

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques et Haute tension

THÈME

**Caractérisation des propriétés physiques des matériaux
diélectriques soumis à flux d'énergie électrique**

Préparé par : Melle BELADJINE Marwa Meriem

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Mr. ALLAOUI.T	Professeur, Université de Tiaret	Président
Mme. BELHACEL.K	M.A.A, Université de Tiaret	Examinatrice
Mr. SMAÏLI.A	Professeur, Université de Tiaret	Encadreur
Mr. BEKKI.Y	Doctorant, Université de Tiaret	Co-encadreur

2018/2019

Remerciements

Au terme de ce travail, je remercie ALLAH le tout puissant qui m'a permis de réaliser ce travail en me donnant force et volonté.

*Je suis très honorées de vous avoir comme encadreur **Pr. SMAILI A.** Je vous remercie pour la gentillesse et la spontanéité avec lesquelles vous avez bien voulu diriger ce travail. J'ai eu le grand plaisir de travailler avec vous, et avons trouvé auprès de vous le conseiller et le guide qui nous a reçus en toute circonstance avec sympathie, sourire et bienveillance. Vous êtes et vous serez pour moi l'exemple de rigueur et de droiture dans l'exercice de la profession. Veuillez, cher professeur, trouvé dans ce modeste travail l'expression de mon haute considération, de ma sincère reconnaissance et de mon profond respect.*

*Mes sincères remerciements s'adressent à mon co-encadreur **Dr. BEKKI Y.** pour avoir accepté de diriger ce travail je tiens à vous remercier chaleureusement et respectueusement pour votre contribution concrète, votre affection, votre appui, votre soutien moral et vos conseils.*

*Nos vifs remerciements s'adressent aux membres du jury de soutenance ; **M. ALLAOUI.T** et **Mme. BELHACEL.K** qui ont bien voulu évaluer notre travail. Vos remarques ne contribueront qu'à améliorer la qualité de celui-ci.*

Enfin, j'adresse ma profonde gratitude à l'ensemble des enseignants qui ont contribué à mon formation durant tout le cursus universitaire.

Merci à tous

Dédicace

A mes parents

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que Dieu te garde et te protège, à toi **mon père**.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; **ma mère** que j'adore.*

A ma chère sœur Houda

Mon amie fidèle, qui m'a assistée dans les moments difficiles et m'a pris doucement par la main pour traverser ensemble des épreuves pénibles. Je te suis très reconnaissante, et je ne te remercierai jamais assez pour ton amabilité, ta générosité et ton aide précieuse.

A mon Cher frère Othman

Le bijou de la famille, je te souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité, je t'exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.

A mes chères cousines

*Mon coup de cœur **Bahia** et la douce **Latifa**; Les mots ne suffisent pas pour vous exprimer toute ma reconnaissance. Vous êtes pour moi des personnes très chères sur qui je peux toujours compter.*

À ma chère tante Fatima et son mari Benaouda

*Une spéciale dédicace à **Mohamed Bourich** mon cher cousin pour son soutien moral et ses conseils.*

Marwa

Liste des figures

Chapitre II Matériaux diélectriques

Figure II.1. Matériaux diélectriques	14
Figure II.2. Modèle des bandes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur	15
Figure II.3. Piézoélectricité	18
Figure II.4. Détecteur pyroélectrique	19
Figure II.5. Cycle d'hystérésis schématisé d'un matériau ferroélectrique montrant l'évolution de la polarisation P en fonction du champ électrique E appliqué	19
Figure II.6. Isolateurs en : (a) Verre (b) Céramique	21
Figure II.7. Bande électrique en caoutchouc	22
Figure II.8. Isolation câble en PVC	23
Figure II.9. Huile d'isolation de transformateur	24
Figure II.10. Gaz de l'hexafluorure de soufre SF ₆ non inflammable	25
Figure II.11. Variation de résistivité électrique ρ en fonction de la température T	27

Chapitre III Les propriétés physiques des matériaux diélectriques

Figure III.1. Les niveaux d'énergie des matériaux	33
Figure III.2. Diagramme de Fresnel	38

Chapitre IV Processus De Génération De Charges Electriques

Figure IV.1. La polarisation moléculaire	46
Figure IV.2. Illustration schématisée des différents mécanismes de polarisation	47
Figure IV.3. Influence des différents types de polarisation sur ϵ' et ϵ''	50
Figure IV.4. Mécanismes de génération de charges électriques	50
Figure IV.5. Electrets neutres à charges d'échange – Homocharges	51
Figure IV.6. Electrets neutres – Hétérocharges	52
Figure IV.7. Électret dipolaire	52
Figure IV.8. Principe de formation d'électret par décharge couronne	53
Figure IV.9. Différentes configurations de la décharge couronne	54
Figure IV.10. Electrets à excès de charge obtenus par implantation électronique	54
Figure IV.11. Electrets à excès de charge obtenus par contact liquide	56
Figure IV.12. Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique	56
Figure IV.13. Dispositif de charge par effet triboélectrique	58

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

Figure V.1. Mesures électrostatiques	59
Figure V.2. Injection de charge dans un isolant avec conditions aux limites à champ nul	62
Figure V.3. Principe de la méthode électroacoustique	67
Figure V.4. Principe de méthode de stimulation thermique de la décharge	68
Figure V.5. Principe de mesure de la charge thermo-stimulée	68
Figure V.6. Principe de la méthode de compensation	70
Figure V.7. Principe de la sonde capacitive	71
Figure V.8. Sonde à induction	72
Figure V.9. Mesure du champ électrique en absence de l'électrode de masse	72

Figure.V.10.Modèle capacitif de la sonde à induction	73
Figure.V.11.Schéma de principe d'un moulin à champ.....	75
Figure.V.12Principe du voltmètre sans contacte	76
Figure.V.13Principe de modulation par variation de capacité.....	77
Figure.V.14.Principe de mesure du potentiel de surface à l'aide de la sonde à condensateur vibrant	78

Liste des tableaux

Tableau II.1. Résistivité d'un certain nombre d'isolants exprimé en [$\Omega.m$]	15
Tableau V .1. Principales méthodes de mesure de la distribution de la charge d'espace	64
Tableau V.2 : Autres techniques de caractérisation des matériaux diélectrique	65

Introduction Générale

Chapitre I Etat de l'art

I.1.	Introduction :	4
I.2.	Applications à la caractérisation des matériaux isolants	5
I.2.1.	Caractérisations de résines époxy.....	7
I.2.2.	Caractérisation de films de polypropylène	7
I.2.3.	Caractérisation de l'état de charge des isolants fibreux non tissés.....	7
I.2.4.	I.2.4. Caractérisation des propriétés électriques des composites.....	9
I.2.5.	Caractérisation de TiO ₂ pour des structures métal-isolant-métal	11
I.3.	Conclusion	13

Chapitre II Matériaux diélectriques

II.1.	Généralités sur les diélectriques	14
II.1.1.	Historique et définition	14
II.1.2.	Liste de certains matériaux isolants courants	16
II.1.3.	Utilisation des diélectriques.....	17
II.2.	Normes relatives aux matériaux isolants électriques	17
II.3.	Classification des matériaux diélectriques	18
II.3.1.	Matériaux piézoélectriques.....	18
II.3.2.	Matériaux pyroélectriques.....	18
II.3.3.	Matériaux ferroélectriques	19
II.4.	Types d'isolant utilisé dans l'industrie électrique	20
II.5.	Milieux diélectriques	20
II.5.1.	Solide.....	20
II.5.1.1.	Isolants naturels	20
II.5.1.2.	Isolants synthétiques.....	22
II.5.2.	Isolants liquides.....	23
II.5.2.1.	Huiles minérales	24
II.5.2.2.	Huiles synthétiques.....	24
II.5.2.3.	Vernis	25
II.5.2.4.	Gazeux.....	25
II.6.	Grandeurs caractéristiques d'un milieu diélectrique.....	27
II.6.1	La résistivité.....	27
II.6.2	La permittivité	28
II.6.3	Rigidité diélectrique (Tenue au claquage)	29

II.7. Conclusion	31
------------------------	----

Chapitre III Les propriétés physiques des matériaux diélectriques

III.1. Introduction.....	32
III.2. Classification des matériaux.....	32
III.2.1. Classification basée sur la conductivité électrique:.....	32
III.2.2. Classification basée sur les niveaux d'énergie:.....	32
III.2.3. Classification basée sur la permittivité diélectrique.....	33
III.2.4. Classification basée sur la susceptibilité magnétique :.....	34
III.3. Propriétés physiques associées aux diélectriques :.....	34
III.3.1. La Permittivité :.....	34
III.3.2. Perte diélectrique.....	36
III.3.3. La conductivité électrique.....	38
III.3.4. Facteur de dissipation diélectrique :.....	39
III.3.5. La résistivité :.....	40
III.3.6. Rigidité diélectrique :.....	40
III.4. Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux :.....	42
III.4.1. Fréquence.....	42
III.4.2. Température.....	43
III.4.3. Humidité et autres impuretés :.....	43
III.4.4. Structure physique et chimique :.....	44
III.4.5. Intensité du champ alternatif.....	44
III.4.6. Conclusion.....	44

Chapitre IV Processus De Génération De Charges Electriques

IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Étude du phénomène de la polarisation des matériaux diélectriques.....	45
IV.2.1. Polarisation statique.....	45
IV.2.2. Différents types de polarisation.....	47
IV.2.2.1. La polarisation électronique.....	48
IV.2.2.2. La polarisation ionique.....	48
IV.2.2.3. La polarisation par orientation.....	48
IV.2.2.4. La polarisation interrassiale.....	49
IV.2.3. La polarisabilité.....	49
IV.2.4. Influence des différents types de polarisation sur ϵ' et ϵ''	49

IV.3.	Mécanismes de génération de charges électriques.....	50
IV.4.	Les électrets.....	51
IV.4.1.	Définition.....	51
IV.4.1.	Charge par décharge couronne.....	53
IV.4.2.	L'implantation électronique (canon d'électrons)	54
IV.4.3.	Charge par Le contact liquide.....	55
IV.4.4.	Charge par rouleau électrostatique	56
IV.4.5.	Charge par la triboélectricité (contact + frottement)	57
IV.5.	Conclusion	58

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

V.1.	Introduction.....	59
V.2.	Caractérisation électrique des diélectriques.....	59
V.3.	Mesures de courants et mesures de potentiel de surface.....	59
V.3.1.	Les deux cas-type	59
V.3.2.	Théorie générale du déclin de potentiel.....	60
V.3.2.1.	Equations électrostatiques de base	60
V.3.2.2.	Application aux mesures de potentiel de surface	61
V.4.	Méthodes d'évaluation de l'état de charge d'un électret	63
V.4.1.	Techniques de mesure de la distribution spatiale de la charge d'espace	63
V.4.2.	Méthode électroacoustique pulsée	66
V.4.3.	Méthodes de stimulation thermique	67
V.5.	Méthodes électrostatiques de caractérisation des électrets.....	68
V.5.1.	Méthode de compensation	70
V.5.2.	Méthode à sonde capacitive	70
V.5.3.	Sonde à induction.....	71
V.5.4.	Moulin à champ.....	74
V.5.5.	Sonde à condensateur vibrant	76
V.6.	Conclusion :	79

Introduction

Générale

Introduction Générale

Dans certains matériaux les électrons sont liés et ont du mal à se déplacer car ils participent aux liaisons fortes qu'elles soient ioniques ou covalentes, ces matériaux sont en général des isolants électriques (diélectriques). [7] Le concept de matériau isolant électrique est né au XVIIIème siècle avec la découverte par Gray de la différence entre isolants et conducteurs. [1] 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. Dans le monde réel, les isolants ont des valeurs de résistivité qui sont très élevés, mais finis. Selon le modèle des bandes d'énergie la largeur de bande interdite des diélectriques est relativement grande ($>3eV$). [3] Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.

Les paramètres permettant de caractériser les matériaux diélectriques sont nombreux, cinq principales caractérisent les isolants utilisés en haute tension notamment la permittivité diélectrique, la rigidité diélectrique, le facteur de pertes, la conductivité électrique, décharges partielles [7]. La permittivité et le facteur de dissipation diélectriques mesurés d'un matériau sont affectés par divers paramètres physiques externes ou internes tels que fréquence, température, intensité du champ électrique, rayonnements ionisants, humidité et chimique ... [23]

Le phénomène de polarisation provient en général de l'orientation d'un dipôle électrique, induit ou permanent, en présence d'un champ appliqué (l'application d'un champ électrique \vec{E} déplace légèrement les charges positives et négatives les unes par rapport aux autres, provoquant l'apparition de dipôles électriques). Un dipôle électrique est formé par deux charges Q de signes opposés séparées par une distance. Polarisation des matériaux peut être due à plusieurs mécanismes connus sous le nom électronique, ionique ou atomique, dipolaire, la polarisation interraciale [32-33]. La possibilité de stocker des charges pendant une durée quasiment illimitée dans les matériaux isolants a été exploitée pour développer les dispositifs les plus variés, notamment en électroacoustique. . Pour mettre au point ces électrets. [1]

Selon les modes de formation des électrets, ces derniers sont classés en deux familles, les électrets dipolaires et les électrets à charge d'espace. En effet, les charges électriques qui peuvent être créées et piégées dans un diélectrique pour former un électret sont de deux catégories majeures : des mono charges appelées charges réelles, et des Dipôles orientés appelés charges liées. Il existe plusieurs méthodes de formation des électrets à charge d'espace. La Polarisation provient de charges des deux signes. Ces charges peuvent être

Introduction Générale

obtenues par Séparation d'hétéro-charges présentes et piégées dans le matériau et/ou par injection D'homo-charges au niveau des électrodes lors de l'opération de polarisation. La polarisation Peut également provenir d'un excès de charges apportées par d'autres processus tels que la Décharge couronne, l'implantation électronique (canon d'électrons), contact liquide, Charge par rouleau électrostatique ou la triboélectricité (contact + frottement) [31]

L'étude de la réponse des isolants solides chargés s'effectue souvent dans deux situations types, à savoir, la mesure du courant en circuit fermé et la mesure du potentiel de surface en circuit ouvert .L'évaluation des charges d'espace d'un électret, réparties en surface et en profondeur du matériau, peut se réaliser par la mesure directe ou indirecte de celles-ci. Elle permettra de caractériser l'aptitude du diélectrique à accumuler et à piéger des charges électriques. Plusieurs techniques de mesures ont été développées, certaines d'entre elles permettent d'estimer la répartition spatiale de la charge d'espace et son amplitude, tandis que d'autres donnent la possibilité d'accéder à des informations relatives aux charges d'espace dans les isolants sans pour autant conduire à la détermination de la distribution spatiale de celles-ci. [41]

L'accumulation de charge est un facteur de risque : la charge par contact ou frottement se produit lors du transport de liquides ou de poudres isolants, et l'accumulation de charge d'espace est un facteur critique pour le vieillissement et le claquage des matériaux isolants.

Les techniques de mesures électrostatiques, notamment la mesure de potentiel de surface, sont faciles à utiliser pour caractériser l'état de charge des isolant chargés et son évolution dans le temps.

L'ensemble de notre travail comprend cinq chapitres :

Le premier chapitre débute par la présentation des différents types des matériaux isolants, la suite est une présentation de quelques applications de méthodes de caractérisation des diélectriques.

Dans le deuxième chapitre nous rappelons quelque généralité et propriétés sur les diélectriques les plus utilisés dans les domaines de l'industrie. Ensuite on a vu les différents types d'isolants et les matériaux utilisés pour les produire.

Introduction Générale

Le troisième chapitre présente d'abord les classes des matériaux en général. Puis on passe à la présentation des différentes propriétés physiques des matériaux diélectriques et les facteurs qui les affectent.

Le quatrième chapitre est un rappel global sur les phénomènes de polarisation et mécanismes physiques qui pouvant expliquer la présence de charge électrique dans un diélectrique soumis à un flux d'énergie.

Le dernier chapitre est consacré aux diverses méthodes d'évaluation et de caractérisation électrique des matériaux diélectriques soumis à un flux d'énergie.

Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Introduction :

Au XIX ème siècle, les isolants solides se diversifient rapidement, des composés minéraux tel que le verre, la porcelaine, le mica se révèlent, pour la plupart d'entre eux, irremplaçables. Après la seconde guerre mondiale, les polymères synthétiques remplacent des composés organiques naturels comme le caoutchouc, la gutta-percha, les bitumes, l'ébonite, sans faire disparaître le bois, les papiers et cartons à base de cellulose ; ces nouveaux polymères sont des thermoplastiques (polyéthylène, polypropylène, polyamide, polyamides...), des thermodurcissables (époxydes, polyesters...) et des élastomères (polyéthylène réticulé chimiquement, silicone...) [1,5]

L'introduction des isolants liquides dans la technique des transformateurs remonte à 1887, avec le dépôt d'un brevet de G. Westinghouse, selon l'étude historique d'A. Von Imhof (1981). Les huiles minérales ainsi que des produits de synthèse telle que les polychlorobiphényles (PCB) sont bien implantés dans le secteur des transformateurs de puissance. Mais, de Nouveaux composés sont proposés comme substituts aux PCB. Pour imprégner les Condensateurs de puissance, les huiles minérales, puis les PCB ont été largement utilisés ; Depuis quelques années, ils sont progressivement remplacés par de nouveaux produits : le Néocaprâte de Benzyle (BNC), le Phénylxyléthane (PXE), Monoisopropylbiphényle (MIPB), quant à l'huile de ricin, employée comme imprégnant dans les condensateurs de stockage d'énergie, elle ne semble pas menacée. Par contre, dans l'appareillage (disjoncteurs, interrupteurs), les huiles minérales comme L'air sous pression cède la place au SF6 et au vide; dans le domaine des câbles, les isolants Extrudés massif à base de polyoléfines se substituent au papier imprégné d'huile minérale, de dodécylbenzène ou de Polybutène. Cependant, des isolations imprégnées dans lesquelles le papier « cellulose » a été remplacé en partie par un papier « polymère » sont expérimentés aux USA et au Japon.

Plus récemment, des gazes liquéfiées comme l'Azote, l'Hydrogène et l'Hélium ont été Proposés comme isolants dans les matériels cryogéniques. Les huiles de pétrole sont le liquide diélectrique isolant le plus courant. Cependant, les fluorocarbures, les silicones et les esters organiques, y compris l'huile de ricin, sont utilisés en quantités importantes. Un certain nombre de considérations entrent en compte dans la sélection de tout liquide

diélectrique. Les propriétés électriques importantes du liquide comprennent la rigidité diélectrique, la conductivité, le point d'éclair, la teneur en gaz, la viscosité, la constante diélectrique, le facteur de dissipation, la stabilité, etc. En raison de leur faible facteur de dissipation et d'autres excellentes caractéristiques, les polybutanes sont de plus en plus utilisés par industrie électrique. [13]

I.2. Applications à la caractérisation des matériaux isolants

Les premières modélisations modernes des propriétés des isolants datent des années 1830, avec d'une part, la description par Faraday de leur capacité à stocker de l'énergie électrostatique, et la naissance du terme diélectrique, et d'autre part la découverte par Ohm de sa célèbre loi. Cette séparation par la pensée, sinon dans la réalité, des deux aspects de l'isolant, stockage de l'énergie et rétention (ou dissipation progressive) de la charge, résumée dans le modèle condensateur résistance, est restée jusqu'à aujourd'hui la pierre angulaire de la modélisation des isolants, au point que, suivant les périodes et les communautés, on finisse trop souvent par complètement perdre de vue la coexistence des deux aspects.

Dans les années 1980-90 la mode était à la charge d'espace. Alors que depuis très longtemps, comme en témoignent les ouvrages écrits 10 à 20 ans plus tôt [7], on considérait surtout les isolants sous l'angle de leurs propriétés diélectriques, on avait découvert que les charges pouvaient pénétrer les isolants solides utilisés dans les installations et semblaient pouvoir jouer un grand rôle dans l'initiation de leur vieillissement. De nombreuses techniques ont vu le jour à la fin des années 1970 et se sont répandues dans les années 1980, visant à donner une image de la répartition volumique de la densité de ces charges injectées, en utilisant la propagation d'une onde de pression dans le matériau (Laser induced pressure pulse, LIPP, ou Pulsed Electro Acoustic, PEA), ou celle d'une onde thermique (Thermal Step Method [TSM], Laser Intensity Modulation Method [LIMM]). Une revue déjà un peu ancienne [8] en donne une idée et depuis, d'autres techniques ont été développées qui permettent une cartographie tridimensionnelle de la charge [9].

La modélisation des mécanismes de conduction a accompagné cet essor expérimental, avec le développement des simulations informatiques. Des modèles du

parcours de la charge dans le matériau faisant appel à la notion de mobilité modifiée par le piégeage (mobilité effective), soit sous forme de rétention partielle de la charge, ou de conduction par sauts, se sont développés. Mais le déplacement des charges d'espace n'est pas pour autant devenu le seul paramètre déterminant la réponse d'un matériau, qui est évidemment, quel que soit la technique utilisée, la somme de différentes composantes. Ce fait est connu depuis longtemps des polyméristes, qui analysent les différentes relaxations du matériau à travers par exemple des techniques de spectroscopie diélectrique, ou de TSC (courants thermo stimulés), qui permettent d'obtenir des ordres de grandeurs des énergies des phénomènes considérés, et de les relier à la structure moléculaire ou à plus grande échelle du matériau **[10]**.

Pourtant, il faut bien constater que les modes (ou paradigmes) existent aussi en science et les chercheurs sont souvent prisonniers d'un cadre de raisonnement fixé par la période et le contexte : dans les années 90, on peut dire en forçant le trait, que dans la communauté du génie électrique étudiant les propriétés électriques des matériaux isolants, tout signal observé était avant tout le signe d'une charge d'espace qui s'injectait.

Un autre paradigme concernant ces modèles de charge d'espace était la tendance – toujours actuelle sans doute à la modéliser comme des électrons, sautant de pièges en pièges pour traverser le matériau, en transitant par la bande de conduction. Bien plus rarement il était question de conduction ionique. En fait, les modèles de conduction adoptés étaient la transcription des modèles développés dans le cadre de la physique du solide des semi-conducteurs, puis des oxydes. Or, les matériaux utilisés en génie électrique sont, la plupart du temps, des polymères. En d'autres termes, peut-on utiliser des notions développées en considérant le désordre comme une perturbation d'un réseau fondamentalement ordonné (introduisant des états localisés, venant perturber une structure de bandes d'énergie) à des situations de très grand désordre, avec les multiples possibilités de piégeage que présentent les polymères utilisés en isolation.

La charge ne pénétrait dans les matériaux que dans certains contextes, les modèles les plus répandus n'étaient pas forcément les plus adaptés aux situations expérimentales les plus fréquentes, et 'il existait un risque accru par les développements des simulations informatiques de développer des modèles sophistiqués permettant d'obtenir un bonne adéquation des courbes au modèle.

I.2.1. Caractérisations de résines époxy

La technique de déclin de potentiel étant utilisée comme outil de caractérisation de la conductivité de surface du matériau. Pour comprendre la réponse d'échantillons de résine époxy après un dépôt de charge mené à remettre en question l'interprétation qui en était généralement donnée dans le laboratoire, car il a montré l'importance des phénomènes de polarisation dans le matériau étudié.

I.2.2. Caractérisation de films de polypropylène

Le polypropylène est un des polymères les plus utilisés en isolation. L'homopolymère utilisé pour les films techniques du génie électrique est le polypropylène isostatique, semi cristallin. Les faibles pertes diélectriques de ce matériau ainsi que leur stabilité avec la fréquence sont les raisons principales de son utilisation dans les condensateurs de puissance, ou il est utilisé comme diélectrique sous forme de film biétiré mécaniquement, imprègne ou non.

