

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Électrotechnique**
Spécialité : **Réseaux Electriques**

Présenté par

Lydia LARBI
Hacène SEBBAK

Thème

Effet des décharges électriques glissantes sur les propriétés électrique et physicochimique d'un polymère isolant

Mémoire soutenu publiquement le 02/07/2024 devant le jury composé de :

Mme Faroudja MEGHERBI
Professeure, UMMTO, Présidente

M EI Hadi BELHITECHE
MCB, U. M'sila, Encadrant

M Farhat SLIMANI
MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués en vue de l'obtention du diplôme de Master académique en électrotechnique, Option : Réseaux électriques.

*Nous tenons à remercier notre encadreur Monsieur El Hadi BELHITECHE, **Maitre de conférences** à l'université de M'sila pour son soutien, ses conseils, ses directives, sa disponibilité qui nous a facilité les taches afin d'achever notre mémoire de fin d'études dans d'agréables circonstances.*

*Nous remercions sincèrement Madame F.MEGHERBI, **Professeure** à l'université de Tizi-Ouzou, d'avoir accepté aimablement, malgré son programme chargé, de présider le jury qui va examiner notre travail.*

*Nos remerciements vont également a Monsieur Ferhat SLIMANI, **Maitre de conférences** à l'université de Tizi-Ouzou d'avoir accepté de participer à ce jury, nous le remercions aussi pour ses conseil et son aide précieuse tout au long de ce travail.*

Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui
ont contribué de près ou de loin à
l'accomplissement de ce travail*

*A mes parents, pour leur amour et leur
confiance en moi qui m'a donnée la force de
préserver*

*A ma famille et mes amis pour leur soutien et
leur encouragement.*

*Vous avez été une source d'inspiration et de
motivation.*

Merci à tous. LYDIA

Dédicaces

*Je dédie ce travail à toutes les personnes ayant
aidé pour réaliser ce mémoire*

*A mes parents pour leur affection. Vous êtes la
source de ma motivation et de ma persévérance.*

*A mes frères et sœurs pour votre soutien
indéfectible, vos encouragements.*

*A mes amis qui m'ont aidé à accomplir et me
faciliter mon travail.*

*Merci à tous. **HACENE***

Figure I.1 : isolant haute tension en céramique.

Figure I.2 : Câble électrique 2 fils + terre avec isolant plastique.

Figure I.3 : pâte de tube de ruban électrique d'isolation liquide.

Fig. I.5 : Réaction de polymérisation de l'Éthylène.

Figure I.4 : Complexe tuyau + isolant

Figure I.6: Polymère à molécule linéaire

Figure I.7 : Homopolymère ramifiée (a) et copolymère ramifiée(b)

Figure I.8 : Polymère réticulé

Figure I.9 : Schéma d'un câble électrique isolé par un polymère

Figure 1.10: Différents types de polarisation moléculaire

Figure II.1 : Modèle d'une décharge le long de la surface de la silicone

Figure II.2 : représentation schématique du phénomène d'avalanche électronique dans l'espace inter-électrodes.

Figure II.3: types de décharges partielles selon la classification de Kreuger.

Figure II.4 : Les différentes géométries dans le cas de décharge couronne

Figure II.5 : Charge par influence

Figure II.6 : Décharge couronne positive

Fig. II.7 : Décharge couronne négative.

Fig. II.8 : Décharge couronne alternative

Figure II.9 : Système à décharges glissantes

Figure II.10 : Figure de Lichtenberg observée sur une interface verre/SF₆ pour une impulsion de tension de 30 kVx1μs sous une pression de 0,3 MPa.

Figure II.11 : Figures originales de Lichtenberg

Figure II.12 : Décharge à barrière diélectrique

Figure II.13 : Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 kV en polarité négative

Figure II.14 : Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 kV en polarité positive

Figure III.2 : Échantillon PRC

Figure III.3 : Cage de Faraday

Figure III.4 : Transformateur d'essai

Figure III.5 : Pupitre de commande

Figure III.6 : Support des électrodes

Figure III.7 : Dispositif expérimental

Figure III.8 : Décharge glissante avec intervalle d'air

Figure III.9 : Décharge glissante sans intervalle d'air

Figure III-10 : LCR mètre utilisé pour la caractérisation diélectrique

Figure III.11 : Montage expérimental utilisé pour la caractérisation diélectrique

Figure III.12 : Spectromètre Shimadzu IRAffinity-1S utilisé pour l'analyse FTIR

Figure IV.1 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence à une distance de 10mm

Figure IV.2 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps pour une distance de 10mm

Figure IV.3 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence à une distance de 5mm

Figure IV.4 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps à une distance de 5mm

Figure IV.5 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence à une distance de 0mm

Figure IV.6 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps à une distance de 0mm

Figure IV.7 : Variation de la permittivité en fonction de la fréquence à une distance de 10mm

Figure IV.8 : Variation de la permittivité en fonction du temps à une distance de 10mm

Figure IV.9 : Variation de la permittivité en fonction de la fréquence à une distance de 5mm

Figure IV.10 : Variation de la permittivité en fonction du temps à une distance de 5mm

Figure IV.11 : Variation de la permittivité en fonction de la fréquence à une distance de 0mm

Figure IV.12 : Variation de la permittivité en fonction du temps à une distance de 0mm

Figure IV.13 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction de la fréquence à une distance de 10mm

Figure IV.14 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction du temps à une distance de 10mm

Figure IV.15 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction de la fréquence à une distance de 5mm

Figure IV.16 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction du temps à une distance de 5mm

Figure IV.17 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction de la fréquence à une distance de 0mm

Figure IV.18 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction du temps à une distance de 0mm

Figure IV.19 : Spectres infrarouges du PRC avant vieillissement électrique

Figure IV.20 : Spectres infrarouges du PRC avant et après vieillissement électrique

Figure IV.21 : Différents pics des spectres infrarouges du PRC avant et après vieillissement électrique

ϵ_r : Permittivité relative

$\tan \delta$: Facteur de pertes diélectriques

ρ : Résistivité volumique

ζ : Conductivité électrique

λ : Longueur d'onde

d : Distance

E : Champ électrique

V : Tension

I : Courant

R : Résistance

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Listes des figures

Liste des Symboles

Sommaire

Introduction générale 01

Chapitre I : Généralités sur les polymères isolants

I.1 introduction	02
I.2. Définition	02
I.2.1 Isolant.....	02
I.2.2 Diélectrique	03
I.3 Différents types d'isolants.....	04
I.3.1 Selon leur origine.....	04
I.3.1 Selon leur état physique	04
I.3.1.2 Isolants gazeux.....	04
I.3.1.2 Isolants liquides	04
I.3.1.3 Isolants solides.....	05
I.4 Les polymères.....	05
I.4.1 Introduction	05
I.4.2 Historique	06
I.4.3 Définition des polymères	06
I.4.4 Types des polymères.....	07
I.4.4.1 Les homopolymères	07

I.4.4.2 Les copolymères	07
I.4.5 Classification des polymères	07
I.4.5.1 Selon l'origine	07
I.4.5.2 Selon les propriétés	07
I.4.5.3 Selon l'importance économique	08
I.4.6 Structure moléculaire des polymères	08
I.4.6.1 Polymères à molécules linéaires	08
I.4.6.2 Polymère à molécule ramifiées.....	09
I.4.6.3 Polymère à molécule réticulés.....	09
I.4.7 Utilisation des polymères dans les câbles électriques.....	10
I.4.8 Propriétés des polymères.....	11
I.4.8.1 Propriétés thermiques.....	11
I.4.8.2 Propriétés mécaniques.....	11
I.4.8.3 Propriétés physiques	12
I.4.8.4 Propriétés optiques.....	12
I.4.8.5 Propriétés chimiques	12
I.4.8.6 Propriétés électriques	12
I.4.8.6.1 Permittivité et polarisation dans les polymères	13
I.4.8.6.2 Rigidité diélectrique	14
I.4.8.6.3 Résistivité	14
I.4.8.6.4 Facteur de pertes diélectriques.....	15
I.5 Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).....	15
I.5.1 Définition.....	15
I.5.2 Structure	15
I.5.3 Principales caractéristiques du (PRC).....	15

I.5.4 Application du (PRC).....	15
I.5.5 Type de réticulation	16
I.5.6 Avantages et inconvénients de l'isolation en PRC.....	16
I.6 Conclusion.....	17

Chapitre II : les décharges électriques

II.1. Introduction.....	18
II.2. Historique sur l'étude scientifique des décharges électriques	18
II.3. Définition d'une décharge électrique	19
II.4. Origine de la décharge	19
II.5. Formation des décharges électriques.....	20
II.6. Types de décharges électriques	21
II.6.1. Décharges partielles.....	21
II.6.1.1. Définition d'une décharge partielle	21
II.6.1.2. Classification des décharges partielles	22
II.6.1.3. Conséquence des décharges partielles	23
II.6.1.4 Remèdes pour éviter les effets des décharges partielles	24
II.6.2. La décharge couronne	24
II.6.2.1. Définition	24
II.6.2.2. Charge par influence (induction).....	25
II.6.2.3. Décharge couronne positive	25
II.6.2.4. Décharge couronne négative	26
II.6.2.5. Décharge couronne alternative.....	27
II.6.3. Décharges glissantes.....	28
II.6.3.1. Définition	28
II.6.3.2. Décharges glissantes aux interfaces air/solide	29

II.6.3.3. Caractérisation optique des décharges glissantes	29
II.6.3.4. Les décharges à barrière diélectrique.....	30
II.7 Conclusion	31

Chapitre III : techniques expérimentales

III.1 Introduction.....	32
III.2 Présentation du matériau utilisé	32
III.3 Structure chimique du PRC	33
III.3 Dispositif et matériaux expérimentaux.....	33
III.3.1 Préparation des échantillons	33
III.3.2 Différents dispositifs du Laboratoire Haute tension	33
III.3.3 Déroulement des essais de vieillissement.....	36
III.4. Mesures des propriétés diélectriques.....	37
III.4.1 Mesure de la permittivité relative	38
III.4.2 Facteur de dissipation	39
III.4.3 Indice de pertes diélectriques ($\text{tg}(\delta)$).....	39
III.5 Caractérisation physico-chimique par FTIR.....	39
III.6 Conclusion	40

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction	41
IV.2 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement	41
IV.3 Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement.....	46
IV.4 Variation de l'indice de pertes diélectrique en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement.....	51

IV.5 Caractérisation physico-chimique.....	56
IV.5.1 La spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ATR-FTIR)	56
IV.5.2 Observation visuelle de la surface de l'isolant	59
IV.6 Conclusion.....	60
Conclusion générale	61

Références bibliographiques

Résumé

Introduction générale

Les avancées technologiques dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont entraîné une demande accrue pour des matériaux isolants de haute performance.

Les polymères se caractérisent par leurs excellentes propriétés isolantes, leur grande résistance aux attaques chimiques et leurs bonnes caractéristiques mécaniques [1]. Depuis 1940, le polyéthylène (PE) est le plus utilisé dans la fabrication de câbles de moyenne et haute tension en raison de son faible coût, sa très bonne rigidité diélectrique et ses pertes diélectriques minimales. Cependant avec l'arrivée de la nouvelle technologie des câbles 500 kV, le comportement thermique du PE à haute température et son caractère thermoplastique limitent son utilisation. C'est dans ce cadre que le polyéthylène réticulé chimiquement est devenu un produit de remplacement. Il présente des propriétés mécaniques et électriques plus performantes. Ces propriétés dépendent de la morphologie, de l'oxydation et des contaminations ou impuretés du polymère [2].

Cependant, un des principaux défis pour ces matériaux isolants est la dégradation causée par les décharges électriques. Ces décharges peuvent modifier les propriétés diélectriques et physico-chimiques des polymères, compromettant leur performance et leur durée de vie. L'objectif dans ce travail est l'étude des effets des décharges électriques sur les propriétés diélectriques et physicochimiques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

- Le premier chapitre comprend des généralités sur les polymères isolants.
- Le deuxième chapitre porte sur les décharges électriques notamment les décharges glissantes.
- Dans le troisième chapitre, nous expliquons les techniques expérimentales utilisées dans la caractérisation du PRC soumis à des décharges électriques glissantes.
- Dans le quatrième chapitre, nous donnerons les discussions des résultats obtenus.

Chapitre I : Généralité sur les polymères isolants

I.1 introduction

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux qui possèdent une résistivité très élevée, généralement de l'ordre de 10^8 à 10^{16} Ωm , [1] ce qui signifie qu'ils ont une faible conductivité électrique en raison de la faible présence d'électrons libres. Les isolants sont caractérisés par leurs propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne permet pas le passage de courant lorsqu'il est soumis à de faibles tensions, à moins d'être exposé à des champs électriques élevés ou à des facteurs ionisants externes qui peuvent altérer ses propriétés diélectriques.

Parmi les différents isolants utilisés pour l'isolation électrique, on trouve des matériaux tels que le verre, la céramique, le mica, ainsi que des diélectriques fluides. Les isolants sont utilisés dans plusieurs applications, notamment pour assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents, afin de guider le courant dans les conducteurs souhaités et de protéger les personnes et les équipements. Ils servent également à supporter les éléments d'un réseau électrique, les isolant les uns des autres et par rapport à la terre. De plus, les isolants peuvent remplir la fonction de diélectrique dans un condensateur.

L'objectif de ce chapitre est de donner des généralités sur les polymères et également de présenter le matériau polymère faisant l'objet de ce mémoire à savoir le Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).

I.2. Définition

I.2.1 Isolant

Un isolant est un matériau diélectrique d'une faible conductivité, utilisé pour isoler et empêcher le passage du courant électrique entre deux parties conductrices soumis à une différence de potentiel électrique, afin de protéger les utilisateurs contre les chocs électriques, et aussi les équipements électriques contre le risque de court-circuit [5].

Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques.



Fig I.1 : Isolant haute tension en céramique [5].

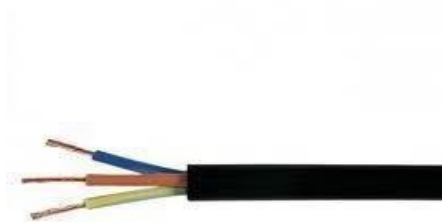


Fig I.2 : Câble électrique 2 fils + terre avec isolant plastique [5].

I.2.2 Diélectrique

Un diélectrique un matériau plus ou moins isolant (résistivité élevée, bande d'énergie interdite de quelques eV), polarisable, c'est-à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits). En d'autres termes un diélectrique peut être défini comme un milieu matériel dans lequel la bande de conduction est séparée de la bande de valence par une énergie supérieure à 5 eV. Dans la pratique technologique la différence entre isolant et diélectrique ne découle pas de propriétés différentes mais de l'angle sous lequel est vu le problème. C'est ainsi que lorsque le souci d'empêcher un contact galvanique est important nous parlerons d'isolant, par contre lorsque notre intérêt est focalisé sur les propriétés découlant de la polarisation ou de la permittivité plus ou moins accentuée nous invoquons le terme diélectrique.

Enfin, compte tenu de ce que vient d'être dit, les mots isolant et diélectrique peuvent être considérés comme étant des synonymes [6].

I.3 Différents types d'isolants

I.3.1 Selon leur origine

Selon leur origine on en distingue deux types, les isolants naturels et les isolants synthétiques. Ce type concerne les matières plastiques et les composites.

I.3.1 Selon leur état physique

Les isolants électriques sont classés en trois grandes catégories : les isolants solides, liquides et gazeux. Ce type d'isolants concerne les isolants minéraux et certains isolants organiques naturels.

I.3.1.2 Isolants gazeux

Dans le domaine de la haute tension, il est courant d'utiliser des gaz comme diélectriques, que ce soit pour les lignes aériennes ou les disjoncteurs. Le développement de la technique d'isolation gazeuse a joué un rôle majeur dans l'industrie en réponse à l'augmentation des tensions et des courants utilisés dans les grands réseaux de distribution [7].

I.3.1.2 Isolants liquides

Les isolants liquides sont couramment utilisés dans l'isolation des machines électriques, car ils remplissent non seulement un rôle d'isolation, mais également de refroidissement. L'huile minérale est l'un des isolants liquides les plus utilisés dans les équipements électriques tels que les transformateurs de grande puissance et les condensateurs. Cependant, il convient de noter que les huiles minérales sont inflammables à des températures proches de 150 degrés Celsius [7].



Fig I.3 : pâte de tube de ruban électrique d'isolation liquide [7].

I.3.1.3 Isolants solides

Les isolants solides sont essentiels pour assurer l'isolation électrique à haute tension et offrir une rigidité mécanique aux équipements électriques. Les premiers isolants solides utilisés étaient des matériaux naturels tels que le bois sec, le soufre, l'ambre et le caoutchouc [8].

Parmi les isolants solides, on trouve maintenant les polymères, qui offrent une grande variété d'options en raison de leur flexibilité et de leur capacité à être façonnés. Cependant, les polymères peuvent présenter des inconvénients tels qu'une faible résistance thermique, une sensibilité à l'humidité et une dégradation sous l'effet des rayonnements UV ou des contraintes mécaniques, ce qui peut affecter leurs propriétés électriques.



Fig I.4 : Complexe tuyau + isolant[8].

I.4 Les polymères

I.4.1 Introduction

Les polymères jouent un rôle essentiel dans le domaine de l'électrotechnique, en particulier pour l'isolation électrique et le stockage d'énergie. Leur utilisation est répandue en raison de leurs qualités inspirées, de leur variabilité en termes de propriétés, de leurs conditions de mise en œuvre et de leurs considérations économiques.

Le développement et la découverte de nouveaux polymères sont des domaines de recherche et développement essentiels. Les polymères sont des macromolécules formées d'unités monomères liées entre elles par des liaisons covalentes. Leurs propriétés peuvent être adaptées pour répondre à des besoins spécifiques, ce qui en fait des matériaux très polyvalents. Les polymères sont largement utilisés dans divers domaines, tels que

l'isolation électrique, la fabrication de films pour condensateurs, d'isolants de câbles et de connecteurs, de supports et substrats pour les circuits imprimés, de matériaux pour les transformateurs et les bobines, ainsi que de matériaux pour les batteries et les supercondensateurs.

L'objectif de ce chapitre est de donner des généralités sur les polymères et également les définitions des différentes structures de ces derniers. Nous allons aussi classer les polymères selon leur caractéristique.

I.4.2 Historique

Le terme polymère est introduit en 1832 par Berzelius, les premiers polymères synthétiques identifiés sont certains polyesters (1847), le celluloïd (1869), la galalithe (1895). Le XXe siècle voit se succéder les découvertes et les commercialisations : plexiglas (1902), Bakélite (1909), buna (caoutchouc synthétique, 1911), polystyrène (PS, 1930), polychlorure de vinyle (PVC, 1931), nylon 6,6 (1938).

Depuis 1945, il ya une véritable explosion de la chimie et de la physique des Polymères, toute sorte de nouveaux polymères voyant le jour, La production mondiale a atteint les 100Mt/an en 1995 et elle double tous les cinq ans. Le père de la chimie des macromolécules est Hermann Staudinger qui a imposé ce concept en 1924 par l'étude des macromolécules naturelles (soie, cellulose, caoutchouc) et a ouvert la voie aux recherches sur les polymères synthétiques.

En 2000, la production mondiale des polymères (caoutchoucs compris) a été d'environ 151 millions de tonnes alors qu'en 2003 elle atteignait 190 millions de tonnes. En 2007, cette production a augmenté à 260 millions de tonnes [9]. La consommation de ces matériaux ne va cesser de croître comme en témoignent les perspectives, qui estiment que ces chiffres vont doubler 10 fois durant la 1iermoitie du 2éme siècle [10].

I.4.3 Définition

Le mot « polymère » vient du grec « poly » signifiant plusieurs et « meros » parties ou unités. En effet, un matériau macromoléculaire ou polymère est constitué de longues chaines où les unités de répétition sont toutes les mêmes (homopolymère) ou de nature différente (copolymère). La cohésion des atomes sur une même chaine est assurée par des liaisons chimiques fortes, tandis que les liaisons inter--chaines sont plus faibles. La présence de liaisons faibles et fortes apporte aux matériaux polymères des propriétés physico-chimiques particulières [11].

L'exemple suivant présente la formation du polyéthylène par polymérisation des monomères de l'éthylène.



Fig. I.5 : Réaction de polymérisation de l'Ethylène.

I.4.4 Types des polymères

Il existe deux types de polymères :

I.4.4.1 Les homopolymères

Sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, autrement dit un seul monomère utilisé parmi les homopolymères on peut citer le polyéthylène [12].

I.4.4.2 Les copolymères

Sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, c'est-à-dire deux ou plusieurs monomères utilisés. Comme les homogènes, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles [12].

I.4.5 Classification des polymères

Les polymères peuvent être classés selon divers critères qui ne s'excluent pas les uns des autres. On peut classer les polymères en trois groupes :

I.4.5.1 Selon l'origine

- **Les polymères naturels** : on est entouré de polymères naturels, tels que la cellulose, le caoutchouc et les résines.
- **Les polymères artificiels** : Dérivés des polymères naturels : nitrate et acétate de cellulose, ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre) [13].
- **Les polymères synthétiques** : Produits dans des réactions de polymérisation en chaîne ou de polycondensation.

