

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat

Département : Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Etude des caractéristiques des matériaux isolants par la méthode de DPS

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : Bourekba Marwa

DEVANT LE JURY

Président :	M Herous L	Pr	U.B.M. Annaba
Directeur de mémoire :	M Herous L	Pr	U.B.M. Annaba
Examineurs :	M Rachedi MF	MCA	U.B.M. Annaba
	M^{elle} Menasria Y	MCA	U.B.M. Annaba
	M Meridjet MS	MCA	U.B.M. Annaba

Année 2019

Remerciement

Qu'il nous soit permis, ici, de dire notre gratitude à ceux qui nous ont donné beaucoup de soins et d'attention à l'élaboration de ce modeste travail et qui nous ont guidés sur le chemin de la réussite, en espérant que ce mémoire soit le reflet de la bonne formation que nous avons reçue.

Nous remercions Allah tout puissant de nous avoir donné le courage, la force morale et physique, pour achever ce travail.

On tient à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur Pr L. Herous qui nous a conseillé et orienté tout au long de la réalisation de ce Projet. Les discussions nombreuses et stimulantes que nous avons eues ont indéniablement contribué à éclairer le travail.

On tient également à formuler nos remerciements en signe de gratitude et de reconnaissance aux membres de Jury qui ont pris la peine de lire ce modeste travail, de le corriger et de nous honorer de leur présence et enfin d'évaluer cette recherche.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère WARRA, source de tendresse et d'amour pour leur soutien tout le long de notre vie scolaire.

Mon père MFD CHERRI, qui m'a toujours soutenu et qui a fait tout possible pour m'aider.

Mon oncle Saleh et sa femme Meriem et notre bébé d'amour Zeynouba, Je te suis très reconnaissante, et je ne te remercierai jamais assez pour ton amabilité, ta générosité, ton aide précieuse.

Mon frère AYMFN et ma sœur BOUCHRA, que Je les aime beaucoup.

Ma grande mère j'aurais tant aimé que tu sois présente. Que Dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde

Ma grande famille.

Mes cher(e)s ami(e)s, et enseignants.

Tout qu'on collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que dieu leur accorde santé et prospérité

BOURBA MARWA

Résumé :

Le processus de vieillissement des isolants organiques solides sous champ électrique intense ou l'évolution des charges électrostatiques sur la surface des matériaux isolants constitue le principal intérêt de notre présent travail. Malgré les différents avantages qu'offre l'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique, l'expérience montre que pour de nombreuses raisons ces isolants ont des défaillances qu'ils soient utilisés sous champs continus ou alternatifs. De ce fait, il est intéressant d'étudier les caractéristiques de l'isolant sous l'effet de la tension. Dans notre travail, nous présentons les résultats d'une étude menée sur l'analyse de l'écoulement d'ions négatifs et positifs déposés en surface dans le Polyéthylène téréphtalate (PET). En effet, il est important de pouvoir diagnostiquer la capacité de ces matériaux à évacuer les charges et comprendre leur dynamique. La méthode de mesure du potentiel en surface des matériaux est une technique longuement éprouvée qui permet de répondre à cette problématique.

Mots clés : isolant, charge, DPS, effet couronne, PET.

Abstract:

The aging process of solid organic insulators in an intense electric field or the evolution of electrostatic charges on the surface of insulating materials is the main interest of our present work. Despite the various advantages offered by the use of these materials in electrical insulation, experience shows that for many reasons these insulators have failures that they are used under continuous or alternating fields. Therefore, it is interesting to study the characteristics of the insulator under the effect of the voltage. In our work, we present the results of a study conducted on the analysis of the flow of negative and positive ions deposited on the surface polyethylene terephthalate (PET). Indeed, it is important to be able to diagnose the ability of these materials to evacuate loads and understand their dynamics. The method of measuring the surface potential of materials is a long-proven technique that makes it possible to respond to this problem.

Keywords: insulator, charge, DPS, corona effect, PET.

الملخص :

إن عملية تلف العوازل العضوية الصلبة تحت تأثير حقل كهربائي مكثف أو تطور الشحنات الإلكترونية على سطح المواد العازلة هي الاهتمام الرئيسي لعملائنا الحالي. على الرغم من المزايا المختلفة التي يوفرها استخدام هذه المواد في العزل الكهربائي ، إلا أن التجربة توضح أن هذه العوازل لديها أسباب عديدة للإخفاق في استخدامها تحت الحقول المستمرة أو بالتناوب. لذلك، من المثير للاهتمام دراسة خصائص العازل تحت تأثير الجهد. في عملنا ، نقدم نتائج دراسة أجريت على تحليل تدفق الأيونات السالبة و الموجبة المودعة على السطح في البولي إيثيلين تيريفثاليت (PET) . في الواقع ، من المهم أن تكون قادرًا على تشخيص قدرة هذه المواد على إخراج الشحنات وفهم ديناميكياتها. طريقة قياس الإمكانيات السطحية للمواد هي تقنية مثبتة منذ فترة طويلة تجعل من الممكن الاستجابة لهذه المشكلة.

الكلمات المفتاحية : عازل، شحنة ، DPS ، تأثير كرونا ، PET .

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre I : Etat de l'art	
I.1 Introduction	4
I.2 Bref historique sur les matériaux isolants	4
I.3 Définition et terminologie	6
I.3.1 Polymère	6
I.3.2 Structure moléculaire des polymères solides :	8
I.3.2.1 Structure amorphe	8
I.3.2.2 Structure semi cristalline	8
I.3.3 Exemple d'utilisation d'isolants électriques organiques	9
I.3.4 Les thermoplastiques	9
I.3.5 Les thermodurcissables	10
I.4 Problématique	11
I.5 Conclusion	11
Chapitre II : Effet couronne et technique de DPS	
II.1 Introduction	12
II.2 Caractéristiques des matériaux isolants	12
II.2.1 Définition	12
II.2.2 Caractéristiques diélectriques des isolants	13
1) Permittivité	13
2) Rigidité diélectrique	13
3) Résistivité électrique des matériaux	14
4) L'angle de perte	15
II.3 Charge statique	16
II.4 Champ électrique	17

II.5 Technique de DPS	18
II.5.1 Méthodes des dépôts de charges	19
1) Charges par effet triboélectrique	19
2) Charges par rouleau électrostatique	19
3) Effet couronne	20
a) Définition	20
b) Application de la décharge couronne	21
c) Les ions générés par la décharge couronne	22
c.1) Décharge couronne positive	22
c.2) Décharge couronne négative	23
d) Phase de dépôt	24
e) Phase de mesure	24
II.5.2 Phénomène physique et mécanique d'évolution	25
II.5.2.1 Conduction de surface	25
II.5.2.2 Polarisation de l'échantillon	26
a) Polarisation électronique	27
b) Polarisation atomique	27
c) Polarisation interfaciale	28
d) Polarisation dipolaire ou l'orientation (Debye)	28
II.5.2.3 Neutralisation par le gaz	29
II.5.2.4 Phénomène piézoélectrique	29
II.5.2.5 Injection de charges	30
II.6 Conclusion	31
Chapitre III : Partie expérimentale et analyse des résultats	
III.1 Introduction	32
III.2 Dispositif expérimental	32

III.2.1 Matériaux utilisé	34
III.2.2 Caractéristiques physiques du PET	35
III.2.3 Propriétés physiques du PET	35
III.2.4 Propriétés mécanique du PET	35
III.3 Analyse des résultats	36
III.3.1 Influence de potentiel initial en polarité négative V0	36
III.3.2 Influence de potentiel initial en polarité positive V0	38
III.4 Conclusion	39
Conclusion générale et perspective	40
Bibliographie	41

Liste de figure

Figure I.1 : Stephen Gray	4
Figure I.2 : Charles_François de Cisternay Dufay	5
Figure I.3 : Benjamin Franklin	5
Figure I.4 : Différents types d'applications des matériaux isolants	7
Figure I.5 : Polymérisation	7
Figure I.6 : Structure amorphe	8
Figure I.7 : Structure cristalline	8
Figure I.8 : Les différences de la liaison chimique entre les thermodurcissables et les thermoplastiques	10
Figure II.1 : Un condensateur remplie par air (ou vide)	13
Figure II.2 : Les différents types des matériaux	14
Figure II.3 : Les contraintes de l'environnement	16
Figure II.4 : Le champ électrique	18
Figure II.5 : Effet triboélectrique	19
Figure II.6 : Diélectrique charge avec un rouleau électrostatique	19
Figure II.7 : Les différentes géométries dans de cas de décharge couronne	20
Figure II.8 : Effet couronne	21
Figure II.9 : Décharge couronne positive	22
Figure II.10 : Décharge couronne négative	23
Figure II.11 : Phase de dépôt	24
Figure II.12 : Phase de mesure	24
Figure II.13 : Différents processus qui peuvent contribuer au déclin de potentiel de surface	25
Figure II.14 : Conduction de surface	25
Figure II.15 : Polarisation de l'échantillon	26
Figure II.16 : Polarisation électronique	27
Figure II.17 : Polarisation atomique	27
Figure II.18 : Polarisation interfaciale	28
Figure II.19 : Polarisation dipolaire	28
Figure II.20 : Neutralisation par le gaz	29
Figure II.21 : Phénomène piézoélectrique	29
Figure II.22 : Injection des charges	30
Figure III.1 : Dispositif expérimental	33
Figure III.2 : Stand expérimental	34
Figure III.3 : Influence du potentiel en polarité négative	36
Figure III.4 : Influence du potentiel élevé	36
Figure III.5 : Influence du potentiel en polarité positive	39

LISTE DES TALEAUX

Tableau I.1 : Exemples d'utilisation des isolants organiques solides	9
Tableau III.1 : Caractéristiques physiques du PET	35
Tableau III.2 : Propriétés physiques de PET	35
Tableau III.3 : Propriétés mécaniques du PET	35

Introduction générale :

Les matériaux isolants sont parmi les éléments vers lesquels se tournent les constructeurs. Ils constituent sans aucun doute l'un des facteurs clés du développement des matériels électrotechniques de demain. Ils tiennent une place de plus en plus importante dans le domaine des applications industrielles.

Les matériaux utilisés aujourd'hui sont extrêmement nombreux et variés. Ils sont parmi ceux dont le choix et l'emploi posent les problèmes les plus délicats à résoudre dans leur conception, leur réalisation et leur exploitation. La pérennité de leur fonction est extrêmement importante puisqu'elle conditionne la fiabilité des dispositifs et des systèmes dans lesquels ils sont intégrés. Ils peuvent être obtenus à partir du règne végétal (bois, coton, etc...) ou du règne minéral (pétrole : quasi totalité des matières plastiques).