I.2.3. Caractérisation de l'état de charge des isolants fibreux non tissés

Le système triode est utilisé par *Tetsuji Oda* et *Jun Ochiai* pour leur étude de la charge des médias filtrants non tissés. Les échantillons utilisés ont une épaisseur de 140 μm et sont obtenus à base de fibres en polypropylène de diamètre 1,6 μm . Les auteurs ont effectué des dépôts en polarité négative qui durent 30 min et ils ont observé que le profil du potentiel de surface est uniforme pour un potentiel de grille inférieur à 1 kV. Ce profil devient non uniforme pour les valeurs du potentiel de grille assez élevées. Ils ont également constaté que le potentiel de surface des échantillons est limité à 600 V, ceci est attribué à des décharges locales dans le média vu sa porosité importante, définie par un faible *facteur d'occupation* qui caractérise la teneur du média fibreux. Le courant observé à travers l'échantillon décroît dans le temps, durant sa charge. Cependant, lorsque le potentiel de grille dépasse 150 V, le courant est instable et présente des pics tel que les bruits, ce qui indique l'existence de décharge locale dans l'échantillon. La décharge luminescente n'a pas encore été observée. [31]

Les travaux expérimentaux de *R. Kacprzyk* et *W. Mišta*, réalisés à l'Université Wrocław de Pologne, révèlent l'intérêt pratique de la mesure de la valeur maximale du potentiel de surface d'un média fibreux non tissé. La loi de Paschen pourrait être utilisée

pour déterminer la valeur maximale du potentiel de surface, mais celle-ci est souvent plus grande que les résultats des mesures. Ce fait a été attribué à la décharge inverse (back corona) qui se produit au niveau des échantillons. Les mesures indirectes du potentiel de surface des échantillons fibreux non tissés en polypropylène (PP), chargés par décharge couronne à l'aide d'un système de triode, étaient réalisées à l'aide d'un champmètre (FM981-METRA). Les auteurs ont constaté que le potentiel de surface augmente linéairement avec le potentiel de la grille pour des valeurs relativement faibles, la différence entre le potentiel de la grille et de la surface mesuré étant de l'ordre de 100 à 200 Volt. Puis une saturation du potentiel de surface apparaît et elle est accompagnée par une augmentation soudaine du courant de charge à travers le média. Ceci, est justifié par l'apparition des ionisations locales de l'air contenu dans la structure fibreuse des échantillons. L'observation visuelle de ces décharges inverses n'a pas été possible qu'en absence de la grille et dans l'obscurité [31].

Les observations rapportées par *E. Motyl* et *B. Łowkis* révèlent la dépendance de l'état de charge des filtres à électrets de leurs conditions de formation ainsi que l'influence de l'humidité relative d'air sur l'affaiblissement de la charge et la durée de vie de ces électrets filtres en polypropylène, dont la conductivité électrique est très basse [34]. Deux groupes d'échantillons sont utilisés. Ils se différencient par leurs épaisseurs. Les échantillons sont chargés par décharge couronne, générée par une pointe portée à +10 kV, durant une minute et dans les conditions atmosphériques. Puis les échantillons sont conditionnés dans des enceintes où l'humidité relative est contrôlée. Les auteurs ont constaté que l'humidité accentue l'affaiblissement de la charge des échantillons, par contre les échantillons dont l'épaisseur est importante sont moins sensibles à l'humidité.

Dans une autre expérience, *E. Motyl* et *B. Łowkis* tentent d'obtenir une relation entre la charge équivalente et l'indice de filtration du filtre à électret [48]. Cet indice, qui caractérise l'efficacité du filtre, est obtenu pour des particules de NaCl. La caractérisation de l'état de charge des filtres est effectuée par la méthode de stimulation thermique. Les auteurs ont constaté un rétablissement partiel du potentiel de surface dans des conditions atmosphériques après avoir sauvegarder les échantillons chargés, pendant 14 jours, dans une enceinte où l'humidité relative est poussée à 100%.

En plus de l'évaluation des effets du traitement des échantillons fibreux non tissés sur l'état de charge de ces échantillons, tels que le séchage et l'utilisation des additifs, *M. Nifuku et al* ont effectué une étude comparative sur la charge des filtres en polypropylène par différentes formes d'ondes de tension électrique [49]. En effet, trois types de tension sont utilisés pour générer la décharge couronne servant à la charge du média, à savoir, la tension continue, une série d'impulsions de tension (200 impulsions par seconde) et une tension combinée d'une composante continue et d'une impulsion large.

Les auteurs révèlent que la densité de charge surfacique est comprise entre 20 à 50 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ et que l'utilisation d'une tension combinée apporte d'avantage de charge au filtre à électret. Les médias fibreux à surface spécifique élevée ont fait l'objet d'une étude réalisée par *M. Ignatova et al* [50]. Ces médias non tissés, à base des nano-fibres de polyéthylène téréphtalate (PET), sont utilisés comme filtres formés par électro-filage (electrospun). En plus de la caractérisation de ces médias par des mesures de potentiel de surface, les auteurs ont mené une étude comparative de la relaxation des échantillons par la méthode des courants thermo-stimulés. Certains échantillons obtenus par électro-filage ont subi un dépôt de charge supplémentaire par décharge couronne. L'étude révèle que ces médias non tissés à surface spécifique élevée ont une aptitude à stocker une importante charge d'espace. Les courants obtenus par thermo-stimulation sont clairement plus importants pour les médias non tissés que pour les films en PET, lorsqu'ils ne subissent aucun dépôt de charge. Ceci est attribué à la relaxation des médias non tissés due à la dépolarisation qui n'est pas négligeable.

1.2.4. 1.2.4. Caractérisation des propriétés électriques des composites

L'utilisation de matériaux isolants et la performance de ces matériaux constitue un élément très important. Plusieurs systèmes d'isolation sont des polymères renforcés par des particules de taille micrométrique. Ces renforts permettent une amélioration des performances, surtout mécaniques et la résistance aux décharges, mais comportent des inconvénients (diminution de la rigidité diélectrique, sensibilité à l'absorption d'humidité, etc) ce qui mène à chercher d'autres solutions afin d'améliorer les systèmes d'isolation. Récemment, une nouvelle classe a fait l'objet d'un grand intérêt scientifique, celle des nano diélectriques (Frechette et al, 2004). Ce sont des diélectriques comportant des nano particules remplaçant ainsi les microparticules. Même à faible teneur d'additif, il y a une

amélioration considérable des différentes propriétés électriques. Une condition nécessaire dans la fabrication des nano composites est qu'il faut s'assurer de la bonne dispersion des particules dans la matrice hôte afin d'éviter la formation des agglomérats de taille micrométrique. Dans ce contexte, visait à adapter les propriétés diélectriques des composites à base d'une résine d'époxy DER332. Ces composites dotés de nano particules à savoir le noir de carbone et d'un deuxième additif le GPOSS dans le but de contrôler la conductivité électrique.

En effet, les composites époxy/noir de carbone sont actuellement utilisés afin de fabriquer le revêtement conducteur extérieur dans un bon nombre d'applications et particulièrement pour l'isolation statorique des machines tournantes. Le contrôle de la conductivité de ces matériaux (qui ne doivent pas être ni trop conducteurs, ni trop isolants) a d'une grande importance. Les particules de noir de carbone ont également été altérées par broyage mécanique. Il fallait trouver les concentrations optimales de noir de carbone pour avoir une meilleure amélioration pour les propriétés électriques tout en sachant que le broyage permet généralement la réduction de la taille des particules et ainsi il permet leur dissociation afin d'éviter la formation des agglomérats.

Les propriétés diélectriques des matériaux produits ont été investiguées via deux méthodes de mesure, la spectroscopie diélectrique et la rupture diélectrique. La première permet de calculer la permittivité complexe et la conductivité complexe qui sont liées mathématiquement. Ces deux paramètres sont en lien avec les phénomènes de polarisation, de relaxation et de transport de charges. La mesure de la rigidité diélectrique ne s'applique que pour les échantillons non conducteurs et permet de mesurer le champ électrique maximal que peuvent supporter ces matériaux avant d'être perforés. Pour la mesure de spectroscopie, il y a deux domaines dans lesquels ces mesures peuvent être faites, à savoir le domaine fréquentiel et temporel. Les résultats trouvés mènent à conclure que l'augmentation de la teneur en noir de carbone entraîne une augmentation de la grandeur de la conductivité complexe et par la suite de la permittivité diélectrique, particulièrement de la partie imaginaire de la permittivité diélectrique. L'ajout du GPOSS agit sur la dispersion des particules et permet la rigidification du réseau de réticulation en augmentant la densité des liaisons. Le résultat obtenu a été une diminution des pertes et de la conductivité complexe. La rigidité diélectrique est dépendante de plusieurs paramètres comme les

conditions de mesure, l'épaisseur de l'échantillon et bien évidemment la nature des matériaux et la nature de la dispersion des particules dans la matrice hôte. La microscopie électronique à balayage permet de voir la morphologie des nano composites à l'échelle micrométrique. Le temps de broyage s'avère être un élément important dans la dissociation des particules permettant la réduction de leur taille. En effet, la diminution de la taille des particules entraîne la diminution de la conductivité électrique.

1.2.5. Caractérisation de TiO₂ pour des structures métal-isolant-métal

Les capacités MIM (Métal/Isolant/Metal) font partie des composants passifs qui sont utilisées dans les mémoires DRAM (Dynamic Random Access Memory), des applications de filtrage radiofréquence (découplage) ou comme convertisseurs analogique - numérique. En ce qui concerne les capacités MIM pour l'application de type DRAM. Chaque cellule DRAM est composée d'un condensateur qui mémorise la présence ou l'absence de charge ce qui définit l'état logique de la mémoire. Le terme « dynamic » signifie que ce type de mémoire nécessite un rafraîchissement régulier des cellules contenant les données car les courants de fuite des condensateurs sont à l'origine de la perte dans le temps de l'information contenue dans la cellule. Ce rafraîchissement doit être effectué avec une période de l'ordre de quelques centaines de millisecondes. La valeur de la capacité est définie par l'expression :

$$C = \frac{\epsilon_0 \times \epsilon_r \times S}{e} \quad (1.1)$$

Avec ϵ_0 : la permittivité du vide

ϵ_r : la permittivité diélectrique relative de l'isolant,

s : la surface de la capacité,

e : l'épaisseur du diélectrique

Pour augmenter la densité capacitive des structures MIM, une solution consiste à diminuer l'épaisseur du diélectrique. Cependant, l'épaisseur de diélectrique ne doit pas être trop faible pour ne pas dégrader les performances électriques de la capacité telles que la rigidité diélectrique ou les niveaux de courants de fuites, critères déterminants pour l'application DRAM. Une autre solution est d'augmenter la surface de la capacité. Des capacités avec une architecture en trois dimensions sont maintenant développées. Cette

solution s'avère néanmoins insuffisante pour atteindre des densités capacitives élevées de l'ordre de la centaine de nF/mm². Pour cela, il est nécessaire de remplacer les diélectriques conventionnels SiO₂ ($\epsilon_0 = 3.9$) et Si₃N₄ ($\epsilon_0 = 6.9$) par des isolants à haute permittivité diélectrique dits "high-k". Des matériaux comme Al₂O₃ ($\epsilon_0 = 9$), Ta₂O₅ ($\epsilon_0 = 25$) ou ZrO₂ ($\epsilon_0 = 40$) ont été utilisés pour fabriquer des structures MIM d'une densité capacitive allant jusqu'à la dizaine de nF/mm².

Cependant, le besoin de condensateurs présentant des densités capacitives de l'ordre de la centaine de nF/mm² pour les prochaines générations MIM requiert l'utilisation de matériaux isolants avec une permittivité encore plus élevée. Le dioxyde de titane (TiO₂) s'avère être un candidat potentiel pour les futures générations de mémoires DRAM notamment grâce à constante diélectrique élevé de sa phase cristalline rutile. En effet, la phase rutile présente une constante diélectrique qui est la plus élevée parmi les oxydes binaires (ϵ_0 variant de 90 à 170 selon l'orientation de la maille cristalline tétragonale). Cependant, malgré ses propriétés diélectriques intéressantes, sa faible largeur de bande interdite (≈ 3 eV) et les défauts intrinsèques du matériau lui conférant un dopage type N sont à l'origine d'un courant de fuite important lorsqu'il est intégré en tant qu'isolant dans les structures MIM. L'élaboration des structures MIM requiert le dépôt de couches très minces de 10 à 20 nm d'épaisseur. Le choix du procédé de dépôt par ALD (Atomic Layer Deposition) à en plus l'avantage de permettre un contrôle très précis de l'épaisseur des couches minces déposées grâce à son mécanisme de réaction chimique autolimité à la surface du substrat.

Les structures MIM pourraient constituer à terme la prochaine génération de condensateurs pour des applications de type DRAM. Il constitue donc un excellent compromis entre les oxydes complexes à plusieurs cations métalliques (STO, PZT, BST) et les oxydes binaires plus « matures » comme le HfO₂, le ZrO₂ ou le Ta₂O₅. Bien qu'ayant des permittivités diélectriques très élevées (de cent à plusieurs milliers), les oxydes complexes présentent de nombreuses difficultés concernant leur intégration dans des structures MIM (techniques de dépôt en couches minces complexes, problèmes de stœchiométrie et de conservation de la permittivité pour les films minces). Quant aux autres oxydes binaires, les nombreux résultats issus de la recherche ont montré qu'il n'était guère possible d'atteindre des valeurs de permittivité supérieures à 50. Le TiO₂ s'est donc avéré comme une solution

alternative avec des atouts indéniables tels que la facilité de dépôt en couches minces du matériau, la conservation de sa permittivité pour des films ultra-minces (< 10 nm) et une constante diélectrique aux alentours de 100 en phase rutile. L'obtention d'une phase rutile du TiO₂ n'est généralement possible que par des conditions de dépôts sévères nécessitant une température élevée (> 700°C), le choix d'une électrode à base de Ru a permis d'obtenir la même phase rutile à des températures de 200°C. L'obtention de cette phase rutile du TiO₂ nécessitait une oxydation préalable de l'électrode de Ru sur une faible épaisseur. Les traitements thermiques entraînaient une dégradation notable de l'état de surface de l'électrode inférieure en termes de rugosité.

I.3. Conclusion

Ce premier chapitre débute par la présentation des différents types des matériaux isolants, la suite est une présentation de quelques applications de méthodes de caractérisation des diélectriques.

Le deuxième chapitre présent les matériaux diélectriques est leurs propriétés.

Chapitre II

Matériaux diélectriques

II.1. Généralités sur les diélectriques :

II.1.1. Historique et définition :

Le concept de matériau isolant électrique est né au XVIIIème siècle avec la découverte par Gray de la différence entre isolants et conducteurs. **[1]** Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas de charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Un isolant possède peu de charges libres, elles y sont piégées, contrairement à un matériau conducteur où les charges sont nombreuses et libres de se déplacer sous l'action d'un champ électromagnétique. Grâce à leurs propriétés isolantes les diélectriques ont une très grande importance dans l'industrie, comme composants actifs (piézoélectrique, pyroélectriques, électro-optiques...etc.), mais également comme composants passifs (condensateur pour le stockage de l'énergie électrique, isolation de câbles). **[2]** Il ne faut pas confondre, un isolant désigne la propriété d'un matériau de ne pas conduire l'électricité ou qui caractérise ce même matériau et un isolateur qui désigne un composant électrotechnique fait de matériau isolant.

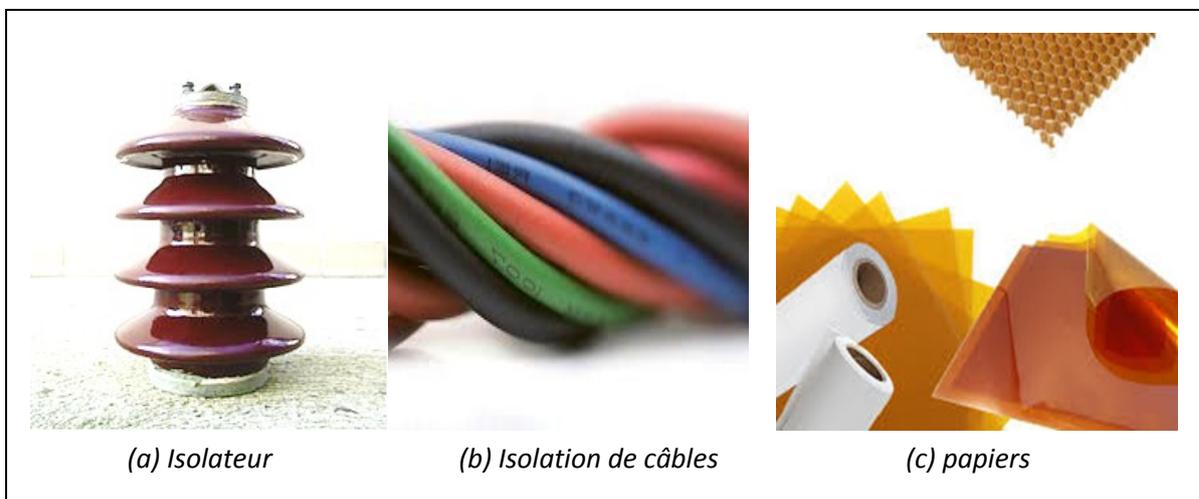
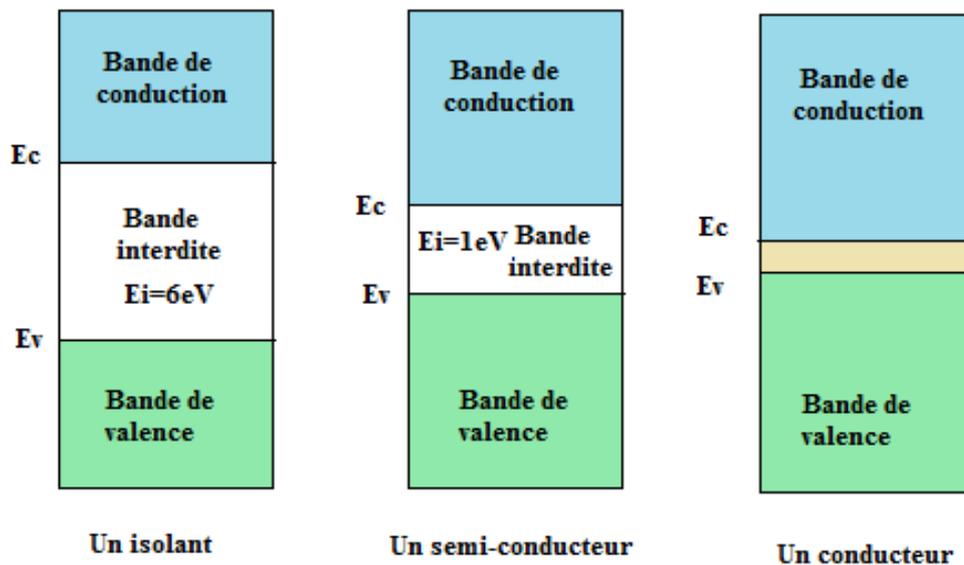


Figure II.1. Matériaux diélectriques

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 bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en courant continue doit être infiniment grande ou la largeur de bande interdite

des diélectriques est relativement grande (>3eV). [3] Selon le modèle des bandes d'énergie la matière devient diélectrique, c'est à dire mauvaise conductrice de l'électricité, quand les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV [4].



Figurier II.2Modèle des bandes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur

Alors, un très petit nombre seulement d'électrons reçoivent, à température ordinaire, l'énergie thermique nécessaire pour effectuer une transition dans la bande de conduction. Quand la température s'élève la probabilité de transition augmente, et l'on observe pour la conductivité σ une dépendance du type : [2]

$$\sigma = \sigma_0 e^{\left(\frac{-\omega}{k_B T}\right)} \tag{II.1}$$

L'isolant idéal est une substance à résistivité infinie. Dans le monde réel, les isolants ont des valeurs de résistivité qui sont très élevés, mais finis. Le tableau II.1 donne une indication de la résistivité d'un certain nombre d'isolateurs, exprimée à l'aide des Système MKSA (mètre, kilogramme, seconde, ampère) [5].

Tableau II.1. Résistivité d'un certain nombre d'isolants exprimé en [$\Omega.m$]

Polypropylène	Polyamide	Epoxy	Phlogopite Mica	Silica Glass
10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{11}

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 est appelé courant résiduel. En HT alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques [7].

II.1.2. Liste de certains matériaux isolants courants [7]

- ABDOS.
- ACÉTATE
- ACRYLIQUE
- OXYDE DE BERYLLIUM
- CÉRAMIQUE
- DELRIN
- ÉPOXY / FIBRE DE VERRE
- VERRE
- KAPTON
- KYNAR
- LEXAN
- MERLON
- MELAMINE
- MICA
- NEOPRENE
- NOMEX
- NYLON
- ANIMAL DE COMPAGNIE. (Polyéthylène téréphtalate)
- PHÉNOLIQUES
- POLYESTER (MYLAR)
- POLYOLÉFINES
- POLYSTYRENE
- POLYURETHANE
- PVC (polyvinylchlorure)
- SILICONE / FIBRE DE VERRE
- CAOUTCHOUC DE SILICONE
- TFE (TEFLON)
- THERMOPLASTIQUE
- PAPIERS ISOLANTS ÉLECTRIQUES, BANDES ET MOUSSES
- NEOPRENE
- POLYSTYRENE
- POLYURETHANE
- SILICONE
- VINYLE

•LAMINÉS

II.1.3. Utilisation des diélectriques

Les diélectriques étant de bons isolants électriques, ils sont utilisés pour remplir les fonctions de diélectrique d'un condensateur, afin de stocker le maximum d'énergie électrique dans le volume le plus faible possible. On insère aussi des couches de diélectriques dans les condensateurs industriels, ce qui permet d'augmenter la capacité en diminuant l'encombrement. Les diélectriques sont aussi utilisés pour isoler des câbles électriques afin d'éviter des contacts avec d'autres câbles, ou assurer la protection des personnes, ou supporter les conducteurs d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre. [7]

Une large variété d'applications, qui comprend aussi les nouveaux dispositifs médicaux et dans les domaines biologiques. Les dispositifs qui peuvent être réalisés avec ces matériaux sont par exemple les électrets microphones, les traducteurs électromécaniques, les détecteurs piézoélectriques. Une autre application très répandue est dans le domaine des filtres d'air. , sont réalisés par des fibres très fines de différentes polymères (polypropylène, polystyrène, polyéthylène, polyester, etc.) [8]

II.2. Normes relatives aux matériaux isolants électriques

Les normes ASTM (American Society for Testing Material) en matière de matériaux isolants jouent un rôle déterminant dans la spécification, l'évaluation et le test des propriétés électriques et physiques des matériaux utilisés principalement comme isolant électrique dans les dispositifs et équipements associés. Ces propriétés comprennent la tension de claquage diélectrique, la résistance diélectrique, la perte alternative, la permittivité (constante diélectrique), la résistance et la conductance continues, le facteur de dissipation, la capacité d'échange ionique, la résistivité ionique et d'autres propriétés physiques. Ces normes sur les matériaux d'isolation électrique permettent aux fabricants d'examiner et d'évaluer ces matériaux et équipements afin de garantir leur qualification pour une utilisation en toute sécurité [6].

II.3. Classification des matériaux diélectriques

Les diélectriques sont classés généralement en trois classes :

II.3.1. Matériaux piézoélectriques

Ce sont des matériaux qui ne possèdent pas un centre de symétrie, il est possible d'induire au sein de ses matériaux une polarisation sous l'effet d'une contrainte et inversement. Parmi les 32 groupes de symétrie ponctuelle, il y a 20 groupes piézoélectriques.

