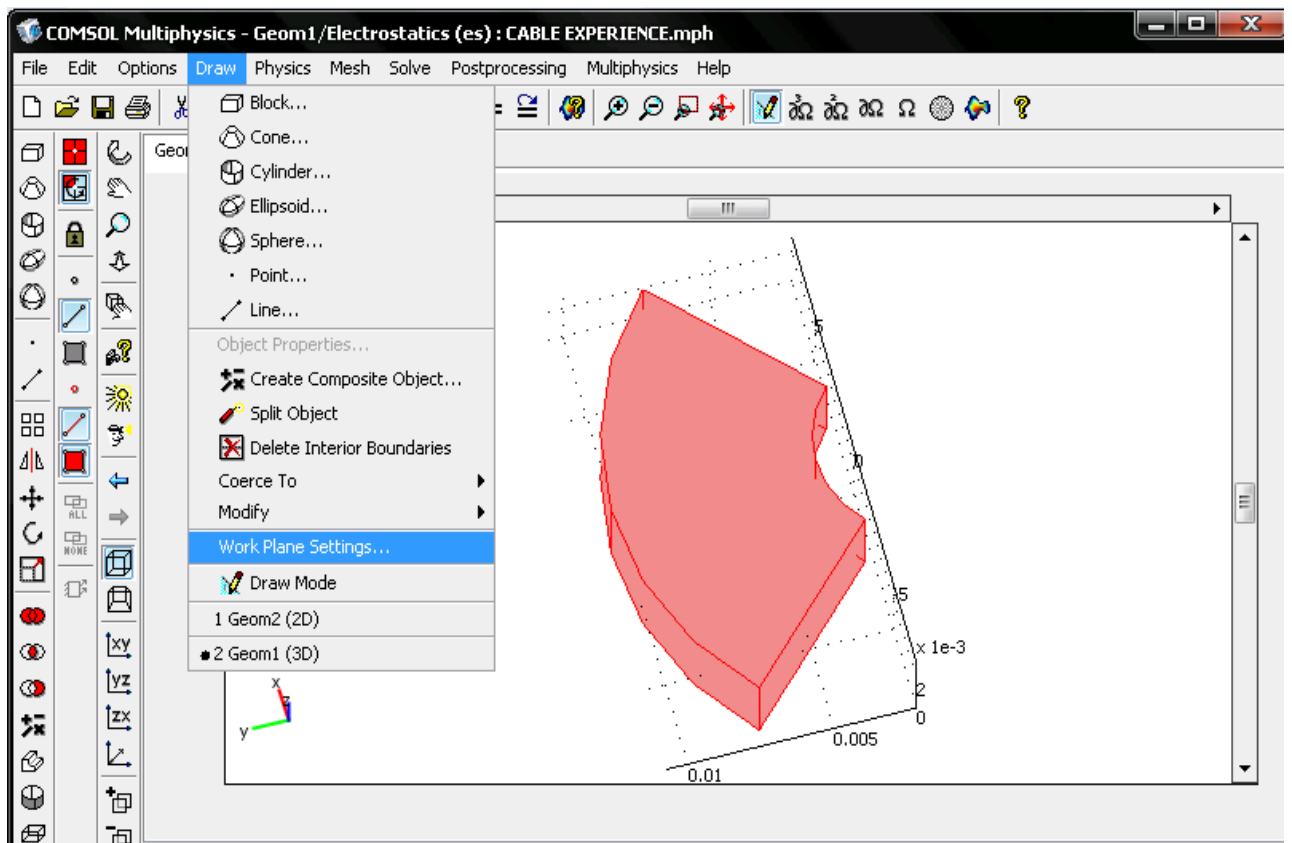


Figure II.3 : Construction de la géométrie en trois dimensions

Pour créer un défaut, on insère une sphère de dimension de l'ordre de micro-mètres dans le volume du domaine d'étude et dans la position désirée. Cependant, on obtient deux sous domaines: isolant et cavité.

II.3.3 Introduction des caractéristiques physiques

Une étape très importante consiste à introduire les caractéristiques physiques montrées dans le tableau II. Cela est possible par un simple clic, comme le montre la figure II.4, sur *Subdomain Setting*.

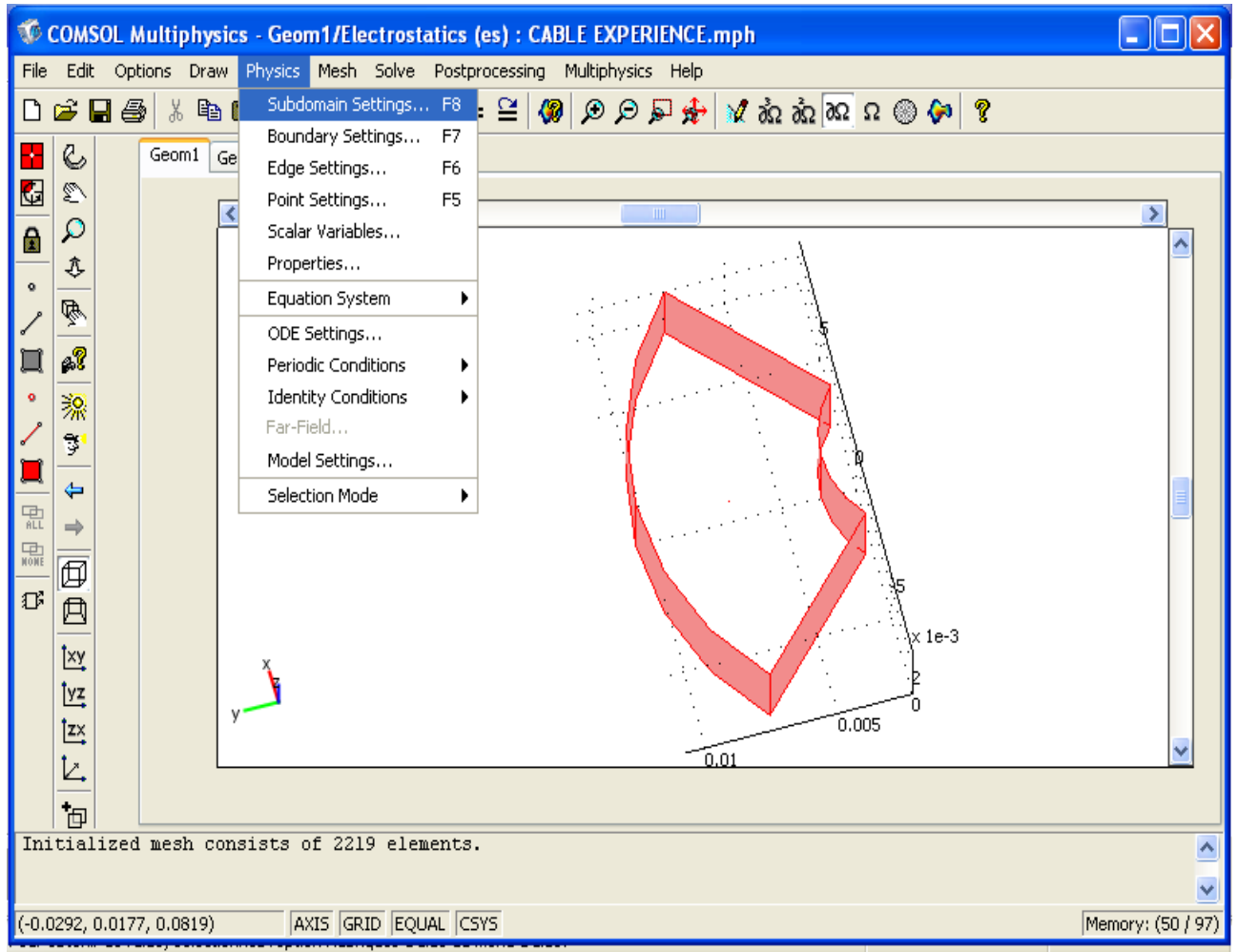


Figure II.4 : *Introduction des caractéristiques physiques*

Nous introduisons les caractéristiques physiques pour les deux sous domaines à savoir défaut et partie isolante. Nous aurons besoin de balancer de choisir aussi mode Transfert de chaleur pour introduire les propriétés thermiques de chaque sous domaine. De la même façon on peut introduire les conditions aux limites pour chaque mode; électrostatique et transfert de chaleur.

II.3.4 Maillage

Le maillage est une étape essentielle pour les méthodes basées sur le principe des éléments finis. Elle consiste à la génération automatique du maillage ainsi que le contrôle interactif de la taille des mailles sur les arêtes, les surfaces et le volume.

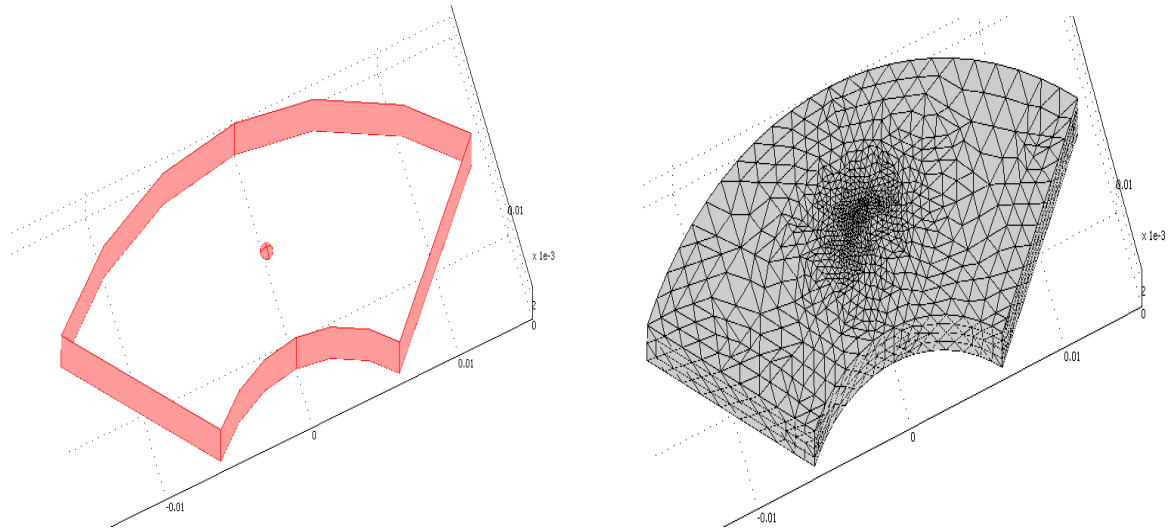


Figure II.5 : *Maillage du domaine d'étude*

La grille de mailles est constituée d'environ 152000 éléments tétraèdres. En raison de la nature de la géométrie, la grille est soigneusement choisie au lieu d'un maillage aléatoire. Dans notre cas nous avons un trop fort rapport d'aspect (défauts de dimension micrométrique) Cependant nous avons deux possibilités pour résoudre le problème de maillage.

1. utiliser un maillage extrudé. Représenter la géométrie en deux dimensions puis la mailler. On peut indiquer les hauteurs d'extrusion (qui définissent les épaisseurs des couches dans la géométrie en trois dimensions), ainsi que le nombre de mailles par couches.
2. mailler en utilisant la "resolution of narrow regions". Cette option est disponible dans le menu Mesh. Lorsqu'elle vaut 1 cela signifie que les mailles sont isotropes dans les régions étroites. Si on introduit la valeur 0.1, cela signifie que les mailles de ces régions seront 10 fois plus allongées qu'épaisses ce qui permet un maillage beaucoup plus raisonnable.

II.3.5 Résolution et post-traitement

Cette dernière étape nous permet de lancer la résolution du problème après avoir bien choisi le type du solveur ainsi que ses paramètres du solveur. Elle nous permet également la visualisation interactive de n'importe quelle variable en fonction de l'espace et du temps.

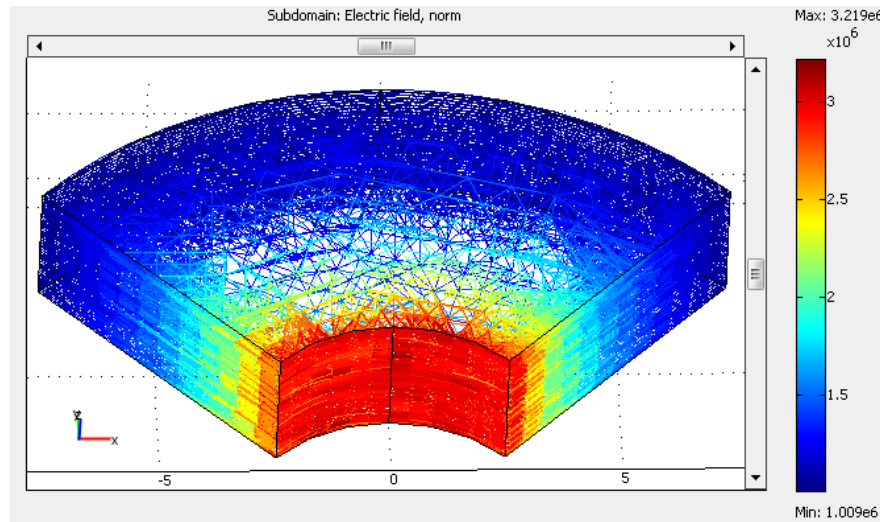


Figure II.6 : *le modèle dans le mode post-traitement*

II.4 Démarche de calcul

Afin de qualifier le phénomène d'apparition des décharges partielles, il est important de calculer les contraintes électrique et thermique dans la partie isolante qui contient des défauts. Le gaz contenu dans un défaut est supposé de l'air, donc un gaz unipolaire. Les calculs des contraintes électro-thermique seront effectués pour différentes tailles, différentes positions ainsi que différentes formes du défaut dans la partie isolante du câble.

En réalité, l'isolant du câble contient une densité de défauts de l'ordre de 10^3 à 10^6 défauts/mm³. Nos calculs peuvent être appliqués à ce cas, dans l'approximation où les défauts n'interagissent pas mutuellement. Dans une autre partie un calcul traite l'influence mutuelle de deux défauts pour s'approcher de la réalité. A la fin nous avons consacré une partie du calcul à l'apparition des décharges partielles.

II.5 Calcul des contraintes électrothermique dans le cas sans défaut

C'est le cas où l'isolant ne contient aucun défaut. Ce cas nous permet, dans une première étape, de valider le résultat de calcul analytique. Les calculs analytiques sont effectués selon les équations suivantes :

$$V(r_i) = \frac{V_N}{\ln\left(\frac{R_t}{r_c}\right)} \cdot \ln\left(\frac{R_t}{r_i}\right) \quad \text{II-3}$$

$$E(r_i) = \frac{V_N}{r_i \ln\left(\frac{R_t}{r_c}\right)} \quad \text{II-4}$$

$$T(r_i) = T_c - (T_c - T_s) \frac{\ln(r_i/r_c)}{\ln(R_t/r_c)} \quad \text{II-5}$$

Les résultats de calcul par le logiciel Comsol montrent que, dans la partie isolante, en partant de l'extrémité de l'âme conductrice, et conformément aux lois analytiques, le potentiel électrique diminue selon une fonction logarithmique et le champ diminue selon une fonction hyperbolique. Les résultats de calcul coïncident avec ceux du modèle analytique.

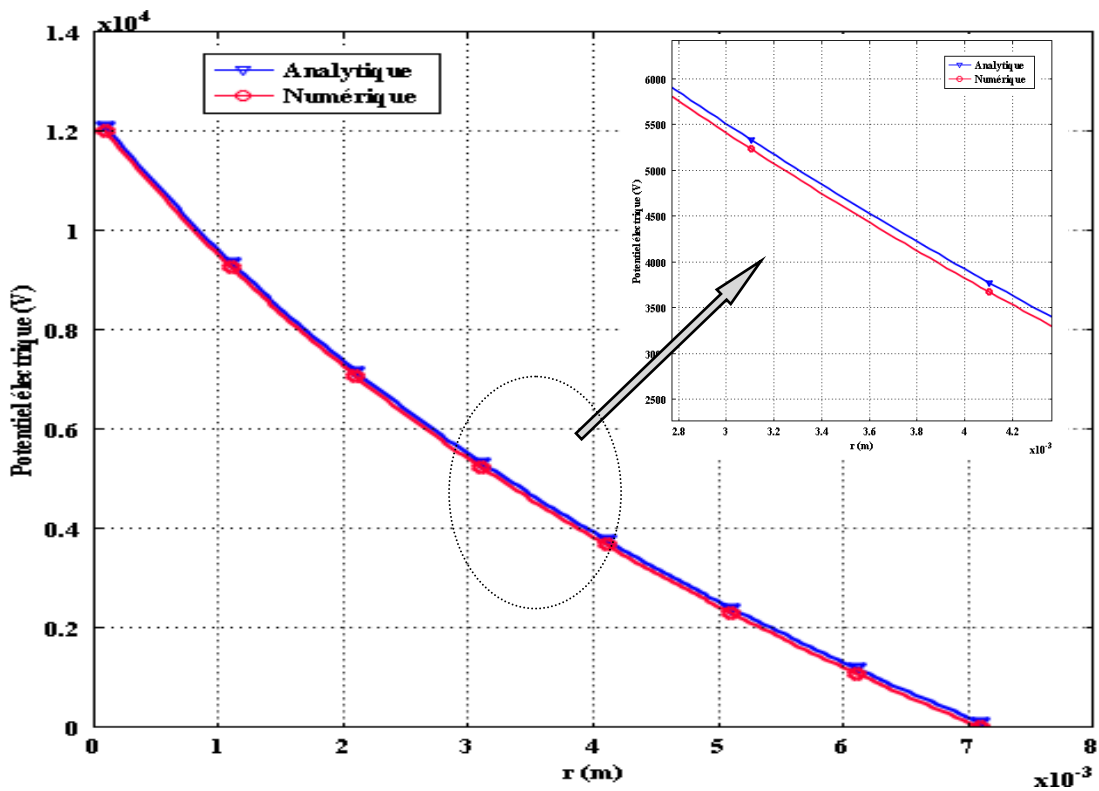


Figure II.7 : Distribution radiale du potentiel

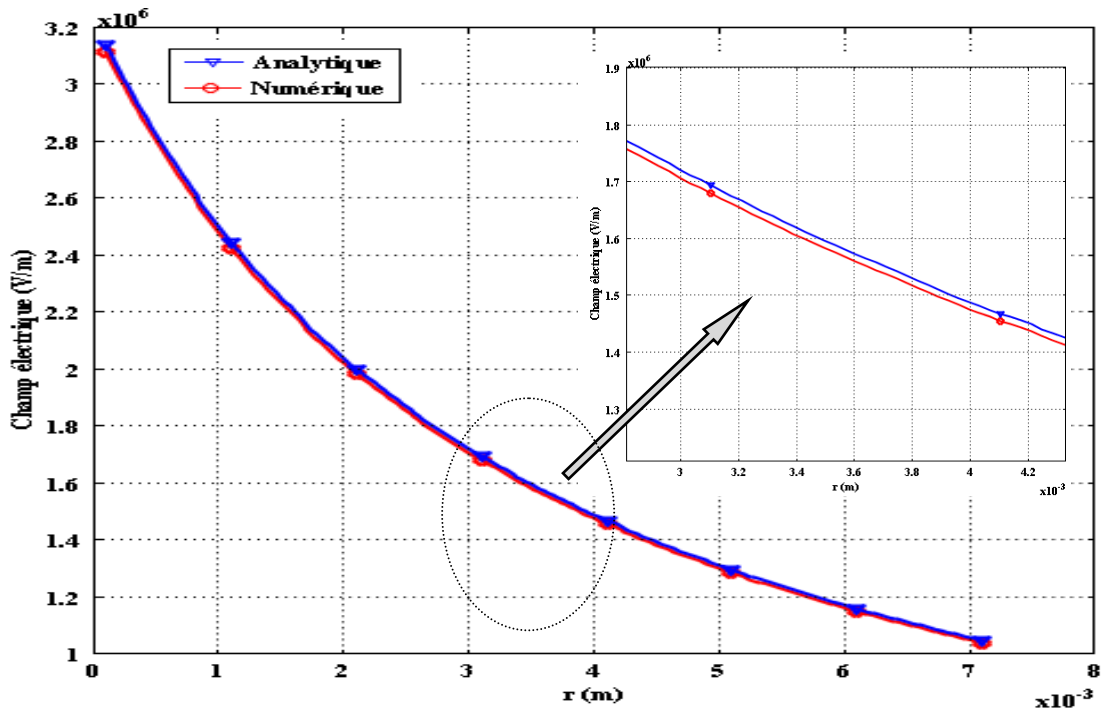


Figure II.8 : Distribution radiale du champ électrique

La figure II.9 montre bien la distribution de la température le long de la partie isolante. Elle montre une décroissance monotone. La solution numérique coïncide avec la solution analytique.

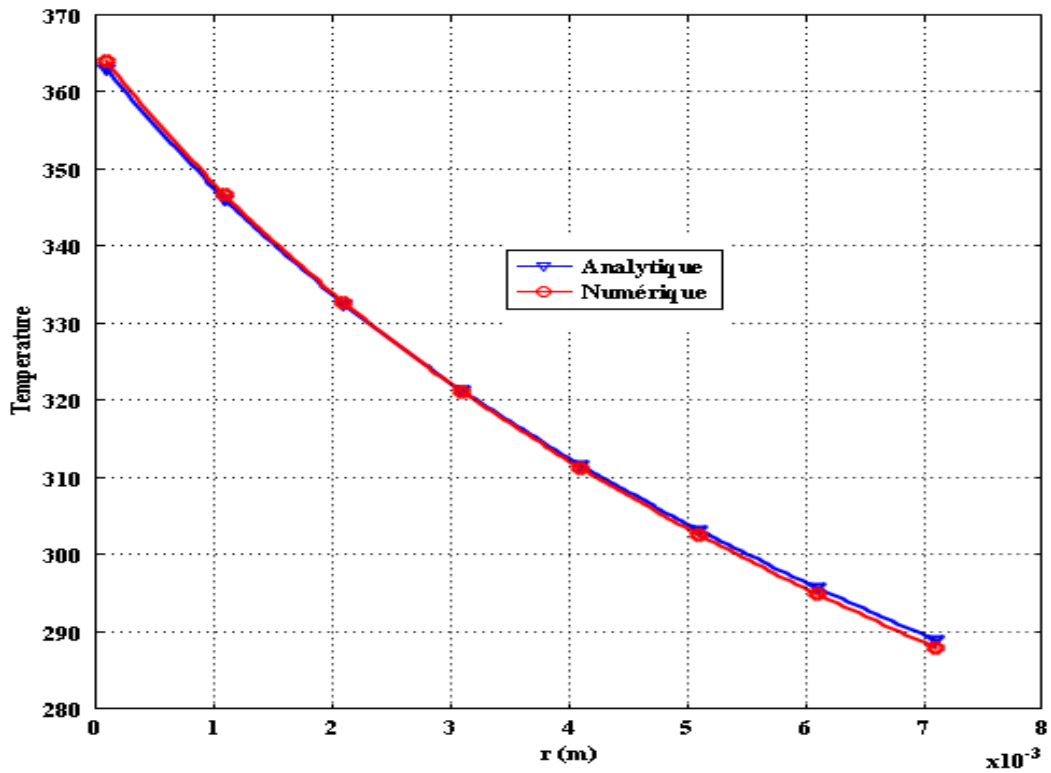
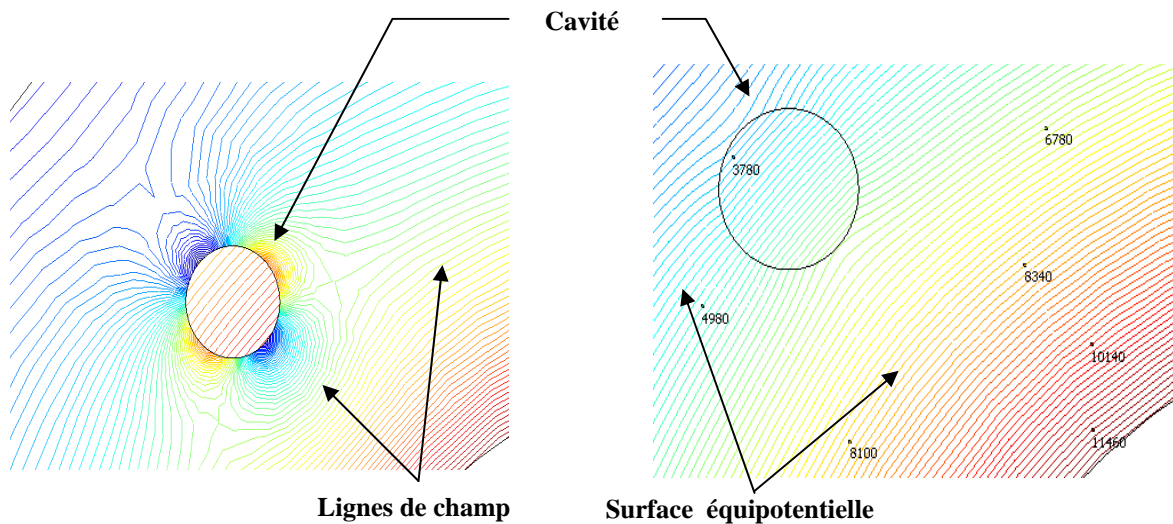


Figure II.9 : Distribution radiale de la température le long de la partie isolante

Si l'on considère les pertes diélectriques et les pertes par conduction (Equation II-2), et selon le résultat obtenu, on peut dire que les pertes dans le cas homogène n'ont aucun effet sur la distribution de la température.

II.6 Calcul des contraintes électrothermiques dans le cas avec défaut

Ce cas (cas hétérogène) simule les parties de l'isolant du câble à faibles concentrations de défauts. On suppose que la partie isolante contient un défaut rempli d'air. Cependant la figure II.10 montre bien que la présence d'un défaut influence la distribution du champ électrique et du potentiel électrique dans la région où elle est localisée. On voit clairement la distorsion des lignes équipotentiels ainsi que les lignes de champ autour du défaut.



a- Lignes iso-valeur du champ

b- surfaces équipotentiels

Figure II.10 : Effet de la présence d'un défaut de 20 micron de diamètre sur le champ et potentiel électriques

Contrairement à ce qu'on s'attend, et selon des calculs déjà faites en utilisant d'autres méthodes numériques et d'autre code de calcul [Seg.03, Seg.04], la distribution de la température n'est pas affectée par la présence des défauts. On a trouvé même résultat que dans le cas homogène (figure II.9). Cela est expliqué par le fait que les pertes diélectriques et par conduction sont toujours négligeables pour des températures inférieures à 363°K. Toutefois, les valeurs des conductivités thermiques et électriques pour l'isolant ou pour l'air ont des valeurs trop faibles.

Les dimensions des défauts considérées, correspondent aux observations de SEIJ [Sei.75]. Il s'agit de dimensions réelles qui varient de 1 et 20 micro mètre de diamètre. Une comparaison quantitative du champ électrique, dans le cas avec et sans défaut est montrée

dans la figure II.11. Elle montre bien une augmentation, d'environ 20% comparée à sa valeur initiale (cas homogène), de la valeur du champ électrique dans un défaut de 20 microns mètre qui se situe juste au milieu de l'isolant.

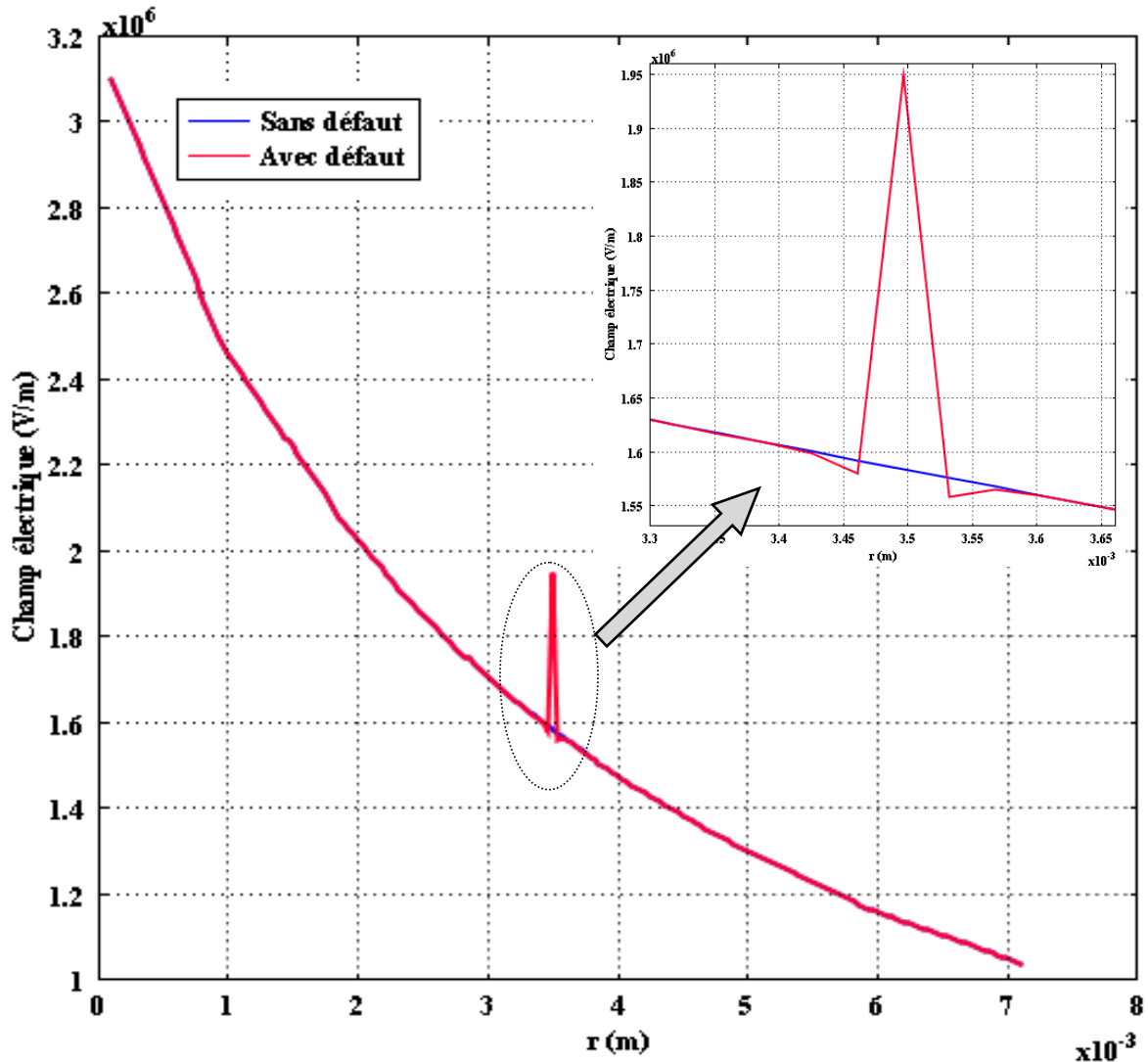


Figure II.11 : Répartition du champ électrique dans le câble en présence d'une cavité de 20 microns de diamètre

L'augmentation de la valeur du champ évidemment expliqué par la faible valeur de permittivité de l'air. D'après la figure II.11, le rapport des champs électriques des crêtes est inférieur au rapport des permittivités électriques assurant la condition de continuité. Ceci nous mène à dire qu'aux bords de la cavité une polarisation s'établie [You. 05], comme le montre la figure II.12, qui s'oppose au champ électrique extérieur et diminue donc le rapport des champs à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité.

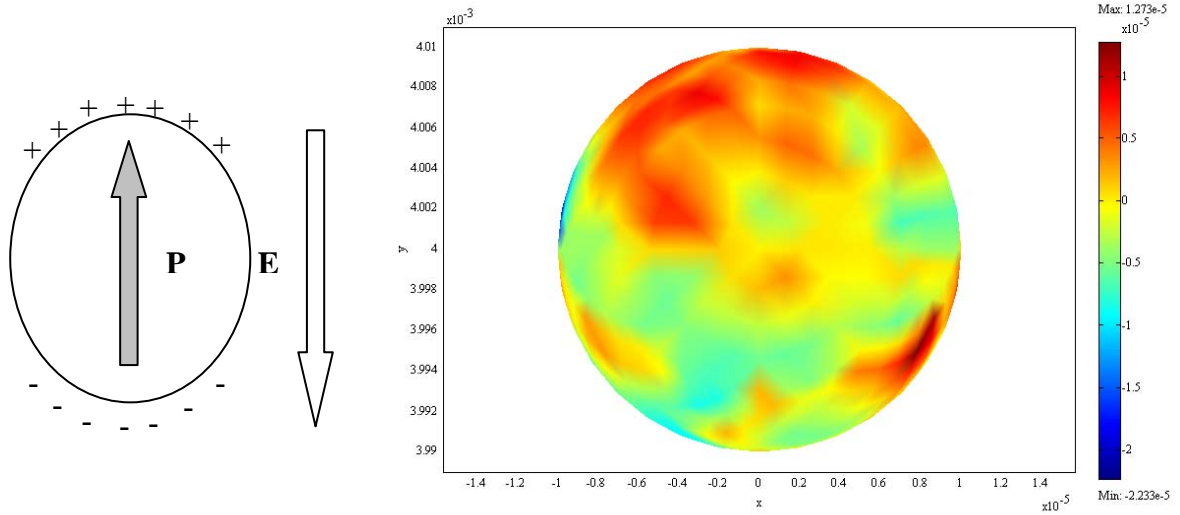


Figure II.12: Polarisation électrique dans le défaut et distribution de charge électrique calculée par logiciel Comsol

II.7 Champ électrique en fonction de la position du défaut

Afin de mettre en évidence l'influence de la localisation du défaut par rapport aux électrodes, nous avons introduit un défaut de diamètre de 20 micromètre dans différentes positions le long de la partie isolante.

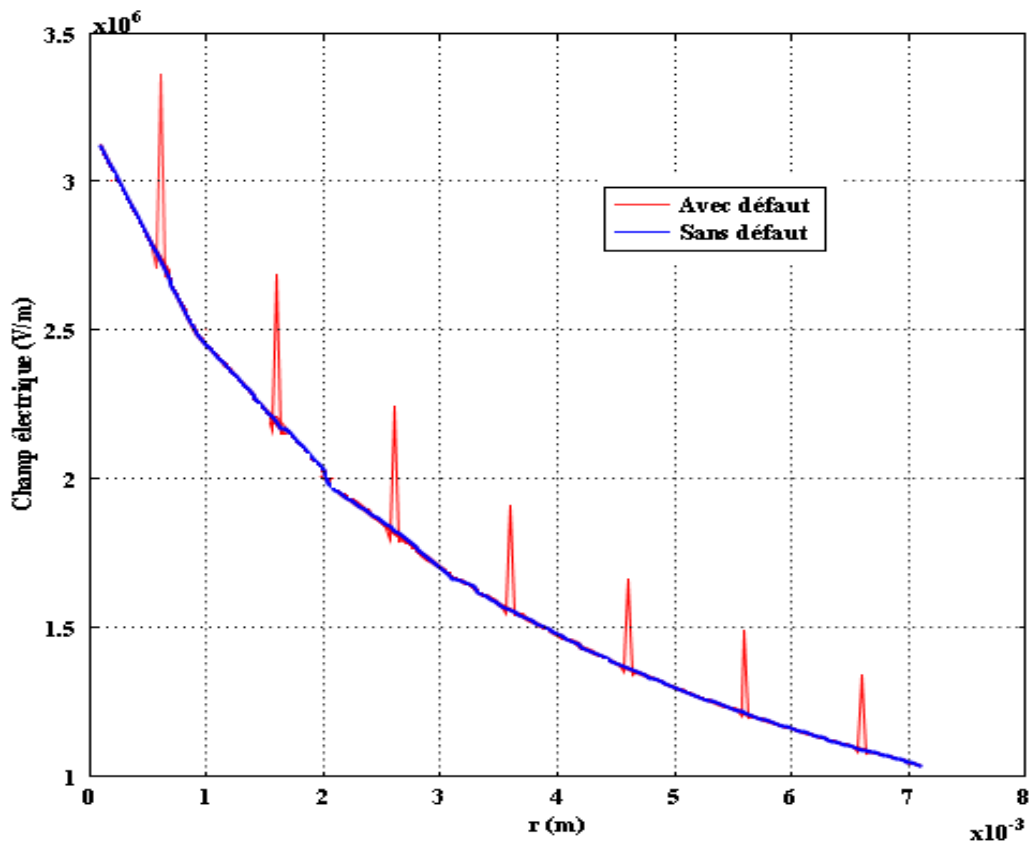


Figure II.13 : Distribution du champ électrique dans un défaut de 20 micromètre pour différentes positions

Comparé au cas où il n'y a aucun défaut et pour la même position, la figure II.13 montre que l'augmentation du champ électrique dans la cavité dépend de sa position dans la partie isolante.

En effet la figure II.14 montre bien que cette augmentation est plus importante lorsqu'elle est située près du conducteur. Elle laisse conclure que les cavités constituent une situation critique si elles sont situées près du noyau. Le champ électrique est plus renforcé, et peut atteindre le champ du claquage de l'air.