Les diélectriques issus du pétrole : les polymères, ont un coût de fabrication bien plus faible et des caractéristiques plus intéressantes. Les polymères occupent une place très importante et se substituent de plus en plus à des matériaux purement inorganiques (verre ou porcelaine) ou à des associations type papier imprégné d'huile.

Les matériaux isolants trouvent des applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. Depuis 2009, de grands constructeurs de voitures ont lancé leur propre gamme de voitures 100% électriques.

Cette conception d'un moteur de nouveau genre entraîne de nouvelles connaissances et de nouvelles compétences à acquérir. Un domaine important dans ce moteur électrique est l'isolation électrique. Elle est l'une des garanties principales du bon fonctionnement du moteur.

Une défaillance d'un matériau isolant électrique induira un vieillissement prématuré du moteur, à savoir la destruction de ce dernier à court ou moyen terme selon la nature du défaut. Par conséquent, les matériaux isolants jouent un rôle prépondérant dans les progrès faits par les matériels électriques. Un isolant est un matériau destiné à empêcher la conduction électrique entre des éléments conducteurs. C'est un matériau de conductivité électrique faible, pratiquement négligeable, utilisé pour séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents.

La défaillance des isolants conduit souvent à des situations catastrophiques entraînant de lourdes conséquences économiques. Grâce à leur performance physico-chimique et pour diverses raisons liées aux performances intrinsèques des matériaux, à la variabilité des propriétés et selon leur nature, aux évolutions des systèmes eux-mêmes, aux conditions de mise en œuvre, à la recyclabilité et à des considérations économiques et politiques, on s'oriente vers ces matériaux, dans l'électrotechnique comme dans bon nombre d'autres domaines (constructions aéronautique et automobile ou encore le bâtiment et médecine). Au sein même des systèmes électriques, les fonctions qu'ils assurent et les contraintes qu'ils doivent endurer en complément de l'isolation électrique sont très variables etc....

Malheureusement ces matériaux sont souvent soumis à des contraintes de différentes natures, particulièrement celle des charges statiques. Ceci, entraîne un vieillissement prématuré du matériau pouvant altérer ses propriétés isolantes.

L'évolution des charges électrostatiques sur la surface des matériaux isolants constitue le principal intérêt de notre présent travail. Malgré les différents avantages qu'offre l'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique, l'expérience montre que pour de nombreuses raisons ces isolants ont des défaillances 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 comprendre les défaillances en prenant en compte les contraintes d'utilisation, mais aussi d'améliorer les paramètres de mise en œuvre. La fonction d'isolation est primordiale du fait qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique.

Les propriétés diélectriques évoluent avec le temps sous l'action combinée du champ électrique et des diverses agressions que leur environnement ne manque pas de leur prodiguer. Leur fragilité chimique les rend vulnérables aux attaques atmosphériques ou rayonnements, à la chaleur et les contraintes résultantes des radiations de grande énergie dans le domaine nucléaire.

Aujourd'hui, la grande concurrence qui motive/stimule les ingénieurs, les chercheurs et les scientifiques à travers le monde permet de développer de nouveaux matériaux dits «composites» qui donnent de nouvelles pistes pour leur utilisation.

La plupart de ces tentatives de développement se concentrent principalement autour de l'élaboration de critères pour le design (CAO) et de la sélection de matériaux performants.

Les concepteurs préfèrent davantage combiner ces deux techniques qui permettent d'aboutir à un produit final pouvant résister à des conditions de fonctionnement sévères avec une certaine sûreté de fonctionnement.

L'accumulation des charges à la surface ou en volume des polymères sous contraintes électriques est à l'origine du renforcement localisé du champ électrique conduisant à l'apparition de décharges partielles suivies de claquage du diélectrique. Il est important de pouvoir analyser le mode d'écoulement des charges électriques présentées sur la surface et dans le volume de l'isolant. Dans les deux cas, suivant les conditions imposées par l'environnement, il peut exister différents mécanismes qui conduisent au claquage.

C'est pour cette raison que la plupart des caractéristiques électriques sont mesurées après que les matériaux ont été soumis à un conditionnement normalisé. La publication 212 de la CEI définit un certain nombre d'atmosphères préférentielles (température et humidité relative), ainsi que les durées recommandées pour le conditionnement des matériaux dans ces atmosphères. Des préconditionnements, visant à effacer l'histoire antérieure des éprouvettes, sont parfois conseillés.

Dans ce manuscrit, nous abordons une problématique essentielle liée à l'évolution des charges déposées sur la surface des isolants au cours du temps, le processus de conduction, la nature et la migration des charges sur la surface de l'isolant. La caractérisation des isolants, l'amélioration ou la prédiction de leur durée de vie passe par une connaissance parfaite des courants résiduels qui peuvent être véhiculés dans les matériaux isolants.

Chapitre I : Etat de l'art

I.1 Introduction :

Dans cette partie et pour déterminer des matériaux candidats à des applications comme isolants électriques à usage extérieur et intérieur, nous présentons tout d'abord un état de l'art des matériaux polymères ainsi que leurs différentes familles et a leurs caractéristiques.

Puis, nous aborderons les propriétés diélectriques à considérer et qui déterminent en partie le choix du matériau adéquat.

Enfin, nous terminerons par les principaux facteurs de vieillissement des polymères et les différentes contraintes auxquelles sont exposés les diélectriques.

I.2 Bref historique sur les matériaux isolants :

Les matériaux ont de tout temps défini le niveau de développement de notre civilisation. Les premiers pas de l'humanité sont ainsi été marqués par l'Age de la Pierre, du Bronze et du Fer.

Aujourd'hui, ils jouent un rôle déterminant dans toutes les mutations technologiques. Quelle que soit sa spécialité, l'ingénieur ne peut ni concevoir, ni construire de nouveaux objets sans tenir compte des propriétés des matériaux qu'il utilise.

En 1731, paraît dans les « *Philosophical Transactions* », la publication de la « *Royal Society* », un texte qui allait faire accomplir un premier pas de géant à la toute jeune science électrique [1]. Son auteur, **Stephen Gray**, il a été le premier à différencier les matériaux conducteurs des matériaux isolants. Il a construit la première ligne de transport électrique dont la longueur était de 300 mètres.

Il a compris que la ficelle et le laiton ont un comportement différent de la soie. Il a su que la soie isolera parfaitement la ficelle.



Figure I.1 : Stephen Gray [1]

Charles-François de Cisternay Dufay (1698-1739), un jeune physicien français [1], membre de l'Académie des Sciences de Paris.

Dufay, reprend la liste impressionnante des corps déjà testés par Gray et ses prédécesseurs : l'ambre, les résines, les pierres précieuses, les verres de toutes natures, le soufre, la laine, la soie, les plumes, les cheveux.

Il y ajoute des corps aussi divers que le marbre, le granit, le grès etc.... Il résulte de ces observations une première conclusion : Il propose de désigner sous le nom de « *corps électriques* », ceux qui, comme le verre, peuvent être électrisés par frottement. Ceux qui, tels les métaux, ne peuvent l'être, constitueront la classe des corps « *non électriques* » [1].



Figure I.2 : Charles-François de Cisternay Dufay (1698-1739) [1]

Il faut attendre Franklin (1706-1790) [1] pour que le vocabulaire soit mieux adapté [2]. Cela étant ainsi, on pourrait abandonner comme impropres les termes « électrique par soi même » et « non-électrique » ; et puisque toute la différence est que quelques corps conduisent la matière électrique et que les autres ne la conduisent pas, on pourrait leur substituer les termes de « **conducteur** » et « **non-conducteur** ».

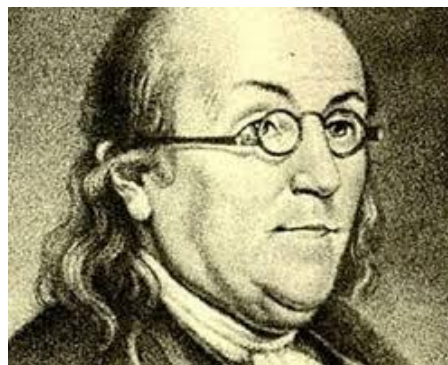


Figure I.3 : Benjamin Franklin [1]

A partir de 1970, le procédé de polymérisation a connu un essor spectaculaire dans la fabrication des matériaux isolants synthétiques [2].

Les matériaux polymères sont synthétisés par polymérisation, les polymères sont formés de macromolécules constituées par la liaison chimique (covalente) d'une ou plusieurs petites molécules de base (monomères). Ces macromolécules sont reliées entre elles par des liaisons faibles de type Van der Waals ou liaisons hydrogènes.

I.3 Définition et terminologie:

I.3.1 Polymère :

Les isolants électriques appelés également matériaux diélectriques, sont composés d'une matière ne contenant aucune charge libre susceptible de conduire les électrons. En effet, pour se déplacer, l'électricité a besoin de transférer les charges électriques qui la composent. Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres [2,3].

Depuis plusieurs années, les applications des isolants solides, notamment les polymères ont connus un élargissement dans le domaine industriel à cause de leurs excellentes propriétés électriques, thermiques et mécaniques.

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » parties [2,3]. 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, et meros : partie).

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). Si l'unité de base d'un polymère est constituée d'un seul type de monomère, le matériau est dit homopolymère.

Dans l'autre cas, le matériau est un copolymère. Le nom des polymères est généralement dérivé de celui du monomère en ajoutant le préfixe poly Exemple : polyéthylène, poly (acide glycolique), polytétrafluoroéthylène, polymideetc.

Une macromolécule est caractérisée par sa masse molaire M qui est en rapport avec le degré de polymérisation x représentant le nombre d'unités de la répétition dans la macromolécule par la relation simple :

$$M = x \cdot M_0$$

Où M_0 est la masse molaire de l'unité de la répétition.

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.... [3,4]

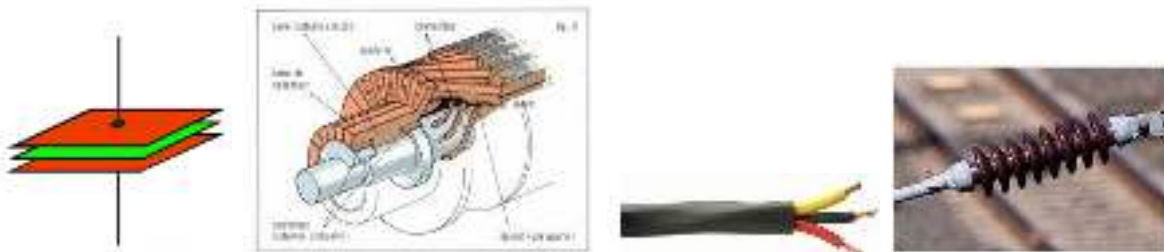


Figure I.4 : Différents types d'application des matériaux isolants [2,3]

La structure chimique d'un polymère, ou plus précisément la nature des atomes le constituant, est donné par l'unité constitutive.

