

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

*Université Badji Mokhtar d'Annaba
Faculté des Sciences de l'Ingéniorat*

Département d'Électromécanique



THESE DE DOCTORAT

Spécialité : Électromécanique

Présentée par

LARBA Mohamed

Thème :

**Effets des décharges partielles sur les propriétés
diélectriques des isolants dans la fabrication des
câbles électriques**

Devant le jury :

Président :	Mr SAAD Salah	Pr	Univ. Badji Mokhtar Annaba
Rapporteur :	Mr BELHAMRA Ali	Pr	Univ. Badji Mokhtar Annaba
Co-rapporteur:	Mme M'ZIOU Nassima	MCA	Univ. Boumerdes
Examineurs :	Mr HEROUS Lazhar	Pr	Univ. Badji Mokhtar Annaba
	Mr SAOU Rachid	Pr	Univ. A. Mira Béjaia
	Mr ALKAMA Razak	Pr	Univ. A. Mira Béjaia

Année 2017

DEDICACE

*À la mémoire de mon oncle Iyad qui est parti
très tôt*

À ma mère et mon père

À mes frères et sœurs

*À toute ma famille en particulier mon
oncle Tayeb*

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué sous la direction de Monsieur Ali Belhamra, Professeur au Département d'Électromécanique à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba (UBMA). Qu'il me soit permis de lui exprimer mes vifs sentiments de gratitude, pour avoir dirigé ce travail, ainsi que Madame N. M'ziou Maitre de conférence à l'université de Boumerdes, pour son aide, le suivi et l'attention constante qu'elle a apporté à mon égard, lors de l'élaboration de ce travail.

Monsieur M.A. Handala, Maitre de conférence au département d'électrotechnique à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO) m'a accueilli dans son équipe en mettant à ma disposition le matériel nécessaire à la réalisation des expériences. Qu'il soit assuré de ma profonde reconnaissance pour l'accueil chaleureux, l'aide scientifique et l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de mes recherches.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à Monsieur S. Saad, Professeur au Département d'Électromécanique à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba (UBMA), pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail et de présider le jury d'examen.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur R. Saou, Professeur au Département Génie électrique à l'Université A. Mira de Béjaia, qui a aimablement accepté de participer à cette commission d'examen.

Mes remerciements vont encore à Monsieur L. Herouz, Professeur au Département d'Électromécanique à l'Université Badji Mokhtar d'Annaba (UBMA), pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mon travail et de faire partie du jury de soutenance.

Je désire aussi remercier Monsieur R. Alkama, Professeur au Département Génie électrique à l'Université A.Mira de Béjaia, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail.

Je tiens plus largement à exprimer ma reconnaissance à toutes celles et à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement au bon déroulement de mes travaux. Particulièrement j'adresse mes remerciements à Messieurs A. Medjdoub, E. Belhiteche, H. Goudjil, A. Hedir, A. Djalal, I.Boukhanef pour ses aides, ses conseils et ses contributions dans le bon déroulement de mes travaux.

Table des matières

Table des matières.....	1
Liste des figures.....	5
Glossaire.....	9
Liste des abréviations.....	10
Résumé en arabe	11
Résumé en français	12
Résumé en anglais	13
Introduction générale.....	14

Chapitre I : Généralités sur les isolants solides

I.1. Introduction.....	17
I.2. Différence entre isolant et diélectrique.....	17
I.3. matériaux isolants.....	18
I.3.1. Différentes structures d'un matériau solide	19
I.3.1.1. Structure cristalline	19
I.3.1.2. Structure amorphe.....	19
I.3.1.3. Structure semi- cristalline.....	20
I.3.2. Définition et structure d'un polymère.....	20
I.3.2.1. Définition.....	20
I.3.2.2. Classement des polymères.....	20
I.3.2.3. Différents niveaux structuraux.....	21
I.4. Notions de bandes d'énergie et définition d'isolants parfait et réel	22
I.4.1. Rappel sur la théorie des bandes d'énergie.....	22
I.4.2. Isolant parfait et isolant réel.....	22
I.5. Polarisation dans les diélectriques.....	24
I.6. Types de polarisation.....	28
I.6.1. La polarisation électronique.....	28
I.6.2. La polarisation ionique.....	28
I.6.3. La polarisation dipolaire.....	29
I.6.4. La polarisation interfaciale.....	29

