

SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة باجي مختار عنابة
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA



FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIORAT
DEPARTEMENT D'ELECTROMECHANIQUE

THESE

Présentée en vue de l'obtention d'un Diplôme de :

DOCTORAT en SCIENCES
Spécialité: ELECTROMECHANIQUE

Thème

**ETUDE DES PROPRIETES DIELECTRIQUES
DES MATERIAUX ISOLANTS SOUMIS A
DES CHAMPS TRES INTENSES**

Par

M^{me} SMILI Karima

Soutenu publiquement le : 27 septembre 2018 devant le Jury composé de :

Président:	Mr SAAD.S	Professeur, Université Badji Mokhtar-annaba
Directeur de thèse :	Mr HEROUS.L	Professeur, Université Badji Mokhtar-annaba
Examineurs :	Mr BELHAMRA.A	Professeur, Université Badji Mokhtar-annaba
	Mr LEMZADMI.A	Professeur, Université 8 mai 1945-Guelma
	Mr BOULOUEH.M	Professeur, Université 8 mai 1945-Guelma
	Mr DIB.D	Professeur, Université Larbi Tebessi-Tebessa

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier **Dieu Le Tout Puissant et Miséricordieux**, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*La première personne à laquelle j'aimerais exprimer ma profonde reconnaissance, mes sincères remerciements et toute ma gratitude, est mon Directeur de thèse **Mr. HEROUS Lazhar**, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel cette production n'aurait pas pu être menée à bien. Qu'il trouve en cette circonstance un hommage vibrant à sa haute personnalité et sa gentillesse.*

*Je tiens à remercier **Mr NEMAMCHA Mohamed** , Professeur à l'Université de Guelma, pour avoir bien voulu m'aider à réaliser les expériences au sein du laboratoire d'électrostatique et de matériaux diélectriques (L.E.M.D) Grenoble,*

*Mes remerciements vont également à **Mr. SAAD Salah**, Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba pour m'avoir encouragé à entreprendre ce projet, pour son soutien et son aide dans la traduction.*

Mes vifs remerciements s'adressent également aux membres du Jury pour l'intérêt qu'ils ont accordé à ma recherche en acceptant de l'examiner.

Enfin, je souhaiterais remercier tous ceux avec qui j'ai eu la chance de collaborer et ceux qui ont participé de près ou de loin, en mettant à ma disposition tous les moyens (matériels, compétences, et qualités humaines) dont ils disposent.

Résumé

Dans le présent travail, nous abordons une problématique essentielle liée aux propriétés diélectriques des matériaux isolants soumis à des champs très intenses. La rupture diélectrique des isolants est à l'origine de nombreuses pannes auxquelles les utilisateurs de matériels électriques sont confrontés.

Aussi les constructeurs électriques et électroniques sont constamment à la recherche de nouvelles techniques pour une meilleure garantie de fonctionnement de leurs produits. Au-delà d'une certaine tension d'alimentation, aucun dispositif électrique ne peut se prévaloir d'être exempt de décharges partielles. Ces dernières sont considérées comme un « ennemi silencieux », dans le sens où elles conduisent, une fois amorcées et si des précautions n'ont pas été prises au préalable, à la défaillance du système dans lequel elles se développent. Compte tenu des contraintes de plus en plus sévères s'exerçant sur les dispositifs et systèmes du génie électrique (électrotechnique ou électronique de puissance) leur existence est de plus en plus d'actualité.

Dans l'industrie de fabrication de condensateurs les ruptures diélectriques observées se situaient souvent en bordure des armatures où les irrégularités conduisent à un renforcement de champ, ou bien dans les régions où les armatures sont en contact avec des vacuoles gazeuses.

Pour remédier à cela, l'une des techniques utilisées consiste à remplir le condensateur de liquides diélectriques (mono/dibenzyltoluène MIDBI), pour lesquels le champ d'apparition des décharges électriques est beaucoup plus élevé que dans les gaz. On prolonge ainsi la durée de vie du condensateur et l'on peut augmenter la contrainte applicable en service. De plus, nous avons utilisé pour la première fois la méthodologie des plans d'expériences pour l'étude de ces processus, en vue de leur modélisation et de leur optimisation.

Les résultats obtenus sont des modèles mathématiques capables d'identifier les principaux facteurs et leurs interactions sur l'apparition des décharges partielles.

Mots-clés : décharges partielles, isolation, polypropylène, condensateur, claquage, plan d'expérience, optimisation

Abstract

The presentwork sheds light on an essential problem related to the dielectric properties of insulating materials that are subject to very intense fields. The dielectric breakage of the insulators is caused by a number of breakdowns which the users of the electrical equipment are confronted with.

Electrical and electronic manufacturers are constantly looking for new techniques in order to have a better performance in relation to their products. Beyond a certain supply voltage, no electrical device could be claimed to be free from partial discharges. The latter is considered as a "silent enemy", in the sense that they result, once initiated, and if precautions are not taken previously, to the failure of the system in which they are to develop.

Given the constraints that are becoming more severe and being applied on the electrical engineering devices and systems (electrical or power electronics); their existence is increasingly topical.

In the capacitor manufacturing industry, the observed dielectric failures are often found either on the armatures edges where the irregularities lead to the enhancement of field, or in the areas where the armatures are in contact with gas vacuoles.

As a remedy for this, one of the techniques used consists of filling the capacitor with dielectric liquids (mono / dibenzyltoluene MDB), for which electric discharges appearance field is much higher than in the gases. This extends the lifetime of the capacitor and increases the applicable stress in service. Furthermore, the experiential plans methodology is used, for the first time, to study these processes in terms of their modelling and optimization.

The obtained results are mathematical models used to identify key factors and their interactions in regard to the occurrence of partial discharges.

Keywords: Partial discharges, Insulation, Polypropylene, Capacitor, Breakdown, Experimental design, Optimization

ملخص

في هذا العمل، تطرقنا إلى مشكلة أساسية تتعلق بخصائص العزل الكهربائي للمواد العازلة الخاضعة لمجال حقل كهربائي جد عالي. إن انهيار العوازل هو أصل العديد من العطب التي يواجهه مستخدمو المعدات الكهربائية. كما أن المصنعين الكهربائيين والإلكترونيين يبحثون باستمرار عن تقنيات جديدة لضمان أفضل تشغيل لمنتجاتهم. بعيداً عن التوتر الممون، لا يمكن لأي جهاز كهربائي أن يدعي أنه خالٍ من التفريغ الجزئي. وتعتبر هذه الأخيرة "عدوًا صامتًا" بمعنى إن لم تأخذ الاحتياطات اللازمة مسبقاً فبمجرد بدئها فإنها تقود إلى فشل النظام الذي ظهرت و تطورت فيه. ونظراً للقيود الصارمة المتزايدة على أجهزة وأنظمة الهندسة الكهربائية (الهندسة الكهربائية أو الالكترونيات الطاقة)، فإن أهميتها تزايدت بوجودها وأصبحت أكثر موضوعية. في صناعة تصنيع المكثفات ، لوحظ أن انهيار العازل قد يكون في أغلب الأحيان على حافة الإطار، حيث تؤدي المخالفات إلى تقوية الحقل. كما يستطيع أن يكون هذا الانهيار في المناطق التي فيها الإطارات على تماس مع الفجوات الغازية. ولعلاج هذا المشكل ، اتخذنا إحدى التقنيات المستخدمة لملء المكثفات بسوائل عازلة (أحادية/ديبنزيتولوين). حيث يكون فيها مجال مظهر التفريغ الجزئي الكهربائي أعلى بكثير من الغازات. فنطيل في عمر المكثفات مع امكانية زيادة الضغط المطبق في الخدمة. بالإضافة إلى ذلك ، استخدمنا لأول مرة منهجية التصميم التجريبية لدراسة هذه العمليات، من أجل النمذجة والتحسين. النتائج المتحصلة عليها هي نماذج رياضية قادرة على تحديد العوامل الرئيسية وتفاعلاتها في ظهور مظهر التفريغ الجزئي.

كلمات البحث: التفريغ الجزئي ، والعزل ، والبوليبيروبيلين ، المكثفة ، انهيار ، والتصميم التجريبي ، والتحسين

TABLE DES MATIÈRES

	Page
Introduction Générale	1
CHAPITRE I : Notions d'électrostatique et matériaux isolants	
Introduction	4
I.1 Notions d'électrostatique.....	4
I.1.1 Charge statique.....	4
I.1.2 Phénomènes de Charge.....	5
I.1.3 Loi de Coulomb.....	5
I.1.4 Champ électrique.....	7
I.1.5 Théorème de Gauss.....	7
I.1.6 Potentiel électrostatique	8
I.1.7 Condensateur	9
I.1.7.1 Définition du condensateur	9
I.1.7.2 Caractéristiques électriques du condensateur.....	9
I.1.7.2.1 Capacité d'un condensateur.....	9
I.1.7.2.2 Courant dans un diélectrique.....	10
I.1.7.2.3 Courant de conduction.....	11
I.1.7.2.4 Courant de déplacement	12
I.1.7.2.5 Courant de diffusion.....	13
I.2 Matériaux diélectriques	14
I.2.1 Définition	14
I.2.2 Classification des matériaux isolants	15
I.2.2.1 Isolants gazeux	15
I.2.2.2 Isolants liquides	16
I.2.2.2.1 Principaux types des isolants liquides.....	16
I.2.2.3 Isolants solides.....	18
I.2.2.3.1 Thermoplastiques.....	18
I.2.2.3.2 Thermodurcissables	19
I.2.2.3.3 Polymères polaires.....	20
I.2.2.3.4 Polymères apolaires.....	21
I.2.3 Caractéristique des matériaux isolants	21
I.2.3.1 Leur résistivité	21
I.2.3.2 Leur permittivité.....	22
I.2.3.3 Leur facteur des pertes diélectriques.....	22
I.2.3.4 Leur rigidité diélectrique.....	23
I.3 Isolations mixtes.....	25

I.4 Polypropylène (PP)	25
I.4.1 Caractéristiques physiques.....	26
I.4.2 Utilisation du polypropylène.....	26
I.5. Vieillessement des polymères.....	26
I.6 Claquage des isolants	27
I.6.1 Dans les isolants solides.....	27
I.6.2 Dans les isolants liquides et gazeux.....	27
I.6.3 Différents Mécanismes de claquage.....	27
I.6.3.1 Claquage intrinsèque.....	29
I.6.3.2 Claquage électronique.....	29
I.6.3.3 Claquage thermique.....	29
I.6.3.4 Claquage électromécanique.....	29
I.6.3.5 Claquage par arborescences électriques.....	29
Conclusion.....	31
Références bibliographiques du chapitre I.....	32
CHAPITRE II : Etat de l'art.....	34
Introduction.....	35
II.1 Décharges partielles.....	35
II.2 Régimes de décharge dans un gaz soumis à une tension continue	36
II.3 Mécanisme des décharges partielles.....	39
II.3.1 Décharge type Streamer	39
II.3.2 Décharge type Townsend.....	40
II.4 Classification des décharges partielles.....	41
II.4.1 Les décharges internes.....	42
II.4.2 Les décharges partielles superficielles.....	42
II.4.3 Les décharges couronnes.....	42
II.4.4 Les arborescences.....	42
II.5 Caractérisation des décharges partielles.....	42
II.5.1 Décharges dans une cavité	42
II.6 Technique de détection et de mesure des décharges partielles	43
II.6.1 Objectif	44
II.6.2 Techniques de détection et de mesure de décharges partielles	44
II.6.2.1 Détection par mesure électrique	44
II.6.2.1.1 Montage élémentaire	45
II.6.2.1.2 Montage en circuit de base doublé	46
II.6.2.2 Détection de DP par méthodes non électriques	46
II.7 Grandeurs liées aux décharges partielles	48

II.7.1 Charge apparente	48
II.7.2 Fréquence de décharge	49
II.7.3 Courant moyen des décharges.....	49
II.7.4 Energie de décharge	49
II.7.5 Débit quadratique.....	49
II.7.6 Tension d'apparition des décharges	50
II.7.7 Tension d'extinction des décharges partielles (TEDP)	50
II.7.8 Tension de transition.....	50
II.7.9 Tension de claquage.....	50
II.7.10 Bruit au fond.....	50
II.8 Grandeurs calculées	50
II.8.1 Courant moyen des décharges	50
II.8.2 Energie des décharges	51
II.8.3 Débit quadratique	51
II.9 Calibration de la mesure de la décharge partielle.....	51
II.10 Utilisation des réseaux de neurones	53
Position du problème	55
Conclusion.....	56
Références bibliographiques du chapitre II.....	57
CHAPITRE III : Dispositif expérimental.....	59
Introduction.....	60
III.1 Cellule d'étude et matériaux utilisés	60
III.1.1 Cellule d'étude.....	60
III.1.2 Polypropylène (pp)	61
III.1.3 Jarylec	62
III.2 Description du dispositif expérimental	63
III.2.1 Source de tension.....	64
III.2.2 Cage de faraday.....	64
III.2.3 Caractéristique du mesureur.....	65
III.2.4 Mesure de décharges partielles à basse température	65
III.3 Fonctionnement du mesureur	66
III.3.1 Détection crête de l'impulsion	66
III.3.2 Mesure de l'amplitude et du signe de la décharge.....	67
III.3.3 Temps: numéro du cycle et position dans le cycle de la décharge.....	67
III.3.4 Interface avec l'ordinateur	68
III.4 Logiciels d'acquisition et de traitement des décharges.....	68
III.4.1 Logiciel d'acquisition des décharges partielle.....	68

III. 4.2 Logiciel de traitement de résultats	69
III.5. Dispositif de mesure des impulsions de courant.....	69
III.6. Dispositif de mesure des décharges partielles à froid.....	70
Conclusion.....	70
Références bibliographiques du chapitre III.....	71
CHAPITRE VI Résultats expérimentaux et interprétations des résultats.....	72
Introduction.....	73
IV.1 Protocole expérimental	73
IV.2 Mesure des décharges partielles	74
IV.2.1 Tension d'apparition de la décharge partielle (TADP)	74
IV.2.2 Evolution des décharges partielles en fonction de la tension appliquée	74
IV.2.2.1 Description générale des phénomènes observés	74
IV.2.2.2 Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures	75
IV.2.2.3 Evolution de la charge moyenne de décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures.....	76
IV.2.2.4 Evolution de l'énergie de décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures.....	77
IV.2.3 Evolution des décharges partielles en fonction de la température	78
IV.2.3.1 Evolution de la fréquence en fonction de la température pour deux tensions.....	78
IV.2.3.2 Evolution de la charge moyenne en fonction de la température pour deux tensions	78
IV.2.3.3 Evolution de l'énergie en fonction de la température pour deux tensions.....	79
IV.3 Distribution des décharges et paramètres statistiques	80
IV.3.1 Distribution des décharges	80
IV.3.1.1 Distribution des décharges $n(\Phi)$, $Q_{\text{moy}}(\Phi)$	81
IV.3.2 Distribution de la décharges la plus probable $P(\Phi)$	82
IV.4 Synthèse	83
Conclusion.....	83
Références bibliographiques du chapitre IV.....	84
Chapitre V : Méthodologie des plans d'expériences : applications aux DP.....	85
Introduction.....	86
V.1. Notion de domaine d'étude ou espace expérimental	87
V.2 Notion de surface de réponse	89
V.3. Modélisation	90
V.4 Plans factoriels	90

V.4.1 Effet global et effet moyen d'un facteur	92
V.4.2 Synthèse du plan factoriel	94
V.4.3 Plans factoriels fractionnaires.....	95
V.5 Méthodologie des surfaces de réponse	97
V.5.1 Modèle polynomial du second ordre	97
V.6 Calculs statistiques	98
V.6.1 Homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale.....	98
V.6.2 Réalisation du test de significatif des effets	98
V.6.3 Intervalle de confiance des effets du modèle	99
V.6.4 Analyse de la variance, validation du modèle	100
V.6.4.1 La variation due à la liaison linéaire.....	100
V.6.4.2 La variation résiduelle	100
V.6.4.3 La variation totale	100
V.7 Qualité du modèle.....	101
V.7.1 Qualité descriptive du modèle.....	101
V.7.2 Qualité prédictive du modèle.....	102
V.8 Application aux décharges partielles	103
V.8.1 Procédure expérimentale	104
V.8.2 Evolution de la charge apparente	105
V.8.3 Evolution du nombre de décharges	107
Conclusion.....	113
Références bibliographiques du chapitre V.....	114
Conclusion Générale et perspectives.....	116
Annexe.....	119

Liste des figures

	Page
Figure I.1 : Influence entre deux corps.....	5
Figure I.2 : Condensateur.....	9
Figure I.3 : Courant aux bornes d'un condensateur.....	10
Figure I.4 : Représentation schématique de polymère.....	18
Figure I.5 : Différents types de polymères thermodurcissables.....	19
Figure I.6 : Structure homopolymère.....	19
Figure I.7 : Représentation schématique de trois types de polarisation	20
Figure I.8: Echelle des résistivités de quelques matériaux.....	21
Figure I.9 : Schema equivalent dun condensateur.....	22
Figure I.10 : Angle de perte.....	23
Figure I.11 : Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur $e= 3$ mm)	23
Figure I.12 : Structure chimique de PP	25
Figure I.13 : Différents Mécanismes de claquage.....	28
Figure I.14 : Différents types de claquage des isolants solides.....	28
Figure I.15 : Effet de la décharge partielle.....	30
Figure I.16 : Phénomène d'arborescence.....	30
Figure II.1 : Décharge partielle.....	35
Figure II.2 : Régimes de décharge en courant continue	38
Figure II.3 : Décharge type streamer.....	39
Figure II.4 : Décharge type Townsend	40
Figure II.5 : Mécanisme des décharges partielles	41
Figure II.6 : Différents types de décharges selon Kreuger	42
Figure II.7 : Décharges partielles dans un model Capacitif équivalent.....	43
Figure II.9 : Schéma de principe d'un système de détection élémentaire.....	45
Figure II.10 : Schéma de détection du son des décharges partielles.....	48
Figure II.11 : Calibration de la charge.....	52
Figure III.1 : Schéma de la cellule d'étude.....	61
Figure III.2 : Schéma synoptique du dispositif expérimental.....	64
Figure III.3 : Impédance de mesure du détecteur de D.P.	66
Figure III.4 : Détection d'une décharge partielle et mesure de son amplitude.....	67
Figure IV.1 : Evolution de la fréquence en fonction de la tension à différentes températures	76
Figure IV.2 : Variation de la charge moyenne en fonction de la tension à différentes température.	76
Figure IV.3: Variation de l'énergie en fonction de la tension à différentes températures.....	77

Figure IV.4: Variation de la fréquence en fonction de la température à la tension.....	78
Figure IV.5 : Variation de la charge moyenne en fonction de la température à la tension	79
Figure IV.6: Variation de l'énergie en fonction de la température à la tension	79
Figure IV.7: Evolution de l'allure des décharges pour le 2 ^{ème} régime à différentes températures.....	81
Figure IV.8 : Distribution de la probabilité de la charge des décharges à différentes températures au second régime.....	82
Figure V.1 : Domaine de variation d'un facteur.....	87
Figure V.2 : Représentation du domaine d'étude pour deux facteurs.....	88
Figure V.3 : Représentation d'un point expérimental.....	88
Figure V.4 : Points expérimentaux dans un domaine d'étude.....	89
Figure V.5 : Représentation d'une surface de réponse.....	89
Figure V.6 : Représentation du domaine d'étude d'un plan 2 ^k	91
Figure V.7 : Evolution de la charge Q apparente (PC) pendant la durée d'acquisition à différentes températures. 5000V premier régime de décharge et 7000 V second régime.....	105
Figure V.8 : Evolution du nombre de décharges en fonction de la phase pour différentes températures..	107
Figure V.9 : Diagramme d'un plan composite centré des essais réalisés.....	108
Figure V.10 : Nombre de décharge prédit par le logiciel MODDE 8.0.....	110
Figure V.11: Courbes de prédiction des réponses (N+, N- et SumN) en fonction des facteurs V ₀ ,T...111	

Liste des tableaux

	Page
Tableau I.1 : Différentes catégories d'isolants liquides.....	17
Tableau I.2 : Domaine d'application des isolants organiques solides.....	24
Tableau III.1: Propriétés du polypropylène	62
Tableau III.2: Propriétés du Jarylec	63
Tableau III.3: Extrait d'un fichier de résultats bruts d'une acquisition de décharge partielle.....	69
Tableau IV.1 : Valeurs des tensions T.A.D.P , tension de transition et tension de claquage à différentes températures.....	74
Tableau IV.2: Charges les plus probables au second régime à différentes températures.....	83
Tableau V.1: Matrice matricielle des expériences.....	92
Tableau V.2 : Signe du calcul du coefficient d'interaction	94
Tableau V.3: Matrice de calcul.....	94
Tableau V.4 : Matrice d'expérience d'un plan 2^2	96
Tableau V.5 : Matrice d'expérience d'un plan fractionné.....	96
Tableau V.6: Tableau de l'analyse de régression.....	101
Tableau V.7 : Position angulaire des distributions de décharges.....	108
Tableau V.8 : Résultats des expériences du plan composite centré.....	109

Liste des symboles et abréviations

DP : Décharge partielle

CEI : Commission électrotechnique internationale

HTB : Haute tension domaine B concerne les installations électriques dans lesquelles la tension :
excède 50 000 volts en courant alternatif et excède 75 000 volts en courant continu

HTA : Domaine haute tension A concerne les installations électriques dans lesquelles la tension :
excède 1 000 volts sans dépasser 50 000 volts en courant alternatif, ou excède 1 500 volts sans
dépasser 75 000 volts en courant continu;

ASTM : American Society For Testing Materials

CIGRE : Conseil International des Grands Réseaux Electriques.

TADP : Tension d'apparition et d'extinction des décharges partielles

TEDP : Tension d'apparition et d'extinction des décharges partielles

PDIV : Partial discharge inception voltage

RNM : Réseau de neurone modulaire

PPMA : Poly méthacrylate de méthyle

P.E : Polyéthylène

PPM : Partie par million (dureté de l'eau)

PEBD : Polyéthylène basse densité

PP : Polypropylène

MSR : Méthodologie des surfaces de réponse

PRESS : Prediction Error Sum of Squares

Introduction Générale

Introduction Générale

Introduction Générale

Le domaine de génie électrique reste l'un des principaux secteurs scientifiques qui sollicite actuellement de plus en plus d'investigation. En effet la majorité des technologies, actuelles et futures, utilisées dans nos sociétés est dépendante de l'énergie électrique. On conçoit alors que la fiabilité des systèmes électriques, quelles que soient les difficultés auxquelles ils sont soumis, fasse l'objet de nombreux travaux de recherche.

Les matériaux ont joué un rôle dominant dans les changements faits par les matériels électriques et les matériaux isolants sont parmi ceux dont le choix et l'emploi posent les problèmes les plus sensibles à résoudre dans la génération, la réalisation et l'exploitation des systèmes électriques.

Si on applique une tension différente sur le matériel électrique industriel, différentes contraintes qui se traduisent par un vieillissement en fonction du temps d'utilisation.

Néanmoins les différents privilèges qu'offre l'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique, l'expérience montre que pour de nombreuses raisons ces isolants ont des faiblesses qu'ils soient utilisés sous champs continus ou alternatifs. C'est dans le but d'améliorer leur fiabilité qu'un nombre important de travaux ont été entrepris dans les laboratoires de recherches. Ces travaux ont pour but de saisir les défaillances en prenant en compte les difficultés de manipulation et d'utilisation, mais aussi d'améliorer les paramètres de mise en œuvre.

La distribution 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 matériaux non isotopes.

On peut définir en chaque point un gradient localisé et il peut atteindre la valeur critique lorsqu'il y a présence de bulles gazeuses (vacuoles). Le cas échéant, 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 critique. Il est possible ainsi, d'avoir entre une et plusieurs dizaines de décharges localisées en un même point et par période.

Ce phénomène de décharges partielles engendre à l'intérieur une érosion et une oxydation; du moins un mélange différent des composés chimiques; et de ce fait entraîne une usure local qui a de grandes chances de croître en fonction du temps.

Les décharges partielles peuvent entraîner la destruction du matériel après un certain temps d'usage alors qu'il a subi avec réussite les essais diélectriques de réception.

Il devient donc important de savoir et de mesurer sur un matériel, neuf ou en service, une valeur représentative du phénomène de décharges partielles.

Cette compréhension ne pourra pas entraîner directement une relation avec la durée de vie probable du matériel, mais elle donnera des informations intéressantes en fonction des procédés.

Suite aux différents travaux il a été retenu, qu'une des grandeurs permettant de caractériser le phénomène de décharges partielles, est la charge apparente. D'autres grandeurs, toutes aussi intéressantes, sont le débit quadratique, le courant, l'énergie etc...

L'ensemble du matériel électrique industriel, tel que câble, transformateur, condensateur, disjoncteur, ou autre, se présente sous forme diélectrique par un montage complexe de capacités entre les divers points soumis à la tension.

Les capacités localisées dans une bulle, 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 vacuole, ces décharges partielles se matérialisent par un claquage d'un condensateur parmi un réseau très complexe.

Notre étude a pour but d'élaborer une méthode diagnostique applicable aux condensateurs de puissance tout-film utilisés pour le redressement du facteur de puissance.

Cette étude porte sur des modèles de condensateurs plans de faible capacité à différentes températures, elle s'articule de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre nous présentons les lois de l'électrostatique dans des milieux diélectriques puis une analyse bibliographique sur les matériaux isolants et en dernier lieu nous avons discuté les propriétés diélectriques des matériaux isolants à travers le claquage, la rigidité diélectrique etc....
- Dans le second chapitre, nous avons présenté une analyse bibliographique détaillée sur les décharges partielles, leurs caractérisations et leurs techniques de détection et de mesure. Une partie de ce chapitre a été dédiée aux différents travaux dans ce domaine car les décharges partielles restent un paramètre très important pour la conception des accessoires électriques, pour assurer une durabilité du produit et une sûreté de fonctionnement.
- Le troisième chapitre décrit le montage expérimental qui nous a permis d'effectuer ce travail : dispositif de détection et de mesures des décharges partielles.

- Le quatrième chapitre traite les résultats expérimentaux des mesures des décharges partielles traités à l'aide de logiciel DECHWIN.
- Dans le Cinquième chapitre, nous présentons la méthode des plans d'expériences, notamment le plan factoriel complet à deux niveaux et l'intérêt de l'utilisation de cette méthode quand à la quantification des effets des facteurs, ainsi que l'effet d'interaction qui leur est associé.

Nous terminons ce travail par une conclusion où nous dégageons les résultats essentiels de cette étude et les perspectives de recherches qui en découlent.

Chapitre I

Notions d'électrostatique et matériaux isolants

Introduction	4
I.1 Notions d'électrostatique.....	4
I.1.1 Charge statique.....	4
I.1.2 Phénomènes de Charge.....	5
I.1.3 Loi de Coulomb.....	5
I.1.4 Champ électrique.....	7
I.1.5 Théorème de Gauss.....	7
I.1.6 Potentiel électrostatique	8
I.1.7 Condensateur	9
I.1.7.1 Définition du condensateur	9
I.1.7.2 Caractéristiques électriques du condensateur.....	9
I.1.7.2.1 Capacité d'un condensateur.....	9
I.1.7.2.2 Courant dans un diélectrique.....	10
I.1.7.2.3 Courant de conduction.....	11
I.1.7.2.4 Courant de déplacement	12
I.1.7.2.5 Courant de diffusion.....	13
I.2 Matériaux diélectriques	14
I.2.1 Définition	14
I.2.2 Classification des matériaux isolants	15
I.2.2.1 Isolants gazeux	15
I.2.2.2 Isolants liquides	16
I.2.2.2.1 Principaux types des isolants liquides.....	16
I.2.2.3 Isolants solides.....	18
I.2.2.3.1 Thermoplastiques.....	18
I.2.2.3.2 Thermodurcissables	19
I.2.2.3.3 Polymères polaires.....	20
I.2.2.3.4 Polymères apolaires.....	21
I.2.3 Caractéristique des matériaux isolants	21
I.2.3.1 Leur résistivité	21
I.2.3.2 Leur permittivité.....	22
I.2.3.3 Leur facteur des pertes diélectriques.....	22
I.2.3.4 Leur rigidité diélectrique.....	23
I.3 Isolations mixtes.....	25
I.4 Polypropylène (PP)	25
I.4.1 Caractéristiques physiques.....	26
I.4.2 Utilisation du polypropylène.....	26
I.5. Vieillessement des polymères.....	26
I.6 Claquage des isolants	27
I.6.1 Dans les isolants solides.....	27
I.6.2 Dans les isolants liquides et gazeux.....	27
I.6.3 Différents Mécanismes de claquage.....	27
I.6.3.1 Claquage intrinsèque.....	29
I.6.3.2 Claquage électronique.....	29
I.6.3.3 Claquage thermique.....	29
I.6.3.4 Claquage électromécanique.....	29
I.6.3.5 Claquage par arborescences électriques.....	29
Conclusion.....	31
Références bibliographiques du chapitre I.....	32

Introduction

Les matériaux diélectriques à base de polymères trouvent un domaine d'application de plus en plus vaste dans l'industrie et notamment dans le domaine du génie électrique : transformateur, câble de transport d'énergie, condensateurs... etc, grâce à leur performance physico-chimique.

Ils ont fait l'objet des matériaux de sélection pour l'industrie électrique grâce à leurs avantages tels que la légèreté, la facilité de manipulation, les bonnes performances par temps pollué les coûts réduits et la résistance aux différentes contraintes.

Aujourd'hui, les chercheurs et les scientifiques à travers le monde entier cherchent à mettre sur le marché de nouveaux matériaux montrant une association entre solide/liquide, solide/gaz qui donnent de nouvelles pistes pour leur utilisation. La plupart de ces progrès de développement se concentrent principalement autour du choix de matériaux adéquats. Les créateurs de nouvelle combinaison préfèrent d'avantage une association qui permet d'aboutir à un produit final pouvant résister à des conditions de fonctionnement extrêmes avec une sûreté de fonctionnement élevée.

Dans ce chapitre, nous allons présenter dans un premier temps un état de connaissance sur les matériaux polymères en général et le polypropylène en particulier ainsi que leurs propriétés diélectriques. En préambule à ce chapitre, nous donnerons quelques généralités sur les lois fondamentales de l'électrostatique.

I.1 Notions d'électrostatique

Malgré que l'électrostatique représente une ancienne discipline de la physique, il est difficile d'imaginer aujourd'hui la variété des domaines d'études couverts par cette discipline de pointe. La recherche sur la piézoélectricité et les électrets, la technologie des microsystèmes électromécaniques (MEMS), les actionneurs aérodynamiques à décharge, filtrage et précipitation électrostatique, séparation électrostatique de granules, injection des charges et dopage, revêtement et traitement de surface, l'étude des protéines en biophysique, montrent en fin de compte que cette science ancienne et aussi une science d'avenir.

I.1.1 Charge statique

Statique signifie stationnaire. L'électricité statique est une charge électrique stationnaire. Tous les matériaux sont composés d'atomes. L'atome est la plus petite partie d'un matériau contenant les mêmes propriétés que ce matériau. Chaque atome est composé d'un noyau positif chargé autour duquel gravitent un ou plusieurs électrons négatifs. Au repos, le noyau positif chargé équivaut à la somme des charges négatives des électrons qui gravitent autour de

lui. La charge est donc neutre. La perte ou le gain d'électrons par le noyau crée un déséquilibre. Un atome qui perd un ou plusieurs électrons possède donc une charge positive. En revanche, un atome qui en gagne un ou plusieurs possède une charge négative et s'appelle un « ion ». Il existe deux types de charge uniquement : positive et négative. Les charges similaires se repoussent et les charges opposées s'attirent.

I.1.2 Phénomènes de Charge

Les phénomènes les plus répandus étant l'effet triboélectrique et l'influence. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse. Le phénomène d'influence correspond à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps d'un matériau dû à la proximité d'un corps déjà chargé, sans qu'il y ait contact entre les deux. En effet la présence du corps chargé induit un champ électrique à l'intérieur du corps influencé produisant ainsi des forces qui vont s'exercer sur les porteurs de charges libres ayant pour conséquence une redistribution de ceux-ci. La charge ainsi induite sera de signe opposé à la charge du corps influençant. Figure I.1.

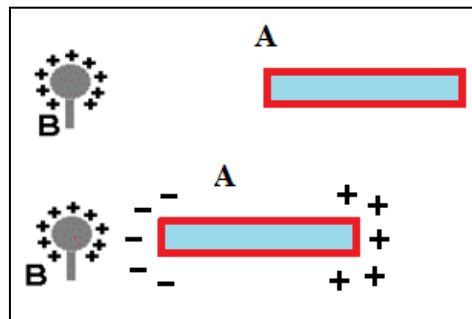
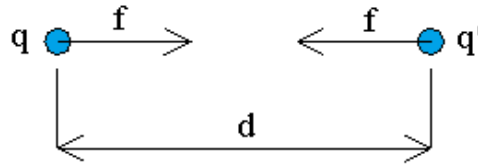


Figure I.1 : Influence entre deux corps

I.1.3 Loi de Coulomb

La loi fondatrice de l'électrostatique est la loi de coulomb qui permet de calculer les forces par lesquelles, deux charges ponctuelles distantes d'une distance ' d ' s'attirent ou se repoussent. Il est précisé que l'espace entourant les charges est vide.

Ces deux forces étant d'intensité égale d'après le principe d'action-réaction.



$$f = cte \times \frac{q \times q'}{d^2} \quad (\text{I-1})$$

f : Force électrique en newton (N)

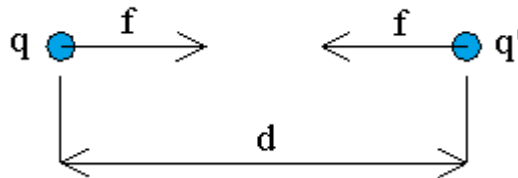
q : Charge 1 qui applique la force électrique sur la charge 2 en coulomb (C)

q' : Charge 2 qui applique la force électrique sur la charge 1 en coulomb (C)

d : Distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m)

cte : Constante de la loi de Coulomb, $cte = k = 9,00 \times 10^9 \text{ N.m}^2 / \text{C}^2$

Mais dans la plupart des calculs de physique où elle intervient, elle s'avère peu pratique d'utilisation. Si bien que l'on a donné à la formule de newton [1], la forme suivante :



$$f = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \times q'}{d^2} \quad (\text{I-2})$$

Dans un milieu matériel de permittivité relative ϵ_r l'interaction coulombienne est divisée par

$$\epsilon_r \text{ et exprimée par : } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

ou :

ϵ_r : Permittivité relative du matériau souvent appelée constante diélectrique

ϵ_0 : Permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

ϵ : Permittivité absolue $\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r$

Cette loi peut être généralisée à un système de n charges.

La force F_i qui s'exerce sur la charge q_i s'exprime alors :

$$\vec{F}_i = \sum_{i \neq j} \frac{q_i q_j}{4\pi\epsilon r_{ij}^2} \vec{r}_{ij} \quad (\text{I-3})$$

Où : \vec{r}_{ij} est le vecteur unité dirigé de i vers j

I.1.4 Champ électrique

Dissocions la formule colombienne (I.2) en :

$$f = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{d^2} \right) \times q' = E \cdot q' \quad (\text{I-4})$$

Par définition l'intensité du champ électrique E produit par la charge positive q en un point quelconque se trouvant à la distance d de cette charge. Le champ ainsi défini ne dépend que de la valeur de la charge q qui le produit, et de la distance qui sépare cette charge du point où on le mesure, ici la distance de q à q' [1].

On peut le définir aussi comme un champ de force invisible créé par l'attraction et la répulsion de charges électriques (la cause du flux électrique) et se mesure en volts par mètre (V/m). L'intensité du champ diminue lorsque la distance à la source augmente.