Selon les définitions, on parle de macromolécule lorsque la masse molaire d'une molécule est supérieure à 5000 g/mol ou 100 unités monomères [5]. En dessous de 1000g/mol, on parle de molécules et entre 1000 et 5000 g/l d'oligomères. On peut citer quelques exemples d'unités constitutives de polymères et leurs abréviations normalisées en électrotechnique:

- Le polyéthylène (PE) qui est largement utilisé comme isolant dans les câbles à cause des faibles pertes diélectriques, une faible permittivité, une résistivité élevée et un coût modéré.
- Le polytétrafluoroéthylène (PTFE Téflon®) est aussi un bon isolant et a une tenue en température élevée.
- Le polypropylène (PP) qui est une polyoléfine comme le polyéthylène qui est principalement utilisé dans les condensateurs.
- Les polyesters comme le polyéthylène téréphtalate (PET) ou le polyéthylène naphtalate (PEN) ont une très bonne tenue en température et sont utilisés dans les condensateurs.



Figure I.5 : Polymérisation

I.3.2 Structure moléculaire des polymères solides :

I.3.2.1. Structure amorphe :

Les zones dites « amorphes » correspondent à une structure comparable à celle des liquides caractérisée par l'absence d'ordre à grande distance.

Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation de celles-ci dans des zones submicroniques [6].

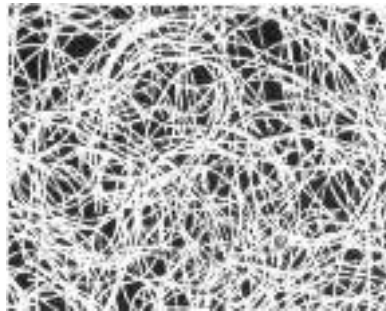


Figure I.6 : Structure amorphe

I.3.2.2 Structure semi-cristalline :

Sous l'influence de certaines actions physiques, des zones ordonnées, suivant un réseau périodique, pourront apparaître au sein du polymère.

Dans ces zones dites cristallines, les chaînes resteront parallèles les unes aux autres, et entre elles s'établiront un réseau d'interactions transversales qui maintiendra la solidité de la structure (figure I.7).

Du fait de l'existence des enchevêtrements entre les chaînes qui se conservent dans le solide pendant la formation des zones cristallines, la régularité du parallélisme des chaînes se trouve limitée à des portions restreintes des longueurs de celles-ci [6].



Figure I.7 : Structure cristalline

I.3.3 Exemples d'utilisation d'isolants électriques organiques :

Dans le domaine électrique, le champ d'application des isolants organiques solides (les polymères) est étendu : lignes de transport d'énergie, câbles de télécommunication, condensateurs, alternateurs, moteurs électriques, systèmes électroniques et composants de puissance terrestres et embarqués sur satellites...

L'utilisation de ces matériaux dans l'isolation électrique présente plusieurs avantages tels que : d'excellentes propriétés électriques (résistivité, rigidité, permittivité), une bonne tenue mécanique et tribologique et une stabilité dimensionnelle. Ajoutons à cette liste, la mise en œuvre facile, le faible poids et pour certains la possibilité de recyclage.

Le tableau I.1 présente quelques exemples d'utilisation d'isolants organiques solides dans les systèmes de génie électrique.

Tableau I.1 : Exemples d'utilisation des isolants organiques solides

Exemples de polymères	Applications
Polyéthylène (PE)	Câbles HT, HF
Polyéthylène réticulé (PR)	Câbles THT
Polychlorure de vinyle (PVC)	Câbles BT
Polypropylène (PP)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène téréphtalate (PET)	Condensateurs de puissance
Polyéthylène naphthalène (PEN)	Câbles, condensateurs Câbles BT des alimentations des avions

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

I.3.4 Les thermoplastiques :

Les thermoplastiques sont des polymères qui se déforment et sont façonnables sous l'action de la chaleur. Cette propriété permet leur recyclage [08,02].

On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants.

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.

De par leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour les installations de tuyauteries industrielles, commerciales et d'habitations.

I.3.5 Les thermodurcissables :

Les polymères thermodurcissables prennent leur forme définitive au premier refroidissement, la réversibilité est impossible [5,7].

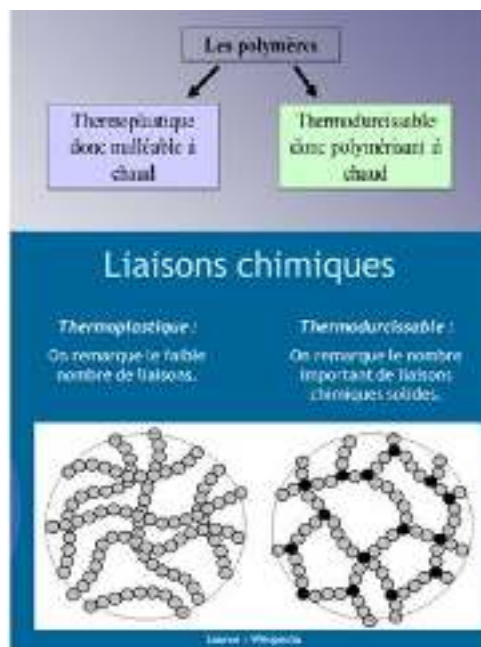


Figure I.8 : La différence de la liaison chimique entre les thermoplastique et thermodurcissable

I.4. Problématique :

Le système d'isolation électrique est soumis à de nombreuses contraintes : thermiques, environnementales, mécaniques et électriques. La compréhension des différents mécanismes mis en jeu par ces contraintes tant au niveau matériau seul qu'au niveau système complet est donc essentielle.

Les travaux effectués et présentés ici s'attachent à comprendre ces différents comportements du système d'isolation. Nous allons essayer de comprendre l'évolution des caractéristiques des matériaux isolants soumis à une contrainte électrique.

Pour cela, nous allons utiliser le stand expérimental du Laboratoire de Génie électrique de l'Université de Guelma. Ce dernier nous permettra de procéder à un dépôt de charges sur la surface du matériau en appliquant une série de décharges électriques sur sa surface par la géométrie Pointe/plan. Nous analyserons ensuite le matériau par la méthode de déclin de potentiel de surface. C'est dans ce contexte que notre travail est réalisé sous la forme de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état de l'art sur les matériaux isolants leur importance et leur application.

Dans le deuxième chapitre, nous étudierons le phénomène de dépôt de charges par effet couronne et certaines caractéristiques des diélectriques.

Le troisième chapitre est consacré au dispositif expérimental et à la description du matériau utilisé.

Enfin dans le quatrième chapitre nous présenterons les résultats de l'évolution des charges et l'interprétation des résultats.

Nous terminerons par une conclusion générale et les perspectives.

I.5. Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de présenter les différents matériaux diélectriques, l'histoire de leur évolution ainsi que leur importance dans pratiquement tous les domaines technologiques.

Nous avons aussi décrit à partir de cette étude l'objectif de notre travail et notre problématique.

Chapitre II : Effet couronne et Technique de DPS

II.1 Introduction :

La technique du déclin de potentiel de surface est une méthode d'investigation des propriétés électriques des matériaux isolants.

Son intérêt réside essentiellement dans sa simplicité et sa puissance dans la caractérisation de l'aptitude d'un matériau à évacuer une charge électrique déposée à sa surface.

Elle s'est largement répandue depuis que la mise en charge du matériau s'effectue par une décharge couronne et par le fait que la mesure du potentiel s'effectue par une sonde électrostatique.

Par conséquent ceci permet d'éviter le moindre contact physique avec la surface à étudier.

II.2 Caractéristiques des matériaux isolants :

II.2.1 Définition:

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée : 10^8 à 10^{16} $\Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres.

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.

II .2.2 Caractéristiques diélectriques des isolants :

1) Permittivité relative :

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) :

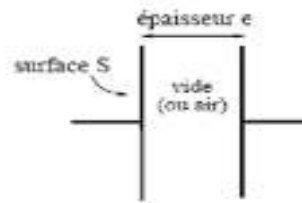


Figure II.1 : Un condensateur remplie par air (ou vide)

Sa capacité est :

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

Où $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m est la permittivité absolue du vide (ou de l'air).

Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient :

$$C_0 = \epsilon_r C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

La permittivité relative est définie par le rapport :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

La permittivité absolue est :

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

Pour l'air, les gaz et le vide, $\epsilon_r = 1$. Donc $\epsilon = \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Pour tous les autres isolants, $\epsilon_r > 1$.

2) Rigidité diélectrique :

Si on augmente la tension à laquelle est soumis un isolant au delà d'une certaine valeur appelée tension de claquage, il apparaît un arc électrique dans l'isolant : courant intense traversant l'isolant en suivant un chemin formé par l'arc lui même.

Dans ce cas, l'isolant est percé : il y a rupture diélectrique ou claquage destruction de l'isolant, irréversible pour les isolants solides (carbonisation), réversible pour les isolants gazeux et liquides (recombinaison des ions avec des électrons).

Par rapport aux positions relatives de la direction du champ électrique et des surfaces principales de l'isolant, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale.

La rigidité diélectrique dépend de :

- la fréquence, la forme et la durée d'application de la tension ;
- la température, la pression et l'humidité de l'atmosphère ;
- la présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...).

3) La résistivité électrique des matériaux :

La capacité d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique est appelée **résistivité**: elle correspond à la résistance d'un tronçon de matière de 1m de longueur et de 1m² de section. Son unité est l'ohm. Mètre [$\Omega.m$]. Son symbole est ρ ; Plus la résistivité d'un matériau est grande, plus le courant électrique aura de la peine à le traverser.

La résistivité varie en fonction de la température (figure II.2) : elle augmente avec elle. Quand la température de conducteur descend à une valeur proche du zéro absolu ($0^{\circ}K = -273.15^{\circ}C$: c'est le moment où toutes les particules du corps seraient immobiles), la résistance du matériau est presque nulle.

Pour un métal très pur, la résistivité peut varier d'un facteur 10^5 pour une température proche de $0^{\circ}K$ à la température ambiante : $20^{\circ}C$.

La résistivité ρ est une caractéristique intrinsèque du matériau et elle varie de $1,6 \cdot 10^{-8} \Omega.m$ pour un bon conducteur comme l'argent à $10^{16} \Omega.m$ pour un bon isolant comme le quartz fondu ..