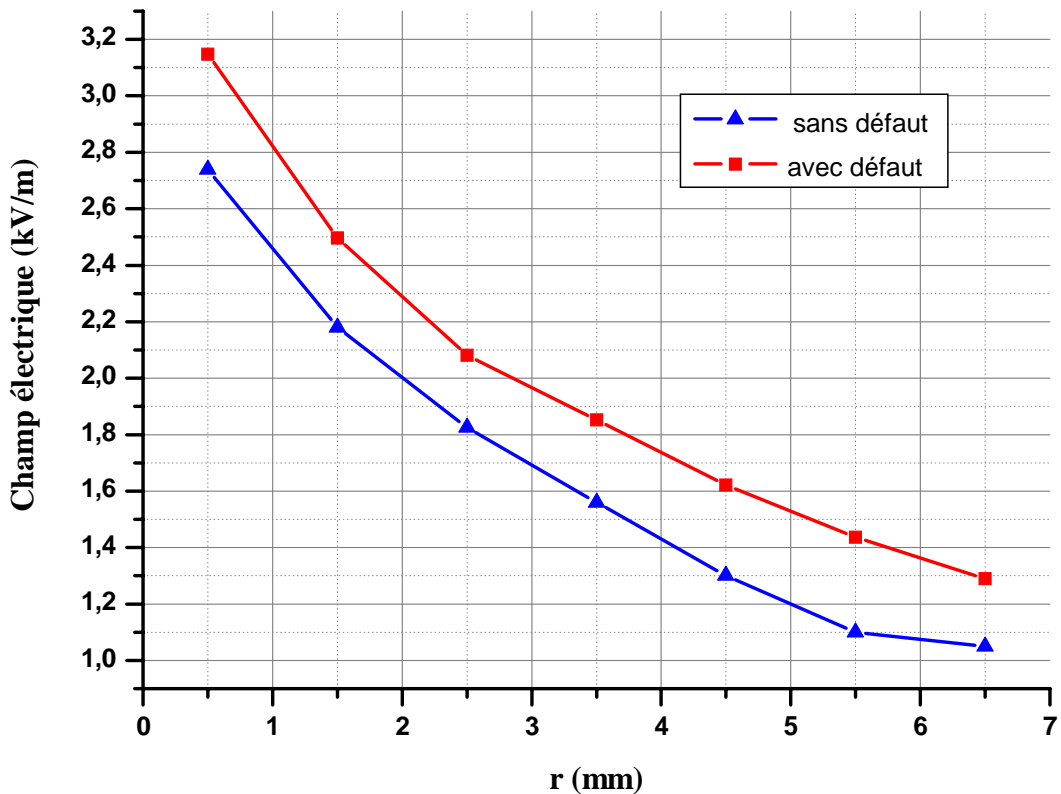


Figure II.14: Représentation de la valeur maximale du champ électrique dans un défaut en fonction de la position

II.8 Champ électrique en fonction de la taille du défaut

La distribution de champ électrique dans des défauts de différentes tailles (5 μm , 10 μm , 15 μm , 20 μm) est calculée pour une seule position. Les résultats, présentés dans la figure II.15, montre que la taille des défauts n'a aucune influence sur la valeur du champ électrique. Toutefois, la région, où le champ électrique est renforcé, augmente en fonction de la taille ; cette région a comme dimension environ la taille du défaut.

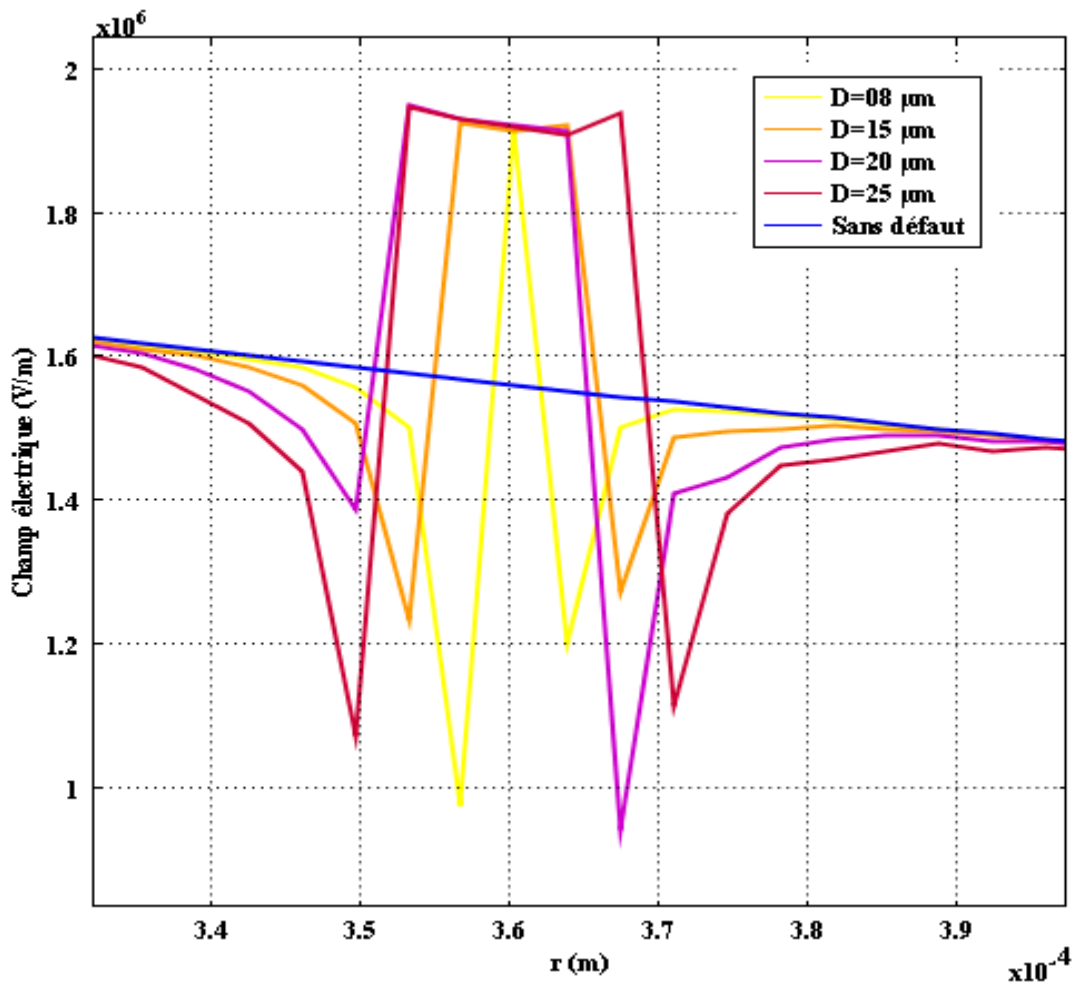


Figure II.15 : Distribution du champ électrique pour différentes tailles du défaut

Malgré que la valeur maximale du champ électrique dans un défaut soit indépendante de la taille du défaut, on peut conclure que les décharges partielles sont plus favorisées dans le cas des grandes dimensions. Cependant, un défaut de grande dimension est plus dangereux ; une décharge partielle se produit à des niveaux de tension plus basse, car les électrons et avec un libre parcours moyen relativement grand, peuvent acquérir plus d'énergie.

En effet, Rogers [Rog.85] a bien montré que l'extinction des décharges partielles est plus remarquable dans le cas des défauts avec un rapport diamètre/profondeur que dans les vides avec un rapport de grand diamètre/profondeur plus faible.

II.9 Champ électrique en fonction de la forme du défaut

Le Logiciel Comsol permet, avec son menu dessin, d'introduire facilement n'importe quelle forme de défaut. Egalement, et avec un maillage bien sélectionné, on peut facilement calculer le champ électrique. Chose qui est très délicate analytiquement.

Nous nous sommes limités à l'introduction des formes qui peuvent exister réellement dans le volume de l'isolant. Pour cette raison, nous avons optés pour la forme sphérique et elliptique.

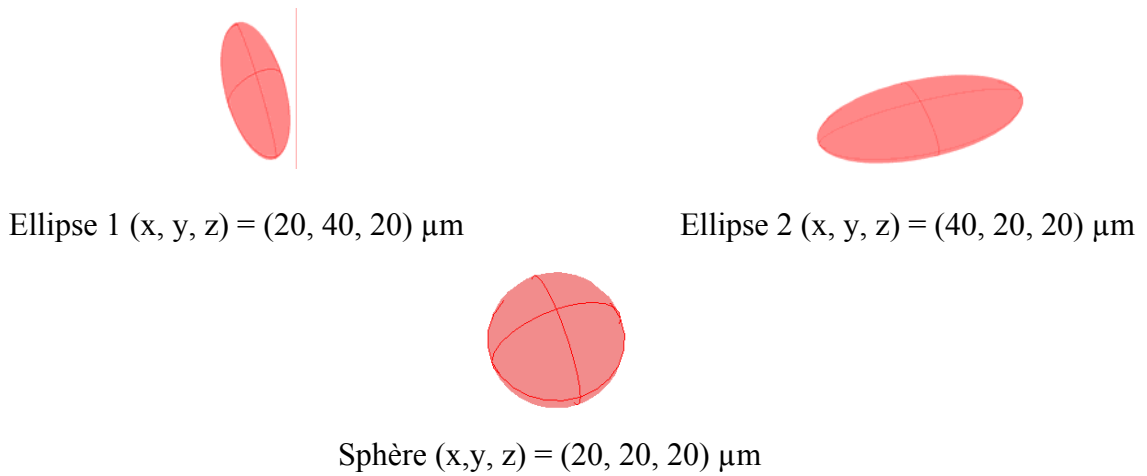
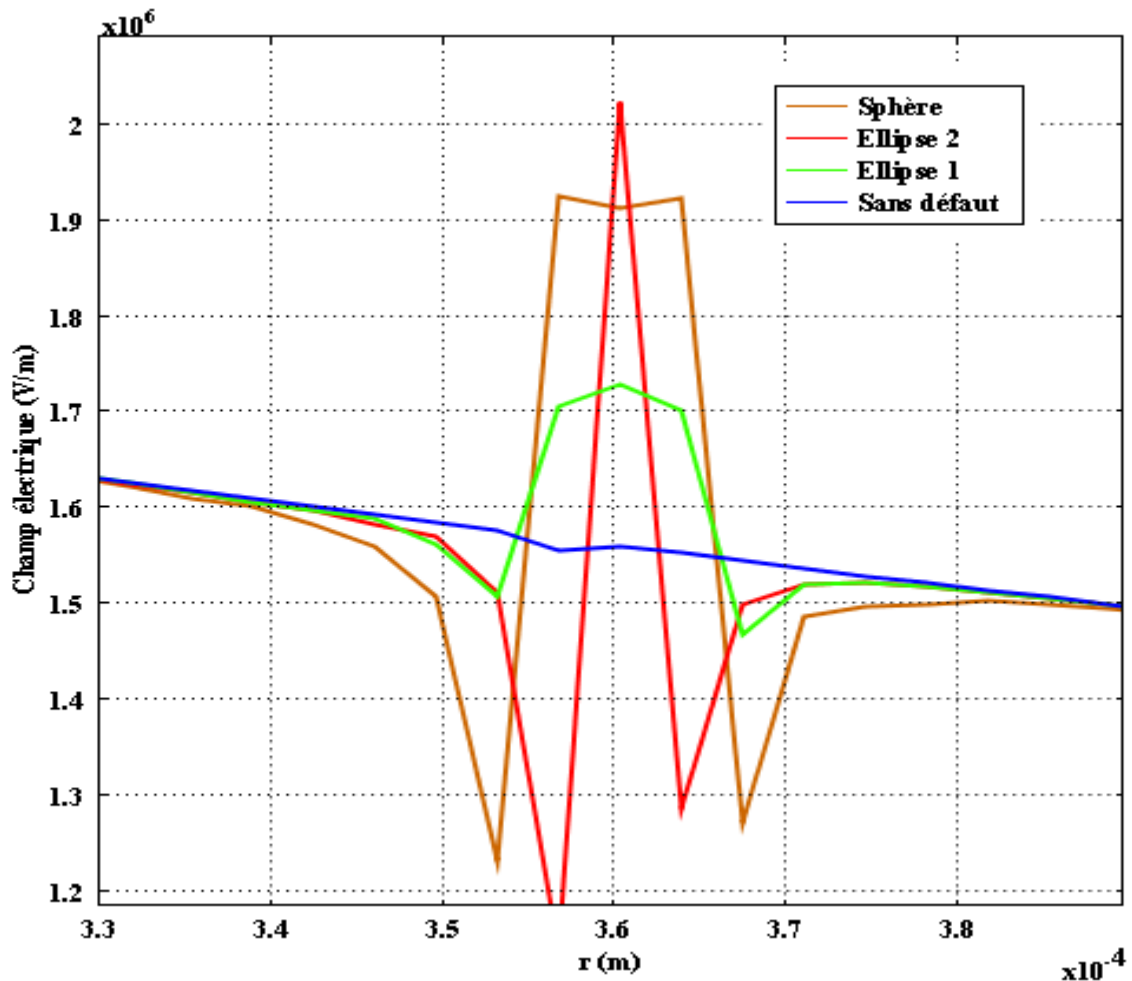


Figure II.16 : *Formes de défaut choisi*



Ellipse 1: défaut elliptique dans le sens du champ électrique

Ellipse2: défaut elliptique dans le sens transversal du champ électrique

Figure II.17 : *Distribution du champ électrique pour différentes tailles du défaut*

Pour ces formes choisies, il est bien clair que la présence d'une cavité de forme elliptique dans le sens transversal du champ électrique représente le cas le plus nocif. Le champ électrique augmente de 30 % comparé à la valeur initiale.

II.10 Influence mutuelle entre deux défauts voisins

Nous avons bien montré qu'il existe, autour du défaut, une zone d'influence, dans laquelle le champ électrique se trouve affecté. Cette zone s'étend à une distance qui dépend de la taille du défaut. Ceci, nous mène à penser à l'existence possible des interactions mutuelles entre deux cavités. Ce cas est également très intéressant, puisque même en petit volume de l'isolant un grand nombre de cavités est trouvées. Les résultats expérimentaux ont montré qu'aucune différence n'existe dans les grandeurs des décharges partielles quand un échantillon contient seulement une cavité et quand il contient deux cavités voisines [[Kub.78, Dan.91, Hat.93].

Pour déterminer l'influence mutuelle entre les deux cavités, nous supposons que celles-ci sont d'abord en contact, puis nous maintenons la première dans une position fixe et nous éloignons la deuxième. La figure II.18 montre que le champ au sein de chaque cavité atteint un maximum presque commun, lorsque les deux cavités sont en contact.

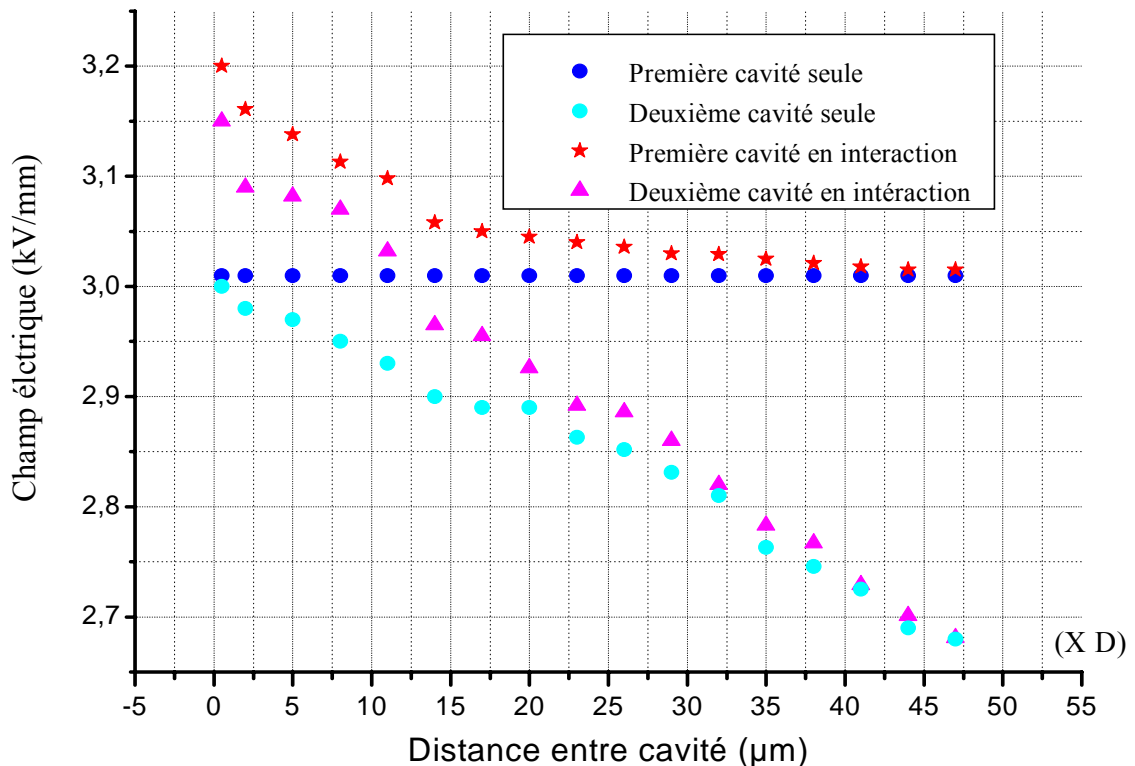


Figure II.18: Distribution du champ électrique dans deux défauts voisins et en interaction

Les résultats indiquent que les cavités semblent agir l'une sur l'autre. Les valeurs du champ électrique sont renforcées par rapport aux cas sans défaut. Cette interaction est possible seulement si la distance inter-cavité est du même ordre de grandeur que la taille de cavité. Autrement, l'interaction entre les cavités est négligeable. Enfin, on peut dire que la tension seuil d'apparition des décharges partielles n'est pas principalement régie par l'état de la cavité prise isolée. Chaque cavité, ne renforce pas seulement le champ électrique dans la cavité elle-même, mais aussi le champ autour d'elle et dans les cavités voisines.

II.11 Qualification de l'apparition des décharges partielles

Dans cette partie, et tenons en compte des résultats obtenus auparavant, nous considérons la possibilité d'apparition des décharges partielles dans la partie isolante. Cependant, Pour qualifier l'apparition des décharges partielles dans les cavités de dimensions réelles (1 à 20 μm), nous avons (figure II.19) tout d'abord tracé la distribution du champ électrique maximum dans une cavité de 20 micromètre de diamètre (la taille des cavités n'influe pratiquement pas le champ électrique) et pour toute position dans la partie isolante du câble.

Maintenant calculons la valeur champ disruptif qui correspond à chaque cavité selon l'équation I-9. Contrairement à la valeur du champ maximal dans une cavité qui peut exister dans l'isolant, la valeur du champ disruptif dépend de la taille de la cavité. Elle dépend, également, de la pression et de la température.

On suppose que pendant l'extrusion le gaz formé sous forme de cavité dans l'isolant est de pression atmosphérique, soit $p_0 = 1$ bar. Cette pression est avant service. On suppose également que le gaz est à une température ambiante T_0 . Dès le câble est en service, un gradient de température s'établit en régime permanent, causant selon la position de la cavité, une pression du gaz occlus sera différente de la pression atmosphérique. On calcule alors la pression dans la cavité pour chaque position en vertu de la loi des gaz parfaits:

$$P = \frac{T}{T_0} P_0 \quad \text{Équation II-6}$$

où p et T sont respectivement la pression et la température de la cavité dans une position donnée.

La pression p étant déterminée, on pourra calculer la valeur du champ de Pashen (champ disruptif de l'air) nécessaire à l'apparition de décharges partielles. Les résultats de calcul sont présentés sous forme de graphe dans la figure II.19.

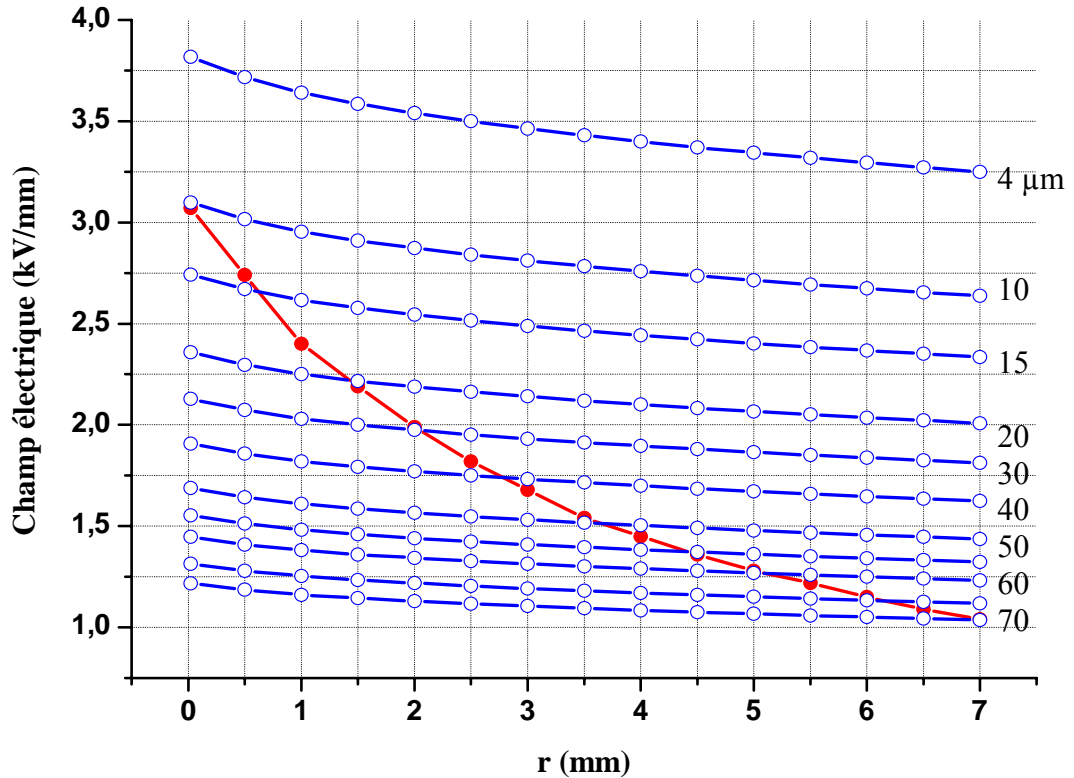


Figure II.19 : *Champ disruptif et champ maximal dans des cavités de différentes tailles en fonction de leur position dans l'isolant*

Les lignes obliques représentent les valeurs du champ disruptif pour chaque taille de cavité en fonction de la position. Pour une taille donnée, si on compare les deux valeurs du champ électrique nous remarquons que le champ à l'intérieur de la cavité atteint la valeur critique. Cependant, les décharges partielles se produisent seulement pour une certaine position, appelé position limite. En dessous de cette position la cavité constitue un cas défavorable. Il est clair que plus le diamètre de la cavité est important, plus la position limite est importante. En outre, la cavité de diamètre inférieure à 4 μm ne sera jamais le siège des décharges partielles quelque soit sa position dans le câble. Aussi, il est clair pour un défaut avec un diamètre supérieure 70 μm , se trouvant dans n'importe quelle position dans l'isolant des décharges partielles apparaissent.

II.12 Simulation des DPs en utilisant le modèle ABC

Dans cette partie on va essayer d'étudier l'activité des décharges partielles dans le défaut. En utilisant le circuit électrique équivalent, ou le modèle ABC, on va essayer de déterminer l'influence des paramètres du circuit sur l'activité des décharges partielles. Les paramètres proposés sont, la résistance de la partie défaut, la capacité de la partie défaut, la fréquence et le niveau de tension. On estime bien que ces paramètres sont fortement liés aux propriétés de l'isolant ainsi que la nature du défaut. On commence tout d'abord par un essai référentiel, en fixant les paramètres du circuit, ensuite on essaye de varier les paramètres du circuit.

Le circuit équivalent d'un isolant, contenant une seule cavité, développé par Whitehead est représenté dans la figure suivante :

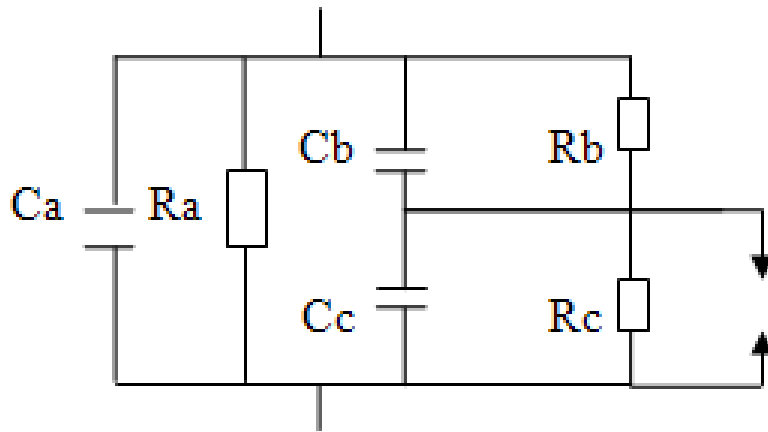


Figure II.20 : Modélisation d'un défaut dans un diélectrique selon Whitehead

En utilisant les composants électriques et électroniques disponibles dans la bibliothèque de Simulink, nous avons imaginé le circuit équivalent reporté à la figure II.21.

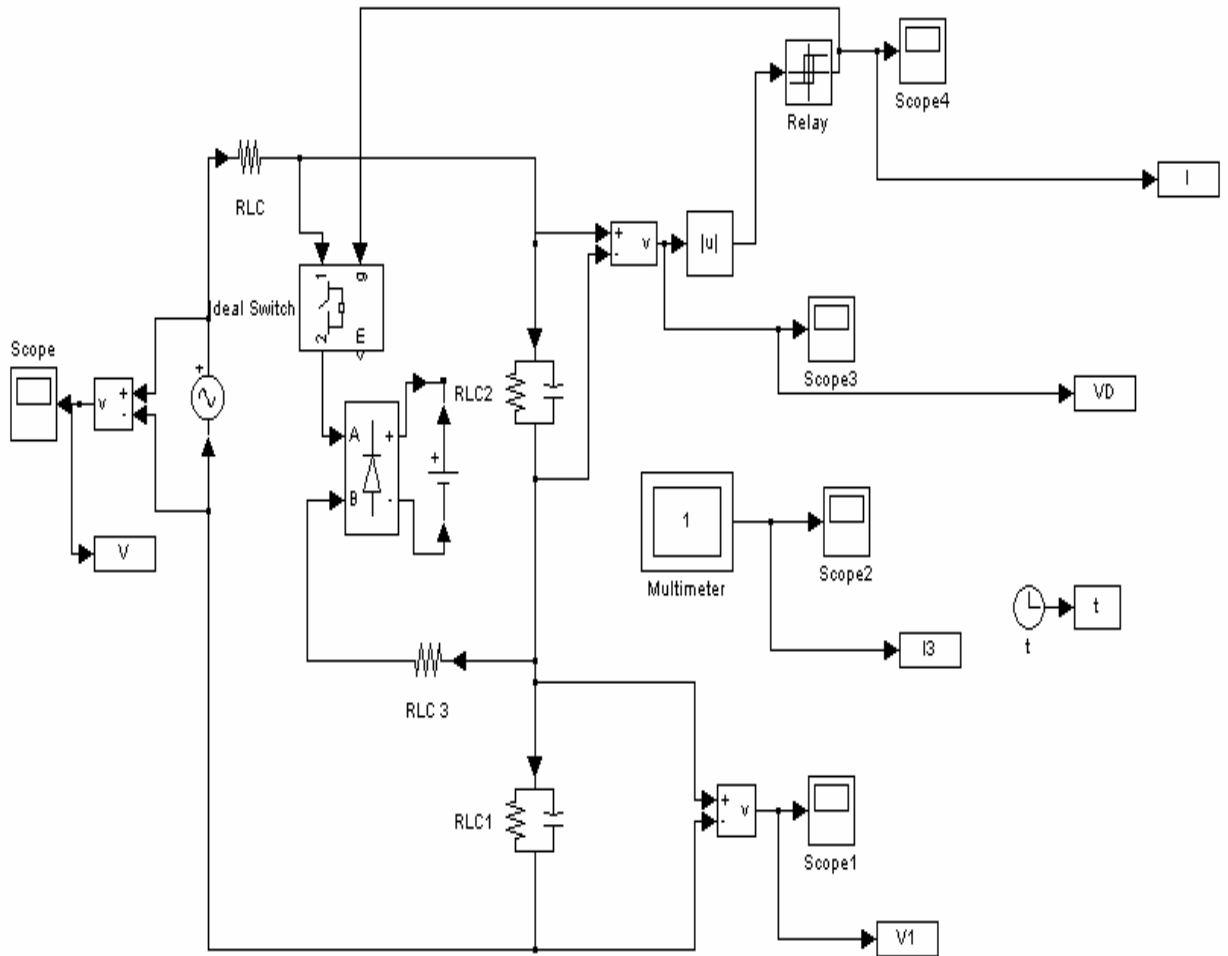


Figure II.21 : *Circuit électrique réalisé pour modéliser les décharges partielles*

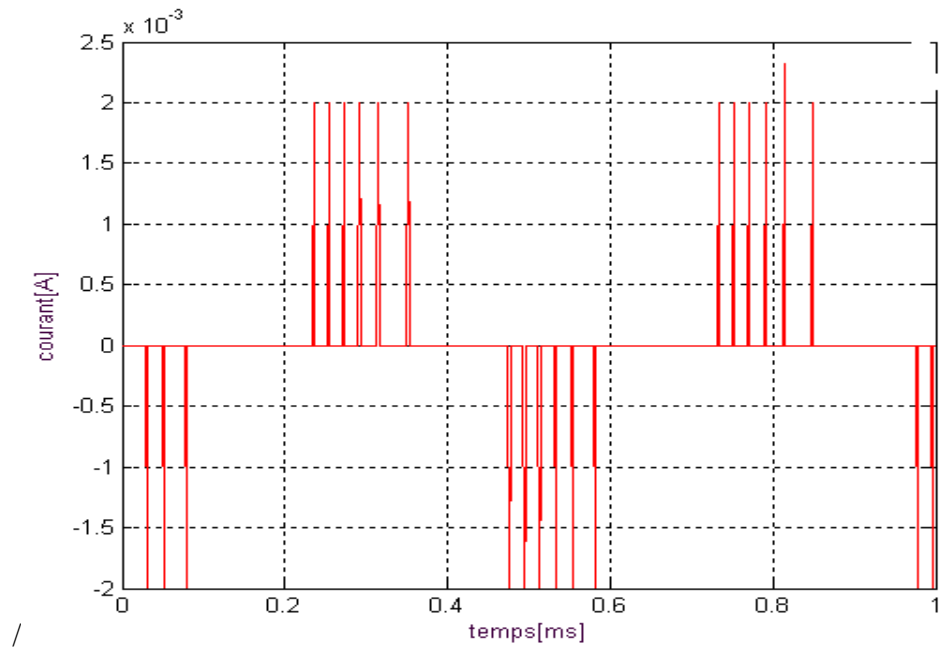
II.12.1 Cas référentiel

Sachant qu'il est très difficile de trouver ou calculer les paramètres du circuit et qui représentent réellement les propriétés de l'isolant ainsi que le défaut, cela nous mène à opter pour des valeurs qui représentent le cas, que nous allons nommer cas référentiel. Ce cas nous permet d'avoir une certaine activité des décharges partielles.

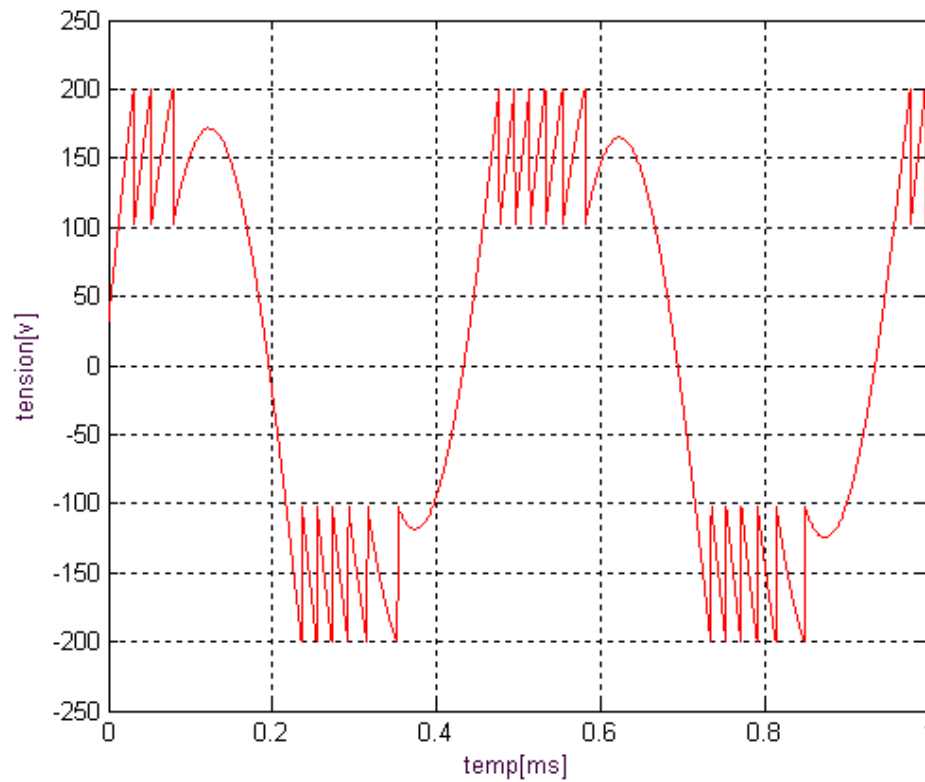
Les valeurs des grandeurs choisies sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} U=500 \text{ V} \\ f = 2000 \text{ Hz} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} C_1=10^{-12} \text{ F} \\ C_2=10^{-11} \text{ F} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} R = 50 \ \Omega \\ R_1 = 10^9 \ \Omega \\ R_2 = 10^8 \ \Omega \\ R_3 = 1 \ \Omega \end{array} \right.$$

L'activité des décharges partielles est enregistrée, elle est représentée dans les figures suivantes :



a



b

Figure II.22 : *Activité des décharges partielles pour une tension de 500 V*

On peut très bien voir dans les figures l'activité des décharges partielles. La figure II.22.b. Montre bien que lorsque la tension d'alimentation du circuit atteint une valeur proche du maximum, des décharges partielles apparaissent. On peut très bien distinguer les valeurs de la tension d'initiation et la tension d'extinction des décharges partielles. La figure II.22.a montre bien les impulsions du courant des décharges partielles.

II.12.2 l'influence du niveau de la tension sur l'activité des décharges partielles

Dans cette partie nous allons étudier l'impact de la tension électrique sur l'apparition du phénomène des décharges partielles. Plus particulièrement, l'influence du niveau de la tension sur le nombre des décharges partielles. Pour cela nous allons fixer les autres paramètres du circuit et on change le niveau de tension. Les tensions choisies sont : 200 V, 250 V, 750 V et 1000 V.

- Pour une tension égale à $U = 200V$ on remarque que nous n'avons aucune décharge. on peut dire que la tension d'alimentation n'est pas suffisante pour atteindre la tension de déclenchement des décharges.