I.1.5 Théorème de Gauss

La force électrostatique comme la gravité, est inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les charges. Si on considère un domaine sphérique englobant une charge unique, le champ électrique associé à cette charge aura la forme suivante :

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \vec{r} \quad (\text{I-5})$$

La surface de la sphère est proportionnelle au rayon :

$$S = 4\pi r^2 \quad (\text{I-6})$$

Le flux du champ électrique E à travers cette surface sphérique est :

$$N = \vec{E}S = \frac{q}{4\pi\epsilon r^2} \times 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon} \quad (\text{I-7})$$

Cette relation est vraie quelque soit la forme de la surface qui englobe les charges et peut être écrite de manière plus générale:

$$N = \oiint E ds = Q/\epsilon \quad (\text{I-8})$$

Où : Q la somme des charges présentes dans le volume limité par la surface S. Sous forme différentielle, le théorème de Gauss s'écrit.

$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (\text{I-9})$$

Sous forme condensée :

$$\operatorname{div} \vec{E} = \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{I-10})$$

Où :

ρ : Densité volumique des charges.

∇ : L'opérateur divergence

Le théorème de Gauss est particulièrement utile lorsque nous désirons calculer le champ électrique produit par des distributions de charges ayant une certaine symétrie géométrique [2].

I.1.6 Potentiel électrostatique

Supposons que \vec{E} est le champ électrique créé par une distribution stationnaire de charge. Soit p_1 et p_2 deux points quelconques dans ce champ. La circulation de \vec{E} entre les deux points représente la différence de potentiel entre ces deux points.

$$V_{21} = - \int_{p_1}^{p_2} \vec{E} d\vec{l} \quad (\text{I-11})$$

Sous forme différentielle ; Le champ électrique s'écrit :

$$\vec{E} = - \left(\frac{\partial V}{\partial y} \vec{y} + \frac{\partial V}{\partial x} \vec{x} + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{z} \right) \quad (\text{I-12})$$

Sous forme condensée :

$$\vec{E} = -\nabla V = -\overrightarrow{\operatorname{grad}} V \quad (\text{I-13})$$

Où : ∇ est l'opérateur gradient

A partir des expressions (II-10.) et (II-13.), on obtient une relation entre $\operatorname{div} \vec{E}$ et V

$$\operatorname{div} \vec{E} = - \operatorname{div} \operatorname{grad} V = - \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{I-14})$$

C'est l'équation de Poisson qui relie la densité de charge aux dérivées secondes du potentiel, elle s'écrit :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{I-15})$$

Sous forme condensée :

$$\nabla^2 V = \frac{-\rho}{\varepsilon} \quad (\text{I-16})$$

Cette équation nous permet d'obtenir le potentiel électrique en un point, si nous connaissons la distribution de charge et réciproquement, dans la mesure où cette distribution de charge est indépendante du temps.

Dans l'espace libre, où il n'y a pas de charges, $\rho = 0$ l'équation de Poisson devient :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{I-17})$$

Où bien :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{I-18})$$

Cette équation est appelée équation de Laplace.

Dans le cas de géométries simples et pour quelques conditions aux limites, les solutions analytiques sont connues et bien vérifiées expérimentalement. Pour les cas plus compliqués, on est obligé dans cette équation d'avoir recours à des méthodes numériques.

I.1.7 Condensateur

I.1.7.1 Définition du condensateur

On appelle condensateur l'ensemble de deux surfaces conductrices ou armatures, séparées par un isolant ayant une permittivité (ou constante diélectrique) donnée. L'isolant est souvent appelé diélectrique. => Deux feuilles d'aluminium séparées par une feuille de papier paraffiné forment un condensateur.

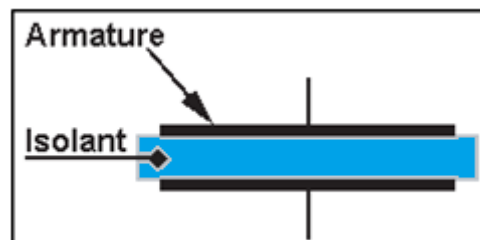


Figure I.2 : Condensateur

I.1.7.2 Caractéristiques électriques du condensateur

I.1.7.2.1 Capacité d'un condensateur

La capacité d'un condensateur indique son aptitude à emmagasiner des charges électriques sur ces armatures. La capacité s'exprime en farad. Mathématiquement sa capacité est de 1 farad.

$$C = \frac{Q}{V} \quad (\text{I-19})$$

C : Capacité en farad

Q : Charge en volt (C)

V : Tension en volt (V)

Physiquement, par sa construction mécanique, la capacité d'un condensateur est déterminée par :

$$C = \frac{\epsilon S}{e} \quad (\text{I-20})$$

S : La surface des armatures (m²)

e : L'épaisseur du diélectrique (isolant)

ϵ : La nature du diélectrique ou sa permittivité absolue.

I.1.7.2.2 Courant dans un diélectrique

La conduction dans un diélectrique peut, à priori, apparaître comme paradoxale ou inutile, puisque sa fonction principale est, en général, d'assurer une isolation. Malheureusement, en pratique on est vite amené à constater qu'il n'existe aucun isolant qui remplit parfaitement cette caractéristique.

La notion d'isolation prend en électrostatique une signification différente que celle qu'elle a dans les domaines classiques. En réalité il y'a une grande diversité des propriétés des matériaux en termes de caractéristiques électriques et de capacité à accumuler et libérer une charge électrique. A titre d'exemple les polymères isolants sont des matériaux dont la résistivité varie de quelque $10^{10} \Omega\text{cm}$ jusqu'à $10^{20} \Omega\text{cm}$. Cette variation de plus de 10 décades suggère fortement que plusieurs phénomènes ou mécanismes de conduction peuvent générer des courants.

Lorsqu'on établit une différence de potentiel continue aux bornes d'un diélectrique homogène (figure I.3.), nous constatons un courant exprimé par une densité $J_c(x, t)$.

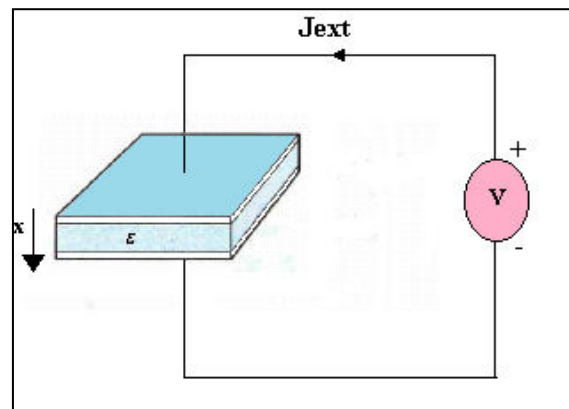


Figure I.3 : Courant aux bornes d'un condensateur

L'expression générale de la densité de courant mesurée dans le circuit extérieur s'écrit :

$$J_{\text{ext}}(x, t) = J_c(x, t) - J_{\text{diff}}(x, t) + J_{\text{dep}}(x, t) \quad (\text{I-21})$$

Où :

$J_c(x, t)$: Courant de conduction

$J_{\text{diff}}(x, t)$: Courant de diffusion

$J_{\text{dep}}(x, t)$: Courant de déplacement

Examinons plus en détail chacun des termes de l'expression I-21.

I.1.7.2.3 Courant de conduction

Soit un volume élémentaire $d\text{sdl}$ soumis à une différence de potentiel $-dV$.

$$dI = Jds \quad (\text{I-22})$$

Où

J : La densité de courant

On appliquant la loi d'ohm, on a :

$$-dV = R dI = - \frac{dl}{\sigma ds} Jds \quad (\text{I-23})$$

σ : Etant la conductivité électrique du matériau à travers lequel passe le courant, on obtient :

$$J_c(x, t) = - \frac{dV}{dl} \sigma \quad (\text{I-24})$$

En considérant le milieu comme isotrope, il existe une relation linéaire entre le courant de conduction et le champ électrique.

$$J_c(x, t) = \sigma E(x, t) \quad (\text{I-25})$$

Dans la plupart des applications de l'électrostatique, la relation entre le courant et le champ est plus complexe. Pour comprendre pourquoi, il est nécessaire d'examiner le processus de conduction.

On considère d'abord la conduction unipolaire où seul est présent un type de porteur de charge. Ces charges ont une densité volumique n en Coulomb par mètre cube (C/m^3) et elles se déplacent toutes avec une vitesse v . La densité du courant est donc :

$$J_c(x, t) = n(x, t).q.v \quad (\text{I-26})$$

Le produit $n.q$ est égal à ρ . Si les charges qui se déplacent sont les seules présentes, il y aura une densité de charge qui va amener des variations dans le champ électrique total.

La densité de courant est proportionnelle à la vitesse des charges qui est déterminée par la réponse de celles-ci aux forces appliquées. Quand un champ est appliqué, la charge

s'accélère en premier, mais elle atteint une vitesse finale qui dépend de la nature du matériau environnant. Après le régime inertiel transitoire, la vitesse v de la charge est reliée au champ appliqué E par :

$$v(x, t) = \mu(E, t) E(x, t) \quad (\text{I-27})$$

Où

μ : Est la mobilité des porteurs dans le matériau.

Cette relation est valable seulement après un délai de temps qui correspond au régime transitoire de l'accélération des porteurs. L'expression de la vitesse à partir de la mobilité doit tenir compte de la polarité des charges étudiées.

Il existe de nombreux exemples où la densité de courant peut varier dans le temps et l'espace. Le nombre de porteurs, leurs charges et leurs vitesses peuvent tout varier dans des situations particulières infirmant la notion de conductivité. Il est toujours possible de définir une conductivité du matériau si ces sources de variations sont faibles ou absentes. En particulier, si le nombre des porteurs et leurs charges sont constants et que la vitesse est reliée linéairement au champ électrique à travers la relation de la mobilité, on peut écrire le courant comme :

$$J_c(x, t) = (n(x, t) q \mu(x, t)) \cdot E(x, t) \equiv \sigma E(x, t) \quad (\text{I-28})$$

Cette relation est toujours valable si on considère plus d'un type de porteurs, la densité totale de courant est alors la somme des contributions de chaque type de porteurs.

$$J_c(x, t) = \sum j_i = \sum n_i(x, t) \cdot q_i \cdot v_i \quad (\text{I-29})$$

Le courant dû au mouvement de charges sous l'action du champ est défini comme le courant de conduction et s'écrit :

$$J_c(x, t) = \left(\sum n_i(x, t) \cdot q_i \cdot \mu_i(E, t) \right) E \equiv \sigma E(x, t) \quad (\text{I-30})$$

Dans certaines études, la relation entre la densité de courant et le champ électrique est donnée en fonction de la résistivité plutôt que la conductivité :

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (\text{I-31})$$

I.1.7.2.4 Courant de déplacement

Le courant qui résulte d'un champ électrique variable est appelé courant de déplacement, pour cela on introduit une nouvelle notion, celle de déplacement électrique ou d'induction électrique.

Le déplacement électrique dans le vide a pour grandeur :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (\text{I-32})$$

L'équation de Poisson peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (\text{I-33})$$

Si D est le déplacement électrique dans un diélectrique, qui se trouve entre deux armatures d'un condensateur, la densité de charge superficielle σ est :

$$\delta = D$$

La charge totale Q sur chacune des armatures est :

$$Q = S \cdot D \quad (\text{I-34})$$

Si pendant le temps dt la charge du condensateur varie de dQ l'intensité du courant dans le circuit est :

$$i(x, t) = \frac{dQ}{dt} = S \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} \quad (\text{I-35})$$

Il s'ensuit que le champ variable du condensateur provoque le même champ magnétique que celui produit par un courant d'intensité $S \frac{dD}{dt}$ ou de densité :

$$J_D = \frac{\partial D(x, t)}{\partial t} \quad (\text{I-36})$$

Cette grandeur est appelée densité de courant de déplacement. Selon Maxwell, toute variation du champ électrique doit provoquer l'apparition d'un champ magnétique rotationnel. Cela entraîne nécessairement la présence d'un courant électrique. Pour un diélectrique qui présente une polarisation P , l'induction D est donnée par la relation :

$$D(x, t) = \epsilon_0 E(x, t) + P(x, t) \quad (\text{I-37})$$

D'où

$$J_D(x, t) = \epsilon_0 \frac{\partial E(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial P(x, t)}{\partial t} \quad (\text{I-38})$$

Où: $\epsilon_0 \frac{\partial E(x, t)}{\partial t}$ et $\frac{\partial P(x, t)}{\partial t}$ sont respectivement les courants de déplacement et les courants de polarisation. Les deux sont des courants transitoires qui décroissent jusqu'à s'annuler avec le temps.

I.1.7.2.5 Courant de diffusion

Le courant de déplacement est lié à la variation du champ électrique. De plus, dès qu'il existe une différence de concentration entre deux points voisins dans le matériau isolant, un mécanisme de diffusion apparaît, il est défini comme l'éparpillement de particules sous l'influence de leur mouvement thermique aléatoire [3]. Le mouvement est tel que le courant

de particule se déplace depuis des zones où la concentration en particules est élevée, vers les zones où elle est plus faible afin d'uniformiser les concentrations dans le volume du matériau. La loi qui permet d'exprimer la densité de courant de diffusion est la suivante :

$$J_D(x, t) = - \frac{D_1 \partial n(x, t)}{\partial x} \quad (\text{I-39})$$

Où :

D_1 : Est le coefficient de diffusion des particules [cm^2/s]

J_D : Est le nombre de particules qui traversent par seconde une aire unitaire dans la direction x .

Le courant mesuré à l'extérieur d'un matériau isolant peut être écrit comme la somme de ces 3 courants :

$$J_{\text{ext}}(x, t) = \underbrace{\sum_i q_i \mu_i(E, t) n_i(x, t) E(x, t)}_1 + \underbrace{\sum_i q_i D_i \frac{\partial n_i(x, t)}{\partial x}}_2 + \underbrace{\frac{\partial D(x, t)}{\partial t}}_3 \quad (\text{I-40})$$

$J_c(x, t) \qquad J_{\text{diff}}(x, t) \quad J_{\text{dep}}(x, t)$

Où :

q_i : Charge électrique

$n_i(x, t)$: Densité des transporteurs

μ_i : Mobilité des transporteurs

D_i : Coefficient de diffusion

$E(x, t)$: Champ local

$D(x, t)$: Vecteur de déplacement.

I.2 Matériaux diélectriques

I.2.1 Définition

Les matériaux, dans leur acception la plus large, ont joué un rôle prépondérant dans les progrès accomplis dans la mise au point des matériels électriques. L'évolution des qualités de ces matériaux s'est étalée sur plus d'un siècle. Bien que cette évolution soit lente mais en terme de qualité elle a été considérable. Les matériaux isolants sont devenus le point central dans la conception de beaucoup de catégories de matériels électriques puisque la fiabilité des dispositifs est largement déterminée par la pérennité des propriétés de ces isolants. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en CC doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un

courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en HT continue. Le courant passant à travers un isolant en HT continue est également constant et est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif. Les isolants sont utilisés pour :

- assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés → protection des personnes et des équipements ;
- supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur.

Lorsque l'on observe les matériaux sous l'angle de leur réponse à une sollicitation électrique on est appelé à parler soit de diélectrique soit d'isolant. C'est ainsi que lorsque le souci d'empêcher un contact galvanique est important nous parlerons d'isolant, par contre lorsque notre intérêt est focalisé sur les propriétés découlant de la polarisation ou de la permittivité plus ou moins accentuée nous invoquons le terme diélectrique. Ceci dit, les mots isolant et diélectrique peuvent être considérés comme étant des synonymes.

D'une manière générale, on peut classer les isolants en trois types.

I.2.2 Classification des matériaux isolants

I.2.2.1 Isolants gazeux

Généralement dans le domaine de la haute tension ; on emploie souvent un gaz comme diélectrique, tel que les lignes aériennes et les disjoncteurs. Le développement de la technique de l'isolation gazeuse a pris un grand pas dans le domaine industriel lié à l'élévation des tensions et courants utilisés dans les grands réseaux de distribution. Pour ce type d'application, l'isolant gazeux présente deux avantages :

- Quelque que soit la complexité de la forme du conducteur, le milieu homogène, enveloppe parfaitement les conducteurs, qu'ils soient statiques ou mobiles. Dans un milieu de diélectrique solide, le vide peut être à l'origine des décharges partielles qui induisent à la destruction de l'isolant.
- Après passage puis rupture d'un arc, le gaz est le diélectrique qui protège le plus rapidement ses propriétés isolantes. Par contre après le passage d'un arc dans les diélectriques solides, ces derniers sont abimés définitivement par carbonisation.

Les gaz les plus utilisés sont :

- Air, azote, gaz carbonique (CO_2), hexafluorure de soufre (SF_6)

I.2.2.2 Isolants liquides

Les huiles isolantes représentent l'avantage d'avoir une rigidité diélectrique élevée par rapport aux gaz et d'améliorer les propriétés diélectriques. En électrotechnique, elles sont utilisées comme imprégnant d'isolations celluloses ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Son rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz. [4].

I.2.2.2.1 Principaux types des isolants liquides

D'une manière générale pour une application donnée, les isolants liquides ne peuvent pas remplir l'ensemble des propriétés demandées. Les caractéristiques électriques, physico-chimiques d'un liquide diffèrent d'une application à une autre ce qui nous pousse à classer les huiles isolantes selon leurs origines.

On distingue trois types :

Les huiles végétales (produit naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse tableau 1.1.

Ces huiles ont été classées par rapport à leur ordre d'apparition chronologique dans le domaine d'électrotechnique. Les premières huiles utilisées, c'est les huiles végétales, après les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse dans certaines applications.

N°	Catégorie	type	applications	Caractéristiques
I	Huiles végétales	Huile de ricin	Condensateurs pour générateurs de choc	Biodégradabilité Résistance au feu Faible stabilité Viscosité élevée Point d'écoulement élevé
		Huile de colza	Condensateurs courant continu	
		Huiles végétales à point de feu élevé	Transformateurs de distribution	
II	Huiles minérales	Base naphénique	Tous types : transformateurs, câbles, condensateurs, etc.	Faible viscosité Bas point l'écoulement sans additif Stabilité à l'oxydation, inflammabilité
		Base paraffinique		
		A masse moléculaire élevée	Transformateurs de distribution (remplacement des PCB)	Point de feu > 300 °C
III	Hydrocarbures halogènes	Polychlorobiphényles (PCB)	Transformateurs	Ininflammabilité Non biodégradable
		Polychlorodiphénylméthanes (PCDM)	Transformateurs	Ininflammabilité biodégradable faible
		Perchloréthylène	Transformateurs de distribution	Stabilité thermique Résistance au feu Agent de refroidissement Appareils scellés et à points chauds limités par la température
		Trichlorotrifluoroéthane	Électronique de puissance convertisseurs transformateurs, etc.	Prix très élevé
		Hydrocarbures perfluorés		
		Polyéthers perfluorés	Condensateurs	Résistance au feu Prix très
	Polyoléfines	Polybutènes	Câbles d'énergie	Pertes diélectriques très faibles : $\tan \delta < 0,0005$ à 50 Hz et 90
		Poly- α -oléfines	Transformateurs	Point d'éclair élevé : 240 à 250
	Hydrocarbures aromatiques	Alkylbenzènes	Câbles haute tension	Viscosité faible Absorption gazeuse sous décharges
		Alkylnaphtalènes	Condensateurs de puissance Diviseurs capacitifs	Viscosité faible (mais varie fortement avec la température) Stabilité thermique Tensions de claquage et d'apparition des décharges partielles élevées Absorption gazeuse sous décharges partielles
		Alkylbiphényles		
		Dérivés du diphenylméthane et diphenyléthane		

Tableau I.1 : Différentes catégories d'isolants liquides [5]

I.2.2.3 Isolants solides

Grâce à leur performance physico-chimique, les matériaux diélectriques à base de polymères trouvent leurs applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique.

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » parties. Il désigne communément une famille, toujours plus nombreuse, de produits constitués de macromolécules caractérisées par la répétition du même groupe d'atomes appelé motif constitutif (ou monomère, du grec monos : un seul ou une seule) figure I.4

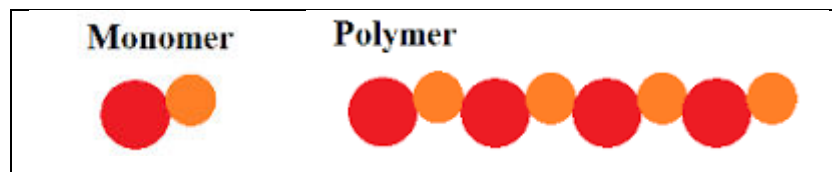


Figure I.4 : Représentation schématique de polymère

Ce dernier diffère d'un polymère à l'autre et détermine en grande partie les propriétés physiques et thermomécaniques du produit fini (après sa mise en œuvre). Il existe différents types de polymères caractérisés par des propriétés différentes : certains sont utilisés pour leurs propriétés élastiques, thermiques ou encore électriques. Hormis les applications électriques, nous pouvons citer leur utilisation dans les emballages, les fibres textiles, la peinture, les adhésifs, les cosmétiques, les pneumatiques, etc... [6]. Les polymères apparaissent comme des biomatériaux très prometteurs. En effet, leur utilisation est de plus en plus courante dans des domaines tels que la médecine où ils sont utilisés dans certains procédés chirurgicaux notamment oculaires, comme implants artificiels, prothèses ou bien dans les systèmes de distribution automatique de médicaments.

Les polymères peuvent être divisés en polymères thermoplastiques, polymères thermodurcissables ou polymère élastomères.

I.2.2.3.1 Thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères qui se déforment et sont façonnables sous l'action de la chaleur. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre. Certains d'entre eux peuvent supporter des températures atteignant 315 °C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C. Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques [7].

I.2.2.3.2 Thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables prennent leur forme définitive au premier refroidissement, la réversibilité est impossible.

Le motif diffère d'un polymère à l'autre et détermine en grande partie les propriétés physiques et thermomécaniques du produit fini. Un polymère formé d'un seul type de monomère est appelé homopolymère, s'il comprend plusieurs types, c'est un copolymère figure I.5.

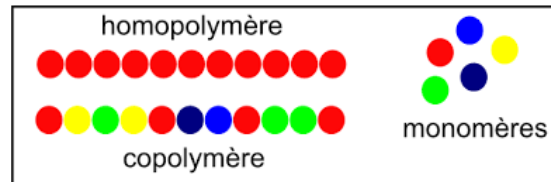


Figure I.5 : Différents types de polymères thermodurcissables

Soit M le monomère, on peut présenter l'homopolymère comme suit :

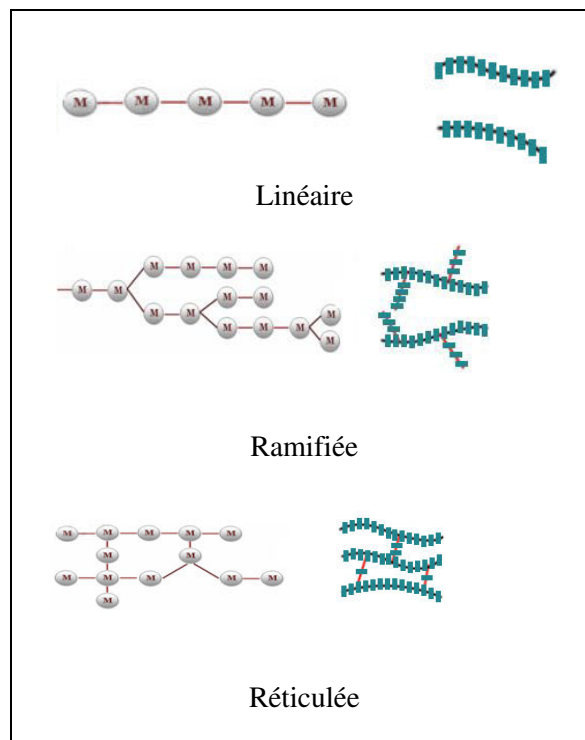


Figure I.6: Structure homopolymère

La classification de la figure I.6 est fondée sur la distinction entre trois structures différentes :

- Structures linéaires et faiblement ramifiées tel que les thermoplastiques.
- Structure légèrement réticulée, c'est-à-dire à maille large elle forme un réseau, tel que les élastomères, dont le comportement mécanique ressemble à celui du caoutchouc de nature thermoplastique ou thermodurcissable.

- Structure ramifiée où, les macromolécules s'étendent dans les 3 directions de l'espace. Ils sont d'autant plus rigides que le réseau tridimensionnel qui les caractérise est plus dense.

Parmi ces différents types de polymères, on peut trouver des polymères polaires et d'autres non polaires.

I.2.2.3.3 Polymères polaires

Les polymères polaires sont généralement des matériaux isolants possèdent dans leurs molécules en plus du carbone et de l'hydrogène, des atomes généralement électronégatifs tels que : le fluor, le chlore, l'oxygène, l'azote, qui fournissent des dipôles. Les polymères polaires ont donc des hautes valeurs de pertes diélectriques et leur constante diélectrique va être dépendante de la fréquence. Parmi ces polymères on peut citer :

- Le poly(chlorure de vinyle) PVC;
- Le poly(fluorure de vinylidène) PVDF;
- Le poly(méthacrylate de méthyle) PMMA;
- Les polycondensats tels que : les polyamides, les polystères.

Sous l'influence d'un champ électrique, les charges électriques localisées ou libres dans un diélectrique sont susceptibles de se déplacer sur de petites distances ou de vibrer ce qui fait apparaître la polarisation qui désigne la densité du dipôle, elle est exprimée en C/m^2 .

On distingue :

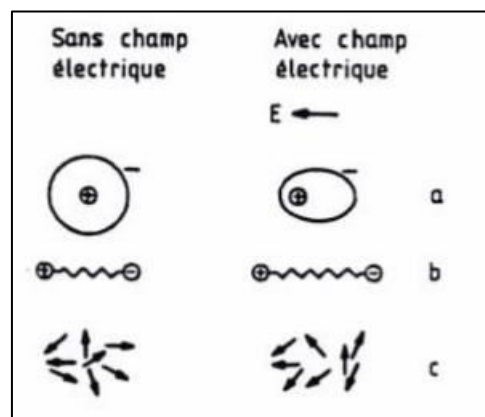


Figure I.7 : Représentation schématique de trois types de polarisation :

(a) électronique (b) atomique (c) d'orientation [8]

- **La polarisation électronique** : Le nuage électronique de tout atome se déplace immédiatement par rapport au noyau créant ainsi une polarisation sous l'effet du champ électrique.
- **La polarisation atomique** : Au moment de liaison sous contrainte des atomes les électrons se déplacent préférentiellement vers l'atome. Si on applique un champ

électrique superposé, les atomes se suivent et donne naissance à une polarisation atomique.

- **La polarisation par orientation** : Si on applique un champ électrique constant superposé sur des molécules dissymétriques qui sont soumis déjà à un couple créant une polarisation résultante dans le sens du champ.

I.2.2.3.4 Polymères apolaires

Contrairement aux polymères polaires, ces polymères présentent un indice de perte diélectrique faible et une permittivité relative quasi-constante dans un large domaine de température et de fréquence. Leur formule chimique ne contient que du carbone et de l'hydrogène et s'ils contiennent des atomes électronégatifs tels que le fluor, ces atomes sont placés symétriquement le long de la chaîne carbonée. Parmi ces polymères on peut citer :

- Le polyéthylène PE ;
- Le polypropylène PP ;
- Le poly (tétrafluoréthylène) PTFE

I.2.3 Caractéristique des matériaux isolants

D'une manière générale, les matériaux isolants sont caractérisés par :

I.2.3.1 Leur résistivité

La résistivité d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre grecque ρ , représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique. Elle correspond à la résistance d'un tronçon de matériau d'un mètre de longueur et d'un mètre carré de section et est exprimée en ohms-mètres ($\Omega \cdot m$). Sur la figure I.8 nous donnons à titre d'information l'échelle des résistivités pour quelques matériaux d'usage courant en électrotechnique.

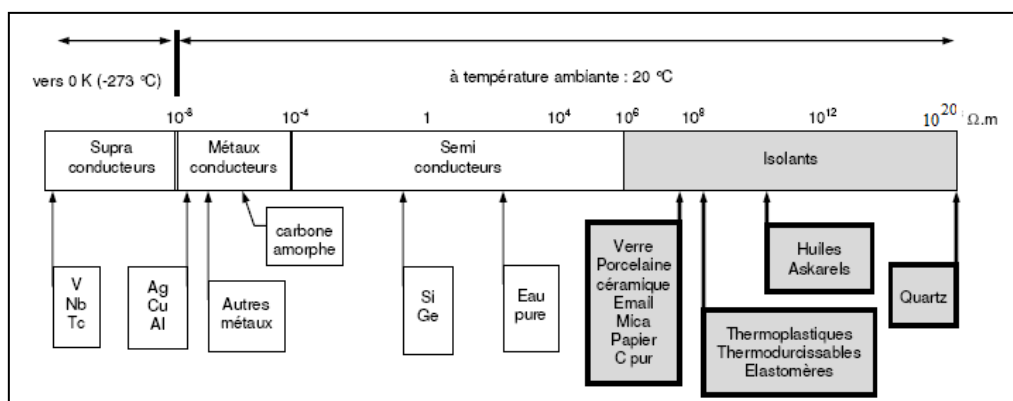


Figure 1.8 : Echelle des résistivités de quelques matériaux

I.2.3.2 Leur permittivité

Elle permet de décrire la réponse d'un milieu donné à un champ électrique. Elle est exprimée en farad par mètre [F/m].

Dans la pratique on utilise de façon quasi exclusive la permittivité relative ϵ_r représentant le rapport de la permittivité absolue à la permittivité du vide ϵ_0 .

On peut la calculer selon la formule suivante :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (\text{I-41})$$

C : capacité d'un condensateur ayant le matériau comme diélectrique,

C_0 : capacité du même condensateur mais avec le vide.

I.2.3.3 Leur facteur des pertes diélectriques

Ce facteur nous permet de connaître la puissance dissipée dans le matériau lorsqu'un champ électrique variable lui est appliqué. Il est exprimé par la tangente de l'angle δ qui représente l'écart à la quadrature entre le courant et la tension d'un condensateur ayant le matériau considéré comme diélectrique.

Supposant un dispositif constituant un condensateur réel (avec pertes) est représenté par le schéma équivalent parallèle tel que représenté sur la figure I.9

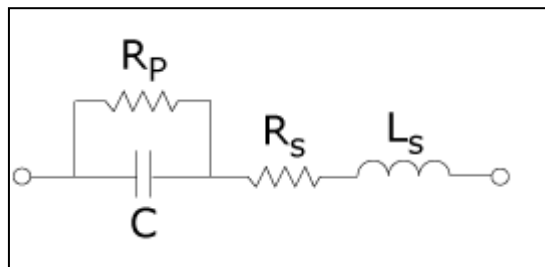


Figure I.9 : Schéma équivalent dun condensateur

R_p : Résistance due aux pertes dans le diélectrique. Elle dépend de la résistance de l'isolement

R_s : Résistance en série due aux connexions des armatures

L_s : Inductance en série

Autrement dit l'angle de pertes δ est défini comme étant l'angle complémentaire du déphasage entre la tension U entre les conducteurs et le courant de fuite I traversant l'isolant figure I.10.

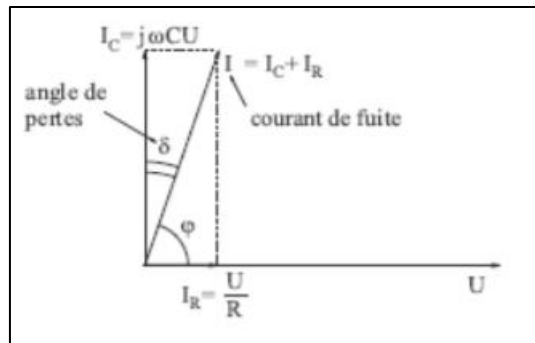


Figure I.10 : Angle de perte

Le facteur des pertes est donné par :

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega CR} \quad (\text{I-42})$$

ω : Vitesse angulaire du circuit oscillant (angle parcouru par unité de temps rd/s)

C : Capacité entre les deux conducteurs

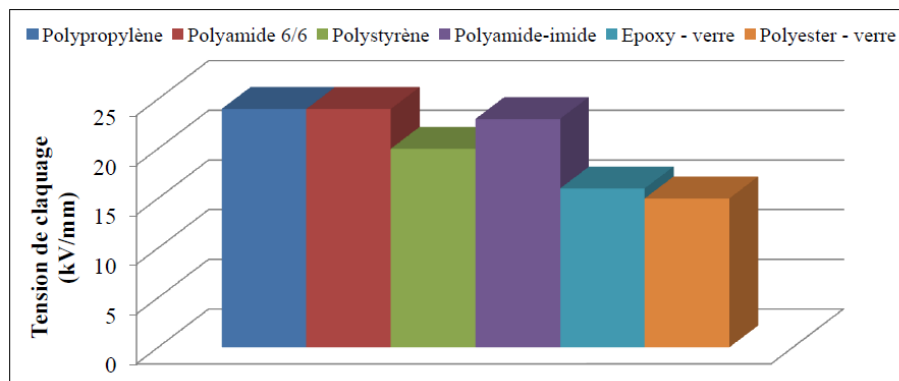
R : Résistance d'isolement de l'isolant

En conclusion la valeur $\tan \delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique. Il caractérise la qualité d'un isolant, en pratique il varie entre 10^{-2} et 10^{-4} [9].

I.2.3.4 Leur rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer sans qu'un claquage ou une perforation ou un contournement ou un amorçage d'arc se produit, rendant impossible une nouvelle application de la tension. Selon la norme CEI 60243-1 [10], la rigidité diélectrique d'un matériau se définit comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit le claquage et la distance séparant les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension.

La figure I.11 montre la tension de claquage de quelques matériaux utilisés pour l'isolation électrique [11].

Figure I.11 : Tension de claquage de quelques polymères (épaisseur $e = 3$ mm) [5].

Le domaine d'application des isolants organiques solides tel que les polymères ont un champ d'application très large dans le domaine électrique, tels que les lignes de transport d'énergie, la fibre optique, condensateurs, alternateurs, moteurs électriques, systèmes électroniques et composants de puissance terrestres et embarqués sur satellites etc.... de nombreux avantages ont contribué à l'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique car ils ont une excellentes propriétés électriques (résistivité, rigidité, permittivité), une bonne tenue mécanique et tribologique et une stabilité dimensionnelle, la mise en œuvre facile, le faible poids et pour certains la possibilité de recyclage, voir tableau I.2.

Matériaux	Abréviation	Applications courantes
Polyéthylène	PE	Isolation électrique (câbles), emballages
Polypropylène	PP	Boitier d'appareil électrique
Polychlorure de vinyle	PVC	Boitiers, diapositive couleur, protection anti-poussière, reliure de livre, câble
Polystyrène	PS	Disque d'enregistrement sonore et emballage
Polyméthacrylate de méthyle	PMMA	Vitrines et cadre
Polyamides	PA	Produit de doublage pour lamination à chaud
Polyéthylène naphthalate	PEN	Isolation électrique et électronique
Polyéthylène téréphtalate	PET	Composants électriques (condensateurs), circuit imprimés, isolation moteur.
Polyacétate de vinyle	PVAC	Câble de latex pour les réparations et liant pour les peintures décoratives
Polyetherimide	PEI	composants et produits contraints à de fortes températures (aéronautique et aérospatiale)
Polyuréthane	PV	Liant des oxydes des bandes magnétique, isolation des transformateurs

Tableau I.2 : Domaine d'application des isolants organiques solides

I.3 Isolations mixtes

L'isolation mixte est un mélange entre les isolants liquides et les isolants solides de tel sorte que les liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs, réactances, condensateurs, câbles etc .

Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation. Cependant, dans beaucoup d'application, ils servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas des transformateurs par exemple.

Dans le chapitre III, nous présentons en détail le type d'isolant mixte utilisé dans notre travail.