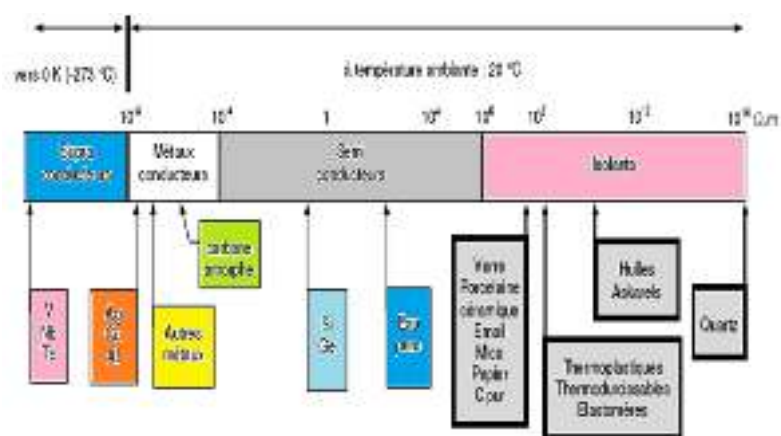


Figure II.2 : Les différents types des matériaux

4) L'angle de perte :

La valeur $\tan\delta$ est appelée facteur de dissipation diélectrique.

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant :

- bon isolant → résistance d'isolement R élevée δ faible ;
- mauvais isolant → R faible δ élevé.

En pratique, le facteur de dissipation $\tan\delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4}

On a besoin des matériaux isolants qui ont d'autres caractéristiques:

- Tension de claquage élevée.
- Résistivité mécanique élevée.
- Durabilité.
- Fiabilité.
- Opérationnels sur des grandes plages de température.
- Résistant aux agents chimiques.

Les propriétés diélectriques évoluent avec le temps sous l'action combinée du champ électrique et des diverses agressions que leur environnement ne manque pas de leur prodiguer.

Leur fragilité chimique les rend vulnérables aux attaques atmosphériques ou rayonnements, à la chaleur et les contraintes résultantes des radiations de grande énergie dans le domaine nucléaire, malheureusement, les matériaux sont soumis à des contraintes diverses.

Les principales contraintes sont :

Contraintes électriques :

Champ électrique, charge d'espace, décharge partielle, arborescence électrique, etc....

Contraintes thermiques :

Echauffement des conducteurs par effet joule et par effet de Foucault, pertes magnétiques (transformateur), pertes diélectriques, etc....

Contraintes mécaniques :

Effort sur les conducteurs, forces dues aux mouvements (machines tournantes), vibrations, forces de charge (isolateur de ligne), etc....

Contraintes climatiques :

Rayonnement solaire, intempéries, pollutions (marine, industrielle), humidité, pluie, gel, air, ozone, etc....

Contraintes radiatives :

Dans les applications nucléaires, spatiale, médicale, résistants aux rayonnements (α , β , γ , x), etc.

Contraintes environnementales :

Impact sur l'environnement en termes de rejet de toute nature (gazeux, solides, liquides), la toxicité des produits, traitement en fin de vie (recyclage), etc....



Figure II.3 : Les contraintes de l'environnement

Les charges statiques qui apparaissent sur les polymères isolants existent à la surface de ceux-ci pendant des temps très longs. Il est important de pouvoir analyser le mode d'écoulement des charges électriques présentées sur la surface et dans le volume de l'isolant.

Dans les deux cas, suivant les conditions imposées par l'environnement, il peut exister différents mécanismes qui conduisent au claquage.

Les charges statiques produisent des champs qui ne sont pas nuisibles, mais plus leur nombre augmente plus l'effet du champ augmente et son effet devient important sur les caractéristiques intrinsèques du diélectriques [7].

II.3 Charges statiques :

Des expériences menées par **Coulomb** en 1785 [6], ont montré que "la force d'interaction mutuelle entre deux objets électrisés ponctuels est inversement proportionnelle au carré de leur distance"

$$F = A \cdot \frac{1}{d^2}$$

Par ailleurs, si l'on maintient la distance identique, mais que l'on change l'un des objets, la force exercée varie avec l'objet électrisé. Par définition, Coulomb a dit que la force constatée était proportionnelle à la "charge électrique portée par l'objet". Cette charge est habituellement désignée par la lettre q .

C'est donc ainsi que l'on définit la quantité d'électricité.

Etant donné la loi mécanique de l'action et de la réaction, la force d'interaction entre deux charges ponctuelles est proportionnelle à chacune de ces deux charges :

$$F = k \cdot \frac{qq'}{d^2}$$

Dans le système d'Unités International (SI) fixé le 3 mai 1961, l'unité de charge est le Coulomb.

La charge de l'électron est égale à :

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{coulomb}$$

Et la constante k dans le vide vaut

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Avec

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9}$$

Donc

$$k = 9 \cdot 10^9$$

ϵ_0 est appelée la permittivité absolue du vide.

Le module de la force d'interaction vaut donc

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{qq'}{d^2}$$

II.4 Champ électrique :

Un champ électrique est 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 à mesure qu'augmente la distance à sa source.

Un champ électrique statique (appelé également champ électrostatique) est un champ électrique qui ne varie pas avec le temps (fréquence de 0 Hz). Les champs électriques statiques sont générés par des charges électriques qui sont fixes dans l'espace [5,6].

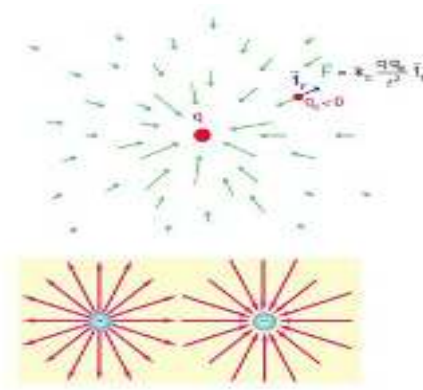


Figure II.4 : Le champ électrique

Une charge q placée dans une région où règne un champ électrique \vec{E} subit une force :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

Le problème principal lié à l'étude de l'électricité statique est la grande difficulté de mesurer le phénomène.

On peut distinguer deux types de mesures : les mesures directes où l'on essaye de déterminer la charge électrique d'un corps et les mesures indirectes où ce sont des propriétés particulières des corps vis-à-vis de l'électricité statique que l'on mesure (résistivité, temps de décharge...) pour comprendre leur comportement électrostatique.

Le problème de la répartition des charges au niveau des surfaces des isolants est également difficile à traiter, très peu de moyens aujourd'hui permettent d'étudier cela.

Les charges statiques créent sur la surface de l'isolant un champ électrique proportionnel à la quantité de la charge, en fonction de l'intensité du champ une modification des caractéristiques du diélectrique qui peuvent mener à la rupture et au claquage.

II.5 Technique de DPS :

La mesure du potentiel de surface se fait à l'aide d'un voltmètre électrostatique muni d'une sonde, par conséquent ceci permet d'éviter le moindre contact physique avec la surface à étudier.

Cette technique de DPS comprend deux phases essentielles :

La première phase consiste à faire un dépôt de charge (positive ou négative) sur la surface du matériau isolant à partir d'une décharge couronne.

La deuxième phase est une quantification par une mesure de l'évolution du potentiel de surface [8].

II.5.1 Méthodes de dépôt de charges :

1) Charges par effet triboélectrique :

L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux ; sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact.

Le frottement impliquant des contacts suivis de séparations, il améliore les conditions de charge. Lorsque deux matériaux différents et électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation.

La charge transférée augmente généralement avec la surface du contact, la pression entre les deux matériaux en contact ainsi qu'avec la vitesse du frottement ; elle diminue avec la rugosité des surfaces de contact.

La charge par effet triboélectrique s'accompagne de génération de chaleur et parfois de transfert de masse. La reproductibilité de la charge est très difficile à obtenir par ce mécanisme [8,9].

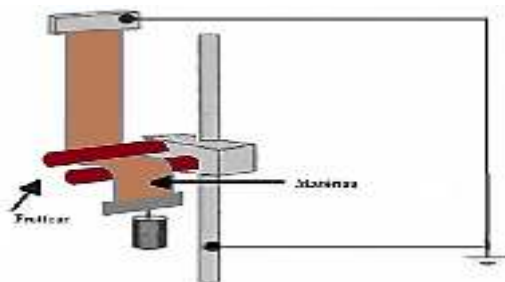


Figure II.5 : Effet triboélectrique

2) Charges par rouleau électrostatique :

Le contact entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrisation.

Un diélectrique peut être aussi chargé avec un rouleau électrostatique en contact avec la surface libre de l'échantillon et dont le potentiel de charge est aussi contrôlé par la source haute tension [9].

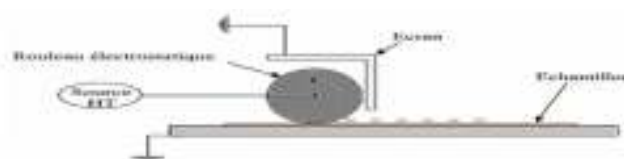


Figure II.6 : Diélectrique chargé avec un rouleau électrostatique

Le transfert de charge au contact entre le rouleau et la surface du diélectrique est très probablement de type électronique. La charge séparée résulte des différences dans la structure électronique des deux corps en contact; elle est influencée tout d'abord par la nature des matériaux et par les traitements subis par leurs surfaces.

Parmi les moyens de dépôt de charges les plus utilisés pour le chargement électrostatique de surface des isolants solides, la décharge couronne est le moyen le plus simple et le plus fiable.

Elle nous donne la possibilité de déposer des charges soit positives ou négatives selon la polarité du système de décharge.

Nous allons présenter dans le cas de décharge couronne le processus physique qui conduisent à la production d'espaces réactives et à leur dispersion.

Ces phénomènes qui ont largement été décrit pour des géométries pointe-plan, pouvons être généralisés à la configuration fil-plan, fil-cylindre, pointe-plan, plan-plan...etc. [10].

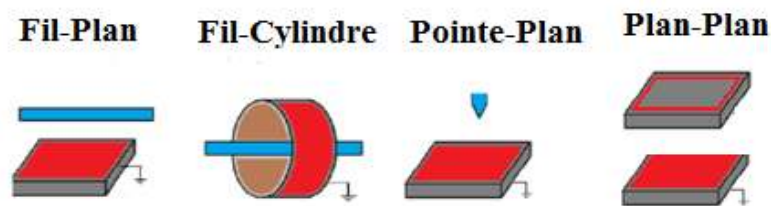


Figure II.7 : Les différentes géométries dans le cas de décharge couronne

3) Effet couronne :

a) Définition :

Est un phénomène de décharge électrique partielle entraînée par l'ionisation du milieu entourant un conducteur. Il apparaît quand le champ électrique dépasse une « *valeur critique* » (mais dont les conditions ne permettent pas la formation d'un arc). Il se manifeste par l'apparition de points lumineux bleuâtres (sur certaines aspérités métalliques) ou lignes lumineuses ou parfois d'une longue « *gaine lumineuse* » qui se forme autour des câbles (conducteurs aériens le plus souvent) transportant du courant sous haute tension.



Figure II.8 : Effet couronne

En général, les effets corona se concentrent sur des éléments saillants des parties métalliques sous tension [11].