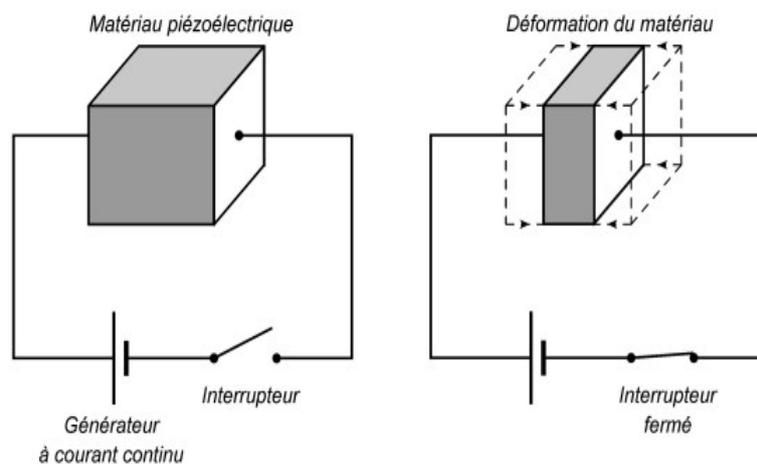


Figure II.3 Piézoélectricité

II.3.2. Matériaux pyroélectriques

Ces matériaux possèdent un axe polaire unique et peuvent donc présenter une polarisation Spontanée le long de cet axe qui dépend généralement de la température. Il y a 10 classes parmi les matériaux piézoélectriques qui sont pyroélectriques.



Figure.II.4.Détecteur pyroélectrique

II.3.3. Matériaux ferroélectriques

Ces matériaux possèdent une polarisation spontanée pouvant être modifiée et renversée par l'application d'un champ électrique, ces matériaux constituent un sous-groupe des matériaux pyroélectriques.

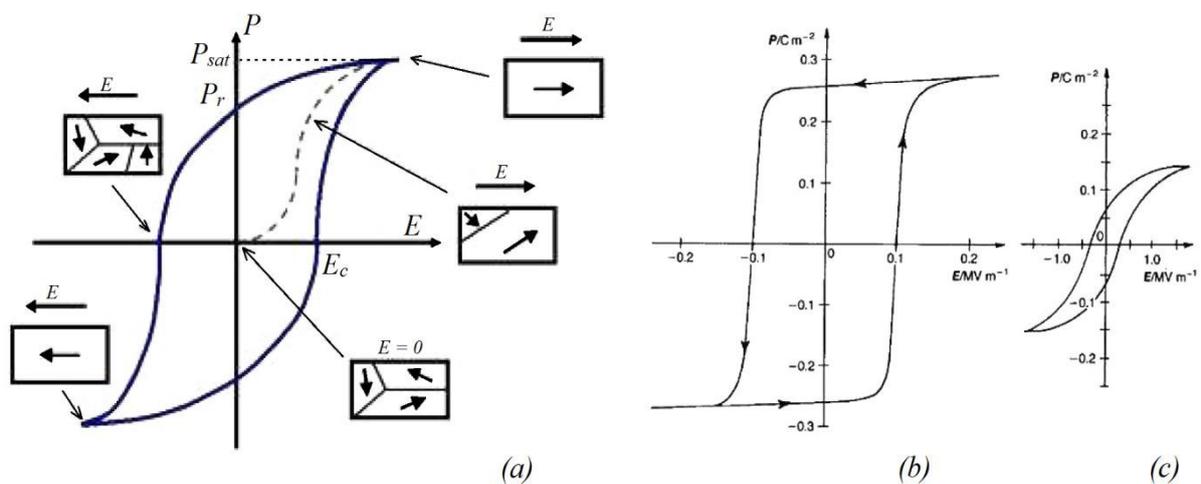


Figure.II.5 Cycle d'hystérésis schématique d'un matériau ferroélectrique montrant l'évolution de la polarisation P en fonction du champ électrique E appliqué

pour une température $T < T_c$. La courbe en pointillés correspond à la courbe de première polarisation. Les petits schémas représentent l'évolution de la structuration en domaines ferroélectriques du matériau. b) Cycles ferroélectriques $P(E)$ mesurés dans le cas de $BaTiO_3$ sous forme de monocristal, et (c) céramique. [9, 10]

II.4. Types d'isolant utilisé dans l'industrie électrique

a. Isolants naturels :

- minéraux ;
- organiques.

b. Isolants synthétiques

- matières plastiques
- élastomères ;
- composites. [12 -13]

II.5. Milieux diélectriques

II.5.1. Solide

II.5.1.1. Isolants naturels

a. Minéraux

- Verres :

Sable siliceux + chaux + soude. Utilisés pour les isolateurs. Résistent à la chaleur et aux agents chimiques.

Propriétés : $T_{\max} = 400 \text{ à } 500 \text{ °C}$; $G \approx 7 \text{ kV/mm}$; $\tan\delta = 0,02 \text{ à } 0,04$; $\epsilon_r = 7$.

- Céramiques :

Argile + quartz + fondants + oxydes métalliques. Utilisées dans les isolateurs de lignes aériennes et d'antennes, les supports d'inductances HF et UHF, les condensateurs HF, les composants piézo-électriques.

Propriétés : $T_{\max} = 200 \text{ à } 500 \text{ °C}$; $G \approx 10 \text{ à } 20 \text{ kV/mm}$; $\tan\delta = 5.10^{-4} \text{ à } 1,2.10^{-2}$; $\epsilon_r = 10 \text{ à } 3000$.

- Mica et produits micacés :

Silicates hydratés de métaux alcalins. Utilisés pour l'isolation à haute température des radiateurs de composants de puissance (feuilles de mica).

Propriétés : $T_{\max} = 500$ à 1000 °C ; $G \approx 210$ à 240 kV/mm ; $\tan\delta = 3.10^{-4}$ à 26.10^{-4} ; $\epsilon_r = 6$ à 7 .

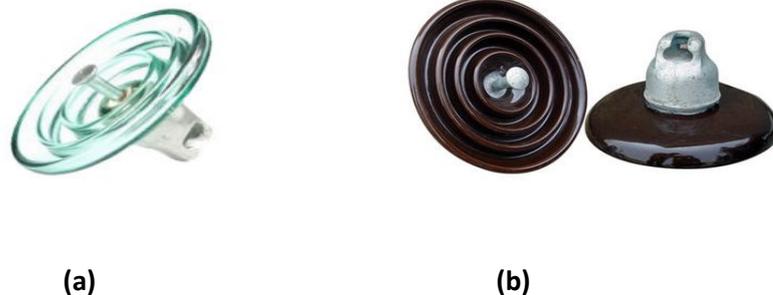


Figure.II.6.Isolateurs en : (a) Verre (b) Céramique

b. Organiques :

- Papiers :

Cellulose extraite du bois ou de l'alfa. Imprégnés de diélectrique liquide pour éviter l'absorption d'eau, ils sont utilisés dans les transformateurs secs et les condensateurs.

Propriétés : $T_{\max} = 105$ °C ; $G \approx 50$ à 80 kV/mm (papier sec) ; 100 kV/mm (papier imprégné d'huile) $\tan\delta = 2.10^{-3}$ à 4.10^{-3} ; $\epsilon_r = 4$ à 6 .

- Textiles :

Coton, soie naturelle, fibres artificielles. Rubans, toiles pour l'isolation, de conducteurs de faible diamètre, bobines.

Propriétés : $T_{\max} = 90$ à 120 °C ; $G \approx 5$ à 10 kV/mm ; $\epsilon_r = 3$.

- Caoutchouc :

Résine naturelle, latex de l'hévéa. Isolation de conducteurs et de câbles.

Propriétés : $T_{\max} = 60$ °C ; $G \approx 20$ à 30 kV/mm ; $\epsilon_r = 3$.



Figure.II.7.Bande électrique en caoutchouc

II.5.1.2. Isolants synthétiques

- **Matières plastiques**

Une matière plastique est le résultat d'un mélange qui comprend :

- une résine de base ou polymère, obtenue à partir de réactions chimiques complexes de polymérisation effectuées sur des matières de base :
- dérivés du pétrole ou du charbon ;
- calcaires, sable, fluorures, sels marins ;
- bois.

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.

Les procédés de fabrication des matières plastiques sont principalement basés sur des traitements à haute température, sous des pressions élevées.

a) Caractéristiques des matières plastiques

- très bonne rigidité diélectrique : toujours $\geq 10 \text{ kV/mm}$;
- résistivité élevée : $10^8 \leq \rho \leq 10^{17} \Omega.m$;
- faibles pertes diélectriques ;
- propriétés mécaniques inférieures à celles des métaux mais pouvant être améliorées par les procédés de fabrication (charges).

b) Matières plastiques utilisées en électrotechnique

Bakélite, Epoxydes, PVC, Polyéthylène, Téflon.



Figure.II.8 Isolation câble en PVC

II.5.2. Isolants liquides

Sont utilisés dans les équipements haute tension pour servir à la fois l'isolation et la chaleur. Ils ont l'avantage qu'un chemin de piqûre est auto-guérisseur. Les pannes temporaires dues à la surtension sont rapidement ré-isolées par un écoulement de liquide dans la zone attaquée.

Les liquides hautement purifiés ont des résistances diélectriques pouvant atteindre 1MV/cm. Dans les conditions de service réelles, la résistance à la rupture diminue considérablement en raison de la présence d'impuretés. Le mécanisme de décomposition dans le cas de liquides très purs est identique à celui du gaz, mais dans les liquides du commerce, les mécanismes de décomposition sont considérablement altérés par la présence d'impuretés solides et de gaz dissous.

Les huiles de pétrole sont le liquide diélectrique isolant le plus courant. Cependant, les fluorocarbures, les silicones et les esters organiques, y compris l'huile de ricin, sont utilisés en quantités importantes. Un certain nombre de considérations entrent en compte dans la sélection de tout liquide diélectrique.

Les propriétés électriques importantes du liquide comprennent la rigidité diélectrique, la conductivité, le point d'éclair, la teneur en gaz, la viscosité, la constante diélectrique, le facteur de dissipation, la stabilité, etc. En raison de leur faible facteur de dissipation et d'autres excellentes caractéristiques, les polybutanes sont de plus en plus utilisés industrie électrique. Cependant, dans les années 1970, il a été constaté que les

Askarels, qui étaient utilisés de manière plus intensive, présentait des risques pour la santé et que, par conséquent, la plupart des pays avaient légalement interdit leur production et leur utilisation. De nombreux nouveaux liquides diélectriques ont depuis été mis au point et ne présentent aucun risque environnemental négatif. Ceux-ci comprennent les huiles de silicone, les hydrocarbures synthétiques et fluorés.

Dans les applications pratiques, les liquides sont normalement utilisés à des tensions d'environ **50 à 60 kV / cm** lorsque l'équipement est utilisé en permanence. D'autre part, dans des applications telles que les traversées haute tension, où le liquide diélectrique ne remplit que les vides du diélectrique solide, il peut être utilisé à des contraintes aussi élevées que **100-200 kV / cm [13]**



Figure.II.9.Huile d'isolation de transformateur

II.5.2.1. Huiles minérales

Dérivés du pétrole, utilisées dans les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs et les câbles.

- **Propriétés**

- rigidité diélectrique : **$G \approx 9 \text{ à } 10 \text{ kV/mm}$**

- facteur de dissipation : **$\tan\delta = 4.10^{-4}$**

- permittivité relative : **$\epsilon_r = 4 \text{ à } 6$** .

II.5.2.2. Huiles synthétiques

-Huiles chlorées

Ininflammables (pas de risque d'incendies), utilisées pour les transformateurs, les disjoncteurs, les condensateurs.

-Huiles silicones : Résistent à des températures élevées, prix élevés.

-Huiles végétales (ricin) : Plastifiant dans la fabrication des vernis et des résines.

II.5.2.3. Vernis

Ce sont des associations résine + solvant + siccatif. Utilisés pour l'imprégnation des bobinages. [6]

II.5.2.4. Gazeux

Un gaz diélectrique est également appelé gaz isolant. C'est un matériau diélectrique à l'état gazeux qui peut empêcher les décharges électriques. L'air sec, l'hexafluorure de soufre (SF₆), etc. sont des exemples de matériaux diélectriques gazeux.

Les diélectriques gazeux ne sont pratiquement pas exempts de particules chargées électriquement. Lorsqu'un champ électrique périphérique est appliqué à un gaz, les électrons libres sont formés. Ces électrons libres sont accélérés de cathode à anode par la pression électrique qui leur est appliquée.



Figure.II.10.Gaz de l'hexafluorure du soufre SF₆ non inflammable

Lorsque ces électrons obtiennent une énergie suffisante pour détruire les électrons des atomes ou des molécules de gaz, ils ne sont plus impliqués dans les molécules et la concentration en électrons commence alors à s'accumuler de manière exponentielle. En conséquence, une panne survient.

Quelques gaz tels que **SF6** sont fortement attachés (les électrons sont puissamment attachés à la molécule), certains sont faiblement attachés pour, par exemple, l'oxygène et d'autres pas du tout, par exemple. N2. L'ammoniac, l'air, le dioxyde de carbone, l'hexafluorure de soufre (SF6), le monoxyde de carbone, l'azote, l'hydrogène, etc. sont des exemples de gaz diélectriques. La teneur en humidité des gaz diélectriques peut altérer leurs propriétés pour en faire un bon diélectrique.

En réalité, il s'agit de la baisse de résistance des gaz isolants. Cela se produit lorsque la tension appliquée augmente par rapport à la tension de claquage (rigidité diélectrique). À la suite de cela, le gaz va commencer à conduire. Autrement dit, il y aura une forte augmentation de la tension dans une petite zone du gaz. Cette zone de forte élévation de tension est la raison de l'ionisation partielle du gaz à proximité et commence la conduction. Ceci est fait intentionnellement dans les décharges à basse pression (dans un précipitateur électrostatique ou dans des lampes fluorescentes).

La loi de **Paschen** estimait approximativement la tension à l'origine de la panne électrique ($V = f(pd)$). C'est en fait une équation qui explique la tension de claquage en fonction du produit de la pression et de la longueur de l'intervalle.

Propriétés des gaz diélectriques

Les propriétés préférées d'un excellent matériau diélectrique gazeux sont les suivantes :

- Rigidité diélectrique maximale.
- Transfert de chaleur fin.
- Incombustible.
- Oisiveté chimique par rapport au matériau de construction utilisé.
- Inertie.
- Environnementalement non toxique.
- Petite température de condensation.

- Haute constance thermique.
- Acquirable à faible coût.[14-15]

Application de gaz diélectriques

Il est utilisé dans les transformateurs, les guides d'ondes radar, les disjoncteurs, les appareillages de commutation, la commutation haute tension, les liquides de refroidissement. Ils sont généralement utilisés dans les applications à haute tension [14].

II.6. Grandeurs caractéristiques d'un milieu diélectrique

II.6.1 La résistivité

a. La résistivité ρ , qui s'exprime en $\Omega \cdot m$ caractérise la résistance opposée au passage d'un courant électrique dans le matériau, pour une section et une longueur unitaire. Son inverse est la conductivité électrique σ qui est donc une mesure de la facilité de passage du courant électrique dans la matière. La conductivité et la résistivité électrique des matériaux varient très fortement en fonction de la nature de leurs liaisons chimiques, de la composition et de la température (FigII.9).

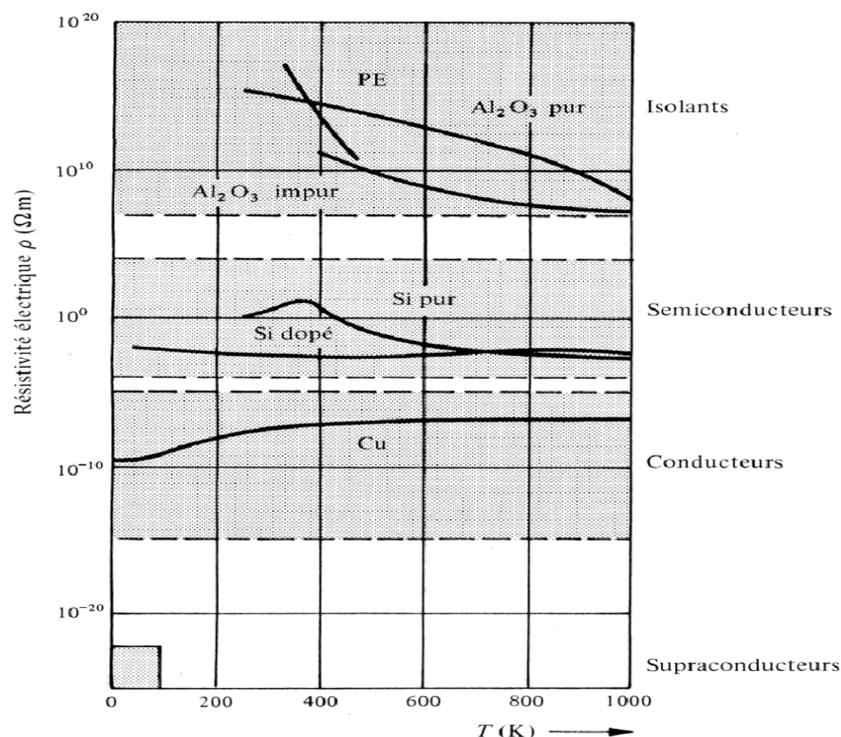


Figure.II.11.Variation de résistivité électrique ρ en fonction de la température T

Ainsi à température ambiante, la conductivité électrique varie de $10^8 (\Omega.m)^{-1}$ pour les meilleurs conducteurs métalliques jusqu'à $10^{-16} (\Omega.m)$ pour les isolants électriques les plus performants. La conductivité électrique se mesure en appliquant à un matériau un champ électrique \vec{E} pour mesurer la densité de courant \vec{j} . Elle définit par la relation:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (II.2)$$

Avec $\sigma = ne\mu$

n : est le nombre d'électrons

e : est la charge d'un électron

μ : est la mobilité

A la température ambiante, les porteurs de charge dans les isolants (diélectriques) sont principalement les électrons. **[16-17]**

II.6.2 La permittivité

Au niveau microscopique, la permittivité d'un matériau est liée à la polarisabilité électrique des molécules ou atomes constituant le matériau. La permittivité d'un matériau est une grandeur tensorielle (la réponse du matériau peut dépendre de l'orientation des axes cristallographiques du matériau), qui se réduit à un scalaire dans les milieux isotropes. Elle est très généralement complexe, la partie imaginaire étant liée au phénomène d'absorption ou d'émission du champ électromagnétique par le matériau. La constante diélectrique est également notée k dans le domaine des circuits intégrés et des semi-conducteurs. Les matériaux dits low-k sont des diélectriques à faible permittivité. Ils sont utilisés comme isolants entre les interconnexions métalliques pour diminuer le couplage entre celles-ci.

Placer un élément isolant entre deux électrodes soumises à une **ddp** (différence de potentiel) revient à polariser le matériau. Ce matériau se comporte comme un condensateur de capacité **C**. celle-ci dépend des dimensions géométriques du condensateur et de la permittivité diélectrique (ou constante diélectrique) du matériau. Dans le cas d'un condensateur plan :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d} S \quad (II.3)$$

Avec $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ La permittivité diélectrique relative

Où $\epsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ est la permittivité absolue du vide.

S : la surface des électrodes appliquées sur le matériau en m^2 .

d : l'épaisseur du diélectrique en m.

La permittivité d'un matériau se manifeste par l'augmentation de la capacité d'un condensateur lorsque l'espace inter-électrode initialement vide ; est rempli par ce matériau. Cela est dû à son aptitude à se polariser dans un champ électrique, à cause des déplacements en sens opposé des charges positives et négatives présentes dans le matériau.

[7]

II.6.3 Rigidité diélectrique (Tenue au claquage)

La rigidité diélectrique est une des grandeurs les plus mesurées, normalisées et étudiées dans le domaine des isolants. Lorsque des charges sont injectées dans un matériau isolant, il s'y produit une accumulation d'électrons et de trous. Ces charges induisent une polarisation et une déformation locale de la structure du matériau : accumuler des charges revient à accumuler de l'énergie. La résistance au claquage diélectrique dépend de la capacité du matériau à stabiliser ces charges. Lorsqu'il ne peut plus en stocker de supplémentaires, celles-ci peuvent se déstabiliser (quitter les pièges) brutalement et amorcer le claquage. L'énergie alors libérée est suffisante pour fondre et vaporiser localement le matériau.

Le facteur limitant l'utilisation des diélectriques est le claquage diélectrique. Ce phénomène catastrophique conduit à une forte détérioration des propriétés mécaniques et diélectriques d'un isolant. Un défaut macroscopique traverse alors le matériau de part en part. La mesure de la tenue au claquage consiste à appliquer aux bornes d'un matériau isolant à l'aide d'électrodes, un champ électrique d'intensité croissante jusqu'à ce que le champ électrique atteigne une valeur seuil au de l à de laquelle le matériau laisse passer le courant (on dit alors qu'il y a claquage). Ce champ seuil ramené à l'épaisseur du matériau est appelé rigidité diélectrique noté E_c (en V.m^{-1}). [16-17]

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. **[7]**

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). On utilise aussi l'expression champ disruptif qui est synonyme mais plus fréquemment utilisée pour qualifier la tenue d'une installation, alors que le terme rigidité diélectrique est plus utilisé pour qualifier un matériau. Pour un condensateur quand cette valeur est dépassée, l'élément est détruit. La valeur maximale de la tension électrique appliquée aux bornes, est appelée tension de claquage du condensateur. **[18]**

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]**

Les matériaux diélectriques réels contiennent un certain volume de charges libres. Ainsi, dans les diélectriques, on peut également observer une très légère conduction, détectable surtout à basses fréquences. Cette conduction est due aux mouvements des ions et des électrons. Leur origine peut être classée en deux catégories:

- Les charges intrinsèques sont des ions contenus initialement dans l'isolant ou générés soit par électro dissociation d'espèces neutres, soit par ionisation des constituants du solide par interactions avec des rayonnements énergétiques ou des particules.
- Les charges extrinsèques sont des électrons, des trous ou des ions injectés à partir des électrodes métalliques vers l'isolant sous l'action d'un champ électrique. **[19]**

Propriétés particulières

La rigidité diélectrique évoque aussi le diélectrique qui est un isolant ou une substance qui ne conduit pas l'électricité et qui est polarisable par un champ électrique. Dans la plupart des cas, les propriétés du diélectrique sont dues à la polarisation de la substance.[20]

Lorsqu'un diélectrique, en l'occurrence l'air est placé dans un champ électrique, les électrons et les protons de ses atomes se réorientent et dans certains cas, à l'échelle moléculaire, une polarisation est induite (un phénomène observé dans les dipôles).

Cette polarisation engendre une différence de potentiel, ou tension, entre les deux bornes du diélectrique ; celui-ci emmagasine alors de l'énergie qui devient disponible lorsque le champ électrique est supprimé.

L'efficacité d'un diélectrique est sa capacité relative à emmagasiner de l'énergie comparée à celle du vide. Elle s'exprime par la permittivité relative, déterminée par rapport à celle du vide.

La force diélectrique est la capacité d'un diélectrique à résister aux champs électriques sans perdre ses propriétés isolantes.

Un diélectrique efficace libère une grande partie de l'énergie qu'il a emmagasinée lorsque le champ électrique est inversé.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques généralités et propriétés sur les diélectriques les plus utilisés dans les domaines de l'industrie. Ensuite on a vu les différents types d'isolants et les matériaux utilisés pour les produire.

Chapitre III

**Les propriétés physiques des
matériaux diélectriques**

III.1. Introduction

Ce troisième chapitre présente d'abord les classes des matériaux en général. Puis on passe à la présentation des différentes propriétés physiques des matériaux diélectriques et les facteurs qui les affectent.

III.2. Classification des matériaux

III.2.1. Classification basée sur la conductivité électrique:

Cette classification est faite sur la base de la conductivité électrique σ (S/m) et la résistivité ρ (Ω cm), mesurée à 20°C (293K) :

- Pour les conducteurs : $\sigma > 10^6$ S/m ($\rho < 10^{-4}$ Ω cm)
- Pour les semi-conducteurs : $10^{-6} < \sigma$ (S/m) $< 10^4$ ($10^{-2} < \rho$ (Ω cm) $< 10^8$)
- Pour les diélectriques (isolants) : $\sigma < 10^{-10}$ S/m ($\rho > 10^{12}$ Ω cm)

[1,2].