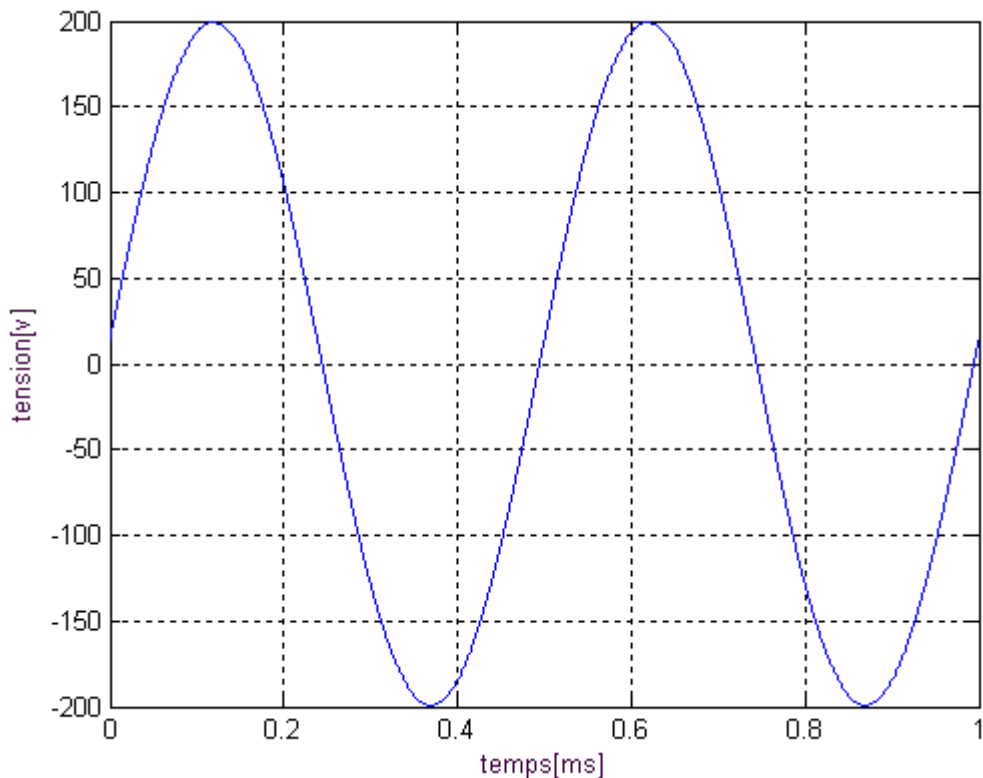
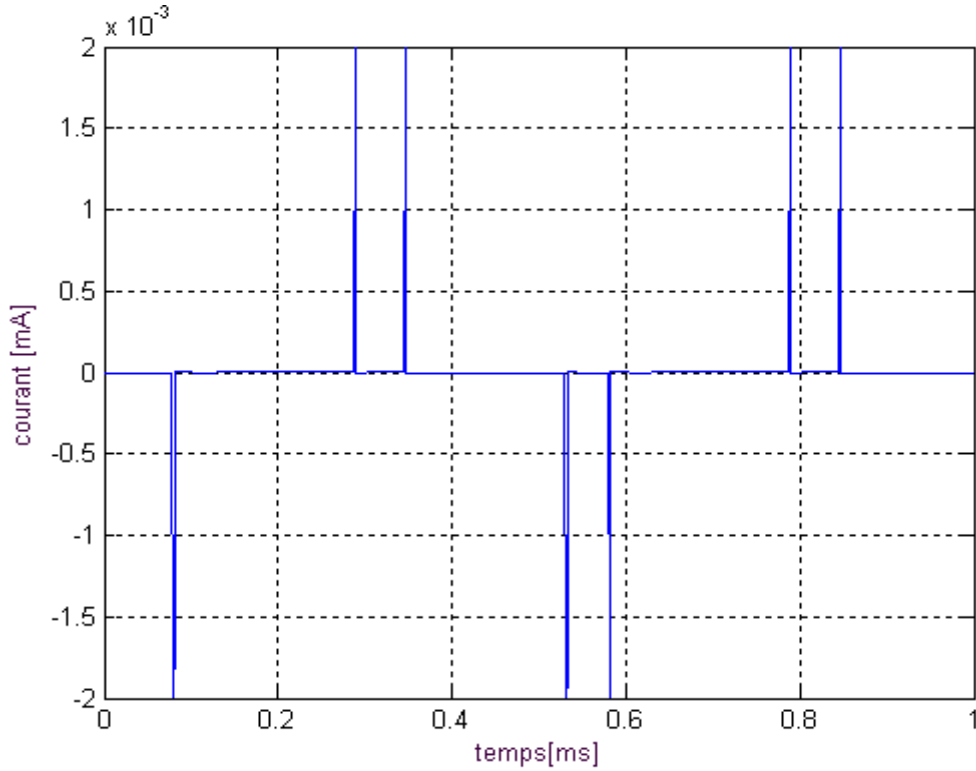
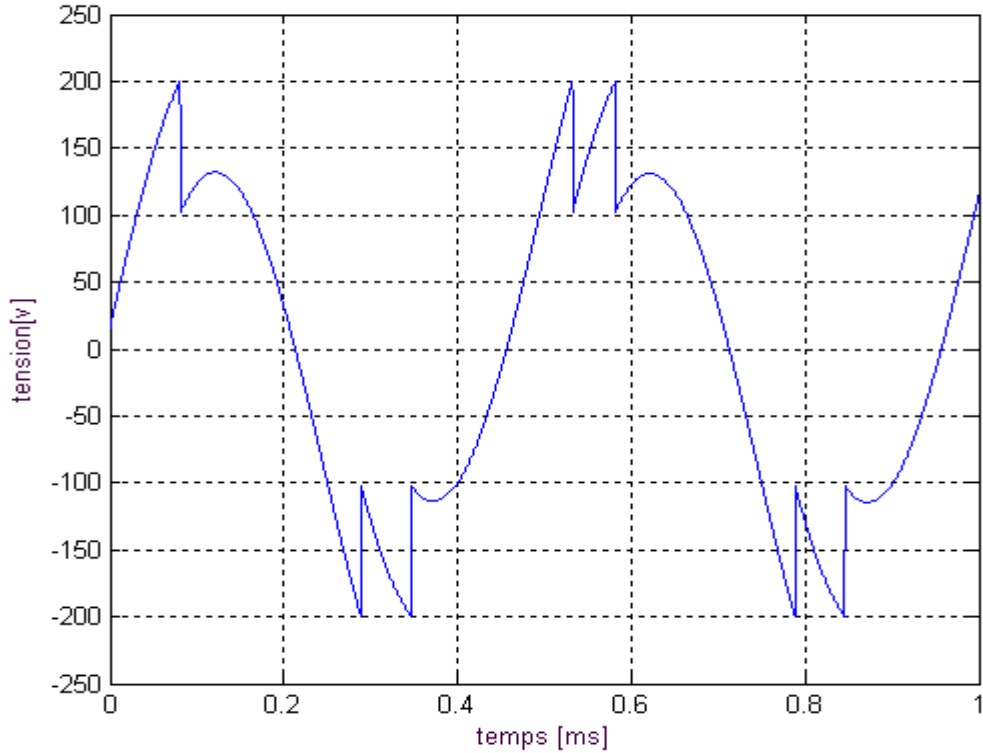


Figure II.23 : *Absence de décharges partielles pour une tension de 220 V.*

➤ Pour une tension égale à $U = 250V$ on obtient les courbes suivantes :



a



b

Figure II.24: *Activité des décharges partielles pour une tension de 250 V*

Dans ce cas on trouve que le nombre de décharges est égal à deux. Ces décharges sous forme d'impulsion sont bien montrées dans la figure III.24.a.

➤ Pour une tension égale à $U=750V$ on obtient les courbes suivantes :

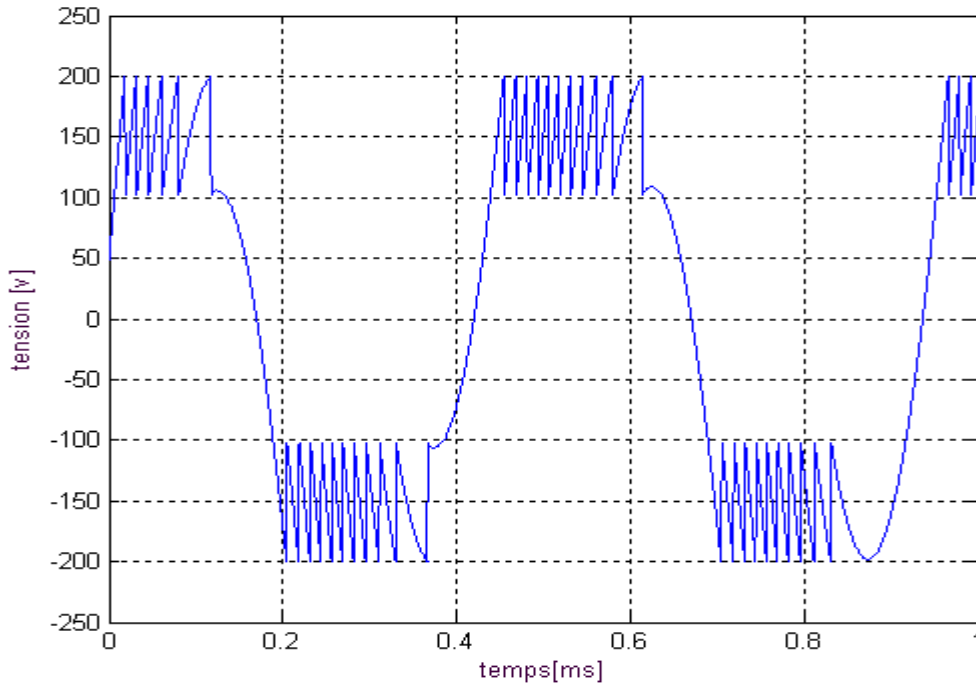


Figure II.25 : *Activité des décharges partielles pour une tension de 750 V*

Dans ce cas nous avons enregistré six décharges. Nous pouvons en conclure que le nombre des décharges augmente avec la tension d'alimentation.

➤ Pour une tension égale à $U=1000V$ on obtient la courbe de décharges suivante :

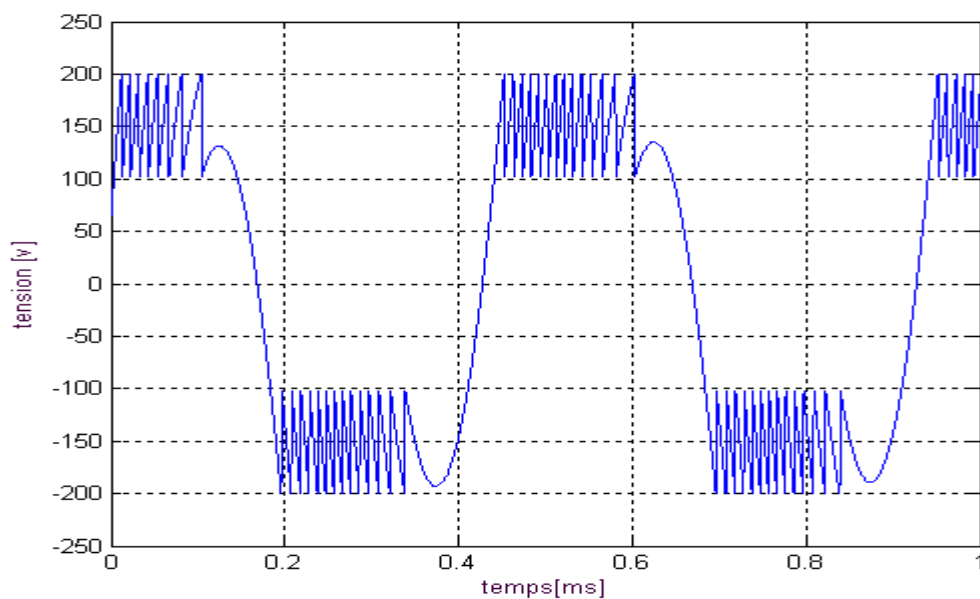


Figure II.26 : *Activité des décharges partielles pour une tension de 1000 V*

Il est bien clair que le nombre de décharges partielles augmente d'avantage pour une tension de 1000V. Leurs nombres valent 14 décharges partielles.

Après avoir recueilli les résultats de ces tests, nous avons pu obtenir la courbe suivante, qui représente le changement de nombre de décharges en fonction de la tension imposée.

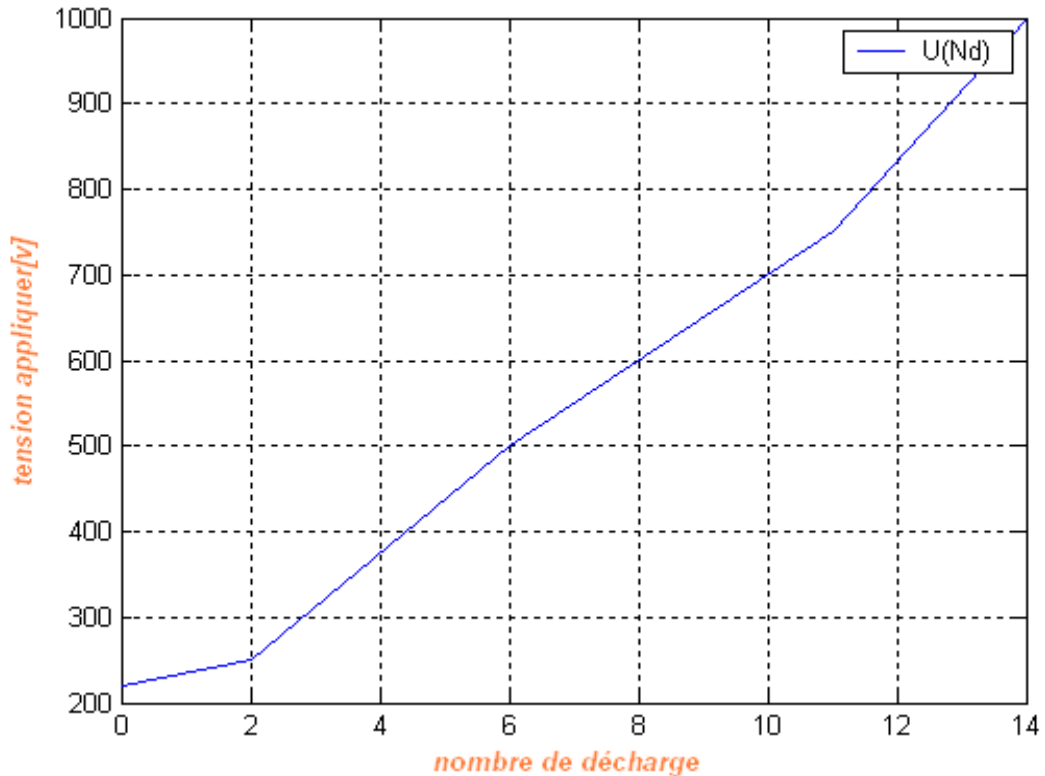


Figure II.27 : Nombre décharges partielles en fonction de la tension d'alimentation

On peut conclure que le nombre des décharges partielles augmente pour une tension d'alimentation croissante. Cela nous mène à dire qu'il y a une grande dépendance entre le niveau de tension et le nombre des décharges partielles.

II.12.3 l'influence de la fréquence sur l'activité des décharges partielles

Dans un autre démarche, nous allons introduire plusieurs valeurs de fréquences afin d'étudier l'impact de ce dernier paramètre sur l'activité des décharges partielles. Les autres paramètres restent les mêmes que pour le cas référentiel.

Dans le cas de la fréquence, et pour bien montrer la dépendance entre la fréquence et le nombre des décharges partielles, nous allons nous assurer de comptabiliser le nombre des décharges durant le temps d'acquisition, le temps est fixé égale à 10^{-3} s.

- Comme le montre la figure suivante, pour une fréquence égale à $f=100\text{Hz}$

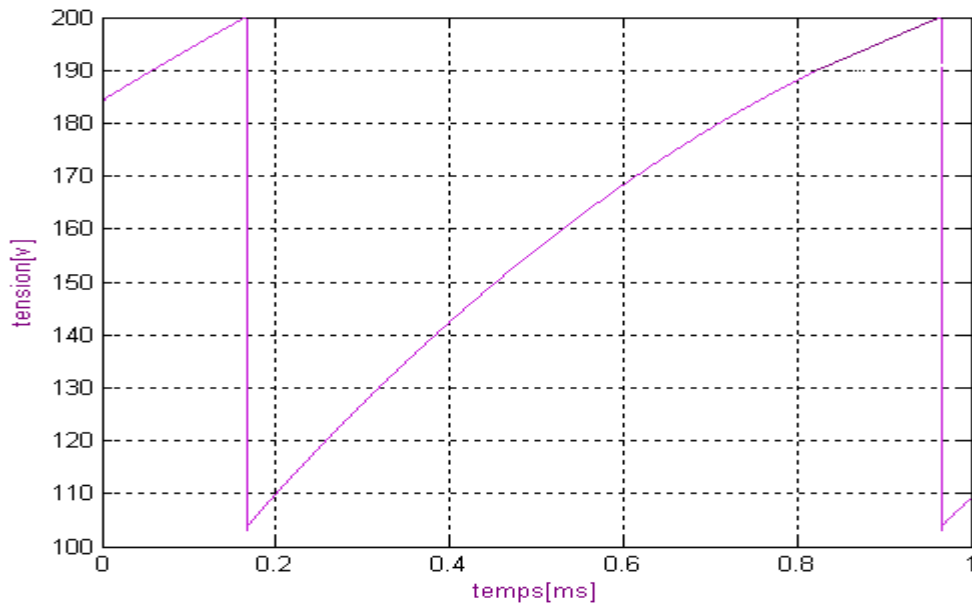


Figure II.28 : *Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=100\text{ Hz}$*

On constate que c'est difficile ou impossible de déterminer le nombre de décharge. Avec une faible valeur de fréquence et une période élevée on n'a pas pu comptabiliser le nombre de décharges dans une alternance de la tension.

- Pour une fréquence égale à $f=1000\text{Hz}$

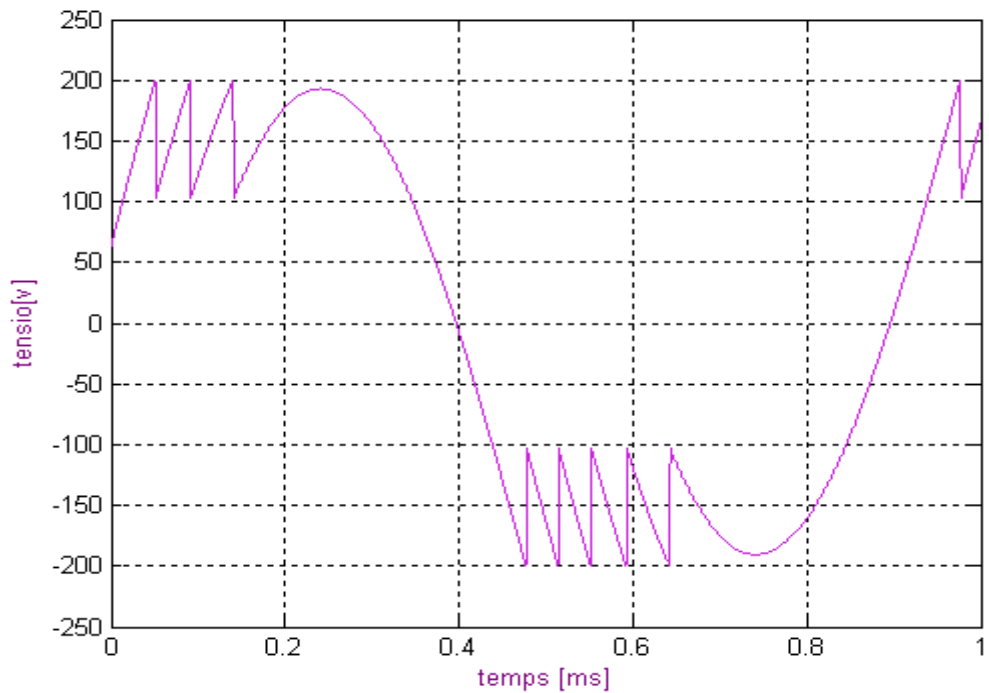


Figure II.29 : *Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=1000\text{ Hz}$*

Comme le montre la figure nous avons comptabilisé cinq décharges partielles dans une alternance. Le nombre est dix durant le temps d'acquisition.

- Pour une fréquence égale à $f=5000\text{Hz}$

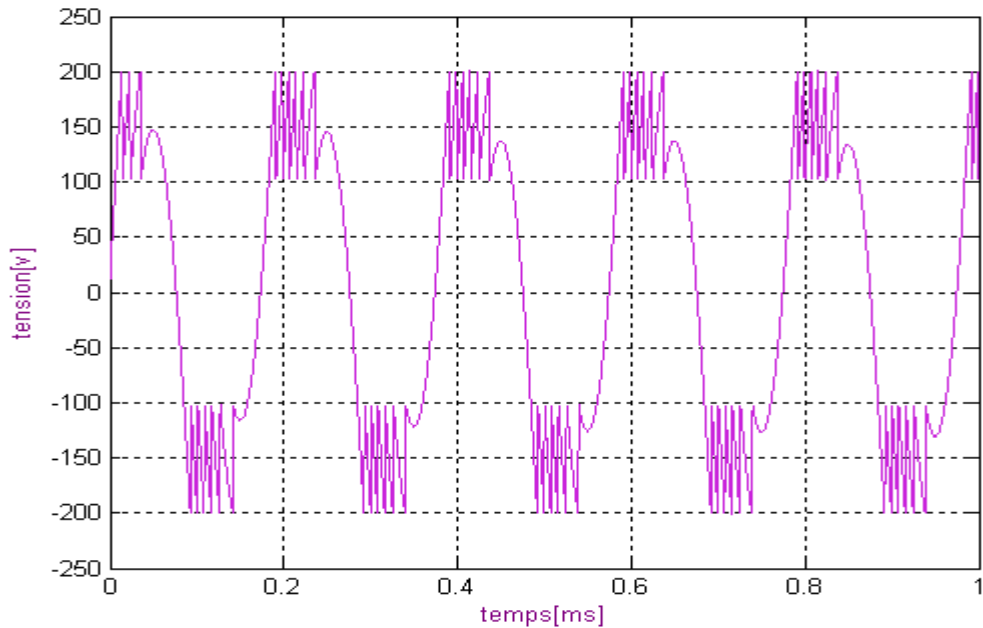


Figure II.30 : *Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=5000\text{ Hz}$*

Pour une fréquence égale à 5000 Hz, les courbes représentées dans la figure II.30 montrent bien qu'il existe 6 décharges partielles. Par contre durant le temps d'acquisition nous trouvons soixante décharges partielles.

- Pour une fréquence égale à $f=10000\text{Hz}$

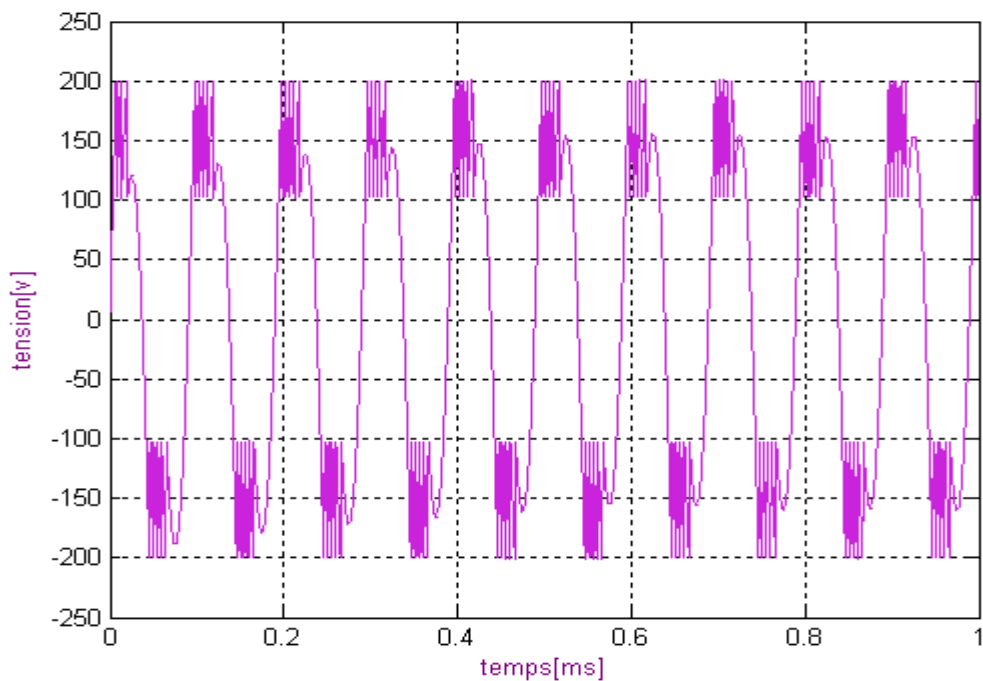


Figure II. 31 : *Activité des décharges partielles pour une fréquence $f=10000\text{ Hz}$*

Pour une fréquence égale à 5000 Hz, on a enregistré toujours six décharges partielles. Dans ce cas on peut dire que le nombre reste constant à partir d'une fréquence qui vaut 10000 Hz. Ce nombre est constant pendant la période, mais durant le temps d'acquisition ce nombre remonte à 120 décharges. Nous pouvons dire que lorsque la fréquence augmente, le nombre des décharges augmente rapidement.

II.12.4 l'influence des résistances sur l'activité des décharges partielles

Dans cette étape on va étudier l'impact des résistances du circuit sur l'apparition du phénomène de la décharge partielle. Nous allons jouer sur les valeurs R (résistance de la partie isolant), R_1 (résistance de l'isolant sein se trouvant dans la même colonne du défaut) et R_2 (résistance du défaut).

L'influence de la résistance R (résistance de la partie isolant):

- Pour une valeur de R allant de 50Ω à $10^4 \Omega$ aucun changement dans le nombre de décharges n'est constaté ; il reste le même que pour le cas référentiel.
- Pour une valeur égale à $R=10^5 \Omega$, la courbe suivante montre un nombre de décharge égale à 29 décharges partielles.

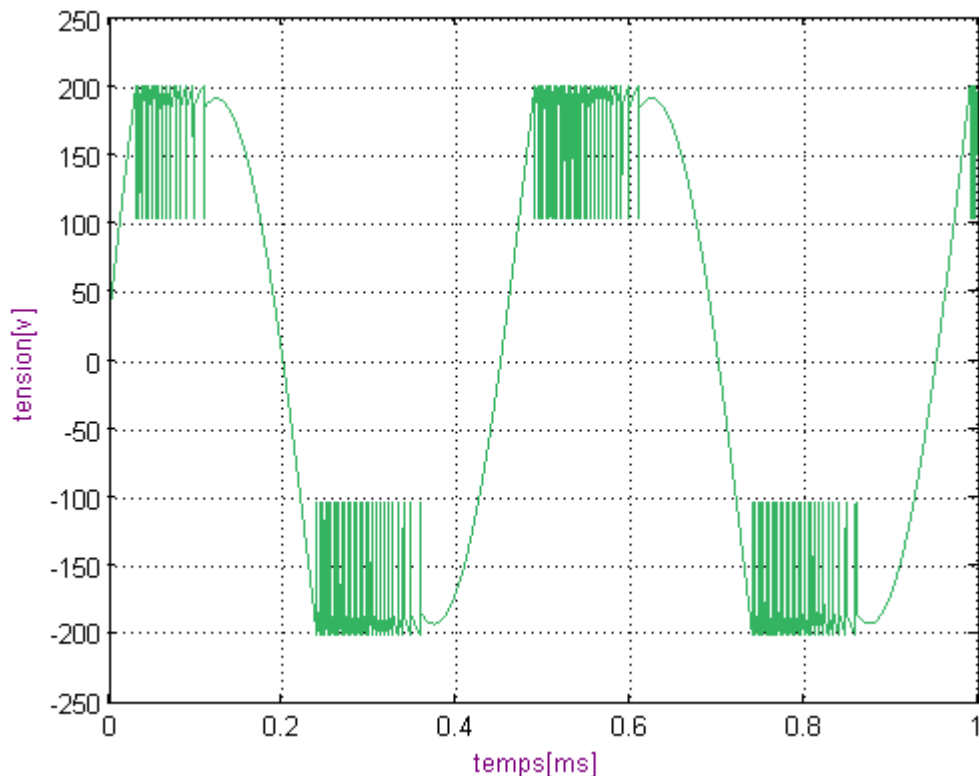


Figure II.32 : *Activité des décharges partielles pour une résistance $R=10^5 \Omega$*

- Pour une valeur de $R=10^8 \Omega$ et contrairement à ce qu'on attend, le nombre des décharges n'est que d'une seule.

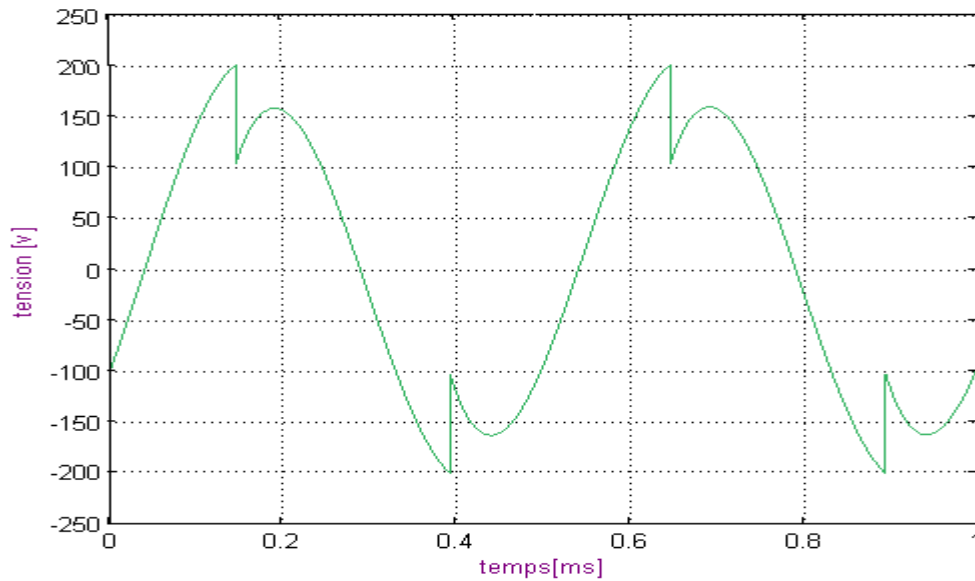


Figure II.33: *Activité des décharges partielles pour une résistance $R=10^8 \Omega$*

- Pour une valeur de résistance $R=10^9 \Omega$ nous ne constatons aucune décharge partielle.

L'influence de la résistance R_1 (résistance de l'isolant sein se trouvant dans la même colonne du défaut)

- Pour une valeur de résistance égale $R_1=10^4 \Omega$ nous n'enregistrons aucune décharge.
- Pour une valeur de résistance $R_1=10^6 \Omega$ nous marquons un nombre important de décharges partielles

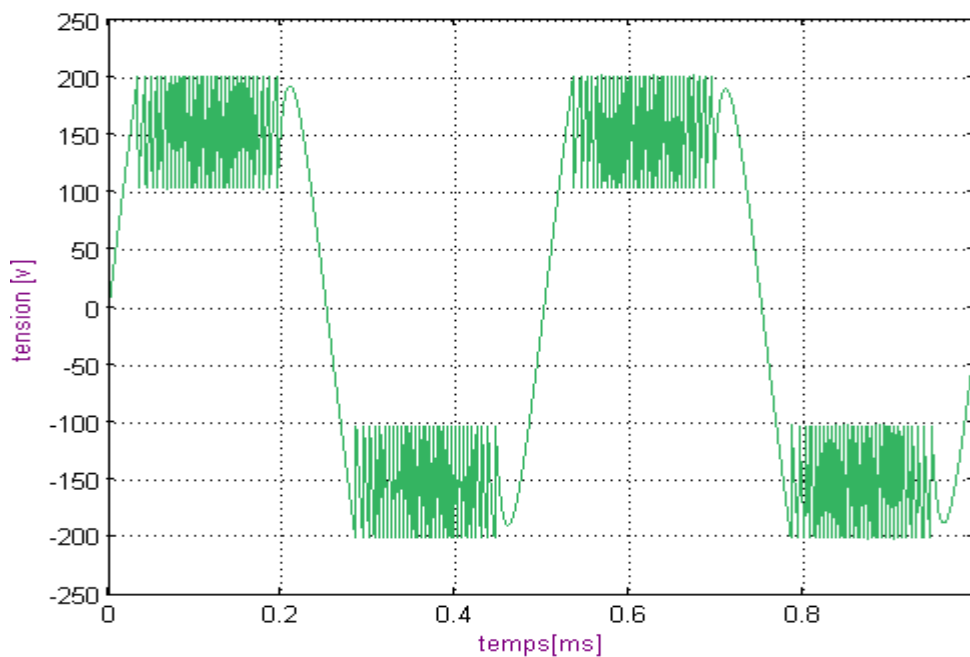


Figure II.34 : *Activité des décharges partielles pour une résistance $R_1=10^6 \Omega$*

Le nombre obtenu des décharges est de 33 décharges partielles pour chaque alternance

- Pour une valeur de résistance supérieure à $10^7 \Omega$, on enregistre six décharges partielles comme dans le cas référentiel.

L'influence de la résistance R_2 (résistance du défaut).

- Pour une valeur $R_2=10^6 \Omega$ le nombre de décharges est égal à zéro
- Pour une valeur égale à $R_2=10^7 \Omega$ et plus le nombre de décharges n'est que de 4.

II.12.5 l'influence des capacités sur l'activité des décharges partielles

Dans ce cas, nous allons discuter le rôle des capacités et l'influence de ces valeurs sur le nombre de décharge partielles.

L'influence de C_1 :

- Pour une valeur $C_1=10^{-10}F$ on obtient 5 décharges

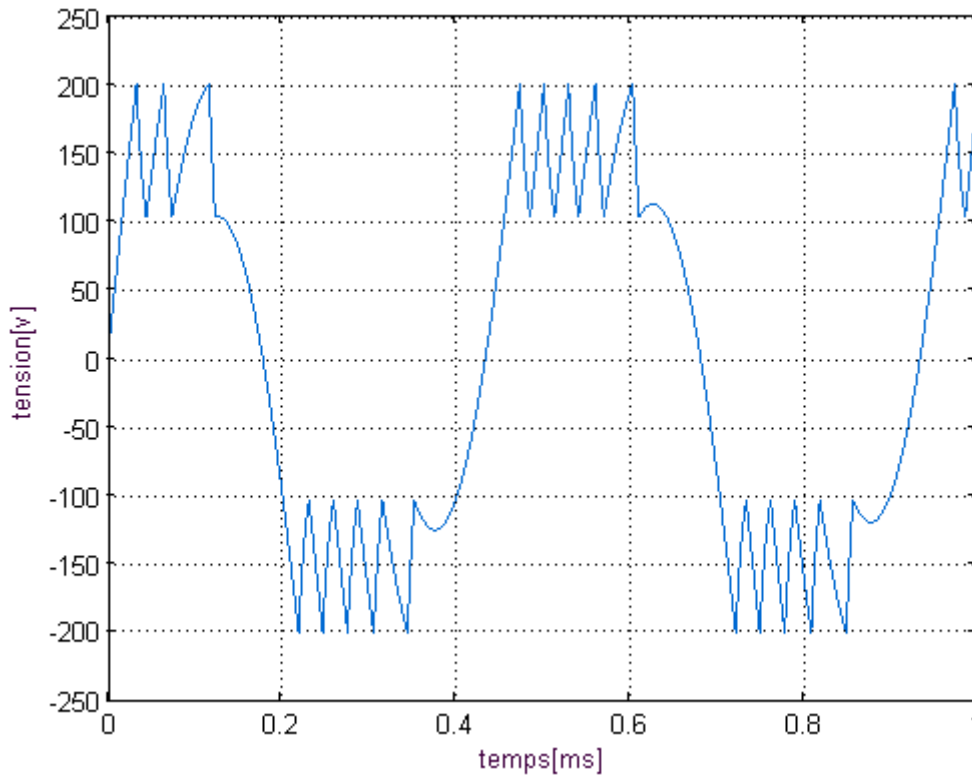


Figure II.35 : *Activité des décharges partielles pour $C_1=10^{-10}F$*

- Pour une valeur $C_1=10^{-12}$ F on obtient une seule décharge

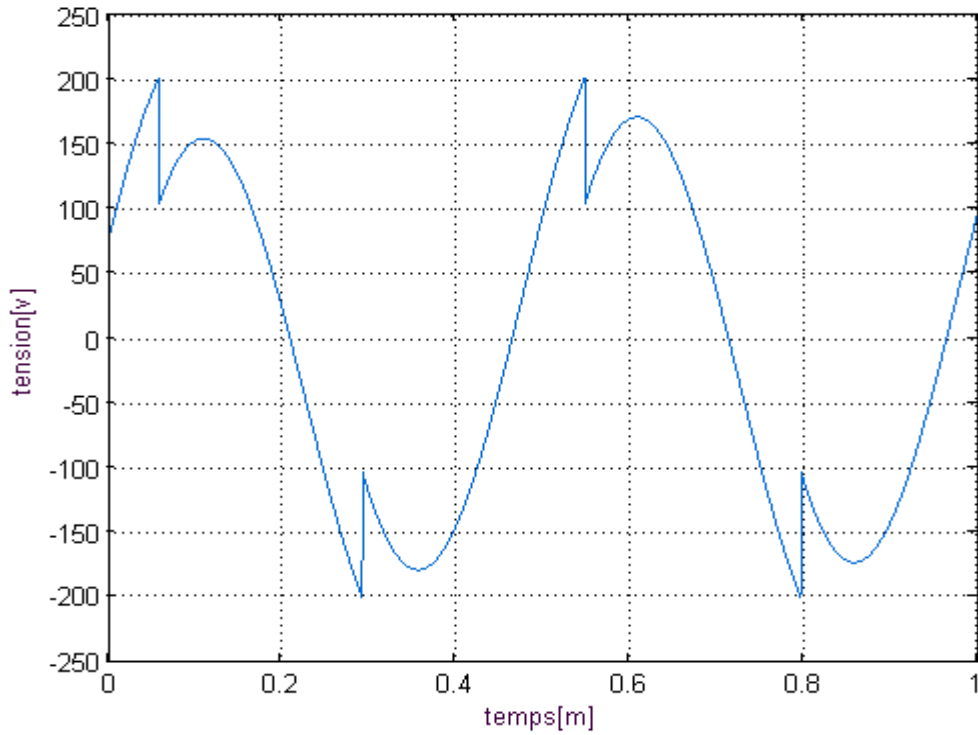


Figure II.36 : *Activité des décharges partielles pour $C_1=10^{-12}F$*

- Pour une valeur $C_1=10^{-13}$ F on n'obtient aucune décharge

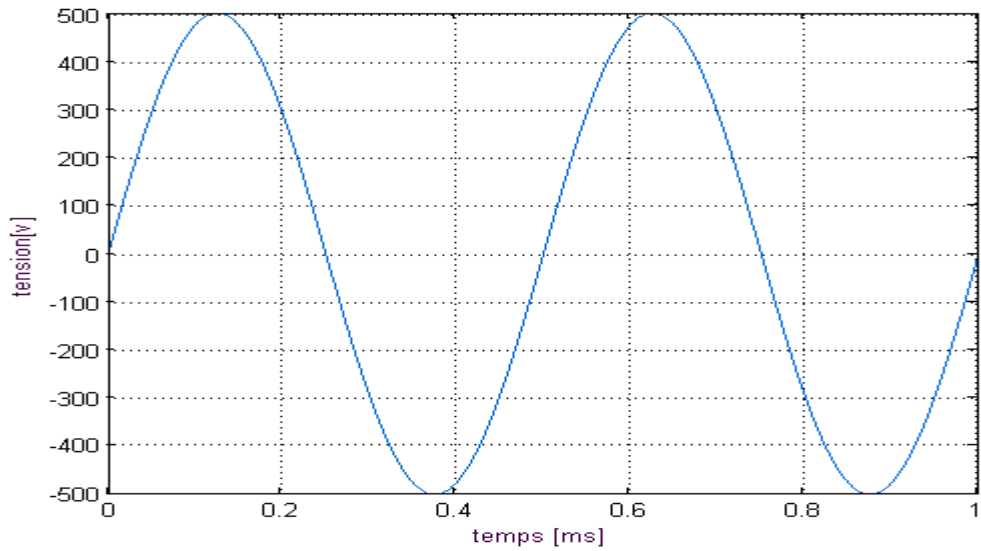


Figure II.37 : *Activité des décharges partielles pour $C_1=10^{-13}F$*

L'influence de C_2 :

- Pour une valeur $C_2=10^{-10}F$ on n'obtient pas de décharge

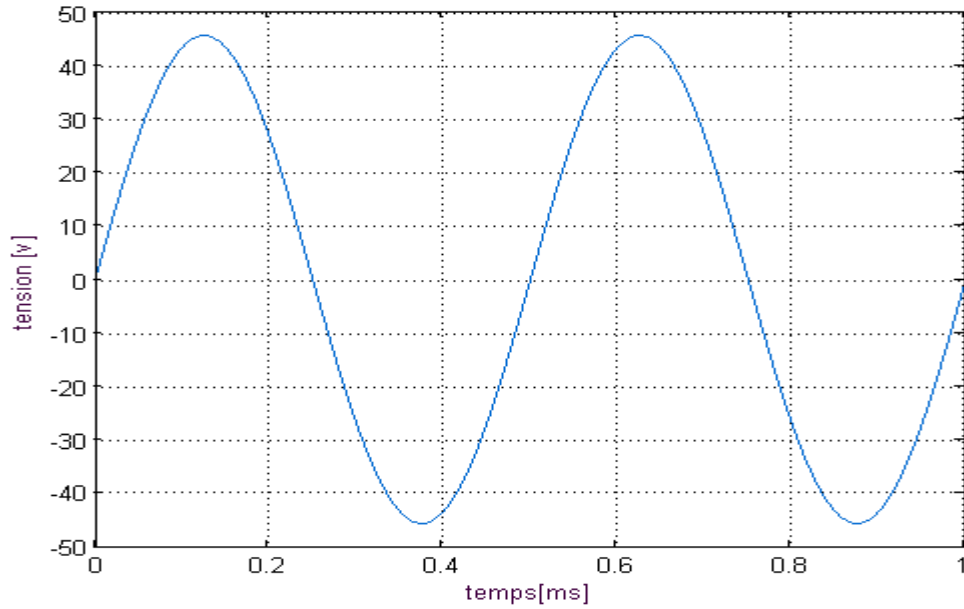


Figure II.38 : *Activité des décharges partielles pour $C_2=10^{-10}F$*

- Pour une valeur $C_2=10^{-11}F$ on obtient deux décharges partielles

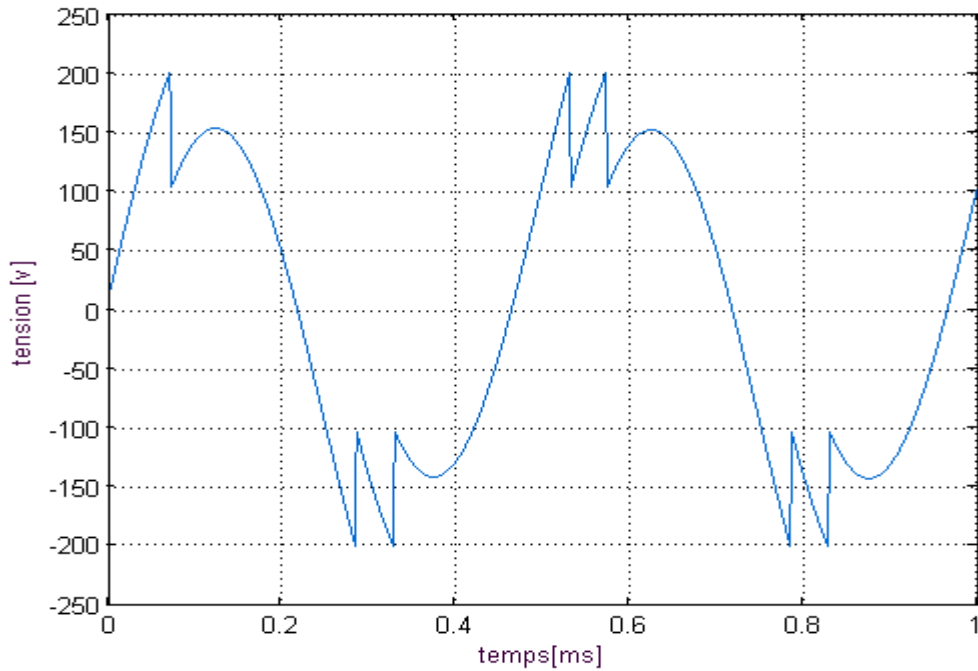


Figure II.39 : *Activité des décharges partielles pour $C_2=10^{-11}F$*

II.13 Conclusion

Les décharges partielles qui peuvent se produire dans les cavités contenues dans un isolant dépendent de plusieurs facteurs. Dans ce chapitre, utilisant un calcul numérique de la cavité, l'impact de la position, l'effet de la taille, de la forme et de l'orientation par rapport au champ électrique ont été étudiés. En outre, le phénomène d'interaction entre les cavités a été également discuté. Les résultats de simulation montrent que le champ dans une cavité dépend de sa position. Par contre cette grandeur est indépendante de la taille. Toutefois la région où la distribution de champ électrique est affectée dépend fortement de la taille de la cavité. Ainsi nous pouvons conclure que les cavités de taille importante favorisent d'avantage l'apparition du phénomène de décharges partielles. En présence d'une deuxième cavité le champ électrique augmente dans chaque cavité. Les deux cavités entreront en interaction si elles sont situées dans une zone d'influence estimée à cinq fois le diamètre de la cavité.