I.4.5.2 Selon les propriétés

Une des propriétés mise en cause est l'influence d'une élévation de température. Une autre est le comportement élastique. Il en résulte qu'on distingue trois grandes familles : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères [13].

- **Les thermoplastiques** : sont malléables et fusibles à température élevée. Les plus courant sont le polyéthylène, le plexiglas, les textiles de type nylon. Chauffés, ces plastiques fondent, se vaporisent et brûlent [14].
- **Les thermodurcissables** : se solidifient à température élevée et gardent leur forme lorsque celle-ci décroît. Les plus utilisés sont le polyuréthane, les résines phénoliques. Exposés la chaleur, ces plastiques, ne fondent pas ; ils se décomposent en dégageant des produits volatiles accompagnés de résidus carbonisés [14].
- **Les élastomères** : ils comprennent, le caoutchouc naturel, le caoutchouc synthétique et le caoutchouc de silicone. Tous doivent subir dans leur préparation une vulcanisation qui a pour but de diminuer leur plasticité et d'augmenter leur élasticité. Les caoutchoucs synthétiques sont en général plus résistants au vieillissement et plus imperméables aux gaz et à la vapeur d'eau. Ils résistent mieux aux solvants et leur composition est plus constante [15].

I.4.5.3 Selon l'importance économique

Pour les polymères comme pour tout produit industriel, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux :

- Les polymères de grande diffusion, dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Exemples : Polyéthylène (PE), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polychlorure de vinyle (PVC).
- Les polymères à hautes performances, dont le volume des ventes est le plus faible et les prix sont les plus élevés.
- Les polymères techniques, dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes. Exemples : polyamides (PA), polyéthylène téréphtalate (PET) [12].

I.4.6 Structure moléculaire des polymères

Les procédés modernes utilisés pour la synthèse des polymères permettent de leur conférer des structures variées [16].

I.4.6.1 Polymères à molécules linéaires

Les macromolécules sont formées de joint bout à bout en chaîne simples (**figure I.5**) comme exemple de tel polymère ; nous pouvons citer : le polyéthylène(PE), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS)...

Les molécules linéaires peuvent être flexibles et souples ; elles sont souvent enchevêtrées et forment des nœuds physiques de réticulation qui peuvent disparaître soit par élévation de la température soit sous contrainte mécanique.

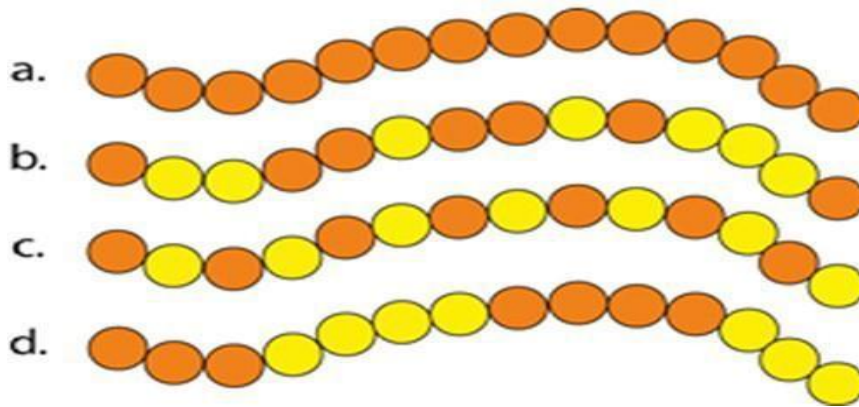


Fig. I.6: Polymère à molécule linéaire [16]

I.4.6.2 Polymère à molécule ramifiées

Ils se caractérisent par la présence de branche latérales, c'est-à-dire d'autres petites molécules identiques branchées latéralement sur le squelette de la chaîne principale, ce sont les ramifications (figure I.6)

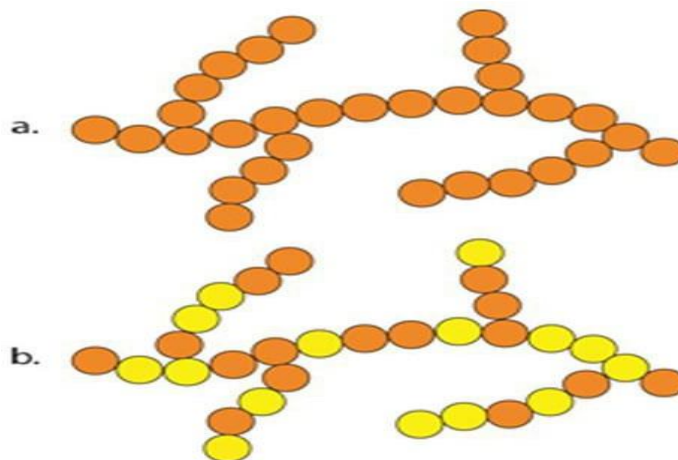


Fig. I.7 : Homopolymère ramifiée (a) et copolymère ramifiée(b) [16]

I.4.6.3 Polymère à molécule réticulées

On peut construire un réseau tridimensionnel de macromolécules en les reliant chimiquement entre elles. Le point de jonction entre deux chaînes est appelé le nœud de réticulation (nœud chimique) ; ces polymères sont dit réticulés, ce sont en générale les élastomères et les thermodurcissables. (Figure I.7)

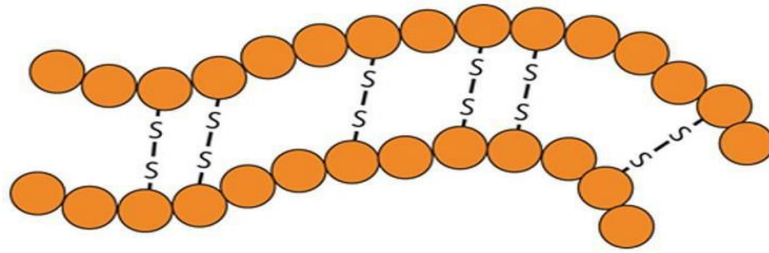


Fig. I.8 : Polymère réticulé [16]

I.4.7 Utilisation des polymères dans les câbles électriques

L'utilisation des polymères dans les câbles électriques a connu une évolution significative au fil du temps. Dans les années soixante-dix, l'utilisation de papier imprégné d'huile sous pression pour l'isolation des câbles de puissance à basse tension a permis de transporter l'électricité sous haute tension. Cependant, cette méthode présentait des inconvénients tels que des coûts d'entretien élevés et la nécessité d'une surveillance constante des lignes, ce qui limitait son utilisation à grande échelle.

Cependant, grâce aux avancées dans la fabrication des polymères capables de résister à des champs électriques intenses, ainsi qu'à l'utilisation d'une méthode d'extrusion combinant des polymères et des écrans semi-conducteurs, le procédé à base de papier imprégné a été définitivement remplacé. Cette nouvelle approche permet une isolation plus efficace des câbles électriques, réduisant ainsi les coûts d'entretien et améliorant la fiabilité du système.

(Figure I.8)

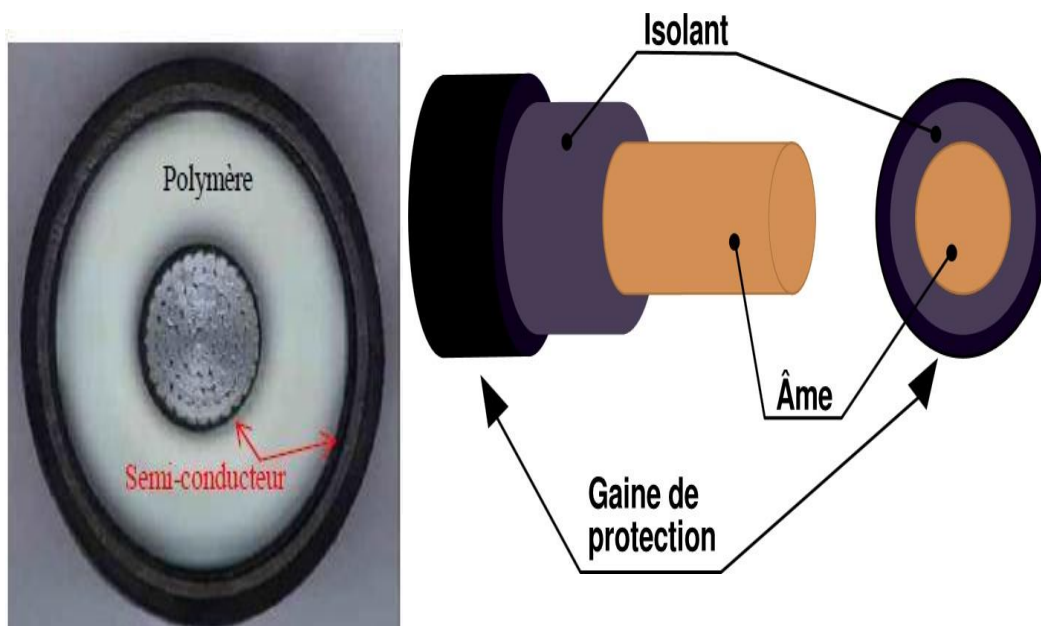


Fig I.9 : Schéma d'un câble électrique isolé par un polymère [16]

I.4.8 Propriétés des polymères

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est :

Masse volumique : La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion.

En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs aux matériaux métalliques.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone).

I.4.8.1 Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des polymères sont, comme les métaux, reliées au coefficient de dilatation linéique et la conductivité thermique. Le coefficient de dilatation linéique est fonction du type de liaisons qui assurent la cohésion de l'ensemble des atomes ou des molécules du matériau, et il est autant plus élevé que l'intensité des liaisons et plus faible. Cette caractéristique rend les matières plastiques intéressantes quand on les utilise comme isolants thermiques (notamment sous forme de mousse) [17].

I.4.8.2 Propriétés mécaniques

La rigidité des polymères n'est pas due à la cohésion qui existe entre tous les atomes constitutifs du matériau ; elle résulte plutôt des interactions secondaires entre les macromolécules que sont les chaînes. Par conséquent, on ne peut plus relier directement le module d'élasticité des polymères à l'énergie de cohésion du matériau, à moins de considérer cette dernière comme l'énergie qui existe dans un ensemble de macromolécules et non pas dans un ensemble d'ions ou d'atomes [18].

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent éventuellement de la masse molaire et de la cristallinité, parmi lesquelles nous pouvons citer [18] :

- La résistance à la traction variant de 9 à 23 MPa ;
- L'allongement à la rupture variant de 150% à 1000% ;

Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500 MPa

I.4.8.3 Propriétés physiques

Les propriétés physiques des matériaux polymères sont une moyenne de celle des composants quand il s'agit de la masse volumique. Pour le reste, ces matériaux sont souvent inhomogène et il n'ya pas de règle d'addition pour prévoir les propriétés à partir de celles des composants [18].

I.4.8.4 Propriétés optiques

La propriété optique d'intérêt pour la lumière visible est la transparence, c'est-à-dire l'absence de diffusion et d'absorption dans le visible. Certains groupes chimiques absorbent la lumière et une coloration apparait. Elle passe du jaune au rouge à mesure que la longueur d'onde absorbée croit. L'indice de réfraction dépend de la nature des atomes et des liaisons qui les relient. Comme pour tous les produits organiques, on peut calculer par addition d'incrémentes la réfraction moléculaire R [19].

$$R = (n^2 - 1) M / (n^2 + 2) d \quad (\text{I.1})$$

Avec :

n : indice de réfraction.

M : la masse molaire (de l'ensemble).

D : la masse volumique.

I.4.8.5 Propriétés chimiques

Le comportement chimique des polymères dépend de leur accessibilité aux agents extérieurs. Sous la chaleur, les thermoplastiques fondent et les thermodurcissable peuvent se décomposer sans fondre mais en émettant des vapeurs ou des liquides inflammables [19]. C'est la nature chimique du polymère et sa réticulation qui prédominent pour la résistance aux agressions chimiques à la température et au gonflement par les solvants.

I.4.8.6 Propriétés électriques

Les matières plastiques ont une résistivité très élevée (entre 10^{15} à $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$) et constituent par conséquent d'excellents isolants électriques. Cette résistivité peut varier, en surface surtout, avec la prise d'humidité [19]. Les variations du champ électrique alternatif provoquent des mouvements moléculaires et une consommation d'énergie transformée en chaleur et qui se traduit par une perte diélectrique qui dépend de la fréquence élevée sans perforation (claquage).

I.4.8.6.1 Permittivité et polarisation dans les polymères

La permittivité d'un matériau est sa capacité intrinsèque à répondre à un champ électrique. Elle est une propriété importante des matériaux diélectriques tels que le polyéthylène. La permittivité peut être représentée par une valeur scalaire ou complexe. Dans le cas du vide, on parle de permittivité du vide (ϵ_0). Pour les matériaux autres que le vide, tels que les polymères, on utilise la permittivité relative (ϵ_r). Le produit de ces deux valeurs donne la permittivité absolue du matériau diélectrique ($\epsilon = \epsilon_0 * \epsilon_r$).

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

Lorsqu'un champ électrique est appliqué à un matériau, les molécules qui possèdent un moment dipolaire ou une liaison hétéro-atomique réagissent en déformant les charges électriques qu'elles contiennent. Ce phénomène est appelé polarisation et il est causé par l'alignement des moments dipolaires à l'intérieur du matériau. La polarisation peut influencer la mobilité des chaînes polymériques, augmenter leur rigidité et avoir un impact sur des propriétés telles que la température de transition vitreuse, la cristallisation et l'élasticité. On distingue quatre types de polarisation moléculaire : la polarisation électronique, atomique, d'orientation et inter faciale.

Le polyéthylène est généralement considéré comme un polymère apolaire, ce qui signifie qu'il présente une faible polarité [20].

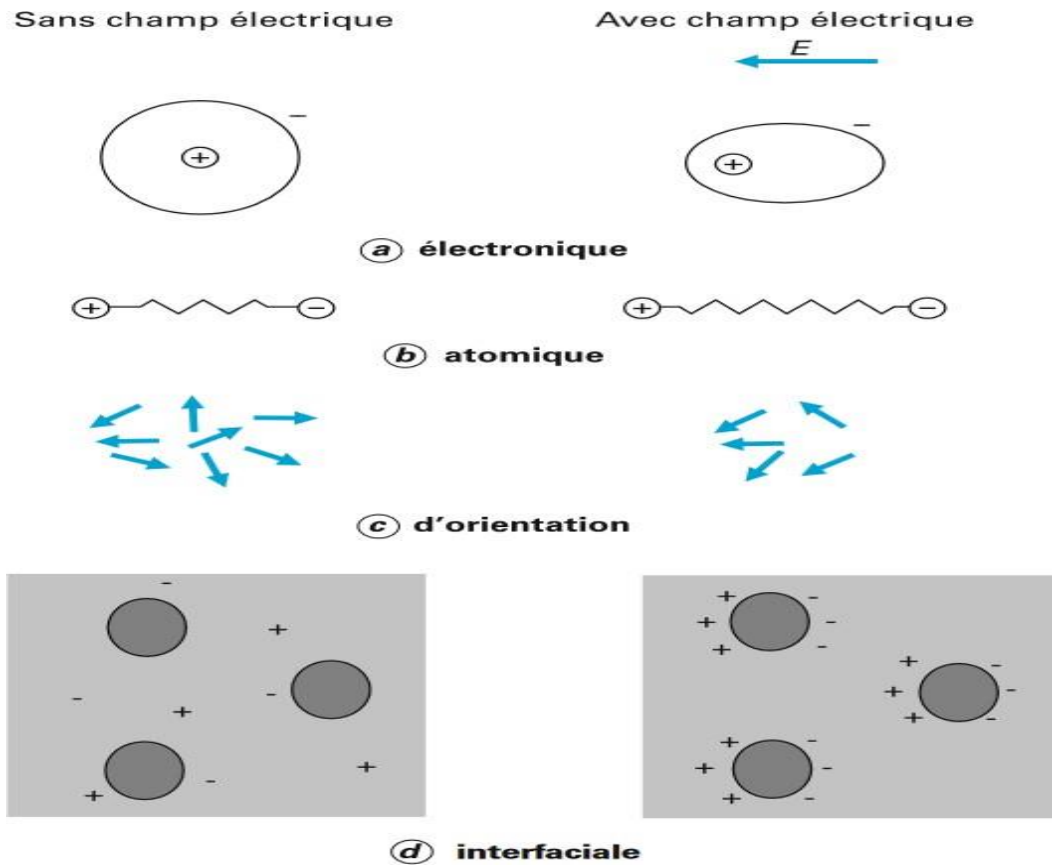


Fig 1.10: Différents types de polarisation moléculaire [20]

I.4.8.6.2 Rigidité diélectrique

La capacité d'un matériau à résister à une contrainte électrique sans subir de dommages est appelée rigidité diélectrique. Cette propriété est essentielle pour les matériaux isolants et est exprimée en kV/mm. La rigidité diélectrique est définie comme le rapport entre la tension (U) à laquelle surviennent la rupture et l'épaisseur du matériau.

$$G = \frac{U}{d} \quad [I.2]$$

Avec :

U : tension de claquage en KV

d : distance inter-électrode

G : Rigidité diélectrique KV/mm

La rigidité diélectrique dépend de :

- La fréquence, la forme et la durée d'application.
- La température, la pression et l'humidité de l'atmosphère.
- La présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité, ...etc.) [21].

I.4.8.6.3 Résistivité

Elle s'exprime en Ohm mètre ($\Omega.m$), selon l'échelle de résistivité, chaque matériaux isolant possède une résistance selon leur usage, la résistivité des polymères isolant est comprise entre $10^6 \Omega.m$ et $10^{16} \Omega.m$ [21].

I.4.8.6.4 Facteur de pertes diélectriques

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

Les pertes diélectriques sont représentées par le facteur de pertes $\tan \delta$.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (I.3)$$

L'angle de pertes caractérise la qualité d'un isolant. En pratique, le facteur de pertes $\tan \delta$ varie entre 10^{-2} et 10^{-4}

I.5 Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)

I.5.1 Définition

Le polyéthylène réticulé chimiquement, également connu sous le nom de PE-X ou polyéthylène réticulé, est une forme de polyéthylène chimiquement modifiée qui améliore ses propriétés mécaniques et physiques grâce à une liaison covalente [22].

I.5.2 Structure

Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) se caractérise par des chaînes polymères croisées, améliorant ses propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. Sa structureréseau offre une résistance à la chaleur, à la pression et aux UV, ce qui en fait l'idéal pour diverses

I.5.3 Principales caractéristiques du (PRC)

- Résistance accrue à la température, à la traction, à la déformation et à la fissuration sous tension
- Meilleure stabilité dimensionnelle
- Rétention de ses propriétés sur une plage de température plus large
- Excellente résistance chimique et aux agents environnementaux
- Facilité d'utilisation et de mise en œuvre

I.5.4 Application du (PRC)

- Tuyauterie pour le chauffage et la plomberie
- Canalisations d'eau potable
- Câbles électriques
- Réservoirs de stockage de produits chimiques
- Pièces automobiles

I.5.5 Type de réticulation :

Le polyéthylène basse(PEBD) densité est réticulé par trois différentes techniques [23] :

a) Par irradiation

La réticulation par irradiation Bêta est un processus chimique, où l'échantillon est simplement sujet à une dose d'électrons de haute énergie pendant un temps correspondant à une dose calculée pour le degré nécessaire de réticulation. Celle-ci se passe à la température ambiante et à l'état solide.

b) Par peroxyde

La réticulation par le peroxyde est la technique la plus utilisée ces dernières années où le polyéthylène basse densité réticulé par le peroxyde est devenu le matériau isolant le plus dominant pour les câbles électriques à moyen et haut voltage

c) Par addition de silane

La réticulation par les silanes est l'une des plus importantes techniques de réticulation.

Elle a été introduite en 1968 à travers le processus de Sioplas. Le PRS est généralement utilisé pour l'isolation des câbles électriques à bas voltage. L'utilisation du polyéthylène réticulé par le silane se développe pour l'isolation des câbles à haute tension [23].

I.5.6 Avantages et inconvénients de l'isolation en PRC.

a-Avantage :

- Pertes diélectriques extrêmement faibles et quasi indépendantes de la température,
- Bonnes étanchéités à l'eau.
- Fortes résistances d'isolement.
- Bonnes conductivités thermiques.
- Hautes rigidités diélectriques.
- Température de fonctionnement élevée (90°C en service normal).
- Bonnes tenues en court-circuit (à 250°C).

b-Inconvénients :

- Coût plus élevé.
- Difficultés d'installation.
- Risque de dommages en cas de perforation.
- Potentiel de combustibilité.
- Recyclage plus complexe.

I.6 Conclusion :

Ce chapitre a mis en lumière l'importance des isolants et des diélectriques dans le domaine de l'électrotechnique, en mettant en avant les différents types d'isolants selon leur origine et leur état physique. Il a également exploré en profondeur le monde des polymères, en décrivant leur structure moléculaire, leur classification, leur histoire et leurs diverses propriétés.