III.2.2. Classification basée sur les niveaux d'énergie:

Une autre façon de classer les matériaux c'est celle qui consiste à utiliser les niveaux d'énergie. Le modèle de l'état solide décrit les états énergétiques des électrons dans des domaines de la structure cristalline régulière et dont le degré de perturbation est faible. Pour l'interprétation de plusieurs phénomènes, il suffit d'utiliser trois notions liées au modèle:

la bande de valence (niveau fondamental d'énergie), la bande interdite et la bande conduction.

La largeur de la bande interdite ΔE_w influe de manière décisive sur la valeur de la conductivité électronique et sa dépendance de la température : [21,22].

- $\Delta E_w = 0$: matériau conducteur
- $\Delta E_w = 0,5$ à 2,0 eV : matériau semi-conducteur
- $\Delta E_w \sim$ dizaines d'eV: matériau diélectrique (nombre d'électrons dans la bande de conduction très faible : σ faible).

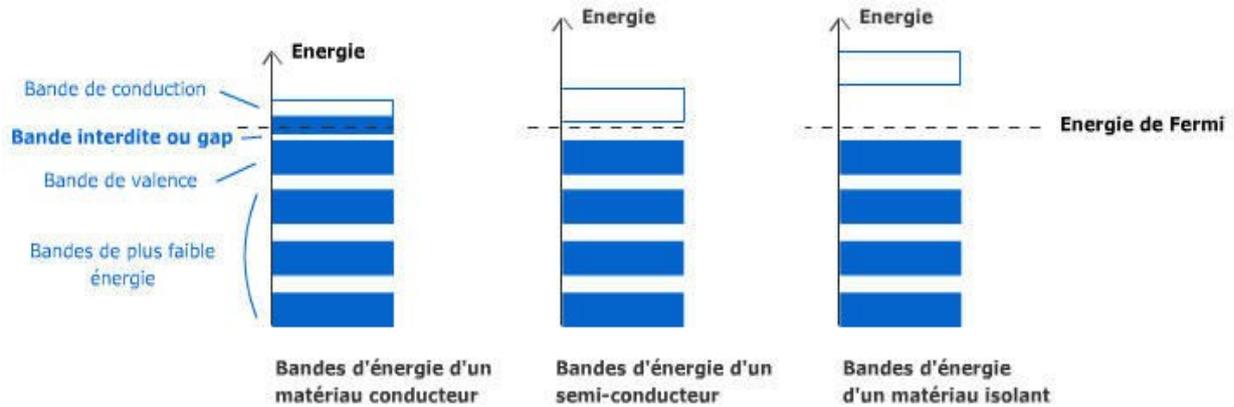


Figure.III.1 Les niveaux d'énergie des matériaux

Ce modèle, basé sur les niveaux d'énergie, explique uniquement le phénomène de conduction électronique. Par contre, il ne décrit pas les autres phénomènes comme la conduction ionique dans les diélectriques, le phénomène de polarisation ... [23]

III.2.3. Classification basée sur la permittivité diélectrique

Une manière intéressante de classer les matériaux est celle basée sur la permittivité diélectrique relative complexe :

$$\epsilon_r = \epsilon' - j \epsilon'' \tag{III.1}$$

Cette représentation complexe ne prend en compte que le courant de conduction et le courant de déplacement étant le terme $\epsilon p''$ lié à la polarisation et σ la conductivité électrique.

$$\epsilon'' = \epsilon p'' + \sigma / \omega \epsilon_0 \tag{III.2}$$

L'angle de pertes des métaux, dans la gamme des fréquences les plus utilisées, est égal à $\pi/2$ ($\phi=0$) et donc $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ tend vers l'infini. Les pertes d'énergie due au passage du courant ont évidemment une valeur déterminée. De plus, ϵ'' doit avoir une valeur finie, c'est à dire que pour les métaux, on peut supposer que $\epsilon'=0$. Pour les autres types de matériaux, $\tan \delta$ a une valeur déterminée qui dépend de la fréquence lesquels soumis à des signaux (contraintes) rapidement variables (par exemple $\tan \delta > 1$ et pour les matériaux quasi-diélectriques, $\tan \delta < 1$).

Cependant, comme $\tan \delta$ est fonction de la fréquence, cette subdivision n'est que relative. En effet, selon la fréquence, un matériau passe d'un état quasi-conducteur à un état quasi-diélectrique. Cette fréquence par exemple pour un aussi bon matériau électro-isolant comme le mica, est de l'ordre de 10^5 Hz, alors que dans le cas des métaux, elle est de l'ordre de 10^{20} Hz. Le fait de considérer un matériau donné comme quasi-conducteur ou encore comme quasi-diélectrique a une grande importance en particulier par rapport aux matériaux semi-conducteurs lesquels soumis à des signaux (contraintes) rapidement variables (par exemple des impulsions), peuvent être considérés comme diélectriques. Ceci peut jouer un rôle essentiel lorsqu'il s'agit de distribution de potentiel dans les systèmes complexes (composites). Les valeurs de ϵ' pour les matériaux semi-conducteurs et diélectriques varient dans une large gamme ; elles sont toujours supérieures à 1. Les diélectriques de permittivité relative statique $\epsilon_r > 3$ sont considérés en pratiques comme polaires alors que les diélectriques dont $\epsilon_r < 3$ sont dits non polaires ou peu polaires. ...[23].

III.2.4. Classification basée sur la susceptibilité magnétique :

Selon leur comportement dans un champ magnétique et plus particulièrement selon la valeur de leurs susceptibilités magnétiques η_m , les matériaux sont divisés en :

- diamagnétiques : $\eta_m \sim 10^{-6}$; $0 < \mu_r < 1$
- paramagnétiques : $\eta_m > 0$; $\mu_r > 1$ (à 20°C, $\eta_m \sim 10^{-2} \dots 10^{-5}$)
- ferromagnétiques : $\eta_m \gg 0$; $\mu_r \gg 1$ selon l'intensité du champ magnétique.

La susceptibilité magnétique est définie par la relation : $\eta_m = \mu_r - 1$.

III.3. Propriétés physiques associées aux diélectriques :

Les paramètres permettant de caractériser les matériaux diélectriques sont nombreux, cinq principales caractérisent les isolants utilisés en haute tension notamment la permittivité diélectrique, la rigidité diélectrique, le facteur de pertes, la conductivité électrique, décharges partielles [7].

III.3.1. La Permittivité :

La permittivité est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné sous l'action d'un champ électrique. Elle peut être exprimée par une quantité adimensionnelle : la permittivité relative ϵ_r normalisée par rapport à la permittivité du vide ϵ_0 : $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

- **Permittivité d'un matériau**

Au niveau microscopique, la permittivité d'un matériau est liée à la polarisabilité électrique des molécules ou atomes constituant le matériau. La permittivité d'un matériau est une grandeur tensorielle (la réponse du matériau peut dépendre de l'orientation des axes cristallographiques du matériau), qui se réduit à un scalaire dans les milieux isotropes. Elle est très généralement complexe, la partie imaginaire étant liée au phénomène d'absorption ou d'émission du champ électromagnétique par le matériau. La constante diélectrique est également notée k dans le domaine des circuits intégrés et des semi-conducteurs. Les matériaux dits low-k sont des diélectriques à faible permittivité. Ils sont utilisés comme isolants entre les interconnexions métalliques pour diminuer le couplage entre celles-ci.

La permittivité d'un matériau se manifeste par l'augmentation de la capacité d'un condensateur lorsque l'espace inter-électrode initialement vide ; est rempli par ce matériau. Cela est dû à son aptitude à se polariser dans un champ électrique, à cause des déplacements en sens opposé des charges positives et négatives présentes dans le matériau.

.[7]

- **Mesure de permittivité d'un matériau**

La mesure de permittivité peut s'effectuer à l'aide de différents instruments tels que :

- des guides d'ondes ;
- des cavités ;
- des bancs en espace libre ;
- des sondes coaxiales.

- **Permittivité absolue**

La permittivité absolue ϵ est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la permittivité du vide Avec :

$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

La permittivité absolue définit la possibilité d'être traversé par un courant électrique, sous l'action du champ électrique. Ceci résulte de diverses contributions de déplacements des

charges : déplacement des électrons, déplacements des atomes et des ions, orientation des dipôles électriques et déplacement des charges d'espace. En effet, la densité de courant traversant ce diélectrique en présence d'un champ électrique sinusoïdal [24.25].

- **Permittivité relative**

Un diélectrique est caractérisé par sa permittivité relative ou constante diélectrique ϵ_r . Dans le cas d'un diélectrique parfait, ϵ_r est le quotient de la capacité C_x entre deux électrodes, supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité C_v de la même configuration d'électrodes dans le vide: [23. 26.27]

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_v} \quad (\text{III.3})$$

- **Permittivité relative complexe**

On définit également une permittivité complexe relative :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (\text{III.4})$$

où ϵ_r' joue le rôle qu'avait ϵ_r dans le cas des isolants parfaits. La permittivité complexe absolue est, de la même manière, égale au produit de la permittivité complexe relative par ϵ_0 .

La composante en phase que présente J avec E est à l'origine des pertes diélectriques, elle représente la dissipation d'une puissance dans le diélectrique.

Ces pertes sont dues au travail nécessaire à l'établissement de la polarisation et à la conduction ohmique résiduelle σ_c du diélectrique. [23.26.27]

III.3.2. Perte diélectrique

Dans un diélectrique parfait, le courant est en quadrature avance par rapport à la tension, alors que dans un diélectrique réel le courant est en avance d'un angle $\varphi < \frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension.

La tangente de l'angle de perte diélectrique ($\delta = \frac{\pi}{2} - \varphi$) est définie comme étant le rapport entre la composante résistive et la composante capacitive du courant. [19]

• La constante diélectrique et les pertes diélectriques

Dans un champ électrique alternatif, la polarisation ne suit pas le champ d'une façon instantanée et le retard se traduit par une perte d'énergie. Ainsi, la permittivité relative est alors remplacée par permittivité relative complexe.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (\text{III.5})$$

- La composante réelle ϵ_r' est appelée constante diélectrique.
- La composante imaginaire ϵ_r'' est appelée facteur de perte.

Par conséquent, les propriétés diélectriques présentent deux types d'interactions entre le matériau diélectrique et le champ électrique, à savoir l'absorption de l'énergie électromagnétique sous la forme d'une polarisation à l'intérieur et la dissipation d'une partie de l'énergie sous forme de chaleur. La capacité d'un matériau à absorber l'énergie est exprimée quantitativement par la constante diélectrique (ϵ_r'), et le taux de perte d'énergie dans le matériau est donné par le facteur de perte diélectrique (ϵ_r'').

La notion de pertes diélectriques peut être introduite en utilisant le diagramme de Fresnel (Figure III.2). Lorsqu'on applique une tension alternative $U = U_0 \cdot e^{i\omega t}$ aux bornes d'un condensateur parfait, le courant est en quadrature avance sur la tension et s'écrit sous la forme suivante (III.6):

$$I = |\omega \epsilon_r C_0 U_0| \cdot e^{i(\omega t + \frac{\pi}{2})} = |\omega \epsilon_r C_0 U| \quad (\text{III.6})$$

Tenant compte du phénomène des pertes diélectriques qui réduisent le pouvoir du condensateur à emmagasiner les charges électriques et en intégrant l'équation (III.6), on obtient :

$$I = i\omega \epsilon_r C_0 U = i\omega (\epsilon_r' - j\epsilon_r'') C_0 U \quad (\text{III.7})$$

Selon cette expression, le circuit est traversé par un courant qui possède deux composantes :

- Une composante I_p appelée courant de perte [A]: $I_p = \omega \epsilon_r'' C_0 U$

- Une composante I_c le appelée courant de charge [A] : $I_c = \omega \varepsilon_r'' C_0 U$

Ce diagramme met en évidence le déphasage existant entre ces deux grandeurs.

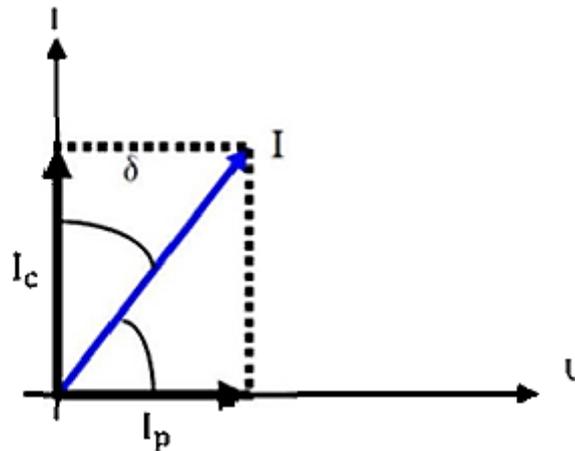


Figure.III.2 Diagramme de Fresnel

L'angle δ , appelé angle de perte diélectrique, constitue l'écart angulaire entre les courants pour un diélectrique parfait et pour un diélectrique réel. La tangente de l'angle de perte est appelée le facteur de dissipation diélectrique. Elle est donnée par la relation suivante (III.8) :

$$\frac{I_p}{I_c} = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (\text{III.8})$$

Ce terme définit le degré d'absorption de l'énergie électrique convertie en chaleur d'un matériau diélectrique à une fréquence donnée. Il représente le ratio de l'énergie dissipée dans le diélectrique sur l'énergie accumulée.

III.3.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique σ ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹ est une propriété fondamentale des matériaux qui quantifie la capacité du matériau à transporter un courant lorsqu'il est placé dans un champ électrique. La résistivité électrique ρ ($\Omega \cdot \text{cm}$) est l'inverse de la conductivité électrique.

La conductivité électrique est une grandeur physique liée aux courants de conduction créés par le mouvement des charges libres. Elle traduit l'aptitude du matériau à laisser ces charges circuler sous l'effet d'un champ électrique. Ce déplacement est accompagné par des pertes d'énergie responsables de l'atténuation des ondes électromagnétiques dans le milieu de propagation. [19].

La conductivité électrique, notée σ^* , est une grandeur complexe mesurée en Siemens par mètre [S/m]. Elle est donnée par la formule suivante (III.9):

$$\sigma^* = \sigma' + j \sigma'' \quad (\text{III.9})$$

Avec

- σ' est la partie réelle de la conductivité. Elle représente le transfert d'énergie par migration des charges.
- σ'' est la partie imaginaire de la conductivité. Elle représente la dissipation d'énergie due au déplacement des porteurs de charges.

La conductivité électrique est définie par rapport à la permittivité complexe par la relation (III.10):

$$\sigma^* = i\omega \epsilon_0 \epsilon_r^* \quad (\text{III.10})$$

Par superposition des expressions , (III.9) et (III.10), on obtient :

$$\sigma' = \omega \epsilon_0 \epsilon_r''$$

$$\sigma'' = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'$$

Avec $\omega = 2\pi f$: la pulsation

Il est à noter que tout au long de ce travail, ϵ_r' et ϵ_r'' désigneront respectivement la constante diélectrique et le facteur de perte. $\tan \delta$ Sera nommée la tangente de perte.

III.3.4. Facteur de dissipation diélectrique :

Le facteur de dissipation diélectrique est égale au quotient $\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$, ce quotient est appelé aussi tangente de l'angle de perte ou $\tan \delta$; δ est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte ($\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$).

En pratique, il n'est pas possible de s'affranchir des pertes par conduction [24] dans ce cas :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''(\omega) + (\sigma_c / \omega \epsilon_0)}{\epsilon_r'} \quad [23] \quad (\text{III.11})$$

• Valeurs de facteur de pertes

- Solides :

Plexiglas : $2 \cdot 10^{-2}$ Résine époxy : $4 \cdot 10^{-3}$

Téflon : $6 \cdot 10^{-4}$ Polyéthylène : $3 \cdot 10^{-4}$

Polystyrène : 10^{-4} Paraffine : $5 \cdot 10^{-5}$

- **Liquides :**

Huiles minérales : $3 \cdot 10^{-4} \sim 5 \cdot 10^{-3}$

- **Gaz :**

Hexafluorure de soufre (SF6) : $2 \cdot 10^{-7}$ [28]

III.3.5. La résistivité :

La résistivité ρ , qui s'exprime en $\Omega \cdot m$ caractérise la résistance opposée au passage d'un courant électrique dans le matériau, pour une section et une longueur unitaire. Son inverse est la conductivité électrique σ qui est donc une mesure de la facilité de passage du courant électrique dans la matière. La conductivité et la résistivité électrique des matériaux varient très fortement en fonction de la nature de leurs liaisons chimiques, de la composition et de la température.

Ainsi à température ambiante, la conductivité électrique varie de $10^8 (\Omega \cdot m)^{-1}$ pour les meilleurs conducteurs métalliques jusqu'à $10^{-16} (\Omega \cdot m)^{-1}$ pour les isolants électriques les plus performants la conductivité électrique se mesure en appliquant à un matériau un champ électrique à la température ambiante. [16-17]

III.3.6. Rigidité diélectrique :

Le facteur limitant l'utilisation des diélectriques est le claquage diélectrique. Ce phénomène catastrophique conduit à une forte détérioration des propriétés mécaniques et diélectriques d'un isolant. Un défaut macroscopique traverse alors le matériau de part en part. La mesure de la tenue au claquage consiste à appliquer aux bornes d'un matériau isolant à l'aide d'électrodes, un champ électrique d'intensité croissante jusqu'à ce que le champ électrique atteigne une valeur seuil au-delà de laquelle le matériau laisse passer le courant (on dit alors qu'il y a claquage).

Ce champ seuil ramené à l'épaisseur du matériau est appelé rigidité diélectrique noté E_c (en $V \cdot m^{-1}$). La rigidité diélectrique est une des grandeurs les plus mesurées, normalisées et étudiées dans le domaine des isolants. Lorsque des charges sont injectées dans un

matériau isolant, il s'y produit une accumulation d'électrons et de trous. Ces charges induisent une polarisation et une déformation locale de la structure du matériau : accumuler des charges revient à accumuler de l'énergie. La résistance au claquage diélectrique dépend de la capacité du matériau à stabiliser ces charges. Lorsqu'il ne peut plus en stocker de supplémentaires, celles-ci peuvent se déstabiliser (quitter les pièges) brutalement et amorcer le claquage. L'énergie alors libérée est suffisante pour fondre et vaporiser localement le matériau. [7]

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 et 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]

- **Propriétés particulières:**

La rigidité diélectrique évoque aussi le diélectrique qui est un isolant ou une substance qui ne conduit pas l'électricité et qui est polarisable par un champ électrique. Dans la plupart des cas, les propriétés du diélectrique sont dues à la polarisation de la substance.

En pratique, la rigidité diélectrique est le rapport entre la tension de claquage et la distance entre les électrodes auxquelles cette tension est appliquée dans des conditions d'essai spécifiées. Pour que cela soit tout à fait exact, il conviendrait que le champ soit uniforme, c'est-à-dire que les électrodes soient planes et parallèles avec des bords tels qu'ils

ne provoquent en aucun point de renforcement du champ. On se contente de fait souvent d'électrodes dont le rayon de courbure est grand devant la distance inter-électrodes.[28].

III.4. Facteurs influençant les propriétés diélectriques de matériaux :

La permittivité et le facteur de dissipation diélectriques mesurés d'un matériau sont affectés par divers paramètres physiques externes ou internes tels que fréquence, température, intensité du champ électrique, rayonnements ionisants, humidité et chimique ...

[23]

III.4.1. Fréquence

En général, les propriétés diélectriques des matériaux varient considérablement avec la fréquence du champ électrique appliquée. L'apparition des pertes diélectriques peut être expliquée comme suit:

Aux très basses fréquences, la polarisation suit le champ alternatif, ce qui fait que sa contribution à la constante diélectrique est maximale et les pertes n'apparaissent pas. Aux fréquences très élevées, le champ alterne trop vite pour que la polarisation puisse augmenter et il n'y a aucune contribution à la constante diélectrique, aucune énergie n'est perdue dans le milieu [29]. Mais quelque part entre ces deux extrêmes, la polarisation commence à prendre du retard par rapport au champ électrique d'où dissipation de l'énergie. Le facteur de pertes atteint une valeur maximale à une fréquence f_m , liée au temps de relaxation caractéristique par la relation:

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_m} = \frac{1}{\omega_m} \quad (\text{III.12})$$

La permittivité et la polarisation de relaxation dépendent du temps; on distingue deux

états d'équilibre pour chacune de ses caractéristiques. Dans un champ statique ($\omega \rightarrow 0$), la permittivité diélectrique vaut ϵ_s , et dans les fréquences optiques ($\omega \rightarrow \omega_{opt}$), elle vaut ϵ_∞ .

L'équation typique décrivant ce modèle simple de relaxation diélectrique est l'équation de dispersion de Debye :

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{(\epsilon_s - \epsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (\text{III.13})$$

L'équation de Debye peut être écrite sous différentes formes selon la caractéristique

expérimentale cherchée. [23].

III.4.2. Température

L'aptitude d'un matériau diélectrique à être polarisé dépend également de la température. Par conséquent, les fréquences correspondant au maximum de l'indice de pertes

(et ainsi à ceux du facteur de dissipation diélectrique) varient avec la température. Il s'ensuit que le coefficient de température de l'indice de pertes peut-être positif ou négatif selon la position du maximum de l'indice de pertes par rapport à la température de mesure. [23]

- **Variation de la permittivité relative en fonction de la température:**

Dans un diélectrique, la permittivité relative (ϵ_r) dépend de la température en raison de la Variation du paramètre de la maille du diélectrique en fonction de ce paramètre. De plus, si le Matériau est ferroélectrique, la permittivité relative augmente en fonction de la température (phase ferroélectrique), atteint un maximum à une température T_c appelé point de curie. Au

dessus de cette température (phase paraélectrique) la permittivité relative obéit à la loi de curie- weisse:

$$\epsilon_r (T) = \frac{C}{T - T_0} \quad (III.14)$$

C : constante de curie –weisse

T_0 : température de curie (°K)

T : température absolue (°K)

[30]

III.4.3. Humidité et autres impuretés :

Le degré de polarisation est augmenté par l'absorption d'eau ou la formation d'une pellicule d'eau à la surface du diélectrique, ce qui affecte la permittivité, le facteur de dissipation et la conductivité en courant continu. Le conditionnement des éprouvettes est, de ce fait, d'une importance capitale et la régulation du degré d'humidité, tant avant que pendant l'essai, est indispensable pour l'interprétation correcte des résultats d'essai.

Le degré de polarisation dépend aussi des impuretés introduites par contamination physique ou par des ingrédients chimiques, par exemple solvants ou plastifiants. Par

conséquent, on doit s'assurer que le matériau à essayer n'est pas affecté ou ne l'est que de façon connue par les opérations de prélèvement d'éprouvettes ou bien par des traitements appliqués ensuite, par exemple à des températures élevées. [23]

III.4.4. Structure physique et chimique :

La direction de la vectrice polarisation du champ électromagnétique par rapport à la structure de l'éprouvette exerce une forte influence sur le résultat de mesure. Des résultats de mesure différents peuvent être obtenus à cause du manque d'homogénéité (comme dans les stratifiés) ou de l'anisotropie, par exemple dans le cas des cristaux, sauf si toutes les mesures sur les éprouvettes sont effectuées en étant rapportées de la même façon à une caractéristique identifiable du matériau.

Des éprouvettes ayant la même composition chimique mais de structures chimiques différentes comme des résines durcies sables soumises à des conditions différentes de durcissement ou de polymères polymérisés à des degrés différents donneront également des résultats différents. [23]

III.4.5. Intensité du champ alternatif

Généralement la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique ne dépendent pas de l'intensité du champ tant qu'aucune décharge partielle ne se produit dans le diélectrique.

Toutefois dans le cas des matériaux ferroélectriques, un effet de variation en fonction du champ peut encore être observable aux fréquences inférieures du spectre hyperfréquence, mais il disparaît rapidement lorsque la fréquence croît. [23]

III.4.6. Conclusion

Les paramètres permettant de caractériser les matériaux diélectriques sont nombreux, cinq principales caractérisent les isolants utilisés en haute tension notamment la permittivité diélectrique, la rigidité diélectrique, le facteur de pertes, la conductivité électrique, décharges partielles.