La température favorise considérablement l'apparition des décharges partielles, en effet, les décharges apparaissent notamment dans des cavités de faibles diamètres si ces dernières se présentent dans des positions près de l'âme où la température est relativement élevée.

D'après les résultats obtenus par simulation du modèle ABC, on peut dire que les facteurs imposés tels que le niveau de tension et la fréquence influence considérablement l'activité des décharges partielles dans un défaut contenu dans l'isolant solide. En effet, le nombre de décharges devient plus important pour de valeurs de tensions croissantes. C'est le cas aussi pour des fréquences élevées.

En terme de facteurs liés au circuit lui-même et qui correspondent aux propriétés du matériau et les propriétés du défaut, on a pu constater que ces facteurs pourront influencer sur l'activité des décharges. Néanmoins, cette dépendance n'est pas vraiment claire. Un nombre important de décharges a été enregistré pour des valeurs des résistances et capacités bien déterminées, en dessous et au dessus de ces valeurs, le nombre des décharges partielles diminue.

Chapitre III

ÉQUIPEMENTS EXPERIMENTAUX ET PROCEDURES D'ESSAIS

Introduction

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans la salle haute du Laboratoire PLAsmas et Conversion d'Énergie (Laplace) de Toulouse. La mise en évidence expérimentale du phénomène des décharges partielles nécessite la mise au point d'un banc d'essai spécifique. Nous présentons dans ce qui suit : le dispositif d'application de la tension, le dispositif de détection et de mesure et le dispositif de traitement des décharges partielles. Nous consacrons également une partie de ce chapitre à la description du logiciel d'acquisition et de traitement des décharges partielles. Nous présentons également les autres dispositifs qui nous ont permis de réaliser ce travail tel que l'enceinte climatique, étuve, cellule de pression,... les différentes cellules utilisées ainsi que les types d'échantillons utilisés. Les conditions de mesure vont être modifiées de manière à étudier leurs effets sur le phénomène des décharges partielles (température, humidité, pression,...).

III.1 Présentation du dispositif expérimental

L'ensemble du dispositif est représenté dans le schéma de la figure suivante.

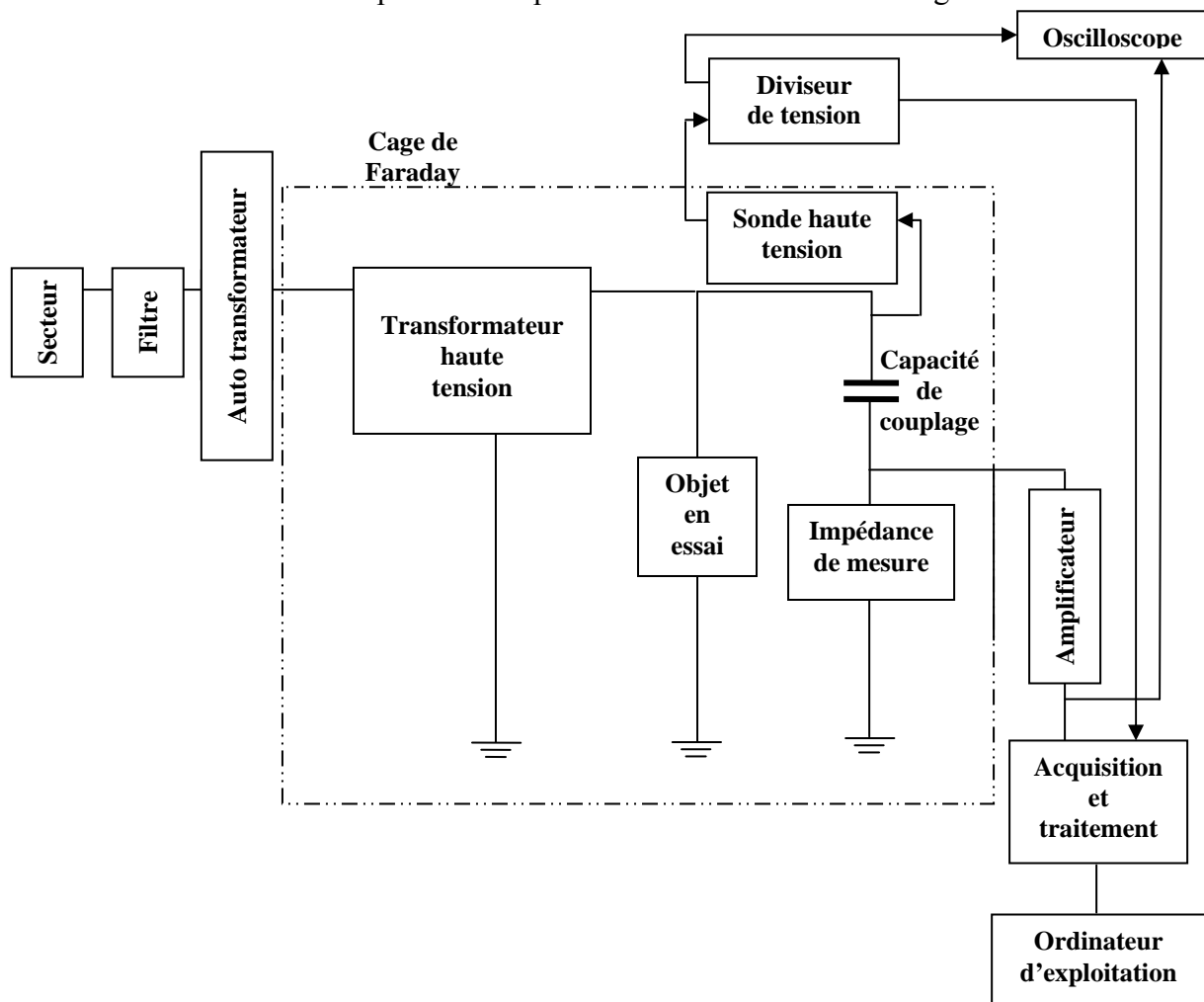


Figure III.1 : Schéma synoptique du dispositif expérimental

Comme le montre la figure ci-dessus, le dispositif expérimental comprend essentiellement :

1. Auto transformateur 220 V.
2. Transformateur haute tension.
3. Filtre 220 V.
4. Cage de Faraday
5. Sonde haute tension 1000 V.
6. Capacité de couplage ($C= 98 \text{ pF}$).
7. Oscilloscope digital Tek Tronix TDS 310.
8. Système numérique de détection des DPs

Le dispositif de détection et de mesure des décharges partielles utilise les manifestations électriques. La caractérisation électrique directe des décharges partielles n'étant pas simple, étant donné qu'elles sont internes dans l'isolant, on s'intéresse aux effets électriques vus de l'extérieur. En effet lorsqu'une décharge partielle apparaît dans la cellule d'étude, un courant apparent circule dans le circuit externe.

III.2 Dispositif d'application de la tension et de mesure des DPs

III.2.1 La source de tension variable

Un générateur de tension alternative sinusoïdale de fréquence 50 Hz, commandé manuellement permet d'appliquer une tension d'amplitude variable pour atteindre la tension seuil d'apparition des DP. Il s'agit soit de l'association auto transformateur/transformateur, soit d'un générateur BF alimentant un amplificateur de puissance. La valeur seuil observée dépend de nombreux paramètres : sensibilité de la mesure (perturbation par des signaux parasites), ainsi que de l'attention de l'opérateur. Le transformateur H.T. d'alimentation doit être lui-même dépourvu de décharges partielles, pour cette raison la valeur efficace de la tension secondaire est volontairement limitée à $15 \text{ kV}_{\text{eff}}$

III.2.2 Cage de Faraday

Notre dispositif de détection et de mesure des décharges partielles a une très grande sensibilité. Il est donc souhaitable d'avoir un niveau de bruit suffisamment faible afin de l'utiliser au meilleur de sa sensibilité.

Les sources de bruit sont nombreuses ; dans le cas de notre dispositif, on peut citer principalement les décharges dans les contacts électriques, les décharges dans le transformateur d'alimentation. Le bruit de fond est acheminé vers le détecteur à travers les

connections de la source haute tension ou de l'alimentation du circuit de détection ou par induction électromagnétique dans la boucle du circuit à tester.

La partie haute tension du circuit de mesure (transformateur, cellule d'étude, capacité de couplage et impédance de mesure) est placée dans le compartiment de la cage de Faraday. Cette dernière est convenablement mise au potentiel de terre. Une borne de l'échantillon est connectée à la sortie du générateur de tension. La seconde borne est reliée à la capacité de couplage. La capacité de couplage dispose d'une prise BNC à laquelle est connectée la tête de mesure du système de détection des DP (impédance de mesure) est connectée. Un soin particulier doit être apporté aux connexions haute tension afin d'éviter qu'elles ne soient le siège de décharges parasites.

III.2.3 Fonctionnement du mesureur

L'échantillon étant un diélectrique, il se présente sous forme d'un assemblage complexe de capacités entre les divers points soumis à la tension. Les capacités localisées dans une cavité, sont elles mêmes insérées en série avec des capacités constituées par les milieux isolants à gradient disruptif très élevé. Lorsqu'un phénomène de décharges partielles apparaît dans une cavité, elles se matérialisent par un claquage d'un condensateur (fictif) parmi un réseau très complexe. Si l'on considère que l'impédance de source du circuit d'alimentation est très élevée en haute fréquence, le front de décharge qui apparaît dans la cavité se retrouvera en partie aux bornes de l'échantillon en essai et il en est ainsi pour chaque phénomène issu des divers points soumis au même effet.

La méthode, qui est mise en application pour atteindre cet effet électrique représentatif du phénomène de décharges partielles, consiste à mesurer la perturbation apportée à la tension d'alimentation (alternative sinusoïdale 50Hz, 60Hz ou autre dépourvue d'harmoniques) aux bornes de l'appareil en essai.

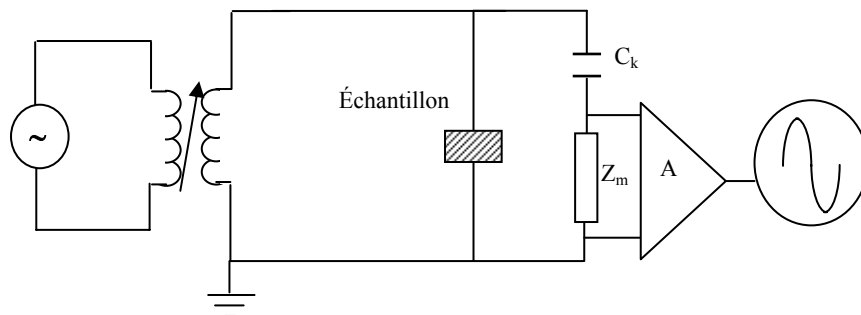


Figure III.2 : Schéma de principe de la détection des DP

La capacité de couplage C_k , dont l'impédance est faible vis-à-vis des courants de décharges qui sont de haute fréquence, doit impérativement supporter la totalité de la tension sans donner lieu à un phénomène de décharges partielles, mais transmettre par sa faible capacité (de l'ordre de 100pF) en haute fréquences, la totalité des impulsions liées au phénomène de décharges partielles. Le condensateur se comporte donc comme une source de courant.

Il est nécessaire d'écouler ce courant à basse fréquence par une impédance de mesure Z_d , elle est branchée en série avec la capacité de couplage. Elle peut être de type RC (parallèle) ou RLC (parallèle). Dans notre cas l'impédance de mesure est un quadripôle (CIL fournie avec le système de détection des DP). Il est constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance d'atténuation. L'inductance et la résistance sont calculées pour former, avec la capacité de couplage, un filtre passe-haut de second ordre. Ce filtre tend à atténuer l'harmonique fondamentale de la tension (50 Hertz) et à amplifier les phénomènes rapides provoqués par une décharge partielle. La figure III.3 présente le schéma électrique de ce dispositif.

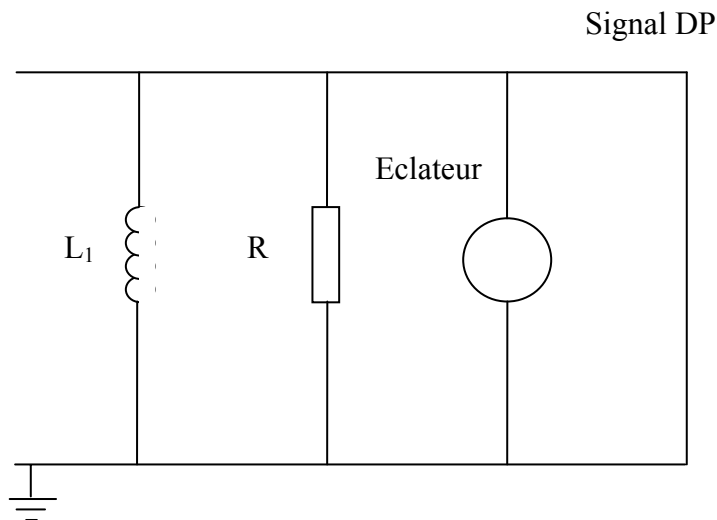


Figure III.3 : *Quadripôle CIL*

Le courant écoulé par l'impédance de mesure est ensuite injecté à l'entrée d'un amplificateur, large bande. La sensibilité (en termes de PC) dépend des connections dans le circuit de mesure et du niveau de bruit.

Enfin les courants des DP se traduisent par une série d'impulsions apparemment aléatoires de très faibles amplitudes et de très courte durée (avec un temps de montée de l'ordre de nanoseconde) visibles à l'oscilloscope.

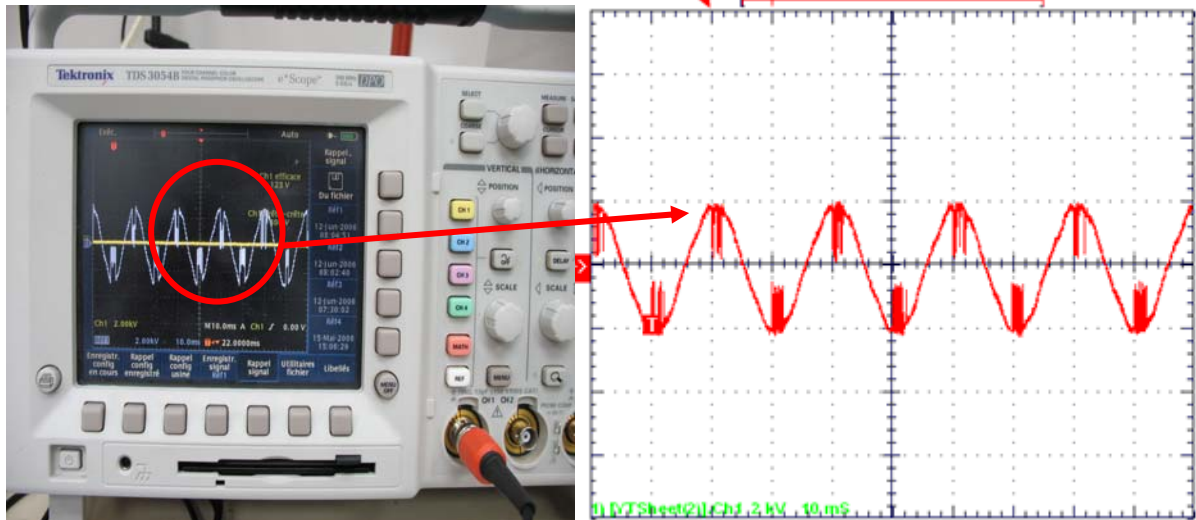


Figure III.4 : *Impulsions des décharges partielles*

Avant chaque acquisition, on effectue une calibration de la charge en injectant aux bornes de la cellule d'étude une charge connue délivrée avec une fréquence donnée par un générateur de décharges appelé calibreur. On effectue également une calibration de la phase. Cette opération permet de faire coïncider le passage par zéro de la tension appliquée à la cellule d'étude avec la position zéro du compteur de position dans le cycle.

Le calibreur utilisé est fourni avec le système de détection des décharges partielles. C'est un générateur d'impulsions qui permet de régler l'amplitude et la polarité d'une seule impulsion de charge par cycle. Cet instrument est synchronisé avec la fréquence de la ligne de tension par l'intermédiaire d'une photodiode. L'impulsion de charge du calibreur est engendrée par l'injection d'un échelon variable de tension à travers une capacité fixe. Le calibreur doit être relié en parallèle avec l'objet à tester. La gamme de charge standard pour CAL1 est 1/2/5/10/20/50/100 PC. Etant donné que le calibrage de l'appareil de détection est en fonction des paramètres diélectriques de l'objet, il est nécessaire de le recalibrer à chaque essai.

III.3 Dispositif d'acquisition et de traitement

Le dispositif d'acquisition et de traitement utilisé dans notre étude pour la détection des décharges partielles fonctionne sous environnement Windows. Il s'agit d'un détecteur numérique utilisable sur une large palette d'applications ; c'est l'ICMsystem. Il fait partie de la famille des détecteurs de décharges partielles numériques conçus par Power Diagnostix. Cet appareil, commandé par un logiciel, permet l'évaluation de l'état de l'isolation des

équipements moyenne et haute tension. Il transmet les impulsions électriques associées aux décharges en respectant leurs amplitudes et angle de phase dans une représentation trois dimensions. L'ICMsystem est utilisable sur une vaste bande de fréquences comprenant les fréquences des réseaux de transport et distribution ainsi que les fréquences spécifiques d'essai.



Figure III.5 : *Dispositif de détection de DP (unité d'acquisition et accessoires)*

Le dispositif de détection comprend essentiellement une unité d'acquisition. C'est une petite armature en métal constituée par plusieurs modules comme le montre la figure III.4. On peut trouver les modules d'alimentation, conversion A/N, contrôle,...comme cette unité d'acquisition est employée avec toutes les applications, l'adaptation aux besoins spécifiques d'une certaine application exige le choix des préamplificateurs appropriés. Cependant, une grande variété d'accessoires est raccordables à l'ICMsystem.

III.3.1 Logiciel de traitement

Le logiciel d'acquisition du système ICM présente de nombreuses fonctionnalités. Il permet de fixer certains paramètres de l'expérience : la gamme de fréquence spectrale de détection utilisée, la calibration, la durée d'acquisition, le niveau de l'amplification.

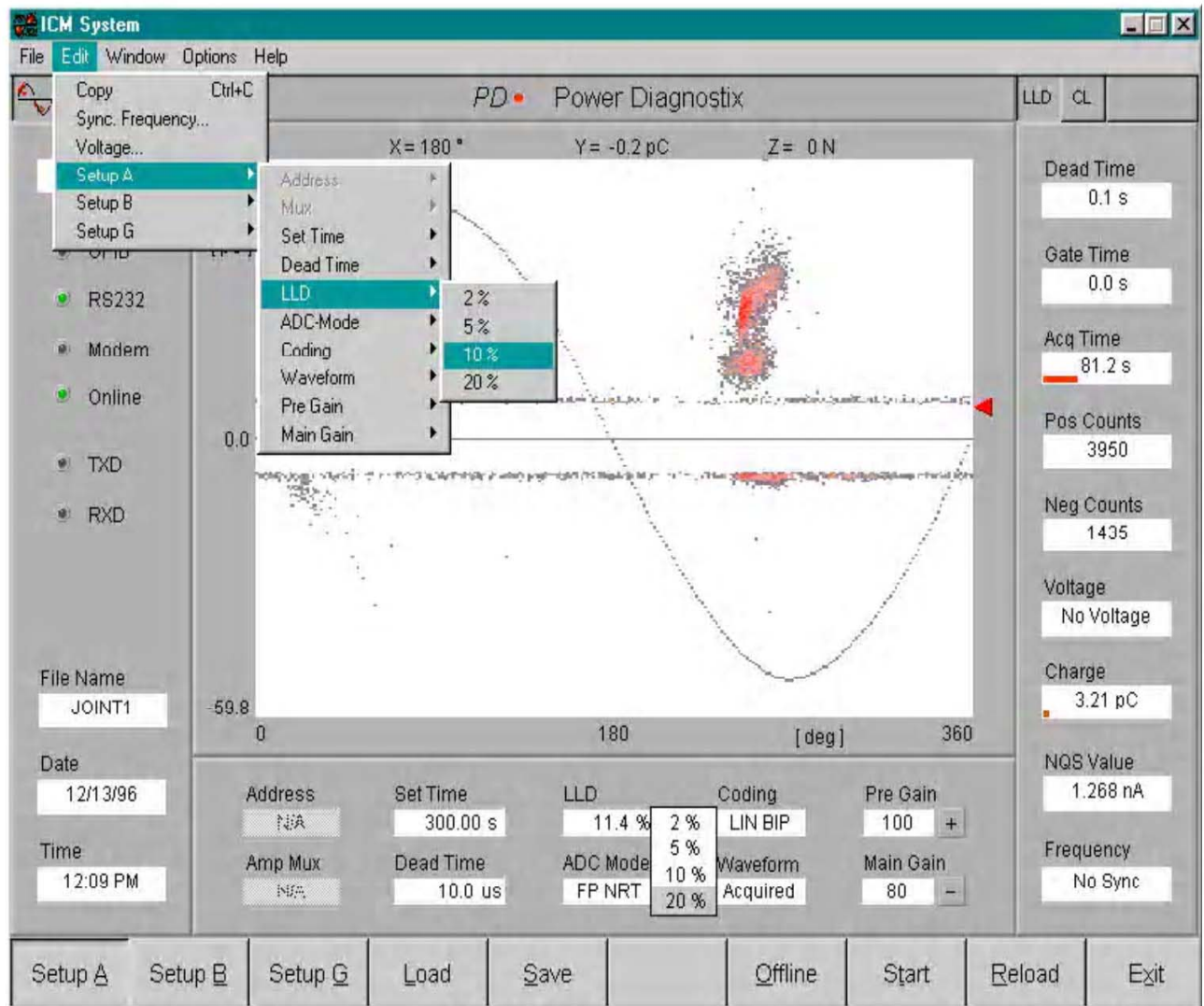


Figure III.6 : Editeur du logiciel du traitement des *DP*

Les résultats d'une acquisition peuvent se regrouper dans un tableau qui donne pour chaque mesure les paramètres calculés ainsi que les graphes obtenus. Enfin, la charge apparente des différentes décharges, leur nombre et leur distribution dans la phase peuvent être relevés directement. Le logiciel permet de calculer pour chaque polarité, les grandeurs statistiques (*Skewness et Kurtosis*) présentées dans la figure suivante.

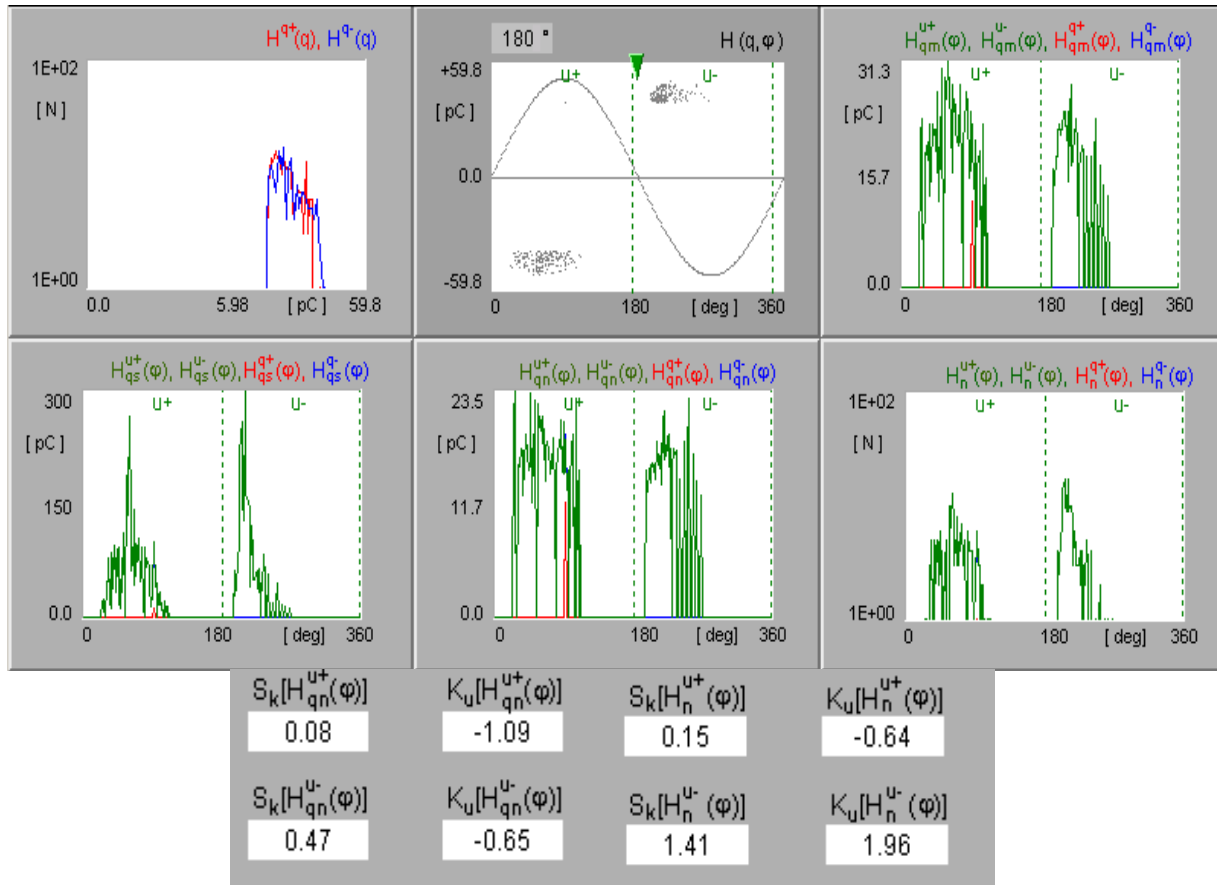


Figure III.7 : Exemple d'une acquisition des DP

Lors de l'acquisition, un point s'affiche sur l'écran de l'ordinateur à chaque fois qu'une décharge est détectée, à l'endroit de la sinusoïde qui correspond à l'apparition de cette décharge. Une acquisition se termine lorsque la durée d'acquisition initialement choisie a été atteinte. Il est également possible d'arrêter la mesure simplement en quittant le programme d'acquisition.

III.4 Cellules d'étude

Dans la plupart de nos essais, les échantillons sont de type sandwich. Dans ce cas et selon le type d'essai deux cellules de modèle sandwich sont utilisées. Une cellule simple est utilisée dans le cas d'étude de l'influence de la température et l'humidité, et autre cellule pour l'étude de l'influence de la pression.

III.4.1 Cellule de température et d'humidité

Cette cellule est utilisée dans le cas d'étude de l'influence de la température et de l'humidité. Elle est constituée par deux corps en matériau plastique (Téflon). Sur chaque corps est fixée une électrode en acier sous forme cylindrique et avec des angles bien arrondis afin d'assurer une bonne répartition du champ (homogène) entre les deux électrodes.

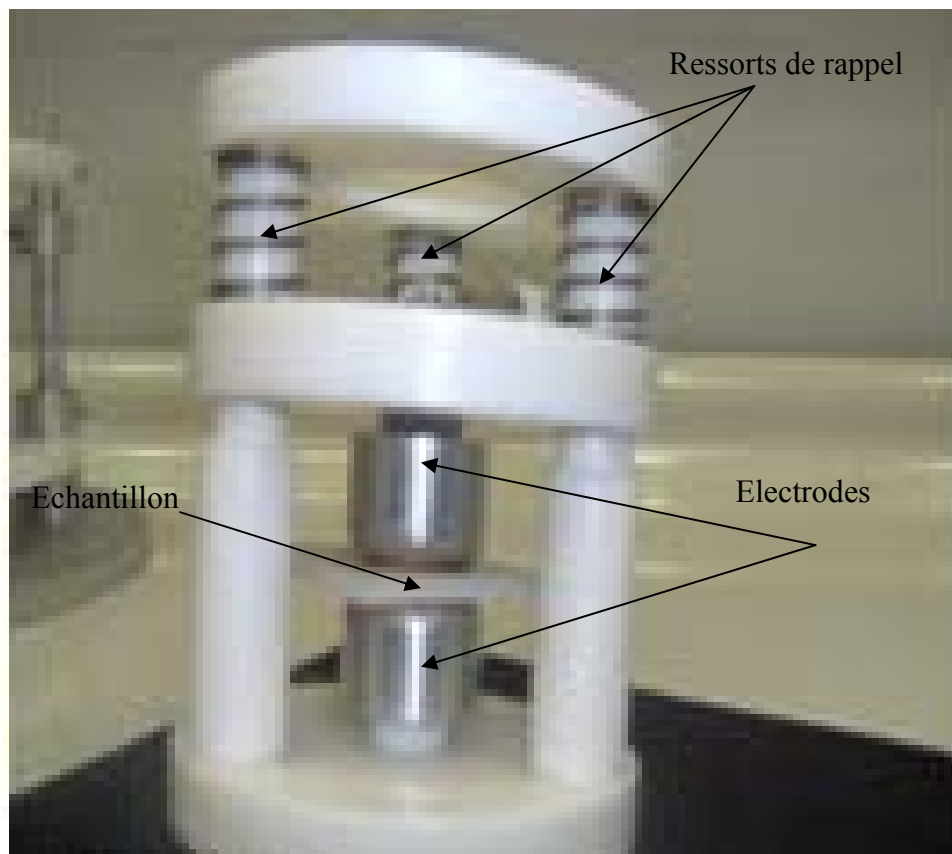


Figure III.8 : *Cellule de mesure qui porte l'échantillon sandwich*

Comme le montre la figure ci-dessus, les deux parties de notre cellule sont assemblées à l'aide des trois ressorts de rappel montés sur trois colonnes creuses en téflon. Les trois colonnes contiennent un système boulon Crous qui permet de bien plaquer les électrodes sur l'échantillon.

III.4.2 Cellule de pression

Afin de contrôler la pression, une cellule de pression a été conçue pour cette raison. C'est une enceinte étanche en acier à l'intérieur de laquelle nous avons placé le système des électrodes ; dont une est fixée sur un axe solidaire à une vis micrométrique permettant de régler la distance inter électrodes selon l'épaisseur de l'échantillon. A l'aide de deux pompes connectées en parallèle, des niveaux de pression pouvant atteindre jusqu'à 10^{-2} mBar ($\sim 7.10^{-2}$ Torr) peuvent être obtenus à température ambiante.

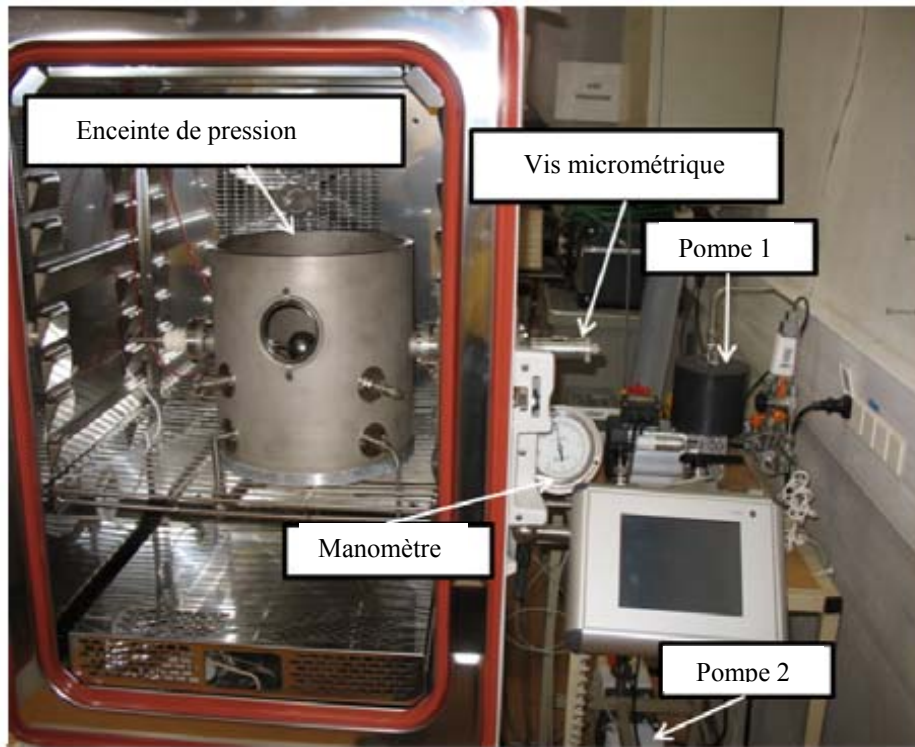


Figure III.9 : Photographie globale du banc d'essai

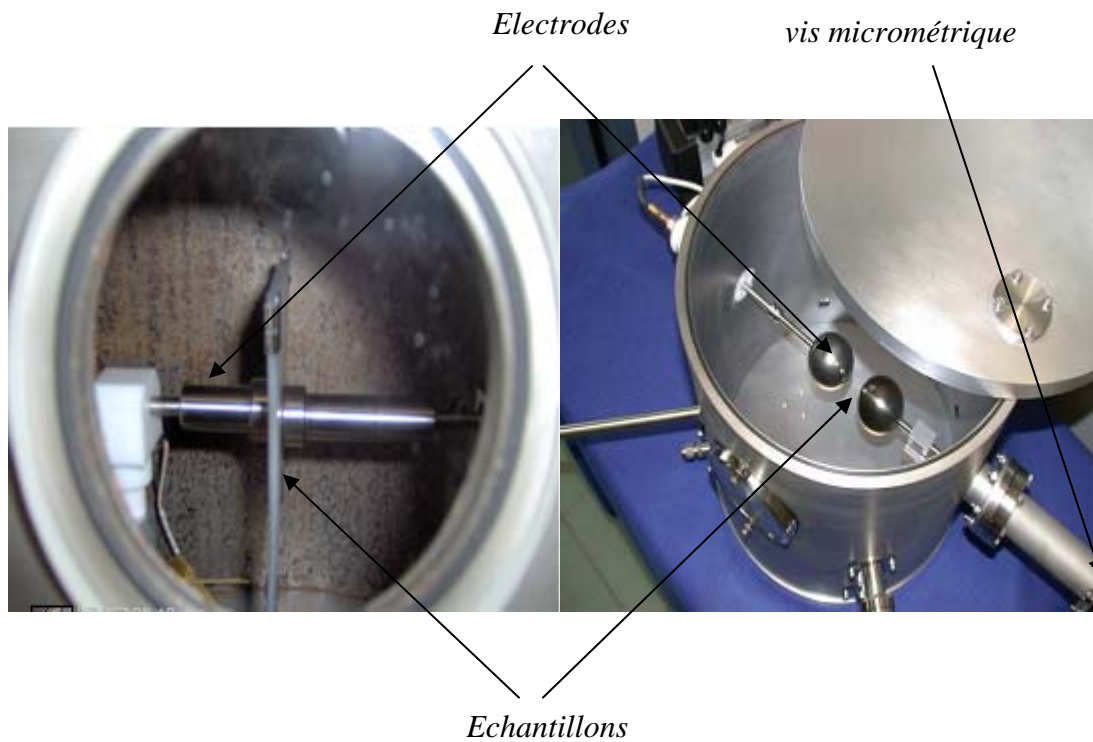


Figure III.10 : Photographie de l'enceinte de pression et des électrodes

L'enceinte de pression d'environ de 0.02 m³ de volume, contenant le système des électrodes, est placée à l'intérieur de l'étuve. Les électrodes sont en acier inoxydable [nuance316]. Ce matériau, avec une meilleure résistance à la corrosion, est utilisé pour le contact avec des produits liquides dans toute une gamme d'environnement. Sa composition est présentée dans le tableau III.1.