Les polymères jouent un rôle essentiel dans de nombreux secteurs tels que l'électrotechnique, l'automobile, l'ingénierie, l'aéronautique et le bâtiment, offrant des solutions innovantes et polyvalentes. Leur utilisation dans les câbles électriques a évolué pour offrir une meilleure isolation et une fiabilité accrue.

Enfin, des exemples de polymères couramment utilisés ont été présentés, mettant en avant leurs structures, propriétés et applications spécifiques. Les polymères continuent de jouer un rôle crucial dans notre vie quotidienne, offrant des solutions durables et efficaces dans de nombreux domaines.

Chapitre II : Décharges électriques

II.1. Introduction

Dans le domaine de l'électrotechnique des polymères, les décharges électriques se produisent généralement dans les isolants polymères utilisés pour l'isolation électrique des câbles, des transformateurs, des condensateurs, etc. Ces isolants sont soumis à des tensions élevées et peuvent être exposés à des surtensions transitoires, des champs électriques intenses et d'autres conditions qui peuvent entraîner des décharges électriques.

La compréhension des mécanismes des décharges électriques dans les polymères repose sur des études expérimentales, des modèles théoriques et des simulations numériques. Ces approches permettent d'analyser les phénomènes physiques associés aux décharges électriques, tels que la propagation des charges, les gradients de champ électrique, les effets thermiques, etc.

L'application d'un champ électrique suffisamment élevé à un diélectrique donne la possibilité d'avoir, par ionisation partielle du milieu, un courant dont la valeur dépend de celle du champ appliqué. Dans ce chapitre nous étudions les différents types de décharges électriques (partielle, arborescente), ainsi que les décharges de surface.

Les décharges glissantes se caractérisent par le déplacement de la zone de décharge le long d'une surface diélectrique, ce qui leur confère des propriétés uniques en termes de formation, de propagation et de contrôle du plasma. Leur comportement est influencé par de nombreux facteurs, tels que la géométrie du système, la nature du gaz, la tension appliquée et les propriétés du diélectrique. [24]

II.2. Historique sur l'étude scientifique des décharges électriques

De nombreux travaux ont été consacrés à la physique de la décharge électrique dans les gaz. Ces travaux ont permis d'éclaircir les mécanismes fondamentaux des décharges électriques aussi bien au niveau microscopique que macroscopique. L'étude scientifique des décharges a commencé au XVIII^{ème} siècle par l'observation expérimentale d'étincelles produites par des générateurs électrostatiques et des éclairs d'orages. Ensuite l'invention de piles suffisamment puissantes a permis à V.V. Petrov de produire le premier arc électrique en 1803 dans l'air. Humphrey Davy en fit ensuite l'étude. Mais ce fut Michael Faraday qui, entre 1831 et 1835, découvrit et commença l'étude des décharges lumineuses en utilisant des tubes contenant des gaz à une pression de l'ordre de 100 Pa sous 1000 Volt. Par la suite, à la fin du XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème} siècle, la physique des décharges électriques dans les gaz a permis à la physique atomique de faire ses premiers progrès avec

les travaux de William Crookes et de Thomson, avec en particulier la mise en évidence du rôle fondamental des électrons dans la décharge. Vers 1900, un élève de Thomson, Townsend, réalisa la première modélisation d'une décharge, correspondant au cas de la décharge luminescente en champ uniforme [25].

II.3. Définition d'une décharge électrique

Une décharge électrique se produit lorsqu'un courant électrique traverse un isolant. C'est un phénomène qui se produit lorsque la charge d'un élément ou d'un composant électrique est brusquement libérée sous l'effet d'un potentiel électrique. Cette libération s'accompagne souvent de réactions chimiques qui donnent naissance à des espèces transportées par différents mécanismes. L'apparition de ces décharges dépend du type d'isolant utilisé ainsi que des conditions de service telles que la pression et la tension appliquées [26,27].

Le phénomène de décharges électriques est très complexe, notamment pour les décharges qui s'étendent avec discontinuité, vu le changement du mécanisme de leur propagation [28]. C'est un phénomène non désiré chez les industriels, mais utile dans le cas de la recherche notamment en électrotechnique. On utilise, par exemple, les décharges partielles comme technique de diagnostic afin de déceler d'éventuels défauts dans un appareil notamment au niveau du système d'isolation électrique [29].

II.4. Origine de la décharge

Plusieurs facteurs, parmi lesquels on peut citer les rayons UV, les rayons γ , la faible pression atmosphérique, la haute température et la pluie, sont à l'origine de l'apparition des décharges surfaciques [30].

Le déplacement des électrons le long d'une surface ionise cette dernière, ce qui induit l'émission d'électrons secondaires à la surface de l'isolant, laissant derrière eux des charges positives qui entraînent la désorption des gaz adsorbés, comme le montre la figure(Fig. II.1) schématisant une expérience réalisée sur un échantillon de silicone.

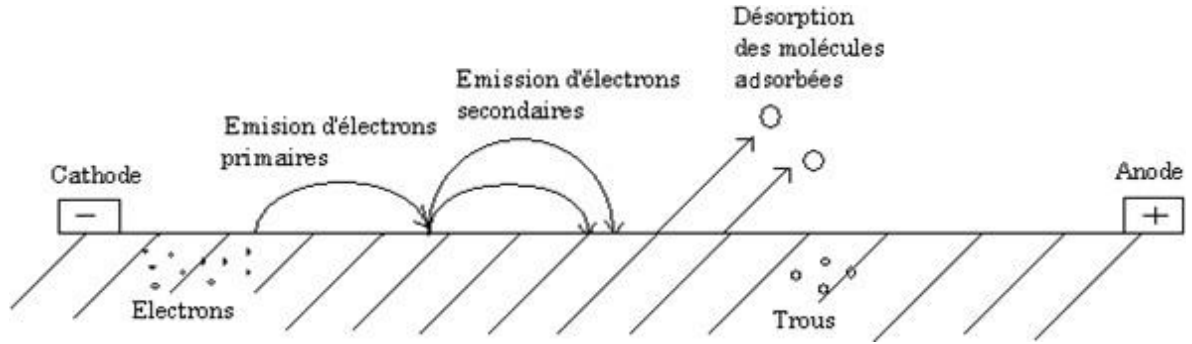


Fig. II.1 : Modèle d'une décharge le long de la surface de la silicose [30].

Les ions provenant de la surface ou de l'atmosphère peuvent être accélérés suite à l'application d'un champ électrique. Ces ions peuvent se combiner avec les électrons pour émettre une grande énergie photonique.

Pour toute surface isolante, la décharge prend naissance dans la région proche d'une électrode et se dirige vers l'électrode opposée. La vitesse de propagation de cette décharge dépend des conditions et de la forme de l'onde [31].

II.5. Formation des décharges électriques

Lorsqu'un gaz est présent entre deux électrodes planes conductrices soumises à une différence de potentiel, un électron situé dans cette zone est accéléré par le champ électrique. Il peut acquérir suffisamment d'énergie pour ioniser une particule neutre par collision. Chaque électron créé par ce processus d'ionisation contribue à son tour à la création d'autres électrons et de nouvelles molécules ionisées lors de leur déplacement vers l'anode. La succession de ces phénomènes d'ionisation primaire génère une avalanche électronique qui est à l'origine d'une décharge électrique [32,33].

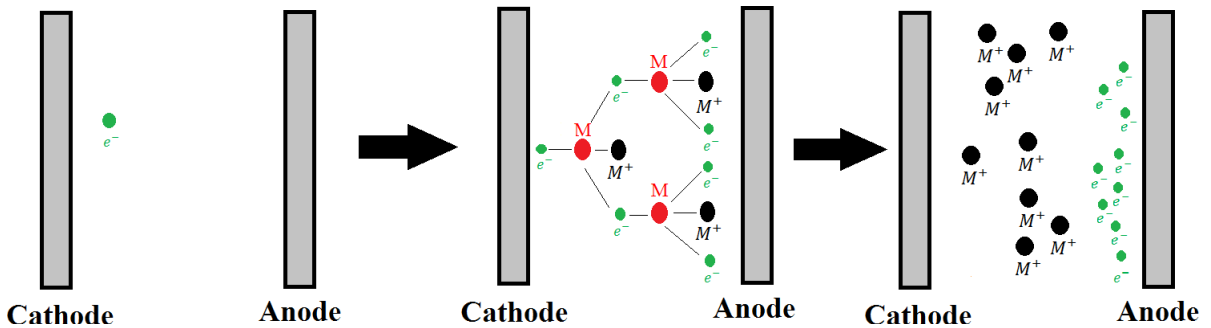


Fig. II.2 : représentation schématique du phénomène d'avalanche électronique dans l'espace inter-électrodes.

Cependant, les électrons produits uniquement par les collisions ionisantes ne sont pas suffisamment nombreux pour maintenir la décharge, ce qui nécessite un renouvellement des électrons d'amorçage à la fin de l'avalanche. Un autre phénomène intervient simultanément, connu sous le nom de phénomène d'émission secondaire. En effet, les ions créés pendant l'avalanche à proximité de la cathode sont accélérés vers celle-ci par le champ électrique, et s'ils ont une énergie cinétique supérieure à l'énergie de désorption des électrons du matériau de la cathode, ils peuvent provoquer l'émission d'électrons lorsqu'ils entrent en collision avec le métal. Ces électrons nouvellement émis serviront alors de nouvelle source d'électrons d'amorçage [34,32].

II.6. Types de décharges électriques

Les polymères sont fréquemment exposés à divers types de décharges électriques, notamment les décharges partielles, les décharges internes, les décharges de couronnes et les décharges surfaciques.

II.6.1. Décharges partielles

II.6.1.1. Définition d'une décharge partielle

Selon la norme IEC 60270, une décharge partielle est une décharge électrique localisée qui ne traverse qu'en partie un isolant situé entre deux électrodes.

Les décharges partielles se produisent généralement dans une cavité gazeuse présente à l'intérieur de l'isolant. En raison de la permittivité du gaz, qui est beaucoup plus faible que celle du matériau environnant, un champ électrique beaucoup plus intense se forme aux bornes de la cavité. Si ce champ dépasse la rigidité diélectrique du gaz présent dans la cavité, une décharge partielle se produit.

Lorsque le dispositif est alimenté en tension alternative, les décharges partielles successives vont progressivement détériorer l'isolant solide, d'abord à la surface de la cavité, puis en profondeur, ce qui peut éventuellement conduire à une défaillance complète du diélectrique. La présence ou l'absence de décharges partielles peut être surveillée à l'aide de méthodes de détection, aussi bien pendant la fabrication que, dans certaines conditions, pendant la mise en service de l'installation [35].

II.6.1.2. Classification des décharges partielles

Parmi les diverses classifications des décharges partielles, Kreuger a développé une méthode qui classe les décharges en fonction de leur localisation et de l'amplitude de la charge qu'elles injectent [36]. Cette méthode a permis de définir quatre principaux types de décharges :

- **Les décharges "internes"** : elles se produisent dans des zones spécifiques où la résistance diélectrique du matériau est faible, généralement dans des bulles d'air à l'intérieur d'un isolant solide.
- **Les décharges "de surface"** : elles surviennent lorsque un isolant solide est en contact avec un gaz isolant et se développent à la surface de l'isolant solide. Elles se déclenchent au niveau d'un "point triple" (interface gaz/métal/isolant solide) en raison du renforcement local du champ électrique.
- **Les décharges "couronnes"** : elles se produisent dans des situations où le champ électrique est fortement hétérogène, notamment en présence d'un système pointe/plan, où le champ électrique est très élevé au niveau de la pointe et beaucoup plus faible au niveau du plan. La décharge se développe dans une zone restreinte de l'espace gazeux. Ces décharges sont également appelées décharges corona.
- **Les arborescences** : la décharge se forme dans une zone d'affaiblissement de l'isolation et se propage ensuite dans l'isolant en formant des structures arborescentes. Les ramifications de ces structures sont le siège de décharges [37].

La figure II.3 sont représentés ces 4 types de décharges partielles :

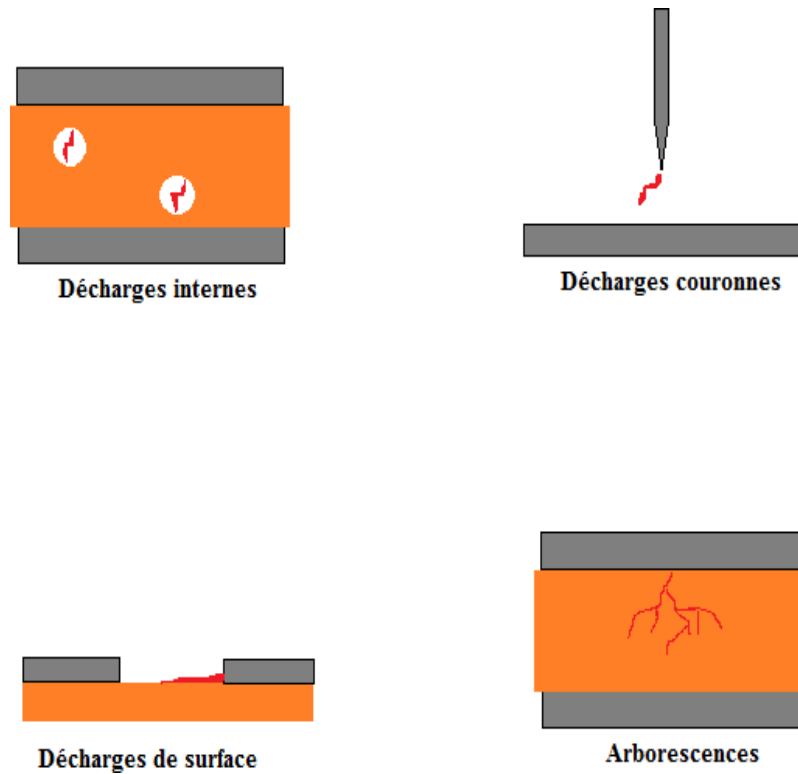


Fig. II.3: types de décharges partielles selon la classification de Kreuger [39]

Certains auteurs se restreignent à la classification en trois types de décharges partielles selon Kreuger à savoir les décharges de surface, les décharges dans un volume et les décharges couronnes [38], tandis que d'autres préfèrent utiliser une classification plus détaillée proposée par le groupe de travail du CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques), comprenant 13 catégories distinctes [39].

II.6.1.3. Conséquence des décharges partielles

Les décharges partielles entraînent plusieurs conséquences néfastes sur les matériaux, résultant de différentes contraintes : [40]

- **Contrainte thermique** : Les décharges partielles génèrent localement une augmentation de la température, pouvant provoquer la dégradation de l'isolant, se manifestant par un farinage puis une carbonisation.
- **Contrainte chimique** : Les produits de dégradation générés par les décharges partielles, tels que l'ozone, les oxydes d'azote et l'acide nitrique, peuvent entraîner des réactions chimiques nocives pour l'isolant.

- Érosion mécanique : Les espèces chargées émises par les décharges partielles peuvent bombarder l'isolant, provoquant une érosion mécanique. De plus, les attaques acides résultant des produits de dégradation contribuent également à l'érosion.

Ces contraintes conduisent à une dégradation de l'isolant, affectant les parties soumises à des tensions élevées. Lorsque l'isolant est trop endommagé, cela peut entraîner un amorçage, c'est-à-dire la formation d'un arc électrique entre deux phases ou entre une phase et le neutre. Dans ces situations, le matériel est souvent endommagé de manière irréversible, entraînant une défaillance du système.

II.6.1.4 Remèdes pour éviter les effets des décharges partielles

Pour prévenir la destruction des appareils électriques due aux décharges partielles, plusieurs mesures peuvent être prises :

- Utilisation de l'analyse des décharges partielles et de dispositifs de surveillance pour détecter et prévenir les décharges.
- Une conception minutieuse et une sélection appropriée des matériaux peuvent contribuer à éviter les décharges partielles.
- Les fabricants doivent intégrer des détecteurs de décharges partielles à toutes les étapes de production.
- Des bilans périodiques sont nécessaires pour prévenir les surprises désagréables liées aux décharges partielles.
- Une analyse approfondie des décharges partielles est essentielle pour garantir le bon fonctionnement à long terme des équipements haute tension [41].

II.6.2. La décharge couronne

II.6.2.1. Définition

La décharge couronne est une méthode simple et fiable pour déposer des charges positives ou négatives en fonction de la polarité du système de décharge. Dans le cas de la décharge couronne, le processus physique qui conduit à la production d'espaces réactifs et à leur dispersion est la décharge couronne est une méthode simple et fiable pour déposer des charges positives ou négatives. Elle utilise un système de décharge pour générer des espaces réactifs qui se dispersent. Cette méthode peut être appliquée à différentes configurations, telles que pointe-plan, fil-plan, fil-cylindre, pointe-plan et plan-plan [42].

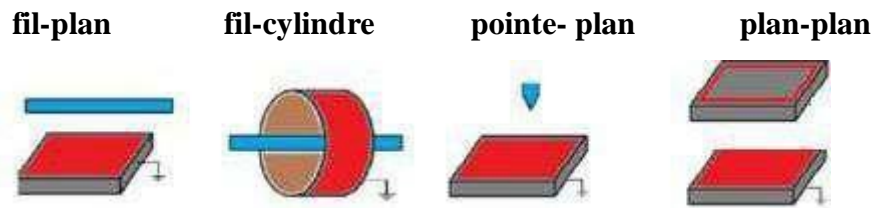


Fig. II.4 : Les différentes géométries dans le cas de décharge couronne [42]

II.6.2.2. Charge par influence (induction)

La charge par influence, également appelée électrisation par influence, se produit lorsque deux matériaux chargés électriquement sont rapprochés sans contact direct. Lorsque ces matériaux se rapprochent, les charges à l'intérieur du matériau approché s'orientent et/ou se déplacent, même s'il est électriquement neutre dans son ensemble. Les charges de signes opposés (+ et -) s'attirent, tandis que les charges de même signe (+ et +, ou - et -) se repoussent en vertu de l'interaction électrostatique régie par la loi de Coulomb.

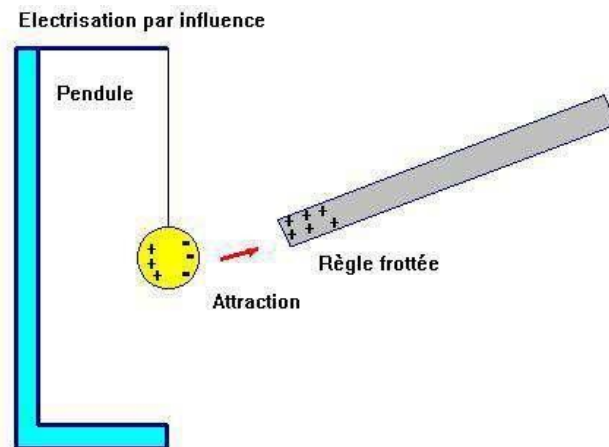


Fig. II.5 : Charge par influence [43]

II.6.2.3. Décharge couronne positive

Lorsque l'électrode active d'une configuration pointe-plan est alimentée positivement, une décharge continue positive, également appelée décharge couronne positive, se produit. Dans cette configuration, le champ électrique est plus intense à la périphérie de l'anode. Des électrons sont produits par des chocs électroniques et sont accélérés, attirés vers la pointe. Autour de la pointe, une région de forte ionisation se forme (représentée par une zone en pointillé). Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode en raison des forces de Coulomb, jusqu'à une certaine distance de la pointe

(Inférieure à un millimètre). Au-delà de cette distance, le champ électrique devient trop faible ($< 30 \text{ kV/cm}$ dans l'air à pression atmosphérique) pour permettre la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent alors vers la cathode (le plan). Cette région, où se trouvent uniquement des ions positifs, est appelée région de "dérive".

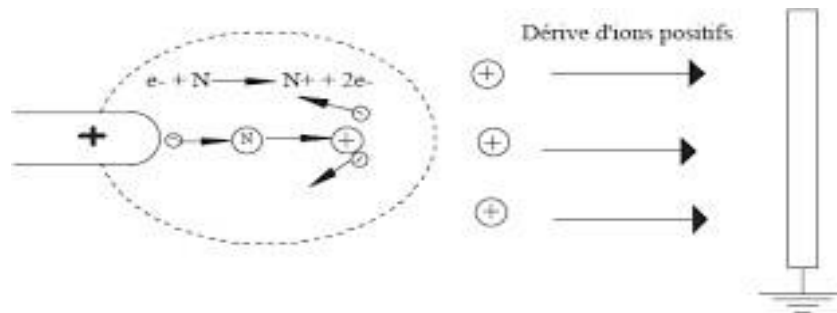


Fig. II.6 : Décharge couronne positive [43]

II.6.2.4. Décharge couronne négative

Dans la décharge couronne négative, l'électrode de polarité négative est constituée par une pointe reliée à une source haute tension, tandis que l'isolant avec une face arrière métallisée est mis à la masse et positionné sous la pointe. Cette configuration présente deux avantages : elle génère des champs électriques intenses au niveau de la pointe et la zone de génération de la décharge est limitée au voisinage de la pointe, ce qui réduit le risque de claquage. En conséquence, des avalanches électroniques se produisent près de la pointe.