Au chapitre suivant, nous parlerons de la polarisation des matériaux diélectriques, ainsi les méthodes de formation des électrets.

Chapitre IV

Processus De Génération

De Charges Electriques

IV.1. Introduction

La compréhension des phénomènes liés à la génération de la charge d'espace et à son évolution ainsi qu'au comportement du diélectrique chargé permettra non seulement la prévention des risques électrostatiques, mais aussi l'amélioration des performances de ces matériaux.[31]

Dans ce chapitre on s'intéresse au processus de polarisation et mécanismes physiques qui pouvant expliquer la présence de charge électrique dans un diélectrique soumis à un flux d'énergie.

IV.2. Étude du phénomène de la polarisation des matériaux diélectriques

IV.2.1. Polarisation statique

Dans les matériaux isolants, il n'y a pas, ou très peu, de charges libres permettant la circulation du courant électrique. Par contre, les charges électriques présentes dans le matériau, si elles ne peuvent se mouvoir d'une électrode à l'autre peuvent se déplacer localement et entraîner une variation des charges images sur les électrodes. Cette variation des charges se traduit par un courant appelé courant de déplacement. En absence de champ électrique, les charges sont généralement orientées de façon aléatoire et ne peuvent pas être considérés comme étant des dipôles permanents (**fig. IV.1(a)**). Mais sous l'action d'un champ électrique externe, le matériau réagit et crée un champ interne qui s'oppose au champ externe: c'est la polarisation (**fig. IV.1(b)**).

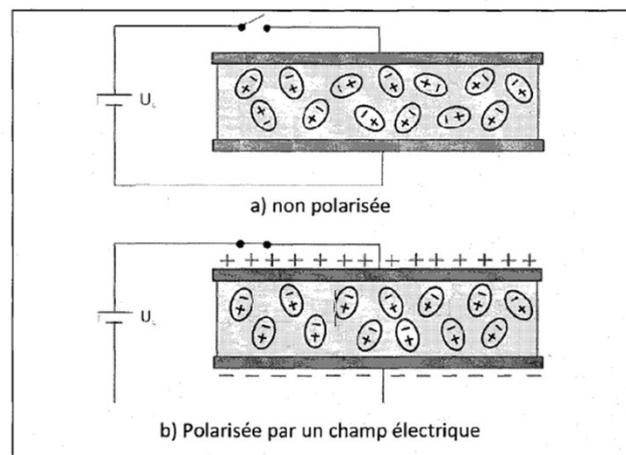


Figure IV.1.La polarisation moléculaire

Le phénomène de polarisation provient en général de l'orientation d'un dipôle électrique, induit ou permanent, en présence d'un champ appliqué (l'application d'un champ électrique E déplace légèrement les charges positives et négatives les unes par rapport aux autres, provoquant l'apparition de dipôles électriques). Un dipôle électrique est formé par deux charges Q de signes opposés séparées par une distance l . Le moment dipolaire électrique est défini par **[32-33]**:

$$p = ql \quad (IV.1)$$

Ces dipôles électriques peuvent provenir de différentes sources microscopiques ou macroscopiques. Habituellement, lorsqu'un matériau diélectrique se dégrade le nombre de dipôles électriques augmente et conséquemment le courant de polarisation, celui relié au mouvement des dipôles, augmente aussi. La polarisation due à ces dipôles correspond à la somme vectorielle de tous les dipôles par unité de volume. On peut donc définir la polarisation P due aux dipôles correspond à la somme vectorielle de tous les dipôles [32-33].

$$P = \sum p_i \quad (IV.2)$$

Si on considère une substance diélectrique linéaire, la relation entre P et E est linéaire, où χ est la susceptibilité électrique du matériau (elle informe sur la capacité du matériau à se polariser.), D est l'induction électrique et $\epsilon_0 = 8.852 \cdot 10^{-12}$ As/Vm est la permittivité du vide, en posant :

$$\epsilon_r = (1 + \chi) \quad (IV.3)$$

on obtient :

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (IV.4)$$

ϵ_r Est la permittivité relative ou la constante diélectrique d'un matériau.

IV.2.2. Différents types de polarisation

On peut distinguer différents types de polarisation pouvant prendre place dans un diélectrique polarisation électronique P_e , polarisation ionique P_a , polarisation dipolaire P_d et polarisation interrassiale P_i (ou du type Maxwell - Wagner). De manière générale, la polarisation totale P d'un matériau résulte de la contribution de ces différents mécanismes

$$P_t = P_e + P_a + P_d + P_i \tag{IV.5}$$

Polarisation des matériaux peut être due à plusieurs mécanismes connus sous le nom électronique, ionique ou atomique, dipolaire, la polarisation interrassiale, représentés schématiquement dans le tableau IV.1 [32-34]:

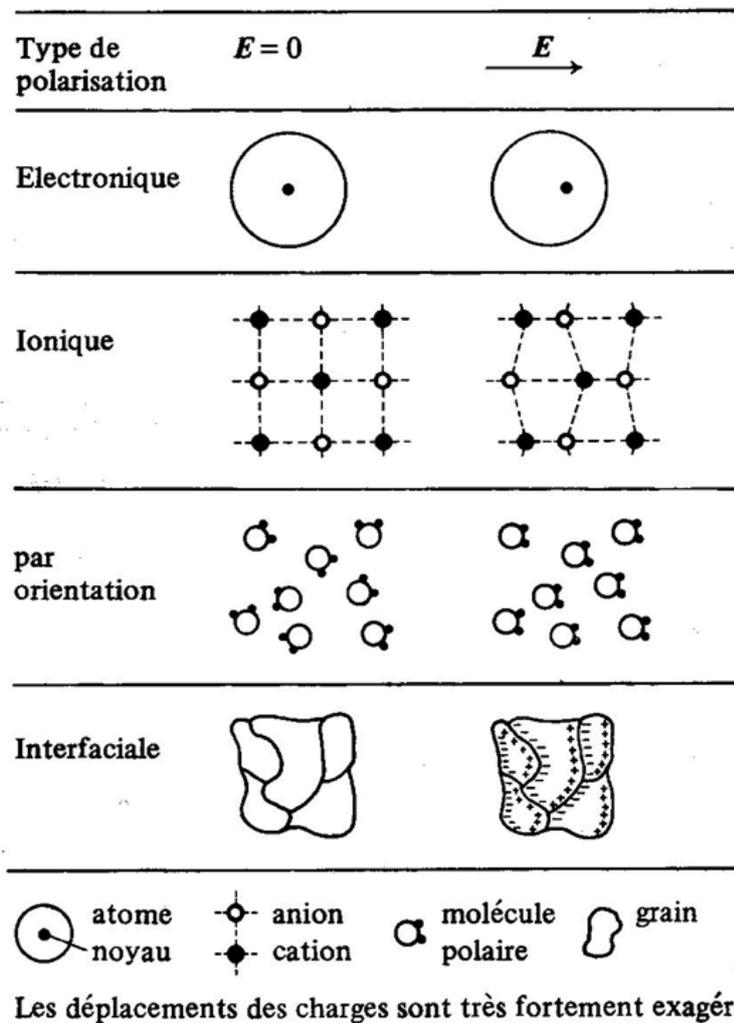


Figure.IV.2 Illustration schématique des différents mécanismes de polarisation

IV.2.2.1. La polarisation électronique

La polarisation électronique est due à un déplacement relatif du noyau de l'atome par rapport à l'ensemble des électrons qui l'entourent. Tous les atomes présentent, à des degrés divers, ce type de polarisation qui s'établit en un temps très court ($\sim 10^{-15}$ secondes).

$$P_e = N\alpha_e E_1 \quad (IV.6)$$

E_1 Étant le champ électrique local, N représente le nombre de dipôles induits par unité de volume, α_e , la polarisabilité qui dépend de la nature du matériau (Fm^2). $\alpha_e \approx 4\pi\epsilon_0(r$ est le rayon de l'atome).

IV.2.2.2. La polarisation ionique

La polarisation ionique résulte du déplacement en sens contraire des ions de signes opposés à l'intérieur de la molécule. Cette polarisation s'établit plus lentement que la précédente, la durée correspondante est d'environ 10^{-13} à 10^{-12} secondes.

$$P_i = N\alpha_i E_1 \quad (IV.7)$$

IV.2.2.3. La polarisation par orientation

Dans le cas général, en l'absence d'un champ électrique externe, tous les dipôles permanents sont orientés de façon aléatoire de telle sorte que la polarisation nette résultante est nulle, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de polarisation macroscopique observable. Par contre, sous l'effet d'un champ, les moments ont tendance à s'aligner. Il en résulte une polarisation appelée polarisation par orientation. Ce type de polarisation dépend de la température et la durée correspondante est d'environ 10^{-10} à 10^{-7} secondes:

$$P_d = N\alpha_d E_1 \quad (IV.8)$$

$$\text{Avec : } \alpha_d = \frac{p^2}{3kT}$$

En plus de ce phénomène d'orientation, le champ peut faire varier le moment de la molécule, par déformation de cette dernière et de ses orbitales. p étant le moment dipolaire de la molécule, $k = 1.380658 \cdot 10^{-23}$ J / K constante de Boltzmann, tandis que T représente la température.

La polarisation d'orientation peut exister seulement dans les gaz, les liquides et les matières amorphes visqueuses. Dans les matières solides, les dipôles sont «figés» et ne peuvent être orientés.

IV.2.2.4. La polarisation interrassiale

Dans un diélectrique, les porteurs de charges qui jamais totalement absents, migrent sous l'effet du champ et ont tendance à se concentrer autour de défauts tels que les impuretés, les lacunes, les joints de grains, etc. On regroupe sous le nom de polarisation interrassiale, la polarisation résultant des accumulations locales de charges dues à l'ensemble des phénomènes de migration. Le délai nécessaire pour l'apparition d'une telle polarisation est de 10^{-2} à 10^{-1} secondes.

IV.2.3. La polarisabilité

En supposant que les quatre mécanismes de polarisation agissent de façon indépendante les uns des autres, la polarisabilité totale α d'un matériau diélectrique donné peut être définie comme étant la somme des quatre termes:[36]

$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_d + \alpha_c \quad (IV.9)$$

IV.2.4. Influence des différents types de polarisation sur ϵ' et ϵ''

Les différents types de polarisation ne se produisent pas tous à la même fréquence, mais ont un impact sur la permittivité relative ϵ' et l'indice de pertes ϵ'' des matériaux diélectriques. Aux plus basses fréquences, les quatre polarisations contribuent à une valeur élevée de la permittivité relative ϵ' . Lorsque la fréquence croît, les contributions apportées par chaque type de polarisation disparaissent les unes après les autres, la constante diélectrique décroît donc avec la fréquence.

En ce qui concerne l'indice de pertes ϵ'' , on voit qu'il présente des pics dans les régions du domaine spectral où un type de polarisation cesse de répondre au signal appliqué (fig. IV) [35].

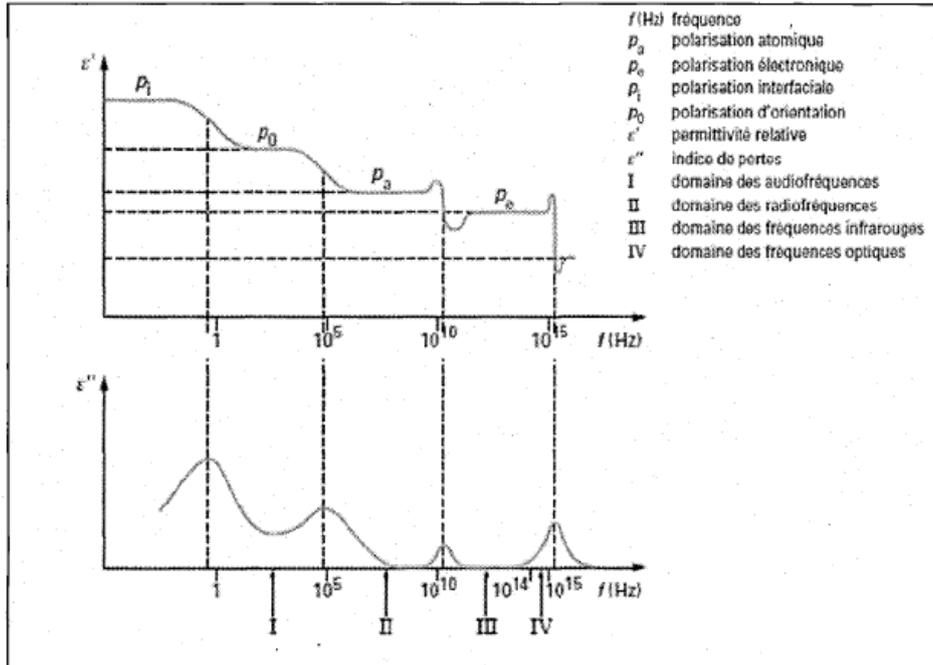
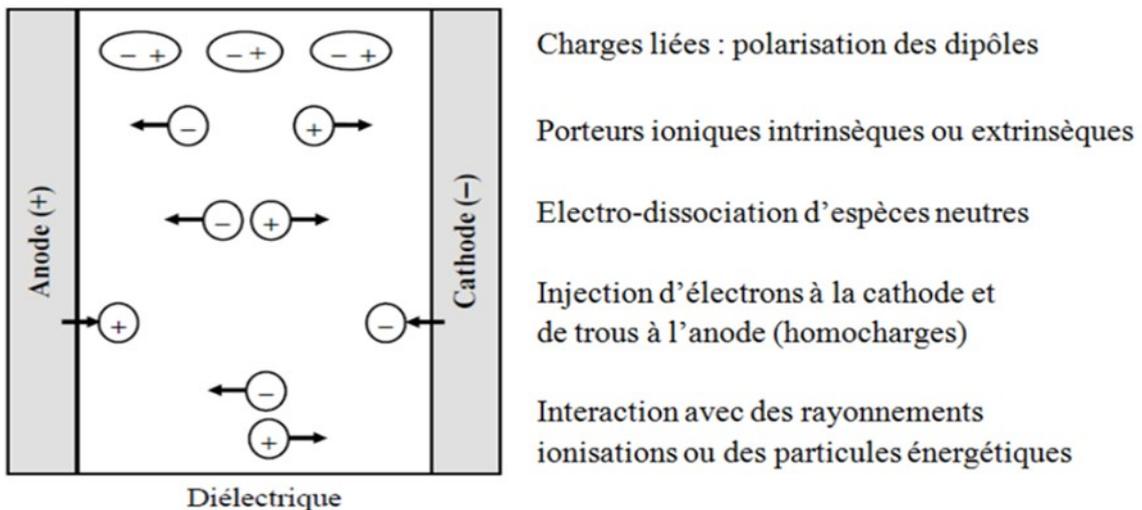


Figure.IV.3. Influence des différents types de polarisation sur ϵ' et ϵ''

IV.3. Mécanismes de génération de charges électriques

La figure IV.3 Résume les mécanismes physiques de base pouvant expliquer la présence de charges électriques dans un diélectrique situé entre deux électrodes de polarités opposées.



figureIV.4.Mécanismes de génération de charges électriques

IV.4. Les électrets

IV.4.1. Définition

La possibilité de stocker des charges pendant une durée quasiment illimitée dans les matériaux isolants a été exploitée pour développer les dispositifs les plus variés, notamment en électroacoustique. Pour mettre au point ces électrets. **[1]**

Un électret est un matériau diélectrique présentant un état de polarisation électrique quasi permanent, c'est-à-dire que le temps de déclin est plus long que la durée de son utilisation. Dans un certain sens, c'est l'équivalent en électrostatique d'un aimant permanent.

IV.4.2. Les méthodes de formation des électrets

Selon les modes de formation des électrets, ces derniers sont classés en deux familles, les électrets dipolaires et les électrets à charge d'espace. En effet, les charges électriques qui peuvent être créées et piégées dans un diélectrique pour former un électret sont de deux catégories majeures : des mono charges appelées charges réelles, et des Dipôles orientés appelés charges liées.**[31]**

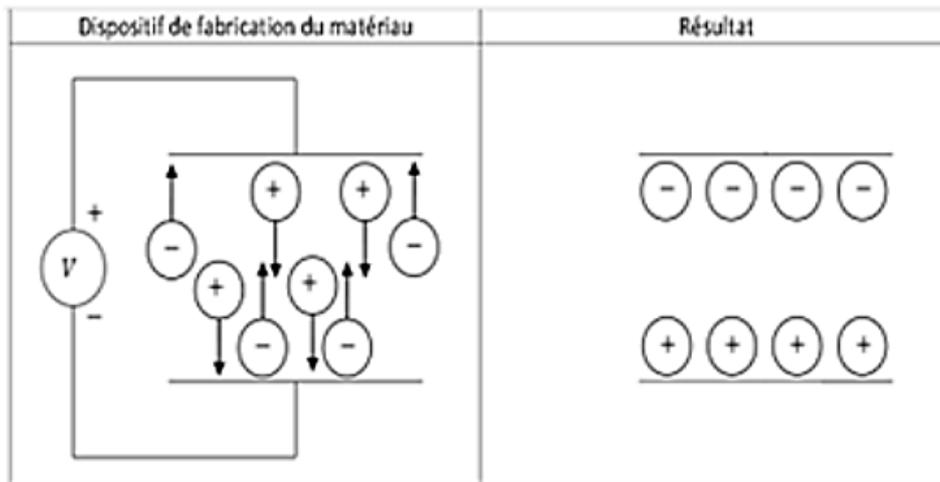


Figure.IV.5Electrets neutres à charges d'echarge – Homocharges

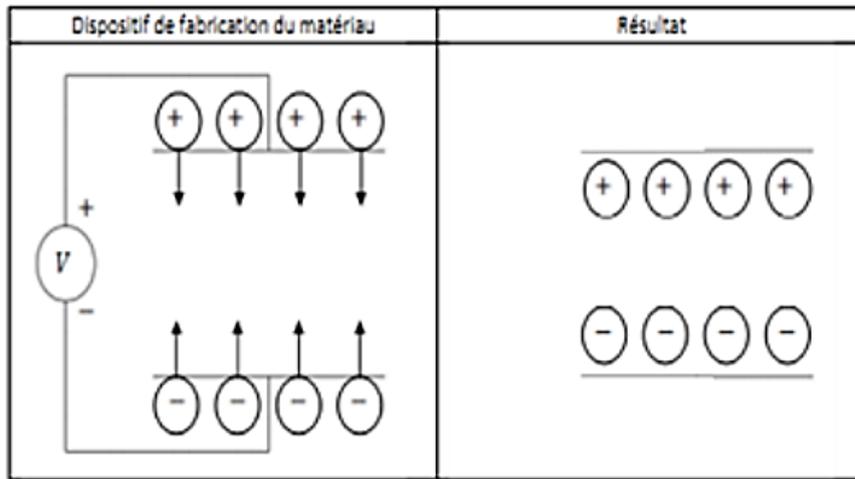


Figure.IV.6.Electrets neutres –Hétérocharges

Un électret dipolaire est généralement un thermo-électret qui résulte de l'orientation de dipôles par application d'un champ électrique à une température élevée qui correspond à la température de fusion ou de ramollissement. Puis obtention de l'état orienté figé par trempe à température ambiante La figure IV. illustre l'orientation des dipôles avant et après la formation du l'électret.[31]

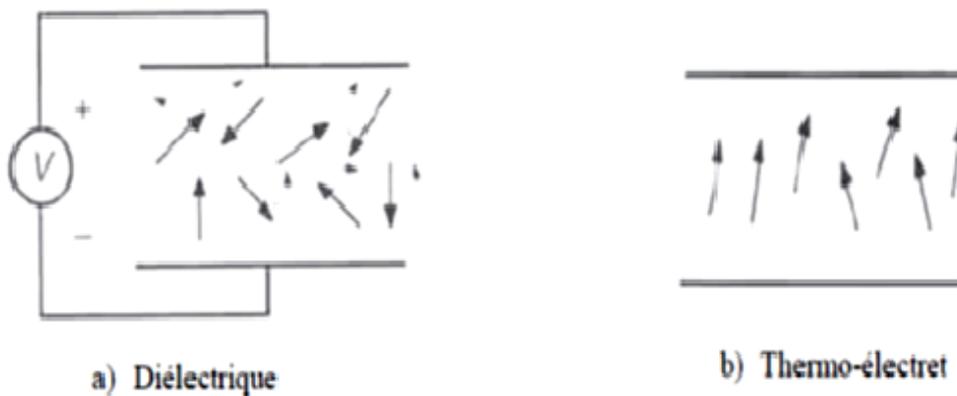


Figure.IV.7.Électret dipolaire

Il existe plusieurs méthodes de formation des électrets à charge d'espace. La Polarisation provient de charges des deux signes. Ces charges peuvent être obtenues par Séparation d'hétéro-charges présentes et piégées dans le matériau et/ou par injection D'homo-charges au niveau des électrodes lors de l'opération de polarisation. La polarisation Peut également provenir d'un excès de charges apportées par d'autres processus tels que la

Décharge couronne, l'implantation électronique (canon d'électrons), contact liquide, Charge par rouleau électrostatique ou la triboélectricité (contact + frottement) [31]

IV.4.1. Charge par décharge couronne

La décharge couronne est utilisée depuis longtemps pour charger des isolants, elle permet d'effectuer cette opération dans l'air ambiant, et sans contact avec la surface. [1] La décharge couronne est le moyen le plus simple et le plus fiable pour reproduire le chargement électrostatique des diélectriques. Grâce à ce moyen, il est possible de déposer et piéger des charges aussi bien positives que négatives dans les niveaux énergétiques de la surface d'isolant.

Pour générer la décharge couronne, un système d'électrode asymétrique est nécessaire, par exemples fil-plan où un diélectrique est posé sur le plan, alors la surface libre reçoit les charges, le dépôt n'est pas répartie de façon homogène sur sa surface.

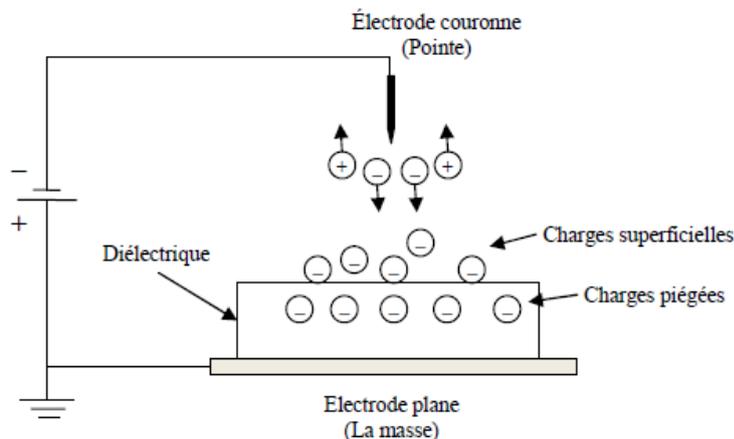


Figure.IV.8.Principe de formation d'électret par décharge couronne

Les décharges couronne sont caractérisées par une dissymétrie géométrique des électrodes. Les configurations courantes utilisées dans les expériences sont de type pointe plan, fil-plan et fil-cylindre (Figure IV.8). Lors de l'application d'une haute tension au niveau de l'électrode ayant le plus petit rayon de courbure, le champ électrique réduit produit dans l'espace inter-électrodes est fortement inhomogène.

Il a une valeur élevée au voisinage de cette électrode puis décroît rapidement au fur et à mesure qu'on s'approche de la cathode plane. A proximité de la pointe anodique, l'amplitude importante du champ électrique réduit permet de générer des électrons avec des énergies suffisantes pour ioniser le gaz. C'est une zone où se développent les avalanches électroniques [37], ce qui permet rapidement l'accumulation d'une charge d'espace à l'origine de la propagation de la décharge. Naturellement dans cette zone proche de la pointe les processus d'ionisation prédominent sur le processus d'attachement des électrons. En revanche, si on s'éloigne de la pointe, le champ électrique devient plus faible.