Eléments	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N
Pourcentage	0.08	2.0	0.75	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	0.10

Tableau III.1 compositions des électrodes [www.sepha.com/stainless.htm]

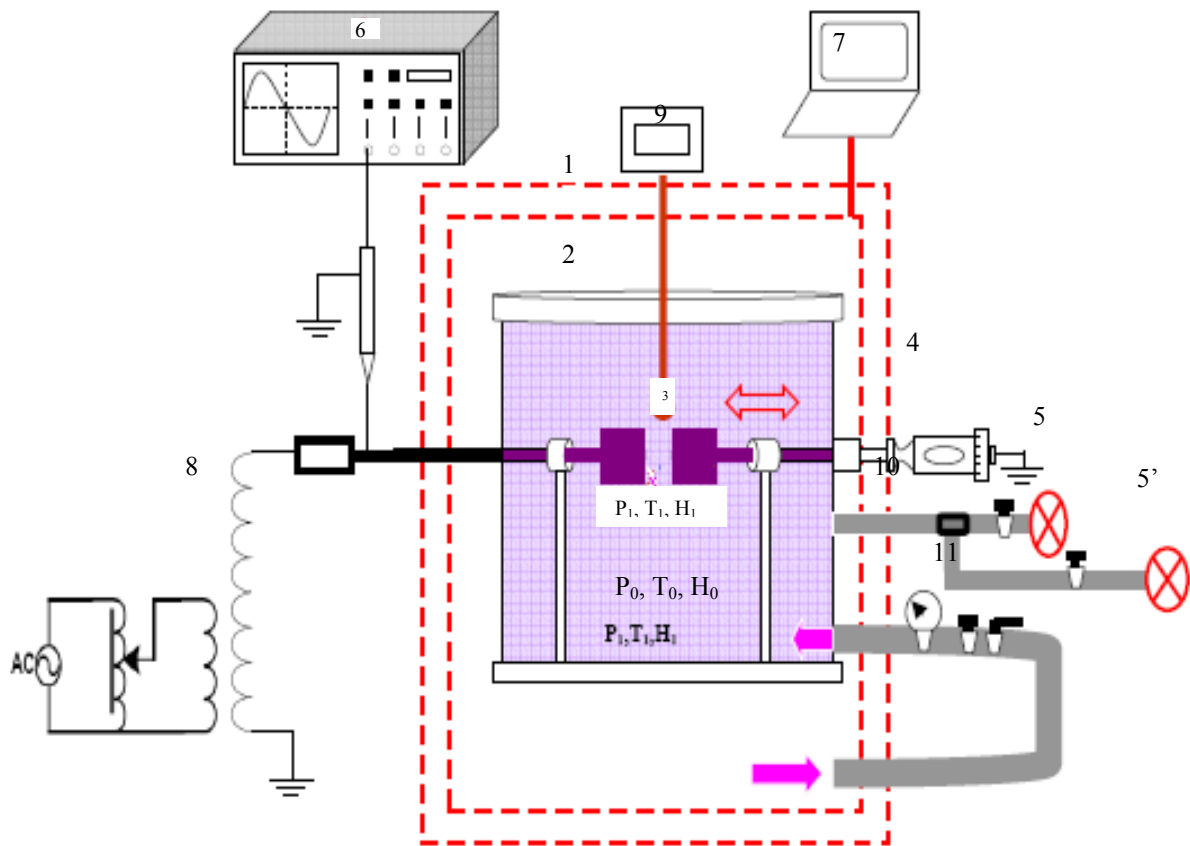


Figure III.11 : Schéma synoptique du banc de test et du circuit de mesure en fonction de la pression

Le réglage de l'atmosphère de l'étuve est contrôlé par un ordinateur (7) et réglée dans l'enceinte de pression à l'aide des vannes (11). Deux pompes (5 et 5') connectées en parallèle et fonctionnant simultanément en fonction de la température permettent l'obtention de niveaux de pression jusqu'à 10⁻²mBars (~7.10⁻²Torr) à température ambiante. La lecture du niveau de pression se fait à l'aide d'un manomètre (10). La température à l'intérieur de l'enceinte est mesurée à l'aide du thermocouple (9).

Afin de minimiser les erreurs sur la distance entre les électrodes liées à la dilatation différentielle des matériaux, celle-ci n'est fixée qu'une fois que l'environnement est thermiquement stable.

II.5 Préparation d'échantillons

III.5.1 Echantillon type sandwich

Comme nous l'avons déjà mentionné, la plupart de nos essais étaient sur des échantillons sandwich. Les caractéristiques géométriques de l'échantillon étudié sont données dans la Figure III.12.

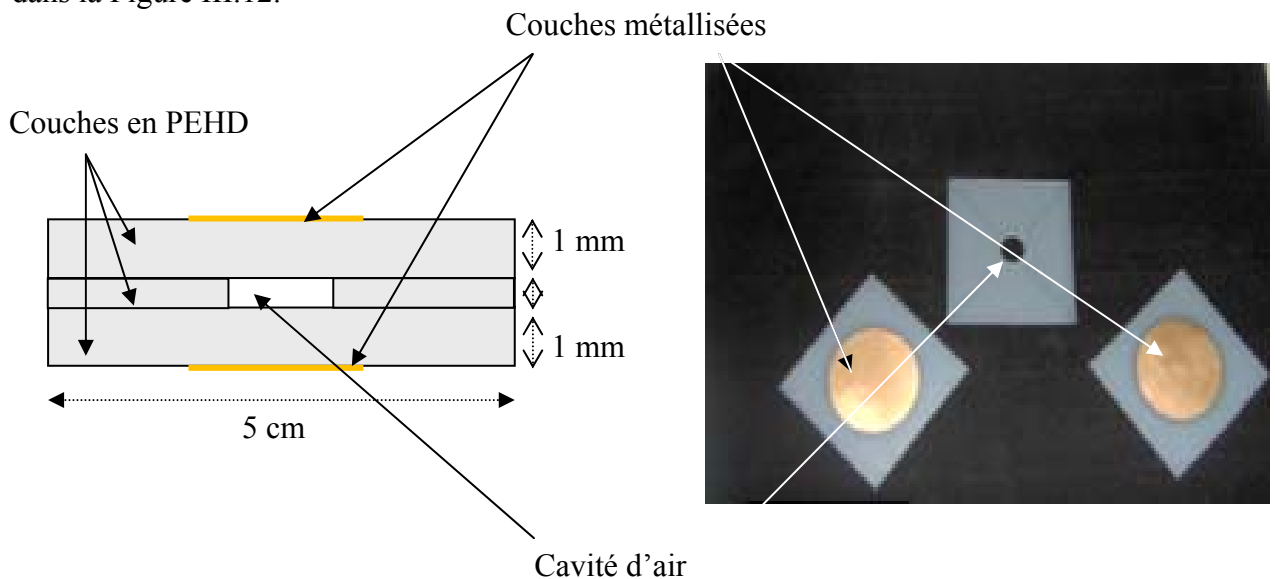


Figure III.12 : Structure de l'échantillon type sandwich

L'échantillon, de forme carrée, se compose d'une couche mince en polyéthylène haute densité. Cette couche, divisant deux autres couches d'épaisseur de un millimètre, contient un trou de 15mm de diamètre qui représente la cavité. Ces dimensions sont calculées à partir de la courbe de Paschen afin d'atteindre une tension VDIV pour une tension appliquée de quelques kilovolts. Les trois couches sont bien plaquées et assemblées en utilisant des pincettes démontables.

Une couche de métallisation en or, de 300\AA d'épaisseur et de 3 centimètre de diamètre, est pulvérisée sur les deux cotés externes de l'échantillon. Ces deux couches assurent le contact électrodes-échantillon. La métallisation sous vide par pulvérisation cathodique est réalisée grâce à une Sputering Or.

Dans le cas de caractérisation des décharges partielles en fonction des charges d'espace nous avons introduit quelques modifications sur l'échantillon montré ci-dessus. Cependant Une couche métallisée de 0.9 micron mètre est déposée du côté intérieur de la couche

extérieure. Comme le montre la figure III.13 et avec une face métallisée de la cavité, cette configuration nous permet d'introduire une quantité contrôlée de charges dans le volume de l'échantillon. Cela est possible si on applique une tension à courant continu sur la paroi métallisée de la cavité.

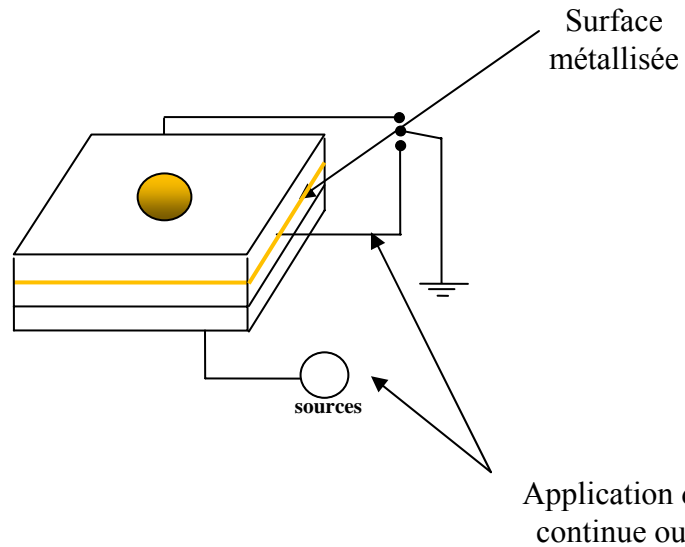


Figure III.13 : Structure de l'échantillon type sandwich utilisé dans le cas de l'étude de l'influence de charges d'espace sur les DP

III.5.2 Echantillon type câble

Dans une autre application, des essais ont été faits sur un câble de transport d'énergie électrique. Le câble de tension nominale 12 kilovolts est unipolaire et de couche isolante de 7 millimètres. Deux échantillons, comme le montre la figure III.14, ont été préparés.

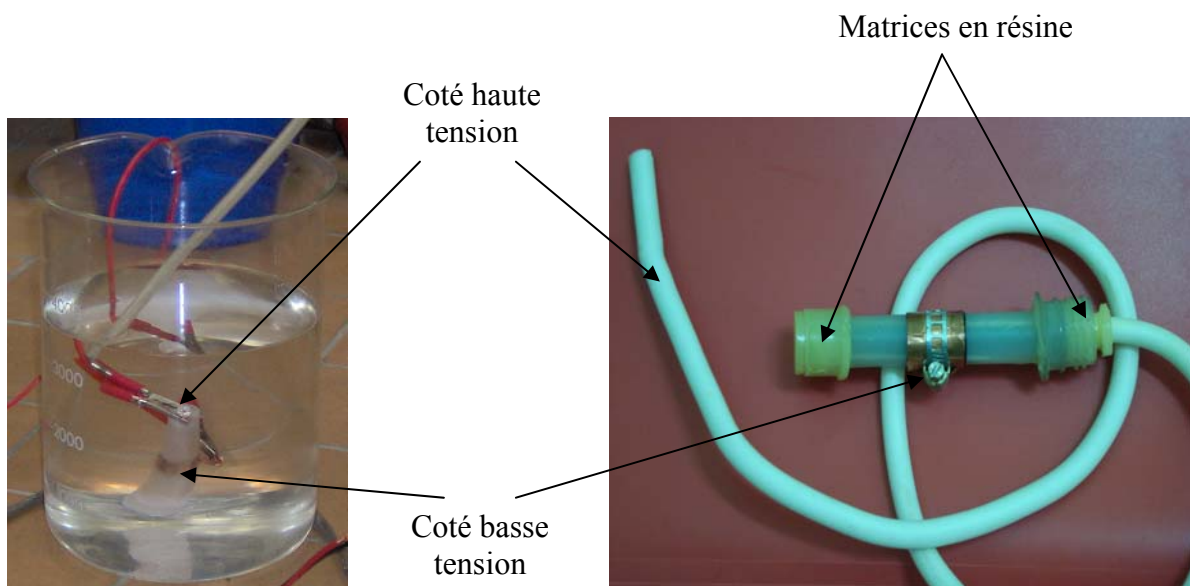


Figure III.14 : Echantillon de type câble

Les deux échantillons, de longueur 12 centimètres, ont été préparés de la même façon sauf que dans un échantillon nous avons créé des défauts artificiels en utilisant une perceuse très précise. Les défauts sont créés sur la longueur du câble et selon l'axe Z, ils ont une forme tubulaire de 1 millimètre de rayon et parallèle à l'âme conductrice.

Dans une autre étape, nous avons enlevé la gaine de protection externe ainsi que la couche métallique et la couche semi-conducteur sur l'isolant. Ensuite, nous avons soudé l'âme conductrice du câble à un conducteur bien isolé afin d'alimenter le câble, en appliquant une tension alternative. La couche métallique, en cuivre, que nous avons enlevée est utilisée pour créer l'électrode basse tension. Pour cela nous avons enroulé un ruban juste au milieu de l'échantillon, puis un dispositif de serrage est utilisé pour bien assurer le contact couche métallique-isolant.

Dans une dernière étape les deux extrémités de l'échantillon sont moulées dans une matrice en résine. Cette technique nous permet d'éviter tout phénomène de contournement et ainsi que l'apparition possible des étincelles. Comme le montre la figure III-14, l'échantillon de câble est immergé dans un récipient rempli d'huile de transformateur (huile standard de Rhodosoil 604 V50). Cela nous permet de limiter les décharges sur la surface.

III.6 Mode opératoire et protocoles expérimentaux

III.6.1 Essais en température-humidité

Le climatogramme présenté sur la figure III.15 définit la plage possible des essais combinés « température-humidité ».

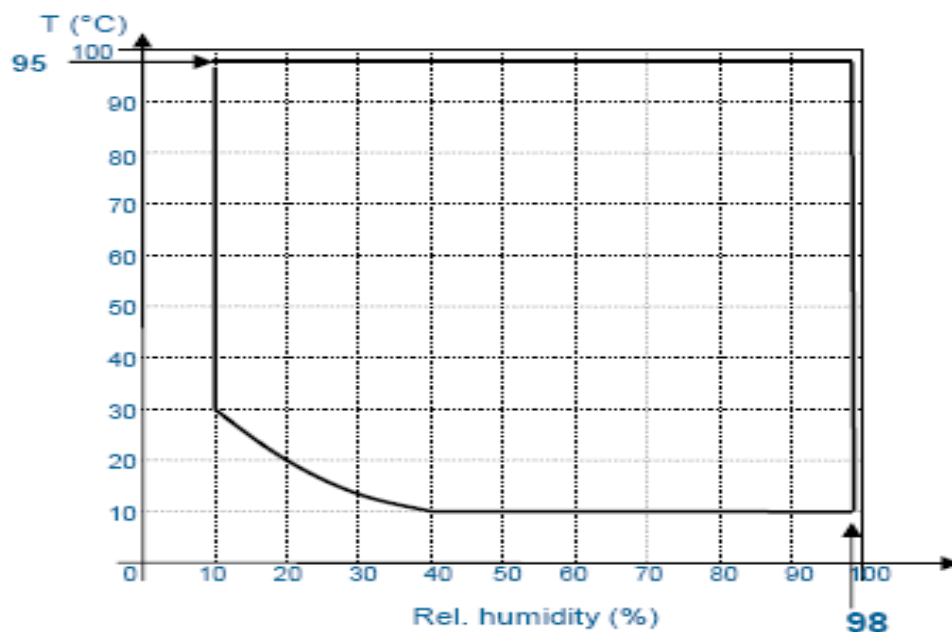


Figure III.15 : Climatogramme de l'enceinte utilisée.

Une fois que les conditions fixées sont stables, on effectue le réglage de la distance inter-électrodes et on procède aux essais.

L'enceinte à l'intérieur de laquelle se trouve la cellule étant fermée. Le conditionnement s'effectue par circulation d'air prélevé à l'intérieur de l'étuve, les vannes de régulation étant ouvertes. Il est important de constater que des résultats identiques sont obtenus même si l'enceinte est ouverte. A température constante, il est possible de régler définitivement la distance inter-électrodes et de procéder ensuite à un balayage en humidité ou température.

A partir de certaines valeurs de température et pour un taux d'humidité relative élevé, l'apparition des gouttelettes d'eau sur les électrodes et les parois de la cavité réduit la distance de décharge jusqu'à le court-circuiter. Ceci peut être observé pour des valeurs de température aussi faible que 30°C mais pour des taux d'humidité relative très élevés (98%).

Aussi, afin de réduire au maximum les éventuelles erreurs, l'impact de l'effet de la quantité de l'humidité n'est donc étudié que sur la plage de température n'entraînant pas l'apparition de gouttelettes d'eau.

III.6.2 Essais en pression

Les vannes de prélèvement étant fermées, la mise en marche de la pompe permet d'effectuer des essais à des pressions inférieures à la pression atmosphérique. Si un conditionnement est souhaité, on jouera sur les vannes de pompage et de prélèvement pour obtenir le couple (P, T) souhaité.

III.6.2.1 Pompage

L'obtention d'une dépression est réalisée à l'aide de deux pompes disposées en parallèle (5 et 5' sur la figure III.11) qui présentent des caractéristiques différentes, notamment au niveau de la puissance et de la plage de fonctionnement en température. La plus puissante (pompe primaire à palettes) fonctionne à température ambiante et permet d'atteindre un vide primaire de l'ordre de 10⁻² mbars. La deuxième (pompe à membranes) sert à maintenir le niveau de pression pour un conditionnement sur une large gamme de température.

III.7 Conclusion

Le choix de la méthode électrique pour la détection des décharges partielles ainsi que les contraintes influençant leurs apparitions est dicté par la disponibilité du matériel et dispositifs expérimentaux au niveau du laboratoire. Les échantillons représentatifs de SIE contenant des défauts sont de type câble et sandwich. Vu la sensibilité des DP, un soin particulier a été apporté signaux parasites en utilisant des filtres ainsi que la cage de Faraday.

Chapitre IV

IDENTIFICATION EXPERIMENTALE DES CONTRAINTES INFLUENÇANT LE PHENOMENE DES DECHARGES PARTIELLES

Introduction

Le processus des décharges partielles dépend de beaucoup de facteurs tels que la taille, la forme ainsi que la position du défaut. Dans ce chapitre, nous examinerons expérimentalement l'influence des autres facteurs tels la température, l'humidité, la pression de gaz ainsi que la charge emprisonnée aux niveaux des parois de la cavité.

L'ensemble des essais que nous allons décrire concerne différentes mesures permettant d'évaluer le niveau d'apparition des décharges partielles en fonction de différentes contraintes.

IV.1 Influence de la température sur l'initiation des décharges partielles

Nous avons bien montré, dans le deuxième chapitre, que pour des défauts de très faibles diamètres le phénomène de décharges partielles est plus accentué si celles-ci se présentent près de l'âme conductrice. A cette position la température est plus élevée. Cela nous mène à prendre en considération ce facteur important.

Dans ce qui suit nous allons étudier expérimentalement l'influence de la température sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles, la distribution de phase et de nombre sur un câble de transport d'énergie. Les échantillons du câble, de 12 kV de tension nominale (câble sur lequel on a fait des simulations), sont préparés selon les étapes présentées dans le chapitre II (voir §III.5.2).

L'activité des décharges partielles est mesurée grâce à l'installation expérimentale rapportée dans la figure IV.I. Deux filtres sont utilisés pour réduire le bruit porté par le réseau : le premier (basse tension) à l'entrée de l'autotransformateur et le deuxième à la sortie du transformateur de HT. Une cage de Faraday est utilisée pour éviter toute interférence électromagnétique.

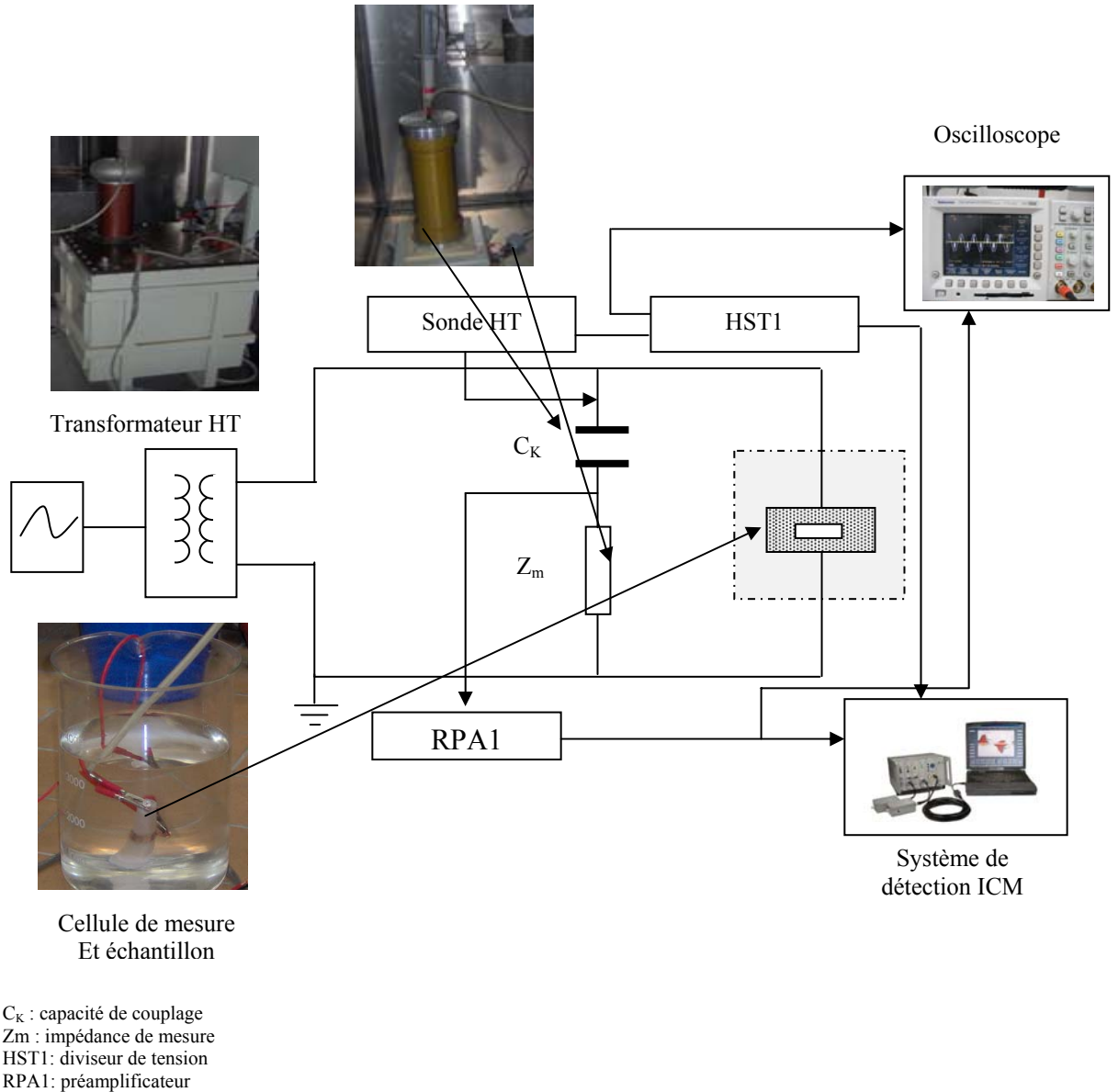


Figure IV.1 : Schéma de montage pour la détection des DPs dans un échantillon de câble

IV.1.1 Tension seuil d'apparition des DPs (VDIV)

En utilisant une étuve, les mesures sont effectuées pour différentes températures s'étendant de 20°C à 80°C. La figure suivante montre la variation de la tension seuil d'apparition des décharges partielles ainsi que la tension d'extinction en fonction de la température dans l'échantillon qui contient la cavité.

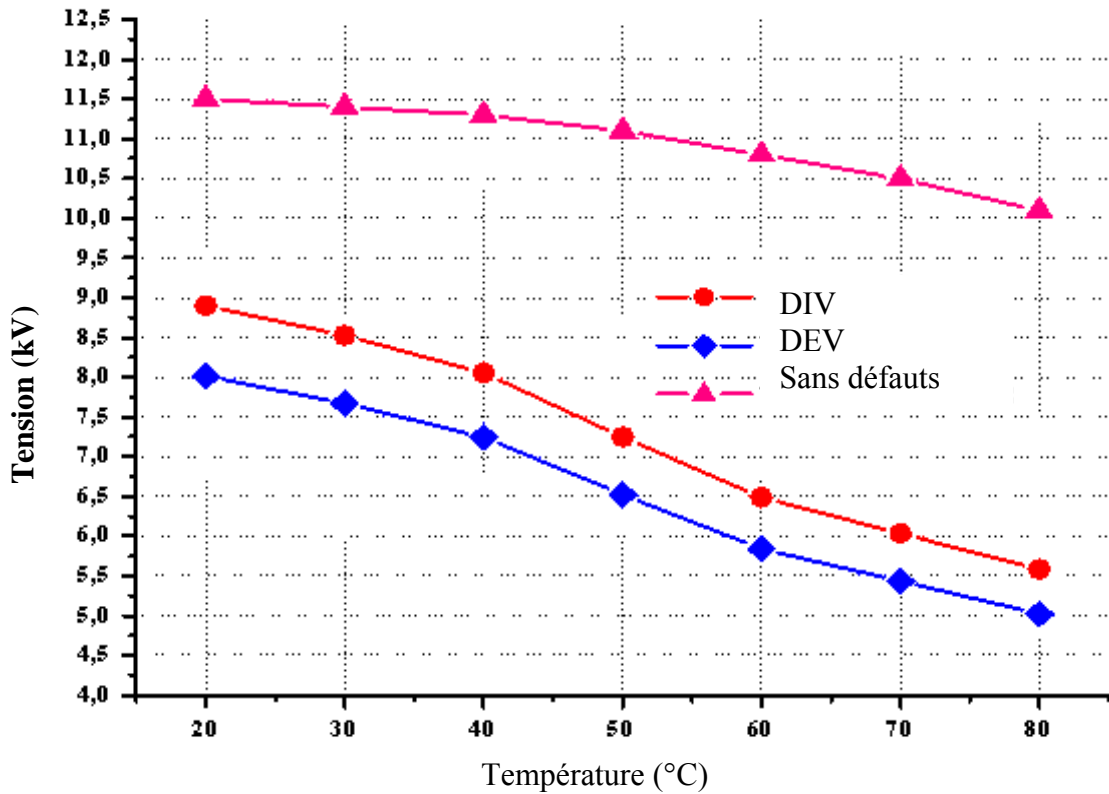


Figure IV.2 : Tension seuil d'apparition et d'extinction des DPs dans un échantillon de câble en fonction de la température

Pour une température s'étendant de $T = 20^{\circ}\text{C}$ à 80°C , nous notons que PDIV et PDEV diminuent lorsque la température augmente. D'une part cela peut être dû aux effets des délais statistiques (statistical time lag). On s'attend à ce qu'il soit plus grand pour un gaz avec une pression réduite et température plus froides [Gut.95]. D'une autre part, la température agit indirectement sur la tension claque d'air en biais de la densité d'air. La densité de gaz augmente avec la température et par conséquent la tension de claque d'air diminue.

En utilisant le logiciel Comsol Multiphysics, un simple calcul de la distribution du champ électrique dans l'échantillon de câble nous permet de calculer la valeur du champ disruptif du gaz contenu dans les défauts en fonction de la température (figure IV.3).

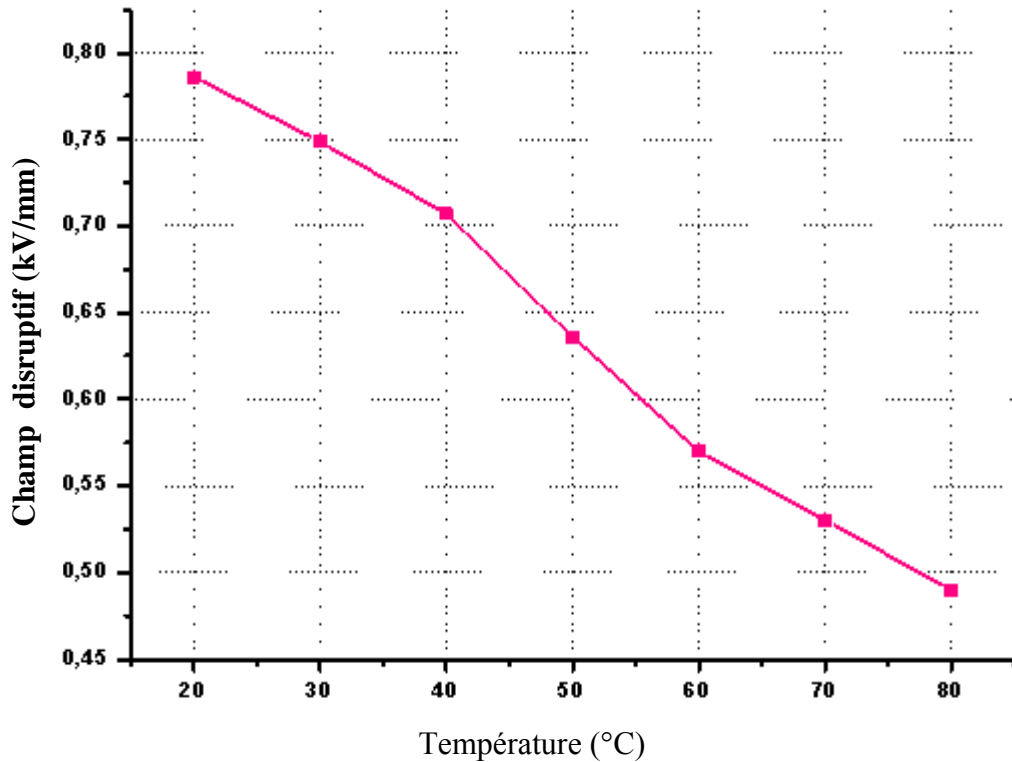


Figure IV.3 : Champ disruptif dans le défaut en fonction de la température.

Il est bien évident que le champ disruptif décroît lorsque la température augmente. Pour une augmentation de 300 % de la température le champ disruptif diminue de 38%.

IV.1.2 Distribution de l'amplitude et le nombre des DPs dans la phase

Pour notre échantillon et pour différentes valeurs de la température, les formes d'impulsion des décharges partielles, distribution de l'amplitude, distribution de nombre sont enregistrées et cela pour chaque valeur de température. Pour voir l'influence de la température sur ces grandeurs nous avons choisi deux températures : 20°C et 80°C. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure IV.4 et figure IV.5.

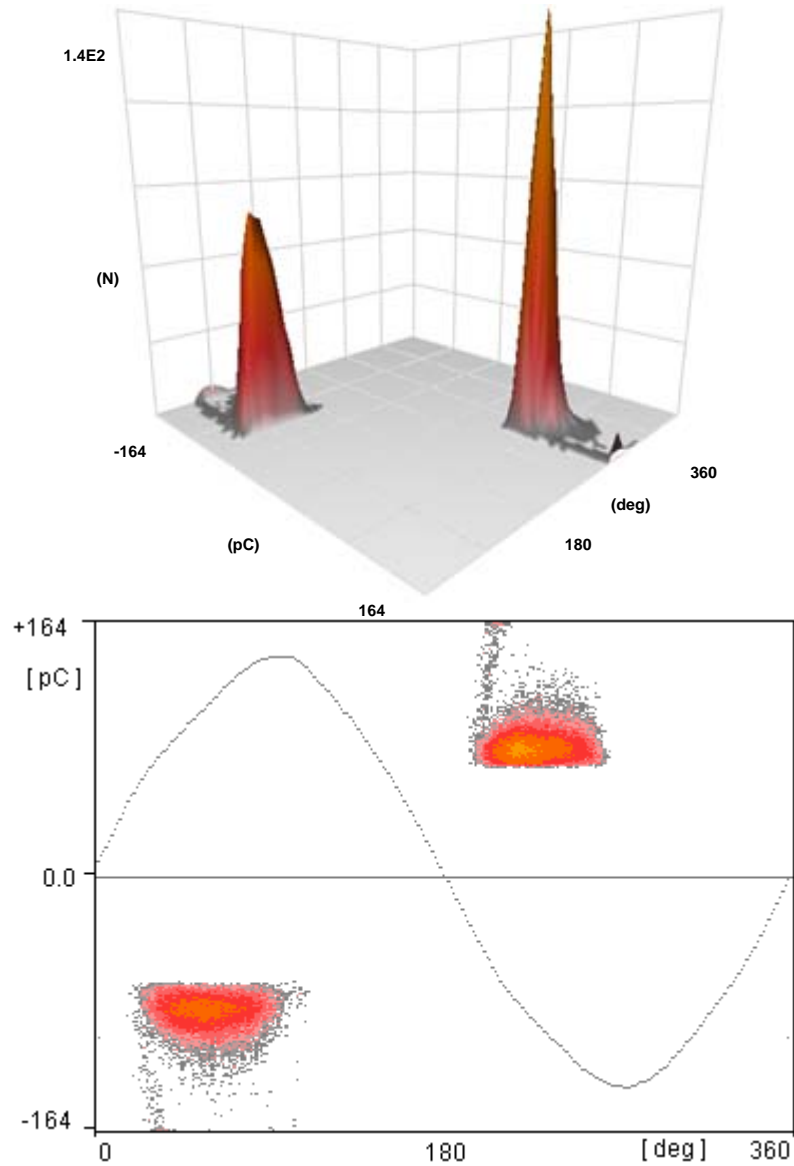


Figure IV.4 : *Distribution en trois dimensions des DP* pour une température de 20°C

Pour une température égale à 20°C, la figure IV.4 montre bien que la forme d'impulsion de décharge est relativement large, avec un nombre et taux de répétition élevé. Ainsi il est bien clair que l'amplitude des DP est relativement faible.

Une signature est symétrique lorsqu'il y a la même intensité des impulsions sur les deux alternances et la même distribution des impulsions en fonction de l'angle de phase. Dans ce cas la décharge se produit dans la cavité dont les parois sont de même nature. Une dissymétrie peut être due à une charge d'espace. La charge d'espace produite par une décharge partielle et réduit le champ électrique local. Sous une tension alternative, la polarité du champ local change périodiquement. La réduction du champ local pour une polarité de la tension conduit à une augmentation du champ sur la polarité opposée. La prochaine décharge sur le demi onde

de polarité opposée apparaît à une tension plus faible. L'effet des charges d'espace sera d'une part la modification de l'amplitude des décharges et d'autre part le décalage de l'angle de phase par rapport à l'apparition des décharges.