I.6.5. La polarisation macroscopique.....	30
I.7. Vieillissement électrique des isolants.....	30
I.7.1. Scenario standard de vieillissement.....	30
I.7.2. Facteurs essentielles du vieillissement électrique des polymères isolants.....	32
I.8. Rigidité diélectrique et mécanismes de claquage.....	34
I.8.1. Définition.....	34
I.8.2. Mécanisme de claquage.....	34
I.8.2.1. Claquage électromécanique.....	34
I.8.2.2. Claquage thermique.....	34
I.8.2.3. Le claquage électronique.....	35
I.8.2.4. Le claquage par arborescence.....	35
I.14. Conclusion.....	35

Chapitre II : Décharge électrique dans l'interface air-solide

II.1. Introduction	36
II.2. Électrons primaires.....	36
II.3. Ionisation, recombinaison et attachement électronique.....	36
II.4. Avalanche électronique	38
II.5. Décharge de Townsend.....	39
II.6. la loi de Paschen	41
II.7. Théorie des streamers	42
II.8. Types de streamers	44
II.8.1. Streamer positifs	44
II.8.2. Streamers négatifs	45
II.9. Conclusion.....	47

Chapitre III : Décharge électrique de surface

III.1. Introduction.....	48
III.1. Décharges partielles.....	48
III.1.1. Définition.....	48
III.1.2. Classification des décharges partielles.....	48
III.2.3. Effets des décharges partielles.....	49
III.3. Décharge électrique de surface.....	49

III.3.1. Décharges glissantes.....	50
III.3.2. Caractérisation optique des décharges glissantes.....	50
III.3.3. Les décharges à barrière diélectrique.....	51
III.4. Forme des décharges surfaciques.....	52
III.5. Dégradation de la surface du solide.....	54
III.6. Conclusion.....	54

Chapitre IV : Moyens et dispositifs expérimentaux

IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Préparation des échantillons.....	55
IV.2.1. Matériau d'étude.....	55
IV.2.2. Mode opératoire.....	56
IV.2.3. Dimensionnements des éprouvettes	57
IV.3. Dispositifs expérimentaux.....	58
IV.3.1. Mesure du courant de décharge.....	58
IV.3.2. Vieillessement électrique.....	59
IV.3.3. Caractérisation diélectrique.....	60
IV.3.3.1 Permittivité relative.....	61
IV.3.3.2 Facteur de dissipation.....	62
IV.3.3.3 Indice de pertes diélectriques.....	62
IV.3.3.4 Résistivité transversale.....	62
IV.3.4. Analyse microscopique.....	63
IV.3.4.1. Constitution d'un microscope électronique à balayage (MEB).....	63
IV.3.4.2. Principe de fonctionnement du MEB.....	64
IV.3.4.3. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	66
IV.4. Protocole des essais.....	67
IV.4. Conclusion.....	68

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Introduction.....	69
V.2. Essais préliminaires.....	69
V.3. Courant de décharge de surface.....	70
V.3.1. Courant maximum de décharge	70

V.3.2. Influence de la tension appliquée sur le courant maximum de décharge.....	72
V.3.3. Influence de l'épaisseur de la couche d'air sur le courant maximum de décharge.....	74
V.3.4. Influence de temps du vieillissement sur le courant de décharge.....	76
V.4. Charge associée à la décharge électrique.....	77
V.5. Morphologie de la surface du solide isolant soumis aux décharges	80
V.6. Caractérisation électrique.....	80
V.6.1. Variation des propriétés diélectriques en fonction du temps de vieillissement....	80
V.6.1.1. Permittivité relative (Constante diélectrique).....	81
V.6.1.2. Facteur de pertes diélectriques.....	82
V.6.1.3. La résistivité transversale.....	83
V.6.2. Variation des propriétés diélectriques en fonction de la fréquence.....	83
V.6.2.1. Permittivité relative (Constante diélectrique).....	83
V.6.2.2. Facteur de pertes diélectriques.....	85
V.6.2.3. La résistivité transversale.....	85
V.6.3. Indice de pertes diélectriques.....	86
V.7. Observations visuelles des dégradations causées par le vieillissement électrique.....	88
V.8. Caractérisation physico-chimique.....	88
V.8.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	89
V.8.2. Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	90
V.9. Discussions.....	91
V.10. Conclusion.....	92
Conclusion et perspectives.....	95
Annexes.....	96
Références bibliographiques.....	100