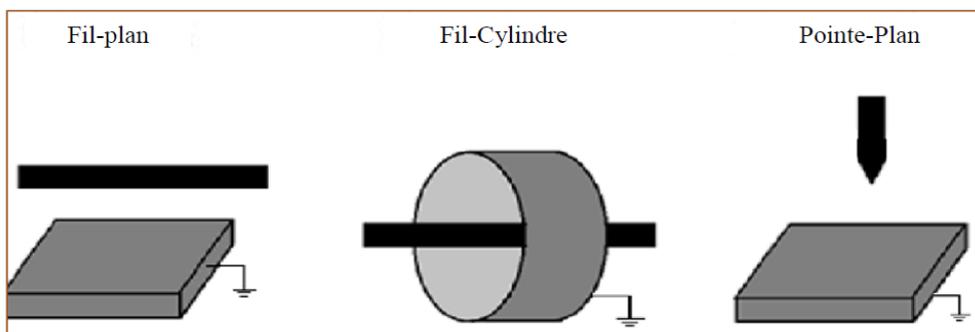


Figure.IV.9.Différentes configurations de la décharge couronne

IV.4.2. L'implantation électronique (canon d'électrons)

L'utilisation d'un canon accélérateur (à ions ou à électrons) pour accélérer des particules chargées (ions ou électrons) vers la surface d'un échantillon de diélectrique permet également de fabriquer des électrets. Les électrons viennent se placer à une profondeur r de la surface en fonction de leur énergie cinétique.[38]

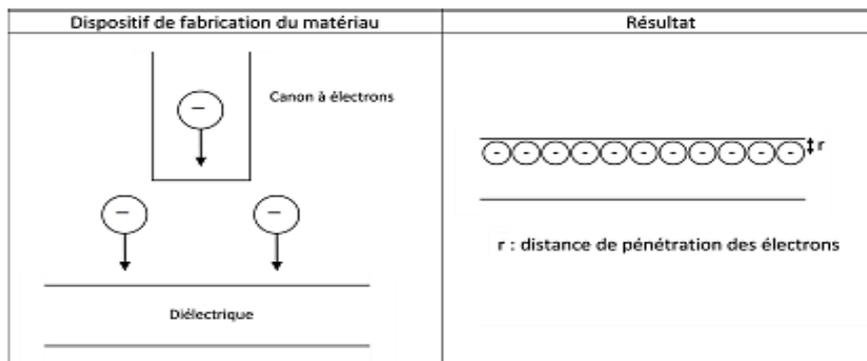


Figure.IV.10.Electrets à excès de charge obtenus par implantation électronique

Pour injecter des électrons énergétiques dans le laser à électrons libres de l'installation d'accélérateur national Thomas Jefferson, des scientifiques de l'installation de Newport News en Virginie ont construit un canon à électrons à photoémission conçu pour fonctionner sous vide à un demi-million de volts. Le "canon" du pistolet est constitué d'une paire d'isolants cylindriques en céramique, appelés colonnes d'accélérateur, en alumine pure et capables de résister à la haute tension. Quelle que soit la qualité d'un isolant en vrac, sa surface est toutefois vulnérable aux défaillances. Dans un champ électrique intense, les électrons libres peuvent être accélérés sur sa surface interne. Un seul impact électronique peut disperser un ou deux ou plusieurs électrons, lesquels impactent la surface à son tour.

À mesure que les atomes de surface perdent de plus en plus d'électrons, une charge positive se développe rapidement et davantage d'électrons sont lancés. En un instant, une avalanche d'électrons se propage à la surface dans un flashover catastrophique. Une façon d'éviter le contournement consiste à ajouter une certaine conductivité à la surface de l'isolateur afin que la charge puisse se dissiper avant de s'accumuler. [38]

IV.4.3. Charge par Le contact liquide

Bien que cette technique ne soit pas standardisée contrairement à la décharge Couronne et à l'implantation électronique, elle donne des résultats néanmoins intéressants. L'échantillon de diélectrique destiné à devenir un électret est couvert d'une électrode en face arrière mise à la masse. En face de cet échantillon est placée une électrode en platine recouverte de coton et imbibé d'une solution électrolytique. Le tout est mis en contact avec la surface du diélectrique et soumis à une forte tension. Au bout de quelques minutes, l'électrode est progressivement retirée tout en maintenant la tension. La surface de l'électret reste chargée

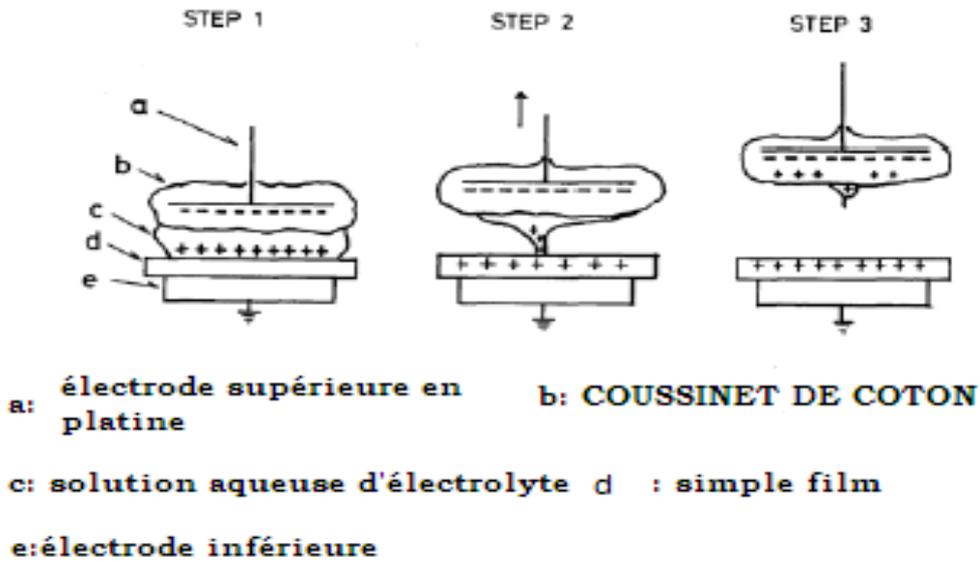


Figure.IV.11. Electrets à excès de charge obtenus par contact liquide

IV.4.4. Charge 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.

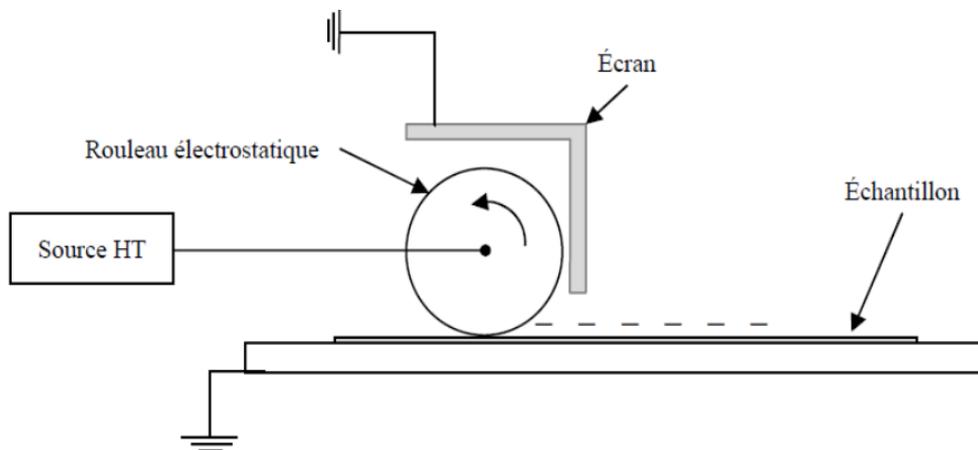


Figure.IV.12.Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique

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. La distribution de

charge de surface déposée étant homogène à l'échelle macroscopique et ces rouleaux sont utilisés pour charger les feuilles de papier dans les imprimantes laser [39] .

L'intérêt de ce système est double :

- Il met en œuvre un principe de dépôt différent de la décharge couronne.
- Il permet la mesure de potentiel simultanément à la charge, le défilement de

L'échantillon pouvant permettre de réduire le temps entre charge et mesure, notamment pour une cartographie ligne par ligne d'échantillons relativement dissipatifs.

IV.4.5. Charge par la triboélectricité (contact + frottement)

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, 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. La figure **IV** présente un dispositif de charge par effet triboélectrique utilisé dans l'évaluation de l'aptitude d'un textile fibreux à se charger par frottement et à atteindre des potentiels de surface plus ou moins importants. Cette évaluation permet de prévenir la manifestation des courants de décharge [39] .

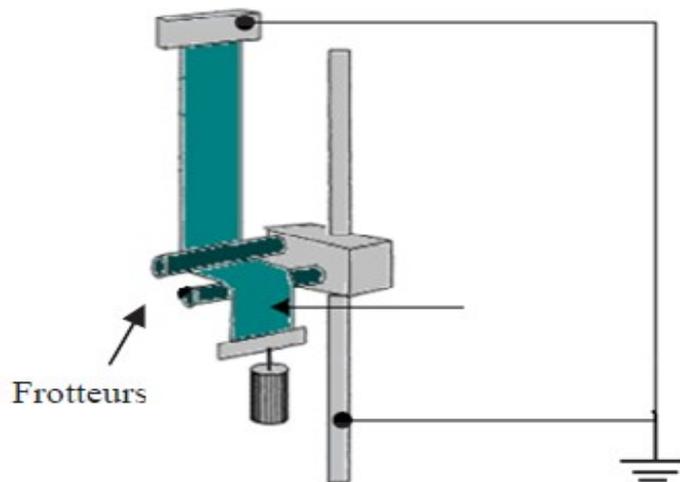


Figure.IV.13 Dispositif de charge par effet triboélectrique

IV.5. Conclusion

Les principaux procédés de charge d'un isolant sont le contact (liquide, ou solide), la décharge couronne, ou le faisceau d'électrons.

Le dernier chapitre sera consacré aux différentes méthodes de caractérisation des isolants chargés et leur comportement.

Chapitre V

**Les méthodes de caractérisation
d'un Diélectrique chargé**

V.1. Introduction

L'étude de la réponse des isolants solides chargés s'effectue souvent dans deux situations types, à savoir, la mesure du courant en circuit fermé et la mesure du potentiel de surface en circuit ouvert [40].

Le travail présenté dans ce chapitre est consacré aux diverses méthodes d'évaluation et de caractérisation électrique des matériaux diélectriques soumis à un flux d'énergie.

V.2. Caractérisation électrique des diélectriques

La caractérisation électrique des matériaux diélectriques comporte le plus souvent deux types de mesures :

- Mesure de courant ;
- Mesure de potentiel (ou charge). [31]

V.3. Mesures de courants et mesures de potentiel de surface

V.3.1. Les deux cas-type

Nous allons nous intéresser ici à des phénomènes électrostatiques, c'est-à-dire variant lentement. Lorsqu'on applique par exemple brutalement un champ électrique continu à un isolant, il présente une réponse transitoire qui peut durer un temps très long avant qu'un régime permanent puisse être atteint. Dans les polymères notamment, des processus de relaxation lents, des mouvements lents de la charge, et un dé piégeage progressif de cette charge dominant habituellement la réponse. On peut considérer que les mesures électriques sur un isolant en régime « temporel » (DC et pseudo-DC) peuvent être séparées en deux cas fondamentaux :

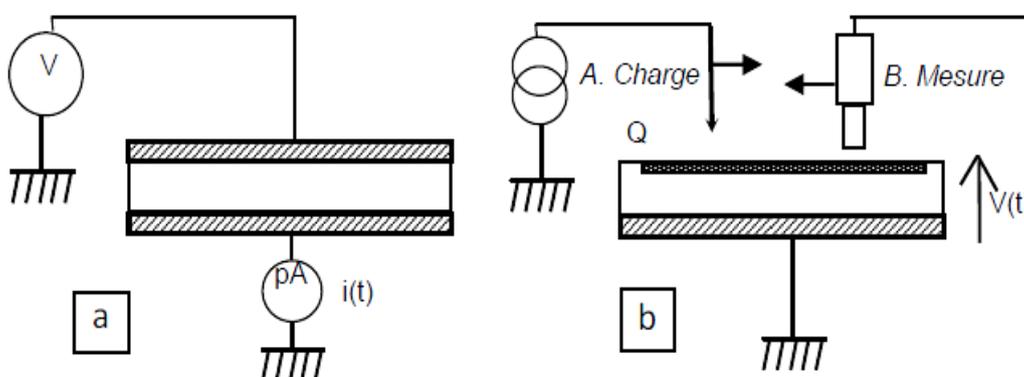


Figure.V.1.Mesures électrostatiques

a) mesure de $i(t)$ à potentiel fixe

b) mesure de $V(t)$ à charge fixée

- le cas (a) de la Figure V.1 ou l'environnement intervient en fixant un potentiel constant, et où c'est la réponse de l'isolant qui détermine la charge à ses bornes, est le cas des condensateurs et de la plupart des circuits où l'isolant sert à séparer des conducteurs. On mesure dans ce cas le courant traversant l'isolant.

- le cas (b) de la Figure V.1, où l'environnement intervient en fixant la quantité de charge (ou le courant) déposée sur la surface, et où c'est le potentiel qui est déterminé par les propriétés de l'isolant, est le cas le plus répandu lorsque l'isolant n'est pas dans un circuit électrique.

On mesure dans ce cas, en imposant un champ nul à la surface de l'isolant, un potentiel de surface. C'est ce type de mesures auquel nous allons nous intéresser ici. Ces mesures de potentiel ne peuvent généralement pas être effectuées simultanément au dépôt de charge, et on a donc le plus souvent une alternance charge / mesure.

On parle de mesures de déclin de potentiel si la charge est déposée avant la mesure, et non renouvelée ensuite. Dans un tel cas, on a donc en fait une phase de charge du matériau qui commencera généralement à courant constant (cas b), puis continuera à potentiel constant (passage par le cas a) lorsque la surface sera chargée à un potentiel d'équilibre, et enfin, l'arrêt de cette charge ramènera le montage au cas b. Pour donner un aperçu des phénomènes transitoires rapides, les mesures de courant pendant la polarisation de l'isolant restent le procédé le plus simple. Pour des phénomènes plus lents (au-dessus de la seconde), les mesures de potentiel de surface sont les mieux adaptées, car elles donnent un signal plus stable et moins bruyant. La mesure est en effet dépendante de la distance de la charge à la masse, et non de sa variation.

V.3.2. Théorie générale du déclin de potentiel

V.3.2.1. Equations électrostatiques de base

En électrostatique, les équations de Maxwell relient le déplacement électrique $D = (\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P})$, \vec{E} étant le champ électrique et \vec{P} la polarisation dans l'isolant), la densité de charge ρ et la densité de courant j en chaque point de l'isolant, par :

$$\text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{équation de Poisson})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div } \vec{j} = 0 \quad (\text{équation de continuité})$$

On peut en déduire que $\text{div} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \right) = 0$, c'est-à-dire que le flux de $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j}$, j est conservatif, et donc égal au courant mesuré dans le circuit extérieur. La grandeur $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (densité de courant de déplacement) exprime les variations de polarisation en un point de l'isolant.

La densité de courant inclue, dans le cas général, plusieurs composantes, comme la diffusion par exemple. Nous ne considérerons ici que le courant de conduction, qui est égal à la somme, pour les différents porteurs de charge, du produit du champ électrique par leur mobilité μ_i et leur densité :

$$\vec{j} = \left(\sum_i \mu_i \rho_i \right) \vec{E} \quad (\text{V.1})$$

Dans le cas où le matériau présente une certaine conductivité intrinsèque σ , on séparera ce terme pour écrire $\vec{j} = (\sigma + \sum_i \mu_i \rho_i) \vec{E} = \vec{j}$. La deuxième partie de l'expression est alors relative à une charge non homogène, et souvent injectée par l'extérieur (charge d'espace).

En considérant la densité de courant totale (relative aux charges libres et liées), on aura donc :

$$\vec{j}_{total} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + (\sigma + \sum_i \mu_i \rho_i) \vec{E} \quad (\text{V.2})$$

Les courants dans un isolant sont donc, si on néglige la diffusion, formés de trois composantes, polarisation dipolaire, conduction intrinsèque, et charge d'espace.

V.3.2.2. Application aux mesures de potentiel de surface

On s'intéressera dans la suite uniquement au cas d'un problème à une dimension (condensateur plan de grande largeur par rapport à son épaisseur L), ce qui est une bonne approximation pour des essais sur des films ou des plaques isolantes. On oriente l'isolant de la manière représentée Figure 3. Les conditions aux limites, dans ce cas, sont un potentiel nul à la face inférieure de l'isolant, et un champ nul à l'extérieur de l'isolant (cela découle notamment de l'utilisation d'une sonde asservie au potentiel de l'isolant, mais cela reste vrai tant que le champ dans l'air reste négligeable face à celui qui règne dans l'isolant).

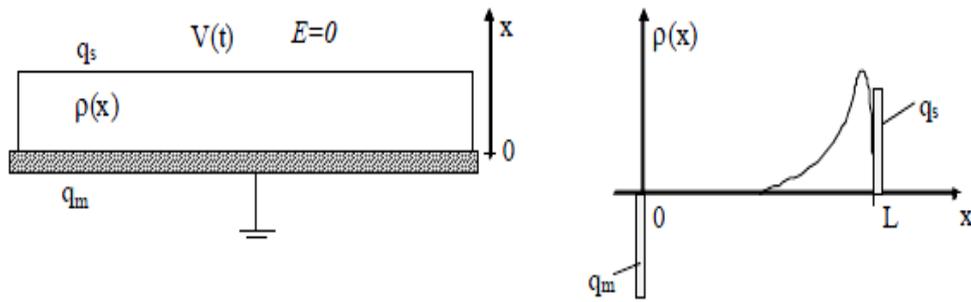


Figure.V.2. Injection de charge dans un isolant avec conditions aux limites à champ nul

L'intégration de l'équation [1] (théorème de Gauss) implique alors que le déplacement électrique en chacun des points de l'isolant sera égal à la densité surfacique de charge existant entre ce point et l'extérieur de l'isolant. La distribution de charge étant fixée initialement par l'extérieur, ce sera donc la « grandeur d'entrée » du système.

- **Constitution ou déclin de potentiel dus à la polarisation lente**

En l'absence de phénomènes de conduction, la charge de l'isolant pourra être décrite par :

$$\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t} = j_{ext} \quad (V.3)$$

c'est à dire que la montée en potentiel sera :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = - \int_0^L \frac{\partial E}{\partial t} dx = - \frac{1}{\epsilon_0} (L j_{ext} - \int_0^L \frac{\partial P}{\partial t} dx) \quad (V.4)$$

Une partie de la charge appliquée sera donc compensée par les phénomènes de polarisation, et la montée en potentiel sera donc plus lente en présence de l'isolant. Lorsque le courant de charge est interrompu, on est alors en circuit ouvert, et les phénomènes de polarisation lents, s'ils existent, entraîneront un déclin² de potentiel donné par :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon_0 \int_0^L \frac{\partial P}{\partial t} dx} dx \quad (V.5)$$

- **Déclin de potentiel dû à des effets de conduction**

Dans le cas où la polarisation est stabilisée, elle peut être décrite par une constante diélectrique ϵ , et les variations de potentiel mesurées seront alors liés à des effets de conduction. On a alors :

$$\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + (\sigma + \sum_i \mu_i \rho_i) E = 0 \quad (V.6)$$

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

Dans le cas où il n'y a pas d'effets de charge d'espace, le champ est homogène, et on a :

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{V.7})$$

- **Retour de potentiel**

La conséquence des différents mécanismes évoqués ici est que, si on réalise un court-circuit temporaire de l'isolant, on ramène V à zéro, mais le potentiel pourra ensuite évoluer :

- Si les mécanismes de dépolarisation lents de l'isolant ne sont pas achevés, l'équation [Eq7] reste valable et entraîne une évolution concomitante du potentiel

- S'il existe une charge d'espace dans le matériau, le champ n'y sera pas nul partout, et cette charge tendra à retourner vers les surfaces. [1]

V.4. Méthodes d'évaluation de l'état de charge d'un électret

L'évaluation des charges d'espace d'un électret, réparties en surface et en profondeur du matériau, peut se réaliser par la mesure directe ou indirecte de celles-ci. Elle permettra de caractériser l'aptitude du diélectrique à accumuler et à piéger des charges électriques. Plusieurs techniques de mesures ont été développées, certaines d'entre elles permettent d'estimer la répartition spatiale de la charge d'espace et son amplitude, tandis que d'autres donnent la possibilité d'accéder à des informations relatives aux charges d'espace dans les isolants sans pour autant conduire à la détermination de la distribution spatiale de celles-ci. [41]

V.4.1. Techniques de mesure de la distribution spatiale de la charge d'espace

Ces techniques non destructives permettent d'accéder à la distribution spatiale des charges internes dans les isolants. Dans la plupart des méthodes, une perturbation extérieure appliquée à l'échantillon provoque un déplacement relatif des charges par rapport aux électrodes de mesure. La charge induite est ainsi modifiée et un signal proportionnel à la charge interne est détecté aux électrodes. Ce signal se traduit par l'apparition d'une variation de tension aux bornes de l'échantillon si la mesure est effectuée en circuit ouvert, ou d'une variation de courant si la mesure est effectuée en circuit fermé. La résolution spatiale de la distribution de la charge d'espace nécessite la connaissance de la

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

forme et l'évolution temporelle de la perturbation pendant la mesure.[42] Le tableau V.1 résume les caractéristiques principales de ces méthodes les plus utilisés.

Les méthodes thermiques sont basées sur la génération d'une dilatation non uniforme du milieu isolant par une élévation locale de la température sur l'une des faces de l'échantillon. Les méthodes acoustiques sont basées sur la propagation de l'onde acoustique (onde de pression) qui interagit avec la charge d'espace, à l'exception de la méthode électroacoustique pulsée où les ondes acoustiques sont générées par le déplacement de la charge [43]

Tableau V .1. Principales méthodes de mesure de la distribution de la charge d'espace

Techniques	Informations fournies	Objets étudiés
Focused Laser Intensity Modulation Method (FLIMM)	-Détection de charges d'espace. -Profil de polarisation. -Cartographie 3D.	Matériaux d'épaisseurs (10 –150 μm) .
Pulse Electro-Acoustique (PEA)	-Distribution spatiale du champ électrique et des charges d'espaces. - Mesure de polarisation.	Matériaux d'épaisseurs (0,1 – 1 mm) ; - Convenable pour les polymères (films, plaques)
Méthode de l'Onde Thermique (MOT)	-Répartition des charges piégées et du champ interne du matériau. -Evolution de l'état électrique	Matériaux d'épaisseurs (100nm-25mm). Convenable pour nombreux matériaux isolants solides.

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

Courants Thermo-Stimulés (CTS)	-Identification des températures de piégeage de charges et/ou de polarisation . - Détermination de l'origine des charges électriques piégées.	-Matériaux d'épaisseurs (100 nm – 25 mm) . - Convenable pour nombreux matériaux isolants solides
Laser-Induced Pressure Pulse (LIPP)	-Distribution spatiale des charges d'espace. - Distribution du champ électrique	-Matériaux d'épaisseurs (100 μ m à quelques mm) . -Adaptée à des polymères (propriétés acoustiques).