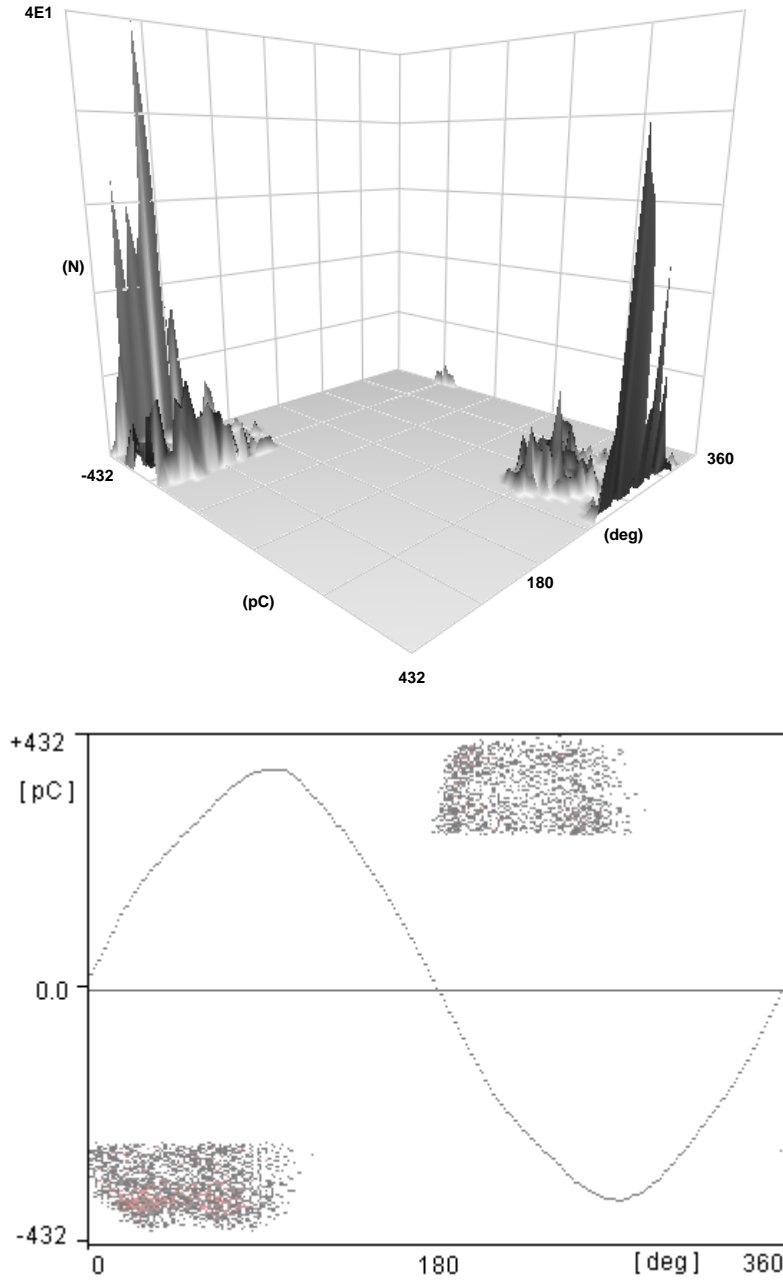


Figure IV.5 : *Distribution en trois dimensions des DPs pour une température de 80°C*

Pour une température de 80°C, la figure IV.5 montre une diminution du taux de répétition et augmentation de l'amplitude des DPs. Un taux décroissant de répétition avec la température peut être expliqué par la conductivité croissante des parois de la cavité. Une conductivité extérieure croissante mènera à un champ réduit dans la cavité et par conséquent

un taux réduit de répétition. Par contre l'augmentation de l'amplitude avec la température pourrait être expliquée par la décharge des distances plus grande le long du défaut [Mor.05].

IV.1.3 Cas du modèle de type sandwich

L'activité des décharges partielles en fonction de la température est étudiée pour le cas d'un échantillon de type sandwich (voir §II.5.3). Des mesures ont été effectuées pour plusieurs valeurs de température qui s'étend de 10°C à 85°C. A cet effet une enceinte climatique a été utilisée pour contrôler la température. Pour chaque essai et pour une température donnée on compte environ 20 minutes avant d'effectuer chaque essai. Cela nous permet de dire qu'on a une température presque homogène. Après on commence à augmenter la tension avec un palier d'environ de 500V et on laisse écouler quelques secondes pour voir s'il ya des décharges partielles qui se maintiennent. Dès qu'on aura des impulsions qui se répètent, on note la valeur de la tension seuil PDIV sur l'oscilloscope et on commence l'opération de l'acquisition de l'activité des décharges partielles.

Les mesures, effectuées en utilisant le dispositif expérimental reporté sur la figure IV.8, nous permet de tracer la variation de la tension seuil d'apparition et la tension d'extinction des DPs (PDIV et PDEV) en fonction de la température (figure IV.6).

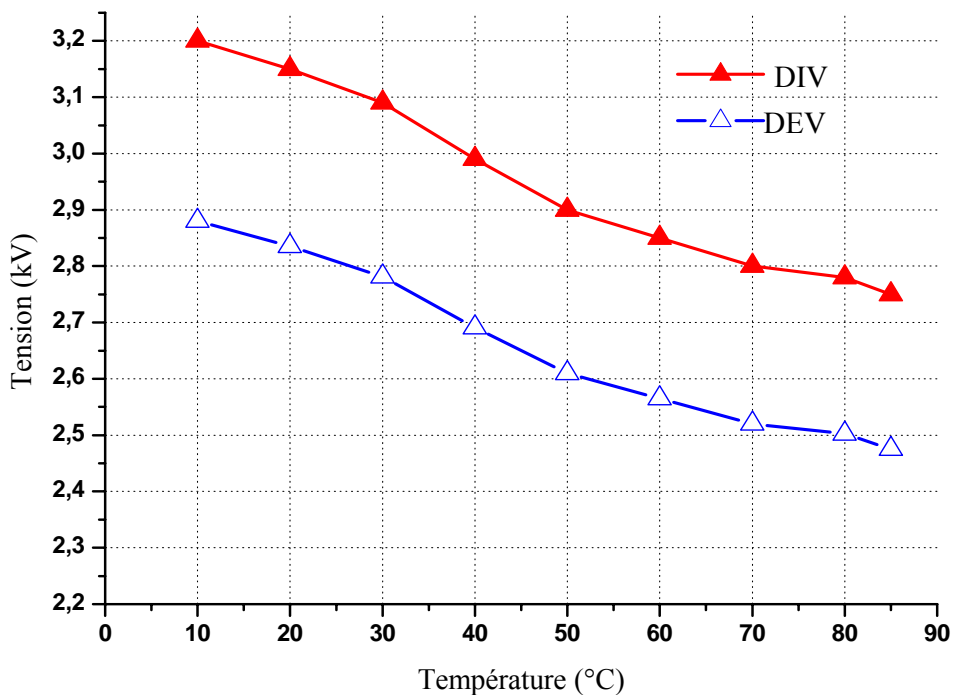
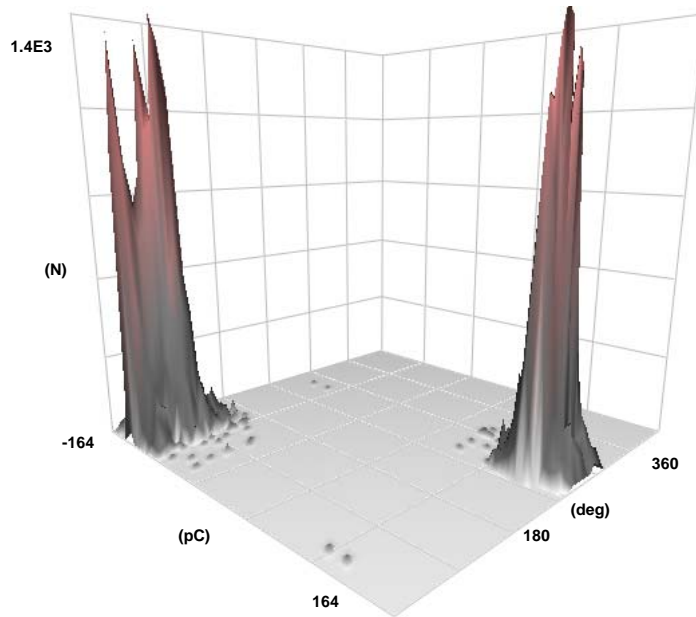


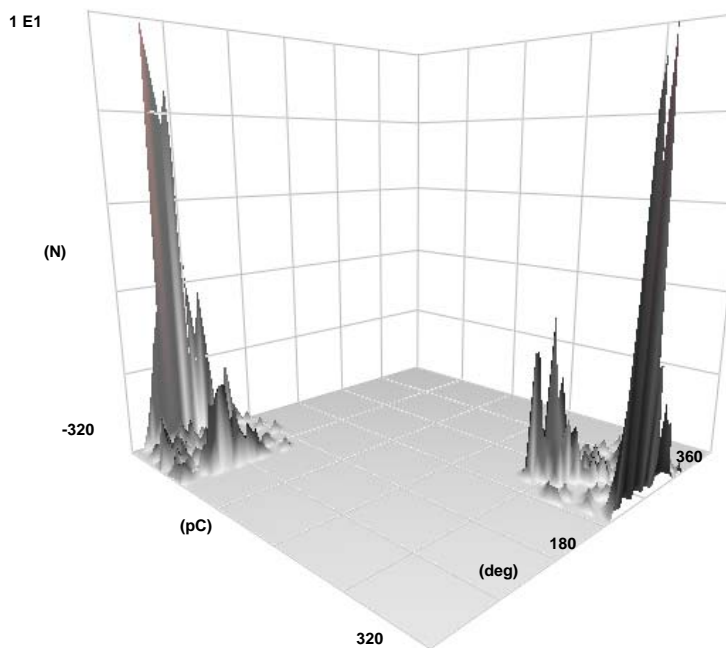
Figure IV.6 : La tension seuil PDIV et tension d'extinction en fonction de la température pour un échantillon de type sandwich (Taux d'humidité est fixé pour HR = 50%)

Pour un taux d'humidité relative égale à 50% et pour des températures s'étendant de 10°C à 85°C, on observe une diminution de la tension d'initiation des DPs ainsi que pour la tension d'extinction. Un tel comportement peut être associé à la densité de gaz qui augmente avec la température, menant à une diminution du PDIV [Bar.97, Gja.94].

La forme d'impulsion, distribution de nombre et de l'amplitude dans la phase des DPs ont été enregistrées pour deux températures différentes. La figure IV.7 montre que, pour une température $T=10^{\circ}\text{C}$, l'impulsion de la décharge est relativement large, avec un nombre et un taux de répétition élevés.



a) $T=10^{\circ}\text{C}$ et $HR=50\%$



b) $T=85^{\circ}\text{C}$ and $HR=50\%$

Figure IV.7 : L'influence de la température sur le nombre et l'amplitude des DPs

Comme dans le cas d'échantillon de câble, pour une température égale à $T = 85^{\circ}\text{C}$, on constate une diminution du taux de répétition et une augmentation de l'amplitude des DPs.

IV.2 Influence de l'humidité sur l'initiation des décharges partielles

L'enceinte climatique nous a permis de contrôler un facteur très important qui est l'humidité relative. L'activité des décharges partielles a été étudiée pour le cas d'un échantillon de type sandwich (voir §II.5.3). Des mesures ont été effectuées en utilisant le dispositif expérimental reporté dans la figure suivante.

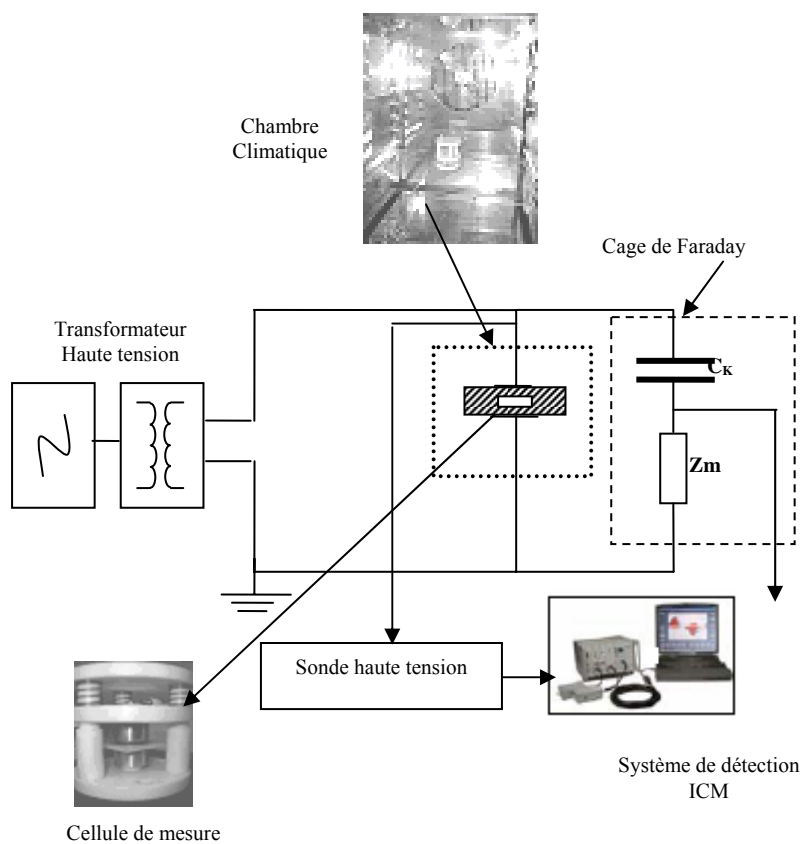


Figure IV.8 : Schéma de montage pour la détection des DPs dans un échantillon de type sandwich

Pour une température fixe égale à $T = 25^{\circ}\text{C}$, et pour des valeurs d'humidité relative s'entendant entre 20 % et 35 % la figure IV.9 montre bien que la tension PDIV ainsi que PDEV augmentent en fonction de l'humidité. Au-delà d'une valeur de 35% ces deux grandeurs commencent à diminuer. Comme précédemment mentionné, la formation des gouttelettes d'eau sur les murs de la cavité doit être prise en considération pour expliquer ces résultats.

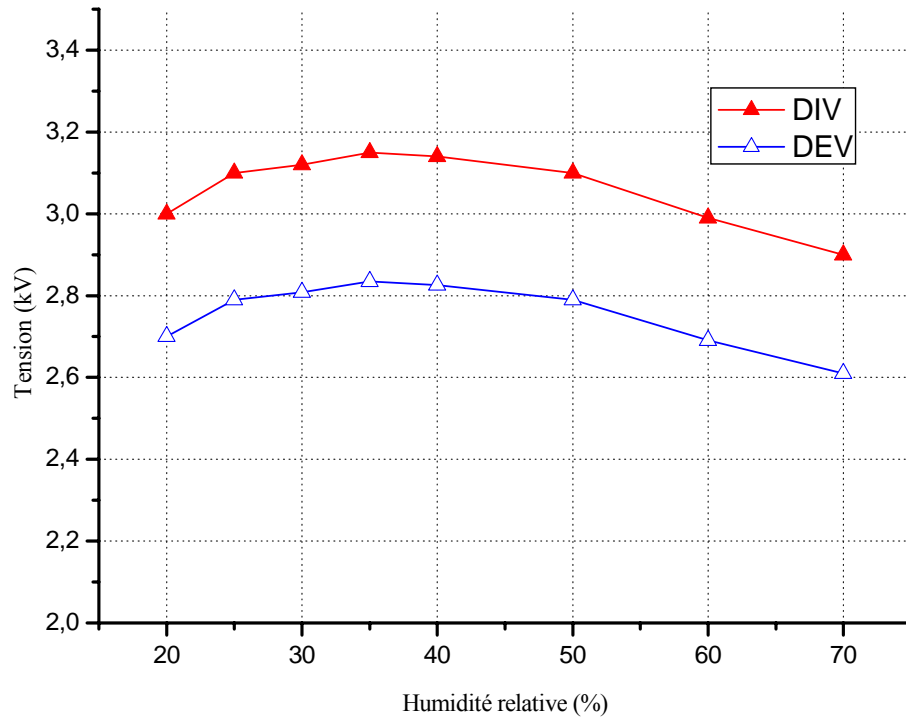


Figure IV.9 : La tension seuil PDIV et tension d'extinction en fonction de l'humidité relative pour un échantillon de type sandwich (température est prise égale à 25°C)

L'accroissement des tensions PDIV et PDEV pour des faibles valeurs d'humidité relative est peut être expliqué par une augmentation de l'humidité dans l'intervalle d'air contenu dans la cavité. La vapeur d'eau se comporte comme un gaz électronégatif et par conséquent la rigidité diélectrique augmente ; dans ce cas on suppose qu'il faut une énergie supplémentaire pour dissocier les molécules d'eau contenues dans l'air. Pour des valeurs d'humidité supérieure à 35% on constate une décroissance de la tension d'apparition des DPs. Cela est expliqué par le phénomène de condensation de l'eau et la formation des gouttelettes d'eau sur les parois de la cavité, ce qui a pour effet de diminuer l'intervalle d'air entre les parois de la cavité.

IV.2.1 Distribution de l'amplitude et le nombre des DPs dans la phase

Pour notre échantillon et pour différentes valeurs de l'humidité, les formes d'impulsion des décharges partielles, la distribution de l'amplitude et la distribution de nombre sont enregistrées pour chaque valeur d'humidité. Pour mettre en évidence l'influence de l'humidité sur ces grandeurs nous avons choisi deux valeurs de l'humidité à savoir 20 % et 70°C. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure IV.10 et figure IV.11.

Pour une valeur d'humidité égale à 20%, la figure IV.10 montre bien une signature non symétrique. Il est bien clair que le nombre des décharges négatives est plus grand que celui des décharges positives. Pour la valeur de l'humidité choisie, le nombre des décharges est relativement faible. On remarque une absence totale de la répétition des décharges. Ainsi il est bien clair que l'amplitude des DP est relativement faible et que l'amplitude des décharges négatives est plus importante.

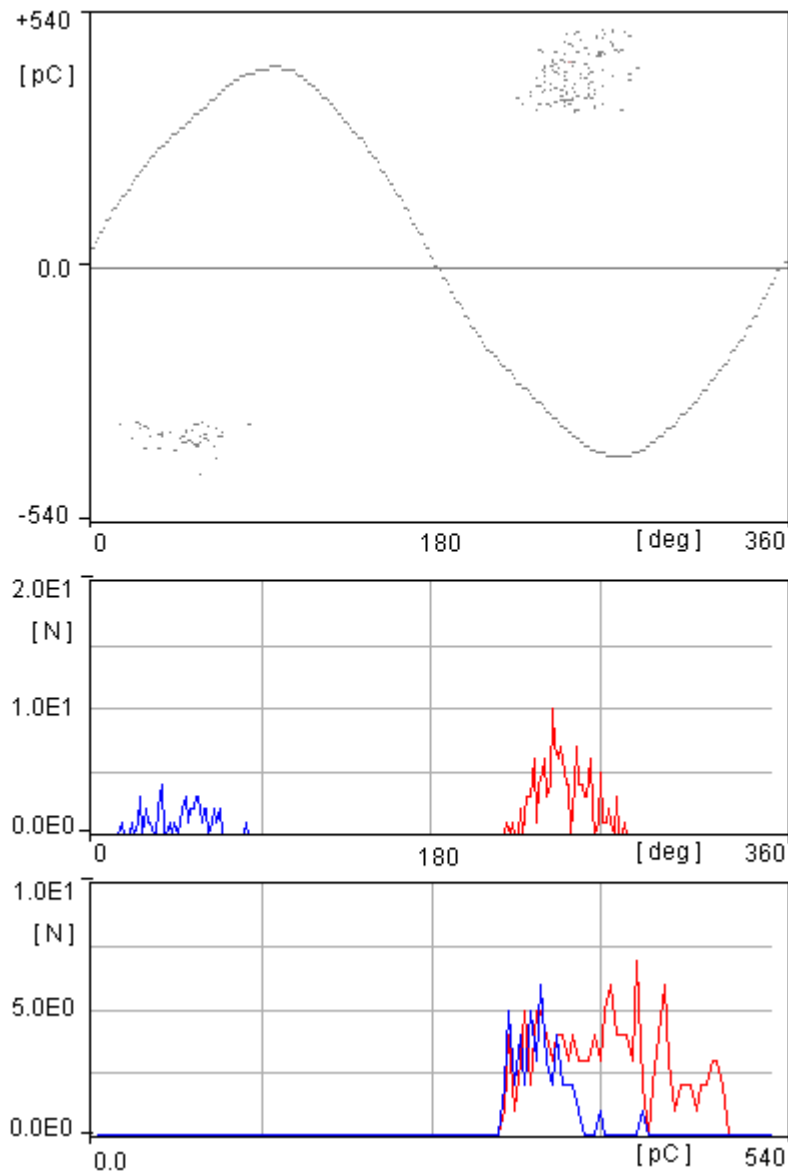


Figure IV.10 : *Distribution des DP* pour une valeur de l'humidité de 20%

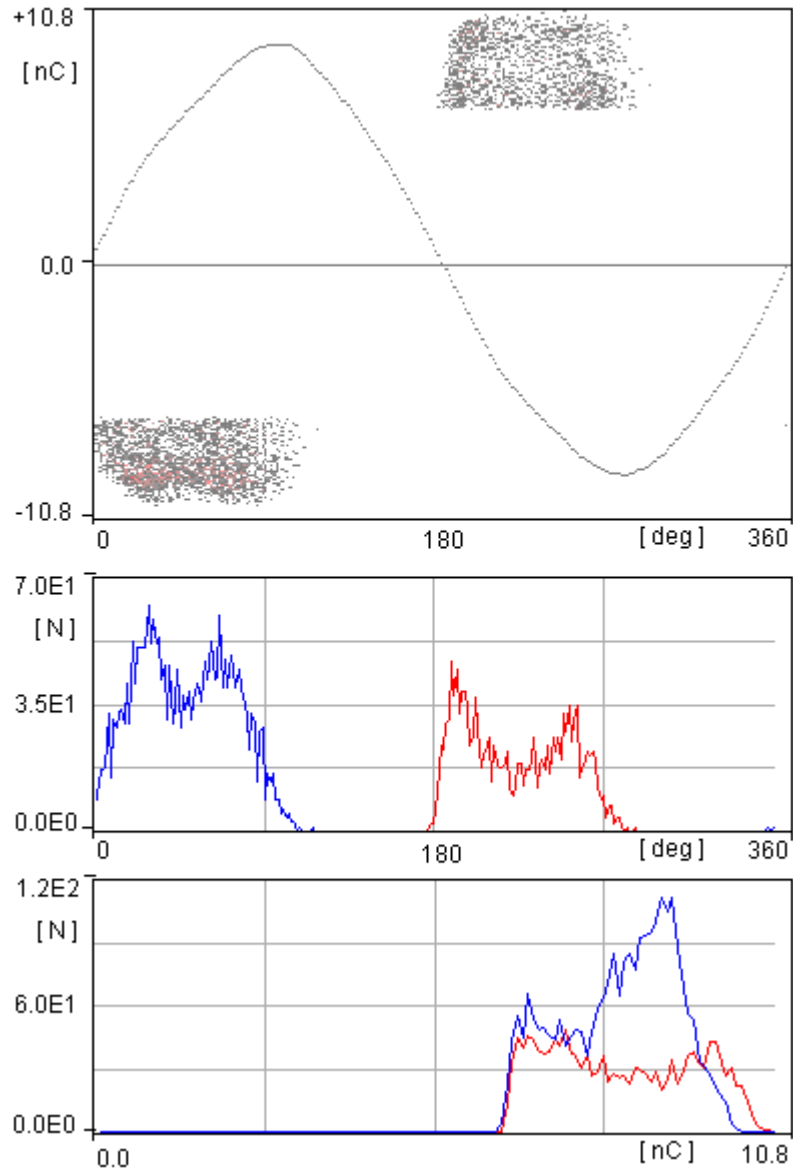


Figure IV.11 : *Distribution des DPs pour une valeur de l'humidité de 70%*

Pour une valeur de l'humidité de 70%, la figure IV.11 montre une augmentation de l'amplitude des décharges. Dans ce cas il est bien clair que l'amplitude des décharges positives est importante. Le nombre des décharges partielles est remarquablement important ; contrairement dans le cas où la valeur de l'humidité est faible, on note un nombre plus grand des décharges positives.

IV.2.2 Influence de l'humidité sur l'initiation des décharges partielles pour des différentes températures

La figure III.12 présente la variation de la tension d'initiation en fonction de la température pour des taux d'humidité variables. L'augmentation de la température se traduit par une diminution de la tension d'amorçage des décharges. Compte tenu de la présence de l'humidité, il est bien clair que la tension d'amorçage augmente. Il faut donc fournir plus d'énergie pour exciter, dissocier ou ioniser les molécules. Pour des taux d'humidité supérieurs à 30 % on observe que la tension d'initiation diminue lorsque l'humidité augmente. Ce qui est en accord avec les résultats obtenus auparavant.

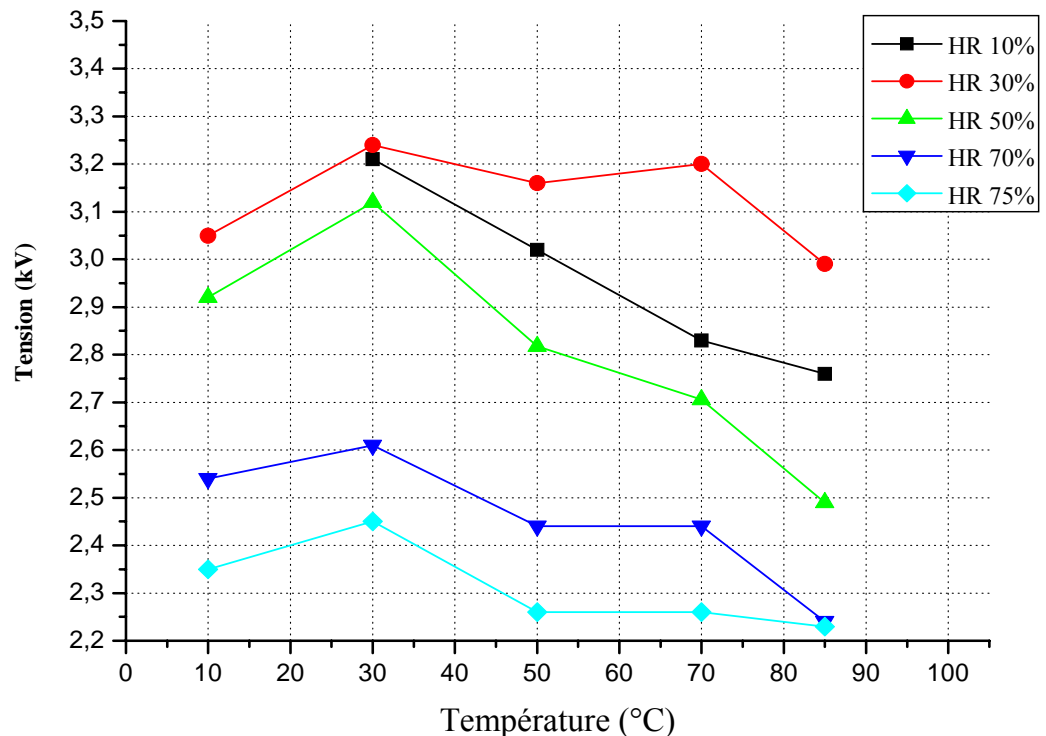


Figure IV.12 : Impact de l'augmentation de la température et de l'humidité relative

IV.3 Influence de la pression sur l'initiation des décharges partielles

L'activité des décharges partielles en fonction de la pression est étudiée pour le cas d'un échantillon de type sandwich. Des mesures ont été effectuées pour trois valeurs de pression à savoir 1 Atm, 0.5 Atm et 0.1 Atm. A cet effet la cellule de pression a été utilisée pour contrôler la pression. Les mesures, effectuées en utilisant le dispositif expérimental, reporté sur la figure III.11, nous ont permis de tracer la variation de la tension seuil d'apparition des DPs en fonction de la température et de l'humidité pour une pression variable.

La figure IV.13 représente l'évolution de la tension d'apparition en fonction de la variation du taux d'humidité relative, combinée à une baisse de pression

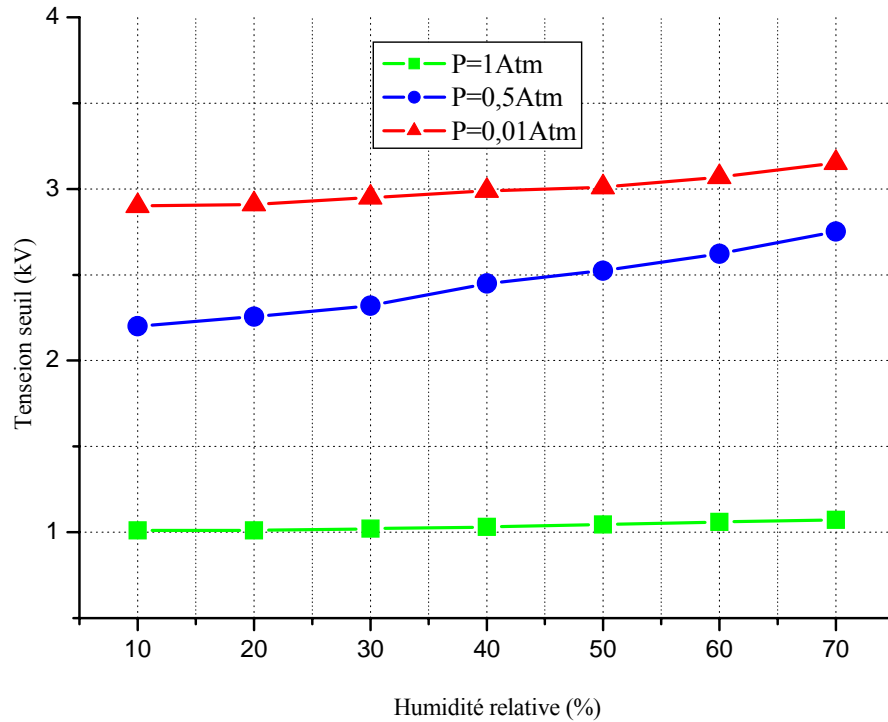


Figure IV.13 : *l'évolution de la tension d'amorçage des DP en fonction de l'humidité combinée à une baisse de pression*

On observe que l'augmentation du taux d'humidité relative augmente la tension d'amorçage des décharges. Cette augmentation entraîne une densification des molécules dans le milieu, d'où la nécessité de fournir plus d'énergie pour exciter, dissocier ou ioniser les molécules. A faible pression, du fait de la raréfaction de la matière, les tensions d'amorçages de la décharge varient très peu.

La figure suivante représente l'évolution de la tension d'initiation en fonction de la variation de la température, combinée à une baisse de pression

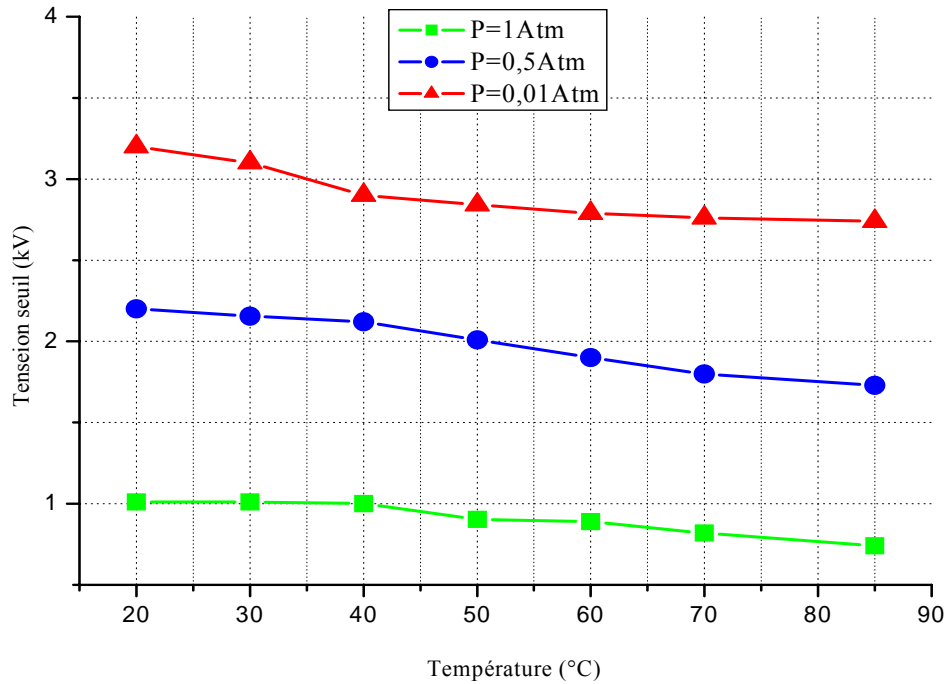


Figure IV.14 : l'évolution de la tension d'amorçage des DPs en fonction de la température combinée à une baisse de pression

On observe que la tension d'amorçage des décharges décroît avec l'augmentation de température pour les trois valeurs de pression. L'effet de température s'explique par la cinétique des décharges. De l'énergie est nécessaire pour amorcer une décharge. Cette énergie est la somme de l'énergie des ions en mouvement ($\Sigma 1/2mv^2$) essentielle pour produire l'avalanche électronique et l'énergie d'agitation thermique ($E \sim kT$). Elle accroît avec l'augmentation de la température ce qui entraîne une amplification des processus collisionnels.

IV.4 Influence de la charge sur l'initiation des décharges partielles

Sachant, d'une part, que les charges d'espace dans un isolant sont habituellement distribuées aléatoirement en trois dimensions (voir § 1.2.5), qu'elles peuvent être déposées sur les parois de la cavité par les premières décharges partielles elles peuvent également être le résultat du transport de charge des électrodes vers la cavité. Pour cette raison, nous avons introduit paquet de charge dans le volume de l'isolant dans des positions variables par rapport à la cavité. Les résultats de calcul montrent que les valeurs de champ dans la cavité se trouvent renforcées à cause de la présence d'une charge. La figure suivante montre bien que de plus en plus que la distance qui sépare la position du paquet charge d'espace et la cavité

diminue, de plus en plus le champ électrique ainsi que le potentiel électrique sont renforcés dans la cavité.

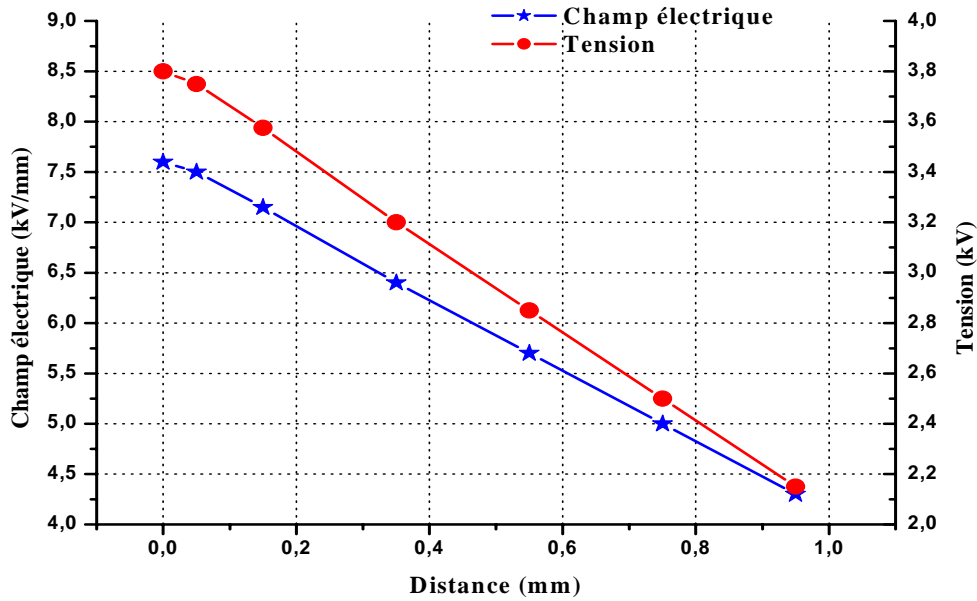


Figure IV.15 : Distribution du champ et du potentiel électrique en fonction de la distance qui sépare la charge d'espace et la cavité.

Ce résultat nous mène à considérer le cas le plus défavorable, c'est le cas où le champ atteint sa valeur maximale lorsqu'une quantité de charge surfacique est répartie sur les parois de la cavité.

Pour créer une densité de charge surfacique nous avons utilisé l'échantillon sandwich présenté dans le chapitre III. On applique une tension à courant continu sur une partie de l'échantillon comme l'indique la figure IV.16.

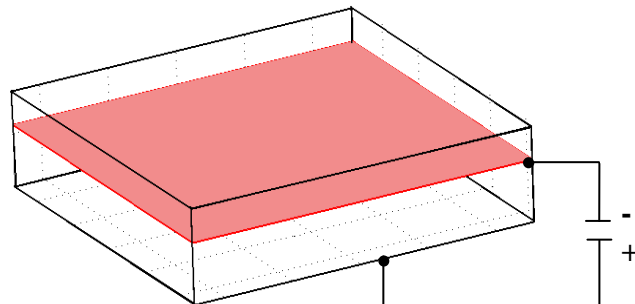
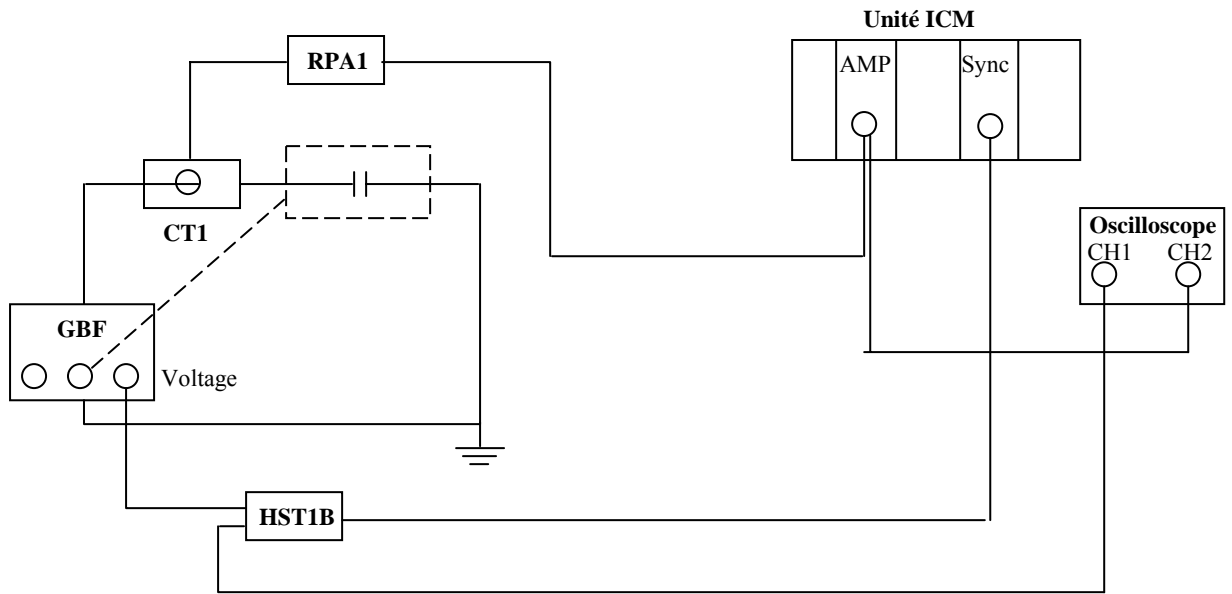


Figure IV.16: Application d'une tension continue pour créer une densité de charge

La paroi supérieure métallisée de la cavité est mise en terre. Ceci nous permet de polariser l'échantillon. Une densité de charge surfacique est formée sur la paroi de la cavité.