La forte densité de charge accumulée sur les pointes donne naissance à un champ électrique important dans le voisinage de la pointe (ce champ est proportionnel à la densité de charge par unité de surface). Ce champ électrique accélère les quelques électrons libres qui se trouvent dans le voisinage et ces électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie cinétique pour à leur tour ioniser d'autres molécules de l'air au voisinage de la pointe, libérant d'autres électrons qui sont accélérés à leur tour, et ainsi de suite.

Il existe donc un faible courant qui passe de l'atmosphère vers la pointe. La recombinaison des électrons avec les ions s'accompagne de l'émission de photons (de lumière) et c'est cette lumière qui génère les microétincelles que l'on peut parfois voir dans l'obscurité.

Pour que le phénomène se produise, le champ électrique doit être suffisamment fort pour accélérer les électrons à une vitesse minimum avant que ceux-ci n'entrent en collision avec les autres molécules, sinon celles-ci ne peuvent être ionisées. C'est pour cela qu'on observe le phénomène à proximité des pointes seulement [12]

b) Application de la décharge couronne :

La décharge couronne présente des aspects utiles recherchés pour ses nombreuses applications : Dépôt de charge en reprographie, traitement de surfaces métalliques et isolantes, textiles, applications biologiques, séparateur électrostatique, dépoussiéreur électrique, neutralisation, production d'ozone, ...etc. Et des aspects nuisible: pertes d'énergie dans les lignes de transmission, perturbations radioélectriques, défaut d'isolement, l'apparition de phénomène de corrosion, photocopieur, laser à azote, refroidissement de composants électroniques, coloration des véhicules ...etc. [11,12].

Dans notre étude, nous allons utiliser l'effet couronne pour déposer des charges statiques sur la surface de notre matériau isolant à l'aide d'une géométrie pointe/plan.

La mise en charge de la surface de l'isolant est effectuée par le principe de la géométrie pointe/plan. La pointe constitue l'électrode à polarité négative reliée à une source HT et

l'isolant dont la face arrière métallisée est mise à la masse, est positionné sous la pointe. Ceci permet d'une part de générer des champs électriques intenses au niveau de la pointe, d'autre part, le lieu de génération est limité au voisinage de la pointe, le risque de claquage est moindre. Par conséquent, des avalanches électroniques ont lieu près de la pointe.

Deux types de cette décharge sont à énumérés. En raison de signe de polarité appliquée au niveau de l'électrode active, on peut différencier deux modèles : « monopolaire et bipolaire ».

Et si on dit bipolaire, c'est qu'on fait allusion à une décharge dite positive et négative sur une certaine fréquence ou période. Si la polarité est positive, la décharge sera donc positive. Dans le cas inverse, elle sera négative.

c) Les ions générés par la Décharge couronne :

Les types d'ion générés dans des décharges couronne positives et négatives ont été déterminés par plusieurs auteurs utilisant des techniques de spectroscopie de masse. Leurs études ont montré que les types d'espèce générées par la décharge couronne dépendent fortement sur le type de gaz présent au voisinage de la pointe. Dans l'air, les espèces dominantes pour une décharge couronne positive sont des ions hydratées avec la formule générale $(H_2O)_nH^+$ où n est un nombre entier qui augmente avec humidité relative. les différents types d'ions générés par la décharge couronne sont (positifs): CO^+ , C^+ , C_2O^+ , C_3O^+ , GO^{+2} , H_3O^+ , CHO^+ , CHO^+ et (négatifs): O^- , O_2^- , O_3^- , CO_3^- , CO^- , OH^- [13].

c.1) Décharge couronne positive :

Soit la configuration pointe/plan figure

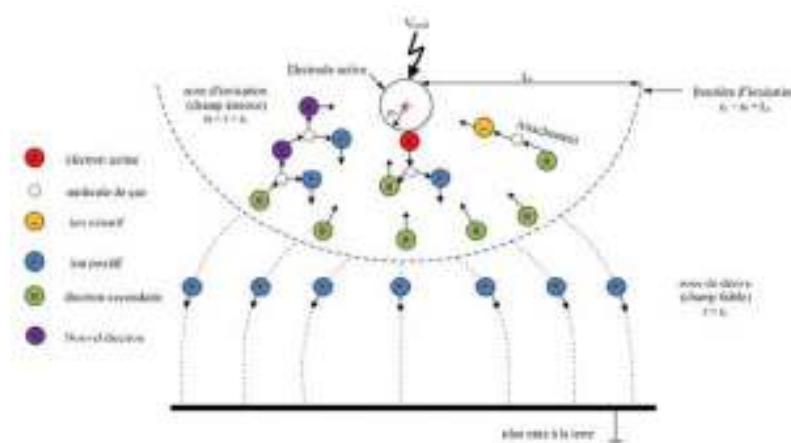


Figure II.9 : Décharge couronne positive

En alimentant l'électrode active positivement, Une décharge continue positive est créée [14].

En sachant que le champ électrique est plus intense sur la périphérie de l'anode, des électrons seront produits par chocs électroniques et seront accélérés, attirés vers la pointe, et autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation (zone en pointillé). Les ions positifs ainsi créés seront repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique est trop faible ($< 30 \text{ kV/cm}$ dans l'air à pression atmosphérique) et ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (le plan).

Cette zone unipolaire, puisqu'il n'y a que des ions positifs, est appelée région de « dérive ».

c.2) Décharge couronne négative :

Soit la configuration pointe/plan figure :

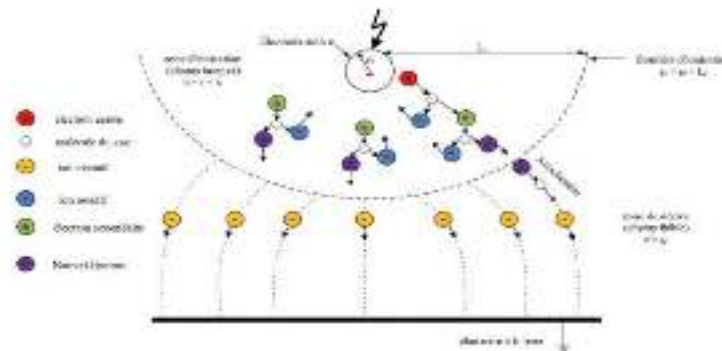


Figure II.10 : Décharge couronne négative

La pointe constitue l'électrode à polarité négative reliée à une source HT et l'isolant dont la face arrière métallisée est mise à la masse, est positionné sous la pointe. Ceci permet d'une part de générer des champs électriques intenses au niveau de la pointe, d'autre part, le lieu de génération est limité au voisinage de la pointe, le risque de claquage est moindre. Par conséquent, des avalanches électroniques ont lieu près de la pointe [14].

Les électrons créés arrivent dans une région où le champ est plus faible. Ils n'ont plus assez d'énergie et sont capturés par les atomes ou les molécules neutres du milieu. Ils constituent ainsi une charge d'espace composée d'ions négatifs.

Sous l'influence du champ, les ions sont balayés vers la surface de l'isolant à travers une grille répartitrice. Cette dernière, permet de répartir la charge uniformément sur la surface de l'isolant. Plus on transfère de charge à la surface de l'isolant, plus la différence de potentiel entre la sonde électrostatique et la surface de l'isolant augmente.

Le transfert de charge sur la surface du matériau isolant est généralement réglable soit par la distance entre la pointe et la surface de l'isolant ou par la variation de la tension de la pointe (notre cas). Par ailleurs, nous pouvons fixer un potentiel sur la grille répartitrice qui imposera donc la valeur initiale du potentiel présent sur le matériau. Le champ électrique près de la pointe est directement proportionnel à cette distance.

L'intérêt de la configuration pointe / plan est double premièrement, elle permet de générer des champs électriques très intenses au niveau de la pointe (plusieurs Mv/cm), pour des tensions modérées (qq Kv). Deuxièmement, étant donné que la région de champ intense est localisée près de la pointe le lieu de génération des porteurs de charge est limité au voisinage de la pointe. Le risque de claquage est moindre.

A partir de ce principe nous allons utiliser la répartition de charges sur la surface du matériau isolant pour passer ensuite à la phase de mesure à l'aide d'un voltmètre électrostatique.

d) Phase de dépôt:

Soit le figure suivante :

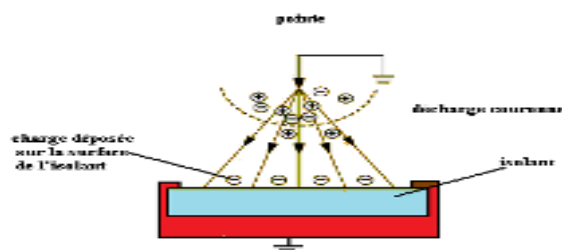


Figure II.11 : Phase de dépôt

A l'aide de la géométrie pointe/plan, on réalise un dépôt de charge négative sur la surface du matériau isolant. Grâce à une grille placée entre la pointe et l'isolant la charge sera répartie uniformément sur la surface du diélectrique [13].

e) Phase de mesure:

Soit la figure représentant la phase de mesure :

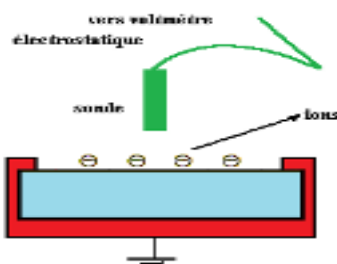


Figure II.12 : Phase de mesure

II.5.2 Phénomène physique et mécanique d'évolution des DPS :

Les phénomènes physiques qui interviennent dans le déclin du potentiel de surface d'un isolant après dépôt de charges (le plus souvent par décharge couronne avec un montage pointe-grille permettant de contrôler le potentiel de surface) sont nombreux.

C'est pourquoi, interprétation des courbes évolutions du potentiel de surface au cours du temps nécessite une connaissance de ces mécanismes et qui sont [13] :

- conduction de surface.
- polarisation de l'échantillon.
- Neutralisation par le gaz.
- phénomène piézoélectrique.
- injection de charges.

La Figure suivante résume schématiquement les différents processus qui peuvent contribuer au déclin du potentiel de surface.

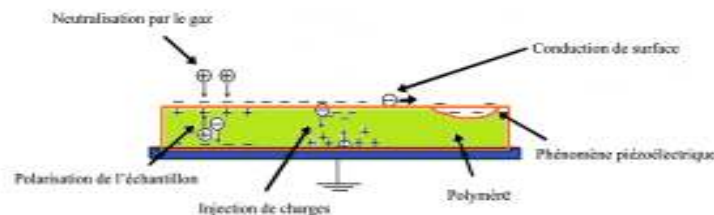


Figure II.13 : Différents processus qui peuvent contribuer au déclin du potentiel de surface

II.5.2.1 Conduction de surface :

La conduction de surface constitue une des causes du déclin de potentiel de surface. Elle est observée surtout dans les cas d'échantillons épais vieillis par décharges couronnes.