Tableau V.2 : Autres techniques de caractérisation des matériaux diélectrique

Techniques	Informations fournies	Objets étudiés
Spectroscopie diélectrique (SD)	-Permittivité (ϵ_r). -Conductivité volumique (σ_v) . -Résistivité volumique (ρ_v)	Matériaux isolants solides (polymères, oxydes et composites) ; \boxtimes Epaisseurs de 100 nm à quelques mm.
Potentiel de surface (DPS)	Déclin du potentiel de surface ; \boxtimes Cartographie 2D du potentiel	Matériaux polymères, céramiques, composites (films, pastilles, plaques) ; \boxtimes Epaisseurs de 100 nm à quelques mm

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

Mesure de courant de conduction (MCC)	Résistivité surfacique et volumique ; ☐ Phénomènes de conduction	Epaisseurs compris entre 100 nm et quelques mm ; ☐ Matériaux isolants solides (polymères, oxydes et composites)
Méthode miroir (MM)	Quantité de charges piégées ; ☐ Mécanismes de piégeage et dépiégeage avec la température ; ☐ Mobilité des charges sous champ électrique	Diélectriques d'épaisseurs > 1 mm ; ☐ Matériaux céramiques, polymères et composites (films, plaques, câbles...)

V.4.2. Méthode électroacoustique pulsée

Cette technique est présentée à part dans ce chapitre car son principe est basé sur la Détection des ondes acoustique générées par le déplacement de la charge suite à une excitation électrique. Les charges piégées sont soumises à une véritable percussion, provoquée par un champ électrique impulsionnel à front très raide. Une onde élastique, Engendrée par échange de quantité de mouvement entre les charges et le milieu, se propage

À la vitesse du son dans le matériau et elle est détectée par un capteur piézoélectrique [45] La méthode électroacoustique pulsée est très développée, sa mise en œuvre n'est pas coûteuse et facile à interpréter les mesures [47]. Cette technique est largement utilisée pour étudier les mécanismes de formation et la distribution spatiale des charges d'espace dans le diélectrique [42].

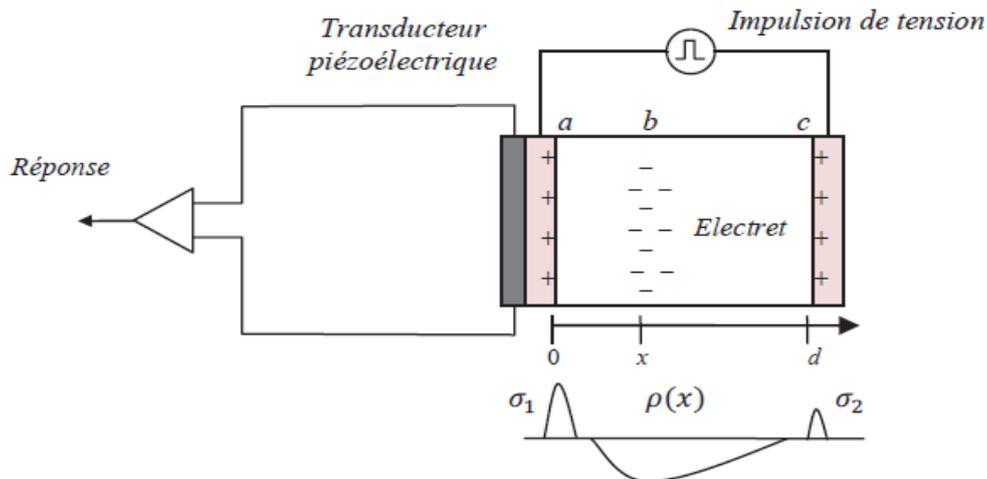


Figure.V.3.Principe de la méthode électroacoustique

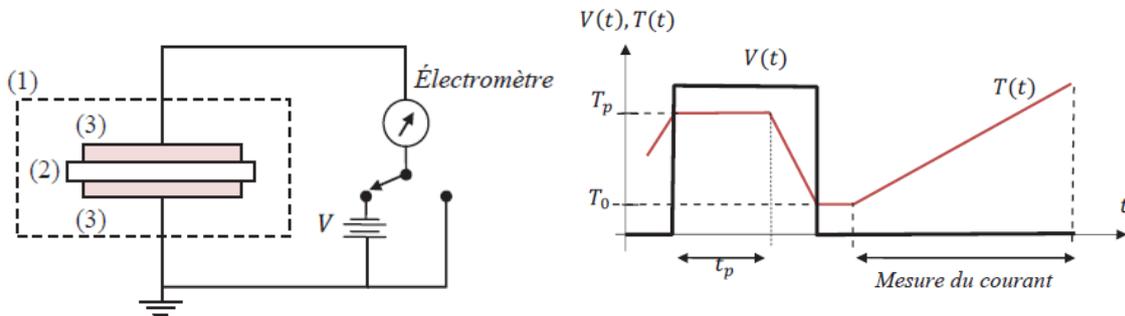
Considérons un diélectrique d'épaisseur d entre deux électrodes (fig V.3), avec une couche de charges réelles négatives à la profondeur x . Ces charges induisent, par influence, des charges en a et c . Lorsque l'échantillon est soumis à une impulsion de tension d'une durée de quelques nanosecondes, un déplacement transitoire des charges d'espace se produit ainsi que des ondes de pression pulsées, dont l'amplitude est proportionnelle à la densité locale des charges. Ces ondes propagent à la vitesse du son et le capteur reçoit les ondes émises en a , b et c dans cette ordre avec des délais correspondant aux distances parcourues. Les charges positives et négatives sont sollicitées par le champ dans des directions opposées. Des études combinées de distribution spatiale de charge d'espace par la méthode électroacoustique pulsée et de courants lors des phases de polarisation et de relaxation ont été développés, ainsi que la mesure du potentiel de surface des électrets obtenus par décharge couronne [46].

V.4.3. Méthodes de stimulation thermique

La méthode la plus répandue est celle des courants de dépolarisation stimulés Thermiquement. L'échantillon est polarisé sous un niveau de tension, à température T_p , pendant un temps t_p . La température est ensuite brusquement abaissée, en maintenant l'échantillon toujours sous tension afin de figer la polarisation, jusqu'à une température T_0 . À laquelle l'échantillon est court-circuité avant de lui appliquer une rampe de température pendant laquelle le courant de dépolarisation est mesuré. Ce dernier contient les informations relatives à la libération des charges piégées et au réarrangement des dipôles

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

électriques. Les spectres obtenus contiennent en général plusieurs pics de courant associés aux différents phénomènes mis en jeu. Ainsi l'énergie d'activation des processus peut être déterminée[42].



(1) : Enceinte pour contrôler de la température.

(2) : Diélectrique. (3) : Electrodes.

Figure.V.4 Principe de méthode de stimulation thermique de la décharge

Sur le même principe, cette méthode est élargie aux mesures en circuit ouvert. En l'absence de l'électrode supérieure, une sonde électrostatique de mesure peut être utilisée pour la mesure du déclin de potentiel thermo-stimulé [43]. Lorsque l'électrode supérieure n'est pas en contact avec la surface libre de l'échantillon, elle peut être reliée à l'électrode inférieure à travers un électromètre afin d'obtenir le spectre de la charge [43].

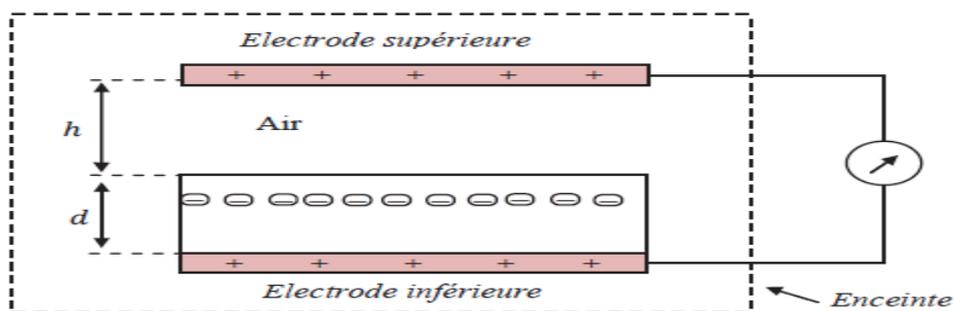


Figure.V.5.Principe de mesure de la charge thermo-stimulée

V.5. Méthodes électrostatiques de caractérisation des électrets

Bien que les techniques électrostatiques ne permettent pas l'obtention de la distribution spatiale des charges d'espace avec précision des autres techniques qui nécessitent souvent de déconvolutions lourdes en calculs mathématiques pour extraire les

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

résultats, elles sont simples et faciles à mettre en œuvre, dont l'extraction des résultats est directe **[43]**

Toute méthode électrostatique de caractérisation des électrets doit permettre la détection des charges électriques sans qu'il y ait ni circulation de courant électrique ni redistribution et neutralisation partielle de ces charges. Ces techniques reposent sur le principe que les charges réelles induisent leurs images en surface conductrice. Le cylindre de Faraday est un dispositif basique dans le domaine de mesure électrostatique, malgré la précision de l'estimation de la charge nette, son utilisation n'est pas souhaitable lorsque la distribution de charges est plus désirée que la charge elle-même où une résolution spatiale est nécessaire, ou bien pour suivre l'évolution de la charge, dans le temps, à un endroit bien défini. En plus, dans certains cas, l'utilisation du cylindre de Faraday est limitée, tels que la mesure de la charge du tapis d'un convoyeur **[42-43]**.

Les seules mesures qui restent pratiques et fiables sont des mesures sans contact basées sur le phénomène d'influence. Elles permettent de mesurer soit le champ électrique, soit le potentiel électrique, ces mesures pouvant servir alors à étudier la réponse d'un électret. Le principe porte sur l'utilisation d'une électrode détectrice reliée à un instrument de mesure, le plus souvent un électromètre. Cependant il faut garder à l'esprit que ce sont des mesures très sensibles, il faut que la mesure elle-même n'affecte pas les résultats. C'est pourquoi il est important que l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure soit très élevée ($>10^{11} \Omega$) et que la capacité d'entrée soit faible ($< 5\text{pF}$). **[48-43]**

Il est également important de réunir des conditions optimales car tout couplage capacitif de l'électrode détectrice peut introduire une erreur de mesure substantielle. Des dérives de mesure peuvent être attribuées au circuit électronique et aux accumulations de la charge indésirable sur ou à proximité de l'électrode sonde. La qualité des mesures dépend aussi de l'environnement et de l'état de surface de l'électrode détectrice qui est souvent plaquée par un métal noble tel que l'or. La résolution des mesures dépend de la configuration géométrique formée par la sonde et l'échantillon ainsi que leurs dimensions respectives **[43]**. Cette section est focalisée sur la présentation des différents principes de mesure sans contact en électrostatique.

V.5.1. Méthode de compensation

Considérons le dispositif de la figure. V.3, d'où l'expression des tensions V_s et V_0 Respectivement aux bornes de l'électret et aux bornes de l'intervalle d'air est obtenue. Si L'intervalle d'air entre l'électrode supérieure et la surface libre de l'électret tend vers l'infini et en introduisant la densité surfacique totale charges, telle qu'elle est définie par la relation (V.19), alors nous pouvons réécrire l'expression de ces tensions :

$$V_s = V_0 = \frac{\sigma_T d}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (\text{V.9})$$

La densité surfacique totale de charges en fonction de la tension aux bornes est :

$$\sigma_T = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d} V_s \quad (\text{V.10})$$

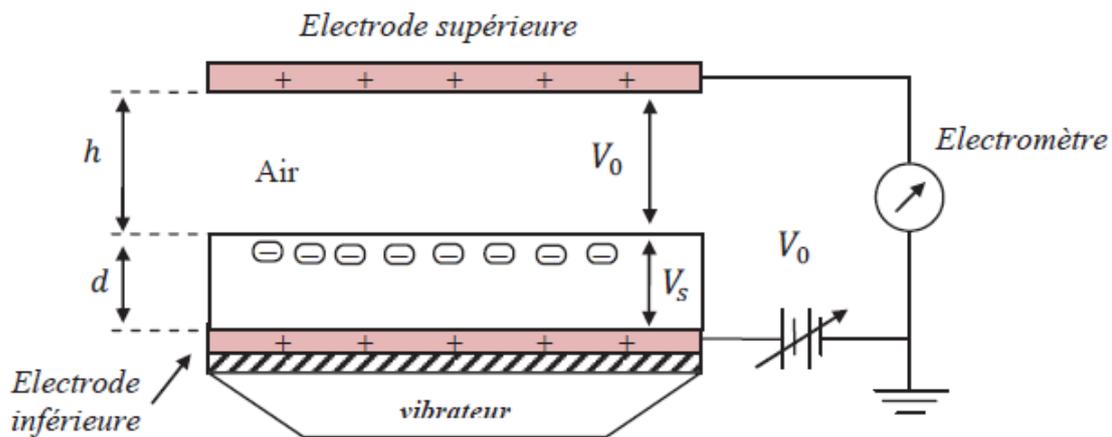


Figure.V.6.Principe de la méthode de compensation

V.5.2. Méthode à sonde capacitive

Cette méthode est utilisée pour caractériser un électret dont une face est libre et l'autre est métallisée ou en contact avec une électrode reliée à la masse. Dans ce cas, une sonde métallique est placée en parallèle avec la surface libre du diélectrique dont l'intervalle d'air est assez large. La sonde est reliée à l'électrode à travers un condensateur électrique de capacité très élevée que celle formée par la sonde et l'électrode (fig V.5) illustre le principe de la sonde capacitive dont un obturateur couvre la sonde métallique du champ de l'électret.

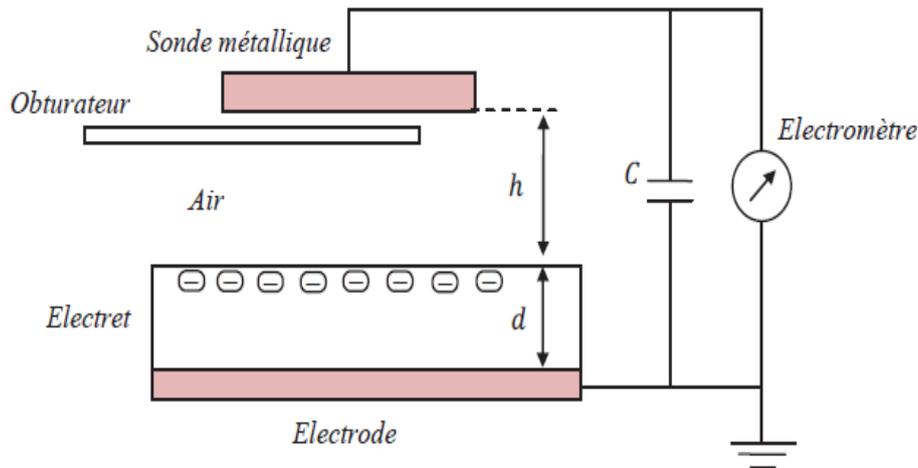


Figure.V.7.Principe de la sonde capacitive

Lorsque l'obturateur est retiré, la sonde est exposée au champ créé par l'électret et des charges électriques s'écoulent vers la capacité en créant à ses bornes une tension, dont la valeur est indiquée par l'électromètre. Cette tension V est exprimée en fonction de la densité des charges induite au niveau de la sonde métallique σ_{sup} , sa surface A et la capacité C du condensateur :

$$V = - \frac{A \sigma_{sup}}{C} \quad (V.12)$$

Si la sonde peut être rendue assez petite, la distribution latérale de charge peut être déterminée par cette méthode de la sonde capacitive [53]. L'évaluation de la densité surfacique totale de charges σ_T peut être obtenue en introduisant la relation (13) :

$$\sigma_T = - \frac{(\epsilon_r h + d)}{d} \sigma_{sup} \quad (V.13)$$

Cette densité surfacique totale de charges σ_T peut être exprimée en fonction de la tension indiquée par l'électromètre :

$$\sigma_T = \frac{(\epsilon_r h + d) CV}{d A} \quad (V.14)$$

V.5.3. Sonde à induction

Lorsque la plaque sensible de la sonde à induction, présentée sur la (figV.6), est exposée au champ électrique \vec{E} créé par des charges proches, une charge image apparaît et qui est recueillie au niveau du condensateur ayant une capacité C . La tension aux bornes de cette capacité est amplifiée et le signal est exploité à afin de déterminer soit le champ électrique, soit la charge d'un isolant.

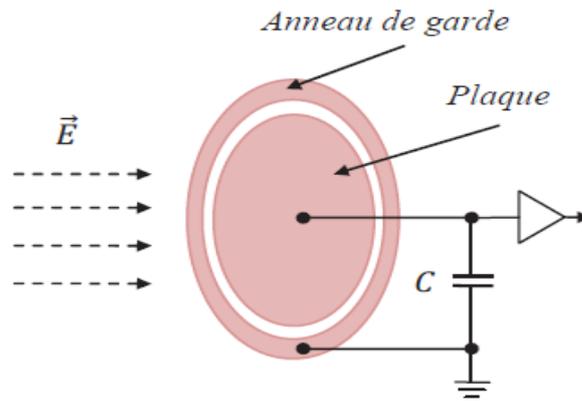


Figure.V.8.Sonde à induction.

La mesure du champ électrique peut servir à déterminer la charge d'une surface isolante. Cette mesure est aussi réalisable pour une plaque isolante n'ayant aucune face métallisée ou en absence d'une électrode de masse. La sonde à induction est aussi utilisée pour mesurer le champ électrique incident d'une seule face chargée, définie par la densité surfacique σ_s , ou dans le cas où les deux faces, supérieure et inférieure, de l'échantillon sont chargées et leurs densités surfaciques sont respectivement désignées par σ_{sup} et σ_{inf} .

La figure suivante montre le lien entre le champ incident et sa source, dont la charge des surfaces est uniforme, ϵ_0 désigne la permittivité du vide et ϵ_r et la permittivité relative de l'isolant. L'orientation du champ électrique suppose que $\sigma_s > 0$ et $\sigma_{sup} + \sigma_{inf} > 0$, et que la face de l'échantillon est assez large par rapport à son épaisseur (K. L. Kaiser 2006).

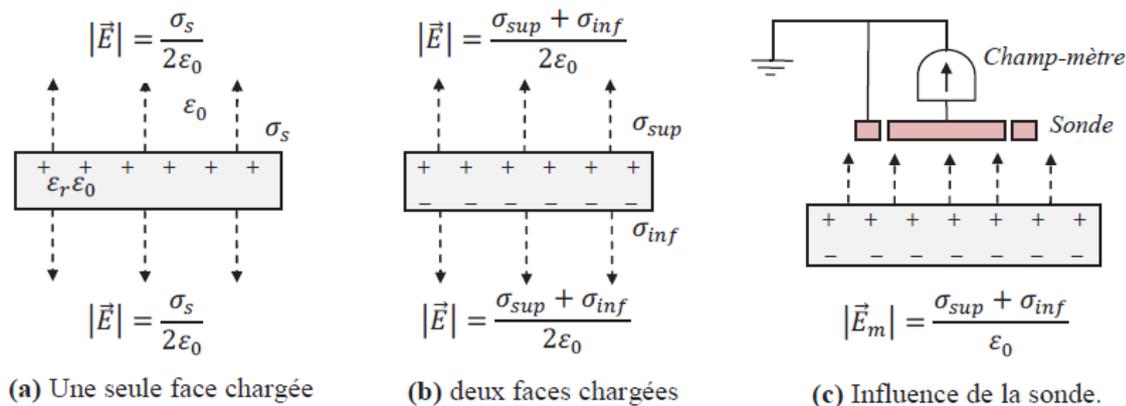


Figure.V.9.Mesure du champ électrique en absence de l'électrode de masse

Si un champ-mètre est introduit de telle façon que la surface sensible de la sonde soit perpendiculaire au champ électrique, alors la valeur du champ mesuré E_m est le double de celle du champ E défini en absence de la sonde, à cause de la charge induite au niveau de la

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

sonde. Une fois que le champ électrique est mesuré, la charge de l'échantillon peut être immédiatement déterminée. En général, il faut veiller à ce que la surface de l'échantillon soit très grande par rapport à la surface de la sonde et aussi à sa planéité en réduisant assez la distance entre la sonde et l'échantillon de telle sorte que cette distance soit très faible devant le rayon de courbure de l'échantillon.

L'anneau de garde est utile pour que la surface sensible reçoive un champ uniforme et au lieu qu'il soit relié à la masse, il peut être au même potentiel que la plaque détectrice en les reliant à l'aide d'un amplificateur de gain unitaire. Le champ-mètre peut être aussi un électromètre. Nous intéressons particulièrement à la situation où une face du diélectrique est en contact avec une électrode reliée à la masse et l'autre surface est libre (fig V.8) ci-dessous, illustre cette situation et son modèle capacitif en présence de la sonde à induction.

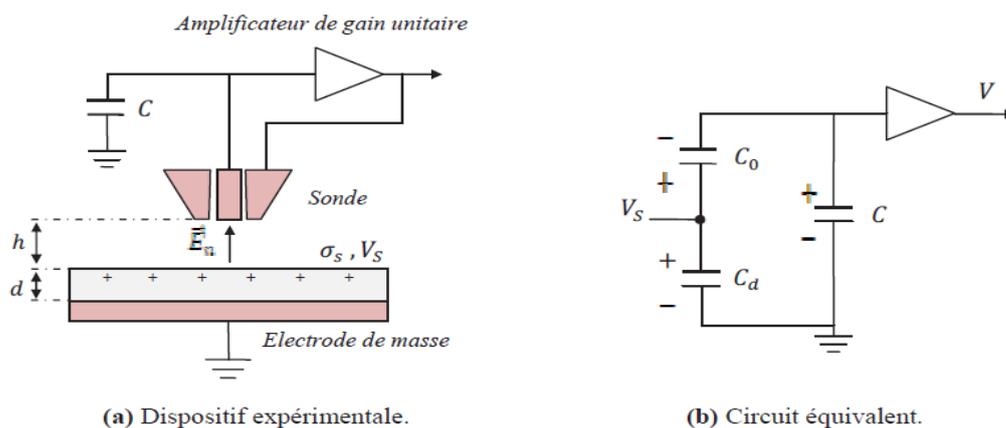


Figure.V.10.Modèle capacitif de la sonde à induction

- C : la capacité du circuit extérieur (champ-mètre ou électromètre + câblage).
- C_0 : la capacité définie entre la face libre du diélectrique et la sonde.
- C_d : la capacité définie entre la face libre du diélectrique et l'électrode de masse.

La relation entre le potentiel de surface V_s et la tension V mesurée à l'aide de la sonde à induction est :

$$V_s = \frac{C_0 + C}{C_0} V \quad (V.15)$$

Sous la sonde, le champ électrique est supposé perpendiculaire à surface de l'électrode détectrice et uniforme, alors :

$$E_n = \frac{|V_s - V|}{h} = \frac{C}{C_0} \frac{V}{h} \quad (V.16)$$

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

En introduisant l'expression de la capacité C_0 , définie entre la sonde et la face libre de l'isolant dont h est la distance entre eux, le champ électrique vu par la sonde sera fonction de la tension mesurée, la capacité C et la surface de l'électrode détectrice A . Par contre, ce champ dépend de l'épaisseur d du diélectrique et de la présence de l'électrode de masse à travers de la tension mesurée de V . L'expression du champ est explicitée par la relation suivante :

$$E_n = \frac{C}{\varepsilon_0 A} V \quad (\text{V.17})$$

Le numérateur de cette expression CV représente la charge totale Q vue par la sonde, et la densité de charge surfacique σ_s le long de la surface A de l'électrode détectrice est égale à cette charge divisée par la surface A . La condition standard à la limite, s'applique au niveau de la surface conductrice de la sonde, alors :

$$D_n = \varepsilon_0 E_n = \sigma_s \quad (\text{V.18})$$

Ceci est complètement en accord avec l'expression (V) du champ E_n et elle peut être retrouvée ;

$$E_n = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{A \varepsilon_0} = \frac{CV}{\varepsilon_0 A} \quad (\text{V.19})$$

Ces résultats supposent que la distribution de la charge surfacique le long de la surface vue par la sonde est uniforme. La taille de la sonde est un facteur d'intensification du champ au niveau de sa surface, ceci peut affecter la distribution surfacique de la charge d'où nous réitérons l'importance de la géométrie de la sonde et la surface chargée du diélectrique. Cette méthode est simple et n'est pas coûteuse, mais elle est sensible à la présence des particules chargées et la mesure est affectée par la dérive de l'instrument à cause de l'amplificateur, même pour les électromètres de qualité. La sonde doit être étalonnée dans une région libre de tout champ électrique et utilisée dans un environnement propre. Cette technique est limitée pour faire des mesures pendant un temps prolongé de manière continue et surtout elle nécessite de refaire le zéro avant chaque mesure [43-49].