Chapitre I : Généralités sur les isolants solides

Figure I.1. Les contraintes aux quelles est soumis un système d'isolation.....	19
Figure I.2. Différentes structures des polymères.....	21
Figure I.3. Diagramme de bande d'énergie dans un milieu isolant.....	22
Figure I.4. Diagramme d'énergie d'un isolant idéalisé.....	23
Figure I.5. Répartition des niveaux de pièges.....	24
Figure I.6. Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique.....	26
Figure I.7. Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait.....	27
Figure I.8. Circuit équivalent série représentant un diélectrique.....	27
Figure I.9. Diagramme de Fresnel pour un diélectrique imparfait.....	28
Figure I.10. Schéma représentant le scénario standard de vieillissement.....	30
Figure I.11. Vieillissement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et de champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu.....	31
Figure I.12. Trois sous catégories de l'arborescence électrique.....	32

Chapitre II : Décharge électrique dans l'interface air-solide

Figure II.1. Processus d'avalanche électronique.....	39
Figure II.2. Tension de claquage pour différents gaz en fonction de (p.d).....	42
Figure II.3. Création de l'avalanche.....	43
Figure II.4. Propagation des avalanches.....	44
Figure II.5. Processus de développement du streamer positif.....	44
Figure II.6. Processus de développement du streamer négatif.....	45

Figure II.7. Champ électrique engendré par la charge d'espace.....	46
Figure II.8. Champ radial autour de la tête d'avalanche.....	47

Chapitre III : Décharges électriques de surface

Figure III.1. Types de décharges partielles : a) internes ; b) de surface ; c) couronne ; d) en arborescence.....	48
Figure III.2. Système à décharges glissantes.....	50
Figure III.3. Figures originales de Lichtenberg 1777.....	51
Figure III.4. Système d'électrode pointe-plan.....	52
Figure III.5. Système d'électrode plan-plan.....	52
Figure III.6. Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 kV en polarité négative.....	53
Figure III.7. Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 kV en polarité positive.....	53

Chapitre IV : Moyens et dispositifs expérimentaux

Figure IV.1. Constituants d'un câble à haute tension.....	55
Figure IV.2. Vue de la presse utilisée pour la fabrication des plaques de PRC.....	57
Figure IV.3. Dispositif expérimental pour la mesure des courants de décharge.....	58
Figure IV.4. Dispositif expérimental pour le vieillissement électrique	60
Figure IV.5. Support des électrodes.....	60
Figure IV.6. Vue des différents éléments de mesure des propriétés diélectriques.....	61
Figure IV.7. Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage (MEB).....	63

Figure IV.8. Signaux produits par l'interaction d'un électron primaire avec l'échantillon.....65

Figure IV.9. Photographie du microscope électronique à balayage..... 65

Figure IV.10. Vue des différents éléments de mesure lors d'un essai FTIR..... 67

Chapitre V : Résultats et discussions

Figure V.1. Courbe de tension..... 69

Figure V.2. Courbe du courant de décharge et de la tension en fonction du temps ($V=10kV$)71

Figure V.3. Forme des impulsions positives..... 72

Figure V.4. Courant maximum de décharge en fonction de la tension pour les deux polarités.....73

Figure V.5. Courant maximum de décharge en fonction de la tension..... 74

Figure V.6. Système d'électrodes pointe-plan avec inclusion d'une couche d'air entre la pointe et le solide isolant..... 74

Figure V.7. Courant de décharge en fonction de la distance d'interface air-solide..... 75

Figure V.8. Influence du vieillissement sur le courant maximum de décharge..... 76

Figure V.9. Charge positive maximale en fonction de la tension appliquée..... 78

Figure V.10. Charge positive en fonction de l'épaisseur du solide isolant..... 79

Figure. V.11. Micrographie MEB du PRC, a) vierge, b) vieilli électriquement sous 10kV pendant 14 heures..... 80

Figure V.12. Constante diélectrique en fonction du temps du vieillissement..... 81

Figure V.13. Facteur de pertes diélectrique en du temps du vieillissement..... 82

Figure V.14. Variation de la résistivité transversale en fonction du temps du vieillissement..83