En effet, une surface vieillie aura une couche superficielle qui a perdu toutes ses propriétés diélectriques, de ce fait les charges qui se trouvent sur sa surface pourront se déplacer et créées un courant électrique.

Les charges se déplacent sur les couches primaires de la surface (figure II.14).

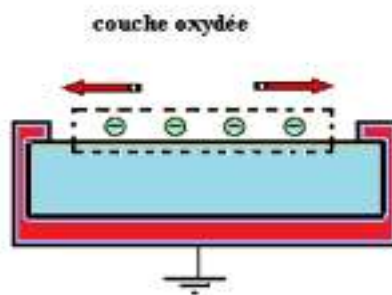


Figure II.14 : Conduction de surface.

De plus, lorsque la surface d'un isolant est soumise à la décharge couronne pendant un certain temps, il apparaît une modification rapide et importante des propriétés de la surface.

Grâce à la présence de l'oxygène, l'ensemble de la surface présente une structure différente sous forme de couche dégradée fortement oxydée [15].

Les propriétés physico-chimiques de cette couche sont très différentes de celle du matériau initial. Il en résulte une importante conductivité de surface.

Selon le même auteur, l'évolution de cette surface est assez complexe et dépend de plusieurs paramètres tels que la structure de l'isolant, du mode de vieillissement, etc....

II.5.2.2 Polarisation de l'échantillon :

Plusieurs études ont montré que les phénomènes de polarisation sont responsables pour une partie du déclin de potentiel et parfois même pour expliquer à eux seuls le déclin (figure II.15).

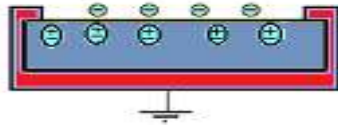


Figure II.15 : Polarisation de l'échantillon.

La charge déposée sur la surface de l'isolant modifie le champ existant dans le matériau.

Sous l'action du champ électrique créé par ces charges surfaciques, des dipôles s'orientent sous ce champ ; les dipôles les plus proches de la surface s'orientent de telle manière qu'ils viennent compenser la charge surfacique.

Ces charges ne peuvent se déplacer que sur une distance de l'ordre de grandeur d'une molécule. Chaque molécule présente alors un dipôle [14].

Ce phénomène est caractérisé par l'apparition d'une mince couche de charges positives. A l'intérieur, il y a une compensation des charges de polarisation.

La circulation de la charge peut être alors expliquée en partie par l'apparition de charges de polarisation. Ce phénomène est généralement caractérisé par la constante diélectrique qui demeure sensible à la température.

On peut observer différents types de polarisation :

a) Polarisation électronique :

En présence d'un champ électrique, le nuage électronique, d'un atome par exemple, est étiré par celui-ci, la distribution de charges devient dipolaire.

Pour tout diélectrique, la déformation d'un édifice élémentaire (atome, ion, molécule...) sous l'action d'un champ électrique local E s'accompagne de la création d'un moment dipolaire p , colinéaire à E , donné par [14] :

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}$$

Où α constitue la polarisabilité électronique de cet édifice.



Figure II.16 : Polarisation électronique

Cette polarisation peut être observée jusqu'à des fréquences dépassant celle de la lumière visible (10^{15} Hz).

A cause de l'inexistence d'une relaxation diélectrique (retard à l'établissement de ce phénomène), ce phénomène est considéré comme instantané.

b) Polarisation atomique (ionique) :

La distorsion de l'arrangement atomique d'une molécule sous l'effet d'un champ électrique fait apparaître un mouvement dipolaire induit (figure II.17).

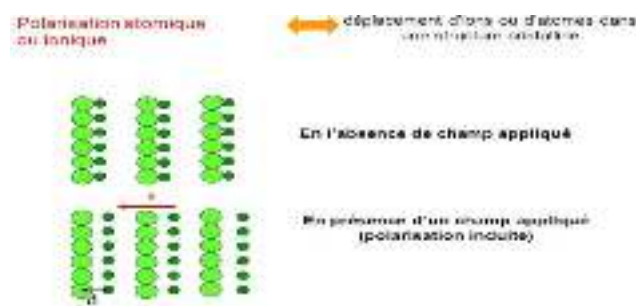


Figure II.17 : Polarisation atomique

L'inertie des masses mises en jeu augmente le temps de manifestation d'un facteur 10^3 à 10^4 par rapport à la polarisation électronique.

c) Polarisation inter faciale :

Ce type de polarisation apparaît dans les matériaux hétérogènes (figure II.19).

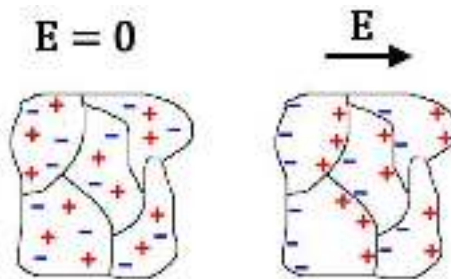


Figure II.18 : Polarisation inter faciale

Elle est due à la présence dans le matériau de porteurs de charges (électronique ou ionique) en excès. Ces charges peuvent être intrinsèques au matériau ou injectées au cours d'application du champ électrique. Cette polarisation provient de l'accumulation de ces charges aux interfaces entre deux phases qui ont des permittivités et des conductivités différentes.

Ce type de polarisation est encore appelé effet Maxwell Wagner Sillars. Il se manifeste en basse fréquence. Ce mécanisme induit un moment dipolaire macroscopique dont le temps d'établissement est long ($>10^3$ s) [13,14].

d) Polarisation dipolaire ou d'orientation (Debye) :

Une molécule formée d'atomes différents présente généralement un moment dipolaire permanent (la résultante des différents moments dipolaires est différente de zéro).

Sous l'action du champ électrique, ces dipôles existent préalablement de manière désordonnée et ont tendance à s'orienter suivant le sens de ce champ (figure II.20).

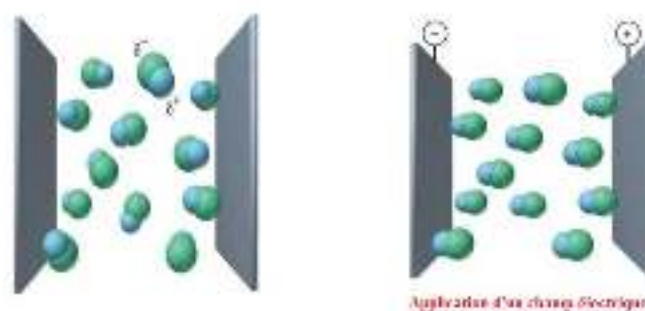


Figure II.19 : Polarisation dipolaire

Le temps d'établissement est beaucoup plus important que lors du phénomène de polarisation précédemment cité ($>10^5$ s), en raison de la grande diversité des dipôles impliqués et de leur environnement moléculaire.

De ce fait, les polarisations électroniques et ioniques seront considérées comme des phénomènes instantanés, contrairement à la polarisation dipolaire. Le retard à l'établissement se manifeste à cause de l'inertie du mouvement des dipôles [15].

II.5.2.3 Neutralisation par le gaz :

La neutralisation des charges déposées sur la surface de l'isolant par les charges libres provenant directement du gaz qui entoure l'isolant est un autre processus qui peut contribuer au déclin de potentiel de surface

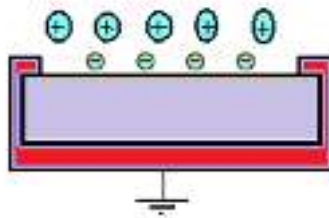


Figure II.20 : Neutralisation par le gaz.

Lors du dépôt de charges, le champ électrique environnant la surface de l'isolant est complètement modifié. Les atomes et les molécules subissent alors l'effet du champ et s'orientent de manière à créer une charge opposée à celle de la surface. Coelho a considéré la neutralisation par le gaz lors de ces études sur le téflon.

II.5.2.4 Phénomènes piézoélectriques :

L'effet piézoélectrique a été cité souvent comme processus physique qui peut participer au déclin de potentiel (figure II.22).

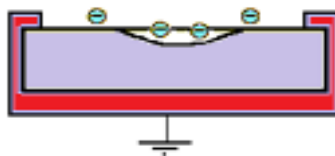


Figure II.21 : Phénomène piézoélectrique.

Les polymères ont une structure moléculaire désordonnée, ils contiennent des zones cristallines et des zones amorphes. La piézo-électricité est un phénomène propre à certains types de cristaux.

Cet effet apparaît à la surface de ces corps quand on les soumet à des pressions ou à des charges électriques.

Sous l'effet d'un champ électrique, la structure piézoélectrique sera le siège de champs de déformations et de contraintes induites. De plus, la charge déposée sur la surface crée une force sur le matériau qui subit une contraction de son volume, cela se traduit alors par l'apparition d'une polarisation électrique à la surface.

II.5.2.5 Injection de charges :

Le phénomène d'injection de charge à partir de la surface du matériau isolant dans le volume est une injection des porteurs de charges déposés sur la surface de l'isolant à travers le volume. Ainsi, une partie du volume de l'isolant change de propriétés électriques et devient chargée (figure II.23).

Par ailleurs, la conduction en volume correspond à un déplacement de charges dans le volume, alors que le matériau reste plutôt neutre.

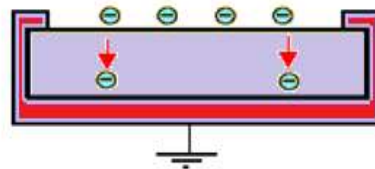


Figure II.22 : Injection de charges

Le phénomène d'injection de charges est le processus qui domine les mécanismes observés dans la littérature sur les mesures de déclin de potentiel. C'est un phénomène assez complexe qui dépend de plusieurs paramètres.

L'état de surface ou, son contact avec un autre matériau joue un rôle important sur le processus de l'injection. La décharge couronne, le temps d'exposition à la décharge, ainsi que la température et l'humidité volumique sont des facteurs qui peuvent jouer un rôle de premier plan. La conduction en volume est surtout présente dans le cas des échantillons minces

(épaisseur de l'ordre du micron) mais elle reste également observée dans des échantillons épais.

Tous ces phénomènes peuvent agir en même temps et devront être considérés pour interpréter le déclin. Toutefois, on peut noter la présence prédominante de trois interprétations dans la littérature : la conduction de surface, la conduction de volume et le phénomène de polarisation des matériaux diélectriques.

Depuis les premières mesures sur l'évolution du DPS, bon nombre de travaux ont été réalisés, dans ce sens.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous étudier le phénomène de DPS, ses avantages et le principe d'utilisation.