V.5.4. Moulin à champ

Le moulin à champ fonctionne sur le même principe que la sonde à induction, seulement un obturateur tournant, sous forme d'une ailette, permet de moduler le champ incident en obstruant par intermittence la plaque sensible. Cet instrument est plus

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

performant, le problème de dérive inhérent aux sondes d'induction est contourné. Il permet une meilleure sensibilité et il n'est pas nécessaire de refaire le zéro à chaque mesure. (figV.9) présente les éléments principaux d'un moulin à champ, où l'ailette tournante est placée devant l'ailette sensible. Ainsi la modulation de la charge induite, obtenue par la modulation de la surface exposée au champ incident, génère un signal alternatif proportionnel au champ, ainsi généré peut être amplifié à l'aide d'un système de détection synchrone. Cela évite les perturbations dues aux champs alternatifs non harmoniques de la fréquence de l'obturateur et les dérives lentes inhérentes aux amplificateurs pour tensions continues [43-50]. L'abréviation PSD (phase-sensitive détection) désigne le détecteur synchrone en anglais.

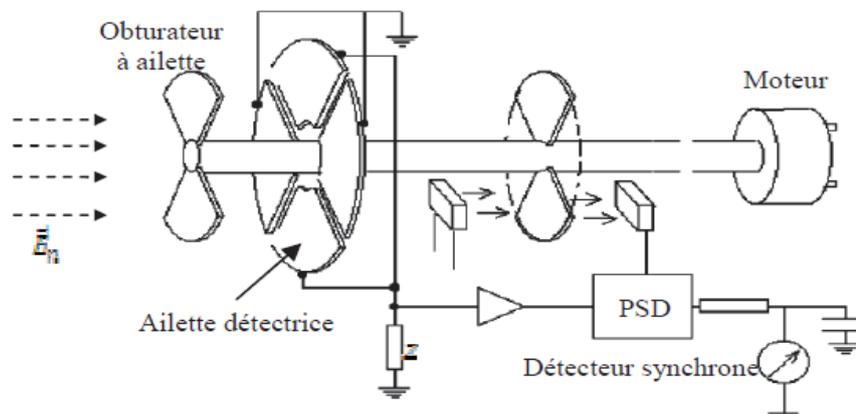


Figure.V.11.Schéma de principe d'un moulin à champ

En introduisant la condition limite à la surface de l'ailette détectrice, le courant engendré par la variation de la charge induite Q à cause de la modulation de la surface A exposée au champ s'écrit :

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d(\sigma_s A(t))}{dt} = \varepsilon_0 E \frac{dA(t)}{dt} \quad (V.20)$$

Supposant que la modulation de la surface A est définie par l'harmonique suivante :

$$A(t) = A_0 \frac{1 + \sin(\omega t)}{2} \quad (V.21)$$

Alors le pic de courant dépendra de l'intensité du champ incident et la fréquence de la modulation :

$$i_{pic} = \omega \varepsilon_0 E \frac{A_0}{2} \quad (V.22)$$

Le moulin à champ est exploité pour concevoir un voltmètre sans contact, il existe des versions commerciales. Le principe, présenté à la figure V.10, est celui qu'un moulin à champ miniature qui utilise une sonde dont l'armature n'est pas reliée à la masse. Le signal

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

délivré par le détecteur synchrone est amplifié à l'aide d'un amplificateur haute tension. Ce dernier est connecté à l'armature de la sonde, ainsi une contre-réaction est réalisée et elle permet d'asservir potentiel de la sonde jusqu'à ce que le champ incident approche le zéro. Lorsque l'annulation du champ est obtenue, alors le potentiel de l'armature de la sonde est égal au potentiel de surface du diélectrique chargé. Cette technique introduit moins de perturbations et elle permet de suivre l'évolution du potentiel de surface [43].

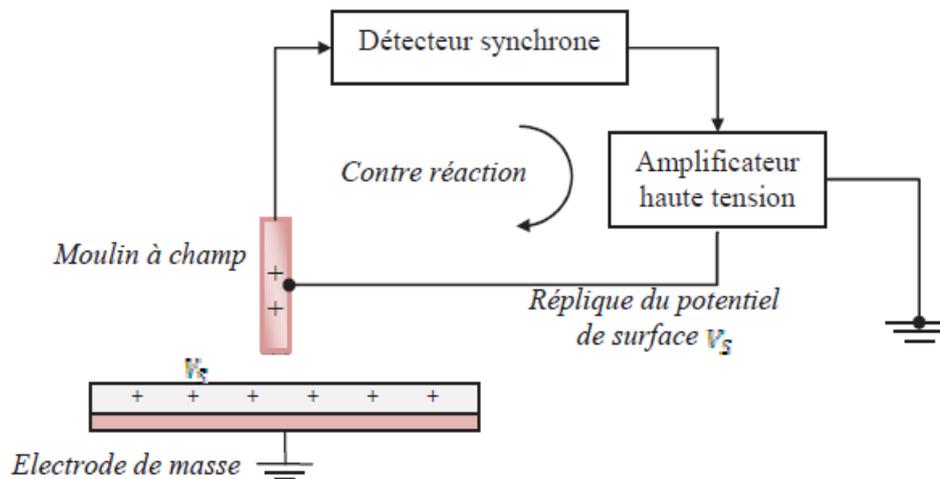


Figure.V.12Principe du voltmètre sans contact

V.5.5. Sonde à condensateur vibrant

La sonde à condensateur vibrant est aussi connue sous le nom de la sonde capacitive de Kelvin. Elle est très utilisée pour la caractérisation non destructive des électrets par la mesure sans contact du potentiel de surface à long terme. Cette sonde à courant porteur alternatif permet de contourner les dérives de la sonde à induction. En effet, il est possible de transformer au préalable les tensions ou courants continus que l'on veut mesurer en tensions alternatives de façon à pouvoir utiliser des amplificateurs ordinaires à couplage par capacité ou par induction qui sont exempts de dérive. Le condensateur de conversion peut en principe être du type tournant ou du type vibrant. La sonde à condensateur vibrant offre une alternative attractive, malgré le rendement de conversion obtenu est faible, en raison de l'absence d'usure et d'entretien. Dans le condensateur vibrant, il n'y a plus besoin de contact glissant avec l'armature mobile.

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

Pour effectuer cette conversion, un procédé utilisable est celui d'une modulation par variation de capacité, procédé purement électrostatique. Une sonde métallique vibre à l'aide d'un oscillateur mécanique au-dessus de la surface chargée d'un échantillon, où les déplacements de la plaque métallique sont perpendiculaires au champ électrique incident de la surface chargée. La figure suivante illustre ce principe de modulation :

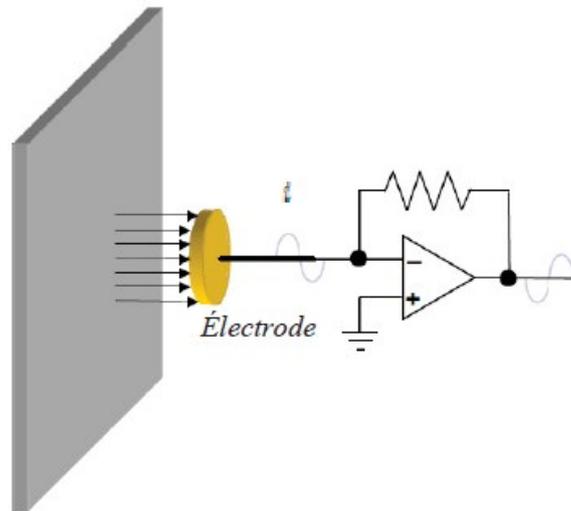


Figure.V.13 Principe de modulation par variation de capacité

Le signal détecté est l'intensité de courant électrique i induit par la vibration de la sonde dans le champ électrique créé par la différence du potentiel de surface V_s entre la sonde et l'échantillon [46].

$$i = C \frac{dV_s}{dt} + V_s \frac{dC}{dt} \quad (\text{V.23})$$

Où C est la capacité du condensateur formé par la sonde et l'échantillon. Pour une modulation sinusoïdale, cette capacité est exprimée par la relation (23), où C_0 est la capacité moyenne et C_1 est l'amplitude des variations :

$$C = C_0 + C_1 \sin(\omega t) \quad (\text{V.24})$$

Pour une différence du potentiel de surface V_s entre la sonde et l'échantillon constant, l'expression (v..) du courant se réduit à :

$$i = V_s \frac{dC}{dt} \quad (\text{V.25})$$

Chapitre V Les méthodes de caractérisation d'un Diélectrique chargé

La mesure automatique de la différence du potentiel de surface V_s , est obtenue par ajustement du courant i à zéro, à l'aide d'un servomécanisme électronique pour l'annulation du champ électrostatique. Ceci nécessite que le potentiel de la sonde V_m soit au même potentiel de surface de l'échantillon car le courant n'est pas seulement fonction de l'amplitude et de la fréquence des vibrations, mais il dépend de la différence de potentiel $(V_s - V_m)$.

$$i = (V_s - V_m) \frac{dC}{dt} \quad (V.26)$$

Considérons les deux situations de la figure ci dessous, où une sonde à condensateur vibrant est utilisée. Dans la situation (a) l'électrode cible est reliée à un potentiel, ainsi le signal généré par vibration de la sonde est désigné par V_1 dont le sens est choisie arbitrairement. Par contre, dans la situation (b) où la sonde qui est sous un potentiel V_s , le signal généré est de sens opposé que celui de la situation (a). Lorsque la mesure du potentiel de surface d'une cible est effectuée à l'aide de cette sonde, la contre réaction du servomécanisme électronique asservi le potentiel de la sonde V_m au potentiel de surface de la cible V_s , ainsi le signal de sortie est proche de zéro du fait que le champ électrique \vec{E} résultant est nul [43].

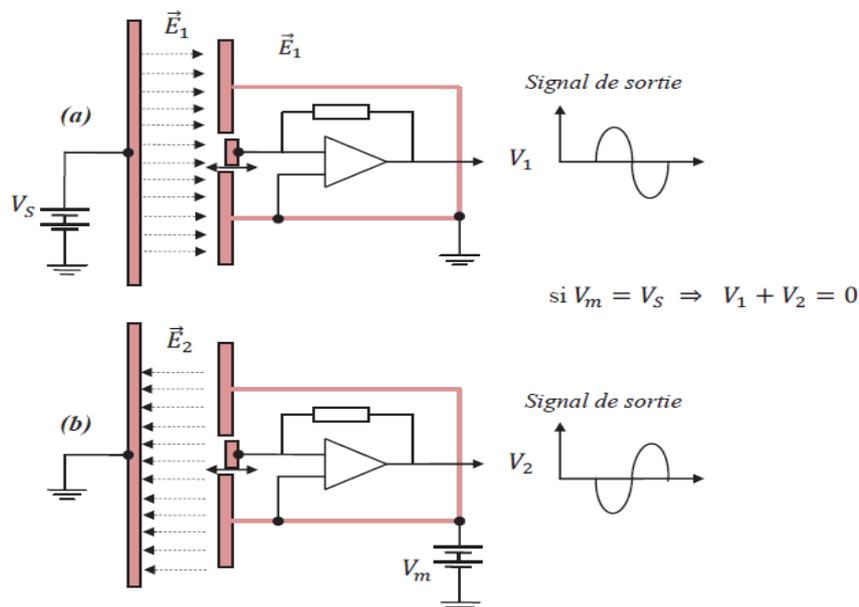


Figure.V.14.Principe de mesure du potentiel de surface à l'aide de la sonde à condensateur vibrant

V.6. Conclusion :

Les techniques de mesures électrostatiques, notamment la mesure de potentiel de surface, sont faciles à utiliser pour caractériser l'état de charge des isolant chargés et son évolution dans le temps.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

En électrostatique, la réponse des matériaux à la charge électrique est complexe et reste un sujet de recherche. La caractérisation de ces matériaux est bien loin de pouvoir se résumer à un ou deux paramètres, en l'occurrence, la permittivité et la conductivité. Les phénomènes de surface sont déterminants pour la génération ou l'injection de la charge dans l'isolant.

Ce travail est consacré à l'étude de caractérisation des matériaux diélectriques soumis à flux d'énergie dans le but de comprendre le comportement de ces diélectriques vis à vis des charges électriques déposées en surface et de démontrer leurs intérêts d'être exploités dans pas mal de domaines d'application. La mesure du potentiel de surface est un outil efficace pour évaluer la réponse des matériaux diélectriques à la charge d'espace. Son évaluation est faite par la mesure sans contact du déclin de potentiel de surface.

La compréhension des phénomènes liés à la génération de la charge d'espace et à son évolution ainsi qu'au comportement du diélectrique chargé permettra non seulement la prévention des risques électrostatiques, mais aussi l'amélioration des performances de ces matériaux.

Les mécanismes de génération, de conduction, de piégeage de la charge sont encore mal compris, La réalisation d'un plan d'expérience peut donner une vue plus précise de ce processus et de établir les conditions optimale.

Bibliographies

Bibliographies

- [1] Philippe Molinie. 2010. Recherches en électrostatique. Actualité d'une science ancienne et applications à la caractérisation des matériaux. Mémoire Habilitation à Diriger des Recherches, université-paris-sud 1, France.
- [2] Pr. Welter. Matériaux Diélectriques. Master Matériaux. Institut Le Bel, 9ème étage nord.
- [3] Amar Tilmatine. 2016. Synthèse sur la décharge à barrière diélectrique et ses applications. Thèse de doctorat. Université Sidi Bel Abbès, Algérie.
- [4] R. Fournié. 2010. Etude de l'influence de charge d'espace sur la dynamique des particules neutres dans une décharge point-plan. Mémoire de magister. Université Abou-Baker Belkaide, Tlemcen, Algérie.
- [5] Olivier Gallot-Lavallée. 2013. Dielectric Materials and Electrostatics. Series Editor Jean-Claude Sabonnadière. British Library Cataloguing-in-Publication Data A CIP record for this book is available from the British Library ISBN: 978-1-84821-604-4.
- [6] ASTM D1711 – 11a Standard Terminology Relating to Electrical Insulation/ Standard Insulating Materials Used in Electrical Engineering. Commercial Applications & Electrical Projects / By Kamalsinh V. Jadeja / Electrical Engineering] consulté le 26.02.2019.
- [7] Ourdia Hamadouche. 2008. Modélisation numérique du transport des charges dans les diélectriques soumis à un champ électrique extérieur. Mémoire de Magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.
- [8] M. Plopeanu, L. Dascalescu and B. Yahiaoui, "Repartition of Electric Potential at the Surface of Nonwoven Fabrics for air Filtration," IEEE Transactions. Industry Applications, vol. 48, no. 3, pp. 851-856, 2012.
- [9] Bounouioua R. 18 / 07 / 2006. Les effets de préparation sur les Propriétés diélectriques des céramiques du type BaTiO₃ + x % mole Fe₂O₃. Mémoire de magister. Université Mentouri, Constantine, Algérie
- [10] Nazir Jaber. 2015. Films Minces Combinatoires De BiFeO₃ –GaFeO₃ Déposés Par Ablation Laser Pulsée Propriétés Structurales, piézoélectriques et ferroélectriques. Thèse de doctorat. Université François-Rabelais De Tours, France.
- [11] N. Thallinger, « Emballage en non tisse », CNRT Emballage Conditionnement, fiche technique N° 27, 2005.
- [12] T. Hammi. 2005. Etude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour

Bibliographies

l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles. Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille.

[13] <http://www.eeeguide.com/dielectric-liquid>. Consulté le 28 avril à 16h

[14] Electrical4u.com/dielectric-gases

[15] R . Fournié. 1986. Les isolants en électrotechnique- concepts et théories. Préface ; Christian Rioux, Edition Eyrolles.

[17] Maurice Gerl., Jean-Paul,. 1997. « Physique des matériaux », Première édition.

[18] X. Meyza. 2003. Relations Microstructures – Comportement face à l'injection de charges – Rigidité diélectrique pour des alumines polycristallines – Effet de la température et du vieillissement thermique. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne.

[19] Imen Elloumi. 2016. Caractérisation Des Propriétés Diélectriques Du Bois Et Des Composites Bois-Polymère. Mémoire De La Maîtrise En Ingénierie, Université Du Québec En Abitibi-Témiscamingue.

[20] *Trésor de la langue française informatisé*, sur le site du Centre national de ressources textuelles et lexicales, consulté le 3 mars 2019.

[21] B. Pincent, D. Méline and J. Auriol, Measurement of the moisture content variation in non saturated, compacted clays, Geoconfine 93, Arnould, Barrès and Côme (eds), 1993

[22] J.P. Baron, La mesure de la teneur en eau par les méthodes nucléaires, Journées de Physique. L.C.P.C., 1987, pp.151-156.

[23] Med Abdelhafid Bouhamla. 2007. Caracterisation Des Materiaux De Construction Par Les Methodes Electriques Cas Des Inclusions Dans Les Pates Pures. Memoire De Magister. Universite Mantouri De Constantine., Algerie .

[24] R. Fournié, *Diélectriques: bases théoriques*, Technique de l'ingénieur (D2 I), D213

[25] A. Beroual, *Matériaux pour le génie électrique*, cours de DEA de génie électrique, Ecole Centrale de Lyon, France, 1996.

[26] J.C. Mage, *Origine des pertes dans les matériaux*, RGE, N°7 (Juin 1991), p.24.

[27] R. Coelho et B. Aladenize, „ Les diélectriques : propriétés diélectriques des matériaux isolants”, Ed. Hermès, 1993.

[28] Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides,Auteur(s) : Claude MENGUY ;Date de publication : 10 août 199]

[29] A. Chelkowski, *Fizyka dielektrykow*, PWN, Warszawa 1993.

Bibliographies

[30] BOUNOUIOUA R . 18 / 07 / 2006. Les Effets De Préparation Sur Les Propriétés Diélectriques Des Céramiques Du Type $\text{BaTiO}_3 + X \% \text{ Mole Fe}_2\text{O}_3$. MEMOIRE De Magister. Université Mentouri ,Constantine Algérie.

[31] Belaid Tabti. 2011. Contributions A La Caractérisation Des Filtres A Electret Par La Mesure Du Declin De Potentiel De Surface. These . Ecole Doctorale : Sciences Et Ingénierie En Matériaux, Mécanique, Energétique Et Aéronautique.

[32] E. David. (14/Avril/2011). *Igee-4453: Matériaux De Y Electrotechnique: Chapitre 4.2 Diélectriques*. Available: [Http://Wcours.Gel.Ulaval.ca/2006/A/21948/Default/5notes/Igee-403%20chap4_2%20edavid.Pdf](http://Wcours.Gel.Ulaval.ca/2006/A/21948/Default/5notes/Igee-403%20chap4_2%20edavid.Pdf)

[33] R. Fournie, *Les Isolants En Electrotechnique : Concepts Et Théories* «Collection De La Direction Des Études Et Recherches D'électricité De France». Paris: Eyrolles, 1986

[34] R. Gallay. (28/Juin/2011). *Matériaux De L'électrotechnique (Chapitre 4: Propriétés Diélectriques de la matière)*.

[Http://Www.Garmanage.Com/Atelier/Index.Cgi?Path=Public&B&Teaching&B&Epfl](http://Www.Garmanage.Com/Atelier/Index.Cgi?Path=Public&B&Teaching&B&Epfl).

Consulté le 13 avril a 10h

[35] R.Fournie, (Février 2000) *Diélectriques: Bases Théoriques, Les Techniques De L'ingénieur : D2300*. 18 Pages

[36] Amidou Betie .2012. Contribution A L'amélioration De L'interprétation Des Techniques De Diagnostic Des Transformateurs De Puissance Par Spectroscopie Diélectrique. Mémoire. En Ingénierie. L'université Du Québec À Chicoutimi. Canada

[37] A. Tilmatine, « Décharge Couronne », Ch. 04.

[38] Sébastien Boisseau. Récupération D'énergie Vibratoire A Electrets. Electronique. Université De Greno- Ble, 2011. Français. Tel-00644697v2

[39] Rouagdia Karim . 2015./Analyse De La Dynamique Des Charges A La Surface Des Polymères Isolants. Université 8 Mai 1945 Gulma.

[40] (R. S. Blacker et A. W. Birley 1991).

[41] (G. G. Raju 2003 ; C. Laurent 2008 ; R. Coelho et B. Aladenize 1999).

[42] (G. G. Raju 2003 ; C. Laurent 2008 ; A. I. Sviridenok et al. 1993).

[43] Ali Fatihou .2016. Amélioration Des Performances Des Matériaux Fibreux Non-Tissés Chargés Par Décharge Couronne Utilisés Pour La Filtration De L'air. Thèse Pour L'obtention

Bibliographies

Du Grade . Ecole Doctorale : Sciences Et Ingénierie En Matériaux, Mécanique, Energétique Et Aéronautique.France

[45] (K. C. Kao 2005 ; G. G. Raju 2003 et R. Coelho et B. Aladenize 1993).

[46] O.G. lavallée et al. 2003 ; G. Chen et al. 2007).

[47] (G. Chen et Y.L. Chong 2006 ; G. Chen, Y. L. Chong et M. Fu 2006)

[48] T. Hammi 2005 ; D.M. Taylor 2001 ; R. Bansal 2006).

[49] (R. S. Blacker et A. W. Birley 1991 ; K. L. Kaiser 2006 ; D.M. Taylor 2001 ; W.E. Vosteen 19987 ; M. Blitshteyn 1984).

[50] (R. S. Blacker, A. W. Birley 1991 ; D.M. Taylor 2001 ; R. Bansal 2006 ; W.E. Vosteen 1984; J. S. Charng et al. 1995 ; D. A. Hill et M. Kanda1999)

Résumé

ملخص

الهدف من هذا العمل هو التطوير التقني لحالة الشحن ، والمعاملات التي تسمح بتوصيف المواد العازلة عديدة ، وهناك خمس خصائص رئيسية تميز العوازل المستخدمة في الجهد العالي ، لا سيما السماحية العازلة ، والصلابة العازلة ، و عامل الخسارة ، التوصيل الكهربائي ، عادة ما تأتي ظاهرة الاستقطاب من اتجاه ثنائي القطب الكهربائي. تقييم الشحنات الفضائية للكتلة، موزعة على السطح وفي عمق المادة.

الكلمات الرئيسية

عازل ، وسائط ليفية غير منسوجة ، بوليمر ، حالة شحن عازل كهربائي ، إمكانات سطحية ، استقطاب ، خواص عازلة

Abstract

The objective of this work is the technical development of the state of charge, the parameters to characterize the dielectric materials are numerous, five main characterize the insulators used in high voltage including the dielectric permittivity, the dielectric strength, the factor The polarization phenomenon generally results from the orientation of an electric dipole.

The evaluation of the space charges of an electret, distributed in surface and in depth of the material.

KEYWORDS

Dielectric, Nonwoven fibrous media, Polymer, Electret, Electrical insulator charge state, Surface potential, Polarization, Dielectric properties

Résumé

L'objectif de ce travail est la mise au point technique de l'état de charge, Les paramètres permettant de caractériser les matériaux diélectriques sont nombreux, On a cinq principales caractérisent les isolants utilisés en haute tension notamment la permittivité diélectrique, la rigidité diélectrique, le facteur de pertes, la conductivité électrique, Le phénomène de polarisation provient en général de l'orientation d'un dipôle électrique.

L'évaluation des charges d'espace d'un électret, réparties en surface et en profondeur du matériau.

MOTS-CLÉS

Diélectrique, Media fibreux non tissé, Polymère, Electret, Etat de charge d'un isolant électrique, potentiel de surface, Polarisation, Propriétés diélectriques.