Figure V.15. Constante diélectrique en fonction de fréquence.....84

Figure V.16. Facteur de pertes diélectrique en fonction de fréquence.....85

Figure V.17. Variation de la résistivité transversale en fonction de fréquence.....86

Figure V.18. Indice de pertes diélectrique en fonction du temps de vieillissement.....87

Figure V.19. Indice de pertes diélectrique en fonction de fréquence.....87

Figure V.20. Photographies de la surface des échantillons vierge et vieillis sous 14 kv..... 88

Figure V.21. Spectres infrarouges du PRC avant et après vieillissement électrique..... 90

Figure V.22. Micrographie MEB du PRC sous 14kV a) non vieilli, b) vieilli pendant 6heures,
c) vieilli pendant 10heures, d) vieilli pendant 20heures..... 91

Glossaire

C : Capacité du solide isolant [F]
L : Longueur de la décharge
 σ : Conductivité
W : Énergie d'activation du processus de conduction [J]
 K_b : coefficient de Boltzmann = $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$
T : Température [°C]
 I_C : Courant de charge [mA]
 I_p : Courant de pertes d'énergie dans le diélectrique [mA]
 ω : Pulsation du courant alternatif
f : Fréquence [Hz]
 C_S : Capacité d'un condensateur parfait [pF]
R : Résistance du diélectrique réel [k Ω]
 C_0 : Capacité du condensateur sous vide
D : Déplacement électrique
 ϵ : Permittivité complexe absolue du diélectrique [F/m]
E : Champ électrique [kV/m]
U : Tension appliquée [kV]
 ϵ_0 : Permittivité du vide = $8,85 \cdot 10^{-12}$ [F/m]
 ϵ_r : Permittivité relative du diélectrique
 ϵ''_r : Indice de pertes diélectriques
 δ : Angle de perte [°]
 $Tg\delta$: Facteur de perte diélectrique
 P_0 : Polarisation induite par le champ électrique
 τ : Temps de relaxation [s]
S : Surface de l'éprouvette [mm²]
e : Épaisseur de l'éprouvette [mm]
 ρ : résistivité transversale [$\Omega \cdot \text{mm}$]
g : Distance inter-électrode [mm]

Liste des abréviations

PMMA : Poly Méthacrylate Méthyle

SAN : Styrène Acrylonitrile

PS : Polystyrène

PP : Polypropylène

PE : Polyéthylène

EP : Polyépoxyde

UP : Polyster

PVC : Polychlorure de vinyle

DP : Décharge partielle

PRC : Polyéthylène Réticulé Chimiquement

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

MEB : Microscopie Électronique à Balayage

XLPE : Polyéthylène Réticulé Chimiquement

ملخص

هذا العمل يقدم نتائج دراسة تجريبية عن آثار التفريغات الجزئية بما في ذلك التفريغات السطحية على الخصائص الكهربائية والعزلية للبولي إيثيلان المعرق كيميائيا وتشكل هذه التفريغات على المدى الطويل سببا هاما لشيخوخة العوازل. بالفعل، في الجزء الأول نقدم خصائص نبضات تيار التفريغ والشحنة المرتبطة بها في مصعدين ابري مستوي. ويتعلق الجزء الثاني بمتابعة تطور خصائص العزل (عامل فقدان العزل، السماحية النسبية، مؤشر الفقدان ومقاومية الحجم) للبولي إيثيلان المعرق كيميائيا المعرض للشيخوخة الكهربائية المتسرة. خاصة التغيرات الناجمة عن العائق الكهربائي على مستوى التركيب الجزيئي للمادة كان موضوع الجزء الثالث من عملنا.

الكلمات المفتاحية : البولي إيثيلان المعرق كيميائيا، التفريغ الجزئي، تيار التفريغ، التشيخ الكهربائي، خصائص العزلية.

Résumé

Ce travail présente les résultats d'une étude expérimentale sur les effets des décharges partielles notamment les décharges surfaciques sur les propriétés électriques et diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), au long terme ces décharges constituent une cause significative du vieillissement des isolants. En effet, dans une première partie nous présentons les caractéristiques des impulsions du courant de décharge et la charge associée dans une configuration d'électrode pointe plan. La deuxième partie concerne le suivi de l'évolution des propriétés diélectriques (facteur de pertes diélectriques, permittivité relative, indice de pertes diélectrique et la résistivité transversale) du (PRC) soumis à un vieillissement électrique accéléré. La caractérisation des changements causés par la contrainte électrique au niveau de la structure moléculaire du matériau a fait l'objet de la troisième partie de notre travail.