Le dispositif de mesure des décharges partielles est reporté dans la figure suivante :



HST1 : préamplificateur pour la tension mesuré.

CT1 : transformateur de courant et d'isolement, sert à capter les DPs pour une gamme de fréquence donnée.

RPA 1 : Préamplificateur 20khz - 800khz

Figure IV.17: Dispositif de mesure des décharges partielles dans le cas d'un échantillon sandwich contenant une charge électrique

On peut calculer théoriquement la valeur de la densité de charge surfacique en utilisant le modèle ABC présenté dans le chapitre I (§ I.4.6 figure I.30). En effet si on néglige les résistances (on suppose qu'il n'y a pas de pertes diélectriques) le modèle du dispositif est simplifié en le circuit reporté dans la figure IV.18.

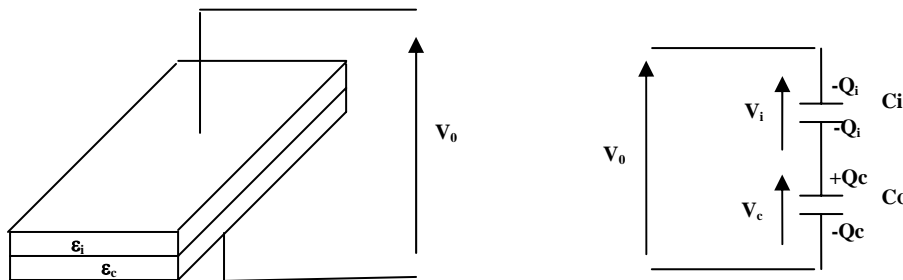


Figure IV.18: Circuit électrique équivalent en négligeant les résistances dans la partie cavité isolant-sein dans le modèle ABC

Les tensions aux bornes de la cavité et aux bornes de la partie saine de l'isolant et sont égales à :

$$V_c = V_0 \frac{Z_c}{Z_c + Z_i} = V_0 \frac{C_i}{C_c + C_i} = V_0 \frac{2.3}{2.3 + 0.5} = 0.82 V_0 \quad \text{Equ. IV-1}$$

$$V_i = V_0 \frac{Z_i}{Z_c + Z_i} = V_0 \frac{C_c}{C_c + C_i} = V_0 \frac{0.5}{2.3 + 0.5} = 0.18 V_0$$

$$\text{Avec : } C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{e} \quad \text{Equ. IV-2}$$

En effet, la densité de charge surfacique en fonction de la tension appliquée est calculée comme suit :

$$\begin{cases} Q_c = C_c V_c = \sigma_c \cdot S \Rightarrow \sigma_c = \varepsilon_0 \varepsilon_c \frac{V_c}{e_c} \\ Q_i = C_i V_i = \sigma_i \cdot S \Rightarrow \sigma_i = \varepsilon_0 \varepsilon_i \frac{V_i}{e_i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sigma_c = \varepsilon_0 \varepsilon_c \frac{V_c}{e_c} = 14.51 \cdot 10^{-9} \cdot V_0 \\ \sigma_i = \varepsilon_0 \varepsilon_i \frac{V_i}{e_i} = 3.67 \cdot 10^{-9} \cdot V_0 \end{cases} \quad \text{Equ. IV-3}$$

Pour une tension continue de 4,5 kV, la figure suivante montre la distribution de la densité de charge surfacique calculée par logiciel Comsol. Cela nous permet de comparer les résultats obtenus pas calcul analytique.

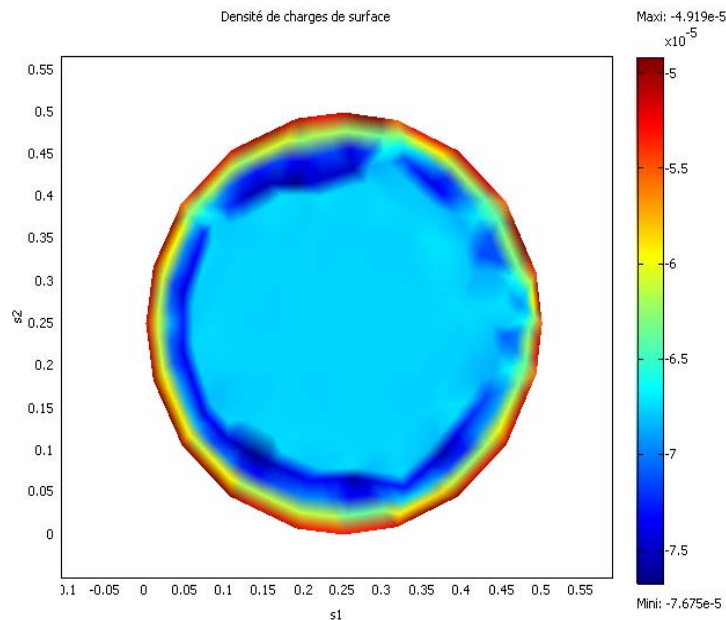
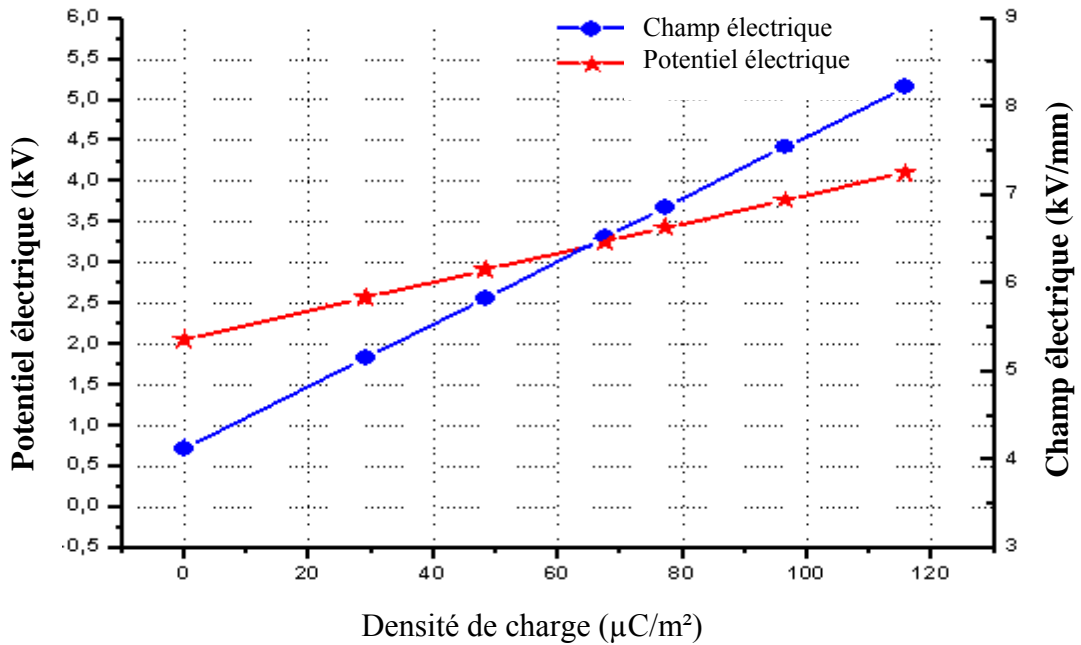
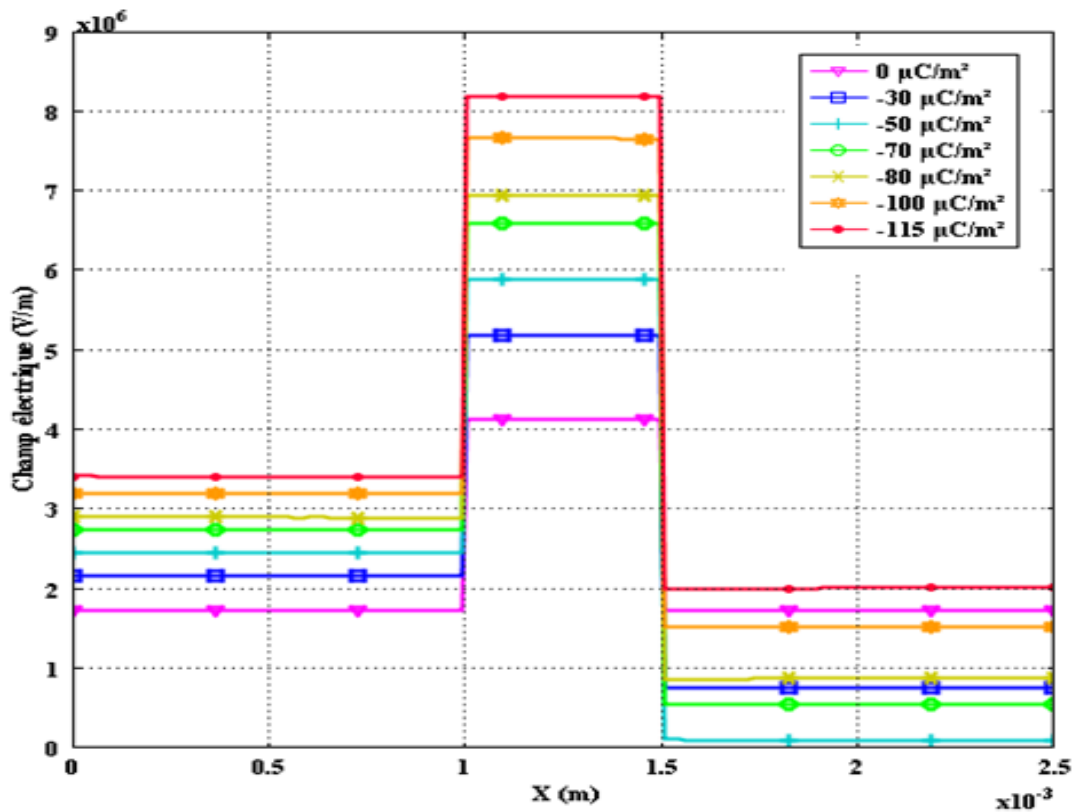


Figure IV.19 : *Distribution de la densité de charge surfacique pour une tension continue $U = 4.5$ kV*

Une analyse quantitative du champ et du potentiel électriques dans l'échantillon est faite. La figure IV.20-a montre la distribution du champ électrique en fonction de la densité de charge surfacique. Cela nous permet de calculer la valeur du potentiel électrique et du champ électrique dans la cavité.



a)



b)

Figure IV. 20 : Valeurs du potentiel et champ électrique dans l'échantillon et dans la cavité en fonction de la densité de charge.

En effet la figure IV.20-a montre que le champ électrique et le potentiel sont renforcés dans la cavité pour des valeurs de densité de charge croissante. Pour cette raison l'activité de DPs est étudiée expérimentalement ainsi que par simulation afin de montrer comment les caractéristiques principales des DPs sont influencées par la présence d'une densité de charge surfacique croissante. Dans le cas de l'absence ou présence d'une densité de charge, la forme d'impulsion, la distribution de nombre de d'amplitude dans la phase ont été enregistrées.

Dans un premier temps des mesures ont été faites sur un échantillon vierge non polarisé (densité de charge nulle). La tension d'apparition des décharges partielles est mesurée avec un taux d'augmentation de 0.5kV/s. Un nombre suffisant de mesures est réalisé afin de vérifier la reproductibilité du phénomène des décharges. Dans ce cas, des décharges partielles sont détectées pour une tension appliquée qui vaut environ 5.5 kilovolts, ce qui correspond bien à une différence potentielle dans la cavité d'environ de 2 kilovolts. Cette valeur correspond bien, d'après la courbe de Paschen, à la tension de claquage d'un intervalle d'air de 0.5 millimètre de longueur.

L'activité des décharges partielles a été enregistrée pour un échantillon polarisé. Toutefois, après application d'une tension continue pendant quelques secondes, on élimine la source continue, et on applique une tension alternative juste après les dix premières secondes. Dans ces conditions, on considère qu'une quantité de charges présentes (qui ont été déposées du côté métallisé de la cavité) peut affecter l'activité des DPs. En fait, la prochaine figure montre l'effet de la densité de charge sur la forme d'impulsion ainsi que la distribution dans la phase.

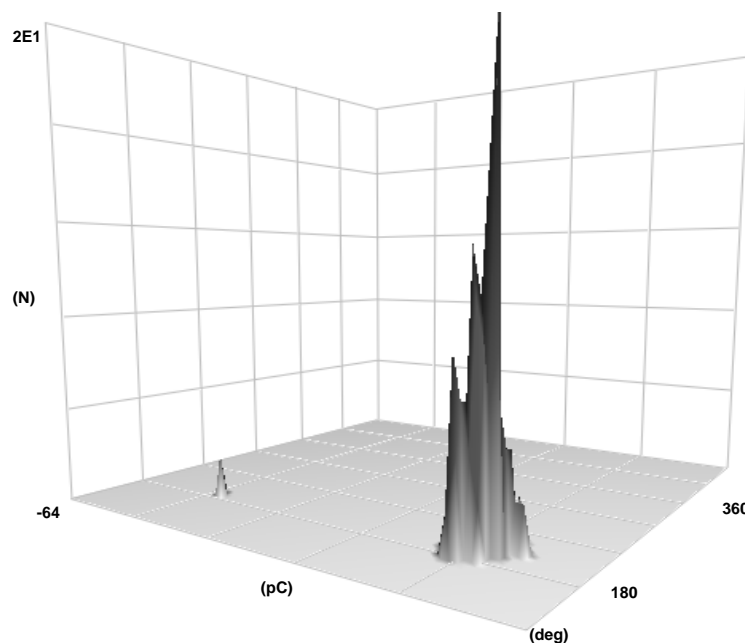
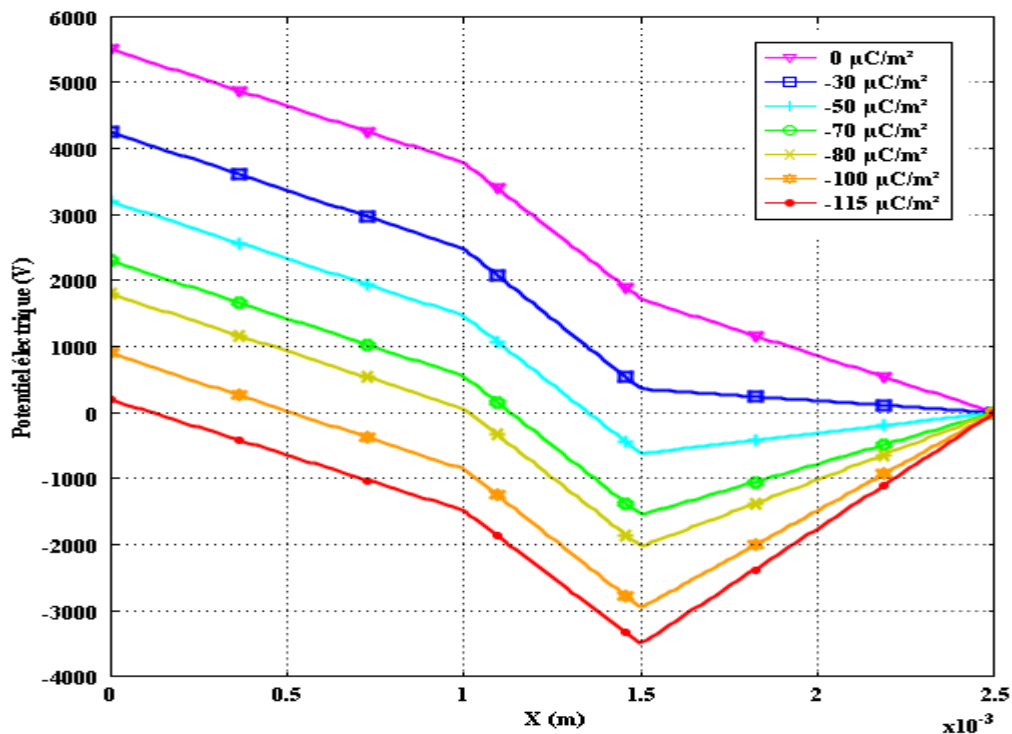


Figure IV.21 : *Forme d'impulsion dans le cas de présence d'une densité de charge négative*

On constate l'absence presque totale des décharges négatives. Cela nous mène à dire que la densité de charge (de signe négatif dans notre cas) à un double effet ; elle favorise l'apparition des décharges partielles dans une alternance et les défavorise dans l'autre, selon que le champ local produit par la densité de charge s'ajoute ou se déduit du champ total appliqué qui est imposé par la source d'alimentation

En effet quand la polarité de la tension alternative est positive, les charges créent un champ additif, ainsi le nombre d'impulsions devient plus haut et plus large. Dans le cas contraire, pendant la polarité négative de la tension appliquée, les charges créent un champ opposé. Les décharges partielles apparaissent pour des tensions plus élevées. On peut observer ce phénomène seulement pendant les premières secondes de polarisation. Autrement, la forme d'impulsion devient de plus en plus symétrique au fur et au mesure que la quantité de charge se neutralise.

Afin de valider les résultats expérimentaux, il est possible de calculer par simulation tension seuil d'apparition des DPs pour les densités de charges surfaciques déjà calculées en fonction de la tension continue appliquée. Sachant qu'en absence de densité de charges et pour les dimensions de notre échantillon la tension seuil d'apparition des décharges partielles correspond à une tension égale à 5.5 kilovolts aux bornes de l'échantillon et une tension d'environ 2 kilovolts aux bornes de la cavité. Tenant compte de cette valeur, qui est suffisante pour faire claquer l'intervalle d'air, nous essayons d'avoir toujours cette valeur aux bornes de la cavité que pour différentes valeurs de densité de charge.



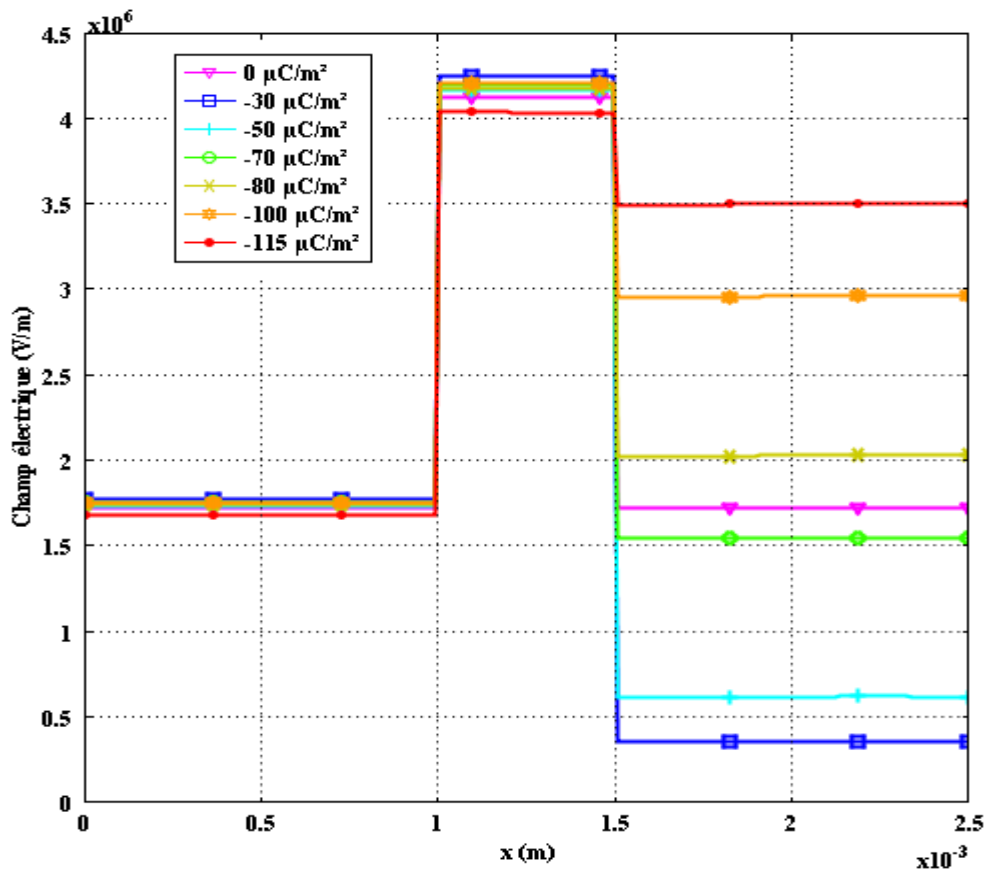


Figure IV. 22: Distribution du champ et du potentiel pour avoir un claquage de l'intervalle d'air pour différentes valeurs de densité de charge

Les figures IV.22-a et IV.22-b montrent que la différence de potentiel et le champ électrique dans la cavité sont constants pour différentes valeurs des tensions appliquées et de densité de charge différente. On constate bien que la différence de potentiel aux bornes de la cavité est égale à 2 kilovolts et que la valeur du champ électrique est constante. Elle vaut 4.2 kV/mm.

Dans la figure IV.23 on représente les résultats de calcul par simulation ainsi que ceux obtenus expérimentalement. La figure représente la tension seuil d'apparition des décharges partielles en fonction de la quantité de charge introduite.

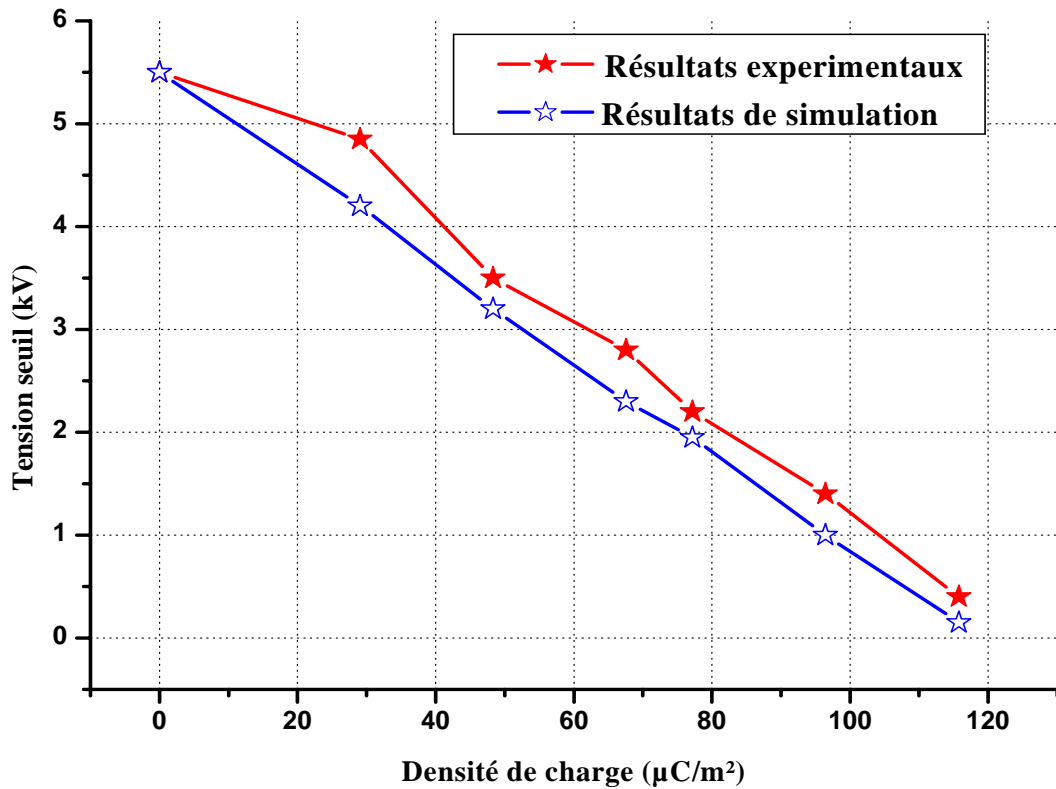


Figure IV.23 : Tension seuil d'apparition des DPs en fonction de la densité de charge

Il est bien clair que les résultats de simulation sont en bon accord avec ceux expérimentaux. La tension seuil décroît à partir d'une valeur qui représente le cas d'un échantillon vierge non polarisé. Plus la densité de charge augmente plus la tension seuil diminue. Le phénomène des DPs est fortement influencé par la densité de charge. Ces charges tendent à modifier et renforcer le champ dans la cavité, ainsi les décharges partielles sont plus probables.

I.5 Discussion

Les essais expérimentaux nous ont permis d'étudier l'influence des conditions d'essais tels que la température, la pression et l'humidité sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles. Nous avons pu aussi imaginer une configuration qui nous a permis de mettre en évidence l'influence de la présence d'une charge d'espace sur les parois de la cavité. Le dispositif de détection, de mesure et de traitement, utilisés nous a permis de présenter une décharge partielle en trois dimensions. Cela est important pour voir si les différentes contraintes peuvent agir non seulement sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles, mais aussi sur leurs nombre.

Les mécanismes physico-chimiques au sein des décharges sont assez complexes et sont encore amplement étudiés par les physiciens des plasmas, car ils ne sont pas encore tous totalement connus. Ils dépendent de plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques fortement couplés. Les analyses des résultats sur l'influence des conditions environnementales sur la tension de rupture de l'air sont généralement fondées sur la variation de la densité de l'air, caractérisée par la pression et la température. Par conséquent les expressions correctives sont établies en tenant compte de la géométrie et la taille du défaut. Ainsi, sans rentrer dans les détails du calcul des coefficients caractéristiques du claquage électrique du gaz contenu (coefficients de dissociation, d'ionisation, de recombinaison, d'attachement, les coefficients de transport ainsi que le calcul des sections efficaces) liés à ces processus, qui sont souvent utilisés par les physiciens du plasma. A cet effet, nous tentons d'expliquer nos résultats par une analyse macroscopique.

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension d'apparition des décharges partielles. L'énergie des ions en mouvement et celle liée à l'agitation thermique contribuent à la mobilité des électrons qui suite à l'augmentation de la température entraîne une amplification des processus collisionnels.

Rappelons que l'air est constitué d'un mélange de gaz (78% N₂, 21% O₂ et 1% d'autres gaz). Le calcul de tous les coefficients cités précédemment s'effectue isolément pour chaque composant. Sachant que le potentiel de dissociation et d'ionisation (énergie exprimée en eV) des principaux constituants de l'atmosphère sont respectivement de l'ordre de quelques eV et d'une dizaine d'eV environ. Dans le cas de notre étude, une variation de ΔT d'environ 60°C (soit un apport d'énergie de l'ordre de meV) n'aura donc pas d'effet considérable direct sur les phénomènes cités. Par contre, la variation de la température aura un effet direct sur la distribution statistique donc sur la mobilité des particules contenues dans le milieu, et donc sur leurs libres parcours moyens.

Par conséquent, l'impact des paramètres atmosphériques sur le libre parcours moyen est relié directement au nombre de particules ($P = nkT$), fonction de la température et inversement proportionnel à la pression.

Nous énonçons donc :

- ✓ à pression constante, le libre parcours moyen augmente avec l'accroissement de la température ;

- ✓ à température constante, le libre parcours moyen augmente avec la baisse de pression. Dans ce cas les chocs intermoléculaires diminuent du fait de la raréfaction de la matière.

L'augmentation du taux d'humidité relative se traduit par une augmentation de la tension d'initiation des décharges partielles. Compte tenu de la présence de cette humidité, il faut donc fournir plus d'énergie pour exciter, dissocier ou ioniser les molécules.

Les charges électriques générées à la paroi de la cavité à partir des mécanismes de conduction. Ces charge augmente le champ local et joue un rôle important à l'apparition des décharges partielles. Notons ici, que le champ résultant aux bornes de la cavité se trouve renforcé ou réduit en fonction du signe de la charge. Par conséquent les décharges partielles peuvent apparaître ou disparaître totalement selon le signe de l'alternance de la tension appliquée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion

Les décharges partielles qui peuvent se produire dans les cavités contenues dans un isolant dépendent de plusieurs facteurs. Dans cette étude, en utilisant un calcul numérique ainsi que des essais expérimentaux, nous avons essayé de mettre en évidence l'effet de quelques facteurs sur l'activité des décharges partielles et plus particulièrement la tension seuil d'apparition de ce phénomène néfaste.

Classés comme des facteurs intrinsèques, l'impact de l'existence des cavités de différentes taille, différente position, différentes formes, l'orientation du défaut par rapport aux lignes de champ ont été bien étudiées par simulation. En outre, le phénomène d'interaction entre les cavités a été également discuté. Se positionnant dans un câble de transport d'énergie, l'étude des distributions de champ électrique, notamment la valeur maximale, dans et autour des défauts a montré un intérêt considérable pour qualifier les phénomènes des décharges partielles.

Le champ électrique dans une cavité dépend de sa position dans la partie isolante. Il laisse conclure que les cavités constituent une situation critique si elles sont situées près de l'électrode haute tension. Par contre cette grandeur est indépendante de la taille. Toutefois la région où la distribution de champ électrique est affectée dépend fortement de la taille de la cavité. On peut conclure alors que les décharges partielles sont plus favorisées dans le cas des grandes dimensions. Dans ce cas, les électrons avec un libre parcours moyen relativement grand, peuvent acquérir plus d'énergie. En termes de forme géométrique de la cavité nous pouvons dire que la présence d'une cavité de forme elliptique dans le sens transversal du champ électrique représente le cas le plus nocif. Le champ électrique est renforcé.

Dans le cas d'existence de deux défauts, les résultats indiquent que les cavités semblent agir l'une sur l'autre. Les valeurs de champ électrique sont renforcées par rapport aux cas sans défaut. Cette interaction est possible seulement si la distance inter-cavité est du même ordre de grandeur que la taille de cavité. Les deux cavités entreront en interaction si elles sont situées dans une zone d'influence estimée à cinq fois le diamètre de la cavité. Autrement, l'interaction entre les cavités est négligeable. Finalement, on peut dire que la tension seuil d'apparition des décharges partielles n'est pas principalement régit par l'état de la cavité prise isolée.

Tenant compte des résultats déjà obtenus nous avons essayé de réunir les facteurs cités ci-dessus pour qualifier le phénomène d'apparition des décharges partielles. Dans ce cas un autre facteur s'impose, à savoir la température. Nous avons bien montré que la température dans des cavités, affectant considérablement l'apparition des décharges partielles. En effet, les décharges apparaissent notamment dans les cavités de faible diamètre dans des positions près de l'âme où la température est relativement élevée. Pour une taille donnée, la valeur du champ à l'intérieur de la cavité peut atteindre la valeur critique. Cependant, les décharges partielles se produisent seulement pour une certaine position, appelée position limite.

Le modèle ABC simulé, nous a permis de dire que les facteurs imposés, tels que le niveau de tension et la fréquence, influence considérablement l'activité des décharges partielles dans un défaut, notamment le nombre des décharges partielles. Il devient plus important pour de valeurs de tensions imposées et des fréquences élevées.

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans la salle haute tension du Laboratoire PLAsmas et Conversion d'Energie (Laplace) de Toulouse. En travaillant sur des échantillons type câble et type sandwich nous avons étudié l'influence des facteurs environnementaux ainsi que la charge d'espace sur la tension seuil d'apparition des décharges partielles.

Dans cette étude, en modélisant un défaut dans un échantillon de câble ainsi qu'un échantillon sandwich, et pour des valeurs de température variables, nous avons montré que le phénomène des décharges partielles est plus accentué. La tension seuil diminue lorsque la température augmente. D'une part cela est peut être due aux effets du délai statistique (statistical time lag). On s'attend à ce qu'il soit plus grand pour un gaz avec une faible réducte et températures plus froides. D'autre part, la température agit indirectement sur la tension de claque d'air à travers la densité d'air. La densité des gaz augmente avec la température et par conséquent la tension de claquage d'air diminue. En termes d'humidité, on a bien enregistré un accroissement des tensions seuils pour des faibles valeurs d'humidité relative. Si le taux d'humidité augmente au-delà d'une valeur limite, les tensions seuils décroissent.

On a montré aussi que pour des températures relativement basses la forme d'impulsion de décharge est relativement large, avec un nombre et un taux de répétition élevé mais d'amplitude relativement faible. Par contre, pour des températures élevées, on a enregistré une diminution du taux de répétition et augmentation de l'amplitude des DP. Un taux décroissant de répétition peut être expliqué par la conductivité croissante des parois de la cavité. Une conductivité extérieure croissante mènera à un champ réduit dans la cavité et par conséquent un taux réduit de répétition. Par contre l'augmentation de l'amplitude avec la température pourrait être expliquée par la décharge à des distances plus grande le long de la cavité.

Le phénomène des DPs est fortement influencé par la densité de charges. Cette influence a été bien claire. En effet, pour un accroissement de densité de charge les tensions seuils diminuent. Ces charges tendent à modifier et renforcer le champ dans la cavité, ainsi les décharges partielles sont plus probables.

Notre travail de thèse peut être considéré comme une contribution à la compréhension de l'influence de quelques facteurs, indépendamment liés, sur le phénomène des décharges partielles. Cependant, en termes de perspective, il pourrait être intéressant d'étudier par simulation le phénomène des décharges dans l'intervalle de gaz contenu dans un défaut. Cela a pour objectif d'introduire les différents facteurs et notamment la température, l'humidité et la pression qui sont fortement liés.

ANNEXES

ANNEXE 1

Caractéristiques des quelques matériaux isolants

<p>PVC (Polyvinylchlorure)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 1.4 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) 3,5 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 3,3 Facteur de perte diélectrique 0,02-0,04 Résistance spécifique >10¹⁵ Ohm.cm Résistance de surface >10¹³ Ohm Limite de résistivité 35 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 120-130 C° Température maximale d'utilisation courte durée 70 °C Température maximale d'utilisation continu -10/60 °C</p>	<p>PVC-C (Polyvinylchlorure surchloré)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 1.55 g/cm²</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 3,4 Facteur de perte diélectrique tan Résistance spécifique >10¹⁵ Ohm.cm Résistance de surface >10¹³ Ohm Limite de résistivité 45 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline C° Température maximale d'utilisation courte durée 110 °C Température maximale d'utilisation continu -10/+100 °C</p>
<p>PEHD (Polyéthylène de haute densité)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 0,95 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) <0,01 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,4 Facteur de perte diélectrique 5x10⁻⁴ Résistance spécifique 10⁸ Ohm.cm Résistance de surface 10¹³ Ohm Limite de résistivité 80 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 130 C° Température maximale d'utilisation courte durée 90 °C Température maximale d'utilisation continu -40/80 °C</p>	<p>PE-UHMW (Polyéthylène, Ultra haut poids moléculaire type 1000)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 0,94 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) <0,01 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,3 Facteur de perte diélectrique 2,5x10⁻⁴ Résistance spécifique >5x10¹⁶ Ohm.cm Résistance de surface >10¹³ Ohm Limite de résistivité 90 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 138 C° Température maximale d'utilisation courte durée 120 °C Température maximale d'utilisation continu -200/+80 °C</p>
<p>PE-UHMW (Polyéthylène, Ultra haut poids moléculaire type 500)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 0,95 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) <0,01 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,3 Facteur de perte diélectrique 2x10⁻⁴ Résistance spécifique 10¹⁷ Ohm.cm Résistance de surface 10¹⁴ Ohm Limite de résistivité 90 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques.</p>	<p>PP-H (Polypropylène homopolymère)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 0,91 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) 0,1 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,25 Facteur de perte diélectrique 3x10⁻⁴ Résistance spécifique >10¹⁶ Ohm.cm Résistance de surface >10¹³ Ohm Limite de résistivité 55-90 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 163 C°</p>

Point de fusion cristalline 136 C° Température maximale d'utilisation courte durée 120 °C Température maximale d'utilisation continu -200/80 °C	Température maximale d'utilisation courte durée 140 °C Température maximale d'utilisation continu -10/100 °C
PP-R (Polypropylène copolymère) Caractéristiques mécaniques. Densité 0,91 g/cm ² Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,3 Facteur de perte diélectrique 5x10 ⁻⁴ Résistance spécifique >10 ¹⁶ Ohm.cm Résistance de surface 10 ¹³ Ohm Limite de résistivité 80 kV/mm Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 140-150 C° Température maximale d'utilisation courte durée 130 °C Température maximale d'utilisation continu -10/100 °C	Matériau PPS (Polypropyleen zelfdovend) Caractéristiques mécaniques. Densité 0,95 g/cm ² Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,3 Facteur de perte diélectrique 5x10 ⁻⁴ Résistance spécifique >10 ¹⁶ Ohm.cm Résistance de surface >10 ¹³ Ohm Limite de résistivité 80 kV/mm Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 158-164 C° Température maximale d'utilisation courte durée 130 °C Température maximale d'utilisation continu -10/100 °C
Matériau ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene) Caractéristiques mécaniques. Densité 1,07 g/cm ² Absorption d'eau (climat standard) <0,01 % Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,4 Facteur de perte diélectrique 0,008 Résistance spécifique 1,23 ¹⁶ Ohm.cm Résistance de surface Ohm Limite de résistivité >20 kV/mm Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline >130 C° Température maximale d'utilisation courte durée 80 °C Température maximale d'utilisation continu -35/58 °C	PVDF (Polyvinylidène fluoride (Solef)) Caractéristiques mécaniques. Densité 1,78 g/cm ² Absorption d'eau (climat standard) <0,04 % Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 8,0 Facteur de perte diélectrique 0,08 Résistance spécifique 10 ¹⁵ Ohm.cm Résistance de surface 10 ¹³ Ohm Limite de résistivité 22 kV/mm Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 175-178 C° Température maximale d'utilisation courte durée 150 °C Température maximale d'utilisation continu -40/140 °C
Matériau PTFE (Polytetrafluorethylène Téflon) Caractéristiques mécaniques. Densité 2,18 g/cm ² Absorption d'eau (climat standard) <0,01 % Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,1 Facteur de perte diélectrique 5x10 ⁻⁴ Résistance spécifique 10 ¹⁷ Ohm.cm Résistance de surface 10 ¹⁵ Ohm Limite de résistivité 20-80 kV/mm Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 320-340 C° Température maximale d'utilisation courte durée	ECTFE (Polychlorotrifluoréthylène) Caractéristiques mécaniques. Densité 1,68 g/cm ² Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,5 Facteur de perte diélectrique 0,0009 Résistance spécifique 10 ¹⁵ Ohm.cm Résistance de surface Ohm Limite de résistivité 80 kV/mm Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 245 C° Température maximale d'utilisation continu 150°C

<p>300 °C Température maximale d'utilisation continu - 200/+260 °C</p>	
<p>PFA (polymère Fluoré)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 2,15 g/cm²</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,04 Facteur de perte diélectrique 0,0002 Résistance spécifique 10¹⁸ Ohm.cm Limite de résistivité 55 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 290 C° Température maximale d'utilisation courte durée 260 °C Température maximale d'utilisation continu - 200/200 °C</p>	<p>PSU (Polysulfone)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 1,24 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) 0,25 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,7 Facteur de perte diélectrique 0,003 Résistance spécifique 5x10¹⁶ Ohm.cm Limite de résistivité >40 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 230 C° Température maximale d'utilisation courte durée 180 °C Température maximale d'utilisation continu - 40/150 °C</p>
<p>PEEK (Polyétheréthercétone)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 1,32 g/cm²</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 334 C° Température maximale d'utilisation courte durée 280 °C Température maximale d'utilisation continu 250 °C</p>	<p>PMMA (Polyméthylacrylate de méthyle extrudé)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 1,10 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) 0,3 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 2,6 Résistance spécifique >10¹⁵ Ohm.cm Limite de résistivité 20-25 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 180 C° Température maximale d'utilisation courte durée 85 °C Température maximale d'utilisation continu - 40/+70 °C</p>
<p>PC (Polycarbonate)</p> <p>Caractéristiques mécaniques. Densité 1,20 g/cm² Absorption d'eau (climat standard) <0,2 %</p> <p>Caractéristiques électriques. Constante diélectrique relative 3,0 Facteur de perte diélectrique 10x10⁻⁴ Résistance spécifique 10¹⁶ Ohm.cm Résistance de surface 10¹⁵ Ohm Limite de résistivité 35 kV/mm</p> <p>Caractéristiques thermiques. Point de fusion cristalline 230 C° Température maximale d'utilisation courte durée 170 °C Température maximale d'utilisation continu - 40/135 °C</p>	

ANNEXE 2

ICM SYSTEM

Le ICM system est un détecteur de décharges partielles numérique utilisable sur une large palette d'applications. Cet instrument transmet les impulsions électriques associées aux décharges en respectant leurs amplitudes et angle de phase dans une représentation trois Dimensions.