I.4 Polypropylène (PP)

La molécule de polypropylène représentée sur la figure I.12 à la forme de celle de l'éthylène dans laquelle un atome hydrogène est remplacé par un groupement méthyl CH₃. Le PP qui est produit par polymérisation en chaîne [13] a été découvert en 1957. Ce produit connaît toujours une très forte croissance et il présente de nombreux points forts comme :

- Une rigidité élevée.
- Une bonne résistance à la fissuration.
- Une bonne transparence.

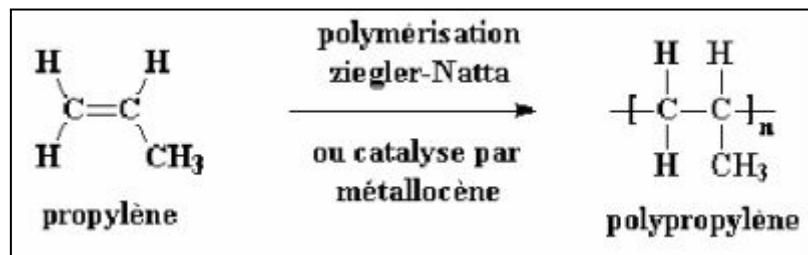


Figure I.12 : Structure chimique de PP [12]

Le PP est aussi un polymère semi-cristallin [13], il est très polyvalent et sert à la fois comme thermoplastique et comme fibre. Il est très facile à colorier et n'absorbe pas d'eau.

Le PP film est l'un des plastiques usuels les plus difficiles à recycler, surtout s'il est imprimé.

Le contrôle de la polymérisation par catalyse permet de jouer sur la structure afin de produire du polypropylène élastomère.

Le PP est un solide qui fond à des températures de 160 à 170°C . Ses propriétés essentielles sont sa bonne résistance à la chaleur et à la plupart des agents chimiques. Il est totalement

insoluble à froid mais à une température de l'ordre de 80 °C, il commence à se dissoudre dans les hydrocarbures aromatiques et chlorés [14]

I.4.1 Caractéristiques physiques

Il a une structure extrêmement régulière et un caractère semi-cristallin. Il est brillant, présente une très grande résistance à la pliure, mais une résistance moyenne au choc.

I.4.2 Utilisation du polypropylène

En raison de ses bonnes propriétés électriques et mécaniques, le polypropylène est largement utilisé en particulier dans les domaines suivants : isolateur d'antennes, manchons de raccordement pour les câbles, boîtiers divers, ailettes de refroidissement dans les moteurs. Le polypropylène est utile en combinaison avec le papier dans les condensateurs de puissance servant comme compensateurs d'énergie réactive [15].

I.5. Vieillessement des polymères

Le vieillissement c'est une altération lente et irréversible du matériau, dans les conditions de service, impliquant sa structure, sa morphologie ou sa composition, et conduisant à une perte de ses propriétés fonctionnelles. De plus, ces changements peuvent être causées par un déséquilibre propre du matériau ou à son milieu. [16]

Deux grandes catégories de vieillissement sont à considérer :

- Le vieillissement physique au sens large, dans lequel il n'y a pas d'altération de la structure chimique du matériau, des chaînes de polymères en particulier maintenant leur intégrité. Ce type de vieillissement présente par principe un caractère réversible.
- Le vieillissement chimique à caractère irréversible, tel que la fonctionnalisation des chaînes de polymères (oxydation) ou la rupture de chaînes ou la réticulation.

Plusieurs paramètres influençant le vieillissement des matériaux tel que :

- Température.
- L'hydrolyse.
- L'oxydation.
- L'érosion sous l'effet des décharges surfaciques.
- La corrosion du matériau en présence d'atmosphère saline ou acide.
- La modification de la structure chimique à la surface du matériau sous l'effet des UV.

I.6 Claquage des isolants

Les défaillances électriques du matériel électrique sont dues, dans une très large mesure, au claquage électrique des isolations. On désigne ainsi l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles où tout milieu diélectrique (liquide, gaz, solide) est soudainement traversé par un arc [17].

I.6.1 Dans les isolants solides

C'est un phénomène qui se produit dans un isolant quand le champ électrique dépasse ce que peut supporter cet isolant. Le claquage peut provoquer la fonte, brûler ou perforer le diélectrique et les électrodes et il peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant. Si on applique une tension de nouveau à cet isolant, un claquage se produit dans la majorité des cas par un très intense faisceau lumineux produit par un laser (suivant le canal tracé par la décharge.).

I.6.2 Dans les isolants liquides et gazeux

Si le préclaquage apparaît dans les diélectriques liquides ou gazeux, la mobilité des particules permet d'éliminer la trace et l'isolant peut être régénéré (si le claquage n'a pas eu lieu pendant une durée assez grande pour changer les propriétés intrinsèques de l'isolant).

Chaque matériau possède une rigidité diélectrique différente des autres. Elle dépend de :

- Fréquence du réseau : si la fréquence augmente la rigidité diélectrique diminue ;
- Température : la rigidité diélectrique est inversement proportionnelle à la température ;
- Temps d'application de la tension.

I.6.3 Différents Mécanismes de claquage

Pour les appareils fonctionnant sous haute tension, le diélectrique est un élément délicat.

Trois mécanismes principaux décrivent la détérioration globale du diélectrique sous le champ électrique:

- Le vieillissement électrique,
- La dégradation d'un matériel
- la rupture diélectrique.

Ces mécanismes sont listés dans la figure I.13 selon le temps et le champ électrique auxquels ils peuvent avoir lieu.

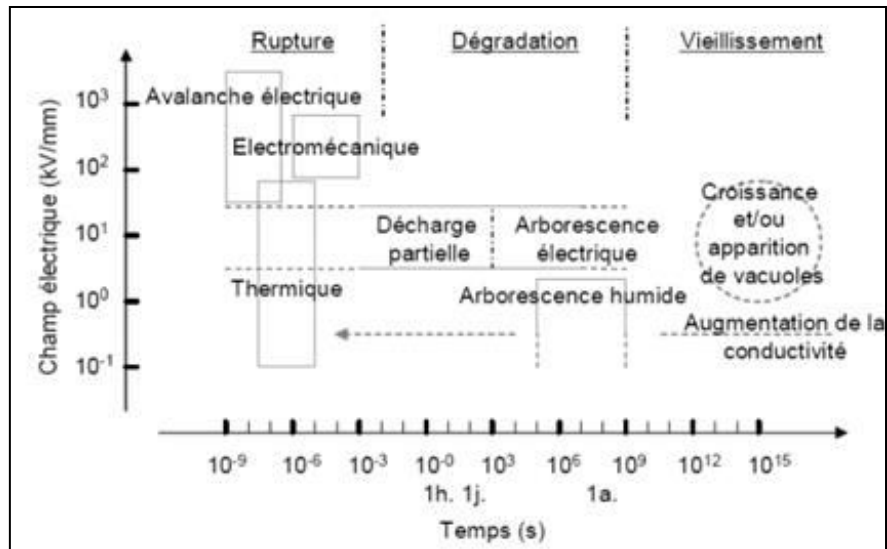


Figure I.13 : Différents Mécanismes de claquage

Le claquage est la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique, manifesté souvent comme une modification irréversible du diélectrique. Il est le fruit d'une série de processus complexes et interactifs. On peut différencier le claquage intrinsèque du matériau qui est lié à des phénomènes électroniques, thermiques ou mécaniques. La figure I.14 montre les différents types de claquage selon le temps d'application de la tension.

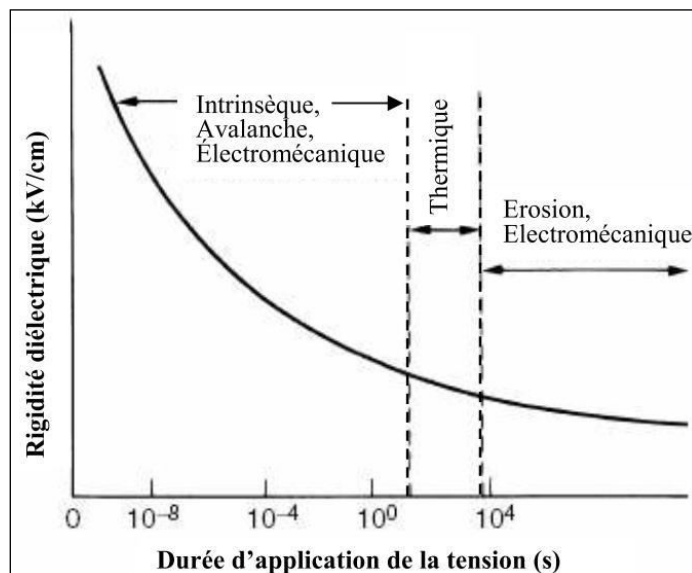


Figure I.14 : Différents types de claquage des isolants solides.[18]

I.6.3.1 Claquage intrinsèque

Pour ce type de claquage, on admet que le processus de rupture diélectrique est produit, sous l'effet du champ électrique, il se déroule comme aux gaz produisant des électrons de conduction. Le déplacement des cavités vers la cathode génère des charges qui consolident le champ électrique au voisinage de la cathode. Puis, on obtient une augmentation d'émission des électrons qui conduit à la destruction de l'isolation [19].

I.6.3.2 Claquage électronique

La présence d'un électron dans le matériau induit une ionisation par collision (sous l'effet du champ électrique) qui entraînera la rupture diélectrique du matériau [20]. L'énergie d'ionisation des atomes peut atteindre 5 à 10 eV.

Pour produire une avalanche il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit 2 électrons, une avalanche de m générations produit 2^m électrons [21]. La destruction du matériau par avalanche électronique nécessite 40 générations soit 2^{40} électrons ($\approx 1.0995116 \cdot 10^{12}$).

I.6.3.3 Claquage thermique

Les pertes diélectriques provoquent une libération de chaleur dans l'isolant. Lorsque la quantité de chaleur produite est supérieure à celle évacuée, la température augmente, provoquant l'augmentation de la conduction et de la chaleur par l'effet Joule dans une évolution d'instabilité thermique. Il provoque une augmentation de la température de la matière isolante par rapport au milieu ambiant qui produit la dégradation de l'isolant. Le mécanisme se déroule de l'ordre de la seconde.

La tension de claquage thermique est reliée à la fréquence f par l'expression suivante:

$$U_c = \frac{C}{\sqrt{f}} \quad (\text{I.43})$$

C : étant une constante.

I.6.3.4 Claquage électromécanique

Le claquage électromécanique prend en compte l'effort électrostatique qui permet de rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cet effort presse l'isolant solide placé entre les deux électrodes. Le claquage survient si cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module de Young.

I.6.3.5 Claquage par arborescences électriques

Le claquage des isolants est généralement anticipé par une période de croissance d'un défaut, comme la cavité, ou vacuole, dans le matériau. Cette cavité, lorsqu'elle atteint une taille

suffisante, est le siège de décharges partielles dont la répétition détruit le matériau et conduit à la formation d'une arborescence où intervient en dernier l'arc électrique figure I.15.

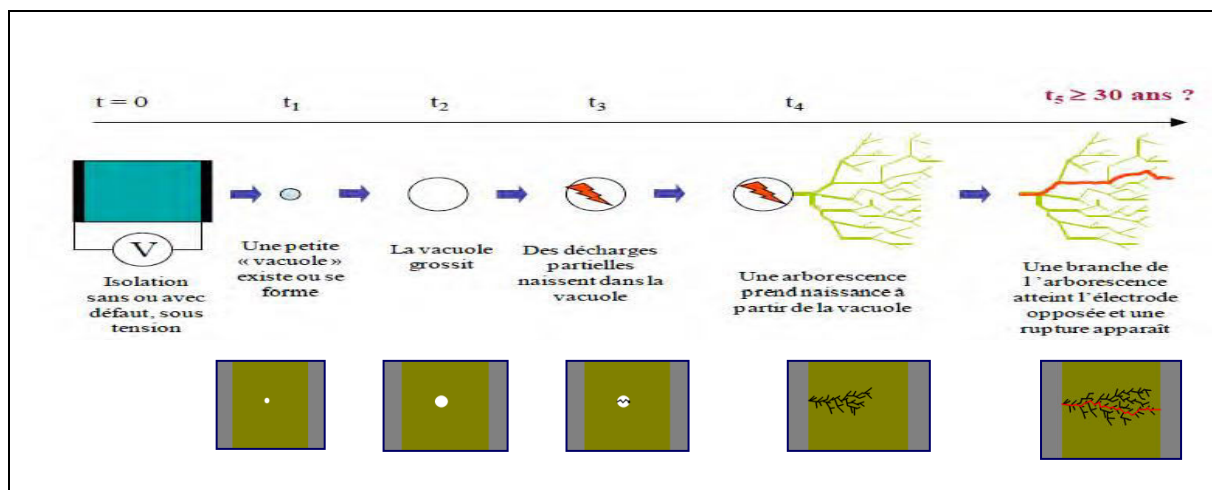


Figure I.15 : Effet de la décharge partielle

Les phénomènes d'arborescences sont des facteurs précurseurs du vieillissement du diélectrique. Ils constituent une dégradation permanente des matériaux et sont étroitement associés au claquage et à la destruction de tout l'appareillage électrique.

Les arborescences sont des compositions filamenteuses ramifiées constituées de micro canaux creux sous forme d'arbre susceptibles de se disperser sur des distances de plusieurs millimètres en volume et en sub-surface d'isolants.

Ce phénomène destructeur peut apparaître sans qu'on le sache dans l'isolation et évoluer pendant plusieurs années jusqu'à la destruction comme le montre la figure I.16 sur une section de l'isolation d'un câble.

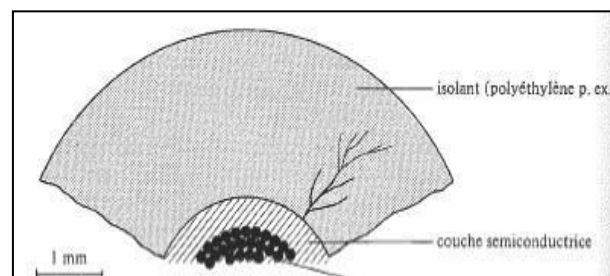


Figure I.16 : Phénomène d'arborescence [22]

Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les phénomènes fondamentaux et une approche générale sur les lois fondamentales de l'électrostatique dans les milieux diélectriques.

Nous avons présenté aussi les matériaux diélectriques les facteurs d'influence sur la rigidité et l'isolement.

Références bibliographiques du chapitre I

- [1] E.LEVY, « *Dictionnaire de physique* », Paris, Presses universitaires de France, 892 p. (ISBN 978-2-130-39311-5, notice BnF n° FRBNF34928543), p. 193,1988.
- [2] L.LANDAU, E.LIFCHITZ, « *Physique théorique* », tome2 : théorie de champs, 5^e édition, Ellipses, Paris, chapitre III, § 16. 1994.
- [3] L.HEROUS, « *Etude des mécanismes d'écoulements de charge dans les matériaux isolants au moyens de mesures électrostatique de déclin* », thèse de Doctorat d'état, Université Badji Mokhtar Annaba, décembre 2006.
- [4] N.BERGER, « *Liquides isolants en électrotechnique* », Présentation générale, Techniques de l'ingénieur, D 2470, 2002
- [5] P.J.VUARCHEX, « *Caractéristiques des diélectriques liquides* », Techniques de l'ingénieur, Traité K 714, Janvier 1988.
- [6] C.M.CHAN, T.M.Ko, H.HIRAOKA, « *Polymer surface modification by plasmas and Photons* », Surface Science Reports, no. 24, pp. 1-54, 1996.
- [7] F.VIVIER, « *Les Polymères* » Travaux Pratiques IUT Créteil, Vitry Mesures Physiques (1^{ère} année), Ecole Mines paris, Janvier 2006
- [8] N. FOURATI et P. HOFFMANN, « *Milieux diélectriques Condensateurs* » Leçon n°3, pp 3. 2011.
- [9] A.TILMATINE, « *Diélectriques 1 : matériaux diélectriques* », Chapitre 7, USBA , 2017.
- [10] Norme CEI 60243-1, « *Rigidité diélectrique des matériaux isolants. Méthodes d'essai. Partie 1 : essais aux fréquences industrielles* », 1998.
- [11] A. ANTON, « *Matériaux isolants solides - Caractéristiques électriques* », Techniques de l'Ingénieur, rubrique Matériaux à propriétés électriques et optiques, D2315, août 2003.
- [12] R.BARTINIKAS, R.M.EICHHORN, « *Electrical properties of solid insulating materials: molecular structure and electrical behavior* », Engineering dielectrics, Vol. II A. ASTM. stp 783, 1983.
- [13] A.SEYNI « *Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage* ». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, décembre 2008.
- [14] R.FARHI, C.MOREL, G.CHERON, « *Matières plastiques & adjuvant hygiène et sécurité* ».INRS, ED638, Octobre 2006.

- [15] P. ROBERT, «*Traite d'électricité : Matériaux d'électrotechnique*», Volume II, septembre 2013.
- [16] B.MORTEGNE, «*Vieillissement des composites – Evolution des propriétés et modélisation*», Techniques de l'Ingénieur, rubrique Corrosion et vieillissement : phénomènes et mécanismes, COR 113, juillet 2005.
- [17] R.TOBAZÉON, «*Préclaquage et claquage des liquides diélectriques* » Techniques de l'Ingénieur, D2450 v2, 1997.
- [18] J.V.CHAMPION, S.J.DODD, J.M.ALISON, «*The correlation between the partial discharge and the spatial and the temporal development of electrical trees grown in an epoxy resin*», J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 29, pp. 2689 – 2695, 1996.
- [19] A.VON HIPPEL, «*Electric breakdown of solid and liquid insulators* », J. Appl. Phys. 8, pp. 815, 1937.
- [20] F.SEITZ and R.P. JOHNSON, «*Modern Theory of Solids*», Journal of Appl. Phys., Vol. 8, No. 2, pp. 84-97, 1937.
- [21] K. H.STARK, C.G.GARTON, «*Electric Strength of Irradiated Polythene*», Nature 176, 1225– 1226, 24 December 1955.
- [22] J.V.CHAMPION, S. J.DODD, «*The effect of voltage and material age on the electrical tree growth and breakdown characteristics of epoxy resins*», J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 28, pp. 398 – 407, 1995.

Chapitre II

Etat de l'art

Introduction.....	35
II.1 Décharges partielles.....	35
II.2 Régimes de décharge dans un gaz soumis à une tension continue	36
II.3 Mécanisme des décharges partielles.....	39
II.3.1 Décharge type Streamer	39
II.3.2 Décharge type Townsend.....	40
II.4 Classification des décharges partielles.....	41
II.4.1 Les décharges internes.....	42
II.4.2 Les décharges partielles superficielles.....	42
II.4.3 Les décharges couronnes.....	42
II.4.4 Les arborescences.....	42
II.5 Caractérisation des décharges partielles.....	42
II.5.1 Décharges dans une cavité	42
II.6 Technique de détection et de mesure des décharges partielles	43
II.6.1 Objectif	44
II.6.2 Techniques de détection et de mesure de décharges partielles	44
II.6.2.1 Détection par mesure électrique	44
II.6.2.1.1 Montage élémentaire	45
II.6.2.1.2 Montage en circuit de base doublé	46
II.6.2.2 Détection de DP par méthodes non électriques	46
II.7 Grandeurs liées aux décharges partielles	48
II.7.1 Charge apparente	48
II.7.2 Fréquence de décharge	49
II.7.3 Courant moyen des décharges.....	49
II.7.4 Energie de décharge	49
II.7.5 Débit quadratique.....	49
II.7.6 Tension d'apparition des décharges	50
II.7.7 Tension d'extinction des décharges partielles (TEDP)	50
II.7.8 Tension de transition.....	50
II.7.9 Tension de claquage.....	50
II.7.10 Bruit au fond.....	50
II.8 Grandeurs calculées	50
II.8.1 Courant moyen des décharges	50
II.8.2 Energie des décharges	51
II.8.3 Débit quadratique	51
II.9 Calibration de la mesure de la décharge partielle.....	51
II.10 Utilisation des réseaux de neurones	53
Position du problème	55
Conclusion.....	56
Références bibliographiques du chapitre II.....	57

Introduction

Les matériaux diélectriques ou isolants qu'ils soient solides, liquides ou gazeux sont souvent le maillon faible des systèmes électriques dont la fiabilité et la disponibilité dépendent assez souvent de la qualité des systèmes d'isolations électriques. Les isolations des matériels sont non seulement soumises aux conditions physiques et chimiques imposées par l'environnement telles que l'oxydation par l'oxygène atmosphérique ou l'humidité qui affecte fortement la tenue diélectrique, mais aussi à des contraintes électriques et mécaniques tels que les surtensions, les vibrations et les chocs thermiques. La durée de vie d'un appareil électrique est limitée aussi par la température à laquelle est soumis son isolant. Sous l'action prolongée de la chaleur, les matériaux isolants sont le siège de réaction chimique qui les dégradent progressivement de sorte qu'ils peuvent devenir inapte à supporter les diverses contraintes électriques et mécaniques.

L'origine la plus importante des dégradations subies par les matériaux isolants inclus dans une isolation soumise à une haute tension est sans doute celle due à l'action des décharges partielles. Ces dernières constituent une des causes pouvant conduire à l'abaissement de la durée de vie des appareils hautes tensions.

II.1 Décharges partielles

Une décharge partielle est une décharge disruptive survenant dans l'isolement. Elles apparaissent dans les diélectriques solides, liquides ou gazeux présentant des défauts (cavité, décollement,...) dès qu'une tension suffisante est appliquée. Les décharges partielles (DP), telles que définies par la norme CEI 60270, sont des décharges diélectriques localisées dans une partie d'un système isolant diélectrique solide ou liquide sous l'effet d'un champ à haute tension.

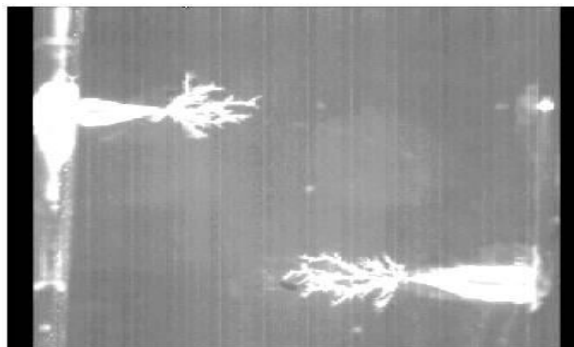


Figure II.1 : Décharge partielle [1]

C'est une sorte de décharge localisée, engendrée par une ionisation gazeuse transitoire dans un dispositif d'isolation, lorsque les contraintes provoquées par la tension électrique dépassent une certaine valeur critique. Elles correspondent à une rupture des gaz occlus dans les défauts, Dans le domaine de l'électricité, une décharge partielle (DP) est une décharge qui ne court-circuite que partiellement l'isolement entre conducteurs" sous l'effet d'une forte tension (HTB ou HTA). [1]

Les décharges partielles, se manifestent soit à l'intérieur des bulles gazeuses emprisonnées dans la structure isolante (les bulles gazeuses peuvent également prendre naissance sous l'effet de la tension dans une isolation imprégnée de liquide isolant tel que le transformateur), soit à la frontière entre isolant et conducteur lorsque l'adhérence n'est pas parfaite, soit dans des cavités ou inclusions de particules étrangers. Dès que le champ est suffisant, les décharges partielles prennent naissance et peuvent par érosion, fusion localisée, transformation chimique créent dans l'isolant des réseaux de canaux plus ou moins conducteurs sous formes d'arbustes (formation d'arborescences) [2], ces derniers croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leurs tailles deviennent suffisamment grandes.

Ce n'est qu'au début des années 1940 que le phénomène des décharges partielles a commencé à intéresser plusieurs chercheurs. Après avoir constaté l'importance des dégâts qu'ils peuvent causer, les investigations s'orientaient beaucoup plus vers la mesure du niveau des décharges partielles et leur localisation, ce qui leur permettait de connaître mieux le développement de ce phénomène dans le temps, leurs effets sur les matériaux isolants et la possibilité de diminuer ou d'éliminer ces décharges partielles.

Une décharge électrique ou simplement « une décharge » désigne le passage d'un courant dans un diélectrique lors d'un claquage. C'est un chemin de haute conductivité dans le diélectrique reliant les deux électrodes.

II.2 Régimes de décharge dans un gaz soumis à une tension continue

Dans les conditions normales un gaz soumis à un champ électrique E produit par une différence de potentiel V ne laisse passer aucun courant si ce champ est modéré. Lorsque l'intensité du champ augmente ou que le gaz est exposé aux phénomènes de l'irradiation par les rayons X, les rayons UV ou les rayonnements cosmiques, il apparaît des phénomènes de conduction produits par le mouvement des corpuscules chargés appelés décharges dans les gaz. Les corpuscules chargés dans les gaz sont des électrons, des ions négatifs ou positifs. Contrairement, aux solides et liquides qui peuvent être classés du point de vue électrique en

conducteurs et isolants, les gaz peuvent suivant les circonstances être considérés soit comme conducteurs soit comme isolants.

Le mouvement des corpuscules chargés provient généralement sou l'effet d'un choc ou d'une radiation. Lorsqu'un électron vient frapper un atome ou une molécule, il lui cède une part de son énergie. Pour que l'ionisation par choc se produit, il faut que l'énergie cinétique de l'électron ionisant soit au moins égale à l'énergie d'extraction d'un électron de la couche extérieure de l'atome c.à.d. au moins égale à l'énergie d'ionisation W_i qui caractérise l'atome ou la molécule considérée.

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (\text{II-1})$$

Le type de radiations auxquelles sont soumis les isolants gazeux peuvent être sous forme de rayons X, UV, rayon de substance radioactive, etc...

Un rayonnement peut être considéré comme formé de photons c.à.d. corpuscules dont l'énergie est $h\nu$ (h : constante de plank, ν : fréquence de rayonnement), pour que l'ionisation soit faite, il faut donc que l'énergie apportée par le photon soit suffisante pour arracher un électron à un atome.

$$h\nu \geq W_i \quad (\text{II-2})$$

Suivant l'énergie de l'ionisation, différents types de décharges dans les gaz peuvent être distinguées :

- Décharge non autonome
- Décharge semi-autonome
- Décharge autonome.

Une décharge est dite non autonome si l'effet qui entretient la distribution des charges est exclusivement d'origine externe (ex : champ électrique), c.à.d. que le passage du courant cesse en même temps que la cause.

Une décharge est dite semi-autonome si à l'origine extérieur se propage un effet ionisant provenant de la décharge elle-même, amplifie énormément le courant sans que la décharge puisse subsister si la cause extérieure cesse.

Une décharge est dite autonome si l'effet est intérieur est suffisant pour entretenir à lui tout seul la décharge amorcée par une cause extérieur, en d'autres termes, le courant doit subsister après la suppression de l'action ionisante extérieure.

Un tube soumis à une décharge de laboratoire contenant un gaz sous pression à une tension variable figure II. La courbe caractéristique courant /tension $V(I)$ peut être séparée en différentes régions qui correspondent à différents régimes de fonctionnement :

On observe d'abord la décharge non autonome provoquée par les effets extérieurs qui ne s'accompagne d'aucun phénomène lumineux (zone 1), lorsqu'on augmente encore la tension, le courant dépendant encore du gaz se remet à augmenter d'une manière rapide par multiplication électronique, ce qui correspond au régime semi-autonome. La décharge dépend encore des effets extérieurs d'ionisation, le régime est limité par une tension V_d dite tension d'amorçage de disruptive, on l'appelle aussi régime de décharge de Townsend (zone 2), ce régime ne s'accompagne d'aucun phénomène lumineux. Lorsqu'on atteint la tension disruptive V_d , le courant continu à augmenter rapidement. Il s'accompagne ensuite d'une diminution de la tension aux bornes du tube et passe par décharge lumineuse normale qui correspond à une valeur constante dans un large domaine du courant (si la tension devient inférieure à V_i , la décharge s'éteint).

Le régime autonome (zone 3) qui est défini par une décharge lumineuse. Il s'explique par l'acquisition des électrons d'une vitesse suffisante pour exciter puis ioniser les molécules de gaz. L'excitation explique l'apparition de la lumière d'où le courant augmente par l'effet d'ionisation interne.

Le régime de la décharge d'arc débute à partir des décharges lumineuses, l'arc jaillit entre les électrodes, la D.D.P entre électrodes devient faible. Par ionisation intense, l'espace qui sépare les électrodes devient très conducteur.

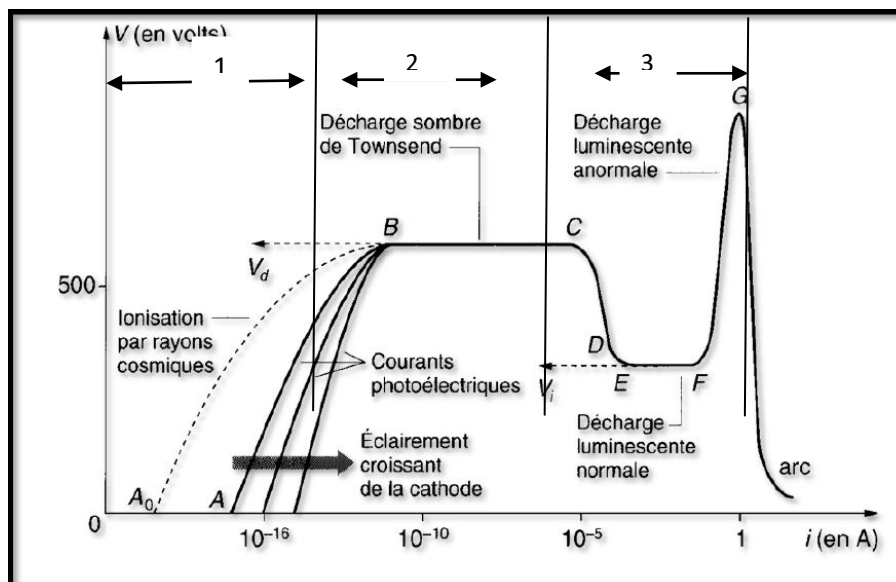


Figure II.2 : Régimes de décharge en courant continu [2]

II.3 Mécanisme des décharges partielles

Plusieurs travaux expérimentaux ont été entrepris dans différents laboratoires [3, 4,5], pour étudier le mécanisme de développement des décharges partielles dans une cavité gazeuse sous une tension alternative. En utilisant la méthode de détection des impulsions du courant électrique et la méthode de détection optique à l'aide d'une caméra vidéo, on constate que quelque soit le matériau isolant utilisé, pour les différentes vacuoles réalisées, on distingue deux importants mécanismes de décharges partielles. Il s'agit de deux étapes successives de décharges partielles qui se développent au sein du gaz au cours du temps.

On distingue successivement le premier type appelé décharge type Streamer puis le second appelé décharge type Townsend [6, 7].

II.3.1 Décharge type Streamer

Cette décharge est basée sur l'initiation des avalanches successives commencées dans le gaz par des photons actifs originaires de l'ionisation dans le champ de la charge d'espace du local. Selon les essais réalisés sur le détecteur des impulsions du courant, on constate que la décharge type Streamer figure II.3 est caractérisée par un brusque temps de propagation défini par un temps de montée rapide et une grandeur de pulsation max presque constante. C'est un type de décharge rapide, caractérisé par un courant de charge bref, ceci est probablement dû au champ intense à l'intérieur du vide, causé sûrement par un manque d'électron initial à la tension d'approche des décharges partielles [4]. En effet, pour qu'une décharge partielle de type streamer se présente dans des inclusions de gaz, il faut avoir deux conditions :

- Une disponibilité d'électron initial
- Un champ électrique supérieur au champ d'amorçage des streamers.

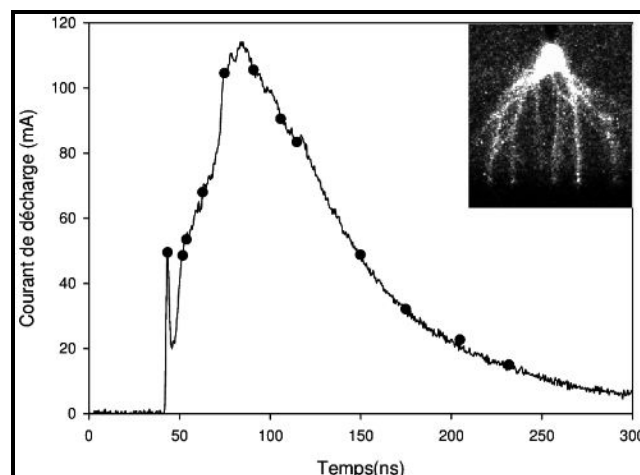


Figure II.3 : Décharge type streamer [5]

Raether [7] a établi un critère basé sur le fait que l'avalanche doit atteindre une taille critique pour que le streamer puisse se développer [8,9]. Le critère est :

$$\int_0^{L_c} \alpha dx = \ln N_c \quad (\text{II-3})$$

N_c : Nombre critique d'électrons en tête d'avalanche (de l'ordre de 10^8).

L_c : Longueur critique de l'avalanche.

II.3.2 Décharge type Townsend

C'est une avalanche électronique auto-soutenue par le choc d'électrons; selon les essais réalisés sur le détecteur des impulsions de courant, il a été constaté que la décharge type Townsend figure II.4 est caractérisée par un temps de montée plus long et une largeur de pulsation importante. L'activité de cette décharge peut même durer plusieurs jours.

Au cours de l'activité de cette décharge, il a été remarqué et contrairement à la décharge streamer que les grandeurs des pulsations de courant sont toujours variables. Les décharges Townsend sont les plus formées dans un champ faible c.à.d. à coté de la tension du début des décharges partielles après les précédentes décharges ou dans un champ réduit causé par les charges d'espace et les charges de surface.

Le processus de la décharge Townsend montre que les électrons sont caractérisés par un temps de transit plus rapide que le temps de montée de la décharge et que les ions positives qui contribuent énormément au courant de la décharge sont créés à la surface de l'anode du vide.

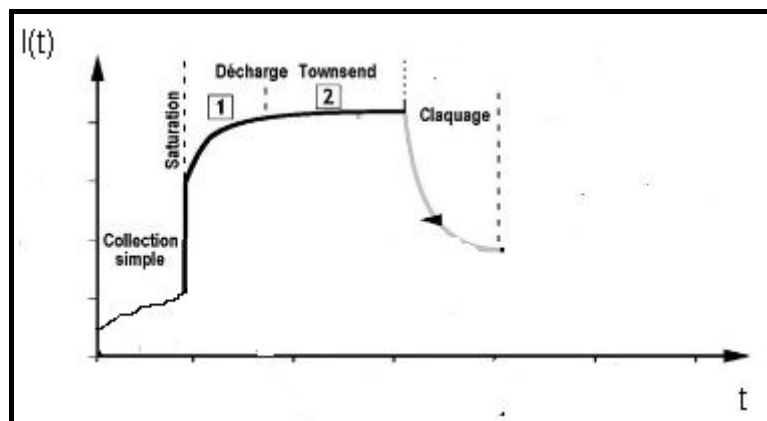


Figure II.4 : Décharge type Townsend [5]

Une image optique a été prise lors des essais a montré que dans une cavité, un processus uniformément distribué qui couvre la grande partie de la surface du vide et souvent la surface complète du vide. Ceci est dû à un processus de la décharge diffuse ainsi qu'au mécanisme d'avalanche de Townsend.

Le phénomène d'avalanche conduit à la relation (II.4) entre le courant émis par la cathode, I_0 , et le courant collecté à l'anode, I_{an} vaut :

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha \cdot d}}{1 - \gamma(e^{\alpha \cdot d} - 1)} \quad (\text{II-4})$$

α : Premier coefficient de Townsend; Il vaut le nombre d'électrons engendrés par l'électron incident par unité de longueur.

γ : 2^{ème} coefficient de Townsend

Si $\gamma e^{\alpha d} < 1 \rightarrow$ Décharge non autonome

Si $\gamma e^{\alpha d} = 1 \rightarrow$ Décharge autonome (critère de claquage de Townsend)

Si $\gamma e^{\alpha d} > 1 \rightarrow$ Le processus d'avalanche est cumulatif, le courant croit rapidement et n'est limité que par la résistance du circuit.