Mots-clés: Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), Décharge partielle, Courant de décharge, Vieillissement électrique, Propriétés Diélectriques.

Abstract

This work present present the results of an experimental study on the effects of partial discharges, in particular surface discharges on the electrical and dielectric properties of cross-linked polyethylene (XLPE). In the long term these discharges constitute a significant cause of aging insulation. Indeed, in a first part we present the characteristics of the currents discharges and the charge associated in a point-plan arrangement. The second part deals with the follow-up of the evolution of dielectric properties (dielectric losses factor, relative permittivity, dielectric losses index and transversal resistivity) of the (XLPE) subjected to accelerated electrical aging. The characterization of the changes caused by the electrical constraint at the molecular structure of the XLPE has been the subject of the third part of our work.

Keywords: Cross-linked polyethylene (XLPE), Partial discharge, Discharge current, Electrical aging, Dielectric properties.

Introduction générale

Introduction générale

1. Problématique

Depuis les années 40, les matériaux isolants traditionnels tels que le papier imprégné sont remplacés par les isolants synthétiques, spécialement les polyéthylènes [1]. Le polyéthylène (PE) est un polymère semi-cristallin possédant d'excellentes propriétés électriques (faible constante diélectrique, faibles pertes diélectriques et une grande rigidité diélectrique), physiques et mécaniques [2]. En plus de ses bonnes propriétés, le PE a cette réputation d'être l'un des polymères les moins coûteux et les plus faciles à mettre en œuvre. Dans les applications industrielles, les polyéthylènes sont souvent utilisés comme isolation électrique pour les câbles moyenne et haute tension [3].

A cause du comportement thermoplastique du (PE) ainsi que sa mauvaise tenue à haute température limite son utilisation comme isolant des câbles électriques, c'est dans ce cadre que le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) est devenu un produit de remplacement du (PE) dans la fabrication des câbles moyenne et haute tension grâce à ses excellentes propriétés électriques [4] et thermiques comparé au polyéthylène [5]. Le PRC a été initialement utilisé comme isolant de câbles de distribution de 3 kV à 6 kV dans les années 60 [6]; actuellement, il est utilisé comme isolant de câbles de très haute tension allant de 275 à 500 kV [7].

Au cours des différentes phases de fabrication d'un câble, des impuretés de tailles microscopiques et de formes diverses peuvent être piégées dans l'isolant (siège d'une décharge partielle interne) ou créées à l'interface des zones conductrices ou semi-conductrices (décharge superficielle) malgré les précautions prises aussi bien par les fabricants de matières premières que par les constructeurs. Des inhomogénéités dans la structure de l'isolant peuvent être créées au cours de l'extrusion ou du refroidissement de la couche isolante. Ces hétérogénéités induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique ainsi qu'un renforcement de ce dernier pouvant conduire à la génération, à plus ou moins long terme, d'arborescences. Ces défauts ou facteurs de vieillissement peuvent conjointement contribuer, en présence des contraintes électriques et thermiques, à la dégradation des propriétés principales du matériau en fonction du temps qui peut, dans certains cas, devenir forte et conduire à la détérioration de l'isolant par rupture diélectrique ou thermique [8].

Les courants de décharge de surface présentent une contrainte sévère pour la vie de l'isolation solide. Ils peuvent mener à la dégradation du diélectrique par la transformation progressive de ses propriétés physico-chimiques [9], et la mesure de la charge de surface

associée à une décharge électrique a une grande importance pour l'évaluation des performances électriques des matériaux isolants utilisés en haute tension [10]. En revanche, la charge qui s'accumule sur la surface d'un diélectrique favorise la conduction superficielle du matériau.