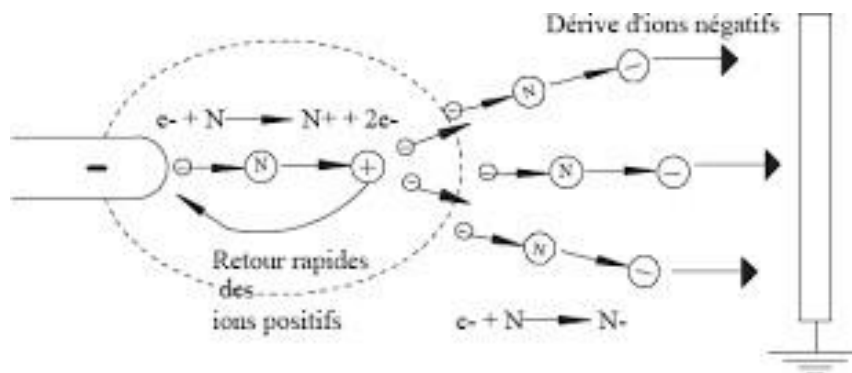


Fig. II.7 : Décharge couronne négative.

Les électrons créés par la décharge couronne négative atteignent une région où le champ électrique est plus faible. Ils perdent alors leur énergie et sont capturés par les atomes ou les molécules neutres du milieu, formant ainsi une charge d'espace composée

d'ions négatifs. Sous l'influence du champ électrique, ces ions sont balayés vers la surface de l'isolant à travers une grille répartitrice. Cette grille permet de répartir uniformément la charge sur la surface de l'isolant. Plus la charge est transférée à la surface de l'isolant, plus la différence de potentiel entre la sonde électrostatique et la surface de l'isolant augmente.

Le transfert de charge sur la surface du matériau isolant peut-être ajusté en modifiant la distance entre la pointe et la surface de l'isolant ou en variant la tension appliquée à la pointe. De plus, on peut fixer un potentiel sur la grille répartitrice pour déterminer la valeur initiale du potentiel sur le matériau. Le champ électrique près de la pointe est directement proportionnel à cette distance.

La configuration pointe-plan présente deux avantages importants. Premièrement, elle permet de générer des champs électriques très intenses au niveau de la pointe (plusieurs MV/cm) pour des tensions modérées (quelques kV). Deuxièmement, étant donné que la région de champ intense est localisée près de la pointe, la génération de porteurs de charge est limitée au voisinage de la pointe, ce qui réduit le risque de claquage.

En utilisant la répartition de charges sur la surface du matériau isolant, nous pouvons ensuite passer à la phase de mesure en utilisant un voltmètre électrostatique [36].

II.6.2.5. Décharge couronne alternative

L'effet de couronne en tension alternative résulte de la combinaison des deux polarités. Cependant, c'est l'apparence lumineuse de l'alternance positive, appelé streamers, qui prédomine. Lorsqu'une tension suffisante est appliquée pour créer un seuil de décharge couronne, l'espace entre les électrodes se divise en deux régions distinctes.

La première région, située près de l'électrode présentant un rayon de courbure faible, est caractérisée par un champ électrique intense. C'est dans cette zone active que se produit l'ionisation du gaz. Les électrons libres sont accélérés par le champ électrique, entraînant des collisions avec les atomes neutres ou les molécules. Cela conduit à une multiplication électronique par avalanche.

Le reste de l'espace entre les électrodes constitue la deuxième région, où le champ électrique est faible. Cette zone correspond à la zone de dérive. Dans cette région, les électrons ne peuvent pas se multiplier, mais les ions créés par les collisions se dirigent vers l'électrode plane (ou présentant un rayon de courbure élevé) sous l'effet du faible champ électrique. Ainsi, une charge d'espace monopolaire se forme dans cette zone.

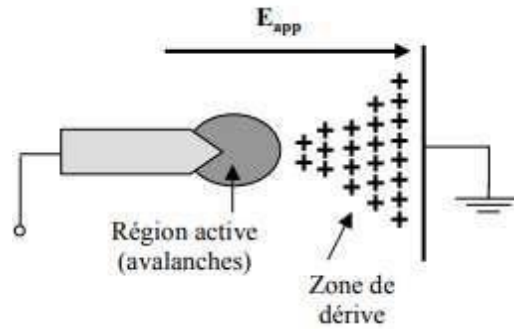


Fig. II.8 : Décharge couronne alternative [42]

II.6.3. Décharges glissantes

II.6.3.1. Définition

Une décharge glissante dans laquelle les deux électrodes sont en contact avec une surface diélectrique solide. La décharge est générée et se développe dans le gaz tout en maintenant un contact superficiel avec le solide isolant sur lequel la décharge se propage.

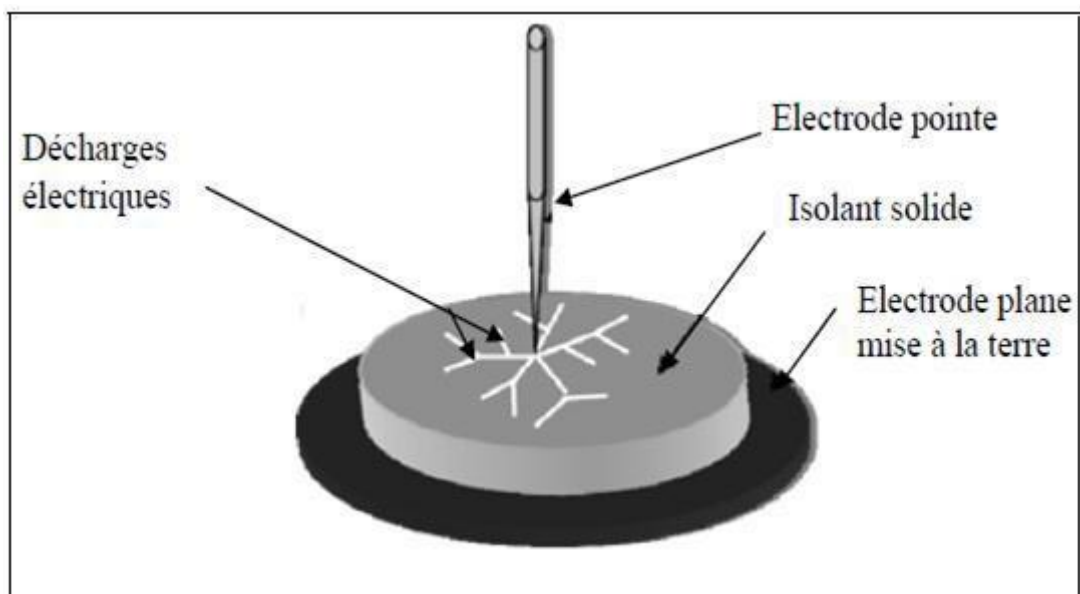


Fig. II.9 : Système à décharges glissantes[44].

Les décharges peuvent se propager à la surface d'un diélectrique solide et le contourner lorsque l'épaisseur du solide est suffisamment importante pour empêcher une perforation volumique ou lorsque ce dernier sert de barrière dans l'entrefer. En se propageant, ces décharges pénètrent profondément dans la surface solide et laissent des

traces telles que des canaux de ramification de petit diamètre, souvent appelés « motifs de Lichtenberg ». Ces chiffres proviennent toujours d'un côté de l'électrode pointue. [44]

II.6.3.2. Décharges glissantes aux interfaces air/solide

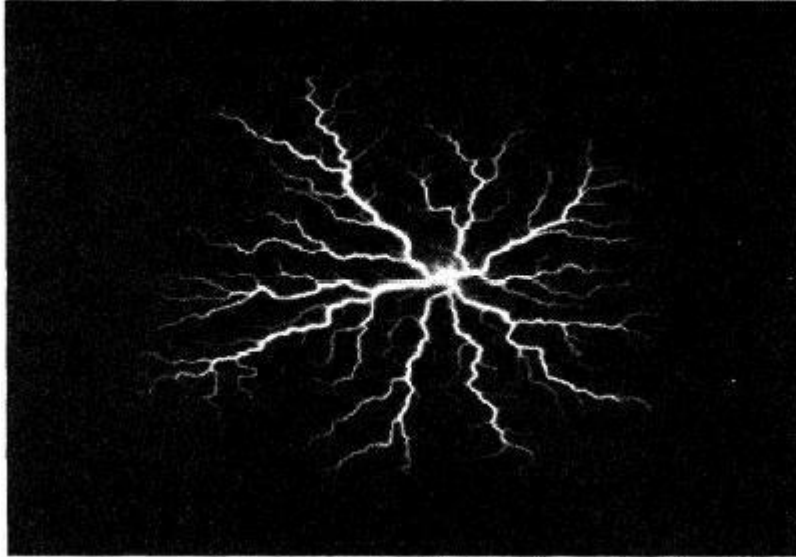


Fig. II.10 : Figure de Lichtenberg observée sur une interface verre/SF6 pour une impulsion de tension de $30 \text{ kV} \times 1 \mu\text{s}$ sous une pression de 0,3 MPa. [45]

Les décharges peuvent se propager à la surface d'un diélectrique solide et le contourner lorsque l'épaisseur du solide est suffisamment importante pour empêcher une perforation volumique ou lorsque ce dernier sert de barrière dans l'entrefer. En se propageant, ces décharges peuvent pénétrer profondément dans la surface solide et laisser des traces, telles que des canaux de ramification de petit diamètre, dont la forme globale est connue sous le nom de « diagramme de Lichtenberg » (Fig. III.11).

Ces chiffres proviennent toujours d'un côté de l'électrode pointue. [44]

II.6.3.3. Caractérisation optique des décharges glissantes

La décharge de surface a été découverte en 1777 lorsque Lichtenberg a accidentellement découvert la formation de petits motifs de poudre sur une surface chargée (Fig.III.3). Ces figures dites de Lichtenberg sont également connues sous le nom de figures en poudre. Ils intéressent beaucoup de nombreux physiciens, non seulement parce que leurs diverses formes offrent l'une des plus belles merveilles de la nature, mais aussi parce qu'ils ont été les pionniers de la découverte des décharges électriques et parce qu'ils sont capables de prendre des dimensions fractales [45].

Pedersen a été le premier à étudier les diagrammes dits de Lichtenberg, où des photographies étaient utilisées pour étudier les surtensions dans les lignes de transmission isolées au gaz.

Merrill et Hippel ont proposé une explication physique de son mécanisme de formation basée sur la théorie moderne des décharges gazeuses.

De nombreux chercheurs utilisent ensuite cette technique pour caractériser les décharges superficielles (ou glissantes). Plusieurs tentatives pour expliquer ces phénomènes de décharge ont également été proposées.

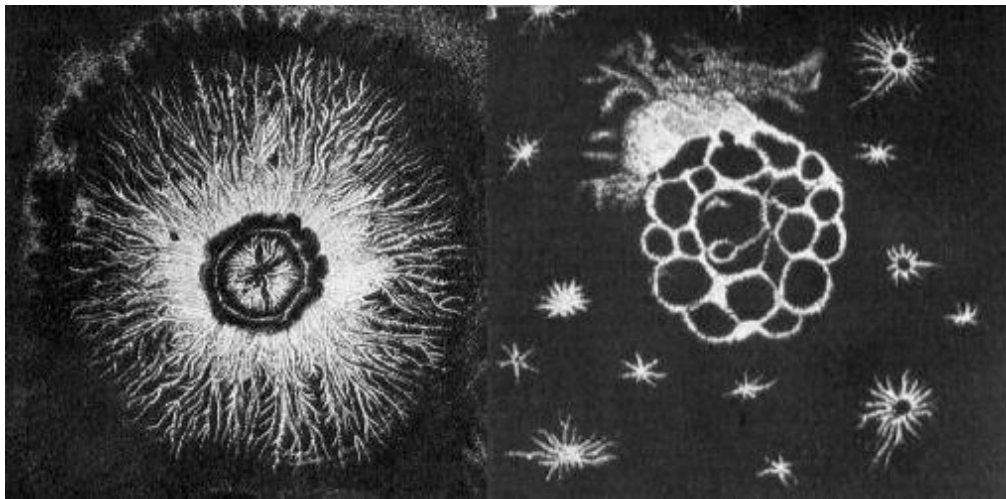


Fig. II.11 : Figures originales de Lichtenberg [45].

II.6.3.4. Les décharges à barrière diélectrique

Toute forme de décharge appelée décharge à barrière diélectrique (DBD) est caractérisée par la présence d'un diélectrique sur l'une ou les deux électrodes. Il peut être fabriqué en utilisant du verre, de la céramique, de l'alumine ou une matière polymère telle que le PVC. Dans ce type de décharge, en général, l'une des deux électrodes est connectée à la terre, l'autre à l'alimentation électrique. Dans une configuration diélectrique simple, le diélectrique est supporté par l'électrode reliée à la terre, comme illustré dans la figure II.12.

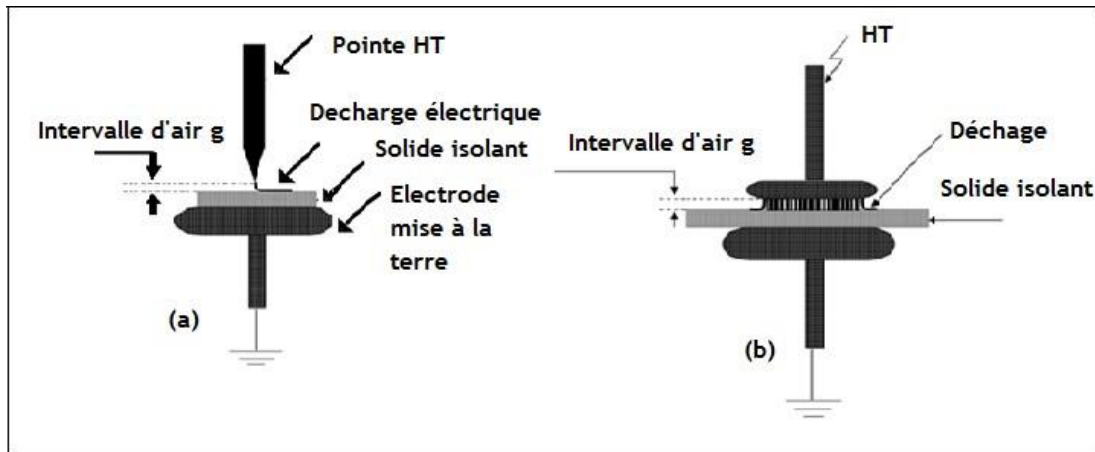


Fig. II.12 : Décharge à barrière diélectrique [45]

Dans la décharge à barrière diélectrique (Fig. III. 9) ou les isolants gazeux et solides sont habituellement en série entre les deux électrodes, la décharge se forme d'abord dans le volume du gaz avant de se propager sur la surface du solide.

II.7 Conclusion

En conclusion, les décharges électriques dans les polymères sont des phénomènes complexes qui nécessitent une compréhension approfondie pour assurer la fiabilité et la sécurité des systèmes électrotechniques.

Les différentes formes de décharges, telles que les décharges partielles, les décharges de surface, les décharges couronnes et les décharges glissantes, présentent des mécanismes distincts et des conséquences néfastes sur les matériaux isolants.

La classification des décharges, les méthodes de prévention et les études sur leur formation et leur propagation sont essentielles pour garantir le bon fonctionnement des équipements électriques à haute tension. Les recherches et les études menées sur les décharges électriques dans les polymères contribuent à améliorer la conception, la fabrication et la maintenance des systèmes électrotechniques basés sur ces matériaux.

Chapitre III : Techniques expérimentales

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier l'effet des décharges électriques glissantes sur les propriétés électrique et physicochimique du polyéthylène réticulé chimiquement. Pour ce faire, des travaux expérimentaux ont été réalisés au niveau du Laboratoire de Haute-tension de l'université de Tizi-Ouzou. Après une première étape consistant à faire un vieillissement électrique du PRC sous une tension alternative de 12kV, 50Hz pendant 2h,4h,6h, 8h et 10h pour différentes distances de 10 mm,5 mm et 0 mm.

Une seconde étape sera dédiée à la caractérisation diélectrique (mesure de la permittivité, le facteur de pertes diélectriques et l'indice de pertes diélectriques) et à l'analyse physicochimique par la technique de la spectroscopie infrarouge à transformé de fourrier (FTIR-ATR) des échantillons avant et après vieillissement sous décharges électriques.

III.2 Présentation du matériau utilisé :

En utilisant le PRC comme matériau pour l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique en haute tension, de nombreuses caractéristiques ont été considérablement améliorées, que ce soit en ce qui concerne la production ou l'exploitation. Parmi ces progrès, les plus remarquables sont :

Propriétés	Normes	Valeurs
Constante diélectrique	IEC 60250	2.3
Densité volumique	//	500-600 Kg/m ³
Rigidité diélectrique (50Hz)	IEC 60243	>22kV/mm
Facteur de pertes (50Hz)	IEC 60250	0.0003
Résistivité volumique sous DC	IEC 60093	10 ¹⁵ ohm.cm
Résistance à la traction (250mm/min) ²	ISO527	>17 Mpa
Allongement à la rupture (250mm/min) ²	ISO527	>450%
Allongement à chaud HST (200 ⁰ ,0.2Mpa)	IEC 60811-2-1	75%

Tableau III.1 : Les caractéristiques du PRC utilisé.

III.3 Structure chimique du PRC

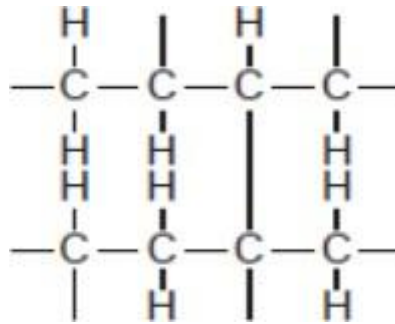


Fig III.1 : Structure chimique du PRC

III.3 Dispositif et matériaux expérimentaux :

III.3.1 Préparation des échantillons :

Les échantillons du PRC en forme de carrée de 3 cm× 3 cm et 2 mm d'épaisseur ont été utilisés dans nos essais. Ces échantillons ont été spécialement conçus pour la recherche par l'entreprise ENICAB de Biskra, comme illustré dans la figure III.2.



Fig III.2 : échantillon PRC

III.3.2 Différents dispositifs du Laboratoire Haute tension :

Le vieillissement électrique du PRC fait au niveau du Laboratoire de haute tension au niveau du département d'électrotechnique de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, qui est équipé d'une cage de faraday, un pupitre de commande, une cellule de mesure constituée de deux électrodes planes et un transformateur d'essai dont les caractéristiques sont les suivantes :

$U=100\text{ kV}$; $f=50\text{ Hz}$; $S=10\text{ kVA}$.



Fig III.3 : Cage de Faraday

- 1) Cage de Faraday
- 2) Transformateur
- 3) Pupitre de commande



Fig III.4 : Transformateur d'essai

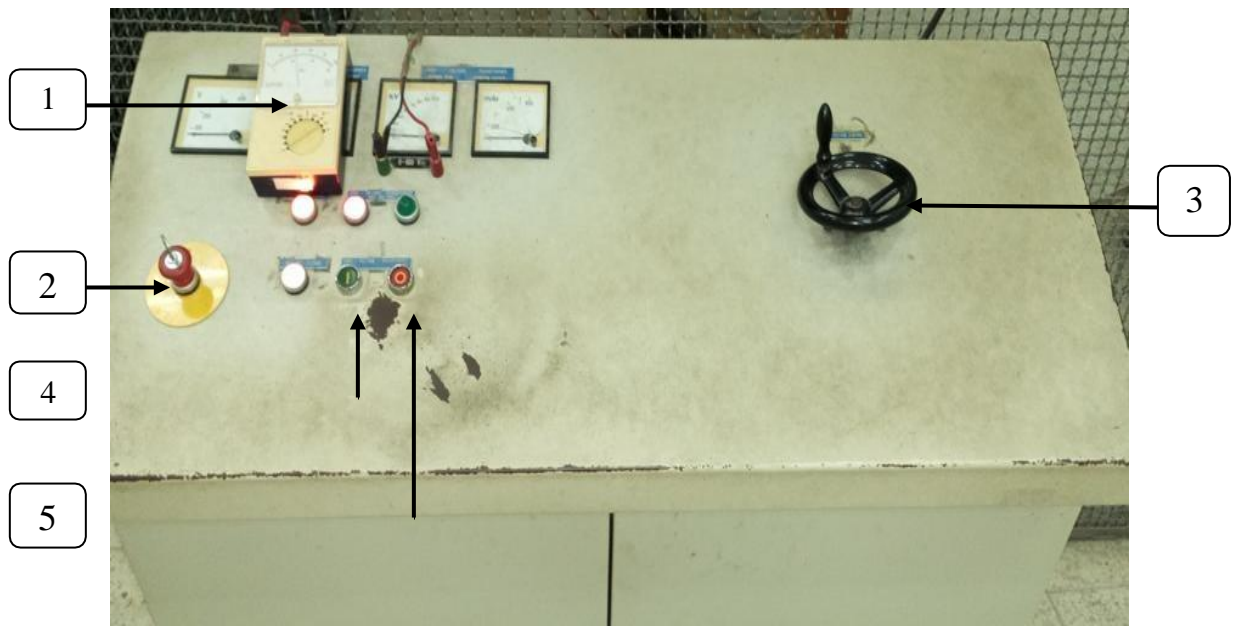


Fig III.5: Pupitre de commande.