Nous concluons que deux raisons contribuent à provoquer des décharges partielles dans les isolants :

1. Le champ électrique dans les cavités E_c est plus élevé que le champ électrique E_d dans le diélectrique.
2. La rigidité diélectrique est plus faible dans les cavités que dans le diélectrique.

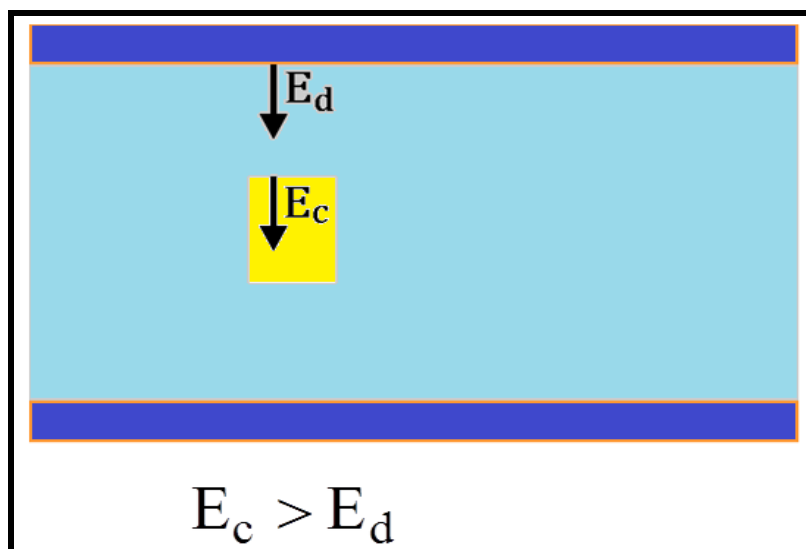


Figure II.5 : Mécanisme des décharges partielles [5]

II.4 Classification des décharges partielles

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

Kreuger [1] classe les décharges en fonction de leur localisation. Ainsi il définit quatre catégories :

II.4.1 Les décharges internes

Ces décharges prennent naissance à l'intérieur de l'isolant dans des zones du diélectrique où la rigidité est faible figure II.6. (A) : par exemple une cavité gazeuse dans un solide ou une bulle dans un liquide.

II.4.2 Les décharges partielles superficielles

Elles se présentent à la surface du matériau figure II.6. (B). elles prennent action lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface de l'isolant, il se produit des effets de cheminement et d'érosion ainsi qu'une altération qui consiste en un affaiblissement progressif de la tenue diélectrique de l'isolant.

II.4.3 Les décharges couronnes

Elles apparaissent au niveau des renforcements localisés du champ électrique au niveau de la pointe (géométrie des électrodes) figure II.6. (C). En d'autres termes, c'est un ensemble de phénomène qui se produit dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure porté à des tensions élevées. La concentration du champ aux bouts pointus, cause une rupture partielle de l'air environnant.

II.4.4 Les arborescences

Suite à un défaut de l'isolation l'arbre électrique donne naissance à différentes branches qui sont le siège des décharges. Figure II.6. (D).

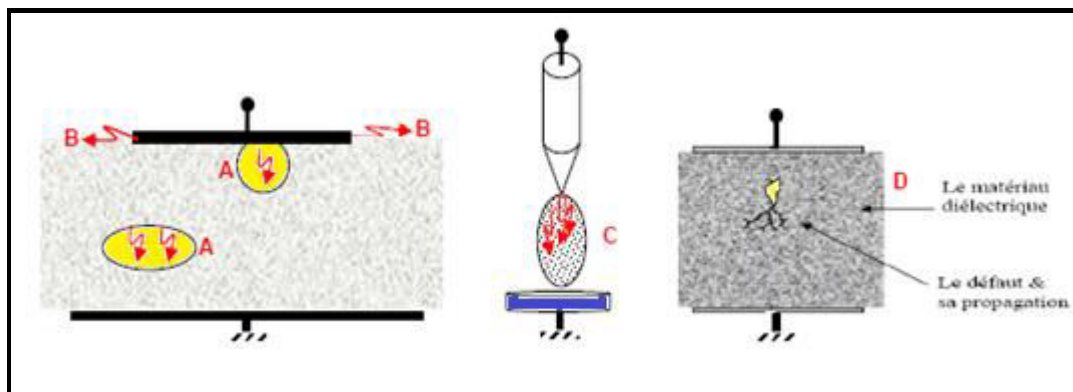


Figure II.6 : Différents types de décharges selon Kreuger : interne (A), surface (B), couronne (C) et en arborescence (D).[1]

II.5 Caractérisation des décharges partielles

II.5.1 Décharges dans une cavité

Les matériaux isolants pour usage technique contiennent toujours des cavités gazeuses. En appliquant une certaine tension alternative avec un champ électrique intense. Le comportement des DP sous cette tension alternative peut être décrit simplement en utilisant un

schéma équivalent de capacités Figure II.7.a. La cavité est modélisée par la capacité a et par un éclateur en parallèle. La capacité du diélectrique en série avec la cavité est représentée par b . La partie saine du diélectrique est représentée par la capacité c .

Une tension est appliquée à travers la cavité V_c et à travers le diélectrique V_a (Figure II.7.a). Lorsque la tension dans la cavité (V_c) devient égale à une certaine valeur critique U^+ (tension d'ignition), une décharge partielle apparaît, alors V_c chute à une valeur résiduelle V^+ et la décharge disparaît. Cette chute de tension se produit sur une durée très courte (quelques ns) par rapport à celle de l'onde sinusoïdale à 50 Hz, aux bornes de la cavité, la tension augmente de nouveau, lorsque cette dernière arrive à la valeur U^+ , une nouvelle décharge se produit, ceci se répète jusqu'à ce que la tension V_a n'augmente plus (phase $\phi = 90^\circ$). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative (arrêt de la production à 270°) dans la cavité les décharges produisent des impulsions de courants rapides (durée de quelques ns) dans l'échantillon et le circuit extérieur (Figure II.7.b).

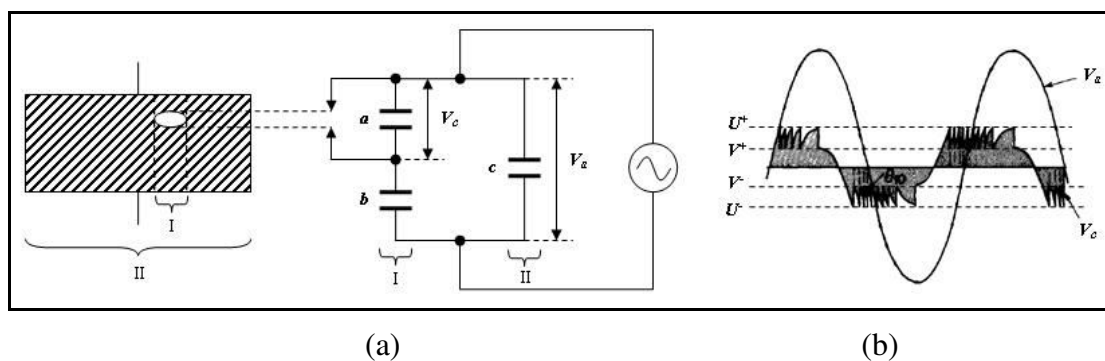


Figure II.7 : Décharges partielles dans un model Capacitif équivalent (a) et des DP récurrent dans une cavité (b) [2].

II.6 Technique de détection et de mesure des décharges partielles

En pratique, il est mal aisé de procéder à une étude analytique de l'action des décharges sur des isolants réels et ce pour deux raisons essentielles :

- En général, on n'a pas affaire à un défaut unique mais à une répartition de défauts de formes et de dimensions géométriques indéterminées
- D'autre part, l'isolation en question est prise dans des pièces métalliques constituants d'électrodes qui n'ont pas des formes simples, ce qui conduit à une topographie du champ électrique difficile à connaître [10].

Pour ces raisons on opte pour la mesure en laboratoire des décharges partielles. Généralement, les décharges, qui sont provoquées par l'ionisation du gaz enserré dans les vacuoles sont accompagnées par :

- Un déplacement de décharges q qui causent un courant
- Une radiation émise par les particules excitées
- Un son ou un crépitement
- Une chaleur générée par l'impact des particules
- Une réaction chimique.

II.6.1 Objectif

Quatre étapes doivent être remplies en vue d'atteindre l'objectif de détection des décharges. Ces étapes sont :

- 1- La détection : consiste à déceler la présence d'une décharge
- 2- La mesure : elle doit permettre par un choix judicieux des grandeurs, de quantifier l'intensité de décharge.
- 3- La localisation : consiste à déterminer l'emplacement exact des décharges
- 4- L'évaluation : détermine le degré de nuisance des décharges afin de prévoir leur effet sur la durée de vie du matériau [1].

II.6.2 Techniques de détection et de mesure de décharges partielles

II.6.2.1 Détection par mesure électrique

La méthode électrique consiste à déceler les impulsions électriques générées par les décharges partielles. Plusieurs dispositifs de détection ont été développés dans le passé, ils peuvent être divisés en trois groupes :

- Mesure de la $\tan \delta$ (dissipation de la puissance)
- Détection par des appareils à bande large
- Détection à bande ultra-large

La détection des décharges partielles faisant usage à la dissipation de puissance faisant usage à la dissipation de la puissance ($\tan \delta$) n'était pas assez sensible pour donner de bons résultats. Des systèmes faisant usage aux oscilloscopes ont été développés et qui sont de nos jours couramment utilisés, ces détecteurs connus sous le nom de détecteur à bande large ont une bonne sensibilité et un bon temps de résolution. La détection est principalement basée sur l'enregistrement des différents model d'impulsion de courant générés par la décharge dans le fil de l'échantillon. En d'autres termes on enregistre principalement la grandeur de la décharge et la position de la phase. Par contre le détecteur à ultra-large bande permet de séparer les décharges individuelles dont la durée est de l'ordre de la nanoseconde et la réponse

en fréquence est bien connue, ce qui n'est généralement pas le cas d'un dispositif industriel complexe.

Il existe deux montages principaux pour la mesure de DP : la mesure directe élémentaire et le montage en pont (de base doublé) (Figure II.9).

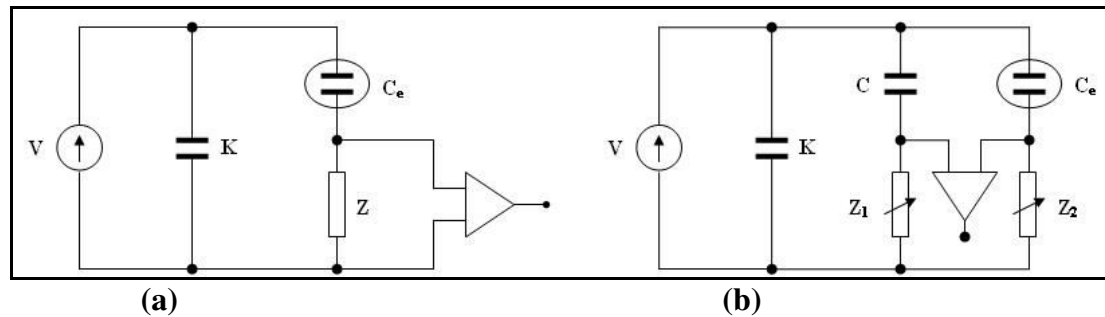


Figure II.9 : Schéma de principe d'un système de détection élémentaire (a) et de base doublé (b). [1]

II.6.2.1.1 Montage élémentaire

Ce circuit est composé d'une source de haute tension H.T, d'une cellule d'étude C affectée par les décharges, d'une capacité K de couplage qui facilite le passage des impulsions de courant de haute fréquence, d'une impédance Z aux bornes de laquelle s'effectue la mesure de l'impulsion de courant dû à la décharge.

L'impulsion est amplifiée à l'aide d'un amplificateur A relié à un appareil de mesure ou à un oscilloscope [11].

Il existe deux types d'impédances de mesure :

- RLC (parallèle) : elle permet de filtrer le signal de basse fréquence (50 Hz) de la source. Sa réponse à une décharge unique est oscillatoire et amortie. Elle est la plus utilisée.
- RC (parallèle) : la réponse à une décharge unique est une impulsion exponentielle décroissante.

Dans les deux cas, la hauteur de l'impulsion est indépendante de la résistance de mesure R . Elle est également proportionnelle à la charge q , ce qui permet d'obtenir la charge en mesurant la hauteur de l'impulsion. La charge peut être obtenue par l'intégration de courant de décharge.

Si V_c : est la tension aux bornes de la cellule d'étude, le courant i qui traverse cette cellule est la somme de 3 termes :

- Un courant capacitif $i_c = c \frac{dV_c}{dt}$, sinusoïdal, en quadrature de phase avec la tension V_c
- Un courant ohmique $i_{ohm} = \frac{V_c}{r}$, ou r est la résistance équivalente de la cellule d'étude.
Ce courant est en phase avec la tension et a une intensité négligeable car la cellule est supposée isolante
- Un courant impulsionnel i_{dp} délivré par le condensateur de couplage afin de compenser la chute de tension causée par le déclenchement d'une décharge partielle dans la cellule d'étude [12].

Donc on a :

$$i = i_{dp} + i_{ohm} + i_c \quad (\text{II-5})$$

II.6.2.1.2 Montage en circuit de base doublé

Dans le but de supprimer les perturbations exercées par les pulsations des décharges externes des échantillons, il est possible d'utiliser ce circuit de base sous forme différente de base doublé.

On appelle généralement ce deuxième circuit, circuit de détection équilibré. Les impédances Z_1 et Z_2 sont variables afin de les ajuster pour obtenir un équilibre entre les deux [1]. Les échantillons affectés par les décharges C et C_e sont de préférence identiques. Ce principe permet de détecter les impulsions même en présence des interférences et d'établir si les décharges sont d'origine interne ou externe.

Reather [7] a utilisé un circuit de détection à bande ultra-large, avec l'introduction des oscilloscopes digitales, ce circuit [5] a permis d'obtenir des meilleures informations sur le mécanisme de la décharge, le développement des avalanches dans le gaz ainsi que les caractéristiques des pulsations du signal de la décharge en fonction de la détérioration du diélectrique.

II.6.2.2 Détection de DP par méthodes non électriques

Ces méthodes de détection peuvent être classées selon le type du signal, elles utilisent les phénomènes physico-chimiques qui se manifestent lors de l'apparition d'une décharge :

- Détection de lumière
- Détection du son
- Détection de chaleur
- Détection de pression du gaz

- Détection de la transformation chimique.

Seulement les deux premières ont une importance pratique lichtenborg [13] a été l'un des premiers à avoir utilisé la photographie de la lumière par les décharges partielles de surface. Masson [14] a utilisé cette méthode pour les décharges dans des cavités artificielles et a obtenu de bon résultat.

En plaçant une caméra sur un échantillon soumis à une haute tension, il est facile de détecter les décharges de surface par une photographie obtenue lorsque l'échantillon s'illumine. D'une manière analogue, il est possible aussi de détecter les décharges couronnes autour d'un point. Cette méthode est excellente pour obtenir une localisation des décharges partielles, d'autant plus qu'avec le photomultiplicateur des décharges dont l'intensité est faible, il devient possible de les enregistrer et on améliore ainsi la sensibilité de la détection de la lumière. La photo-détection n'est pas toujours pratique puisqu'on exige l'obscurité absolue durant les tests et le photomultiplicateur est facilement saturable par la lumière, ce qui oblige à l'enlever après chaque expérience durant plusieurs heures. Durant ces dernières années, on utilise de plus en plus des convertisseurs d'images et des intensificateurs d'images en combinaison avec une caméra vidéo.

Cette méthode de détection est d'une bonne sensibilité qui peut aller jusqu'à 0,005 pC [1]. Elle fournit un emplacement exact de la décharge partielle sans qu'elle puisse être affectée par le bruit dans le circuit ou le secteur. Le seul inconvénient, c'est que cette méthode ne détecte généralement que ces décharges visibles de l'extérieur et que les grandeurs de décharges ne peuvent pas être mesurées.

La détection du son est une méthode utilisée depuis déjà plusieurs années. En effet pour guider le bruit auditif (clic ou sifflement générés par les DP), on utilise un long tube isolant ce qui permet de localiser et détecter les D.P. Auparavant, on peut même écouter le bruit des décharges de surface ou de couronne. Cependant, elle nécessite un calme absolu autour de l'échantillon où sont générées les décharges.

L'appareil ultrason a un tube en plastique avec un microphone à son bout pour détecter le moindre bruit émanant des décharges partielles qui sont ensuite converties en un audible [15, 16, 17], figure II.10

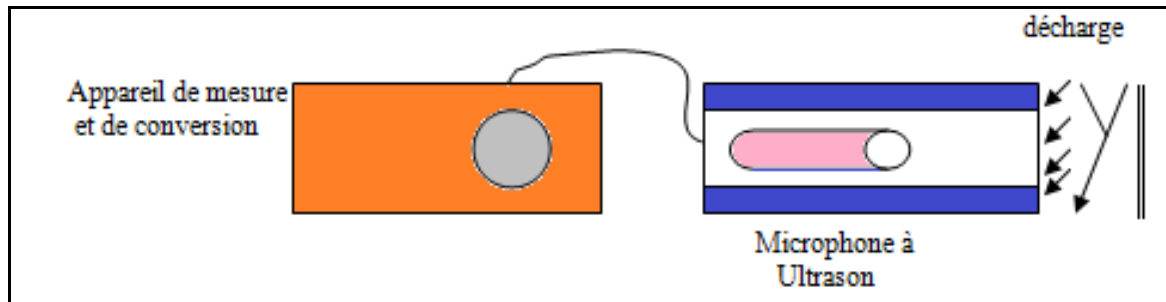


Figure II.10 : schéma de détection du son des décharges partielles [1]

Après avoir détecté les décharges partielles, il faut essayer ensuite de connaître où elles sont. Les décharges couronnes et de surface peuvent être localisées par les méthodes acoustiques et photographiques. Les décharges internes sont localisées par les méthodes acoustiques pour des isolations pas trop épaisses (50-100 mm). Dans les transformateurs il est possible d'utiliser plusieurs transducteurs ou examiner le transformateur en déplaçant le microphone en contact avec la cuve.

Enfin, la dernière étape consiste à évaluer les décharges observées et vérifier s'ils sont nuisibles ou non, si leur niveau est sans danger ou non etc. pour cela il faut combiner plusieurs résultats d'essai et de mesure tels que l'enregistrement de la décharge sur oscillogramme pour voir le type et l'origine de la décharge, faire des essais en fonction de la tension et l'effet du temps pour les hautes tensions, évaluer les durées de vie les plus longues et la tension qui permet de l'obtenir, comparer les différents modèles de décharge pour distinguer les non nuisibles par rapport aux nuisibles, etc...

Sur la base des travaux de la GIGRE [18], un programme a été développé utilisant les techniques des systèmes experts qui peuvent fournir un diagnostic après un certain nombre de questions concernant les caractéristiques des décharges.

II.7 Grandeurs liées aux décharges partielles

II.7.1 Charge apparente

C'est la quantité de la charge injectée instantanément aux bornes de la cellule d'étude, elle changerait momentanément la tension entre les bornes de celui-ci de la même quantité que la décharge partielle elle-même, [1, 19]. D'après le modèle cité en haut (figure II.6).

On conclut l'équation suivante :

$$Q_i = q_{app} = \frac{b}{A + B} \Delta v \quad (\text{II-6})$$

Elle exprimée en Pico-Coulomb (pC)

II.7.2 Fréquence de décharge

C'est le nombre moyen de répétition de décharge apparaissent sur l'intervalle du temps. Elle est exprimée en impulsions par seconde (s^{-1}).

$$F = \frac{nd}{\Delta t} \quad (\text{II-7})$$

II.7.3 Courant moyen des décharges

C'est la somme des valeurs absolues des charges des N décharges par la durée T. Il est exprimé en coulombs par seconde (C/s).

$$I = \frac{1}{T} \sum |q_i| \quad (\text{II-8})$$

II.7.4 Energie de décharge

Une décharge isolée ne contient qu'une quantité insignifiante d'énergie dans l'isolant, mais l'effet cumulatif de ces décharges peut provoquer la dégradation de l'isolant. On peut dire que cette énergie est une grandeur cumulative de la charge apparente fournie par le circuit externe lors de l'apparition des décharges. Elle est calculée selon l'expression suivante :

$$E = \sum q_i V_i \quad (\text{II-9})$$

V_i : La tension instantanée où se produit la décharge.

Elle est exprimée en joule (J).

Selon le CEI, On doit garder le signe de chaque terme dans la formule. Si on divise cette énergie par la durée appliquée T, on obtient la puissance des décharges, exprimée en Watt.

$$P = \frac{E}{T} \quad (\text{II-10})$$

II.7.5 Débit quadratique

C'est le rapport entre la somme carrée des décharges apparentes et la durée d'acquisition. Cette grandeur reflète les décharges les plus intenses sans tenir compte de la tension appliquée.

$$D = \frac{1}{T} \sum q_i^2 \quad (\text{II-11})$$

Il est exprimé en (Coulombs)² par seconde (C^2/s).

II.7.6 Tension d'apparition des décharges

Lorsque la tension appliquée est augmentée graduellement à partir d'une tension où on n'observe aucune décharge, la TADP est la tension au niveau de laquelle on commence à observer une récurrence de décharges. Elle est exprimée en volt (V).

En pratique, le CEI préconise de prendre la tension la plus basse au-dessus de laquelle l'intensité d'une grandeur choisie liée aux décharges devient supérieure ou égale à un niveau seuil prédéfini [14].

II.7.7 Tension d'extinction des décharges partielles (TEDP)

Lorsque la tension appliquée est diminuée graduellement à partir d'une tension où l'on observe une récurrence de décharges, la TEDP est la tension à laquelle ces décharges disparaissent.

En pratique, la CEI préconise de prendre la tension la plus basse en dessous de laquelle l'intensité d'une grandeur choisie liée aux décharges devient inférieure ou égale à un niveau seuil prédéfini.

II.7.8 Tension de transition

C'est la tension qui sépare les deux régimes de décharges.

II.7.9 Tension de claquage

C'est la tension dont laquelle une rafale de décharge apparaît, cette rafale conduit au claquage de la cellule d'étude.

II.7.10 Bruit au fond

Ce sont des parasites qui perturbent la mesure des décharges partielles, ils peuvent se classer en deux catégories :

- Signaux impulsionnels aléatoires et occupent un large domaine dans le temps.
- Les signaux périodiques continus dans le temps ayant des fréquences bien définies, [20].

II.8 Grandeurs calculées

Dans ce paragraphe, on considère que pendant une durée T, N décharges sont mesurées.

II.8.1 Courant moyen des décharges

Le courant moyen I est la somme des valeurs absolues des charges de N décharges divisée par la durée. Ce courant est exprimé en Coulombs par seconde et non pas en Ampère.

$$I = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N |q_i| \quad (\text{II-12})$$

Il est possible de distinguer le courant moyen positif et le courant moyen négatif.

II.8.2 Energie des décharges

Une décharge isolée ne dépose qu'une quantité infime d'énergie dans l'isolant, mais les décharges peuvent être nombreuses et dans ce cas leur effet cumulatif peut conduire à la détérioration du matériau, d'où l'intérêt de considérer l'énergie des décharges.

L'expression de l'énergie calculée est :

$$E = \sum_{i=1}^N q_i v_i \quad (\text{II-13})$$

V_i : Tension appliquée à la cellule d'essai à l'instant où se produit la décharge dont la charge est q_i .

C'est l'énergie apparente fournie par le circuit externe lors de l'apparition des décharges dans le matériau. C'est une grandeur cumulative liée à la dégradation de l'isolant.

D'après le CEI, on doit conserver le signe de chaque terme dans la formule. Si on divise E par la durée T , on obtient la puissance des décharges. Cette puissance est exprimée en Watt.

II.8.3 Débit quadratique

C'est la somme des carrés des charges apparentes des décharges divisées par la durée T . Cette grandeur donne un poids plus important aux décharges les plus intenses sans tenir compte de la tension appliquée.

$$D = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N q_i^2 \quad (\text{II-14})$$

D : Est exprimé en (coulombs)² par seconde.

II.9 Calibration de la mesure de la décharge partielle

La calibration de la mesure des décharges permet d'injecter des courtes impulsions de courant aux bornes de la cellule, les essais se font avec une charge connue. Elle est exprimée en pico coulombs, la sensibilité de la mesure est estimée à partir du niveau de calibration. Ce dernier dépend de la configuration de l'échantillon sous test. Les paramètres diélectriques de l'échantillon influent directement sur le calibrage de mesure ce qui oblige à opérer cette calibration à chaque changement de l'échantillon, figure II.11.

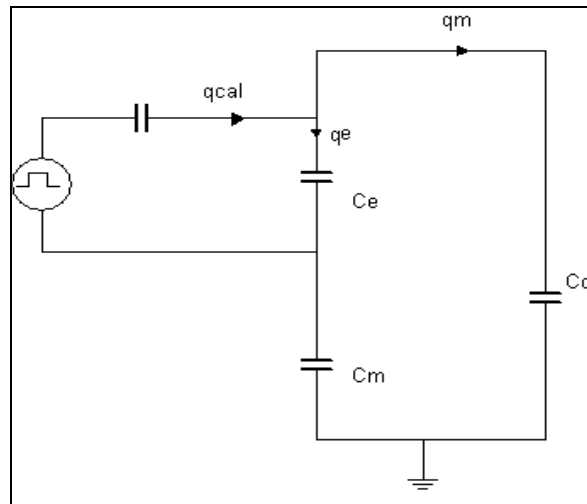


Figure II.11 : Calibration de la charge

Soit q_{cal} la charge délivrée par le calibre aux bornes de la cellule d'étude dont la capacité est C_e et que cette charge va se répartir dans les différentes branches du circuit qui contient :

C_m : La capacité de l'impédance de mesure

C_c : La capacité de couplage

C_{eq} : La capacité équivalente de C_m

q_m : La charge qui a passé dans C_m

q_e : La charge qui circule dans la cellule d'étude.

On a :

$$\frac{q_m}{C_{eq}} = \frac{q_e}{C_e} = \frac{q_m + q_e}{C_{eq} + C_e} \quad (\text{II-15})$$

D'où :

$$\frac{q_m}{C_{eq}} = \frac{q_{cal}}{C_{eq} + C_e} \quad (\text{II-16})$$

Soit :

$$q_m = \frac{C_{eq}}{C_{eq} + C_e} q_{cal} \quad (\text{II-17})$$

Le calibre nous donne une charge connue, alors il est possible de déduire le facteur de correction :

$$\frac{C_{eq}}{C_{eq} + C_e} \quad (\text{II-18})$$

II.10 Utilisation des réseaux de neurones

Depuis quelques années, de nombreux auteurs ont testé l'aptitude à la classification et à la reconnaissance des signaux de décharges à partir des réseaux neuronaux [21].

Suzuki et Endoh [22] ont mis au point un réseau à 3 couches de neurones et l'ont appliqué au suivi des décharges partielles générées par une pointe métallique placée dans une cavité dans un solide diélectrique. Ils ont dans un premier temps réussi à séparer les signaux des décharges du bruit de fond. Ensuite, ils ont obtenu une corrélation entre l'évolution des sorties du réseau de neurone et le développement d'une arborescence dans le diélectrique. Quelques temps avant le claquage, une des sorties du réseau appelée alarme devient active.

La même année et avec le même type de réseau Hosumi et al [23] réussissent à détecter la présence d'arborescences générées par une pointe métallique dans une résine époxy. Cependant le succès de la méthode est intimement lié au stade de développement de l'arborescence. Aussi, lorsqu'il s'agit des échantillons non utilisés dans l'apprentissage du réseau, les taux d'échecs ou d'erreurs de classification sont importants.

D'autres auteurs ont tenté de classer des cavités cylindriques en fonction de leur taille ou de leur position (près de l'électrode, entourée de diélectrique) [24]. Ils ont injecté à l'entrée d'un réseau multicouche à rétropropagation, les distributions de la charge moyenne dans la phase. Leur étude a mis en exergue certains inconvénients des réseaux de neurones tels que la lenteur de la reconnaissance, la lourdeur nécessaire pour améliorer la qualité de la reconnaissance.

Gulski et al [25] se sont également intéressés à l'application des réseaux de neurones à la reconnaissance des décharges partielles. Ils ont utilisé 3 différents types de réseau. Un perceptron multicouche, un réseau auto-organisateur de Kohonen et un réseau à vecteur d'apprentissage. La base de données ainsi que les coefficients servant à la reconnaissance sont ceux qu'ils ont précédemment utilisés. Le perceptron multicouche est le réseau qui donne les meilleurs résultats. Cependant pour les 3 types de réseaux, il y a une difficulté à étendre la reconnaissance à des défauts qui ne font pas partie de la base d'apprentissage. Des erreurs de classification peuvent survenir dans de tels cas. De plus, les temps d'apprentissage sont souvent longs (quelques heures). Les mêmes conclusions ont été faites par Krivda [26].

Une méthode basée sur le perceptron multicouche a été également appliquée par Mazroua et al [27] pour la classification des décharges en fonction de la taille et de la position de la cavité qui les a initiées. Les auteurs ont utilisé les caractéristiques des impulsions de courant de décharge comme grandeurs d'entrée du réseau. Les résultats sont très médiocres lorsque les

cavités ont des tailles voisines. Les mêmes auteurs ont obtenu les mêmes résultats en utilisant d'autres structures de réseaux de neurones [28].

Cachin et al [29] ont souligné l'importance du prétraitement des données pour l'optimisation de la reconnaissance par les réseaux de neurones. Ils ont introduit la méthode de validation croisée qui consiste à diviser dans un premier temps l'ensemble d'apprentissage en k sous-ensembles de même cardinal puis d'utiliser $k-1$ sous-ensembles comme base d'apprentissage du réseau et tester le réseau avec le $K^{\text{ième}}$ sous-ensemble. L'opération est répétée k fois. Au vu des résultats obtenus, les auteurs insistent sur la nécessité d'adapter la taille du réseau à la complexité du problème.

Enfin Hong et al [28] mettent au point un réseau de neurone modulaire (RNM) composé de 5 sous-réseaux de type perceptron multicouche dont chacun est entraîné à la reconnaissance d'un seul type de décharge. Pour 5 types de sources de décharges différentes, ils injectent à l'entrée du réseau un vecteur formé par la concaténation des distributions statistiques $Q_{\text{moy}}(\Phi)$, $Q_{\text{max}}(\Phi)$ et. Ils comparent les résultats obtenus avec RNM et avec un réseau multicouche classique. Le RNM donne des taux de reconnaissance supérieurs avec des temps d'apprentissage plus faibles (ils restent cependant relativement longs).

De ces nombreuses études sur l'aptitude des réseaux de neurones à classifier les décharges partielles, des conclusions communes peuvent être tirées :

- ✓ Le perceptron multicouche est le type de réseau le plus adapté à ce genre de tâche.
- ✓ Le choix de la base d'apprentissage est fondamental.
- ✓ Plus le nombre d'exemples servant à l'apprentissage est important et le nombre de paramètres à l'entrée est grand, plus il y a de chance assignée et en même temps un nombre trop important de paramètres d'entrée alourdit la structure du réseau.
- ✓ La phase d'apprentissage est souvent lente, ce qui limite l'utilisation de ces réseaux.
- ✓ Les réseaux différencient mal des défauts similaires.
- ✓ Il y a une difficulté d'étendre la reconnaissance à des objets qui n'ont pas été utilisés lors de l'apprentissage ou dont les signaux caractéristiques sont trop éloignés de ceux de la base de données. Ainsi il y a un risque d'erreur de classification.
- ✓ La quasi-totalité des études qui ont été faites concernent des défauts de laboratoire, d'où la difficulté d'étendre ces résultats à des défauts dans les appareils.

Position du problème

Dans notre travail, nous abordons une problématique essentielle liée aux propriétés diélectriques des matériaux isolants soumis à des champs très intenses. La rupture diélectrique des isolants due à un vieillissement prématuré est à l'origine de nombreux problèmes auxquelles les utilisateurs et les fabricants de matériels électriques sont confrontés.

Les décharges partielles représentent un souci permanent aux industriels. Ce phénomène imprévisible et irréversible peut entraîner la destruction de matériels électrique et électronique après un certain temps d'usage et causer parfois des dégâts économiques et humains importants. Compte tenu des contraintes de plus en plus sévères s'exerçant sur les dispositifs et systèmes du génie électrique (électrotechnique ou électronique de puissance) leur existence est de plus en plus d'actualité.

Plusieurs travaux ont montrés que dans la fabrication de condensateurs les ruptures diélectriques observées se situaient souvent en bordure des armatures où les irrégularités conduisent à un renforcement de champ, ou bien dans les régions où les armatures sont en contact avec des vacuoles gazeuses. Dans notre travail, pour éliminer les vacuoles de gaz, nous avons renforcé l'isolation du condensateur en utilisant une isolation mixte.

Nous avons rempli le condensateur de liquide diélectrique (mono/dibenzyltoluène MIDBI), pour lequel le champ d'apparition des décharges électriques est beaucoup plus élevé que dans les gaz. L'objectif est de considérer le phénomène de décharges partielles dans une isolation mixte. La méthodologie de notre recherche est basée essentiellement sur les essais expérimentaux de plus, nous avons utilisé pour la première fois la modélisation expérimentale par la méthodologie des plans d'expériences pour l'étude de ces processus, en vue de leur modélisation et de leur optimisation.

Les résultats obtenus sont des modèles mathématiques capables d'identifier les principaux facteurs et leurs interactions sur l'apparition des décharges partielles.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un état de l'art sur les décharges partielles, les différents types, leurs méthodes de détections, leurs évolutions, les grandeurs caractéristiques ainsi que les différents techniques d'analyses.

Les décharges partielles restent l'ennemie numéro un des matériaux isolants. Elles se produisent à l'intérieur ou à la surface d'une isolation, sous l'action du champ électrique. Elles sont le résultat d'un ensemble complexe de paramètres telle que :

- ✓ L'augmentation de la température du gaz ambiant provenant des chocs élastiques entre les molécules gazeuses et les électrons,
- ✓ Bombardement des parois de la vacuole ionique et électronique, causant leur dégradation, soit directement, soit par l'intermédiaire d'échauffements locaux, rayonnement ultraviolet,
- ✓ Réactions chimiques secondaires provoquées ou activées par l'effluve (décharge électrique à faible luminescence) et faisant intervenir les gaz contenus dans la cavité, les produits de décomposition ou les deux à la fois.