ICM System

Unité d'acquisition

L'unité centrale du système de détection est la même pour toutes les applications. L'adaptation aux demandes spécifiques de chaque application est possible en choisissant les éléments de circuits (amplificateur, dispositif de couplage) correspondants. L'unité d'acquisition est constituée de six modules.



Unité d'acquisition

Le module d'alimentation AC2 :

Le LED vert indique que l'instrument est mis sous tension. La tension d'entrée doit être dans la gamme 95-260 V AC et à une fréquence 47-63 Hz.

Le module de contrôle CTRL3 :

Ce module contient la communication GPIB et le port série. Un affichage par des LEDs indique à chaque instant l'état du système, par exemple : en communication, démarrage de l'acquisition, ou une activité de décharge partielle.

Le module DPR3 :

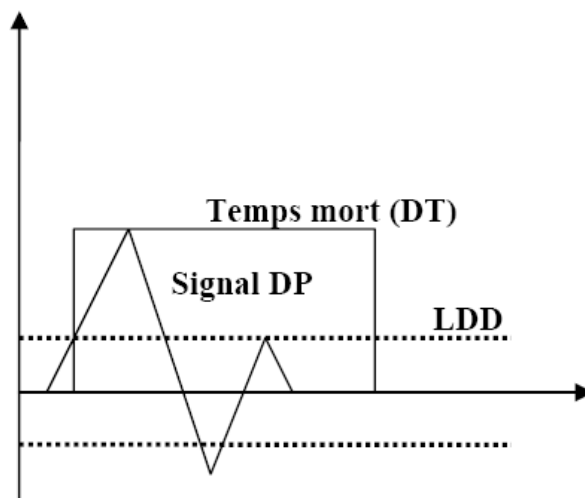
Le module DPR3 permet de générer les références logiques (temps et phase) ; il contient les blocs mémoires et le circuit de mesure de la tension. Ainsi, le logiciel peut afficher la forme exacte de la tension appliquée sur l'objet à tester. Le DPR3 contient un dispositif pour le contrôle de la signature des décharges et l'émulation du port RAM afin d'avoir l'acquisition des spectres et la communication en mode asynchrone.

Le module de conversion analogue/numérique ADC3 :

L'unité ADC3 réalise la conversion en numérique des impulsions électriques analogues. Ce module détermine l'amplitude des impulsions et leurs polarités. Il peut traiter différentes formes d'impulsions en fonction de l'équipement testé.

La conversion analogique numérique peut être réalisée en deux modes trigger :

- ✓ Trigger aux premiers pics (non re-triggerable ou re-triggerable) : Le premier pic du signal mesuré est mémorisé et converti sous la forme d'une expression numérique. (Non retriggerable) signifie que dans l'intervalle du temps mort aucune impulsion n'est acceptée. Afin d'empêcher la lecture des multiples signaux oscillants, une autre impulsion qui apparaît sur la durée définie par le temps mort peut re-trigger le temps mort. C'est le mode (retriggerable).
- ✓ Trigger in time window : La décision concernant la polarité des impulsions est prise à la fin du (time window). Ainsi, les deux pics positif et négatif sont mesurés et mémorisés dans le temps mort défini et le plus grand d'entre eux sera transféré au module DPR3. Dans les deux modes présentés ci-dessus, la conversion est démarrée si l'amplitude des impulsions électriques dépasse le niveau du bruit établi par LDD. Le temps mort (DT) définit l'intervalle de temps durant lequel une impulsion est convertie en numérique et ce temps est réservé pour une seule impulsion électrique. Le temps mort minimum est de 5 μ s. Le LDD (Low Level Discriminator) permet de rejeter le niveau du bruit ou les décharges qui ont une faible intensité et un taux de répétition grande. Il réagit de façon symétrique sur les impulsions positives et négatives.



Trigger module ADC3 de l'unité de détection des DP

La résolution du convertisseur est de 12 bits. La fréquence d'échantillonnage maximale en temps réel est de 200kHz.

Le module AMP3 :

Ce module contient l'amplificateur du signal associé à la décharge partielle. Il y a un computer programmable pour le gain et la bande passante des filtres. De plus le module intègre un commutateur analogue qui ouvre le circuit quand il est actionné par le bruit sur une grille, et un PC-mètre avec un convertisseur analogique numérique pour la mesure de la charge apparente en respectant la norme IEC 270.

Les paramètres spécifiques sont :

- gain 1, 2, 4, 8, 10, 20,.....200, 400, 800
- impédance d'entrée 50 Ω
- fréquence de coupure : BF 40, 80,100 HZ et HF 250, 600, 800 Hz

Le module GATE3 :

Le module de déclenchement GATE3 surveille le trigger du bruit afin d'éviter que ce signal ne contribue pas à la signature des décharges partielles. La structure est la même que celle du AMP3. De plus il contient un trigger contrôlé, Si un signal de bruit amplifié dépasse le niveau trigger, un signal interne TTL est transmis aux modules AMP3 et ADC3. Activé par le programme de contrôle, ce signal ouvre un commutateur analogue du module AMP3 et empêche le traitement d'une autre impulsion électrique.

Dispositifs externes utilisé pour la détection des DP :

Le RPA1 est un pré-amplificateur pour les mesures dans le domaine des basses fréquences en respectant les normes IEC60270. La bande passante du filtre est légèrement plus large que celle des filtres intégrés dans les modules AMP3 et GATE3. Ainsi, les filtres de l'unité d'acquisition contrôlent seulement la bande passante globale. La sensibilité (en termes de PC) dépend des connections dans le circuit de mesure et du niveau de bruit. Les paramètres caractéristiques de cet amplificateur sont :

- impédance d'entrée 10K Ω /50PF
- bande passante 40KHZ-800kHz
- sensibilité d'entrée <200 mV.

Le HST1 est un pré-amplificateur pour la tension mesurée. Le système ICM l'actionne à distance s'il est connecté à l'entrée SYNC IN du module DPR3.

Les spécifications de cet amplificateur sont :

- impédance d'entrée 10M Ω /200PF
- gamme de tension 100V rms
- bande passante 30-400Hz.

Le quadripôle CIL est constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance d'atténuation. L'inductance et la résistance sont calculées pour former, avec la capacité de couplage, un filtre de second ordre passe-haut. La figure ci-dessous présente le schéma électrique de ce dispositif.

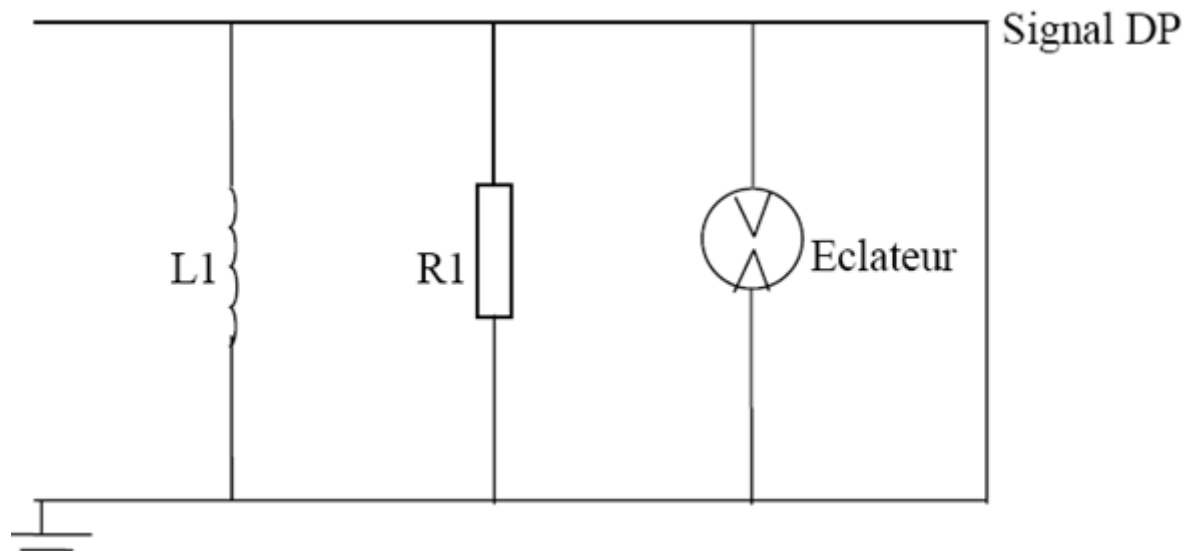


Schéma électrique du quadripôle CIL4L

Les spécifications du quadripôle CIL4L qu'on utilise pour les mesures des DP sont :

- 600pf-2.5nf, 100mH
- tension maximale 125KV (50HZ).

Le calibreur CAL1 est utilisé pour réaliser la calibration du circuit de mesure des DP. Le calibreur est un générateur d'impulsions et il permet de régler l'amplitude et la polarité d'une seule impulsion de charge par cycle. Cet instrument est synchronisé avec la fréquence de la ligne de tension par l'intermédiaire d'une photodiode. L'impulsion de charge du calibreur est engendrée par l'injection d'un échelon variable de tension à travers une capacité fixe. Le calibreur doit être relié en parallèle avec l'objet à tester. La gamme de charge standard pour CAL1A est 1/2/5/10/20/50/100 PC. Etant donné que le calibrage de l'appareil de détection est en fonction des paramètres diélectriques de l'objet, il est nécessaire de recalibrer à chaque changement d'objet.

ANNEXE 3**Caractéristiques techniques de l'enceinte climatique**

Plage de température : +10°C à +95°C

Stabilité (temporelle) : +/-0.1 à +/-0.3K

Plage d'humidité : 10% hr à 98% hr (voir climatogramme chapitre III)

Température de rosée : -3°C à 94°C

Homogénéité : +/-1.0 % hr à +/-3% hr

Compensation thermique :

400W sur la plage de 25°C à +95°C avec humidité relative jusqu'à 90% hr.

Valeurs d'étalonnage : +23°C / 50%hr et +95°C / 50%hr



Enceinte climatique de marque VÖTSCH - VC 7018

REFERENCES

- [Agn.99] S. Agnel, A. Toureille, G. Platbrood and G. Geert, "Study of AC Charging Ability of XLPE Insulating for Power Cable", *Jicable* 99, pp. 656-661, 1999.
- [Agu.87] M. Aguet, M. Ianoz "Haute tension" Ed. Dunod 1987 pp. 314- 343
- [Avi.00] Steven M. Avila and David A. Horvath « microscopic void detection as a prelude to predicting remaining life in electric cable insulation », International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human-Machine Interface Technologies, Washington, DC, November, 2000.
- [Bal-84] E. H. Ball, H. W. Holdup, D. J. Skipper and B. Vecillio, "Development of Cross-Linked Polyethylene Insulation for HV Cables", CIGRE, Paper 21-01, 1984.
- [Bar.97] R. Bartnikas, "Corona discharge processes in voids" in *Engineering Dielectrics, Volume 1, Corona Measurement and Interpretation*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1979, ch. 2, pp. 22–67.
- [Bar.87] R. Bartnikas, "A Commentary on Partial Discharge Measurement and Detection", *IEEE Trans. Elec. In-Sui.*, Vol. 22, pp. 629-653, 1987.
- [Bar.93] R. Bartnikas and J. P. Novak, "Different Forms of Partial Discharge and their Terminology", *IEEE Trans. Elec. Insul.*, this issue, 1993.
- [Bla.01] Blaise G., Charge localization and transport in disordered dielectric materials. *Journal of Electrostatics*, 2001. 50(2): p. 69-89.
- [Bog.04] S. Boggs, A Rational Consideration of Space Charge, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 20, No. 4, pp 22-27(2004).
- [Bou.00] A. Boubaker, Y. Mecheri, M. Bonnezon « Comportement diélectrique et mécanique du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à un vieillissement thermique continu » *Ann. Chim. Sci. Mat.* 2000, 25, pp.457-470.
- [Bou.01] L. Boudou, "Influence des paramètres de mise en oeuvre sur la morphologie et la conductivité électrique d'un polyéthylène destiné à la fabrication des câbles", Thèse de doctorat, université Paul Sabatier, Toulouse III, 2001.
- [Che.02] Y. F. F. Ho, G. Chen, A. E. Davies, S. G. Swingler, S. J. Sutton, R. N. Hampton, S. Hobdell, "Measurement of Space Charge in XLPE Insulation Under 50Hz AC Electric Stresses Using the LIPP Method", *IEEE Trans. Diel. & Electr. Insul.*, Vol. 9 No 3, pp. 362-370, 2002.
- [Che.03] G. Chen, M. Fu and X.Z. Liu "Influence of AC Ageing on Space Charge Dynamics in LDPE", XIII th International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003.
- [Che.03] Y.-B. Chen, R.J. Varley and G.P. Simon, "Layered Silicate Nanocomposites Based on Various High Functionality Epoxy Resins: The Influence of Cure Temperature on Morphology, Mechanical Properties and Free Volume", *Macromolecules*, Vol. 36, pp. 1616 -1625, 2003.
- [Chr.85] S. Christensen, Electrical Deterioration of Epoxy Plastic as a Result of Internal Discharges, Ph.D. thesis Technical University of Denmark, 1985.
- [Cie.83] C.E.I Publication 250 «Partial discharges measurements», Edition 1983.
- [Dan.91] M.G. Danikas «Some further comments on the fast measurements of partial discharges in polyethylene voids» *Proc. 20th Elec. Electron. Insul. Conf.* pp 220–4, 1991
- [Dan.96] M. G. Danikas, I. Karafyllidist, A. Thanailakis et al «simulation of electrical tree growth in solid dielectrics containing voids of arbitrary shape », *IEEE, Trans. Elect. Insul. Pas-92*, pp. 535-52, 1996.
- [Dan.93] M. G. Danikas, R. Bartnikas and J. P. Novak, "Discussion On: On the Spark to Pseudoglow Transition Mechanism and Discharges Detectability", *IEEE Trans. Elec. Insul.*, Vol. 28, pp. 429-431, 1993.

- [Day.84] A. G. Day « Optical detection of electrical discharges in insulation », IEE Conf. Publication n°239 Dielectric materials measurements and application, pp 229-232, 1984.
- [Ded.02] Base de données des polymères, groupe Dedienne (www.polymeres.dedienne.com)
- [Dej.92] P. Dejean, N. Foulon, M. Goldman and H. Dejean, "Chemical Aspects of the Aging of Solid Insulating Materials Submitted to Partial
- [Dis1.92] L. A. Dissado et J. C. Fothergill, "Electrical degradation and breakdown in polymers" , Peter Peregrinus Ltd, London, United Kingdom, 1992.
- [Dub.01] Dubois, J.-C., Propriétés diélectriques des polymères. Techniques de l'Ingénieur, 2001.
- [Fou.00] Fournié and Coehlo, Diélectriques - Bases théoriques. Techniques de l'Ingénieur, 2000.
- [Fou.86] R.Fournie «les isolants en électrotechnique, concepts et théorie», Edition Eyrolles 1986.
- [Fou.95] N. Foulon Belkacemi, M. Goldman, A. Goldman and J. Amouroux, "Transformation of nodules into crystals on polymers submitted to corona discharges with streamers", IEE Proc. Sci., Measur. Techn., Vol. 142, pp. 477 - 481, 1995.
- [Fuj.87] Y. Fujimoto et al Operation of on_line substation diagnosis system, IEEE San Francisco, 1987
- [Gal.04] Olivier Gallot-lavallee, « Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension », thèse de doctorat, l'Université Paul Sabatier (Toulouse III), 2004.
- [Gar.62] C.G. Garton «the energy of discharges and their interaction with solid dielectrics in gus discharges and the electricity supply in industry». Édition Butterworth, 1962
- [Gar.80] G. Garcia, Sur le comportement du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à l'action des décharges partielles, Ph.D. thesis Paul Sabatier University, Toulouse, 1980
- [Gar.87] M. Gamez Garcia, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, "Synthesis reactions involving XLPE subjected to partial discharges", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 22, pp. 199 - 205, 1987.
- [Gar.88] V.R. Garcia-Colon Hernandez and M. Gamez-Garcia, "Evaluación de superficies de XLPE expuestas a descargas parciales mediante una microsonda electrostatica", 1st Reunión de Verano del Capítulo de Potencia, IEEE Sección México, Acapulco, pp. 1 - 6, 1988.
- [Gha.04] S.A. Al-Ghamdi and B.R. Varlow, "Treeing in Mechanically Prestressed Electrical Insulation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. Vol. 11, pp. 130-135, 2004.
- [Gja.94] A.C. Gjaerde, "Multi factor ageing of epoxy - the combined effect of temperature and partial discharges", Ph.D. thesis Technical University Trondheim, 1994.
- [Gol.95] M. Goldman, A. Goldman and J. Gatellet, "Physical and Chemical Aspects of Partial Discharges and their Effects on Materials", IEE Proc. Sci., Measur. Techn., Vol. 142, pp. 11 - 16, 1995.
- [Gut.95] F. Gutfleisch and L. Niemeyer, "Measurement and simulation of PD in epoxy voids," IEEE Trans. Dielectrics EI., vol. 2, no. 5, pp. 729-743, Oct. 1995.
- [Had.91] A. Hadid, C. Laurent, T. Lebey, "A new experimental technique to detect space charge injection in polymeric dielectrics", Proceeding of the 3rd international conference on properties and applications of dielectric materials, pp. 942-945, Tokyo, 1991.
- [Har.93] R. Harrold, "Partial discharge – Part XVI : Ultrasonic sensing of Partial discharge within large capacitors", IEEE Electrical insulation, magazine, Vol. 9, N°. 3, pp. 21-28, 1993.

- [Hat.93] D. P. Agoris and N. D. Hatziaargyriou «Approach to partial discharge development in closely coupled cavities embedded in solid dielectrics by the lumped capacitance model» *Proc. IEE* 140A 131–4, 1993
- [Hol.92] J.T. Holbøll and M. Henriksen, "Partial discharge patterns and surface deterioration in voids in filled and unfilled epoxy", *IEEE International Sympos. Electr. Insul. Cat. No. 92CH3150 0*, pp. 354-358, 1992.
- [Hor.00] D. A. Horvath, D. C. Wood, and M. J. Wylie, "Microscopic Void Characterization for Assessing Aging of Electric Cable Insulation Used in Nuclear Power Stations" *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, pp 33-38, 2000.
- [Hor.01] Horvath, D.A. and D.C. Martin, "Preliminary Results of Electric Insulation Void Content Growth from Simulated Exposure to a Nuclear Power Plant's High Energy Line Break Event", to be presented at *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIPD) 2001*
- [Hud.90] C. Hudon, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, "Surface conductivity of epoxy specimens subjected to partial discharges", *IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul. Cat. No. 90 CH2727 6*, pp. 153-155, 1990.
- [Hud.91] C. Hudon, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, "Analysis of Degradation Products on Epoxy Surfaces subjected to pulse and glow
- [Hud.92] C. Hudon and R. Bartnikas, "Surface and gas phase reactions arising with epoxy exposed to partial discharges". *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, Cat. No. 92CH3123 7, pp. 725-734, 1992.
- [Hud.93] C. Hudon, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, "Spark-to-glow discharge transition due to increased surface conductivity on epoxy
- [Hud.94] C. Hudon, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, "Chemical and physical degradation effects on epoxy surfaces exposed to partial discharges", *IEEE 4th Intern. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials Cat. No. 94CH3311 8*, pp. 811-814, 1994.
- [Hud.95] C. Hudon, R. Bartnikas and M.R. Wertheimer, "Effect of physicochemical degradation of epoxy resin on partial discharge behavior", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 2, pp. 1083 - 1094, 1995.
- [Ied1.83] M. Ieda, "Electrical conduction and carrier traps in polymeric materials», *Proc. ICSD 83CH1836-6-EI*, Toulouse, 1983.
- [Ish.99] I. Ishikawa, S. Nakamura, S. Utsunomiya, S. Yamamoto et T. Niwa, "The research of peroxide decomposition in XLPE cables", *Fujikura Ltd., Tokyo, Japan*, pp. 506-511.
- [Jon.84] A. K. Jonscher and R. Lacoste, "On a cumulative model of dielectric breakdown in solids," *IEEE Trans. Elec. Insul*, vol. 19, pp. 567-77, 1984.
- [Kag.75] S. Kageyama, M. Ono and S. Chabata, "Microvoids in Crosslinked Polyethylene Insulated Cables", *IEEE Trans. PAS.*, Vol. 94, pp. 1258-1263, 1975.
- [Kar.94] Georges G. Karady, Murray D. Sirkis, "Investigation of Corona Initiation Voltage at Reduced Pressures" *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 30, No.1 (1994).
- [Kat.03] H. Kato et Y. Miyashita, "Elucidation of the chemical reaction in the crosslinked polyethylene insulation exposed to high temperature", *Mitsubishi Cable Industries Ltd.*, pp. 391-400.
- [Koz.03] M. Kozako, N. Fuse, K. Shibata, N. Hirai, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Surface change of polyamide nanocomposite caused by partial discharges". *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, Cat. No. 03CH37471, pp. 75-78, 2003.
- [Koz.04] M. Kozako, R. Kido, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Difference in surface degradation due to partial discharges between polyamide nanocomposite and microcomposite [electrical insulation applications]", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, *IEEE Cat. No. 04CH37584*, 2004.

- [Koz.04A] M. Kozako, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto and T. Tanaka, "Surface degradation of polyamide nanocomposites caused by partial discharges using IEC (b) electrodes", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 11, pp. 833 - 839, 2004.
- [Koz.04B] M. Kozako, R. Kido, N. Fuse, Y. Ohki, T. Okamoto, and T. Tanaka, "Difference in surface degradation due to partial discharges between polyamide nanocomposite and microcomposite [electrical insulation applications]", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, pp. 398 - 401, 2004.
- [Kre.00] F.H Kreuger "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment" Butterworths & Co. (Publishers) Ltd, (1989), pp.15-28
- [Kre.01] F.H Kreuger and Udo Fromm "Partial Discharges in Gaseous Voids for DC Voltage" *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 33 (1994), pp.1079-1084
- [Kre.89] F. H. Kreuger, S. Shihab, "Partial Discharge Measurement of Three-core Belted Power Cables", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, pp. 927-931, 1989
- [Kre.92] F. H. Kreuger, "Partial Discharge detection in high voltage equipment", Delft University press, 1992.
- [Kub.78] B. Kubler «Investigations of partial discharge measuring techniques using epoxy resin samples with several voids *Proc. IEEE Int. Symp. Elect. Insul.* pp 82–5, 1978
- [Lau.92] Laurent, C., Mayoux, A.P. « Partial Discharge Part XI: Limitations to PD as a diagnostic for deterioration and remaining life ». *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 8, No. 2 14, 1992.
- [Lau] C. Laurent, "Diélectriques solides et charge d'espace», *Techniques de l'ingénieur*, D 2 305.
- [Lau.79] C.Laurent «Etude de la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène par voies optiques et électriques». Thèse docteur ingénieur, U.P.S Toulouse 1979.
- [Leb.00] T. Lebey "Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques" *J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information des systèmes*, Vol. 4, Hors-série 4,3 (2000).
- [Leb.90] T. Lebey, C. Laurent, "Charge injection and electroluminescence as a prelude to dielectric breakdown", *J. Appl. Phys.* 68(1), pp. 275-282, 1990.
- [Lun.92] L.E. Lundgaard, "Partial Discharges – Part XIV : acoustic partial discharges detection – practical application", *IEEE Electrical insulation magazine*, Vol. 8, N°. 5, pp. 34-43, 1992.
- [Mam.95] Mammeri, M., Laurent, C., Salon, J. « Influence of space charge buildup on the transition to electrical treeing in PE under ac voltage ». *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2, No. 1 27, 1995.
- [Mar.03] L Markey and G C Stevens1 "Microstructural characterization of XLPE electrical insulation in power cables: determination of void size distributions using TEM", *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 pp 2569–2583, 2003.
- [Mar.72] Martin, E.H. and J. Hirsch, *Electron-Induced Conduction in Plastics. I. Determination of Carrier Mobility. Journal of Applied Physics*, 1972. 43(3): p. 1001-1007.
- [Meu.00] Meunier, M. and N. Quirke, « Molecular modeling of electron trapping in polymer Insulators ». *The Journal of Chemical Physics*, 2000. 113(1): p. 369-376.
- [Meu.01] Meunier, M., N. Quirke, and A. Aslanides, Molecular modeling of electron traps in polymer insulators: Chemical defects and impurities. *The Journal of Chemical Physics*, 2001. 115(6): p. 2876-2881
- [Meu.00] M. Meunier et N. Quirke, "Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators», *J. Chem. Phys.* Vol. 113 pp.369-376, 2000.
- [Meu.01] M. Meunier, N. Quirke et A. Aslanides, " Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators: chemical defects and impurities», *J. Chem. Phys.* Vol. 115 pp.2876-2881, 2001.

- [Mor.90] P.H.F. Morshuis and F.H. Kreuger, "Transition from streamer to Townsend mechanisms in dielectric voids", *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Vol. 23, pp. 1562 - 1568, 1990.
- [Mor.05] P.H.F. Morshuis "Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharges some thoughts on progress made and where to go now" *IEEE Trans. DEIS*, vol. 12, no. 5, pp. 905-913, Oct; 2005.
- [Mor.91A] P.H.F. Morshuis and F.H. Kreuger, "The influence of the dielectric-gas interface on the discharge mechanism in a dielectric bounded cavity", *7th Intern. Sympos. High Voltage Engineering*, paper 22.07, 1991.
- [Mor.91B] P.H.F. Morshuis and F.H. Kreuger, "The evolution of the discharge mechanism in a dielectric bounded cavity due to surface effects", *IEEE 3rd Intern. Conf. Properties and Applications of Dielectric Materials* Cat. No. 91CH2937 1, pp. 672-675, 1991.
- [Mor.95] P. Morshuis, "Assessment of dielectric degradation by ultrawide-band PD detection", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 2, pp. 744 -760, 1995.
- [Mor.93] P. Morshuis, "partial discharge mechanisms", *Doctoral Dissertation*, University of Delft, 1993.
- [Mot.75] O.Motoyuki S.Kagayama, S.Chabata, «Microvoids in crosslinked polyethylene insulated cables», *IEEE, Trans. Elect. Insul. Pas-94*, vol. N°4, pp. 1258-63, 1975.
- [Nam.80] Namiki, Y., Shimanuki, H., Aida, F. Morita, M. « A study on microvoids and their filling in crosslinked polyethylene insulated cables ». *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. EI-15, No. 6 473, 1980.
- [Not.99] P. jr Notingher, A. Tourelle, J. Santana and M. Albertini, "Space Charge in A.C.-Poled XLPE for HV Cables", *Jicable 99*, pp. 701- 706, 1999.
- [Old.01] F. Oldervoll, "Polymer materials as insulation in HVDC cables", *rapport d'activité du Department of Electrical Power Engineering* (<http://www.elkraft.ntnu.no>).
- [Pfe.91] W. Pfeiffer "High-frequency voltage stress of insulation – Methods of Testing" *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.26, No.2, (1991), pp. 239-246
- [Rog.85] E C. Rogers « The self-extinction of gaseous discharges in cavities in dielectrics *Proc. IEE Vol. 105A* pp.621–630, 1985
- [Sal.03] M. Abdel-Salam and L. Allen "Current-voltage characteristics of corona in rod-plane gaps as influenced by temperature" *IEEE, Proc-Sci. Mea. Technol. Vol.150*, No.3, (2003), pp. 135-139.
- [Seg.04] T. Seghier, D. Mahi, A. Nouar, K. Lefkaier « The Effect of Temperature and the Mutual influence Between two Cavities on the Appearance of Partial Discharges in Gaseous Cavities Contained in the Insulator of High Voltage » *IEEE proceeding, International Conference on Solid Dielectrics. Toulouse, France, July 5-9. 2004*, pp.598-602
- [Seg.03] T. Seghier, D. Mahi, A. Nouar, K. Lefkaier « Study by simulation of the effect on temperature on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage cable » *Power Tech. Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna. Volume 2, 23-26 June 2003*, 4 pages.
- [Seg] Y. Segui, "Diélectriques – Courants et conduction», *Techniques de l'ingénieur*, D 2 301.
- [Seg.01] Seghier Tahar « Etude par simulation de l'influence de la température sur l'apparition des décharges partielles dans les cavités gazeuses contenues dans la couche isolante des câbles de haute tension » *Mémoire de magister, Université de Laghouat*, 2001.
- [Sei.75] K. Seiji, O.Motoyuki, C. Sueji « Microvoids in crosslinked polyethylene insulated cables » *IEE Transactions on Power Apparatus and systems*, Vol. Pas-94, N°4, 1975, pp. 1258-1265.
- [Sek.01] Y. Sekii, Y. Idei et K. Asakawa, "Influence of antioxidants on polyethylene chemical crosslinking reaction", *Annual Report of CEIDP*, pp. 83-87, 2001.

- [Ser.78] A. sergent «Contribution à l'étude de vieillissement d'isolations solides soumis aux décharges partielles» Thèse de doctorat. U.P.S, Toulouse 1978.
- [Shi.98] N. Shimizu and C. Laurent, "Electrical Tree Initiation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 5, pp. 651-659, 1998.
- [Tan.04] T. Tanaka, G.C. Montanari, and R. Mulhaupt, "Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future applications", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, pp. 763 - 784, 2004.
- [Tan.05] T. Tanaka, "Dielectric-nano-composites with insulating properties", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5, 2005.
- [Tan] B. H. Tan, I. Cotton and S Hill "Higher Voltage Aircraft Electrical Systems – A Study of Discharge Phenomena" 1- Electrical Engineering, UMIST, Manchester, UK. 2- Strategic Research Center, Rolls-Royce plc, Derby, UK.
- [Tem.00] K. Temmen, "Evaluation of surface changes in flat cavities due to ageing by means of phase-angle resolved partial discharge
- [Tia.01] Y. Tian, P.L. Lewi, A.E. Davies, G.M. Hathaway, S. J. Sutton, S.G. Swingler "acoustic emission measurement of partial discharges during electrical tree growth in XLPE cable insulation", IEEE 7th international conference on solid dielectrics, pp. 477-480, Eindhoven, the Netherlands 2001.
- [Tia.02] Y. Tian, P.L. Lewi, A.E. Davies, "Comparison of on-line partial discharge detection methods for HV cable joints", IEEE transactions dielectrics and electrical insulation Vol. N°. 4, pp. 604-615, 2002.
- [Tro.84] J.P. Trotignon, J. Verdu, M. piperaud et al «Précis de matières plastiques », édition Afnor-Nathan, Paris 1984.
- [Vah.72] W. Vahlaström «Investigation of insulation deterioration in 15kV and 22 kV polyethylene cables removed from service». IEEE Trans. Vol 91 pp.1023-28, 1972.
- [Van.94] R.J. Van Brunt, "Physics and chemistry of partial discharge and corona", IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, N°. 5, pp. 761-784, 1994.
- [Wat.95] Watson, P.K., The Transport and Trapping of Electrons in Polymers. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995. 2(5): p. 915-924.
- [Win.72] Wintle, H.J., Surface-Charge Decay in Insulators with Nonconstant Mobility and with Deep Trapping. Journal of Applied Physics, 1972. 43(7): p. 2927-2930.
- [Wol.78] K.D. Wolter, J.F. Johnson and J. Tanaka, "Degradation product analysis for polymeric dielectric materials exposed to partial discharges", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 13, pp. 327 - 336, 1978.
- [Wol.82] K.D. Wolter, J. Tanaka and J.F. Johnson, "A Study of the Gaseous Degradation Products of Corona-exposed Polyethylene", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 17, pp. 248 - 252, 1982.
- [Yod.72] B.Yoda, K. Muraki « development of EHV cross-linked polyethylene insulated power cables », IEEE, Trans. Elect. Insul. Pas-92, pp. 506-13, 1972.

STUDY OF PARTIAL DISCHARGES AND THEIR INFLUENCING ON ELECTRICAL TREE APPEARANCE IN SOLID INSULATORS OF HIGH VOLTAGE CABLE

Abstract

This thesis concerns the study of the partial discharges phenomenon (PDs) which occur in a solid insulator containing defects. These defects, if they did not exist during the operation of the implementation, they can be formed at the time of the service of insulator. This phenomenon depends on several factors intrinsic and extrinsic generally joined together, and very often the laws modify interact which characterize insulator and make more complex their analysis. In this context and all depends on the complexity of the situation, a simulation and experimental studies were presented. Indeed, we tried to show the effect of some factors on the appearance and the activity of the partial discharges, more particularly the threshold voltage of appearance. By using software Comsol Multiphysics, we treated the influence of the size, the form, the position, the orientation compared to the electric field of the defects on DPs. In the aim of validating some obtained results by simulation, experimental tests were realized in the high voltage room test. Indeed, while working on different samples (cables and sandwich) representing an insulator containing defects we studied the influence of the temperature, the moisture, the pressure, the frequency and the existence of the space charges on the activity of PDs.

Key Words: Solid insulator, polyethylene, cavities, electric field, temperature, moisture, pressure, space charges, partial discharges.

Comsol Multiphysics

ETUDE DES DECHARGES PARTIELLES ET LEURS INFLUENCE SUR L'APPARITION DES ARBORESCENCES DANS LA COUCHE ISOLANTE DES CABLES HAUTE TENSION

Résumé :

Les travaux de cette thèse portent sur l'étude du phénomène des décharges partielles (DPs) qui se produisent dans un isolant solide contenant des défauts. Ces défauts, s'ils n'existaient pas pendant l'opération de la mise en œuvre, ils peuvent se former lors du service de l'isolant. Ce phénomène dépend de plusieurs facteurs intrinsèques et extrinsèques généralement réunie, interagissent et modifient bien souvent les lois qui caractérisent l'isolant et rendent plus complexe leur analyse. Dans ce contexte et tout dépend de la complexité de la situation, une simulation numérique ainsi que des essais expérimentaux ont été présentés. En effet, nous avons essayé de mettre en évidence l'effet de quelques facteurs sur l'apparition et l'activité des décharges partielles et plus particulièrement la tension seuil d'apparition. En utilisant un le logiciel Comsol Multiphysics, nous avons traité l'influence de la taille, de la forme, de la position, de l'orientation par rapport au champ électrique des défauts sur les (DPs). Dans le but de valider quelques résultats obtenus par simulation, des essais expérimentaux ont été réalisés dans la salle haute tension du Laboratoire PLAsmas et Conversion d'Energie (Laplace) de Toulouse. En effet, en travaillant sur différents échantillons (type câble et type sandwich) représentant un isolant contenant des défauts nous avons étudié l'influence de la température, de l'humidité, de la pression, de la fréquence et de l'existence des charges d'espaces sur l'activité des DPs.

Mots clés : Isolant solide, polyéthylène, défaut, champ électrique, température, humidité, pression, charges d'espaces, décharges partielles.