- 1) Voltmètre
- 2) Bouton d'arrêt d'urgence
- 3) Curseur de variateur de tension
- 4) Bouton de marche
- 5) Bouton d'arrêt

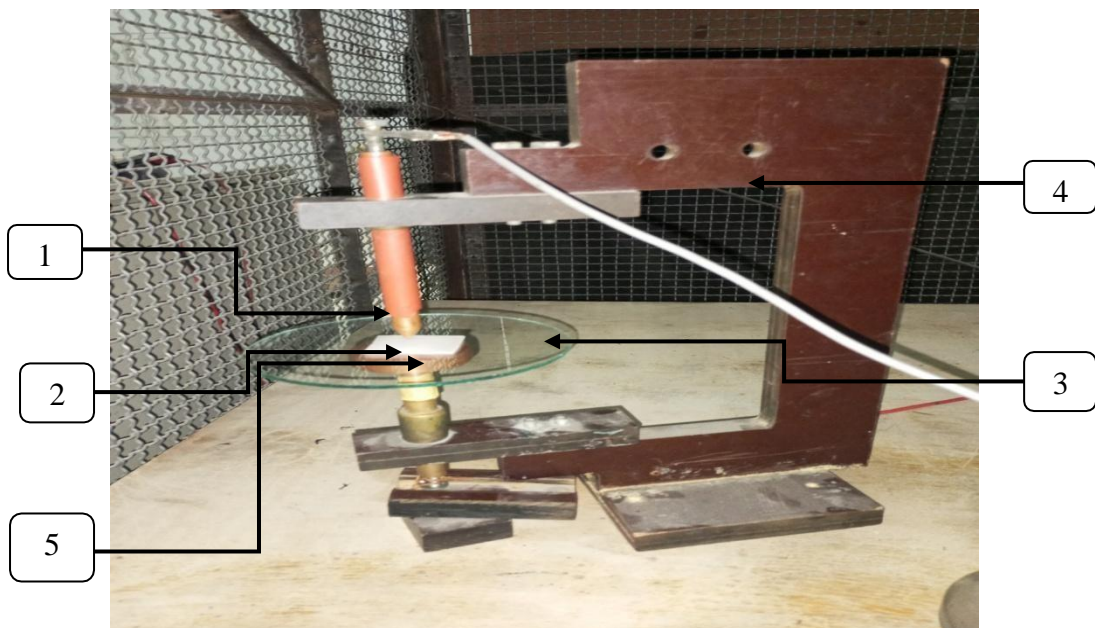


Fig III.6: Support des électrodes

- 1) Pointe HT
- 2) Isolant solide : PRC
- 3) Verre
- 4) Support d'électrode
- 5) Electrode plane mise à la terre

III.3.3 Déroulement des essais de vieillissement :

Les éprouvettes sont placées entre deux électrodes pointe-plan pour obtenir le vieillissement électrique du PRC.

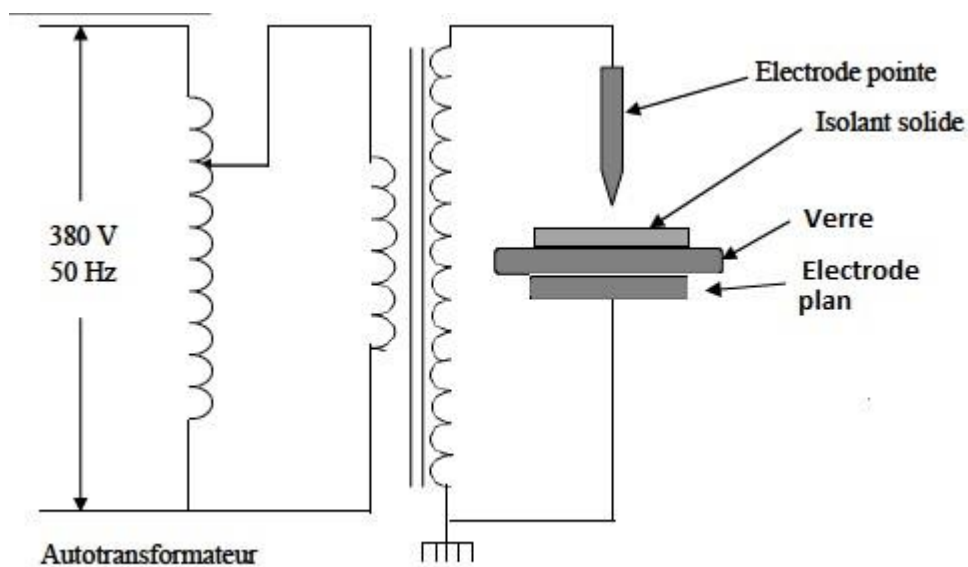


Fig III.7 : Dispositif expérimental [53]

Afin de générer des décharges, les électrodes pointe-plan de 10 mm, 5 mm (décharge à barrière diélectrique) et 0 mm (décharge glissante) sont alimentées avec une tension alternative générée par le transformateur. Ensuite, cette tension est ajustée à l'aide d'un autotransformateur situé au niveau du pupitre de commande, et la valeur de la tension alternative est fixée à 12 kV.

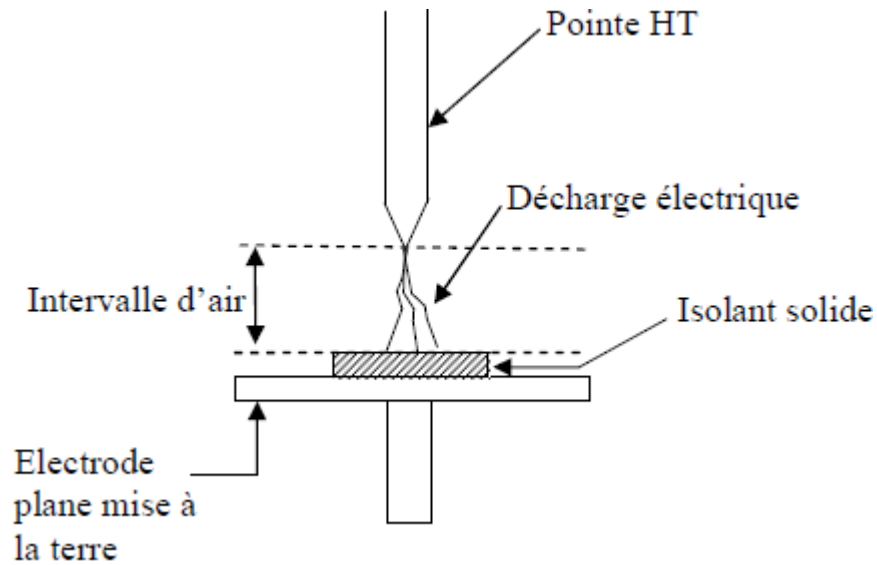


Fig III.8 : Décharge glissante avec intervalle d'air [53]

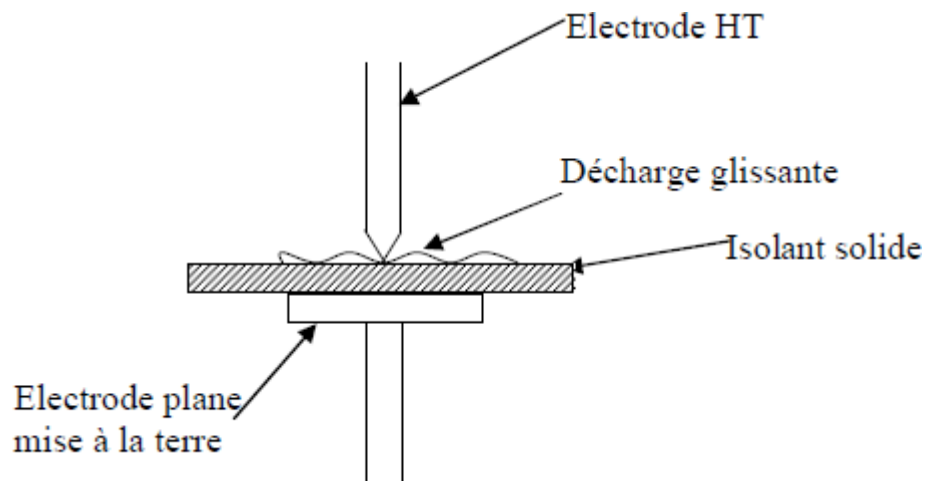


Fig III.9 : Décharge glissante sans intervalle d'air[53]

III.4. Mesures des propriétés diélectriques :

Nous avons étudié la variation de la permittivité relative ϵ_r , le facteur de dissipation $\text{tg}(\delta)$ (angle de pertes) en fonction de la fréquence en utilisant un LCR mètre modèle GWINSTEX LCR-817. Cet appareil nous permet de mesurer la capacité C, la résistance R, l'inductance L, le facteur de dissipation $\text{tg}(\delta)$ en fonction de la fréquence qui peut varier entre 20 Hz et 10kHz, figure III-10.



Figure III-10 : LCR mètre utilisé pour la caractérisation diélectrique.



Figure III.11: Montage expérimental utilisé pour la caractérisation diélectrique

III.4.1 Mesure de la permittivité relative :

Généralement, la permittivité écrite sous sa forme complexe est donnée...

$$\boldsymbol{\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''} \quad \text{(III-1)}$$

La partie réelle ϵ' de la permittivité complexe, ϵ^* représente la permittivité relative ou la constante diélectrique ,elle nous renseigne sur la capacité du diélectriques à stocker la

charge en présence du champ électrique. La permittivité relative est en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette ainsi que la géométrie des électrodes de mesure et a comme équation :

$$\mathcal{E}' = \frac{C.e}{\epsilon_0.S} \quad (\text{III-2})$$

Avec :

C : la capacité de l'isolant (F)

e : Epaisseur de l'isolant (m).

S : surface de l'électrode (m²).

$\epsilon_0 = 8.854.10^{-12}$ Permittivité du vide (F/m).

III.4.2 Facteur de dissipation :

Le facteur de dissipation diélectrique, appelé aussi tangente de l'angle de perte ou **tan δ** , δ est l'angle complémentaire de déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte, en accord avec la théorie de Debye le facteur de dissipation est donné par:

$$\tan \delta = \frac{\mathcal{E}''}{\mathcal{E}'} \quad (\text{III.3})$$

III.4.3 Indice de pertes diélectriques (tg(δ))

La partie imaginaire \mathcal{E}'' de la permittivité complexe représente les pertes diélectriques ou bien l'indice de pertes diélectriques. Ces pertes dépendent de la conductivité et des phénomènes de relaxation et de polarisation dipolaire, l'indice de perte est donné par :

$$\mathcal{E}'' = \tan\delta. \mathcal{E}' \quad (\text{III.4})$$

III.5 Caractérisation physico-chimique par FTIR

L'analyse par Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une technique qui permet d'obtenir un spectre infrarouge à partir d'un échantillon. La technique utilise un faisceau infrarouge pour exciter les molécules de l'échantillon, qui vibrent à des fréquences spécifiques. Les vibrations sont ensuite mesurées et transformées

mathématiquement en un spectre infrarouge qui peut être utilisé pour identifier les composants de l'échantillon.

Le dispositif utilisé est un spectromètre infrarouge de type Shimadzu, modèle IR Affinity-1S, installé au niveau du Laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique (LCAGC) de l'université de Tizi-Ouzou.



Figure III.12 : Spectromètre Shimadzu IRAffinity-1S utilisé pour l'analyse FTIR.

III.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé en détail le matériau d'étude, à savoir le polyéthylène réticulé chimiquement. Le processus de vieillissement électrique effectué au laboratoire de haute tension de l'université de Tizi-Ouzou a ensuite été décrit. Nous avons également décrit les méthodes de caractérisation diélectrique et physico-chimique. Dans le chapitre suivant, nous allons donner et interpréter les résultats obtenus.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction :

La caractérisation diélectrique et physico-chimique des matériaux isolants est essentielle pour comprendre leur comportement sous différentes conditions d'exploitation. Ce chapitre explore la variation du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité diélectrique et de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement à différentes distances. Les figures et analyses présentées fournissent une compréhension approfondie de l'influence des contraintes électriques et de la durée d'exposition sur ces propriétés, permettant d'évaluer la stabilité et la fiabilité des matériaux dans des applications pratiques.

IV.2 Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement :

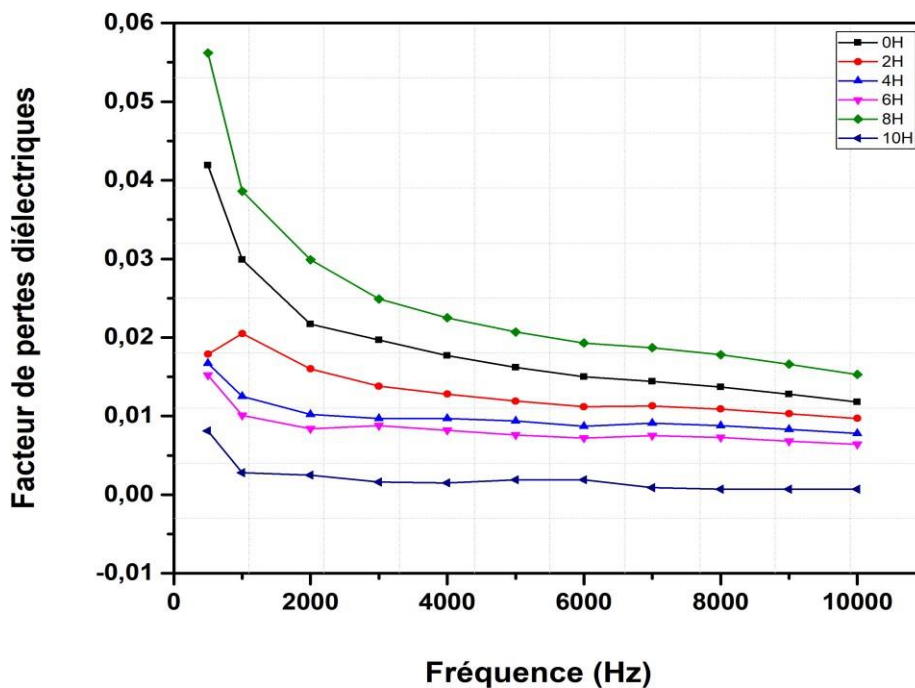


Figure IV.1 : variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence à une distance de 10mm

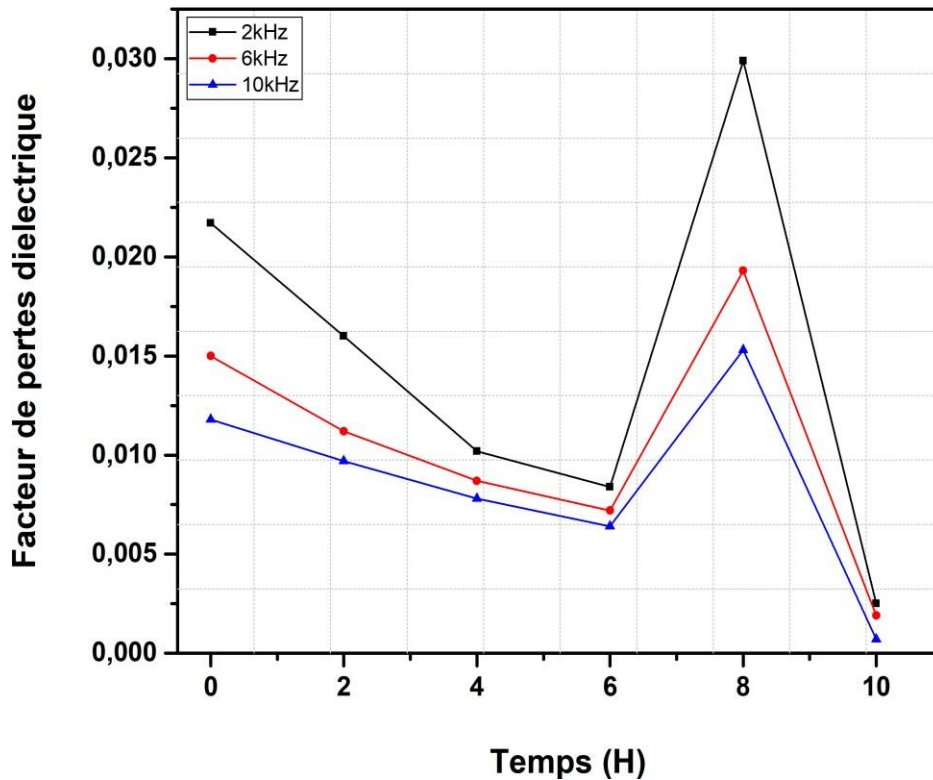


Fig IV.2 : variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de temps pour une distance de 10mm

La figure IV.1 montre l'évolution du facteur de pertes diélectrique en fonction de la fréquence pour six échantillons soumis à des durées de traitement différentes.

La variation du facteur de pertes diélectrique diminue avec l'augmentation de la fréquence pour tous les échantillons, à la basse fréquence [0.5kHz ; 3kHz] la constante diélectrique diminue brusquement, et au-delà de cette fréquence elle diminue progressivement jusqu'à stabilisation.

La figure IV.2 montre l'évolution du facteur de pertes diélectrique en fonction de temps pour six échantillons soumis à de différentes fréquences.

L'augmentation de la durée d'application de la contrainte électrique (champ électrique) induit la diminution du facteur de pertes diélectrique avec l'apparition d'un pic à 8h.

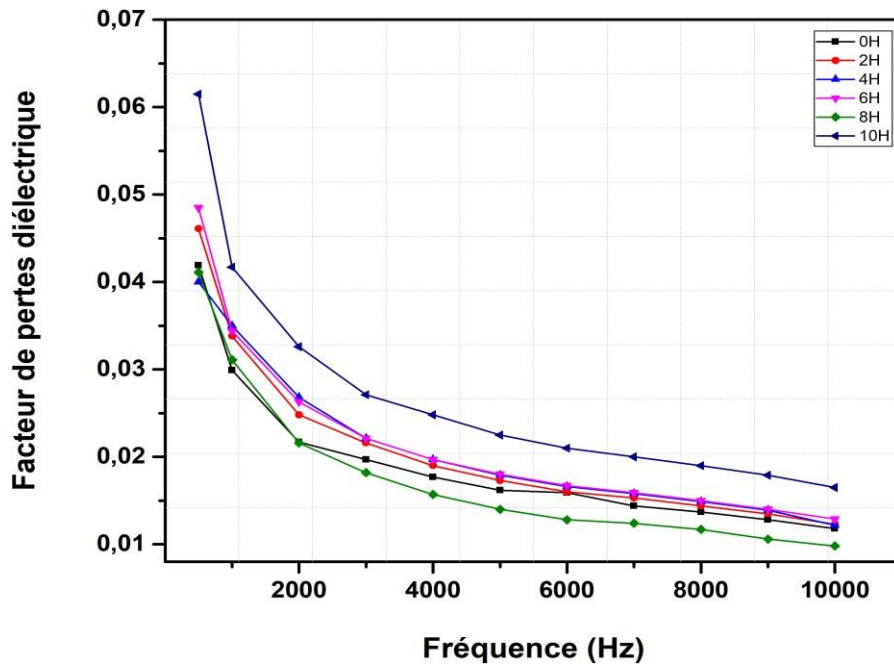


Fig IV.3 : variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence à une distance de 5mm

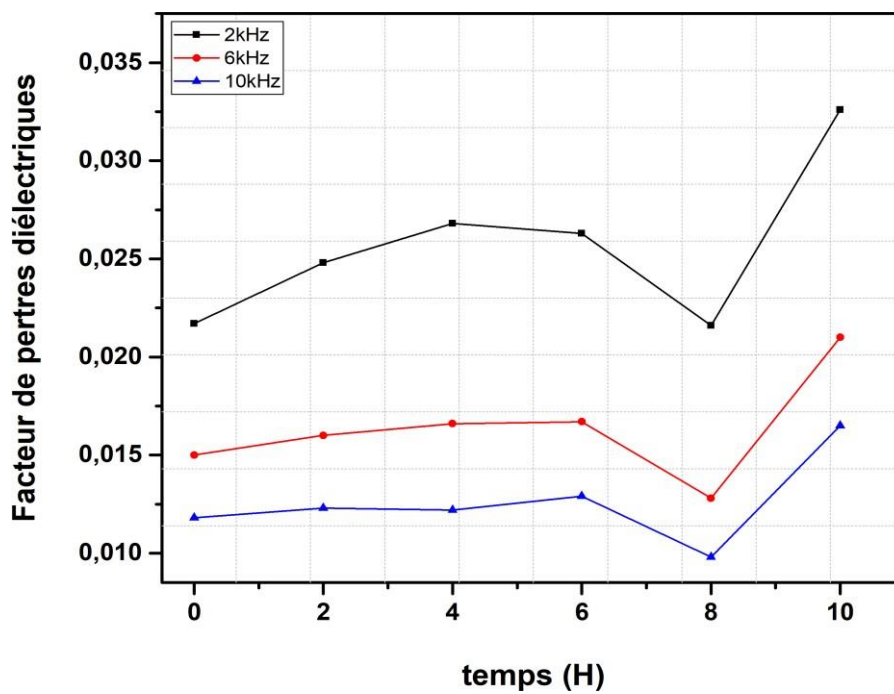


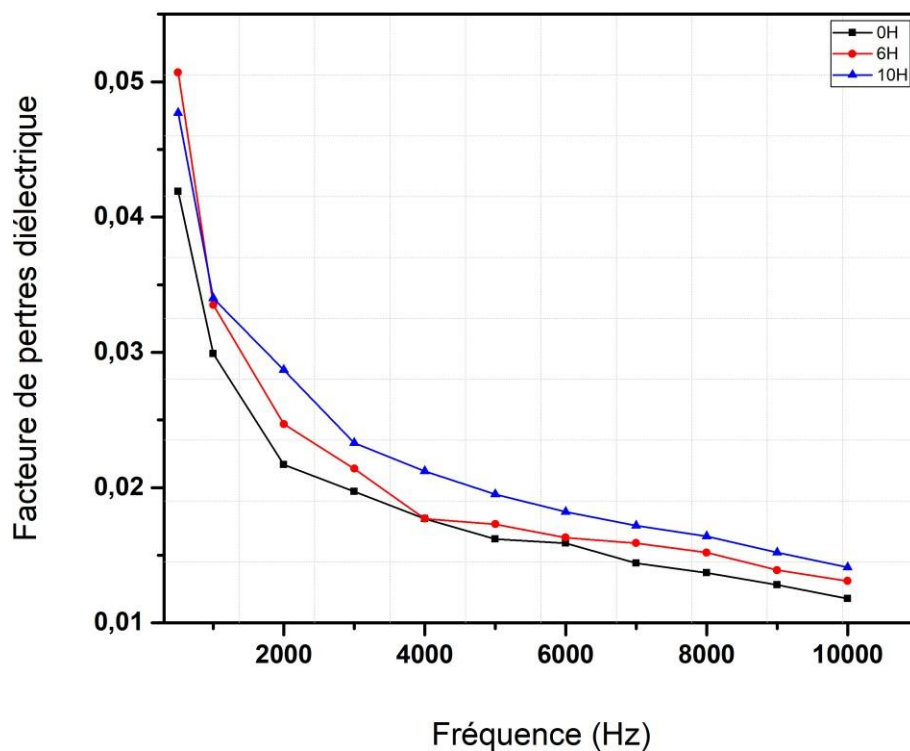
Fig IV.4 : variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps à une distance de 5mm

La figure IV.3 montre l'évolution du facteur de pertes diélectrique en fonction de la fréquence pour six échantillons soumis à des durées de traitement différentes pour une distance de 5mm.