Références bibliographiques du chapitre II

- [1] F.H.KREUGER, «*Partial Discharge Detection In High Voltage Equipment*», Butterworths, 1989.
- [2] A.M.POINTU, «*Décharges partielles* », Technique de l'ingénieur, D 2830,1998.
- [3] P.BEZBORODKO, «*On the mechanism of partial discharge in gaseous cavities in contact with solid or liquid insulation*», 3rd ICSD, Trondheim, 3-6 July, 1989.
- [4] J.T.HOLBOLL, «*Temporel and spatial developments of partial discharge in spherical voids in epoxy related to the detected electrical signa*», CEDIP 1991.
- [5] P.H.F.MORSHUIS, «*Partial discharge mechanisms*», Doctoral dissertation, University of Delft, 1993.
- [6] J.C.DEVIN'S, «*Tron's electric insulation*», IEEE 19.5 pp.475-495, 1984.
- [7] H. REATHER, «*Electron avalanches and breakdown in gases*», Butterworths, 191 p, 1964.
- [8] W.R.KODOLL, «*Evaluation de la résistance aux décharges partielles*», CIGRE, 1988.
- [9] C.MENGUY, «*Mesure de l'énergie des décharges partielles et dégradation des isolants*», R6E, 1990.
- [10] A.J.PEARMAIN and DANIKAS, «*A study of behavior of uniaxially oriented polyethylene top dodecylbenzene oil insulating system subjected to electrical and thermal stress*», comma, 1988.
- [11] M.CACCIARI, «*Identification and separation of two concurrent partial discharge phenomena*», proc, IEEE conf; elect insul. Diel phen, pp. 476-479, san fransisco, 1996.
- [12] E.SEBILLOTE, «*dégradation sous champ électrique alternatif du polypropylène imprégné influence des oxydes*», Thèse de doctorat, Grenoble, 1989.
- [13] F.H.MAUTNER, «*Nova methodo naturam ac natum fluidi electrici investigation, novi commentara societatis regi scientanu*», Pp. IX, 46, 490, Gruyter, Berlin, 1968.
- [14] J. H.MASSON, «*Dielectric Breakdown In Solid Insulation*», Progress in dielectric, vol. 1, p. 1, Heywood & Co., London, 1959.
- [15] M.NEMAMECHA, «*Claquage des isolants haute tension*», session 2899, 9th ISH, Graz, pp. 1-4, 1995.
- [16] I.K.SEUNG, «*A study on the partial discharge characteristics according to the distribution pattern of voids with an insulation*», IEEE, 1995.
- [17] J.R.LAGHARI, «*Time included partial discharge breakdown in laminated structure*», IEEE, pp 34-43, 1992.

- [18] W.G. CIGRE, «*Material properties for non-ceramic outdoor insulation: State of the art*», Technical Brochure No. 255, D1.14, 2004.
- [19] IEC, «*Partial Discharge Measurements*», 270, 1981.
- [20] H.J.WEBER, R.E.SEEBERGER et G.SLOPE, «*Field Measurements of Partial Discharges in Potential Transformers*», IEEE Electr. Insul. Mag., N°2, Vol. 5, pp. 34-38, 1986.
- [21] H.ABDI, «*Les réseaux de neurones*», presse universitaire de Grenoble, 1994.
- [22] E.SUZUKI, «*Pattern recognition of partial discharge in XLPE Cables using a neural network*», IEEE Trans electr. Insul, vol. 27 N°3, pp. 543-549, 1992.
- [23] N.HOZUMI, «*Discrimination of partial discharge pattern using a neural network*», IEEE Trans. Electr. Insul, vol 27, N° 3, pp. 550-556, 1992.
- [24] F.JOMNI, «*Etude Des Phénomènes Hydrodynamiques Engendrés Dans Les Liquides Diélectriques Par Un Champ Electrique Intense*», thèse de l'université Joseph Fourier, Grenoble, 1997.
- [25] E.GULSKI et F.H KREUGER, «*Computer aided recognition of discharge sources*», IEEE Trans. Electr. Insul., Vol 27, N°, 1pp. 82-92, 1992.
- [26] A.KRIVDA, «*Recognition of discharges discrimination and classification*», these, delft university press, 1995.
- [27] A.A.MAZROUA, «*Discrimination between PD pulse shapes using different network paradigms*», IEEE trans, diel electr, insul, vol; 1, N°6, pp.1119-1131, 1994.
- [28] T.HONG, «*Classification by a modular neural network based on task decomposition*», IEEE Trans, diel electr insul, vol 3, n° 2. 1996.
- [29] H.CACHIN, «*Recognition with knowledge-based preprocessing and neural networks*», IEEE Trans. Diel electr. Insul, vol 2 N° 4 pp, 578-589, 1995.

Chapitre III

Dispositif Expérimental

Introduction.....	60
III.1 Cellule d'étude et matériaux utilisés	60
III.1.1 Cellule d'étude.....	60
III.1.2 Polypropylène (pp)	61
III.1.3 Jarylec	62
III.2 Description du dispositif expérimental	63
III.2.1 Source de tension.....	64
III.2.2 Cage de faraday.....	64
III.2.3 Caractéristique du mesurer.....	65
III.2.4 Mesure de décharges partielles à basse température	65
III.3 Fonctionnement du mesureur	66
III.3.1 Détection crête de l'impulsion	66
III.3.2 Mesure de l'amplitude et du signe de la décharge.....	67
III.3.3 Temps: numéro du cycle et position dans le cycle de la décharge.....	67
III.3.4 Interface avec l'ordinateur	68
III.4 Logiciels d'acquisition et de traitement des décharges.....	68
III.4.1 Logiciel d'acquisition des décharges partielle.....	68
III. 4.2 Logiciel de traitement de résultats	69
III.5. Dispositif de mesure des impulsions de courant.....	69
III.6. Dispositif de mesure des décharges partielles à froid.....	70
Conclusion.....	70
Références bibliographiques du chapitre III.....	71

Introduction

Les isolants habituellement utilisés en haute tension ne sont jamais parfaitement homogènes. Il existe dans le matériau des cavités de formes et dimensions diverses. Elles sont la cause principale de vieillissement et de destruction des isolations solides à moyen et à long terme. La mesure des décharges partielles est considérée comme un outil très important pour perfectionner la fiabilité des systèmes d'isolation a HT. L'interprétation et l'analyse des grandeurs mesurées constituent la clé pour estimer le risque de défaillance de cette isolation. Quel que soit le mécanisme de détérioration, il en résulte une érosion lente de l'isolant et une réduction considérable de la tension critique de claquage.

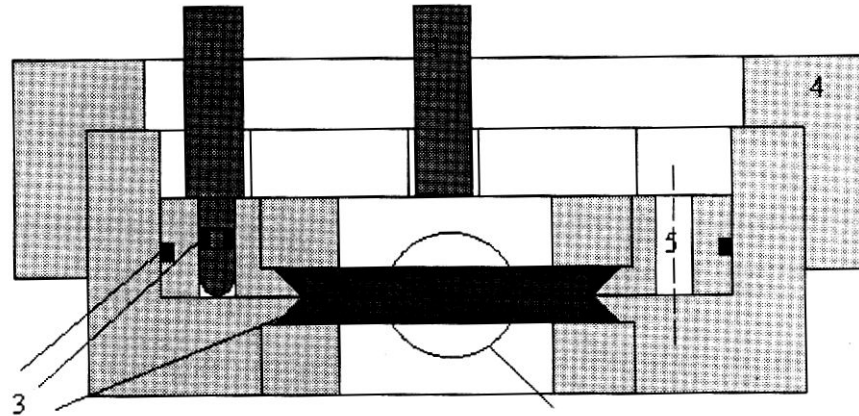
Dans le présent chapitre nous présentons les cellules d'essais, la description du dispositif expérimental ainsi que la méthode de mesure des décharges partielles utilisées durant nos travaux; Les mesures des décharges partielles ont été faites au sein du laboratoire d'électrostatique et de matériaux diélectriques (L.E.M.D) Grenoble, dans le cadre d'une collaboration entre le centre universitaire de Guelma et l'université de Joseph Fourier Grenoble.

Nous consacrons également une partie de ce chapitre à la description des logiciels d'acquisition et de traitement des décharges partielles.

III.1 Cellule d'étude et matériaux utilisés

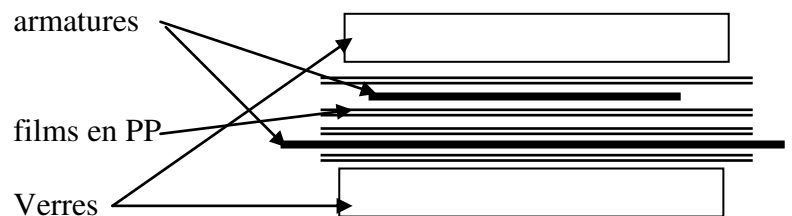
III.1.1 Cellule d'étude

La cellule de mesure réalisée est un modèle de condensateur tout film imprégné; elle est constituée d'un corps en Téflon à l'intérieur duquel 2 rubans d'aluminium sont disposés à 90° et séparés par des films de polypropylène. Les deux rubans d'aluminium ont une largeur comprise entre 8 et 10 mm et une épaisseur de 6 μm et leurs bords sont repliés. Dans le cas le plus fréquent, le diélectrique est constitué de 2 films de polypropylène rugueux de 13.6 μm d'épaisseur pondérale chacun. Le schéma de cette cellule est donné sur la figure III 1. L'ensemble est pressé entre 2 verres afin de rendre possible la visualisation des phénomènes qui se produisent sur les bords d'armatures. Après montage et serrage de la cellule d'étude à sec sa capacité est mesurée, puis on injecte un liquide d'imprégnation qui est le Jarylec C100 utilisé dans les condensateurs de puissance à l'aide d'une seringue, deux heures après, on mesure de nouveau sa capacité puis elle est prête à l'exploitation.



(a) vue en coupe transversale

- 1 : Electrode en laiton
- 2 : Verres
- 3 : Joints en viton
- 4 : Corps de la cellule en ertalon
- 5 : Trou de remplissage



(b) vue de dessus

Figure III.1 : schéma de la cellule d'étude avec : (a) vue en coupe et (b) vue de dessus

III.1.2 Polypropylène (pp)

Le polypropylène (ou polypropène) isotactique, de sigle PP (ou PPI) et de formule chimique $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n$, est un polymère thermoplastique semi-cristallin de grande consommation. Comportant un taux réduit de forme atactique et un faible taux d'impuretés minérales (environ 50 mg/kg),.

Il peut être utilisé en permanence à 100°C et pendant de courte période à 120°C. Un film rugueux est livré, sous des épaisseurs comprises entre 7 et 18 μm afin de faciliter leur imprégnation. [1]

Les propriétés électriques du polypropylène sont résumées dans le tableau II.1 :

		20 C°	100 C°	
Permittivité relative ξ	50 H Z	2.20	2.15	ne varie pas avec la Fréquence
	1 M H Z	2.20	2.15	
Angle de perte Tang δ	50 H Z	$\leq 2.10^{-4}$	$\leq 2.10^{-4}$	ne varie pas avec la fréquence
	1 M H Z	$\leq 2.10^{-4}$	$\leq 3.10^{-4}$	
Résistivité volumique ($\Omega.cm$)		$>10^{17}$	$>10^{16}$	
Rigidité diélectrique	560V/ μm			
Température de fusion ($^{\circ}C$)	160 à 170			
Température de ramollissement Vicat pour 1 KG ($^{\circ}c$)	150 à 155			
Masse volumique ($g.cm^3$)	0.905			
Conductivité thermique ($w.m^{-1}.k^{-1}$)	0.22			

Tableau III.1 : propriétés du polypropylène [2,3,4].

III.1.3 Jarylec

C'est un mélange de mono-benzyltoluène (environ 65 %) de formule chimique $C_{14}H_{14}$ et de di-benzyltoluène de formule chimique $C_{21}H_{20}$, il y a également des traces de tri-benzyltoluène.

Ce liquide est non polaire, sa permittivité relative est de 2.67 à 20°C voisine de celle du polypropylène, il présente une répartition uniforme des contraintes électriques dans le film et dans la couche liquide placée en séries ainsi un faible niveau de pertes; les impuretés ioniques ne peuvent se dissocier que très difficilement dans ce liquide.

Les propriétés essentielles de ce liquide d'imprégnation sont résumées dans le tableau III.2:

PROPRIETES ELECTRIQUES		PROPRIETES PHYSIQUES	
Propriété	La Valeur Moyenne	Propriété	La Valeur Moyenne
Permittivité relative ξ_r à 20° c	2.67	Masse (g.cm ⁻³) volumique à 20°c	1,0
Angle de perte (Tang δ) 50 Hz et -100°C	< 4.10 ⁻³	Viscosité cinématique (mm ² /sec) -30°C 20°C 50°C	100 6,5 2,8
Résistivité volumique (Ω .cm) à 100° C	> 10 ¹⁴	Point d'écoulement (°C)	< -50
Tension de claquage (kv) 25°c	> 70	La pression de vapeur (mmHg) à 20°C 100°C 200°C	1,5 x 10 ⁻³ 1.0 75
Taux de gassing d'H ₂ (cm ³ /h)	2.3	Point éclair (°C)	144

Tableau III.2 : Propriétés du Jarylec [6, 5]

III.2 Description du dispositif expérimental

Nous avons effectué des mesures des décharges partielles sur un dispositif expérimental qui utilise les manifestations électriques des décharges partielles. Lorsqu'une décharge partielle apparaît dans la cellule d'étude, un courant apparent circule dans le circuit externe, l'activité de la décharge partielle s'accompagne également d'une émission de lumière.

L'ensemble du dispositif est schématisé sur la figure III.2 comprend :

1. Une source de haute tension alternative.
2. Une cage de faraday.
3. Un ensemble de détection et de mesure de D.P.

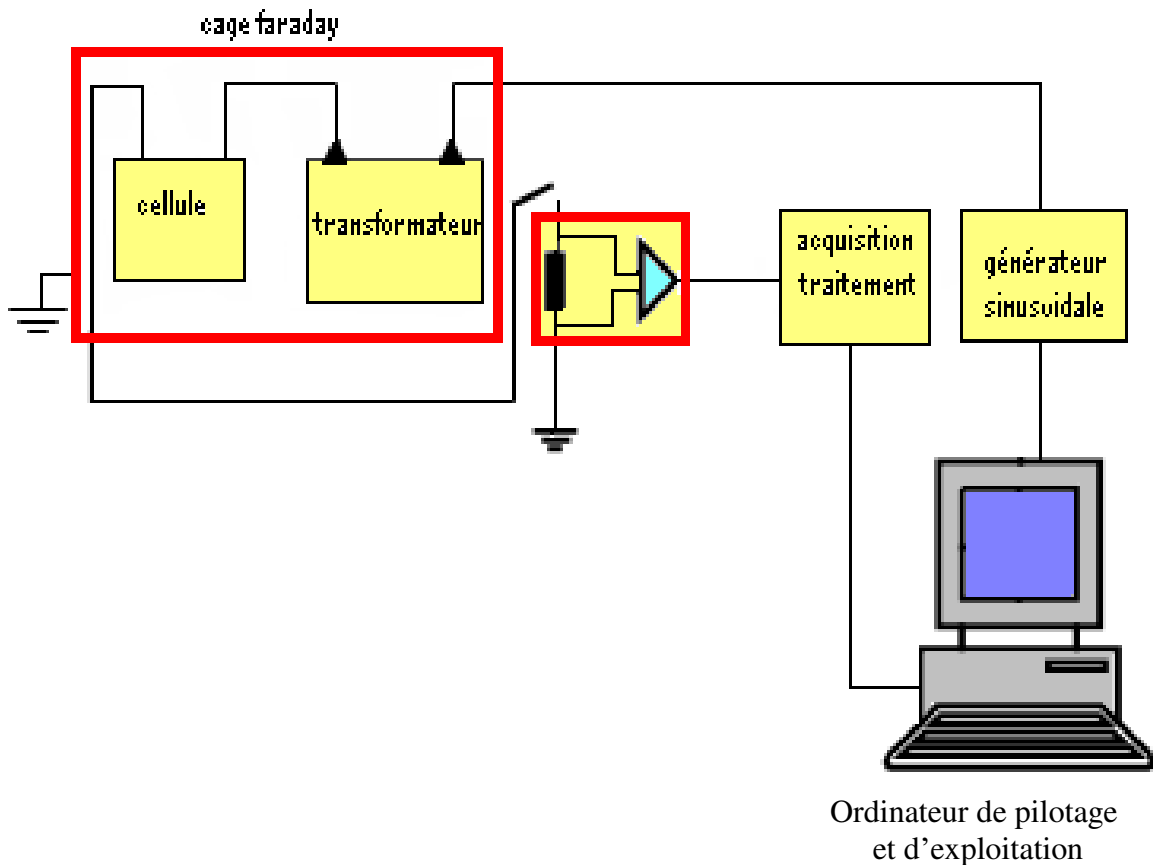


Figure III.2 : schéma synoptique du dispositif expérimental

III.2.1 Source de tension

Un générateur numérique de tension alternative sinusoïdale de fréquence variable (25 à 100 Hz) et d'amplitude variable commandée par un micro-ordinateur de type P.C. alimente le primaire d'un transformateur élévateur de tension (100 VA, 20 kV). La valeur efficace de la tension au secondaire est volontairement limitée à 12,5 kV_{eff} afin d'éviter les décharges partielles dans le transformateur.

III.2.2 Cage de faraday

Le dispositif de détection et de mesure de D.P. à 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.

La cage de faraday est composée de deux compartiments distincts le transformateur est placé dans un des deux compartiments, la cellule d'étude est placée à l'intérieur de l'autre compartiment, une des bornes de la cellule est connectée à la sortie H.T. du transformateur.

La seconde borne est reliée à une prise sur laquelle on branche la tête de mesure du système de détection des DP. Un soin particulier est apporté dans la réalisation de la connexion électrique reliée à la haute tension afin d'éviter les décharges parasites dues aux effets de pointe. Un diviseur capacitif sur le secondaire du transformateur permet de contrôler la valeur de la tension appliquée.

III.2.3 Caractéristique du mesureur

La sensibilité de mesure de notre dispositif dépend de la capacité de la cellule d'étude. Pour une sensibilité donnée, la chaîne de mesure a une dynamique de 32 dB. Par exemple, pour la sensibilité maximum, l'appareil mesurera des décharges dans un intervalle $[0,05 \div 2 \text{ pC}]$.

Pour la sensibilité minimum, cet intervalle est $[50-2000 \text{ pC}]$. Il est ainsi possible, en faisant varier la sensibilité de mesure lors d'un essai, d'effectuer des mesures sur une plage d'environ 92 dB.

La durée minimum entre deux décharges successives est de 330 ns. Lorsqu'une impulsion est détectée, son amplitude, sa polarité ainsi que l'instant de son apparition sont mesurés. Ce qui permet de déduire la phase de la décharge, c.à.d. sa position sur l'onde de tension qui est divisée en $65536=2^{16}$ intervalles de même longueur.

III.2.4 Mesure de décharges partielles à basse température

La cellule d'étude est placée dans une étuve thermostatée qui atteint des températures jusqu'à $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, cette étuve comprend une fonction séchage qui permet d'éviter la formation de givre à basse température. La cellule d'étude est placée dans une boîte métallique servant de cage de faraday placée à l'intérieur de l'étuve. Le câble blindé qui relie la sortie du transformateur à la cellule de mesure dans l'étuve a été spécialement conçu pour ne pas présenter de décharges supérieures à 0,05 pC aux tensions inférieures à $5 \text{ kV}_{\text{eff}}$. La tête de mesure est branchée, par l'intermédiaire d'une connexion usinée sur la boîte métallique, à la cellule d'étude.

III.3. Fonctionnement du mesureur

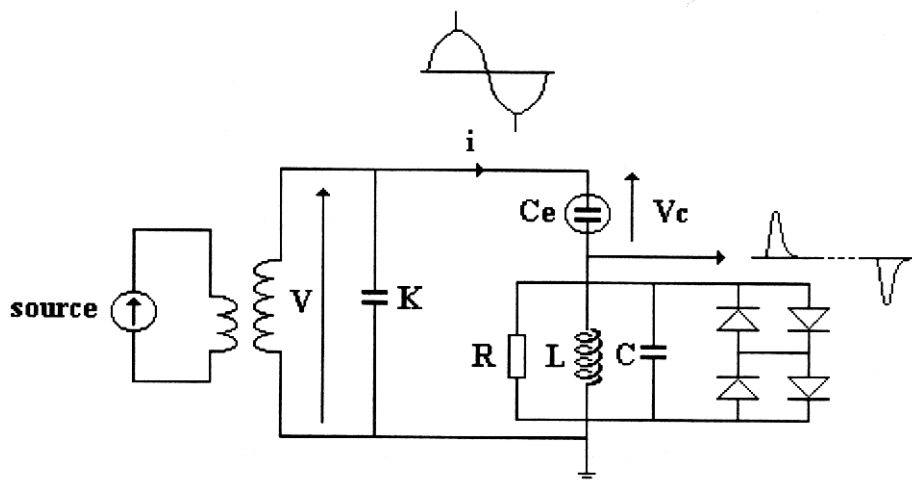


Figure III.3 : Impédance de mesure du détecteur de D.P.
(K: Capacité de couplage de 80 pF),

L'impédance d'entrée de la tête de mesure (R/L/C) avec $R = 100 \Omega$; $L = 100 \mu\text{H}$ et $C = 400\mu\text{F}$, supprime la composante basse fréquence du courant i .

Les impulsions de courant sont intégrées par le condensateur C de la tête de mesure, elles sont fortement amorties ($RC=40 \text{ ns}$). La durée du pic de courant réel est bien inférieure à cette constante de temps, ce qui signifie que lorsque le condensateur de la tête de mesure commence à se décharger, il a déjà acquis la totalité de la charge de la D.P.

Quatre diodes de type IN4148 montées 2 à 2 parallèles, tête - bêche, sont placées aux bornes de l'impédance de mesure afin de protéger la chaîne de mesure d'éventuelles décharges trop intenses.

Le signal est injecté à l'entrée d'un amplificateur, large bande, faible distorsion, au gain variable (80 dB maximum) et à faible bruit (densité spectrale du bruit: 1.4 nV/Hz soit : 2.4.μV à 3 MHz, ce qui donne un niveau de bruit à l'entrée de 24 nA car l'impédance d'entrée est de 100 Ω). Le réglage de la sensibilité de mesure se fait par l'intermédiaire du clavier de l'ordinateur.

III.3.1 Détection crête de l'impulsion

Le signal est mis en forme par un amplificateur logarithmique (gain élevé et large bande: 120 MHz) qui fournit en sortie, un signal proportionnel au logarithme de la valeur absolue du

signal d'entrée. Cette opération permet de compresser l'amplitude des signaux afin d'en réduire la gamme de variation et faciliter la détection de leur valeur crête..

Après sa mise en forme, l'impulsion passe par un dérivateur suivi d'un comparateur à zéro, ce qui permet de détecter avec précision le passage par zéro de la dérivée du signal.

Lorsque le pic est détecté, une impulsion est envoyée vers une bascule qui transmet l'ordre de début de conversion à un convertisseur analogique/numérique (CAN) 10 bits. La fréquence de ce convertisseur est de 18 MHz soit un temps d'échantillonnage de 56 ns.

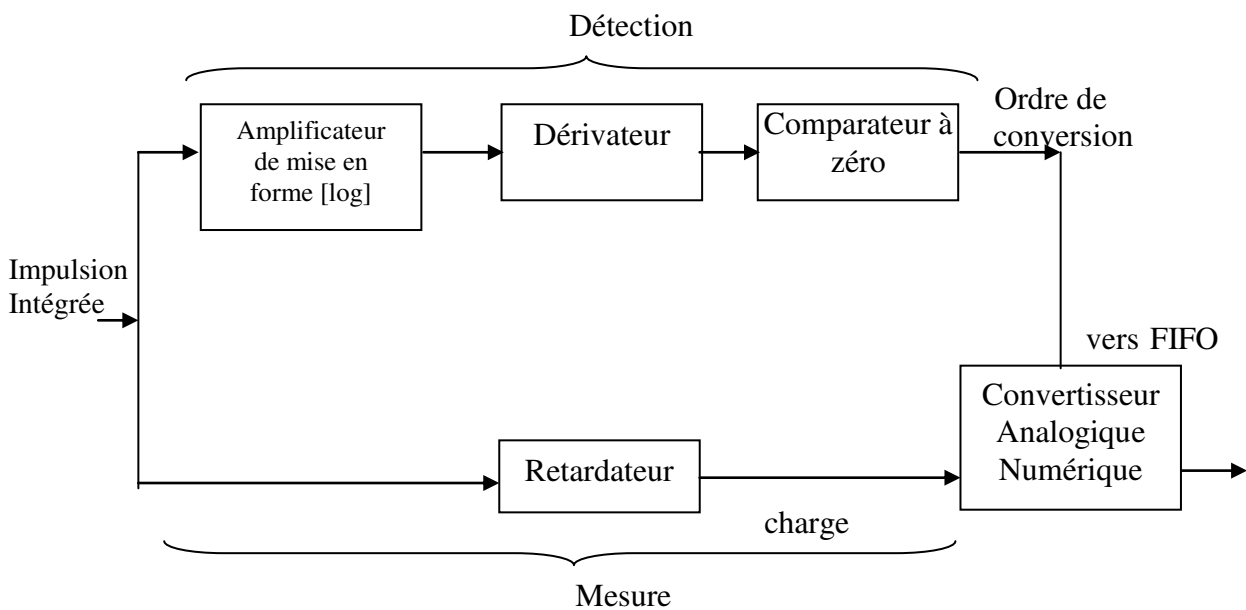


Figure III.4 : Détection d'une décharge partielle et mesure de son amplitude

III 3.2 Mesure de l'amplitude et du signe de la décharge

Le signal impulsionnel intégré issu de la tête de mesure passe par un circuit retardateur, ce qui permet de faire coïncider l'arrivée de l'information à l'entrée du CAN avec la réception de l'ordre du début de conversion. Une entrée du convertisseur est attaquée par le signal retardé. 9 bits sont réservés à l'intensité de la décharge (ce qui fait 2^9 , soit 512 niveaux pour la valeur absolue de la charge), Le dixième bit est réservé au signe de la décharge.

Des potentiomètres permettent de régler la symétrie de mesure entre les décharges positives et les décharges négatives.

III 3.3 Temps: numéro du cycle et position dans le cycle de la décharge

L'horloge de l'oscillateur a une fréquence de 19.8 Mhz; celle-ci est divisée et ensuite va servir à incrémenter deux compteurs placés en boucle (un pour le n° de cycle, l'autre pour le n° de

position dans le cycle). Lorsqu'une impulsion est détectée, un signal est envoyé afin de déclencher l'enregistrement de la position des compteurs dans une mémoire FIFO à l'instant de détection.

III.3.4 Interface avec l'ordinateur

Les informations en sortie du CAN sont transmises vers une mémoire tampon FIFO pouvant contenir jusqu'à 4000 décharges, chaque décharge est repartie sur 13 bits (9+1 pour la charge 1 bit pour les dépassements éventuels, 1 bit pour les décharges intermédiaire, 1 bit pour les surtensions).

Le contenu des FIFO est transmis vers le micro-ordinateur, les informations sont alors présentées sous forme de tableaux. (tableau III.3).

III.4 Logiciels d'acquisition et de traitement des décharges

III.4.1 Logiciel d'acquisition des décharges partielles

Le logiciel d'acquisition des décharges partielles permet de sélectionner les paramètres d'une expérience : tension appliquée, fréquence de l'onde de tension, sensibilité de mesure, durée d'acquisition.

La tension appliquée lors de l'acquisition peut être choisie directement lors de la sélection des paramètres de l'expérience. On peut également augmenter manuellement la tension à partir de zéro par palier de 50 V. Avant chaque acquisition, on effectue une calibration de la charge en injectant aux bornes de la cellule d'étude une charge connue ($\pm 5\text{pC}$) donnée avec une fréquence de 3.7 kHz par un générateur de décharges appelé calibrateur.

L'acquisition se termine lorsque 4000 décharges ont été enregistrées ou si la durée d'acquisition initialement choisie a été atteinte.

La tension appliquée peut contenir des surtensions dont la durée (par nombre de périodes), la périodicité et l'amplitude (en Volts) sont choisies.

Lors d'un claquage, l'appel de courant qui en résulte provoque la coupure de l'alimentation en tension de la cellule d'essai, l'acquisition est alors arrêtée.

Les résultats bruts d'une acquisition se présentent sous forme d'un tableau (Tab III.3) qui donne pour chaque décharge, le numéro de la décharge de (0 à 3999 maximum), le numéro du cycle où la décharge se produit ainsi que sa position dans ce cycle donné par le numéro du canal correspondant (chaque cycle est divisé en 65536 canaux). La sortie du CAN, la charge apparente de la décharge avec son signe. Le tableau nous indique si une décharge a lieu lors

d'une période de sur-tension ou si son intensité est supérieure à la gamme de mesure prédéfinie. Il nous renseigne également sur la présence de décharges intermédiaires non prises en compte car apparaissant entre deux décharges trop rapprochées.

N°	N° cycle	N° position	Charge PC	Tension V	Sous tension	Saturations	D .int
0	16357	13291	9.96	10279	0	0	0
1	16357	13293	1.91	10280	0	0	0
2	16556	12034	5.32	9827	0	0	1
3	16621	13704	2.06	10395	0	0	0
4	16683	13248	6.52	10266	0	0	0
5	16694	14594	1.41	10590	0	0	0
6	16694	14597	3.82	10591	0	0	1
7	16825	46694	-6.31	-10451	0	0	1
8	16858	14325	11.95	10539	0	0	0
9	16903	15121	3.11	10669	0	0	1
10	16936	12649	5.17	10066	0	0	0
11	16983	15516	2.56	10711	0	0	0
12	16984	15164	12.72	10675	0	0	0
13	17017	11100	5.61	9398	0	0	0
14	17044	15800	3.35	10731	0	0	0
15	17044	15806	13.92	10732	0	0	0

Tableau III.3: extrait d'un fichier de résultats bruts d'une acquisition de décharge partielle

III. 4.2 Logiciel de traitement des résultats

Les résultats sont traités à l'aide d'un logiciel qui permet de calculer pour chaque polarité, les grandeurs telles que la charge moyenne, l'énergie, la puissance, le débit quadratique des décharges et le courant moyen.

Le logiciel permet des sorties graphiques de l'évolution en fonction du temps de la charge apparente $q(t)$, de la charge cumulée par cycle $q_c(t)$ ainsi que la tension d'apparition par décharge $v_{inc}(t)$.

Il permet aussi de calculer les paramètres statistiques pour chaque distribution, les détails sur l'utilisation de ce logiciel seront examinés dans le chapitre suivant.

III.5. Dispositif de mesure des impulsions de courant

Le système de détection électrique comprend un montage de visualisation directe des impulsions de courant comportant une résistance de mesure, un amplificateur de courant de gain 50 et un oscilloscope numérique très rapide HP 54542 C ayant une bande de 500 MHz, une fréquence d'échantillonnage de 2 Géch/s sur 4 voies.

III.6. Dispositif de mesure des décharges partielles à froid

Il contient une étuve thermostatée qui atteint des températures jusqu'à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette étuve comprend une fonction séchage qui permet d'éviter la formation de givre à basse température. La cellule d'étude est placée dans une boîte métallique servant de cage faraday placée à l'intérieur de l'étuve. Le câble blindé qui relie la sortie HT du transformateur à la cellule de mesure dans l'étuve a été spécialement conçu pour éliminer les décharges supérieures à $0,05\text{ Pc}$ lors des tensions inférieures à 5kV_{eff} . La tête de mesure est branchée à la cellule d'étude par l'intermédiaire d'une connexion usinée sur la boîte métallique.

Conclusion

La technique de mesure des décharges partielles dans les condensateurs tout film imprégné est une technique simple, très riche en résultats et d'informations. Pour mieux étudier le phénomène de décharges partielles, nous avons eu recours à un modèle de laboratoire (à surface plane) qui nous a permis de simuler le comportement des condensateurs. Plusieurs essais ont été effectués sur ce modèle dont la tension de contournement, la mesure de l'activité des décharges partielles en surface des isolants et la tension de claquage diélectrique avec la variation de la température, qui est un des paramètres les plus importants à considérer pour le vieillissement des matériaux isolants.

Références bibliographiques du chapitre III

- [1] E.MARK, « *Properties of Polymer Handbook* », *Physical*, 2^e éd, 1076p. (ISBN 0387690026), p. 294, Springer, 2007.
- [2] E.SEBILLOTE, « *Dégradation Sous Champ Electrique Alternatif Du Polypropylène Imprégné* », Influence des oxydes Thèse de doctorat, Grenoble, 2015.
- [3] S. FÜZESSERY, « *Polypropylènes* », techniques de l'ingénieur AM2, A3, 320, pp 1.15. 1991.
- [4] B.SEQUIN, « *Les Pertes Dans Les Condensateurs Bobinés Utilisés En Electronique De Puissance* », thèse de doctorat, 1997.
- [5] Technical information, Ugilec Clol, Prodelec, Septembre 2015.
- [6] N. BERGER et P. JAY « *Impregnant Polypropylene Interaction In The All-Film Capacitor Configuration* », IEEE. Trans. On elect. Insult, Vol. 22. N°4. August 1987.

Chapitre IV

Résultats Expérimentaux Et Interprétations Des Résultats

Introduction.....	73
IV.1 Protocole expérimental	73
IV.2 Mesure des décharges partielles	74
IV.2.1 Tension d'apparition de la décharge partielle (TADP)	74
IV.2.2 Evolution des décharges partielles en fonction de la tension appliquée	74
IV.2.2.1 Description générale des phénomènes observés	74
IV.2.2.2 Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures	75
IV.2.2.3 Evolution de la charge moyenne de décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures.....	76
IV.2.2.4 Evolution de l'énergie de décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures.....	77
IV.2.3 Evolution des décharges partielles en fonction de la température	78
IV.2.3.1 Evolution de la fréquence en fonction de la température pour deux tensions.....	78
IV.2.3.2 Evolution de la charge moyenne en fonction de la température pour deux tensions	78
IV.2.3.3 Evolution de l'énergie en fonction de la température pour deux tensions.....	79
IV.3 Distribution des décharges et paramètres statistiques	80
IV.3.1 Distribution des décharges	80
IV.3.1.1 Distribution des décharges $n(\Phi)$, $Q_{moy}(\Phi)$	81
IV.3.2 Distribution de la décharges la plus probable $P(\Phi)$	82
IV.4 Synthèse	83
Conclusion.....	83
Références bibliographiques du chapitre IV.....	84

Introduction

Nous appelons « un modèle de condensateur sans défaut » un condensateur plan de faible capacité (de 50 à 100 pf) dépourvu de toute anomalie qui pourrait provoquer un renforcement du champ électrique ou une baisse de la rigidité diélectrique du milieu. Cette anomalie aurait alors pour conséquence une tension d'apparition des décharges partielles plus faible.

Ce chapitre est consacré à l'étude des décharges partielles qui apparaissent dans un modèle de condensateur sans défauts qui est un modèle symétrique avec des armatures de même épaisseur (6 μm) dont les extrémités sont repliées.

Nous avons déterminé la tension d'apparition des décharges, l'évolution en fonction de la tension appliquée de certaines grandeurs telles que la fréquence ou l'amplitude des décharges, l'allure des distributions des décharges en fonction de la température.

IV.1 Protocole expérimental

Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus avec la cellule « modèle de condensateur tout film » décrite dans le chapitre III.

La tension est augmentée progressivement par paliers. Les acquisitions sont effectuées durant chaque palier alors que la tension est maintenue constante. Une acquisition de 5 mn si le nombre maximum de 4000 décharges n'est pas atteint. Sinon, à la fin de l'acquisition, la tension est maintenue constante jusqu'à épuisement de la durée (5 mn).

Pour la basse température la cellule d'essai est refroidie pendant 24 heures dans une étuve, l'alimentation en tension se fait par l'intermédiaire d'un câble blindé issu de la cage de Faraday.

Pour une température donnée, on applique une tension croissante par palier d'environ 50 V/s jusqu'au seuil de l'apparition de décharges. Pour un niveau de tension, on procède à l'acquisition de décharges partielles pendant 5 mn, le prochain palier se situe à 200 V au-dessus de la T.A.D.P. On continue l'augmentation de la tension jusqu'à une valeur voisine de la tension de claquage.

Nous avons remarqué que la valeur de la tension d'apparition des décharges partielles (TADP) mesurée à différentes températures est pratiquement identique et se situe autour de 5000 V. L'apparition des décharges partielles est aléatoire c'est à dire que l'origine de l'impulsion n'est pas identifiée. Le régime de décharge est très variable dans le temps et en fonction de la tension.