Nous avons expliqué le principe de dépôt de charge sur le matériau isolant et les différents mécanismes d'évolution des charges sur la surface du diélectrique.

Chapitre III : Partie expérimentale et analyse des résultats

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons procéder à des essais de dépôt de charges sur le Polyéthylène téréphtalate (PET), particulièrement un dépôt de charge négative et positif.

De plus, nous allons essayer d'analyser l'évolution des charges sur ce matériau et observer le mécanisme prépondérant qui change les propriétés diélectriques de ce matériau.

La technique qu'on appelle « déclin de potentiel de surface » (DPS) est une méthode d'investigation des propriétés électriques des matériaux isolants.

Son intérêt réside essentiellement dans sa simplicité et sa puissance dans la caractérisation de l'aptitude d'un matériau à évacuer une charge électrique déposée à sa surface.

III.2. Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé a été réalisé au niveau du Laboratoire d'électrotechnique de l'Université 8 mai 1945 de Guelma LGEG, (figure III.1).

La mesure du potentiel de surface implique l'usage de sonde de mesure qui fonctionne selon le principe de condensateur vibrant. La vibration d'un petit volet à l'intérieure de la sonde fait varier la capacité entre ce volet et la surface. Le principe de mesure est d'annuler en permanence ce courant en faisant varier le potentiel de la sonde et du volet, la sonde est donc au même potentiel que la surface, ce qui permet de perturber le moins possible l'échantillon.

Le principe de la méthode du DPS est de suivre en fonction du temps l'évolution du potentiel de surface d'un échantillon préalablement chargé par décharge couronne. La mesure du potentiel en surface de l'échantillon au cours du temps à partir d'une sonde électrostatique à condensateur vibrant permet de fournir des informations sur le mode d'écoulement (surfacique et/ou volumique) des charges déposées et sur la mobilité de ces charges.

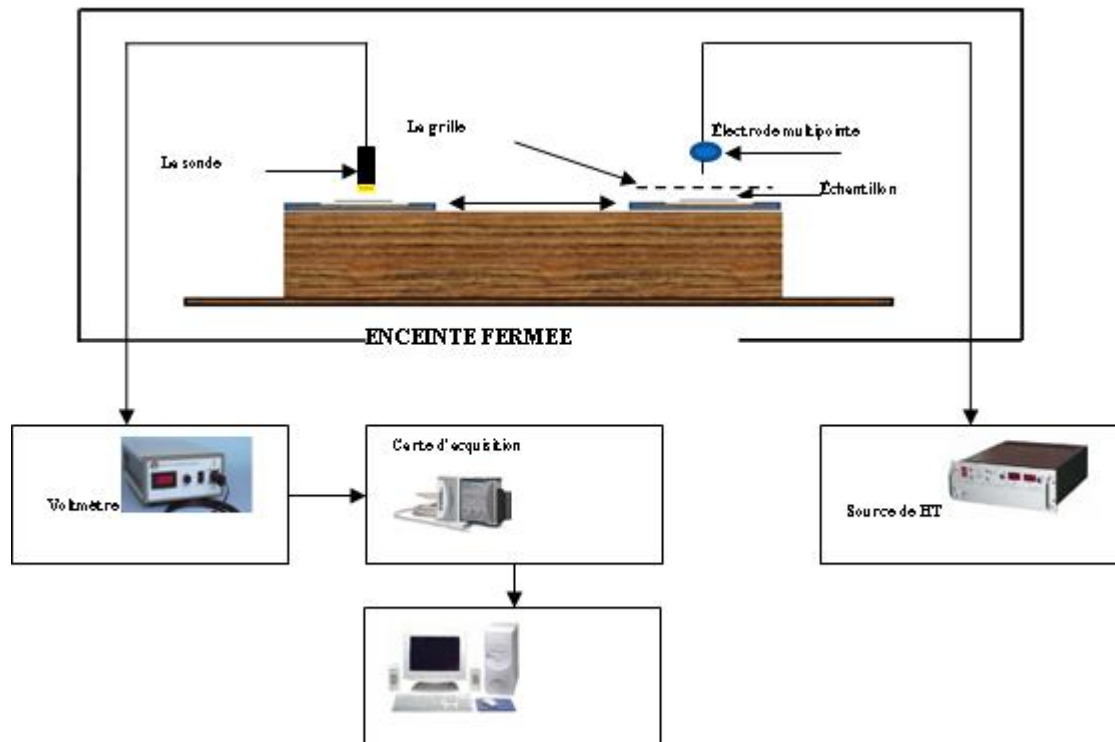


Figure III.1 : Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est composé de deux parties ou deux procédés. La première partie constitue le procédé de chargement, il est composé d'un système fil/plan. Nous avons réalisé le chargement des films du Polyéthylène Téréphtalate par décharge couronne en utilisant un système fil/plan. Le fil est en Tungstène de rayon $50 \mu m$ alimentée avec une tension continue variable jusqu'à $10 kV$ (courant variable de $200 \mu A$ à $2 mA$)

La distance entre la pointe et l'échantillon d est choisie égale à $10 mm$ Nous avons limité la durée de chargement à $10 s$ pour éviter toute modification de surface.

Le principe de chargement est basé sur l'ionisation de l'air au voisinage du fil. Les charges créées par la décharge couronne sont accélérées vers la surface libre de l'échantillon. Au fur et à mesure que les charges s'accumulent à la surface de l'échantillon, le potentiel de surface augmente.

Une fois que l'opération de chargement est terminée, un système de déplacement permet de positionner l'échantillon sous la sonde de mesure du potentiel pour le relevé des déclins de potentiel de surface



Figure III.2 : Stand expérimental

III.2.1. Matériau utilisé :

Comme matériau isolant, nous avons utilisé le Polyéthylène téréphtalate qui est considéré comme un matériau modèle pour une étude fondamentale. Le Polyéthylène téréphtalate est obtenu par polymérisation catalysée du Polyéthylène dont la mise au point par Giulio Natta date des années 50. Le PET est un thermoplastique appartenant à la famille des polyesters. Sa production a commencé dans les années 50 avec Dupont de Nemours. Depuis, il prend une place de plus en plus importante dans notre vie sous toutes ses formes, films, fibres, contenants. Sa consommation est en constante augmentation.

Les échantillons utilisés sont en polyéthylène téréphtalate. Ils sont fabriqués par polycondensation. Le motif du polyéthylène téréphtalate est composé d'un groupe phényle C_6H_4 et du groupe ester qui composent essentiellement le groupe téréphtalate et d'un groupe éthylène. Le PET peut être à l'état totalement amorphe ou, après un traitement thermique adapté, à l'état semi cristallin. Le taux de cristallinité et la morphologie dépendent du traitement thermique que subit l'échantillon [3,4].

III.2.2.Caractéristique physique du PET :

Tableau III.1 Caractéristiques physiques du PET

Propriétés électriques à 25 °C et 50 % HR	PET
Permittivité relative à 50 Hz	3.2 - 4.2
Facteur de pertes diélectriques à 1 MHz (10^{-4})	200 - 300
Rigidité diélectrique (KV /mm)	33 - 35
Résistivité transversale (Ωcm)	10^{15} - 10^{18}
Résistivité superficielle (Ω)	10^{13} - 10^{15}

III.2.3.Propriétés physiques du PET :

Tableau III.2 Propriétés physiques de PET

Propriétés physiques à 25 °C et 50 % HR	PET
Masse volumique (densité) (g/cm^3)	1.4
Indice limite de viscosité (mg/l)	0.74 à 0.85
Absorption d'eau (24h) (%)	0.1 à 0.2
Température de fusion (°C)	249 à 271
Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$)	0.13
Capacité thermique massique ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1.1 à 1.3
Taux de cristallinité (%)	60 à 65

III.2.4.Propriétés mécaniques du PET :

Tableau III.3 Propriétés mécaniques du PET

Propriétés mécaniques à 25 °C et 50 % HR	PET
Résistance à la rupture (MPa)	240 – 225
Allongement à la rupture (%)	90 – 110
Module d'Young (Mpa)	5300 – 4500
Résistance à l'impact (mJ.mm^{-2})	1400 – 2000
Résistance à la déchirure (N.mm^{-1})	220 – 250
Température maximale d'exploitation (°C)	115 – 170
Température minimale d'exploitation (°C)	-40 - -70

III.3. Analyse des résultats :

III.3.1. Influence du potentiel initial en polarité négative V_0 :

Sur les figures suivantes, nous avons représenté les essais de dépôt de charges négatives sur la surface du PET. Les essais concernent l'évolution du déclin de potentiel de surface en fonction de différentes tensions initiales : -550V ; -1000V ; -1500V ; -1800V ; -2000V.

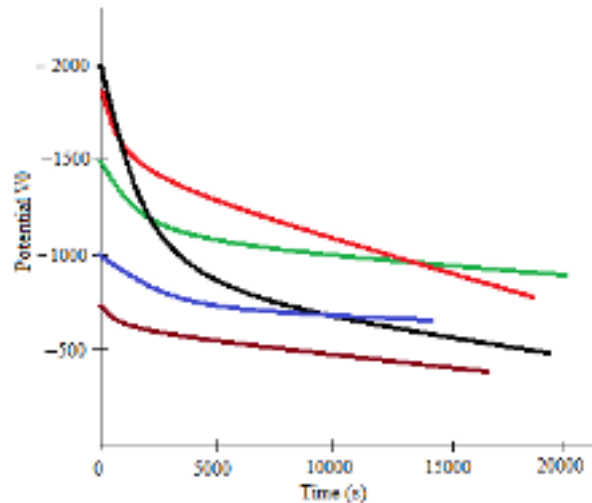


Figure III.3 : Influence de potentiel initial en polarité négatif

D'une manière générale, nous avons noté une dépendance du potentiel de surface en fonction du temps, c'est-à-dire la cinétique d'évolution du potentiel de surface dépend de la quantité de la charge déposée sur la surface de l'échantillon.

De plus, nous avons noté que de plus en plus qu'on augmente la tension, de plus en plus que le DPS est significatif.

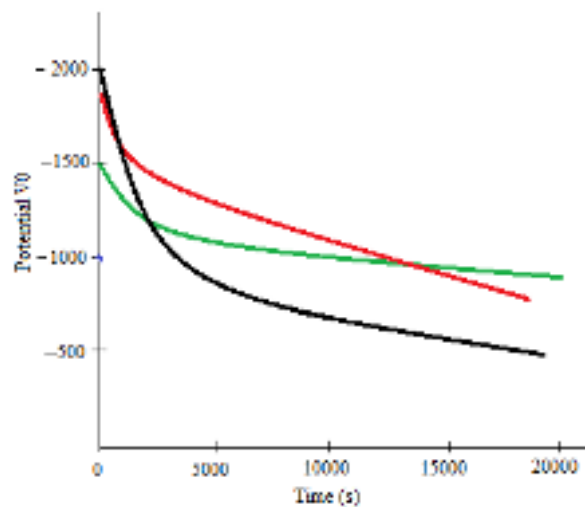


Figure III.4 : Influence du potentiel élevé en polarité négatif

Nous avons noté aussi, pour des potentiels élevés, -1500V ; -1800V ; -2000V, le déclin est plus accentué et plus rapide, tandis que pour des potentiels moins importants -1000V ; -500V, le déclin de potentiel est moins importants.