La variation du facteur de pertes diélectrique diminue avec l'augmentation de la fréquence pour toutes les allures.

La figure IV.4 montre l'évolution du facteur de pertes diélectrique en fonction de temps soumis à de différentes fréquences.

La variation du facteur de pertes diélectrique augmente avec l'augmentation de la durée d'application de la contrainte électrique avec apparition d'un pic de relaxation décroissant.



FigIV.5 : variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence à une distance de 0mm

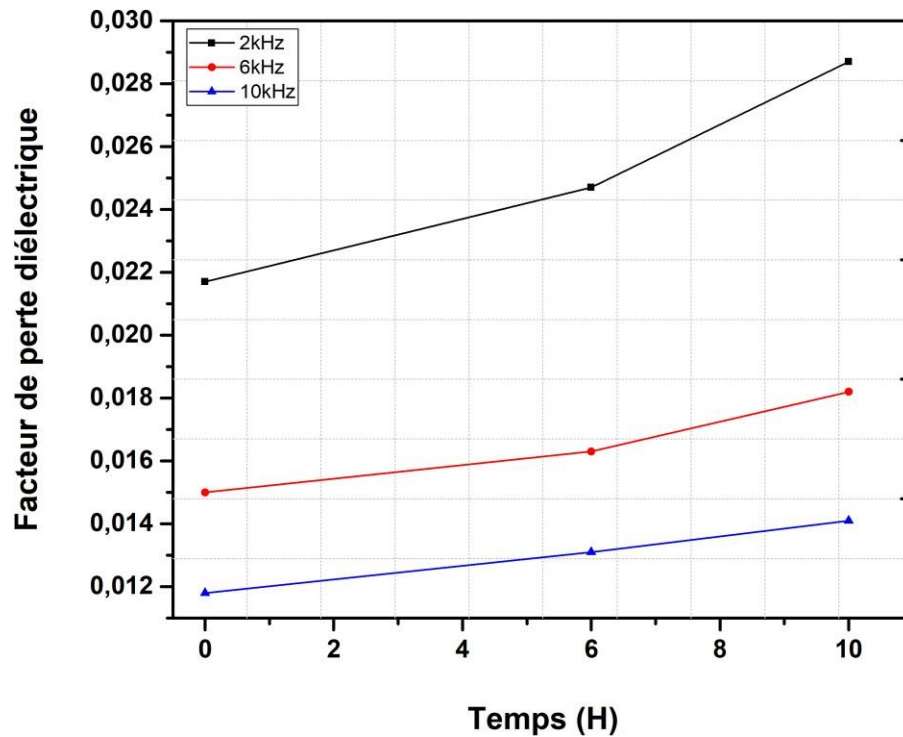


Fig IV.6: variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps à une distance de 0mm

La figure IV.5 montre l'évolution du facteur de pertes diélectrique pour trois fréquences 2kHz, 6kHz, 10kHz sur une période de 10h.

La diminution du facteur de pertes diélectrique avec la fréquence peut indiquer que les pertes par dissipation sont moins importantes à haute fréquence, ce qui est typique pour les matériaux isolants, car les pertes capacitives dominent à haute fréquence.

La figure IV.6 montre l'évolution du facteur de pertes diélectrique pour trois fréquences 2kHz, 6kHz, 10kHz sur une période de 10h.

Les résultats montrent que le facteur de pertes augmente avec l'augmentation du temps de vieillissement pour toutes les fréquences.

Cette tendance montre que le matériau isolant subit une dégradation plus rapide à des fréquences plus basses, probablement en raison de mécanismes de dissipation plus importants à ces fréquences.

- La diminution du facteur de pertes diélectriques avec l'augmentation de la fréquence serait due à la disparition du phénomène de la polarisation [46], et donc la diminution de la conductivité électrique et du facteur de pertes.

- L'augmentation du facteur de perte diélectrique avec l'augmentation du temps de vieillissement serait, avec parfois des pics de relaxation (augmentation et diminution), qui seront dus aux mouvements (rotations, translations et vibrations) des segments plus ou moins longs de chaînes principales ou latérales. [46, 47].

IV.3 Variation de la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement

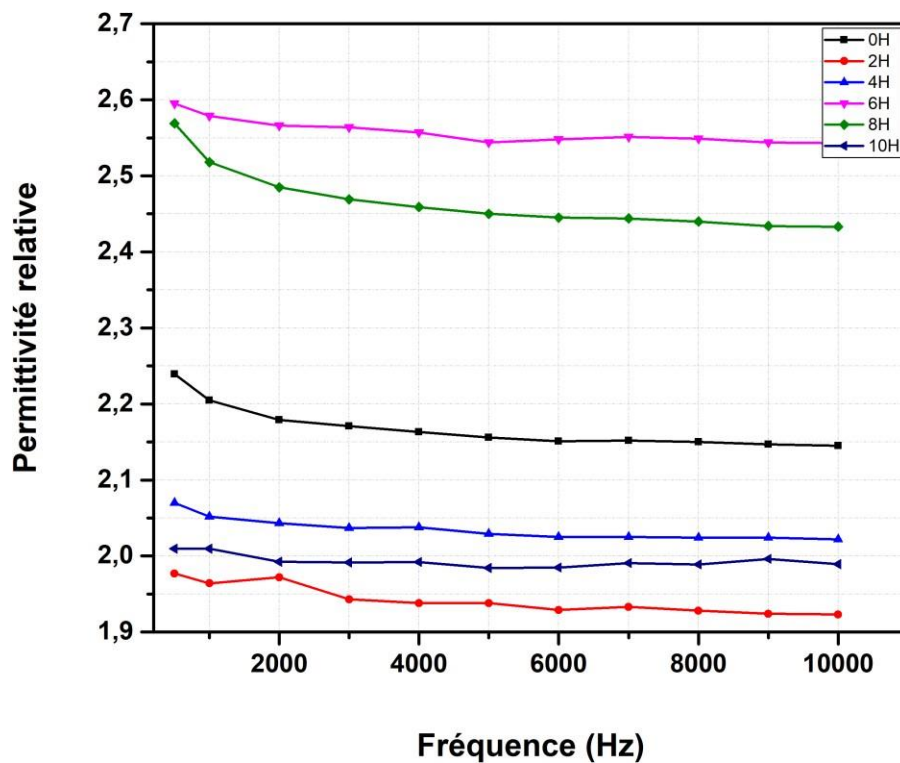


Fig IV.7 : variation de la permittivité en fonction de la fréquence à une distance de 10mm.

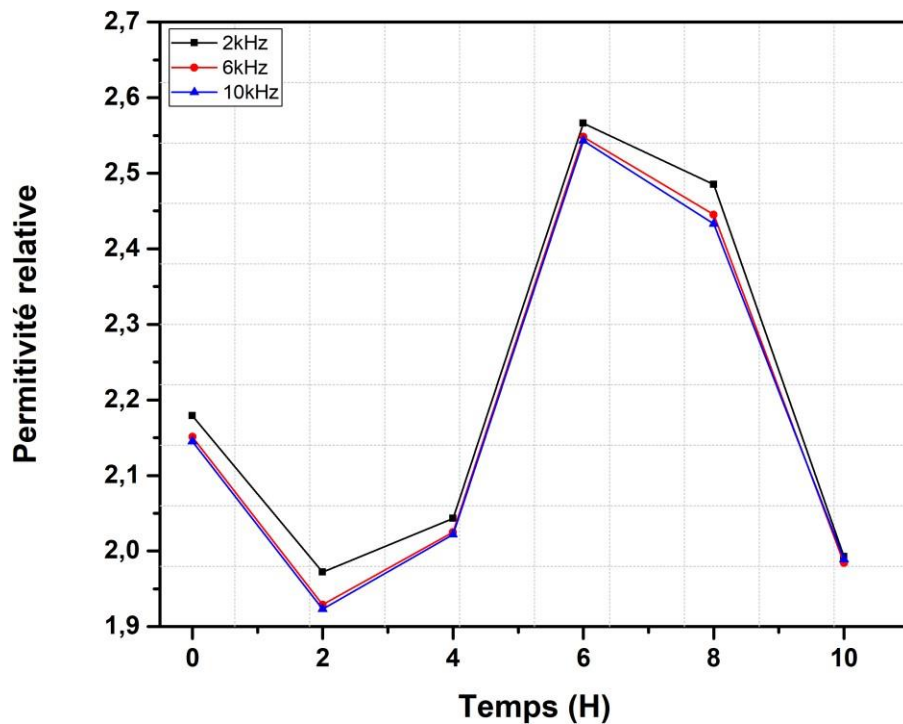


Fig IV.8 : variation de la permittivité en fonction de temps à une distance de 10mm.

La figure IV.7 montre l'évolution de la permittivité en fonction de la fréquence pour six échantillons soumis à des durées de traitement différentes : 0h, 2h, 4h, 6h, 8h et 10h.

On observe que la permittivité relative diminue légèrement avec l'augmentation de la fréquence pour toutes les durées de traitement, avec des valeurs de permittivité plus élevées pour les traitements de 6h et 8h.

La figure IV.8 : montre la permittivité relative en fonction du temps pour trois fréquences différentes : 2 kHz, 6 kHz et 10 kHz.

Les courbes des trois fréquences suivent des tendances similaires, avec des variations très proches les unes des autres tout au long des différentes périodes de temps. La permittivité relative subit une diminution, augmentation pour atteindre un pic, puis diminue rapidement.

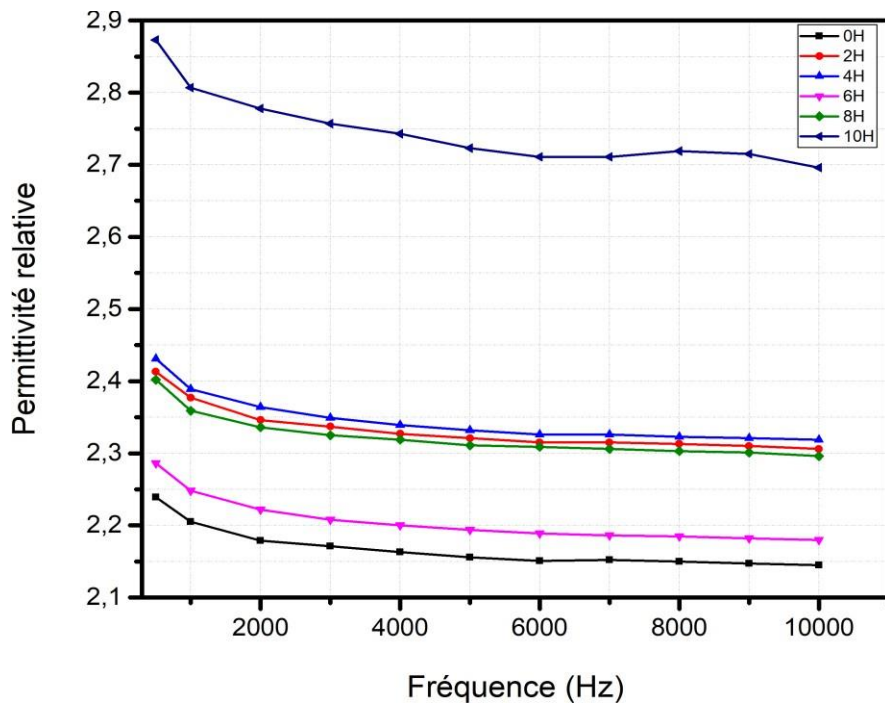


Fig IV.9 : variation de la permittivité en fonction de la fréquence à une distance de 5mm.

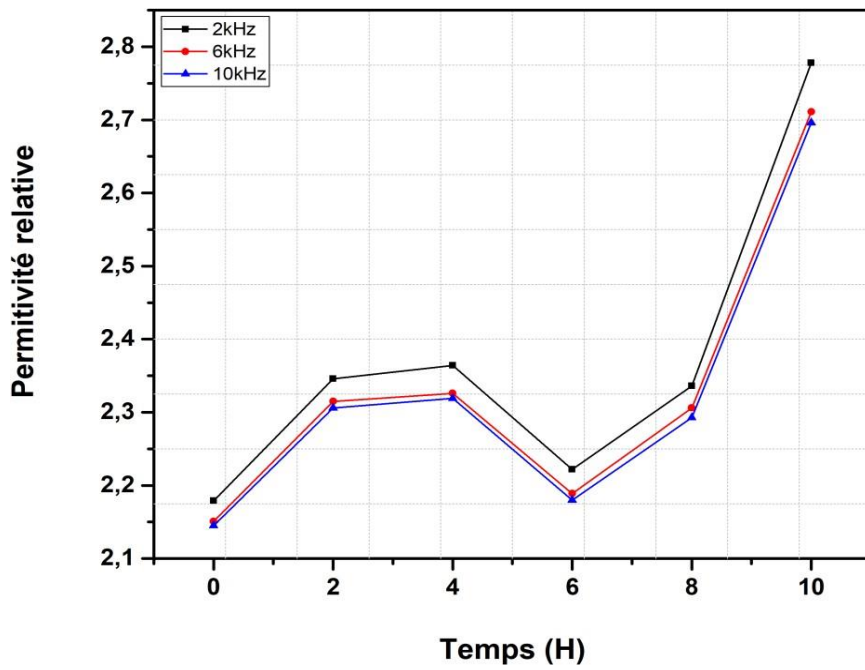


Fig IV.10 : variation de la permittivité en fonction de temps à une distance de 5mm.

La figure IV.9 présente la variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence, pour différents temps d'exposition (0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h).

On remarque que la variation de la permittivité relative diminue de façon exponentielle lorsque la fréquence augmente, et ce quel que soit le temps d'exposition.

La figure IV.10 montre l'évolution du facteur de permittivité relative en fonction du temps pour différentes fréquences (2 kHz, 6 kHz et 10 kHz).

On observe des variations complexes avec des pics et des chutes de la permittivité selon la fréquence et le temps d'exposition. À 2 kHz, la permittivité relative est plus élevée et varie de manière plus linéaire avec le temps. Aux fréquences plus hautes (6 kHz et 10 kHz), on constate des comportements plus erratiques avec des changements plus brusques.

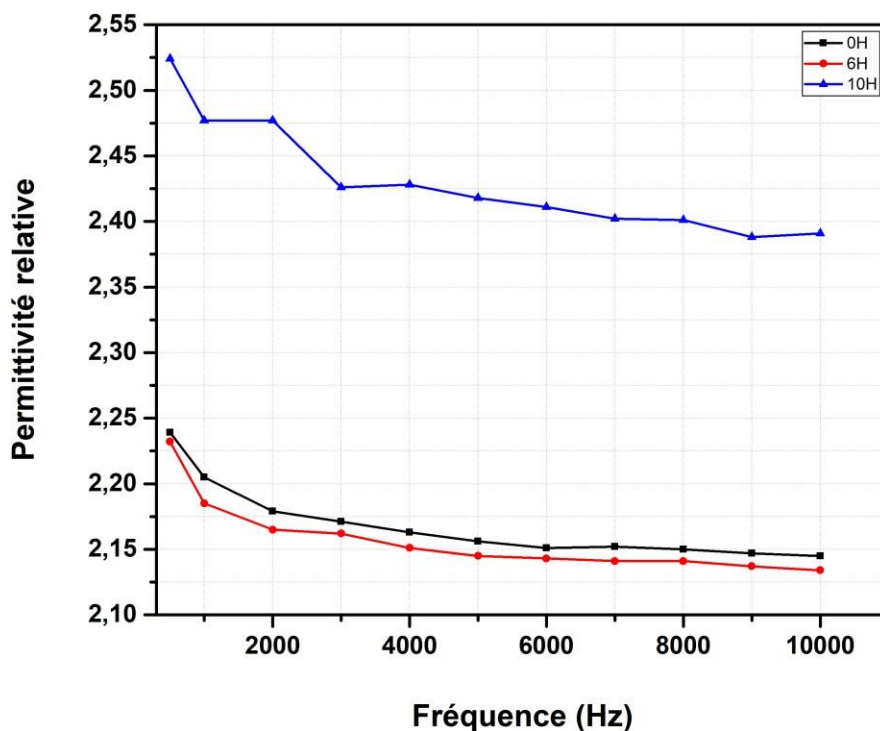


Fig IV.11 : variation de la permittivité en fonction de la fréquence à une distance de 5mm.

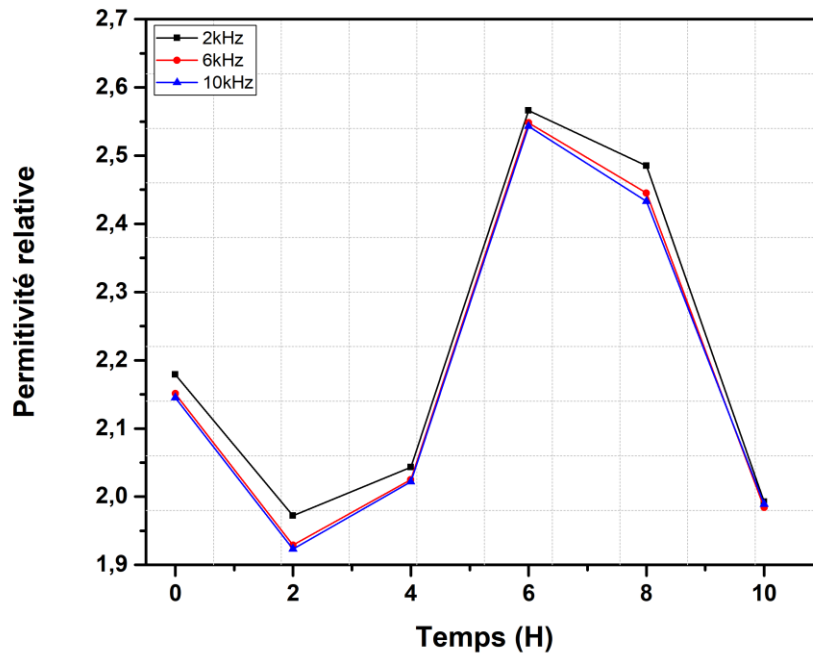


Fig IV.12 : variation de la permittivité en fonction de temps à une distance de 0mm.

La figure IV.11 montre la variation de la permittivité relative en fonction de la fréquence (en Hz) à trois moments différents : 0h, 6h et 10h.