IV. 2 Mesure des décharges partielles

IV.2.1 Tension d'apparition de la décharge partielle (TADP)

La tension d'apparition des décharges partielles déduite à partir du critère fréquentiel de plus d'une décharge par seconde vaut :

$$\text{TADP} = 5 \pm 0.2 \text{ kV}_{\text{eff}}$$

Le champ seuil d'apparition des décharges partielles est évalué à partir de l'expression suivante :

$$E_s = \frac{V_s}{d} \sqrt{\frac{d}{a}} \sqrt{\frac{\epsilon_{pp}}{\epsilon_l}} \quad (\text{IV-1})$$

V_s : La tension seuil ou TADP (en volt crête) ;

a : $12 \pm 1 \mu\text{m}$ est l'épaisseur du métal ;

d : Epaisseur du diélectrique ;

ϵ_{pp} : Permittivité relative du polypropylène soit 2.2 ;

ϵ_l : Permittivité relative du Jarylec, soit 2.66.

Dans le tableau IV.1, nous représentons les valeurs des différentes : tension d'apparition des décharges partielles, tension de transition et tension de claquage pour différentes températures. Nous remarquons que la T.A.D.P est constante pour toute la gamme de température, nous constatons aussi que la tension de transition et la tension de claquage diminuent avec la diminution de la température, cela est probablement dû à la diminution de la rigidité diélectrique des matériaux isolants.

T°(C)	TADP (V)	U transition (V)	U claquage (V)
28°	5000	7600	7800
0°	5000	7600	7800
-28°	5000	7000	7200

Tableau IV.1 : Valeurs des tensions T.A.D.P , tension de transition et tension de claquage à différentes températures

IV.2.2 Evolution des décharges partielles en fonction de la tension appliquée

IV.2.2.1 Description générale des phénomènes observés

On observe deux régimes différents de décharges partielles suivant la tension appliquée :

- **1^{er} régime**

Lorsque la tension appliquée est proche d'une valeur seuil dépendant de l'épaisseur du diélectrique ($5.6 \text{ kV}_{\text{eff}}$), les décharges apparaissent de manière désordonnée dans la phase de la tension et avec un taux de répétition très faible. Ces décharges ne sont pas prises en compte car elles disparaissent rapidement si la tension est maintenue constante. Puis lorsqu'on dépasse ce seuil de tension, les décharges deviennent plus régulières et apparaissent de manière corrélée avec la phase de la tension appliquée négative, elles sont situées entre 180° et 270° de la phase de la tension alors que les décharges positives sont localisées entre 0° et 90° . Le nombre de décharges positives est égal au nombre de décharges négatives avec parfois des écarts allant de $1/3$ à 3 . Ces décharges sont stables dans le temps et ne conduisent pas au calquage même après des temps très longs. Si la tension est abaissée, la disparition de ces décharges a lieu à la même tension que leur apparition. Ces décharges constituent ce que nous appelons le premier régime des décharges.

- **2^{ème} régime**

Si on augmente encore la tension appliquée, on observe à partir d'un second seuil (7.2 kV), l'illumination totale des bords d'armature. On enregistre des décharges d'un second type, caractérisées par des fortes intensités et une symétrie en nombre et en amplitude entre décharges positives et décharges négatives. Elles apparaissent de manière nettement plus décalée vers la gauche dans la phase de la tension que les décharges du 1^{er} régime. Ces décharges du second régime sont très nuisibles. Elles provoquent le claquage de la cellule au maximum quelques minutes après leur apparition.

IV.2.2.2 Evolution de la fréquence des décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures

Figure IV-1 montre l'évolution de la fréquence moyenne des décharges en fonctions de la tension appliquée. La fréquence moyenne de ces décharges est le rapport entre le nombre de décharges mesurées sur la durée d'acquisition.

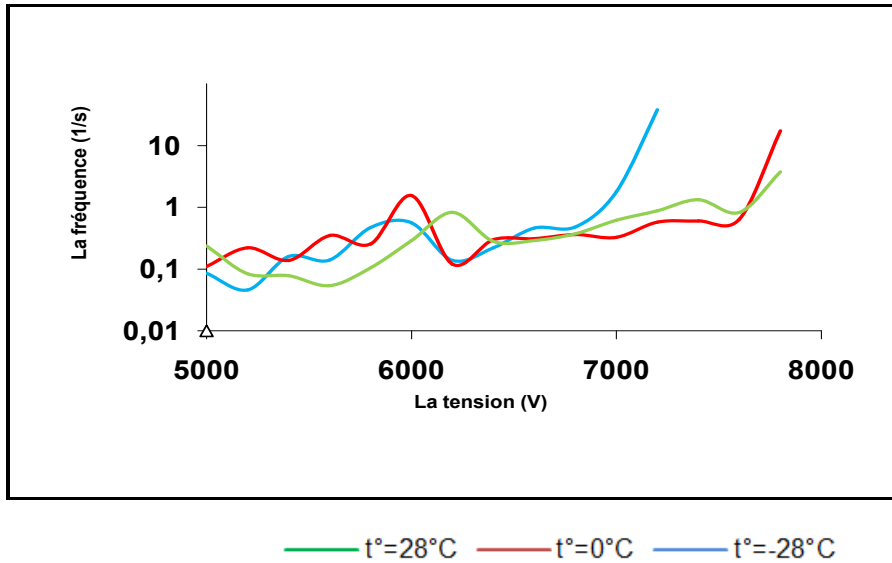


Figure IV.1 : Evolution de la fréquence en fonction de la tension à différentes températures

Le premier régime s'étend de $V = 5 \text{ kV}$ à $V = 7.6 \text{ kV}$ pour les températures 28°C et 0°C , et $V = 5 \text{ kV}$ et $V = 7 \text{ kV}$ à 7.2 kV pour la température -28°C . Une transition s'opère à $V=7.6 \text{ kV}$ pour les températures 28°C et 0°C et $V=7$ à 7.2 kV pour les températures -28°C . La fréquence y multipliée par environ 700 au-delà, les fréquences sont de quelques dizaines de kHz. Le claquage survient entre 7.8 kV à la température 28°C et 7.2 kV à la température -28°C .

IV.2.2.3 Evolution de la charge moyenne de décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures

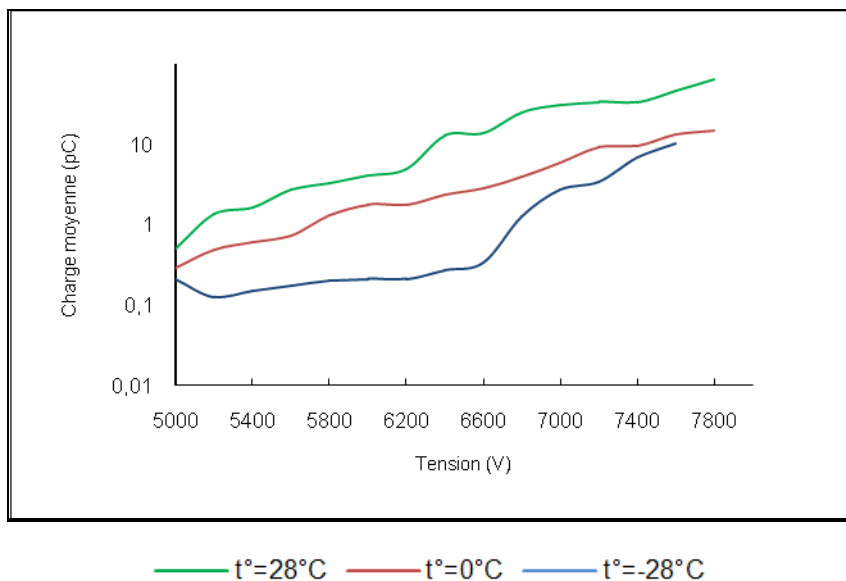


Figure IV.2 : Variation de la charge moyenne en fonction de la tension à différentes températures

La figure IV.2 montre l'évolution de la charge moyenne développée par les décharges partielles en fonction de la tension appliquée pour différentes valeurs de température. Les résultats de la comparaison entre ces caractéristiques montrent clairement l'évolution des deux régimes des décharges partielles en fonction de la tension appliquée. La charge moyenne réside à un niveau bas pour les basses températures relativement à celle constatée pour une température de 28 ° C figure IV-2. Des résultats similaires ont été enregistrés par Hammel [1].

Le résultat de comparaison entre ces caractéristiques montre aussi que l'influence de la température sur la charge apparente n'est pas importante; par exemple la charge moyenne passe de : 0.49 pC à 45.76 pC à la température 28°C avec un écart de 45.27 pC; les résultats sont tout à fait en conformité avec la relation de la conductivité de la température.

IV.2.2.4 Evolution de l'énergie de décharges en fonction de la tension appliquée à différentes températures

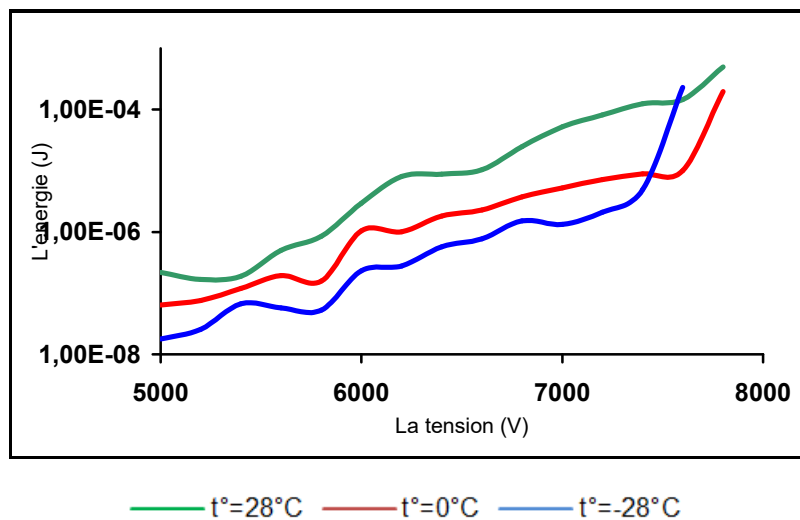


Figure IV.3: Variation de l'énergie en fonction de la tension à différentes températures

Au 1^{er} régime, l'énergie de la décharge passe de 2.18×10^{-4} J (T.A.D.P) à 1.45×10^{-4} J (tension de transition) à la température 28°C et à basse température (-28°C) elle passe de 2.68×10^{-4} J (T.A.D.P) à 7.73×10^{-4} J (tension de transition).

Au deuxième régime, la transition vers le claquage est plus rapide, l'énergie de décharge, passe de 1.45×10^{-4} J (tension de transition) à 4.98×10^{-4} J (au claquage) à la température 28°C et à basse température (-28°C) elle passe de 7.73×10^{-7} J (tension de transition) au 2.91×10^{-6} J (au claquage).

Alors on constate d'après ces résultats l'existence des deux régimes de décharges pour toute la gamme de la température, et qu'au fur et à mesure qu'on augmente la tension, l'énergie enregistrée augmente progressivement.

IV.2.3 Evolution des décharges partielles en fonction de la température

Nous avons analysé l'influence de la température sur la fréquence et la charge apparente moyenne pour les deux régimes au niveau de la tension d'apparition des décharges (T.A.D.P) et le second à la tension du claquage (Uclaquage).

IV.2.3.1 Evolution de la fréquence en fonction de la température pour deux tensions

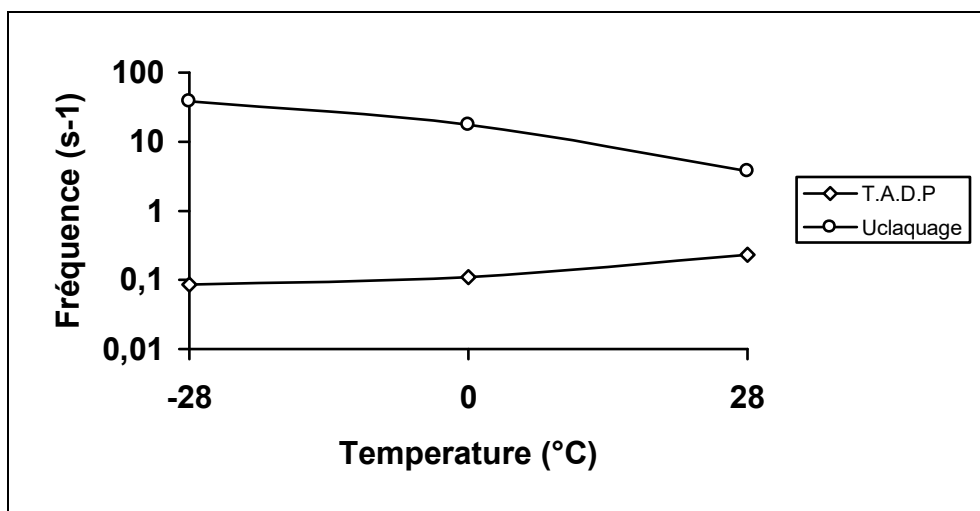


Figure IV.4: Variation de la fréquence en fonction de la température à la tension
 - T.A.D.P
 - Uclaquage

La figure IV-4 nous montre la variation de la fréquence en fonction de la température pour deux tensions différentes nous remarquons que la fréquence des décharges partielles augmente considérablement lorsque la température diminue, elle varie $38,68 \text{ s}^{-1}$ à la température de -28 °C à $3,75 \text{ s}^{-1}$ à température 28 °C . De façon similaire, il ya quelques proportionnalités entre la fréquence et la tension selon la température.

IV.2.3.2 Evolution de la charge moyenne en fonction de la température pour deux tensions

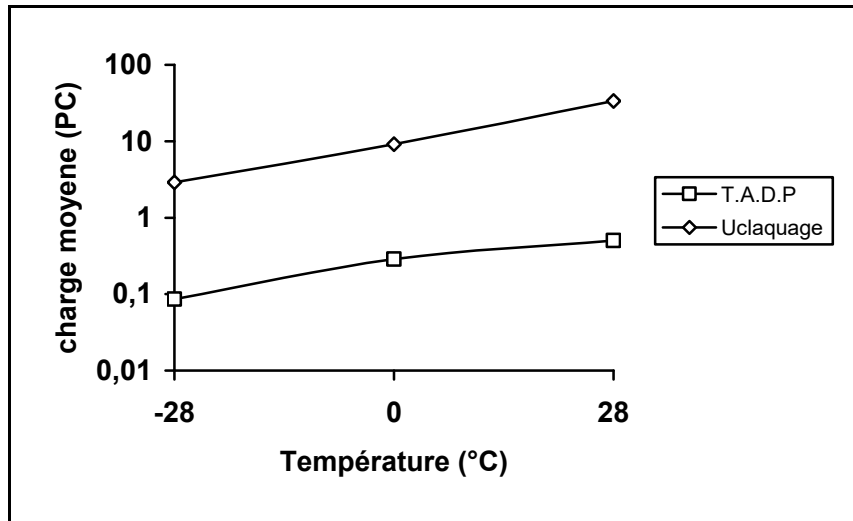


Figure IV.5 : Variation de la charge moyenne en fonction de la température à la tension : T.A.D.P & Uclaquage

La figure IV.5 nous montre la variation de la charge moyenne, en fonction de la température lorsque la tension est maintenue constante. La charge moyenne diminue en diminuant la température. Par ailleurs, la variation de la charge moyenne dépend de la tension appliquée. Elle passe de 5.98 pC à la température -28°C à 65.04 pC à la température 28°C au second régime.

On constate que la charge moyenne est fortement corrélée avec la température avec un coefficient de corrélation de l'ordre 0.97 au second régime.

IV.2.3.3 Evolution de l'énergie en fonction de la température pour deux tensions

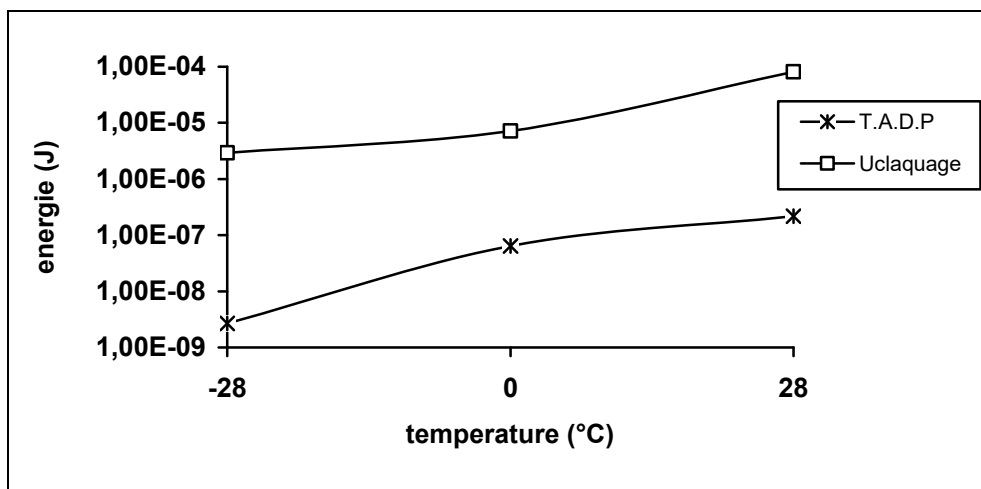


Figure IV.6: Variation de l'énergie en fonction de la température à la tension :
 - T.A.D.P - Uclaquage

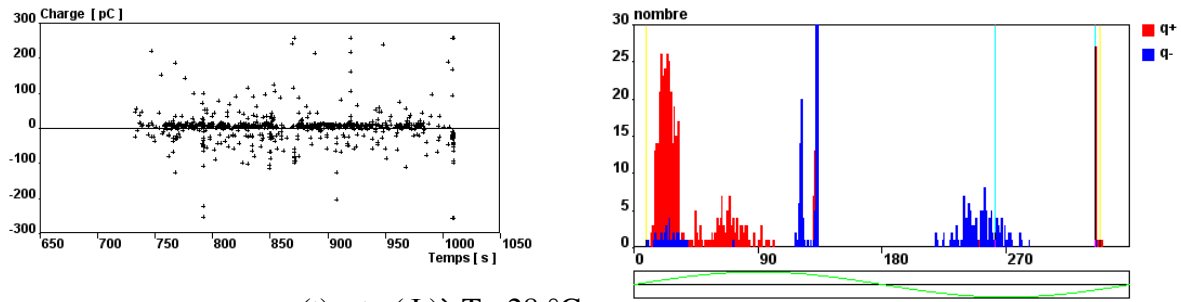
Nos résultats montrent qu'il existe une forte corrélation entre l'énergie et la température avec un coefficient de corrélation au second régime qui atteint 0.96. On note que l'énergie augmente rapidement avec l'augmentation de la température elle passe de $7.75 \text{ e}^{-7} \text{ J}$ à la température -28°C à $1.45 \text{ e}^{-4} \text{ J}$ à la température 28°C .

IV.3 Distribution des décharges et paramètres statistiques

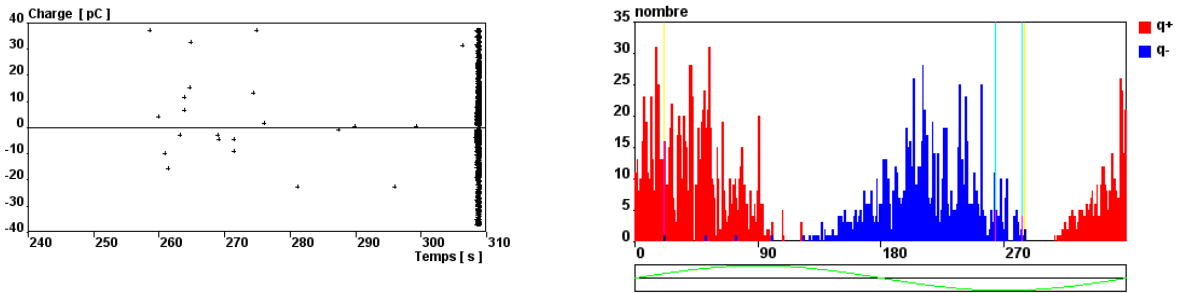
IV.3.1 Distribution des décharges

Nous avons enregistré les distribution $n(\Phi)$, $Q_{\text{moy}}(\Phi)$ et $P_0(\Phi)$ pour les deux régimes de décharges. Compte tenu de la symétrie présentée par la géométrie du modèle, dans chacune des demi-périodes, on enregistre les décharges négatives sur l'une des électrodes et des décharges positives se produisant sur l'autre. Ces distributions sur la $\frac{1}{2}$ période positive et la $\frac{1}{2}$ période négative de la tension doivent donc être semblables quelque soit la tension, ce qui est effectivement observé. Ces distributions qui englobent les phénomènes sur les deux électrodes sont données dans nos travaux effectués précédemment [3,4,5].

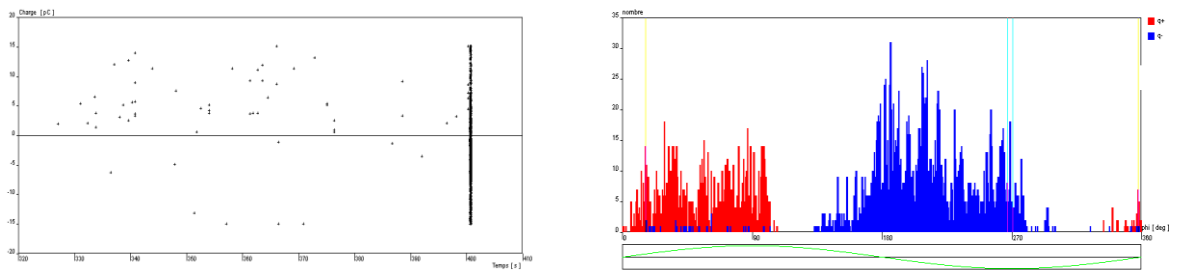
IV.3.1.1 Distribution des décharges $n(\Phi)$, $Q_{moy}(\Phi)$



$q(t)$ et $n(\Phi)$ à $T= 28\text{ }^{\circ}\text{C}$



$q(t)$ et $n(\Phi)$ à $T= 0\text{ }^{\circ}\text{C}$



$q(t)$ et $n(\Phi)$ à $T= -28\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figure IV.7: Evolution de l'allure des décharges pour le 2^{ème} régime à différentes températures

La figure IV.7 représente l'ensemble des décharges enregistrées entre la tension de transition et la tension d'extinction. En effet au 2^{ème} régime, la courbe $q(t)$ montre la présence d'un premier groupe de décharge essentiellement positive suivie d'une rafale de décharges nettement plus intense qui conduit au claquage de la cellule. La distribution $n(\Phi)$ pour toute la gamme de température est similaire pour les décharges du régime 2, c'est la formation d'une bulle de gaz qui provoque l'apparition d'une rafale de décharges qui conduisent au claquage.

IV.3.2 Distribution de la décharges la plus probable $P(\Phi)$

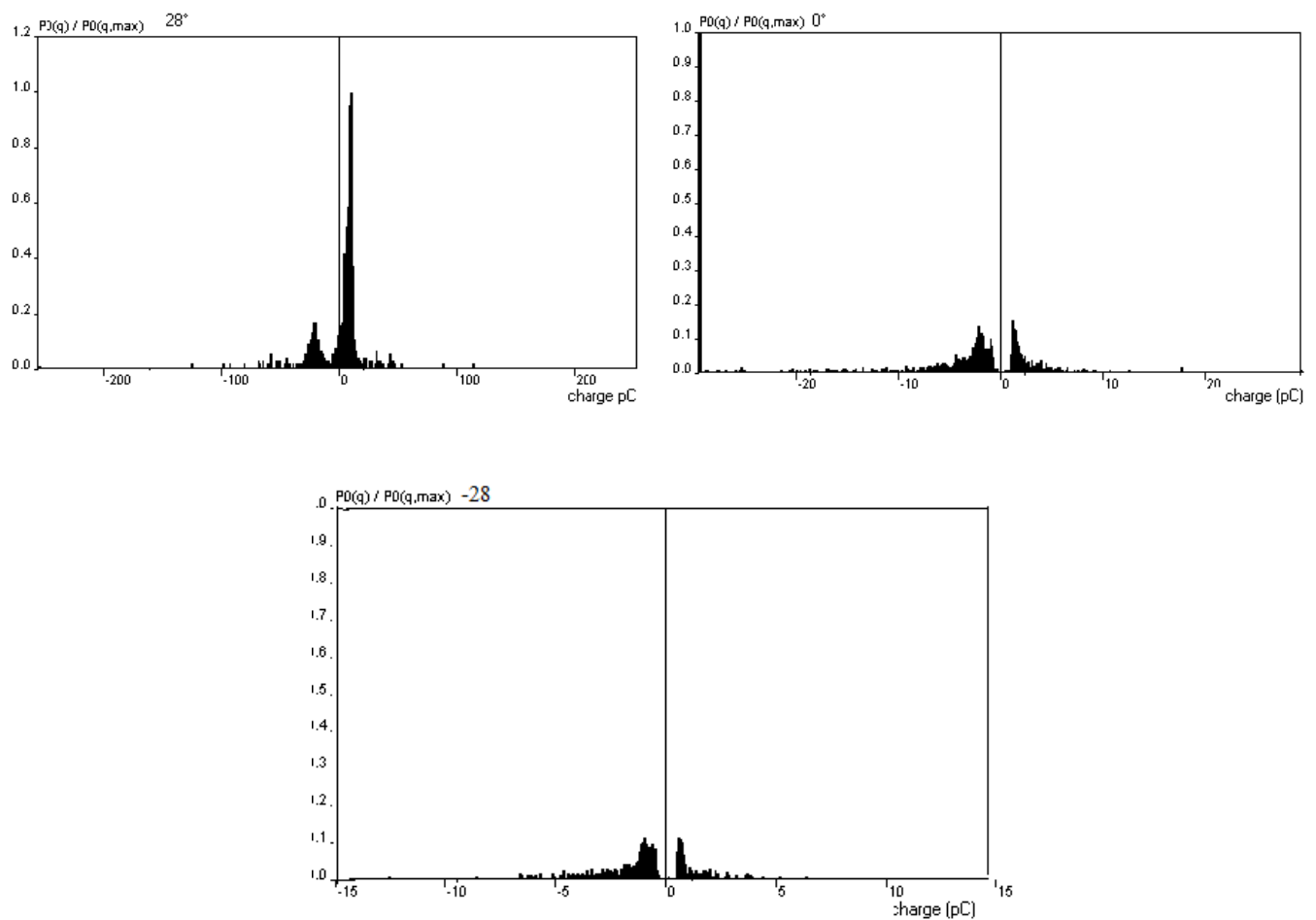


Figure IV.8 : Distribution de la probabilité de la charge des décharges à différentes températures au second régime

La figure IV.8 nous montre la distribution des décharges partielles à différentes températures au 2^{ème} régime, ces distributions permettent de déterminer la valeur de la charge positive et négative la plus probable. Ces dernières sont mentionnées dans le tableau IV-2 On prend par exemple les charges les plus probables positives et négatives à la température 28°C, respectivement, 15 pC et -10 pC. (voir tableau IV-2).

T°C	Charges les plus probables au second régime	
	Q+ pC	Q- pC
28°	15	-10
0°	2.4	-2.9
-28°	2	-3.5

Tableau IV.2: Charges les plus probables au second régime à différentes températures

IV.4 Synthèse

Dans notre modèle d'étude, les tensions seuils des régimes I et II des décharges sont respectivement 5 et 7.8 kV_{eff} pour la température ambiante et 5 et 7.2 kV_{eff} pour la basse température. Ces observations de deux régimes différents de décharge sont similaires à celle faites par Fox et Hamel [2] [1]. Nous attribuons le 1^{er} régime à des avalanches électroniques dans le liquide suivies de la formation de bulles de gaz. Lorsque le liquide près des armatures est saturé en gaz, il apparaît un second régime de décharges se produisant dans les poches de gaz.

Conclusion

Ces résultats montrent que le froid n'a pas d'effet sur l'apparition des premières décharges conséquentes des avalanches électroniques en phase liquide. L'influence commence à se faire sentir lorsque les cavités gazeuses formées par ces avalanches ont leur durée de vie prolongée sous l'effet de l'augmentation de la viscosité du liquide. En effet, la viscosité du jarylec varie fortement avec la température par exemple le rapport entre les viscosités du jarylec à T=-30°C et T=20°C est égal à 13 PRO83 [6].

Notons d'ailleurs que l'influence de la température se traduit par l'augmentation de la fréquence des décharges et non pas sur la charge elle-même car l'augmentation de la durée de vie d'une bulle a pour conséquence l'augmentation de la probabilité de décharge dans cette bulle. Il en résulte que le claquage, qui est vraisemblablement le résultat des décharges du second régime, survient à une tension plus basse à froid qu'à température ambiante. L'effet est plus marqué avec 2films de pp.

Références bibliographiques du chapitre IV

- [1] R.HAMMEL et P.RAIN « *Décharges Partielles Due A Des Bulles D'air Dans Une Isolation Imprégné* », 2ème CNHT, Tizi Ouzou, nov 1997.
- [2] M.KARKKAINEN, K.FOX, W. PLESSNER and M. M. J. HALL, « *Theory Of Discharges At The Foil Edge In Capacitors* », Proc. IEEE, Vol 115, N°7, pp. 1027- 1033, 1968.
- [3] K. SMILI, L.HEROUS and M.NEMAMCHA « *Experimental Investigation On Evolution Of Partial Discharge In Polypropylene Films Impregnated With Jarylec* », Journal of electrical engineering : volume 11,edition :2, 2011.
- [4] K.SMILI, L.HEROUS and M.NEMAMCHA « *Experimental Study of Distribution of Partial Discharges in Insulation Impregnated at Different Temperatures* » Journal of Engineering Science and Technology Review 5 (2) 63-65, 2012.
- [5] L. HEROUS, K.SMILI and R.MOKDAD « *Using Design Of Experiments To Evaluate The Partial Discharges Evolution In Mixed Dielectric Structures* » Journal of electrical engineering: volume 11 edition:3, 2011.
- [6] Technical information, Ugilec Clol, Prodelec, Septembre 1983.

Chapitre V

Méthodologie Des Plans D'expériences Application Aux DP

Introduction.....	86
V.1. Notion de domaine d'étude ou espace expérimental	87
V.2 Notion de surface de réponse	89
V.3. Modélisation	90
V.4 Plans factoriels	90
V.4.1 Effet global et effet moyen d'un facteur	92
V.4.2 Synthèse du plan factoriel	94
V.4.3 Plans factoriels fractionnaires.....	95
V.5 Méthodologie des surfaces de réponse	97
V.5.1 Modèle polynomial du second ordre	97
V.6 Calculs statistiques	98
V.6.1 Homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale.....	98
V.6.2 Réalisation du test de significatif des effets	98
V.6.3 Intervalle de confiance des effets du modèle	99
V.6.4 Analyse de la variance, validation du modèle	100
V.6.4.1 La variation due à la liaison linéaire.....	100
V.6.4.2 La variation résiduelle	100
V.6.4.3 La variation totale	100
V.7 Qualité du modèle.....	101
V.7.1 Qualité descriptive du modèle.....	101
V.7.2 Qualité prédictive du modèle.....	102
V.8 Application aux décharges partielles	103
V.8.1 Procédure expérimentale	104
V.8.2 Evolution de la charge apparente	105
V.8.3 Evolution du nombre de décharges	107
Conclusion.....	113
Références bibliographiques du chapitre V.....	114

Introduction

Pour mettre en évidence son intérêt ainsi que son utilisation, nous allons présenter et expliquer dans ce chapitre non pas la totalité de la méthode des plans d'expériences mais uniquement les fondements de base et l'importance de cette méthode dans la recherche scientifique ou les études industrielles [1].

En effet, dans un problème de conception ou d'optimisation, un essai ou une simulation présente généralement un temps de calcul important. De plus, l'étude expérimentale d'un phénomène dépendant de différents paramètres (multiparamétriques), les méthodes généralement utilisées peuvent conduire à un nombre de résultats difficile à exploiter.

Avec les plans d'expériences, on obtient le maximum de renseignement avec le minimum d'expériences. Ils apportent une méthodologie permettant d'atteindre une meilleure connaissance du système observé par un minimum d'essais et un maximum de précision [2, 3].

Le principe général des plans d'expériences consiste à étudier que certains points du domaine expérimental sous investigation, tout en réussissant à appréhender le phénomène physique étudié sur l'ensemble du domaine considéré. Ils relèvent d'une démarche qui consiste à mettre en évidence et quantifier l'influence, ou, l'effet des paramètres comme des interactions entre facteurs [4, 5, 6]. La méthode des plans d'expériences apparaît aujourd'hui comme un préalable d'une part à l'amélioration de la qualité des produits et des procédés, et d'autre part, à la réduction de tout développement. Les contextes d'application peuvent aller du traitement et la résolution des problèmes qualité à l'optimisation d'un produit sous l'angle de la conception, ou encore l'optimisation d'un processus qui va fabriquer un produit.

La méthode des plans d'expériences repose sur des bases statistiques. Le principe de la méthode consiste à ne pas étudier tous les points expérimentaux possibles. La difficulté réside alors dans la manière de choisir les points d'étude de façon optimale.

Le principe général de cette méthode consiste à formaliser le problème expérimental en délimitant le phénomène étudié et en précisant les entrées (facteurs) et les sorties (sorties).

Le facteur est une variable qui agit généralement sur le système étudié tandis que la réponse est la grandeur mesurée qui permet d'évaluer les effets des facteurs sur le système. Par conséquent, les plans d'expériences consistait à établir des relations liant la réponse tant avec les facteurs, qu'avec les facteurs entre eux (interactions) [7, 8] ; En résumé, les principaux avantages des plans d'expériences sont :

- Diminution du nombre d'essais;

- Possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs;
- Détection des interactions entre facteurs;
- Modélisation des réponses étudiées;
- Une précision optimum des résultats.

Cette technique peut être employée dans différents domaines tels que l'agriculture, la chimie, la biologie l'électronique etc.

V.1. Notion de domaine d'étude ou espace expérimental

L'étude d'un problème expérimental peut généralement être représentée de la manière suivante : la grandeur à laquelle on s'intéresse par exemple y est appelée réponse. Le plus souvent, cette grandeur dépend d'un grand nombre de variables $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ qui peuvent être continues, discrètes ou quantitatives sont appelées facteurs. De plus, pour chaque facteur on doit lui attribuer deux niveaux, l'un sera qualifié de « niveau bas » borne inférieure, notée par -1 , l'autre de « niveau haut » borne supérieure, notée $+1$ (les signes $+$ et $-$ symbolisent la valeur haute et basse du facteur). L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre ces deux niveaux s'appelle le domaine de variation du facteur ou tout simplement le domaine expérimental du facteur figure V.1.

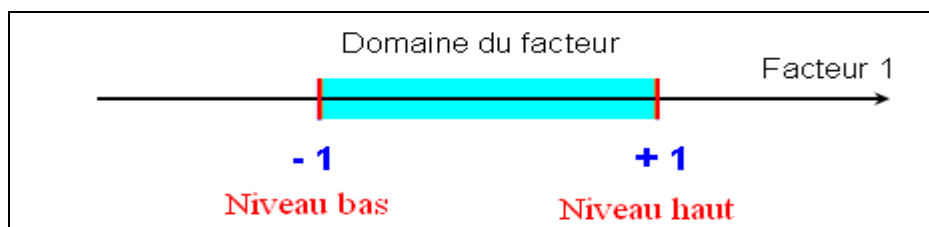


Figure V.1 : Domaine de variation d'un facteur

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté (facteur 2). On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe (l'axe représentant le second facteur) est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé « espace expérimental » ou « domaine d'étude » on trouve également l'appellation « espace de recherche ».

Les dimensions du domaine d'étude sont obligatoirement imposées par les plages de variation des deux facteurs, figure V.2.