De plus, au bout d'un certain temps, on observe l'existence d'une charge qui persiste sur la surface du matériau isolant. Pour répondre à la question sur le phénomène prépondérant de la cinétique des charges dans le matériau isolant et identifier les composantes fondamentales de la réponse diélectrique du matériau comme la conduction, la relaxation dipolaire ou l'injection de charge, nous allons analyser en fonctions des courbes la réponse physique de l'évolution des charges.

Plusieurs phénomènes peuvent agir sur l'évolution de la charge déposée par décharge couronne, leur distinction est parfois complexe à cause de la morphologie du matériau et de la teneur en impureté.

La présence de pièges affecte considérablement les propriétés électriques des polymères, que ce soit la micro et la macrostructure de ces matériaux sont sensibles à leur histoire électrique, mécanique et thermique. Les polymères sont connus posséder des pièges pour les charges électriques qui peuvent exister à partir des défauts dans la structure des polymères et souvent dans les frontières entre les régions amorphes et cristallines [15]. En effet, la charge électrique qui persiste sur la surface de l'isolant est une charge dont l'énergie intrinsèque n'est pas suffisante pour s'injecter dans le volume du matériau.

Plusieurs travaux ont montré qu'un changement de pente dans la courbe du DPS est attribuée à l'existence de deux régimes de déclin de potentiel de surface séparés par un temps de transit qui représente la transition des charges vers l'autre face du matériau. Ceci explique que ce comportement est représentatif d'un mode d'injection partielle de charges dans le volume du matériau.

De plus, on a mis en évidence l'existence du phénomène de « cross-over ». On observe nettement le croisement des courbes du DPS particulièrement aux premiers instants du déclin, montrant ainsi qu'au bout du même temps de mesure, la déclinaison de l'échantillon chargé à -2000 V est plus importante que celle de -1800 V, -1500 V, -1000V et -500V. Ce comportement nous fait donc supposer qu'on devrait expliquer ce déclin de potentiel par une injection partielle de la charge déposée sur la surface de l'isolant sous l'effet du champ électrique créé par ces charges elles mêmes. Une fois les charges injectées, elles sont soumises au champ local qui les entraînera vers la face arrière.

Pour les temps longs, on observe un potentiel de surface quasi stationnaire, il est possible que ces charges n'aient pas assez d'énergie pour être injectées dans le volume et en conséquence, le potentiel de surface demeure relativement stable.

Toutefois, en tenant compte du phénomène de croisement des courbes « cross-over » observé dans la représentation temporelle du déclin en fonction du potentiel initial, on peut exclure l'hypothèse d'une réponse dipolaire prédominante. Le cross-over est généralement attribué à une injection de charge, plus exactement au mouvement de la charge dans le matériau. Une simple non linéarité de la réponse dipolaire ne pourrait pas expliquer l'apparition du cross-over.

Selon les différents modèles élaborés pour expliquer le processus du déclin de potentiel, on peut remarquer que si le modèle considère seulement des pièges peu profonds, le potentiel de surface atteindra zéro au cours de quelques heures. Par conséquent, pour expliquer un déclin qui ne s'annule pas, il faut supposer des pièges profonds dans le matériau.

Un isolant contient en général plusieurs types de défauts ponctuels répartis aléatoirement dans l'espace. La présence de ces défauts dans le matériau est un fait inévitable et ces imperfections jouent un rôle important dans le comportement des isolants soumis à une injection de charges. L'injection de charge dans le volume est partiellement instantanée à cause des états de surface. Le transport de charge injectée demande une activation à partir de la surface aux états de transport de volume.

Par conséquent, l'hypothèse qui suppose l'existence d'une injection partielle et instantanée des charges avec une mobilité dépendante du champ permet d'expliquer les caractéristiques du taux de variation de déclin pour différentes valeurs de V_0 . Pour les grandes valeurs de V_0 une injection partielle instantanée se présente, et aux faibles valeurs de V_0 , les charges déposées n'ont pas assez d'énergie pour être injectées dans le volume.

III.3.2. Influence du potentiel initial en polarité positive V_0 :

Pour le dépôt de charge positif sur la surface du PET, on observe un effet moins important que les charges négatives même pour des tensions élevées.

De plus, nous avons remarqué l'inexistence du phénomène de cross-over. Il est fort probable que l'effet prédominant est le phénomène de polarisation.

La charge piégée sur la surface de l'isolant est plus importante que pour les charges négatives.

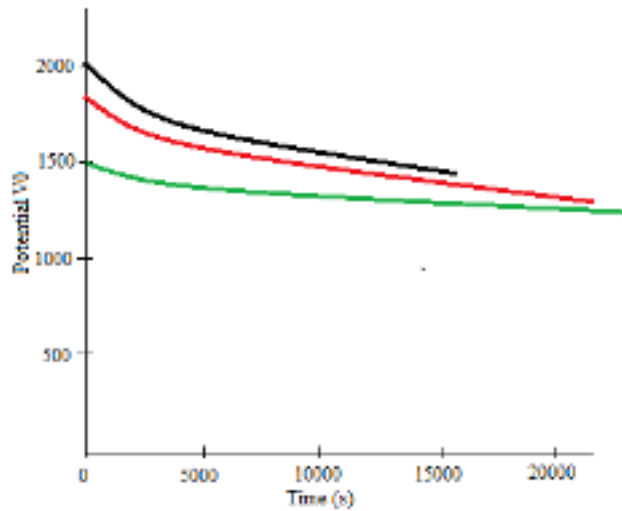


Figure III.5 : Influence du potentiel en polarité positive

III.4. Conclusion :

Les résultats des essais expérimentaux sur le PET nous ont permis de constater une injection partielle de charge dans le volume du matériau pour les charges négatives et une polarisation partielle de la charge pour la polarité positive.

Ce processus peut induire une détérioration progressive des caractéristiques isolantes du matériau.

Le piégeage des charges dans le volume du PET peut induire une évolution latente d'un phénomène d'arborescence qui finira par provoquer le claquage de l'isolation.

Conclusion générale et perspective :

L'évolution des charges électrostatiques sur la surface des matériaux isolants constitue le principal intérêt de notre présent travail.

L'expérience montre que pour de nombreuses raisons ces isolants ont des défaillances 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.

C'est dans ce contexte que nous avons noté une dépendance du potentiel de surface en fonction du temps, c'est-à-dire que la cinétique d'évolution du potentiel de surface dépend de la quantité de la charge déposée sur la surface de l'échantillon. De plus, nous avons remarqué que de plus en plus qu'on augmente la tension, de plus en plus que le DPS est significatif.

La polarité négative enregistre un déclin plus accentué que la polarité positive. Pour les temps longs, on observe un potentiel de surface quasi stationnaire, il est possible que ces charges n'aient pas assez d'énergie pour être injectées dans le volume du matériau et par conséquent, le potentiel de surface demeure relativement stable.

En tenant compte du phénomène de croisement des courbes « cross-over » observé dans la polarité négative, notre hypothèse suppose l'existence d'une injection partielle et instantanée des charges avec une mobilité dépendante du champ qui peut expliquer les caractéristiques du taux de variation de déclin pour différentes valeurs de V_0 .

Pour la polarité positive, Il est fort probable que l'effet prédominant est le phénomène de polarisation. La charge piégée sur la surface de l'isolant est plus importante que pour les charges négatives.

En perspective, il est important d'étudier le DPS en fonction de plusieurs grandeurs physiques telles que : la température, l'humidité etc.... de plus, on peut comparer nos résultats par rapport à d'autres polymères tels que le PP, PE (Polypropylène, polyéthylène), etc....

Bibliographies :

- [1] M.E.Bichat et M.R.Blondlot « Introduction à l'étude de l'électricité statique » Ghautier Paris 1885 ;
- [2] R. Coelho et B. Aladenize « Les diélectriques : propriétés diélectriques des matériaux isolants » Traité des nouvelles technologies, série Matériaux, Hermes, 1999.
- [3] Bolinche. R. « Caractérisation des phénomènes de transport surfacique et volumique de charges électrique dans les polymères » thèse de doctorat université Paul Sabatier Toulouse, 1997
- [4] « Electrical Ageing of Composites: An Industrial Perspective », S. W. Rowe, Proceedings International Conference on Solid Dielectrics, pp.401-406, 2007.
- [5] « Electrical degradation and breakdown in polymers », L.A. Dissado and J.C. Fothergill, Ed. Peter Peregrinus Ltd., London, 1992.
- [6] « Electrical degradation and breakdown in polymers », L.A. Dissado and J.C. Fothergill, Ed. Peter Peregrinus Ltd., London, 1992.
- [7] « Diélectriques solides et charge d'espace », C. Laurent, Technique de l'Ingénieur, D2305, 1999.
- [8] « Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory » L.A. Dissado, IEEE Transactions on Dielectrics Electrical Insulation, vol. 9, pp.483-497, 2002.
- [9] Compos M., Giacometti J.A. « Surface potential decay in insulators with deep traps » J.Appl. Phys, Vol. 52, pp.4546-4552, 1981.
- [10]A. Crisci. « Etude du déclin de potentiel d'une surface chargée par une décharge électrique de type couronne » Rapport pour maîtrise de physique LEMD, 1996.
- [11]J. C. Dubois. « Propriétés diélectriques des polymères » Techniques de l'ingénieur, traitée électrique. E1850, pp1-15, 2004.
- [12]Das-Gupta D.K. « Electrical properties of surface of polymeric insulators » IEEE – Trans. On. Elect. Insu, Vol. 27, N°5, pp. 909-923, 1992.
- [13]L.Herous, M.Nemamcha, M.Remadnia, L.Dascalescu: Factors that Influence the Surface Potential Decay on the thin film of Polyethylene Terephthalate: Journal of Electrostatics; Elsevier, Volume 67; Issue 2+3; pp 198-202; 2009.
- [14]K.Rougdia, L.Herous, A.Fatihou, B.Tabti, M.Nemamcha, L.Dascalescu “Experimental Modelling of the electric potential decay at the surface of polypropylene” *Journal of Electrostatics Vol: 76, pp: 262-26, 2015.*
- [15]K.Rouagdia, M.Nemamcha, L.Herous, L.Dascalescu, H.Mellouki “Surface Potential Decay of DC-corona-charged PET Films on Humid Electrodes” journal of Electrostatics Vol. 78, pp:17-21, 2015.