Les tendances montrent que la permittivité relative diminue avec l'augmentation de la fréquence pour chaque moment, mais les valeurs absolues varient en fonction du temps.

La figure IV.12 présente la variation de la permittivité diélectrique en fonction du temps (en heures) pour trois fréquences différentes : 2 kHz, 6 kHz et 10 kHz.

La variation de la permittivité est relativement stable au début du vieillissement [0h ; 6h], puis augmente brusquement [6h ; 10h].

- La diminution de la permittivité avec l'augmentation de la fréquence peut être expliquée par le réarrangement de la structure moléculaire et le phénomène de réticulation. [48]
- Les pics de relaxation de la permittivité relative seraient dus soit au phénomène de réticulation, soit aux coupures de chaînes. [46]

IV.4 Variation de l'indice de pertes diélectrique en fonction de la fréquence et du temps de vieillissement

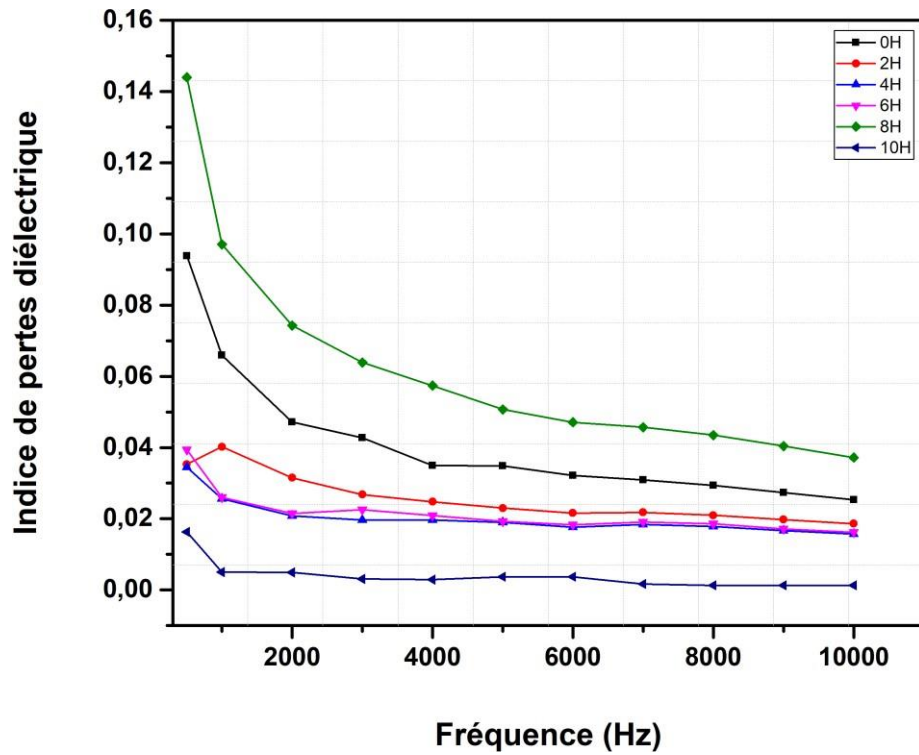


Fig IV.13 : variation de l'indice de perte diélectrique en fonction de la fréquence une distance de 10mm.

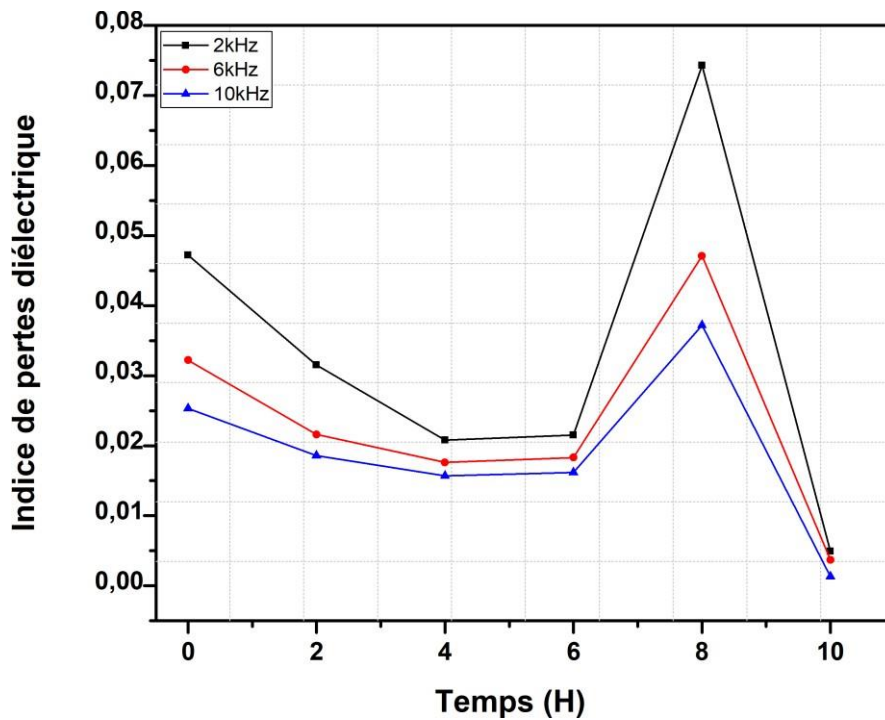


Fig IV.14 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction du temps à une distance de 10mm.

La figure IV.13 montre l'évolution de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la fréquence pour différentes durées de temps (0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h).

On observe que l'indice de pertes décroît globalement avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à possibilité de stabilisation ou amélioration, indiquant une réduction de ladissipation énergétique à haute fréquence.

La courbe IV.14 montre l'évolution de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps pour trois fréquences (2 kHz, 6 kHz et 10 kHz).

On observe une diminution initiale de l'indice de pertes pour toutes les fréquences, suggérant une stabilisation des dipôles dans le matériau.

Le pic observé à 8 heures pour toutes les fréquences indique une dégradation ou une réaction chimique interne augmentant les pertes énergétiques, suivie d'une stabilisation.

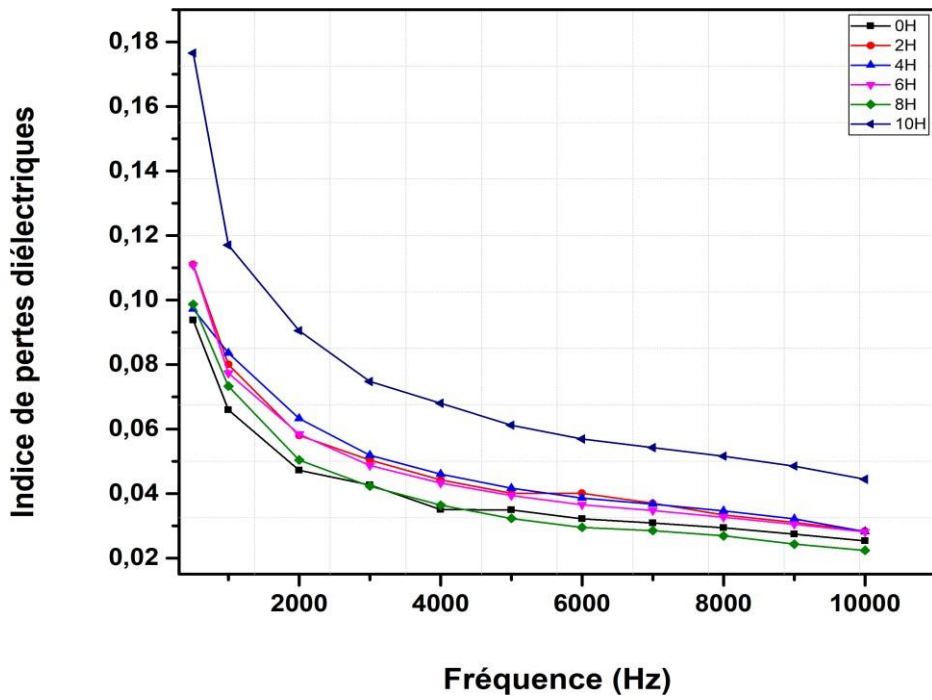


Fig IV.15 : variation de l'indice de perte diélectrique en fonction de la fréquence à une distance de 5mm.

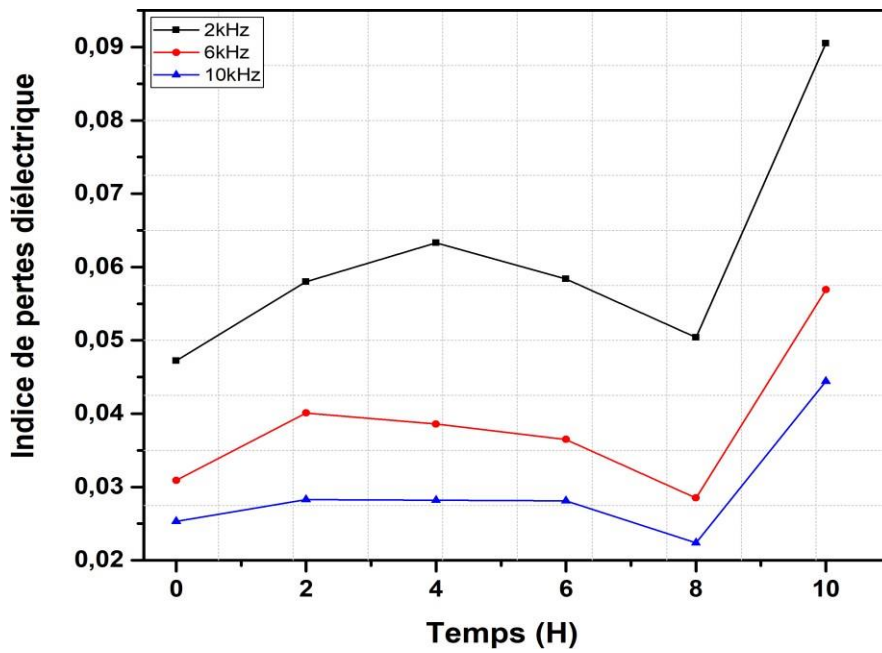


Fig IV.16 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction du temps à une distance de 5mm

La courbe montre l'évolution de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la fréquence pour différentes durées de traitement (0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h).

La variation de l'indice de pertes diélectriques diminue avec l'augmentation de la fréquence pour toutes les durées de traitement ; ces dernières ont les mêmes allures.

Le graphique présente l'évolution de l'indice de pertes diélectriques d'un matériau en fonction du temps pour trois fréquences différentes : 2 kHz, 6 kHz et 10 kHz.

On observe que le facteur de pertes augmente avec le temps, mais le taux de cette augmentation et les valeurs atteintes diffèrent selon la fréquence. On remarque l'apparition d'un pic décroissant à 8H ce qui serait généralement liée à des phénomènes de relaxation ou de résonance.

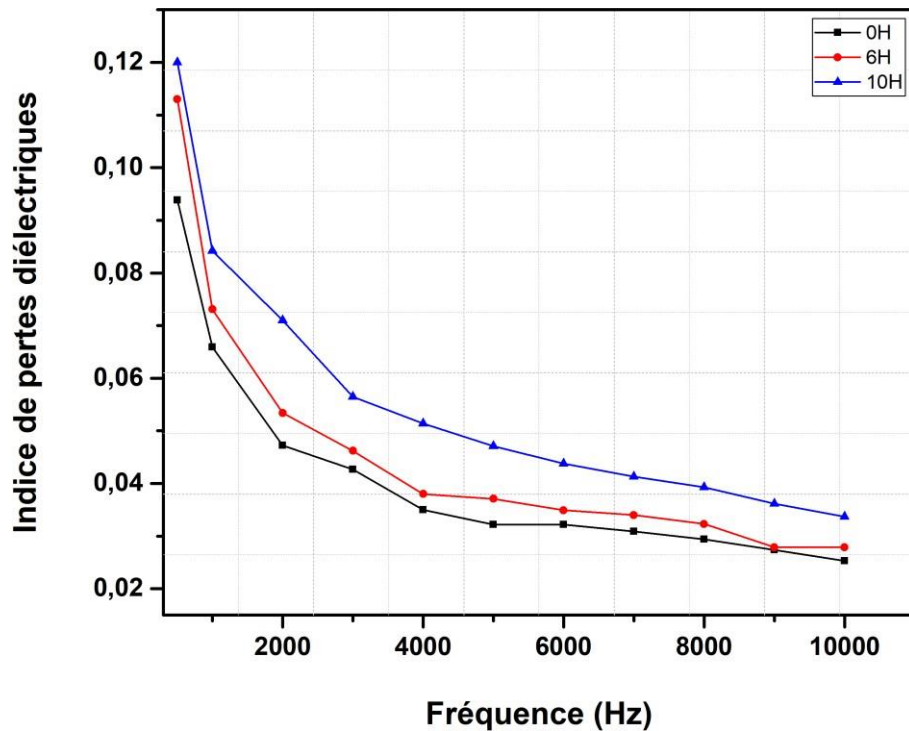


Fig IV.17 : variation de l'indice de perte diélectrique en fonction de la fréquence à une distance de 0mm.

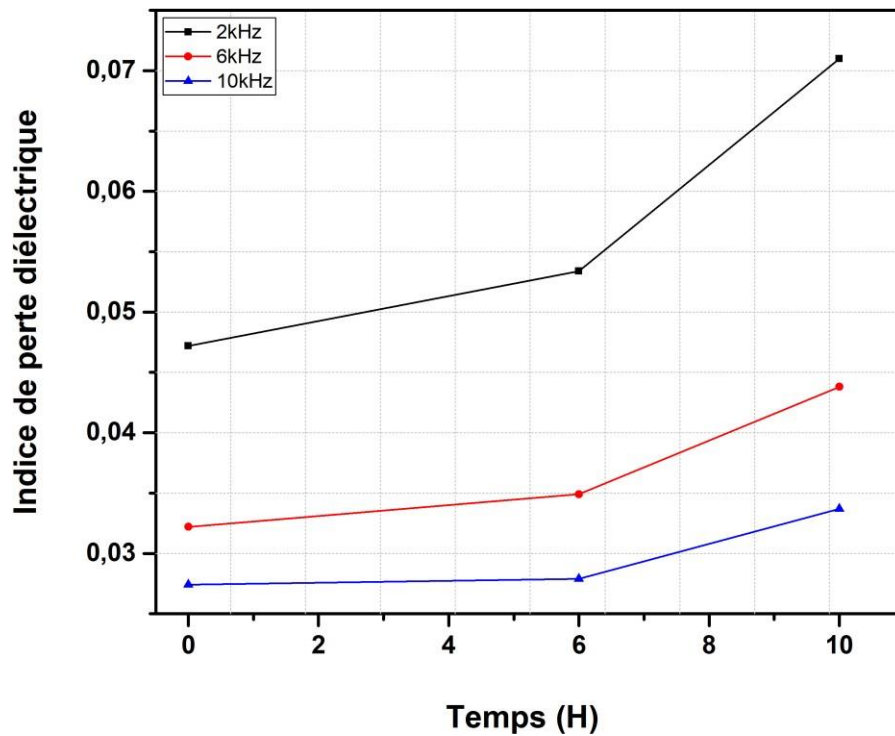


Fig IV.18 : Variation de l'indice de perte diélectrique en fonction du temps à une distance de 0mm.

La figure IV.17 montre l'évolution de l'indice de pertes diélectriques en fonction de la fréquence, pour trois durées différentes d'observation : 0h, 6h et 10h.

On constate que l'indice de pertes diminue de manière significative lorsque la fréquence augmente, et ce quel que soit le temps écoulé.

La figure IV.18 montre l'évolution de l'indice de pertes diélectriques d'un matériau en fonction du temps, pour trois fréquences différentes : 2 kHz, 6 kHz et 10 kHz

Entre 0h et 6h, la permittivité reste relativement stable, avec de légères diminutions. Après 6h, il y a une augmentation significative de la permittivité. Les courbes pour les trois fréquences suivent des tendances similaires, montrant une augmentation marquée après 6 heures.

- L'indice de pertes diélectrique est le produit entre le facteur de perte diélectrique et la permittivité relative donc L'augmentation ou la diminution de l'indice de perte diélectrique correspond à une augmentation ou diminution de la puissance perdue dans le matériau. [49]

- Le pic décroissant serait généralement lié à des phénomènes de relaxation ou de résonance.
- La présence du pic de relaxation révèle l'existence de plusieurs bandes d'absorption. [50]

IV.5 Caractérisation physico-chimique

IV.5.1 La spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ATR-FTIR)

De manière générale, les groupements chimiques d'une molécule absorberont les infrarouges à des fréquences caractéristiques. En traçant le spectre d'un matériau et en se référant à des tables (Figure IV.19), il est possible d'obtenir des informations sur les groupements fonctionnels du matériau particulièrement ceux qui disparaissent et ceux qui se forment après vieillissement.

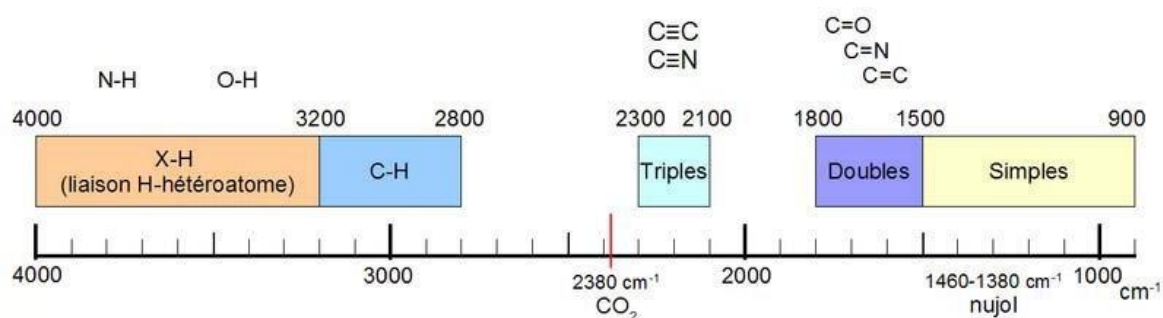


Fig.IV.19. Aperçu des longueurs d'ondes d'absorption pour les molécules organiques [53]

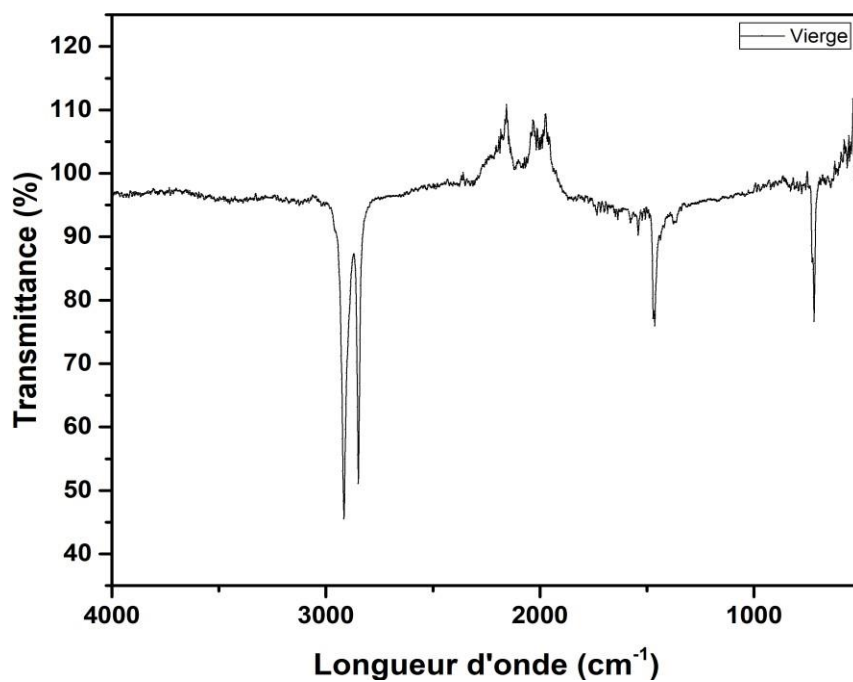


Fig IV-20 : Spectres infrarouges du PRC avant vieillissement électrique.