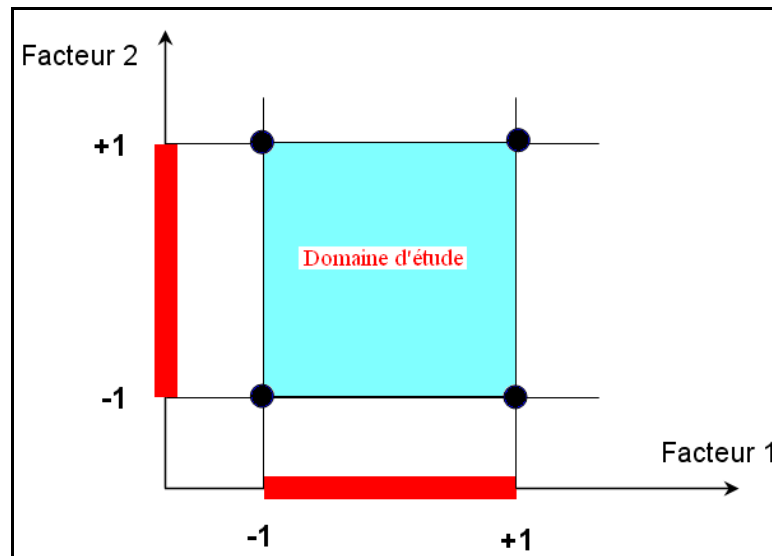


Figure V.2 : Représentation du domaine d'étude pour deux facteurs

Le niveau x_1 du premier facteur et le niveau x_2 du deuxième facteur représentent les coordonnées d'un point du domaine d'étude figure V.3.

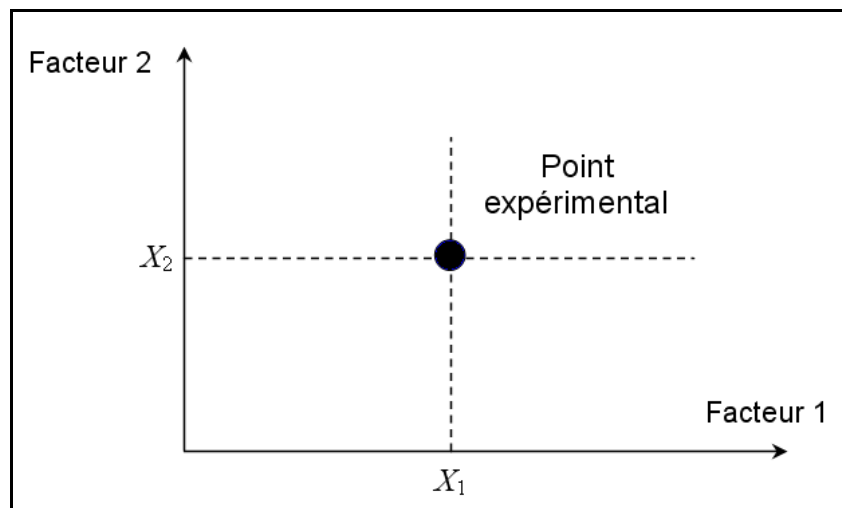


Figure V.3 : Représentation d'un point expérimental

Une étude expérimentale bien définie est représentée par des points réparties dans le domaine d'étude figure V.4.

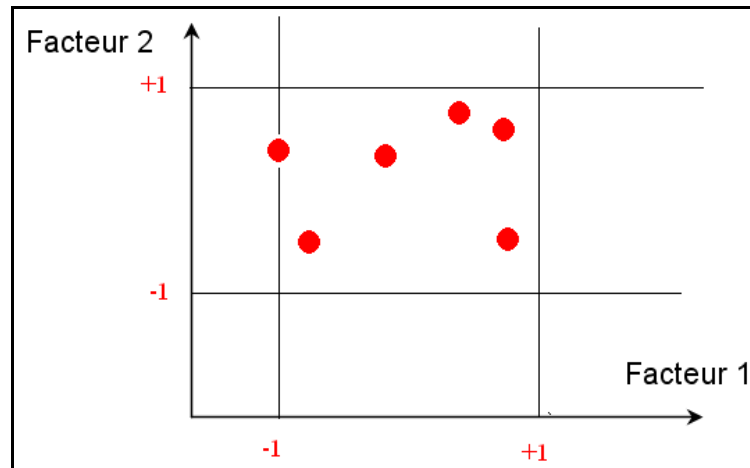


Figure V.4 : Points expérimentaux dans un domaine d'étude

V.2 Notion de surface de réponse

Le principe global de cette méthode se base sur le fait que l'étude d'un phénomène peut, le plus souvent être schématisé de la manière suivante : nous nous intéressons à une grandeur y (sortie) qui dépend d'un certain nombre de variables (facteurs) x_1, x_2, \dots, x_n . On définit alors un axe orthogonal au domaine d'étude et on l'attribue à la réponse. La représentation géométrique du plan d'expériences et de la réponse nécessite un espace ayant une dimension de plus que le domaine d'étude. Un plan à deux facteurs x_1 et x_2 utilise un espace à trois dimensions pour être représenté : une dimension pour la réponse : y et deux dimensions pour les facteurs x_1 et x_2 , figure V.5.

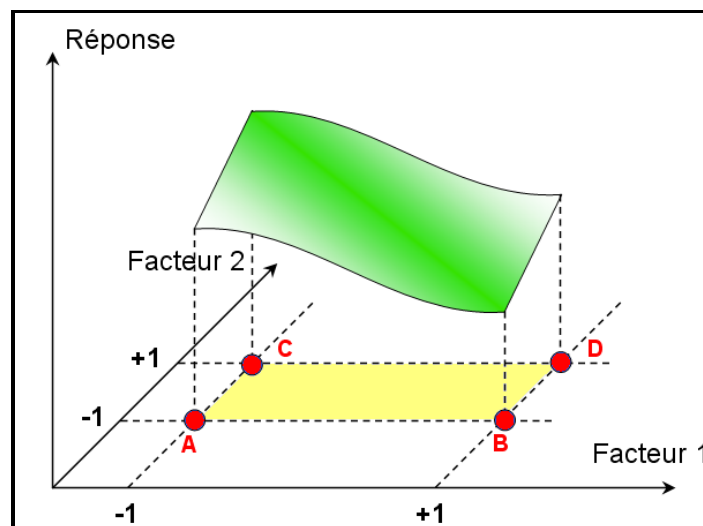


Figure V.5 : Représentation d'une surface de réponse

A chaque point du domaine d'étude correspond une réponse. A l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localisent sur une surface appelée la surface de réponse figure V.5.

V.3. Modélisation

La méthode des plans d'expériences repose essentiellement sur la création et l'exploitation de modèles de la fonction réponse. La réponse étant fonction des facteurs, si k facteurs ont été identifiés, on peut poser a priori : $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ avec $y \in \mathbb{R}$ (ou \mathbb{R}^m). On choisit a priori une fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs. On prend un développement limité de la série de Taylor-Mac Laurin. Les dérivées sont supposées constantes et le développement prend la forme d'un polynôme de degré plus ou moins élevé:

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \dots + \sum a_{ii} x_i^2 + a_{ij\dots z} x_i x_j \dots x_z \quad (\text{V-1})$$

Où

- y est la réponse ou la grandeur d'intérêt. Elle est mesurée au cours de l'expérimentation et elle est obtenue avec une précision donnée.
- x_i représente le niveau attribué au facteur i par l'expérimentateur pour réaliser un essai. Cette valeur est parfaitement connue. On suppose même que ce niveau est déterminé sans erreur (hypothèse classique de la régression).
- a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} sont les coefficients du modèle mathématique adopté a priori. Ils ne sont pas connus et doivent être calculés à partir des résultats des expériences.

L'avantage de cette méthode est d'obtenir un modèle sous la forme d'un polynôme qui nous permet ensuite de calculer toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire les expériences.

V.4 Plans factoriels

L'étude d'un phénomène peut, le plus souvent, être schématisé de la manière suivante : On s'intéresse à une grandeur y (réponse) qui dépend d'un grand nombre de variables, x_1, x_2, \dots, x_n (facteurs).

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Une méthode classique d'étude consiste en la mesure de la réponse y pour plusieurs valeurs de la variable x_i tout en laissant fixe la valeur des $(n-1)$ autres variables. Ainsi, l'application du principe statistique d'orthogonalité conduit à répéter l'opération précédente pour chacune des variables, lorsque les autres $(n-1)$ sont fixées. Pour k facteurs, cela représente 2^k expériences à réaliser. Le processus calculatoire correspond au plan factoriel complet. Le principal

inconvenient d'une telle méthode réside dans le nombre d'expériences nécessaires lorsque k devient important : exemple, si nous avons 6 variables (facteurs) et si l'on décide de donner 2 valeurs expérimentales à chacune d'elles, nous sommes conduits à effectuer $2^6 = 64$ expériences. Ce temps expérimental constitue donc un inconvenient.

Les plans factoriels à deux niveaux sont les plus simples, ils permettent de bien comprendre le principe de la méthode.

Le nombre d'expériences à réaliser se calcule par :

Nombre d'expériences = 2^k ou $k = 2$

Cela veut dire qu'il y a deux facteurs $k = 2$ et que chaque facteur prend deux niveaux. Le domaine d'étude peut être représenté de la façon suivante figure V.6.

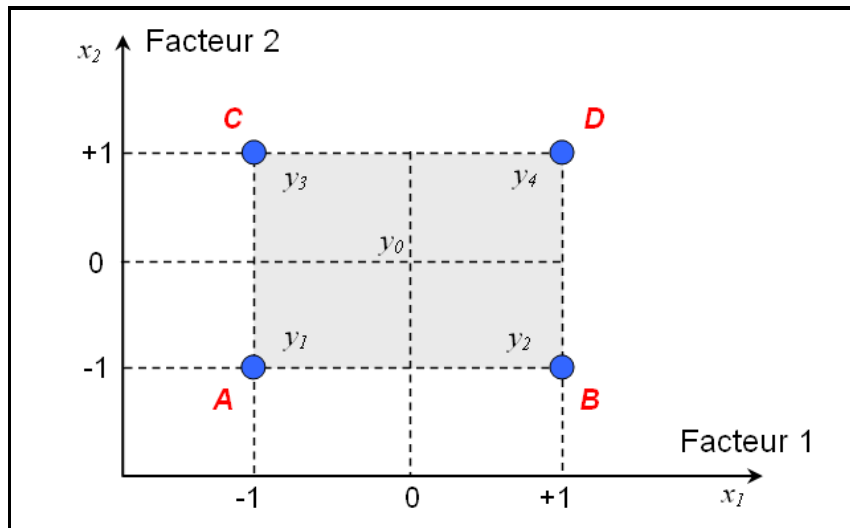


Figure V.6 : Représentation du domaine d'étude d'un plan 2^k

A priori, on effectue deux essais par facteur, soit deux niveaux par facteur, on adopte une loi du premier degré par rapport à chaque variable. Pour les plans factoriels complets à deux facteurs cette loi sera :

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 \quad (\text{V-2})$$

Avec ces hypothèses, on démontre que le meilleur emplacement des points expérimentaux se situe aux sommets du carré représentant le domaine d'étude : points A, B, C et D.

Il est maintenant possible d'introduire une représentation matricielle des expériences qui permet de déterminer les essais ou les simulations à réaliser. La matrice d'expérience sera constituée de deux sous tableau : le premier indique le nombre d'expériences à réaliser avec la

façon de faire varier les facteurs et l'ordre dans lequel il faut réaliser les expériences. Ce tableau est donc composé de +1 et -1. On réalisera alors dans la pratique 4 expériences. La colonne de gauche de la matrice d'expérience indique le numéro de l'expérience (ou de l'essai). La troisième ligne indique que lors de la réalisation du deuxième essai, le facteur x_1 sera au niveau haut alors que le facteur x_2 sera lui au niveau bas.

Le deuxième sous tableau indique en unités constantes, les valeurs des niveaux haut et bas de chacun des facteurs.

Essais à réaliser		
N° Essai	Facteur 1	Facteur 2
1 (A)	-1	-1
2 (B)	+1	-1
3 (C)	-1	+1
4 (D)	+1	+1

Tableau V.1: Matrice matricielle des expériences

Niveau -	Bas 1	Bas 2
Niveau +	Haut 1	Haut 2

Domaine d'étude

V.4.1 Effet global et effet moyen d'un facteur

En remplaçant dans la relation (2) les x_i par leur valeur du tableau 1, on obtient:

$$y_1 = a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} \quad (\text{V-3})$$

$$y_2 = a_0 + a_1 - a_2 - a_{12} \quad (\text{V-4})$$

$$y_3 = a_0 - a_1 + a_2 - a_{12} \quad (\text{V-5})$$

$$y_4 = a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} \quad (\text{V-6})$$

Où :

y_1, y_2, y_3 et y_4 représentent les réponses des expériences.

On appelle effet global d'un facteur, la variation de la réponse quand le facteur passe de niveau -1 au niveau +1.

On appelle effet moyen d'un facteur, la demi variation de la réponse quand le facteur passe de niveau -1 au niveau +1. Ainsi, l'effet est défini comme étant la moitié de l'effet global. Pour notre cas ou nous avons deux facteurs x_1 et x_2 , l'effet moyen de x_1 est la demi variation de la réponse lorsque x_1 passe de -1 à +1. Or pour chacun des niveaux de x_1 on a deux expériences. Nous devons donc prévoir des réponses moyennes. Quand x_1 est au niveau -1, nous avons la réponse moyenne :

$$y_- = \frac{1}{2}(+ y_1 + y_3)$$

Et quand x_1 est au niveau +1, nous avons la réponse moyenne :

$$y_+ = \frac{1}{2}(+ y_2 + y_4)$$

L'effet global a_1 de x_1 donne :

$$a_1 = \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{V-7})$$

On l'appelle l'effet du facteur 1, c'est la variation de la réponse due au facteur 1 quand on passe du centre du domaine d'étude au niveau haut de ce facteur.

L'effet moyen a_2 de x_2 se calcule de la même manière :

$$a_2 = \frac{1}{4}(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{V-8})$$

On l'appelle l'effet du facteur 2.

La réponse théorique au centre du domaine d'expérience est :

$$a_0 = \frac{1}{4}(+y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (\text{V-9})$$

Le coefficient a_0 est la valeur de la réponse au centre du domaine d'étude, elle peut être considérée aussi comme la moyenne des quatre réponses.

Si on désire étudier non seulement les effets des facteurs mais encore les interactions possibles entre les facteurs, le calcul des coefficients du modèle se fait toujours à l'aide de la même règle.

$$a_{12} = \frac{1}{4}(+ y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \quad (\text{V-10})$$

Il y a donc interaction lorsque l'effet d'un facteur dépend du niveau de l'autre facteur. La valeur de l'interaction est donc la demi-différence entre l'effet du facteur 1 au niveau haut du facteur 2 et l'effet du facteur 1 au niveau bas du facteur 2.

Les signes de la relation (V-10.) proviennent du produit des deux facteurs x_1 et x_2 .

	x_2	x_1x_2
x_1		
-	-	- par - = +
+	-	+ par - = -
-	+	- par + = -
+	+	+ par + = +

Tableau V.2 : Signe du calcul du coefficient d'interaction.

A partir de la matrice des expériences, le plan complet avec interaction sous forme matricielle sera :

N° Essai	Moyenne	Facteur 1	Facteur 2	Interaction 12
1	+1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1

Tableau V.3: Matrice de calcul.

V.4.2. Synthèse du plan factoriel

L'exemple précédent décrit un cas particulier d'un plan factoriel complet à $k=2$ facteurs, prenant chacun deux niveaux. Le modèle mathématique est un polynôme prenant en compte la moyenne, les effets de chaque facteur ainsi que toutes les interactions.

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij\dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{V-11})$$

La notation 2^k décrit le nombre d'expériences à réaliser avec un plan factoriel complet avec k facteurs prenant chacun deux valeurs.

Pour tout plan factoriel complet de type 2^k , il faut donc calculer :

- k facteurs principaux
- $2^k - k - 1$ interactions
- 1 moyenne

L'ensemble des résultats conduit donc à un système de 2^k équations à 2^k inconnues.

La généralisation mathématique de l'étude se fait en général par l'approche matricielle. Ce système peut se mettre sous la forme matricielle suivante :

$$Y = Xa \quad (\text{V-12})$$

Où :

Y : Vecteur des réponses de chaque essai.

a : Vecteur de la moyenne, les effets des facteurs et toutes les interactions.

Si nous reprenons le système du plan 2^2 , la relation (12) prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +I & -I & -I & +I \\ +I & +I & -I & -I \\ +I & -I & +I & -I \\ +I & +I & +I & +I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (\text{V-13})$$

On constate que les vecteurs (colonnes et lignes) sont orthogonaux 2 à 2. Cette propriété implique que l'inverse de la matrice X est égale à la transposée de X divisée par le nombre de ligne n .

$$X^t X = nI \quad (\text{V-14})$$

I représente la matrice unité. Cette matrice est appelé matrice d'information ou matrice de fisher L'inverse de la matrice d'information $(X^t X)^{-1}$ correspond à la matrice de dispersion. Les matrices d'information et de dispersion sont diagonales lorsqu'il y a orthogonalité des lignes et des colonnes de la matrice d'expériences.

Le vecteur a de l'expression (V-12.) peut donc être déterminé en tenant compte :

$$\left. \begin{aligned} X^t Y &= X^t X a \\ X^t Y &= nI a \\ a &= \frac{1}{n} X^t Y \end{aligned} \right\} \quad (\text{V-15})$$

Cette relation est valable pour tous les plans factoriels complets. Chaque élément de a est donc de la forme :

$$a_1 = \frac{1}{n} [\pm y_1 \pm y_2 \pm y_3 \pm \dots \pm y_n] \quad (\text{V-16})$$

V.4.3 Plans factoriels fractionnaires

Lors de la réalisation d'un plan d'expériences à deux niveaux, le nombre d'expériences à réaliser augmente d'une manière significative avec le nombre de variables prises en compte.

Un plan 2^6 nécessite 64 expériences. Or dans de nombreux domaines les interactions d'ordre élevé sont souvent considérées comme négligeables, d'où l'idée de diminuer la taille des

plans et donc d'utiliser pour l'étude de k facteurs des matrices d'expériences issues de plan 2^{k-1} , 2^{k-2} , 2^{k-3} , ..., 2^{k-p} .

Pour trois facteurs prenant deux niveaux, le plan complet est noté 2^3 . Il comporte huit essais.

Le plan fractionnaire, moitié du plan complet n'a que quatre essais 2^{3-1} .

La matrice des effets d'un tel plan est :

N ⁰ Essai	A	B	AB
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

Tableau V.4 : Matrice d'expérience d'un plan 2^2

Comme nous devons placer le troisième facteur C, nous le plaçons dans la colonne de l'interaction AB ; Ainsi, la matrice d'expérience du plan fractionné sera :

N ⁰ Essai	A	B	C
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

Tableau V.5 : Matrice d'expérience d'un plan fractionné

C'est cette matrice qui servira une fois les quatre expériences réalisées, à calculer les effets A, B, C et de leur interactions éventuelles.

Du point de vue vocabulaire, le fait de pose $C = AB$ se traduit en disant que l'on a aliasé le facteur C avec l'interaction AB. De ce fait, on peut se demander si les effets de A, B et C calculés avec le plan fractionnaire sont les mêmes que celles que l'on aurait obtenues avec un plan complet. Il n'en est rien [9, 10, 11].

Pour résumer, les étapes successives suivantes sont nécessaires pour la construction d'un plan fractionnaire :

- 1- Prise en compte du plan factoriel complet de base 2^k .
- 2- Détermination du nombre admissible d'expériences 2^{k-p} .
- 3- Recherche des meilleurs générateurs indépendants.
- 4- Dédution des contrastes (aliases).

Dans ce plan fractionnaire, chaque effet principal est confondu avec une interaction, l'interprétation des résultats est donc plus délicate. Le demi-plan coûte moins cher en nombre d'essais que le plan complet, mais ce gain se paye sur l'ambiguïté dans l'estimation des effets. On essaye autant que possible d'aliaser les effets principaux avec des interactions d'ordres élevées, en supposant que celles-ci soient négligeables.

V.5 Méthodologie des surfaces de réponse

La méthodologie des surfaces de réponse (MSR) constitue le second volet de la méthode des plans d'expériences. Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la fonction réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative [9, 10].

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux d'études par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré (avec ou sans interactions) par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent par fois à des modélisations simples mais suffisantes. Pourtant il existe de nombreux cas où il est nécessaire d'avoir une bonne modélisation des phénomènes étudiés et où il faut passer à des modèles mathématiques de second degré. On fait alors appel aux plans pour surface de réponses.

V.5.1 Modèle polynomial du second ordre

Le modèle mathématique postulé utilisé avec les plans pour surfaces de réponse est un modèle du second degré avec interaction d'ordre 2 :

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots a_{i..k} x_{i..} x_k + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (\text{V-17})$$

Pour deux facteurs :

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2$$

Le plan d'expériences fournit un certain nombre de valeurs de la réponse y . L'interprétation du plan consiste donc à trouver les coefficients et, par la suite, résoudre un système de n équations et p inconnues. Sous forme matriciel ce système sera :

$$y = X \cdot a \quad (\text{V-18})$$

$(n,1) \quad (n,p) \quad (p,1)$

La résolution de ce système est généralement menée selon la méthode des moindres carrés, et la solution est notée \hat{a} .

Cette solution est donnée par la formule suivante:

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t y \quad (\text{V-19})$$

L'emploi d'un logiciel se révèle nécessaire.

En conclusion, la méthodologie des surfaces de réponse doit être vue comme un ensemble d'outils permettant la compréhension et l'exploitation d'objets simplificatrices de la fonction réponse étudiée.

V.6 Calculs statistiques

Les plans présentés plus haut donnent la définition des expériences dans le domaine d'étude. Les valeurs des réponses en ces points doivent être analysées afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur les variations de la réponse. Les calculs statistiques permettent de savoir si les effets sont significatifs ou non, en particulier l'analyse de la variance.

V.6.1 Homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale

Les calculs statistiques qui permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance ou de valider la linéarité du modèle font intervenir d'une part les résidus e_i , c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle et, d'autre part un estimateur sans biais de la variance commune des résidus. Cet estimateur est donné par :

$$s^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad (\text{V-20})$$

Où :

n : Le nombre d'expériences réalisées.

P : Le nombre de coefficients du modèle.

Dans ces conditions, on peut montrer que tous les effets ont la même variance donnée par :

$$s_i^2 = \frac{s^2}{n} \quad (\text{V-21})$$

V.6.2 Réalisation du test de significatif des effets

Le test utilisé est le test << t >> de *Student*. Un effet sera dit significatif (c'est-à-dire que la variable ou l'interaction qui lui est associée a une influence sur la réponse), s'il est, pour un risque donné, significativement différent de 0. On testera donc l'hypothèse :

$$H_0 = \langle\langle a_i = 0 \rangle\rangle \quad (\text{V-22})$$

Contre l'hypothèse :

$$H_1 = \langle\langle a_i \neq 0 \rangle\rangle \quad (\text{V-23})$$

Pour cela, on calcul

$$t_i = \frac{|a_i|}{s_i} \quad (\text{V-24})$$

On utilise alors une table dite de *Student* (voir l'annexe) à $\nu = n-p$ degrés de liberté (n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre d'effets y compris la constante) [11]. On choisit un risque de première espèce α (le plus souvent 1% ou 5%) et on lit dans cette table la valeur $t_{crit}(\alpha, \nu)$, en utilisant la partie relative à un test bilatéral. La règle du test est alors la suivante :

- Si $t_i > t_{crit}(\alpha, \nu)$: on rejette H_0 au risque toléré.
- Si $t_i < t_{crit}(\alpha, \nu)$: on accepte H_0 au risque toléré.

Si l'hypothèse H_0 est acceptée, cela veut dire que l'effet en question n'est pas, au risque α significativement différent de 0 et donc que la variable qui lui est associée n'a pas d'influence sur la réponse.

V.6.3 Intervalle de confiance des effets du modèle

Rappelons que si l'on détermine tous les effets, on ne peut pas calculer la variance commune des résidus. On supposera donc, dans la suite, que l'on a négligé au moins un effet.

On calcule alors s^2 donnée par l'équation suivante :

$$s_y^2 = \frac{SCEE}{ddl_{SCEE}} \quad (\text{V-25})$$

Avec : SCEE : La somme des écarts expérimentaux :

$$SCEE = \sum (y_{ki} - y_k)^2 \quad (\text{V-26})$$

ddl_{SCEE} : Degré de liberté des variance de mesure

$$ddl_{SCEE} = N(r-1) \quad (\text{V-27})$$

r : Nombre de répétitions;

n : Nombre total des déterminations ($n = N \cdot r$) ;

y_{ki} : Réponse observée lors de la réalisation des expériences, $k = 1 \dots N$, $i = 1 \dots r$;

y_k : Moyenne des réponses observées, pour une ligne du plan d'expériences, $k = 1 \dots N$;

Puis on en déduit la variance commune des effets. On choisit alors un risque α et on détermine avec *la table de Student* le nombre $t(\alpha, \nu)$. L'intervalle de confiance d'un effet a_i est alors donné par :

$$[a_i - t(\alpha, \nu)s_i ; a_i + t(\alpha, \nu)s_i] \quad (\text{V-28})$$

V.6.4 Analyse de la variance, validation du modèle

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test F la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression (au modèle), avec la somme des carrés des résidus.

On définit alors trois types de « variation »

V.6.4.1 La variation due à la liaison linéaire

$$SCEL = \sum (Y_i^{est} - Y_{moy})^2 \quad (V-29)$$

Où :

Y_i^{est} : La réponse estimée à l'aide du modèle linéaire.

Y_{moy} : La moyenne des réponses.

$SCEL$: Somme des carrés des écarts dues à la liaison.

V.6.4.2 La variation résiduelle

$$SCER = \sum (Y_i - Y_i^{est})^2 \quad (V-30)$$

Y_i : Réponses observées lors de la réalisation des expériences

$SCER$: Somme des carrés des écarts des résidus.

V.6.4.3 La variation totale

$$STCE = SCEL + SCER \quad (V-31)$$

$STCE$: Somme totale des carrés des écarts.

On définit de plus un "carré moyen" qui est le quotient d'une somme de carrés par son degré de liberté.

$SCEL$ aura $(p - 1)$ degrés de liberté (p est le nombre de coefficients estimé à partir du modèle).

$SCER$ aura $(n - p)$ degrés de libertés (n est le nombre d'expériences réalisées).

$SCET$ aura $(n - 1)$ degrés de liberté.

En outre, on note CML le carré moyen associé à $SCEL$, et CMR le carré moyen associé à $SCER$.

Le tableau de l'analyse de variance se présente alors de la façon suivante:

Variation due à	Somme des carrés	DDL	Carré moyen	F
Liaison	$SCEL$	$p - 1$	$\frac{SCEL}{p - 1} = CML$	$F_{obs} = \frac{CML}{s^2}$
Résidus	$SCER$	$n - p$	$\frac{SCER}{n - p} = s^2$	
Totale	$SCET$	$n - 1$		

Tableau V.6: Tableau de l'analyse de régression.

Le test F permet alors de comparer pour un risque fixé à l'avance le F_{obs} que l'on a calculé dans le tableau précédent avec un $F(\text{critique})$ lu dans la table de Fisher-Snedecor (voir l'annexe) avec $(p-1)$ et $(n - p)$ degrés de liberté.

Le test est le suivant :

Hypothèse H_0 : " les deux carrés moyens sont de même grandeur" et donc la régression n'est pas significative

Hypothèse H_1 : " le carré moyen dû à la régression est significativement plus grand que le carré moyen dû aux résidus" donc la régression est globalement significative

La règle du test est alors pour un risque α choisi:

- Si F_{obs} est inférieure au $F(\text{critique})$, on accepte l'hypothèse H_0 .
- Si F_{obs} est supérieur au $F(\text{critique})$, on accepte l'hypothèse H_1 avec la confiance $1 - \alpha$

V.7 Qualité du modèle

V.7.1 Qualité descriptive du modèle

Le tableau d'analyse de régression (Tableau V.4) permet d'établir immédiatement le coefficient de détermination à partir de la relation suivante:

$$R^2 = \frac{SCEL}{STCE} = 1 - \frac{SCER}{STCE} \quad (\text{V-32})$$

Ce coefficient traduit la contribution du modèle dans la restitution de la variation de la réponse observée. Par définition, le coefficient de détermination appartient à l'intervalle suivant : $0 \leq R^2 \leq 1$

En présence de plusieurs variables explicatives, ce qui est généralement le cas dans l'analyse des résultats d'essais provenant d'un plan d'expériences, il faut impérativement éviter l'utilisation du coefficient de détermination R^2 pour comparer la qualité descriptive de

différents modèles. Il faut recourir à l'utilisation du coefficient de détermination ajusté $R_{ajusté}^2$.

Le même tableau de régression permet de corriger le coefficient de détermination défini à partir de l'équation (V-43.). Pour tenir compte du nombre de coefficients présents dans un modèle et pour comparer différents modèles entres-eux, on définit le coefficient de détermination ajusté à partir de la formule suivante:

$$R_{ajusté}^2 = 1 - \frac{\frac{SCER}{N-P}}{\frac{STCE}{N-1}} \quad (V-33)$$

Par définition, le coefficient $R_{ajusté}^2$ appartient à l'intervalle suivant : $-\infty \leq R_{ajusté}^2 \leq 1$

Plus la valeur du coefficient de détermination ajusté est proche de 1, plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante.

V.7.2 Qualité prédictive du modèle

Le modèle obtenu peut servir à prédire la valeur de la réponse non encore réalisée. Cette approche est très courante dans un problème d'optimisation.

Au même titre que l'on a défini précédemment la qualité descriptive d'un modèle à partir du coefficient de détermination $R_{prédictif}^2$, il est possible de définir maintenant la qualité prédictive d'un modèle à partir d'un coefficient noté $R_{prédictif}^2$ ou Q^2 . Comme on dispose de N erreurs de prédiction, on définit la statistique suivante :

$$PRESS = \sum_{i=1}^N e_{(i)}^2 \quad (V-34)$$

Où :

$e_{(i)}$: L'erreur de prédiction pour le $i^{ème}$ traitement du plan d'expériences

Dans cette relation, *PRESS* est l'acronyme de la locution anglaise *PR*ediction *E*rror *S*um of *S*quares. Plus la valeur de *PRESS* est faible, plus le modèle est prédictif. Par analogie avec le coefficient de détermination R^2 , on définit le coefficient $R_{prédictif}^2$ encore noté Q^2 à partir de la relation suivante :

$$Q^2 = 1 - \frac{PRESS}{STCE} \quad (V-35)$$

Par définition, le coefficient Q^2 appartient à l'intervalle suivant : $-\infty \leq Q^2 \leq 1$

Plus la valeur du coefficient Q^2 est proche de 1, plus la qualité prédictive du modèle est importante.

V.8 Application aux décharges partielles

Durant les dernières décennies, le développement de l'industrie électrostatique a été accompagné d'un intérêt croissant dans la compréhension des phénomènes qui mène à la détérioration du matériel isolant. Depuis, de nombreuses études ont montré que l'isolement peut être soumis à des phénomènes de transition causant sa détérioration progressive. Un des phénomènes les plus importants est la décharge partielle [12,13,14]. Par ailleurs, il est reconnu que les défauts introduits accidentellement lors de la fabrication des équipements électriques (défaut d'imprégnation, trou dans un film ...) peuvent générer des décharges partielles. L'étude des décharges partielles dans les structures diélectriques mixtes fait toujours l'objet d'investigations intenses. En effet, les structures diélectriques mixtes (solide liquide) offrent l'avantage d'avoir une bonne rigidité diélectrique [15,16].

L'évolution de décharge partielle dans diélectrique mixte est un processus multifactoriel. Le potentiel initial ainsi que la température sont connus pour influencer sur l'évolution de décharge partielle. Le but du présent travail est de démontrer l'efficacité de la méthodologie des plans d'expériences pour évaluer les effets de ces facteurs.

Dans le cas du présent travail, l'objectif est de modéliser le nombre des décharges en fonction du potentiel initial V_0 et la température T .

Le modèle linéaire de la réponse du système est un polynôme du deuxième degré, ou la réponse de ce processus est exprimée en fonction de e facteurs.

$$y = f(u_i) = c_0 + \sum c_i u_i + \sum c_{ij} u_i u_j + \sum c_{ijk} u_i u_j u_k + \dots + c_{i\dots l} u_{i\dots l} + \sum c_{ii} u_i^2 \quad (\text{V-36})$$

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + a_{i\dots k} x_{i\dots k} + \sum a_{ii} x_i^2$$

On définit pour chaque facteur une valeur normalisée centrée comme suit :

$$x_i = (u_i - u_{ic}) / \Delta u_i = u_i^* \quad (\text{V-37})$$

Où :

$$\begin{aligned} u_{ic}^* &= (u_{i\max} + u_{i\min}) / 2 \\ \Delta u_i &= (u_{i\max} - u_{i\min}) / 2 \end{aligned} \quad (\text{V-38})$$

Ainsi, x_i prend la valeur -1 pour la valeur minimum $u_{i\min}$ et la valeur +1 pour la valeur maximale $u_{i\max}$.

La fonction de la réponse devient :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijk} x_i x_j x_k + \dots a_{i..l} x_{i..l} + \sum a_{ii} x_i^2 \quad (\text{V-39})$$

Et pour les deux facteurs choisis pour cette étude:

$$x_i = V_0^* ; x_2 = T^* ;$$

On obtient le modèle linéaire suivant :

$$y = a_0 + a_1 V_0^* + a_2 T^* + a_{12} V_0^* T^* + a_{11} V_0^2 + a_{22} T^2 \quad (\text{V-40})$$

Où :

a_0 : La valeur prédite de la réponse au centre de domaine expérimental ;

a_i, a_{ii} : L'effet de facteur x_i ;

a_{ij} : L'interaction entre le facteur x_i et x_j

V.8.1 Procédure expérimentale

La détection et la mesure de décharge partielle a été effectuée avec un appareil fabriqué au LEMD Grenoble [15]. Cet appareil utilise les expressions électrique et optique des décharges partielles. Un flux de courant apparent à travers le circuit externe dû à l'apparition de décharges partielles dans la cellule d'étude. Il permet de faire des mesures de décharges dans l'ordre 0,05 pc et la durée minimale entre deux décharges successives est de 330 ns. Les Impulsions sont mises en forme et amorties avec une constante de temps RC = 40 ns. Lorsqu'une décharge est détectée, son amplitude, sa polarité ainsi que l'instant de son apparition sont mesurés. La phase de l'apparition de décharge est déduite de cet instant. Le dispositif expérimental peut atteindre des températures jusqu'à - 40 ° C.

Le domaine d'étude expérimental est le suivant :

- La tension de dépôt : $V_{0 \min} = 5000\text{V}$; $V_{0 \max} = 7000\text{V}$;
- La température : $T_{\min} = -28^\circ\text{C}$; $T_{\max} = +28^\circ\text{C}$;

V.8.2 Evolution de la charge apparente Q :

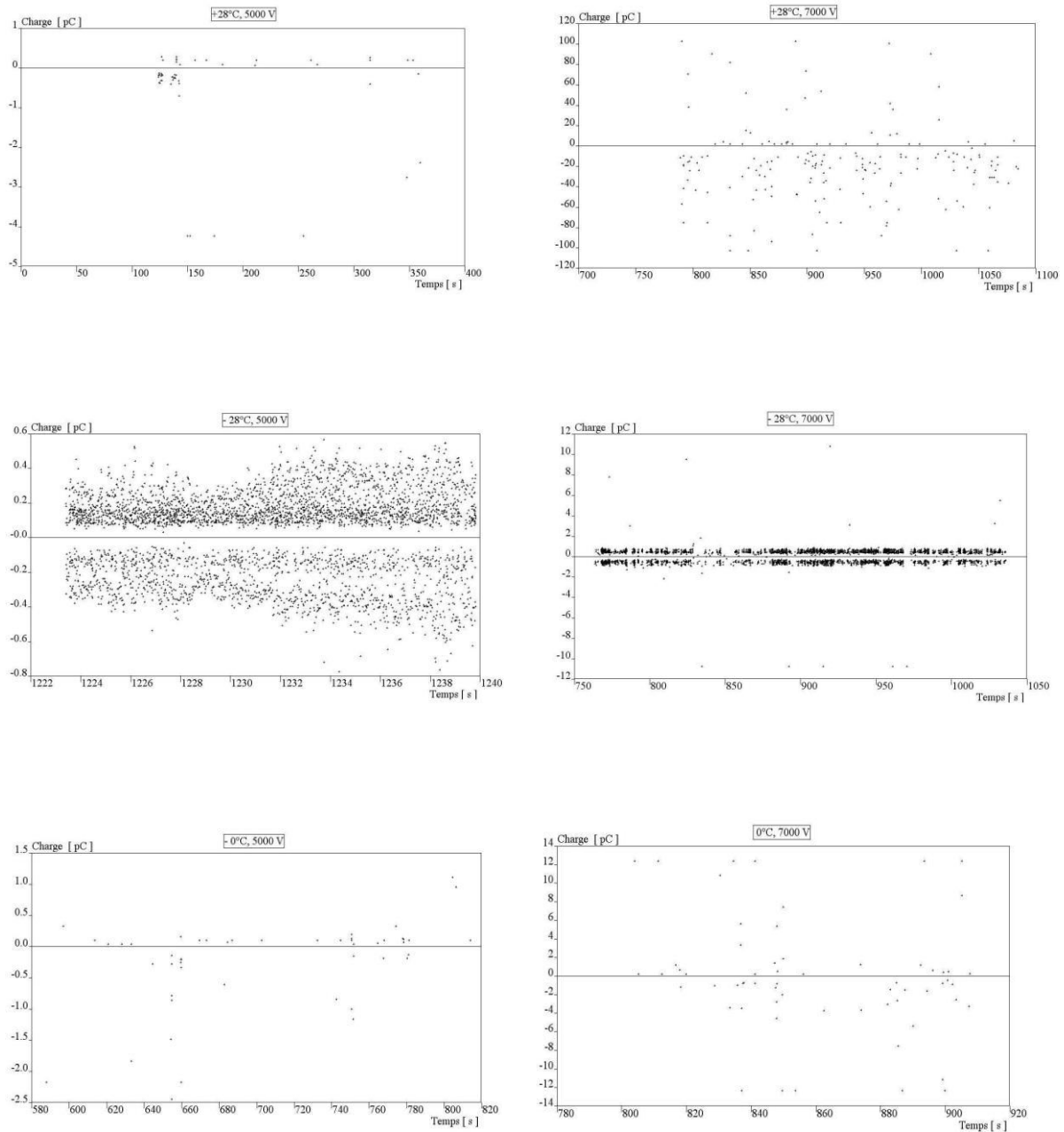
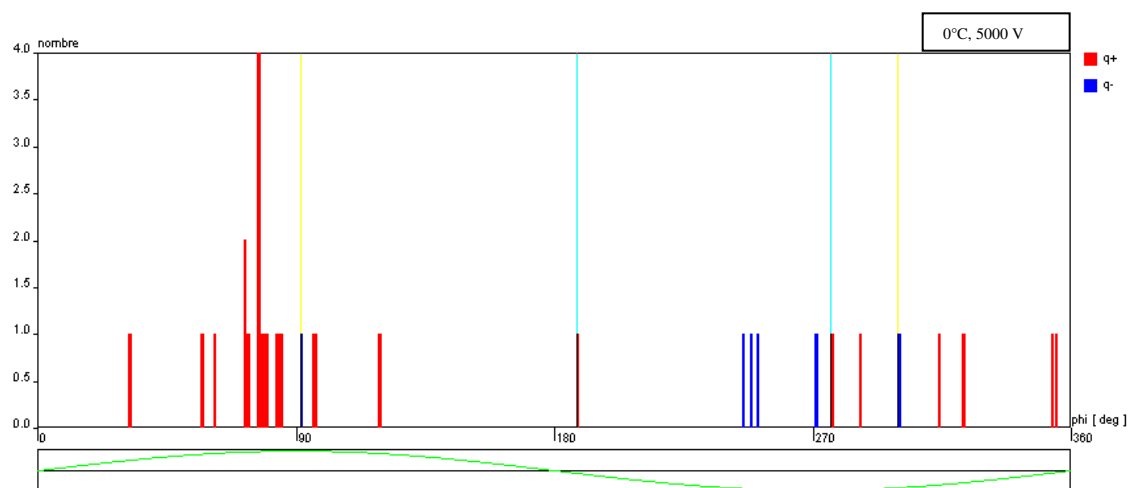
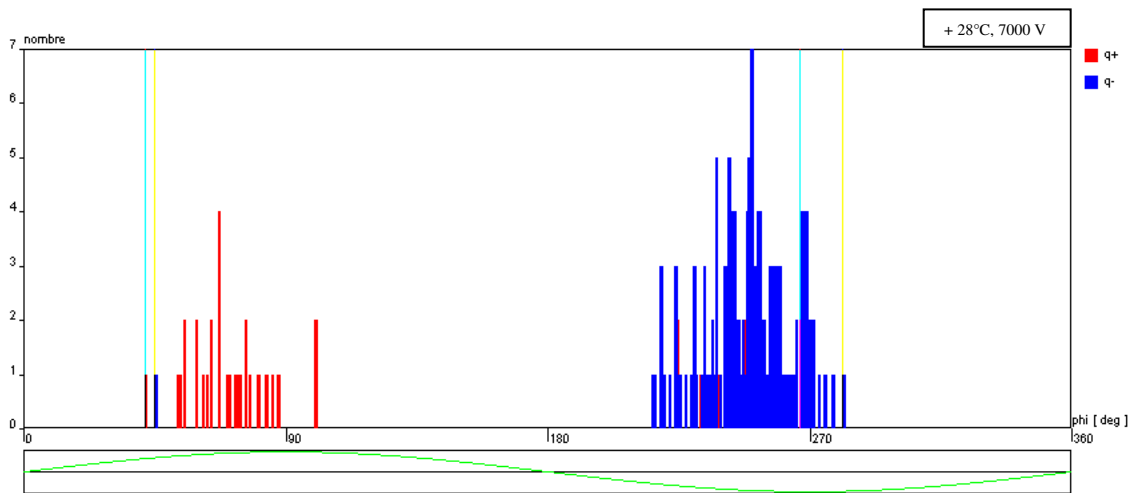
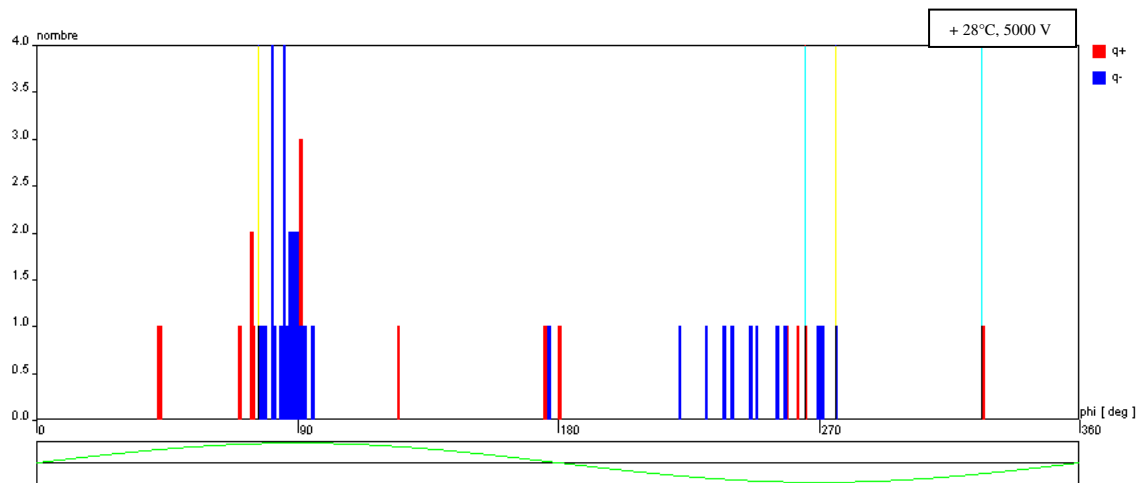


Figure V.7 : Evolution de la charge Q apparente (pC) pendant la durée d'acquisition à différentes températures. 5000 V correspond au premier régime de décharge et 7000 V pour le second régime.

V.8.3 Evolution du nombre de décharges $n(\Phi)$



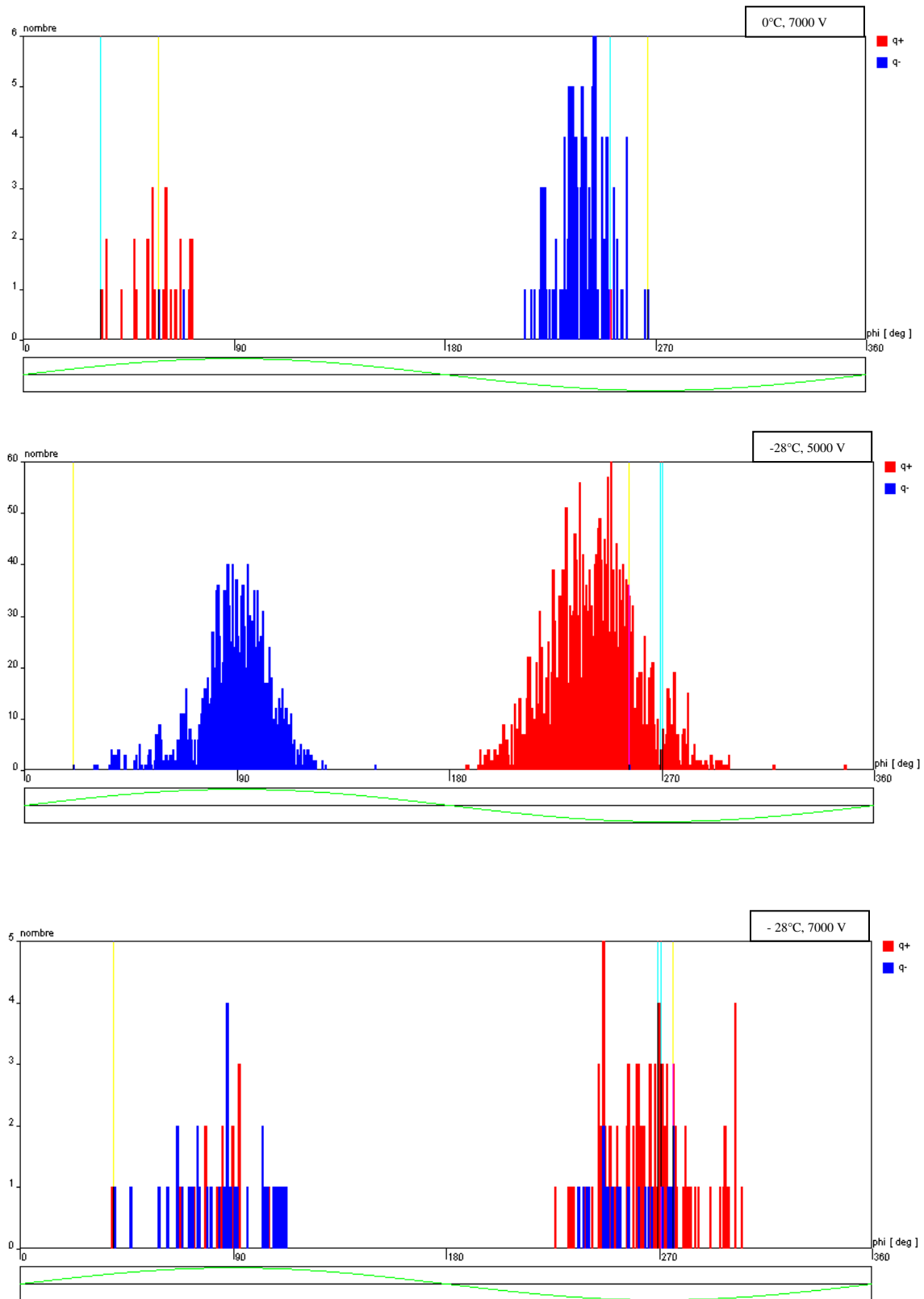


Figure V.8 : Evolution du nombre de décharges en fonction de la phase pour différentes températures

La figure V.8 montre l'allure des distributions du nombre des décharge $n(\Phi)$ en fonction de la phase enregistrée au cours de la T.A.D.P (5000 V) et l'autre entre la tension de transition et la tension d'extinction (7000 V).

Ces distributions ont une allure pratiquement semblable d'une tension à l'autre et d'une température à l'autre. On constate aussi une large distribution de décharges qui se traduit par une augmentation du nombre des décharges due à la formation d'une bulle de gaz qui provoque l'apparition d'une rafale de décharges, état conduisant au claquage.

Nous remarquons aussi que la décharge apparait au passage par zéro de la tension à la température 28°C, et la distribution présentant un pic vers 90° pour les décharges positives et un pic vers 80° pour les décharges négatives à la tension 5000 V. Le tableau V.9 présente le reste des distributions angulaires du nombre de décharges pour toute la gamme de la température étudiée.

T°C	5000 V		7000 V	
	q ⁺	q ⁻	q ⁺	q ⁻
28°C	90°	80°	70°	250°
0°C	80°	250°	70°	250°
-28°C	250°	80°	250°	85°

Tableau V.7 : Position angulaire des distributions de décharges

A partir de ses expériences, nous avons relevé les 11 essais du plan composite centré, ils sont donnés à la figure V. 9, et les résultats sont reportés dans le tableau V.9.

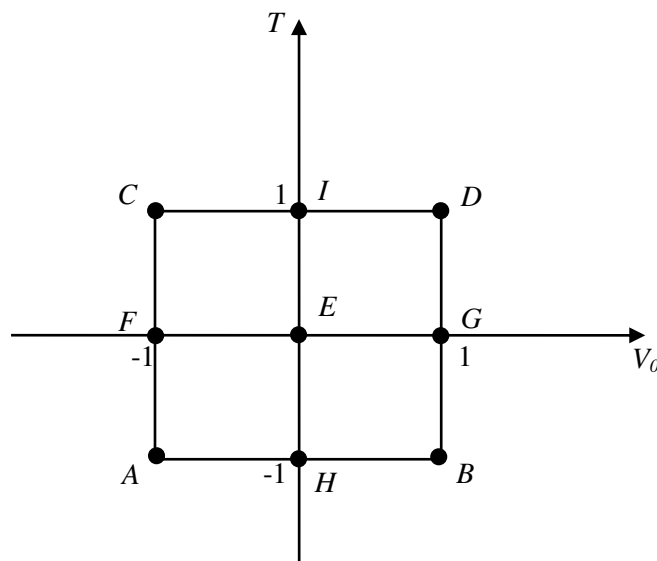


Figure V.9 : Diagramme d'un plan composite centré des essais réalisés

N°	Facteurs		Réponses		
	V_0 (V)	T (°C)	N_-	N_+	$Sum N$
1	5000	-28	1410	2320	3730
2	7000	-28	1650	2336	3986
3	5000	+28	30	19	49
4	7000	+28	138	44	182
5	5000	0	25	20	45
6	7000	0	40	54	94
7	6000	-28	1560	2308	3868
8	6000	+28	49	33	82
9	6000	0	30	38	68
10	6000	0	32	39	71
11	6000	0	31	40	71

Tableau V.8 : Résultats des expériences du plan composite centré

Sur la base des données expérimentales de tableau V.8, et après élimination des effets non significatifs les modèles des réponses (Y_{N_-} , Y_{N_+} , Y_{SumN}) proposées par le logiciel MODDE 8.0 sont :

$$N_- = 30.78 + 60.50 V_0 - 733.83 T + 2.02 V_0^2 + 774.026 T^2 - 33 V_0 T \quad (V-41)$$

$$N_+ = 36.63 + 12.50 V_0 - 1144.67 T + 3.92 V_0^2 + 1137.42 T^2 + 2.25 V_0 T \quad (V-42)$$

$$SumN = 67.42 + 73 V_0 - 1878.5 T + 1911.45 T^2 \quad (V-43)$$

La qualité descriptive (R^2) des modèles (N_- , N_+ , $SumN$) est égale 0.998 ; 1.00 et 1.00 respectivement, on constate que R^2 est proche ou égale à 1. On peut donc dire que les modèles obtenus pourront servir à prédire la valeur de la réponse.

La qualité prédictive (Q^2) des modèles est satisfaisante, elle est égale 0,979 ; 1.00 et 0.997 respectivement.

En utilisant les fonctions de la réponse N_- , N_+ , $SumN$. Le logiciel MODDE 8.0 (développé par Umetrics, Umea, Suède) pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences, donne les réponses prédites en fonction des paramètres. La figure 10 montre des courbes iso-réponse de la tension en fonction de la température.[17]

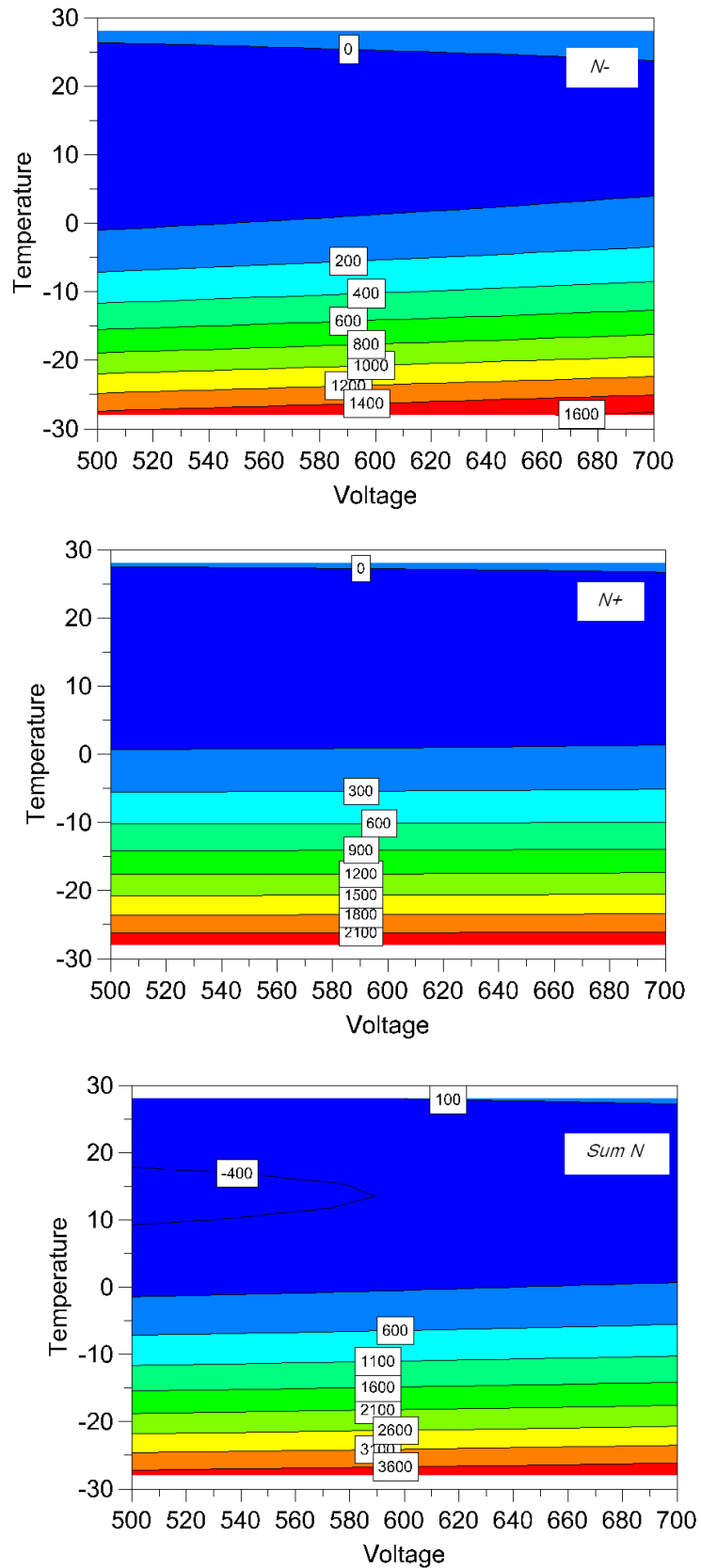


Figure V.10 : Nombre de décharge prédit par le logiciel MODDE 8.0

À partir du modèle mathématique obtenu, on peut également déterminer l'influence de chaque facteur sur la réponse en traçant la variation des réponses en fonction des facteurs.

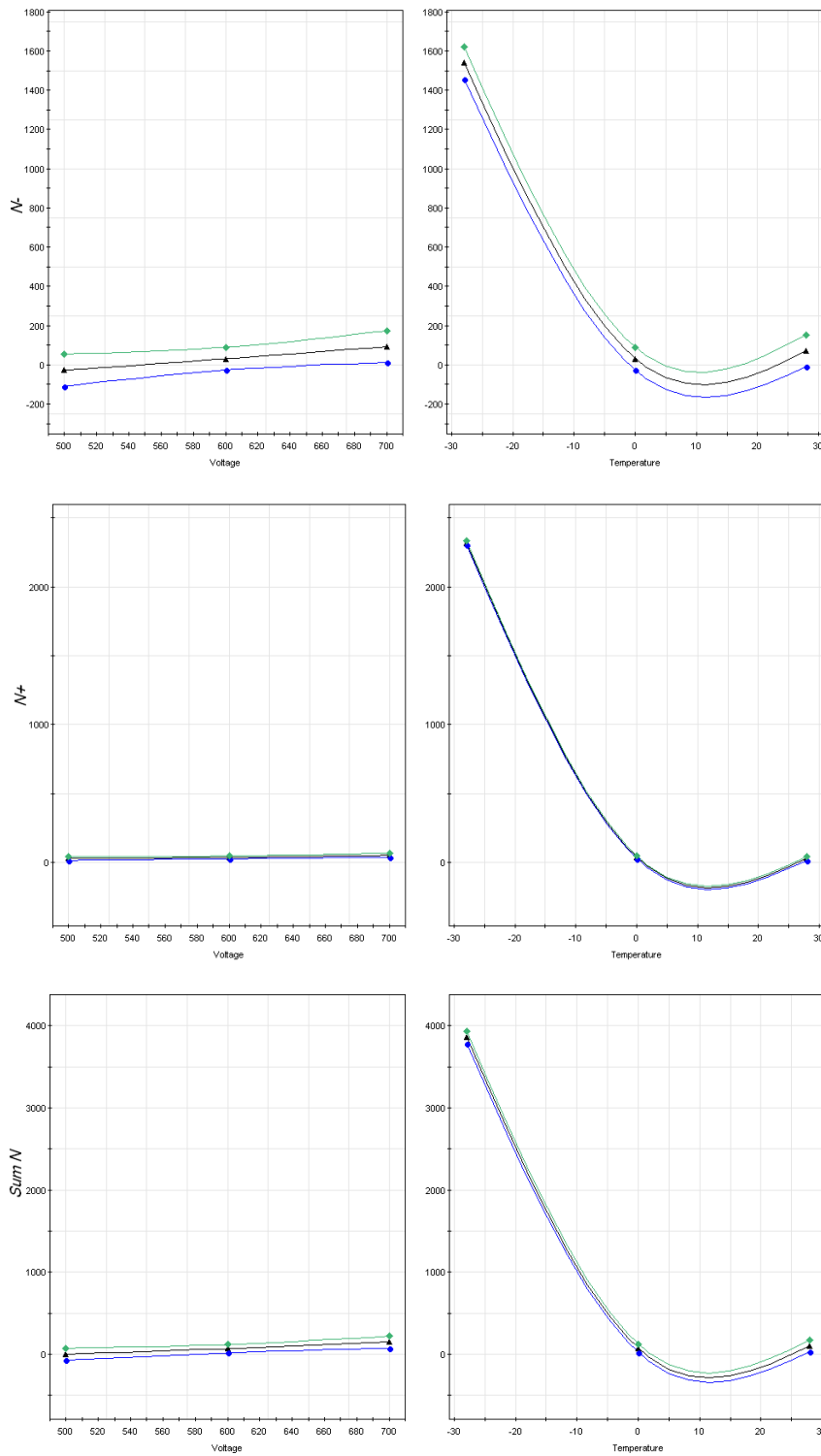


Figure V.11: Courbes de prédiction des réponses (N^+ , N^- et $SumN$) en fonction des facteurs V_0 , T

L'analyse statistique des données, en utilisant le test de Student indique que les premiers effets potentiels (V_0) et l'interaction entre le potentiel initial et la température dans la décharge négative (N^-) et de décharge positive (N^+) ne sont pas significatifs. Les capacités

descriptives et prédictives des deux modèles sont évaluées par les statistiques R2 coefficients et Q2. La bonté de R2 coefficient d'ajustement qui est une mesure de la façon dont le modèle de régression peut ajuster les données brutes est proche ou égal à 1 pour les modèles, 0,998 et 1,00 respectivement. La bonté de coefficients de prédiction Q2 de deux modèles est également assez élevée: 0,970 et 1,00 respectivement.

L'aspect des courbes de réponse prévu, calculé avec les formules (V-41) et (V-42) est respectivement représenté sur la figure V.11.

Les valeurs des coefficients associées aux facteurs dans les modèles mathématiques montrent que l'effet de la température sur le nombre de décharges est plus important que celui du potentiel initial. Cet effet est observé dans les trois modèles mathématiques.

Le point intéressant révélé par l'examen des coefficients des deux modèles polynomiaux est que l'effet du potentiel initial V_0 , et dans une moindre mesure celle de la température T , est plus forte sur le nombre de décharges partielles positives, que sur le nombre de décharges partielles négatives (figure V.10 et V.11). Cela pourrait refléter le fait que les mécanismes physiques qui affectent l'évolution partielle des décharges positives sont plus influencés par ce facteur que ceux qui sont responsables de l'évolution négative des décharges partielles dans les structures diélectriques mixtes.

Les figures V.10 et V.11 montre que dans l'intervalle $[0^\circ \text{C} - 28^\circ \text{C}]$, la température n'affecte pas significativement le nombre de décharges partielles, de l'autre côté, dans l'intervalle $[-28^\circ \text{C} - 0^\circ \text{C}]$, elle a une influence importante, la diminution de la température accroît le nombre de décharges partielles. Il peut également être noté que l'augmentation du potentiel accélère le nombre initial de décharges partielles (figure V.11).

Un autre résultat intéressant est l'influence de la tension qui est plus grande sur le nombre de décharges négatives (N-) (figure V.11).

Par conséquent, la méthodologie des Plans d'expériences se révèle être un outil efficace dans l'analyse de l'évolution des décharges partielles dans les structures diélectriques mixte composée de polypropylène imprégné de Jarylec. Des modèles mathématiques ont permis à la quantification de l'effet de chaque facteur considéré (T , V_0). Les résultats montrent que la basse température a une plus grande influence sur le nombre de décharge que la tension initiale qui a été expliquée par la viscosité du liquide imprégné. Par ailleurs, il est constaté que la tension a un effet important sur l'apparition de décharge négative (N-) et de l'influence moins importante sur la décharge positive (N +). Comme conséquence des décharges partielles sont plus prononcées dans les climats froids, comme au matin d'hiver.

Conclusion

Les résultats présentés nous montrent que l'influence de l'apparition de décharges commence lorsque la viscosité du liquide augmente. Par conséquent la durée de vie des cavités gazeuses formées par ces avalanches augmente aussi. En effet, la viscosité du jarylec varie fortement avec la température, par exemple, le rapport entre la viscosité du jarylec à $T=-30\text{ °c}$ et $T=20\text{°c}$ est égale à 13.

Nous notons que l'influence de la température se traduit par l'augmentation du nombre de décharges car l'augmentation de la durée de vie de la bulle a pour conséquence l'augmentation de la probabilité de décharges.

Références bibliographiques du chapitre V

- [1] J.GOUPY and L.CREIGHTON « *Introduction Aux Plans D'expériences* » 3^{ème} édition, Dunod. Paris 2006.
- [2] L.ERIKSSON, E.JOHANSSON, N. KETTANEH-WOLD ; C. WIKSTROM and S. Wold « *Design of experiments. Principles and Applications* », Learnways AB, Stockholm, 2000.
- [3] N.L.FRIGON and D. MATHEWS « *Practical Guide To Experimental Design* » Wiley, 2016.
- [4] C.R.HICKS and K.V. TURNER, « *Fundamental Concepts In The Design Of Experiment* » Oxford, Oxford University Press, 2017.
- [5] T.MORI « *The new experimental design. Taguchi's approach to quality Engineering* » Dearbon, Michigan ; American Supplier istitute, 1993.
- [6] P.J.ROSS ; « *Taguchi techniques for quality Engineering* » New York : MC Graw Hill, 1988.
- [7] G.TAGUCHI, E.A.ELSAYED and T.C.HSIANG « *Quality Engineering in production system* » New york, MC Graw Hill, 1989.
- [8] Y.WU and W.H.MOORE « *Quality Engineering product and process optimisation* » Dearbon, Michigan ; American Supplier istitute, 1986.
- [9] J. Goupy; « *Plans D'expériences Pour Surface De Réponse* » Edition, Dunod ; 1999.
- [10] G.E.P.BOX and N.R.DRAPER « *Empirical models-building and response surface* » John Wiley and sons; 1987.
- [11] J.J.DROESBEKE; J.FINE and G.SAPORTA « *Plans d'expériences-Applications à l'entreprise* » Edition. Technip; 1997.
- [12] C.G. KARAGIANNOPOULOS, « *A model for dielectrics experiencing partial discharges under high electric fields* », J. of Electrostatics, 65(8), 535 – 541. 2007.
- [13] A. CAVALLINI, G.C. MONTANARI and F. CIANI, « *Analysis of partial discharge phenomena in paper oil insulation systems as a basis for risk assessment evaluation* », in Proc. IEEE. Int. Conf. on Dielectric Liquids (ICDL), Portugal, 241– 245. , 2005.
- [14] M. POMPILI and C. MAZZETTI, « *Partial Discharge Behavior In Switching-Surge-Aged Oil-Paper Capacitor Bushing Insulation* », IEEE. Trans. on Dielec. and Elec. Insul. 9(1), 104 – 111. 2002.
- [15] M. NEMAMCHA, J.P. GOSSE and B. GOSSE, « *Effect Of Partial Discharge On Impregnated Polypropylene Films* », IEEE. Trans. on Dielec. and Elec. Insul., 01(4),

578 – 484,1994.

- [16] R.HAMMAL, P.RAIN, J. P.GOSSE and C. HANTOUCHE, «*Characterization of partial discharge in impregnated capacitor*», in Proc. 12th Int. Conf. on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids (ICDL), Rome, 171 – 174. 1996.
- [17] K.SMILI and L.HEROUS, «*Study and optimization of the partial discharges in capacitor model at different temperatures*», Syntheses review 33: 165 - 174, 2016.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusion Générale

Au cours de ce travail, nous avons étudié les décharges partielles apparaissant dans un modèle de condensateur au polypropylène imprégné sous tension alternative.

Dans notre cellule d'étude, les décharges apparaissent en bord d'armature. Nous retrouvons comme dans des travaux antérieurs deux régimes de décharges partielles. Le premier régime correspond à des avalanches électroniques en phase liquide dans l'imprégnant. Ces décharges apparaissent uniquement en polarité négative de la tension. Ces décharges ont une intensité de 0.1 à 0.2 pC et sont stables au cours du temps pour toute la gamme de la température étudiée, elles apportent une énergie suffisante pour vaporiser le liquide. Dans le second régime de décharge, on a relevé que les décharges provoquent le claquage de la cellule au bout de quelques minutes maximum.

La transition entre les deux régimes se matérialise par une augmentation brutale de la fréquence et de l'intensité des décharges ainsi que par le changement des allures des distributions de décharges dans la phase.

L'effet de la température se traduit par l'augmentation de la fréquence de décharges et non pas sur la charge elle-même car l'augmentation de la durée de vie d'une bulle a pour conséquence l'augmentation de la probabilité de décharge dans cette bulle. Il en résulte que le claquage, qui est vraisemblablement le résultat des décharges du second régime, survient à une tension plus basse à basse température qu'à température ambiante.

Cette étude nous a permis de tester l'aptitude des moments d'ordre 3 et 4 issus des distributions des décharges dans la phase de la tension à caractériser les décharges étudiées pour toute la gamme de température.

La méthodologie des Plans d'expériences se révèle être un outil efficace dans l'analyse de l'évolution partielle des décharges dans les structures diélectriques mixte composée de polypropylène imprégné de Jarylec. Des modèles mathématiques ont permis à la quantification de l'effet de chaque facteur considéré (T , V_0). Les résultats montrent que la basse température a une plus grande influence sur le nombre de décharge que la tension initiale qui a été expliquée par la viscosité du liquide imprégné. Par ailleurs, il est constaté que la tension a un effet important sur l'apparition de décharge négative (N-) et une influence moins importante sur la décharge positive (N+). Comme conséquence, On a relevé que les décharges partielles sont plus prononcées dans les climats froids, comme au matin d'hiver.

Perspectives

Les techniques exposées au cours de ce travail se sont avérées performantes pour l'analyse des isolations mixtes soumises à fort champ. Nos travaux sont loin d'être complets et il serait souhaitable de poursuivre les recherches avec une orientation sur les aspects suivants :

- Cette étude peut être complétée par l'étude des décharges générées par d'autres défauts tels que les particules ou par la présence de plusieurs défauts (exemple : plusieurs cavités).
- Une extension des mesures à d'autres matériaux isolants d'Equipements Electriques et Electroniques nous paraît également indispensable.
- Une étude plus poussée en fonction de la température et du taux d'humidité environnants nous paraît aussi indispensable.
- Il serait souhaitable d'approfondir l'étude par la méthode des plans d'expériences des effets et des interactions entre d'autres facteurs qui peuvent jouer un rôle important sur l'évolution des décharges partielles.

Annexe chapitre V

Annexe Chapitre V

Table de Student :

TEST	DE	STUDENT
	BILATERAL	
	Risque 5 %	Confiance 95 %
v(DDL)	t(crit)	t(crit)
1	12,70	63,66
2	4,30	9,93
3	3,18	5,84
4	2,78	4,60
5	2,57	4,03
6	2,45	3,71
7	2,37	3,50
8	2,31	3,36
9	2,26	3,25
10	2,23	3,17
11	2,20	3,11
12	2,18	3,06
13	2,16	3,01
14	2,15	2,98
15	2,13	3,95
16	2,12	2,92
17	2,11	2,90
18	2,10	2,98
19	2,09	2,86
20	2,08	2,85

TABLE DE FISCHER – SNEDECOR

	v_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15
v_2													
1		161	199,5	215,7	224,6	230,2	234	236,8	239	240,5	241,9	243,9	245,9
2		18,5	19	19,16	19,25	19,3	19,33	19,35	19,4	19,38	19,4	19,41	19,43
3		10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,7
4		7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6	5,96	5,91	5,86
5		6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62
6		5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,1	4,06	4	3,94
7		5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	3,57	3,51
8		5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,5	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22
9		5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01
10		4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85
11		4,84	3,98	3,59	3,36	3,2	3,09	3,01	2,95	2,9	2,85	2,79	2,72
12		4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3	2,91	2,85	2,8	2,75	2,69	2,62
13		4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,6	2,53
14		4,6	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,7	2,65	2,6	2,53	2,46
15		4,54	3,68	3,29	3,06	2,9	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,4
16		4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35
17		4,45	3,59	3,2	2,96	2,81	2,7	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31
18		4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27
19		4,38	3,52	3,13	2,9	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23
20		4,35	3,49	3,1	2,87	2,71	2,6	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,2
21		4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18
22		4,3	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,4	2,34	2,3	2,23	2,15
23		4,28	3,42	3,03	2,8	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,2	2,13
24		4,26	3,4	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,3	2,25	2,18	2,11
25		4,24	3,39	2,99	2,76	2,6	2,49	2,4	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09
26		4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07
27		4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,2	2,13	2,06
28		4,2	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04
29		4,18	3,33	2,93	2,7	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,1	2,03
30		4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01
40		4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2	1,92

60		4	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,1	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75
120		3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66
infini		3,84	3	2,6	2,37	2,21	2,1	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57