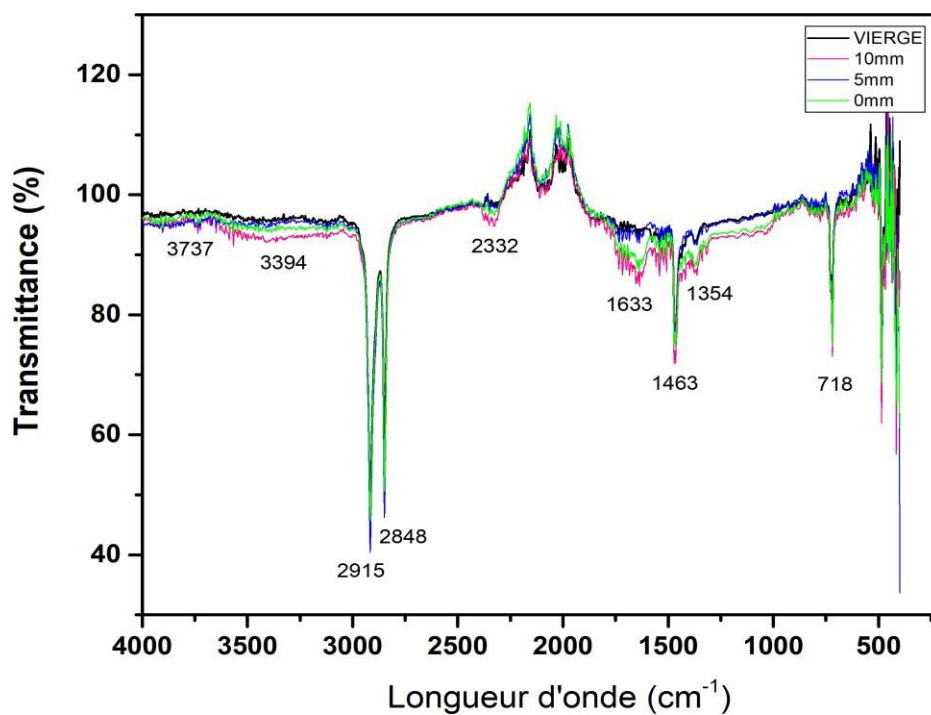


Fig IV-21 : Spectres infrarouges du PRC avant et après vieillissement électrique.

Les figures (IV.20 et IV.21) représentent les spectres FTIR des échantillons vierge et vieillis respectivement. La figure (IV.22) représente le zoom de quelques pics remarquables du PRC.

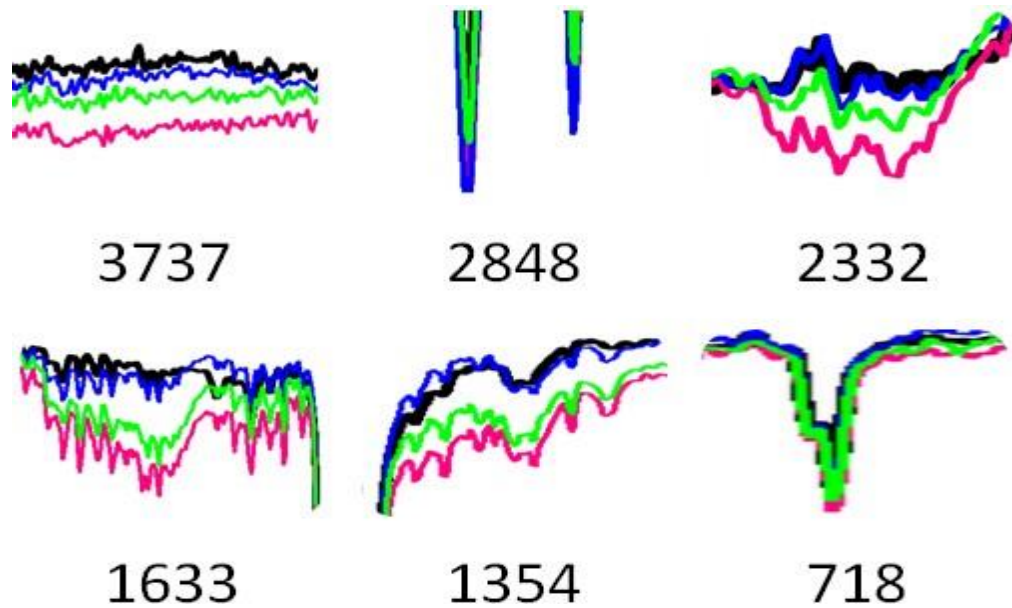


Fig IV.22 : Différents pics des spectres infrarouges du PRC avant et après vieillissement électrique.

Le groupe CH_2 se manifeste à un nombre d'onde de 718 cm^{-1} , et il est confirmé par ses pics apparus à 1463 cm^{-1} , 2848 cm^{-1} et 2915 cm^{-1} [51, 52]. Après décharges électriques, une augmentation de l'intensité des pics dans les bandes caractéristiques du PRC (720 , 1463 , 2848 et 2915 cm^{-1}), pourrait être attribuée à la scission des chaînes moléculaires. Après 10h de décharges électriques, on remarque la formation de groupes carbonyle $\text{C}=\text{O}$ correspond à la bande d'absorption IR entre 1500 cm^{-1} et 1800 cm^{-1} [53].

Le pic apparu à la longueur d'onde de 1354 cm^{-1} correspond à l'absorption de l'acétophénone [54], un produit de décomposition résultant de l'opération de réticulation du polyéthylène.

On remarque aussi la formation d'un pic à 2332 cm^{-1} qui correspond à CO_2 .

De plus, une légère augmentation de l'absorption de la fonction $-\text{OH}$ des groupes hydroxyle a pu être observée après vieillissement dans la région entre 3000 et 3500 [55].

IV.5.2 Observation visuelle de la surface de l'isolant

Nous avons soumis aux décharges de surface les échantillons d'isolants solides sous une tension de 16 kV (entre électrodes). Avant d'effectuer la mesure de la résistance superficielle, nous avons d'abord procédé à des observations visuelles pour constater les dégradations subies par le matériau.

La figure IV.2 illustre les changements de l'état de surface des spécimens vieillis sous décharges pour différents temps de vieillissement. Une érosion sévère de la surface du solide isolant a été constatée. La zone érodée forme une sorte d'anneau blanchâtre au contour plus ou moins distinct.

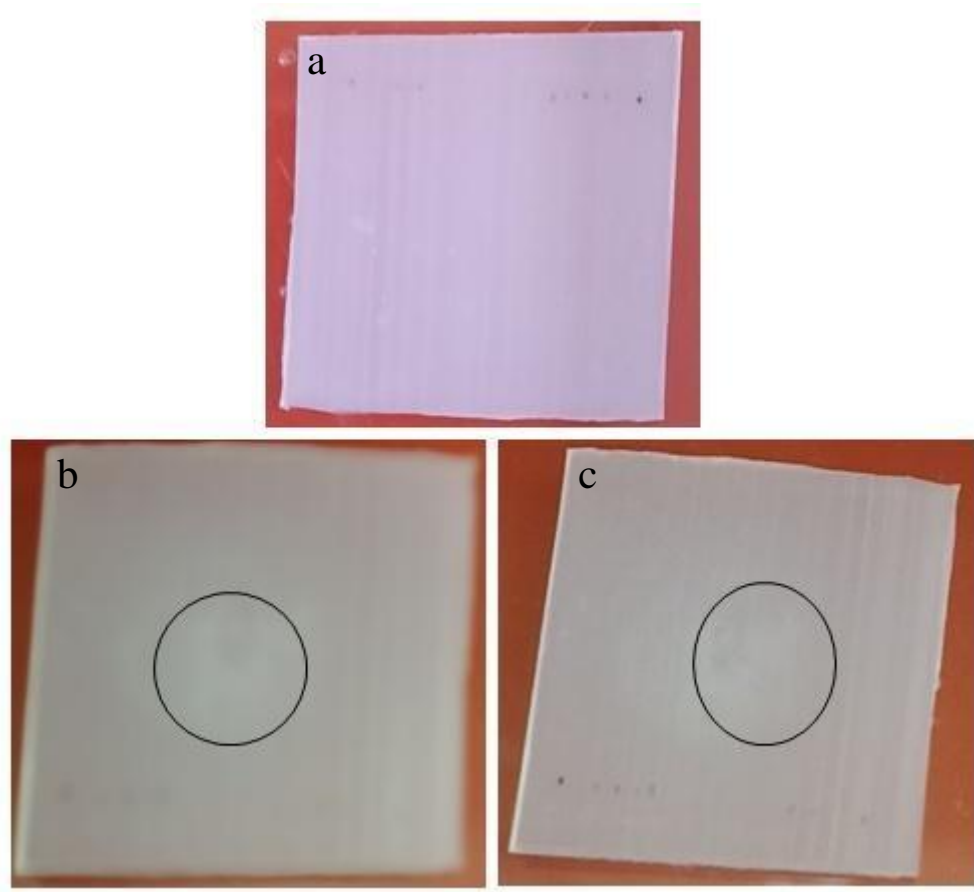


Fig IV.23 : Echantillons de PRC : a) Vierge,
b) et c) Vieillis 10h, e=5mm et Vieillis 10h, e=10mm respectivement.

IV.6 Conclusion

Les résultats montrent une tendance générale à la diminution du facteur de pertes diélectriques et de la permittivité avec l'augmentation de la fréquence, ce qui peut être attribué à la diminution des phénomènes de polarisation. En revanche, l'augmentation du temps de vieillissement tend à augmenter ces propriétés, suggérant une dégradation progressive du matériau. Les variations observées à différentes distances et fréquences soulignent l'importance de ces paramètres dans l'évaluation de la performance des matériaux isolants. Ces connaissances sont cruciales pour le développement de matériaux plus résistants et efficaces, particulièrement dans les applications nécessitant une exposition prolongée à des champs électriques élevés

Conclusion générale

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'influence des décharges électriques sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) utilisé dans l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique. Dans la première partie, nous avons donné quelques généralités sur les polymères qui sont des isolants solides présentant de bonnes propriétés physico-chimiques qui les rendent plus utilisés dans les domaines de l'industrie. Nous avons vu par la suite, les décharges électriques et leurs différents types.

Dans la deuxième partie (expérimentale) de notre travail, nous avons décrit en détail la préparation des échantillons ainsi que le montage expérimental utilisé. Nous avons montré que la durée de l'application des décharges électriques influe directement sur les propriétés diélectriques du PRC. Les résultats des essais expérimentaux montrent que la permittivité relative, le facteur de pertes diélectriques et l'indice de pertes diélectriques diminuent avec l'augmentation de la fréquence et le temps de vieillissement électrique, indiquant une détérioration progressive due aux décharges.

L'analyse FTIR, a montré, après décharges électriques, l'augmentation de l'intensité des pics dans les bandes caractéristiques du PRC ainsi que la formation de groupes carbonyle C=O. Ce qui a confirmé la dégradation superficielle du polymère. Les échantillons vieillis avec une distance pointe-surface de 0 mm (la pointe de l'électrode est sur la surface de l'échantillon) ont subi une dégradation plus importante que les deux autres cas (5 et 10 mm).

Comme perspectives, nous souhaitons pousser les durées de vieillissement encore plus loin avec d'autres valeurs de la tension et d'autres méthodes de caractérisation comme l'analyse par MEB, et l'étude de l'hydrophobicité.

Références bibliographiques

- [1] M. Moudoud « Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants » Thèse de Doctorat, UMMTO, 21/12/2010
- [2] Séverine Le Roy « Modélisation numérique des phénomènes de transport électrique dans un isolant polyéthylène sous contrainte électrique » Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, Juin 2004
- [3] P. Robert. « Matériaux de l'électrotechnique volume II ». Ed. Presses polytechniques Romandes,1987.
- [4] B. Du, Y.Gao. « Dynamic behavior of surface charge on gamma-ray irradiated polybutylene ». (2009) pp 139-143. Vol. Polymer Degradation and Stability 94.
- [5] Melle : DJ. TILIKATE, S. ISMIGAOUA, S. MECHERAK « Etude de la dégradation de PMMA sous décharge électrique », mémoire de magister, UMMTO, 2010
- [6] LARBA Mohamed «Effets des décharges partielles sur les propriétés diélectriques desisolants dans la fabrication des câbles électriques» thèse doctorat, Année 2017, Université Badji Mokhtar d'Annaba
- [7] H.S, K.S, R.F. « Effet d'un champ électrique sur les propriétés diélectrique de la résine époxyde ». Mémoire d'ingénieur, UMMTO, 2013
- [8] Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE, « électrotechnique » 4eme édition, 2005
- [9] Gohfriedw –Ehrenstein ; Fabienne Montagne ; matériau polymères (structures propriétés et applications) paris 2000.
- [10] E. Maréchal; Polycondensation et polyaddition ; Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et composites ; A M 3 041.
- [11] Serge Etienne et Laurent David. '' Introduction a la physique des polymères'',dunod,2002.
- [12] E.Duget, J.Louis Pariente, P. Conort.«Chapitre II : Aspects physico-chimiques des matériaux utilisés en Urologie». Progrès en Urologie, n°15, p.865-866,2005.
- [13] F. Gourgues-Lorenzon et J-M. Haudin. ''Matériaux pour l'ingénieur''.2006.
- [14] Incendies et explosions d'atmosphère ; traité de sécurité intérieure. Jean-ClaudeMartin. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008.
- [15] A. le Hir, J.C.Chaumeil et D. Brossard .''Pharmacie galénique, bonne pratique defabrication des médicaments'', 9e édition. Elsevier Masson SAS ,2009.

Références bibliographiques

- [16] Hermann Etiteurs .Physique des polymères, I. Structure, Fabrication, Emploi Patrick Combette, Isabelle Ernoult. 2005.
- [17] A-f. Gourgues-Lorenzo et J-M.Haudin.Matériaux pour l'ingénieur ; 2006.
- [18] Jean-Paul Bilon, Jean-Marie Dorlet «des matériaux», 3ème édition. Ecole polytechnique de Montréal, 2000. Sciences Exacte, Département de chimie, 2009.
- [19] M. Carrega et Coll, «Matériaux industriels» Dunod, Paris, 2000.
- [20] Matériaux pour l'ingénieur. A-F. Groupes-Lorenzo et J-M. Haudin. 2006
- [21] MallysElliazar Banda. Mesure et modélisation du comportement de matériaux diélectriques irradiés par faisceau d'électrons. Electronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017.
- [22] M. DJELIL, O. FERHAOUI, "Influence des rayonnements ultraviolets sur les caractéristiques du PS et du PC", mémoire de fin d'étude en vu de l'obtention diplôme de Master, Université de Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2017
- [23] Polymères - Propriétés mécaniques et physiques des matériaux" par Michel Fontanille et Michel Vincent (Dunod, 2011).
- [24] Polystyrène : Synthèse, propriétés et applications" par Michel Fontanille et Michel Vincent (Dunod, 2012).
- [25] Polypropylène : Synthèse, propriétés et applications" par Michel Fontanille et Michel Vincent (Dunod, 2010)
- [26] Polychlorure de vinyle - Matériaux, mise en œuvre, propriétés" par Jean-Claude Laffon (EDP Sciences, 2002).
- [27] Poly(éthylène téréphtalate) - Synthèse, propriétés, applications" par Michel Fontanille et Michel Vincent (Dunod, 2015).

Références bibliographiques

- [28] Tanaka, T. (2005). Aging of polymeric and composite insulating materials. Aspects of interfacial performance in aging. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12(5), 914-928
- [29] Le Roy, S. (2004). *Modélisation numérique des phénomènes de transport électrique dans un isolant polyéthylène sous contrainte électrique* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- [30] Boeuf, J. P. (2003). Sliding discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(6), R53.
- [31] Borvon, G. (2009). *Histoire de l'électricité: de l'ambre à l'électron*. Vuibert.
- [32] Zhang, S., Harano, Y., Yoshida, K., & Uchiike, H. (1997, February). Discharge characteristics of surface-discharge ac plasma displays by observation using an ultra-high speed electronic camera. In *ITE Technical Report 21.10* (pp. 65-69). The Institute of Image Information and Television Engineers.
- [33] Ikeda, T., Wake, H., Takada, T., & Murooka, Y. (1998, September). Observation of AC surface discharge dynamic behavior under various atmosphere pressure. In *Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation. 30th Symposium on Electrical Insulating Materials* (pp. 263-266). IEEE.
- [34] Zegnini, B., & Mahi, D. (2002, April). The relationship between the estimated intensity of electrical current flowing in the electrolyte and the propagation of the local discharge on an electrolytic surface under AC voltage. In *Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (Cat. No. 02CH37316) (pp. 241-244). IEEE.
- [35] Koliatene, F. *Les Décharges Partielles (DP) dans le diagnostic du Système d'Isolation de l'Avionique*.
- [36] Zhao, W. B., Zhang, G. J., Xie, L., & Yan, Z. (2004, July). Investigation on pulsed surface discharge phenomena of silicon in atmosphere. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004.* (Vol. 2, pp. 888-891). IEEE.
- [37] Harada, S., Iwata, A., & Tanaka, M. (1997, February). Development of high brightness, high definition surface discharge AC-PDPs. In *ITE Technical Report 21.10* (pp. 59-63). The Institute of Image Information and Television Engineers.
- [38] Do, M. T. (2008). *Propriétés diélectriques des gels isolants: application aux composants d'électronique de puissance* (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I).
- [39] Koliatene, F. (2009). *Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique* (Doctoral dissertation, Toulouse 3).

Références bibliographiques

- [40] Fridman, A. (2008). Plasma chemistry. Cambridge university press.
- [41] Reid, AJ, Judd, MD, Fouracre, RA, Stewart, BG et Hepburn, DM (2011). Mesure simultanée des décharges partielles à l'aide des techniques IEC60270 et radiofréquence. Transactions IEEE sur les diélectriques et l'isolation électrique , 18 (2), 444-455.
- [42] Kreuger, F. H., Gulski, E., & Krivda, A. (1993). Classification of partial discharges. IEEE transactions on Electrical Insulation, 28(6), 917-931.
- [43] Danikas, MG et Tanaka, T. (2009). Nanocomposites - un examen de l'arborescence et des pannes électriques. Magazine IEEE sur l'isolation électrique , 25 (4), 19-25.
- [44] Zhang, H. (2006). Advanced techniques application of on-line partial discharge detection in power cables (Doctoral dissertation, UNSW Sydney).
- [45] Loubeau, F. (2016). Analyse des phénomènes de vieillissement des matériaux d'isolation électrique de machines de traction électrique (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [46] Ouramdane, B. A. A., & Malek, I. (2014). Etude des décharges électriques au niveau d'un point triple metal/gaz/solide isolant (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [47] Reid, AJ, Judd, MD, Fouracre, RA, Stewart, BG et Hepburn, DM (2011). Mesure simultanée des décharges partielles à l'aide des techniques IEC60270 et radiofréquence. Transactions IEEE sur les diélectriques et l'isolation électrique , 18 (2), 444-455.
- [48] AL MWLAD Yaqoob, M., & GHEDDARI, F. Neutralisation des charges électriques sur la surface des polymères isolants (Doctoral dissertation).
- [49] Ramier, J. (2004). Comportement mécanique d'élastomères chargés, Influence de l'adhésion charge-polymère, Influence de la morphologie. Lyon, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [50] Djemai, Z. (1991). Etude de la propagation des streamers à l'interface liquide-solide sous tension alternative 50 Hz (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- [51] Niemeyer, L., Pietronero, L., & Wiesmann, H. J. (1984). Fractal dimension of dielectric breakdown. Physical Review Letters, 52(12), 1033.
- [52] Kebbabi, L. (2006). Caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension-Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lyon).
- [53] Belhiteche, E. (2012). Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface. Mémoire de Magister en Electrotechnique, UMMTO.

Références bibliographiques

- [54] BOUKEZZI, L. (2007). Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension (Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique).
- [55] Bouguedad, D. (2010). Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [56] E. Belhiteche, M.A. Handala, F. Zeboudj "Evaluation of surface degradation of PVC under electrical aging using Dielectric Spectroscopy, SEM and FTIR analysis", *9th International Conference on Insulated Power Cables, Jicable'15 – Versailles 21-25 June, 2015*.
- [57] Du, BX et Li, J. (2014). Comportements au vieillissement électrique et mécanique des tubes isolants thermorétractables usagés. *Transactions IEEE sur les diélectriques et l'isolation électrique*, 21 (4), 1875-1881.
- [58] J.C. Dubois, Plastiques. « Propriétés Diélectriques, Techniques de l'Ingénieur », A3140, August 1984, pp. 1-19.

Résumé

Les polymères sont aujourd'hui largement utilisés dans le monde industriel. On les retrouve dans l'isolation des machines électriques, dans l'isolation de câbles électrique, etc. Cependant, quand ils (polymères) sont mis en service, ils sont vulnérables à l'action des décharges électriques. Dans notre étude nous nous sommes intéressés à l'influence des décharges électriques glissantes sur les propriétés du PRC utilisé dans l'isolation de câbles de transport d'énergie électrique. Nous avons montré que la durée de l'application de la contrainte électrique et la fréquence influent directement sur les propriétés diélectriques du PRC. L'augmentation de la durée de vieillissement engendre l'augmentation du facteur de pertes diélectriques et la diminution de la permittivité relative et de l'indice de perte, ce qui dénote la dégradation superficielle du matériau. Cette dégradation a été confirmée par les analyses FTIR.

Mots clés : Caractérisation, décharges électriques, FTIR, propriétés diélectriques, PRC.

Abstract:

Polymers are widely used in the industrial world today. They are found in the insulation of electrical machines, in the insulation of electrical cables, etc. However, when they (polymers) are put into service, they are vulnerable to the action of electrical discharges. In our study we were interested in the influence of sliding electrical discharges on the properties of the PRC used in the insulation of electrical energy transmission cables. We have shown that the duration of the application of the electrical stress and the frequency directly influence the dielectric properties of the PRC. The increase in the aging time leads to an increase in the dielectric loss factor and a decrease in the relative permittivity and the loss index, which denotes the surface degradation of the material. This degradation was confirmed by FTIR analyzes.

Keywords: Characterization, electric discharges, FTIR, dielectric properties, PRC.