En générale, dans la fabrication des câbles électriques, on ne peut pas éviter la pénétration des particules étrangères au sein de l'isolant (appelés défauts ou impureté), et nous pouvons difficilement réaliser un tel cas pour l'état de l'influence de ces particules. Par contre nous pouvons facilement élaborer des dispositifs expérimentaux pour étudier les décharges surfaciques, ainsi que l'évolution des propriétés diélectriques d'un isolant solide soumis à une contrainte électrique. C'est dans cette optique que nous nous intéressons dans cette thèse à la caractéristique des impulsions du courant de décharge aux interfaces air/solide, dans une configuration d'électrodes pointe-plan et à la mesure également de la charge associée. Ainsi que l'effet des décharges surfaciques sur les propriétés diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), en basant sur des essais du vieillissement électrique accéléré sur des échantillons du (PRC) sous champ électrique intense. L'originalité de cette étude réside dans le fait que les mesures sont réalisées et réside également dans le fait qu'elle présente un complément de résultats de caractérisation basé sur des techniques physico-chimiques pour identifier les changements causés par le vieillissement à l'échelle moléculaire. En plus, ces mesures contribuent à l'enrichissement de la base de données existante dans la littérature et vérifie la reproductibilité des résultats.

2. Objectifs de l'étude

Le sujet que nous nous proposons d'aborder est en relation direct avec l'étude et la compréhension des phénomènes du vieillissement électrique du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) fabriqués par l'Entreprise Nationale des Industries des Câbles de Biskra (ENICAB) et utilisé pour l'isolation des câbles moyenne et haute tension de transport d'énergie électrique et plus particulièrement du réseau algérien. Les essentiels Objectifs de cette étude sont :

- Étude de l'effet de l'interface air-solide sur les impulsions du courant de décharge et la charge associée dans une configuration d'électrodes pointe plan.
- Étude de l'évolution des propriétés diélectriques (permittivité diélectrique, facteur de perte diélectrique et la résistivité transversale) du PRC soumis au vieillissement électrique accéléré sous champ électrique alternatif.

- Corrélation de la variation des propriétés citées ci-dessus avec les changements morphologiques et structurels subis par le matériau.

Le présent manuscrit est organisé en cinq chapitres et une conclusion générale avec également les perspectives ouvertes par cette étude.

Le premier chapitre, présente des généralités sur les diélectriques : définition, Différentes structures d'un matériau solide, et plus particulièrement les polymères (polarisation et leur vieillissement sous contrainte électrique) et à la fin, la rigidité diélectrique et les mécanismes du claquage sont détaillés.

Le deuxième chapitre a pour objectif la description des mécanismes des décharges électrique dans les gaz.

Le troisième chapitre décrit les différents types des décharges partielles dont nous intéressons par les décharges surfaciques.

Dans le quatrième chapitre nous expliquons les techniques expérimentales utilisées dans les caractérisations électriques, et physico chimiques du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à la contrainte électrique. Le dispositif expérimental utilisé pour la mesure des courants de décharge est présenté dans ce chapitre.

Dans le cinquième chapitre, nous donnons les résultats de caractérisation de notre matériau suivis par des interprétations et des commentaires. Dans une première partie de ce chapitre, l'étude des courants des décharges et la charge associée à une décharge électrique sont présentées. L'évolution des propriétés diélectriques (facteur de pertes diélectriques, permittivité relative et résistivité transversale) en fonction du temps de vieillissement et de la fréquence est présentée dans la deuxième partie. L'évolution de la morphologie du PRC au cours du vieillissement a fait l'objet de la troisième partie de ce chapitre.

Chapitre I

Généralités sur les isolants solides

I.1. Introduction

Les matériaux isolants solides sont beaucoup utilisés dans le domaine de l'industrie électrotechnique. Ces matériaux occupent une place importante dans les applications électriques puisque pouvant jouer un rôle de support mécanique en plus de leur fonction principale d'isolation. Grâce à ces excellentes propriétés électriques et mécaniques, les polymères sont largement utilisés dans la fabrication des câbles à isolation synthétique à moyen et haute tension.

L'objectif de ce chapitre est de donner des généralités sur les polymères et également de présenter un rappel des aspects fondamentaux sur les matériaux isolants solides.

I.2. Différence entre isolant et diélectrique

Lorsque on observe les matériaux sous l'angle de leur réponse à une sollicitation électrique, on est appelé à parler soit de diélectrique soit d'isolant. Afin d'éviter toute incompréhension nous donnons les définitions suivantes : [11]

- **Un isolant** est un matériau que ne conduit pas l'électricité. Sa destination première est d'empêcher tout contact entre des pièces métalliques portées à des potentiels différents. Une façon plus simple de définir un matériau isolant est de lire qu'il est caractérisé par une résistivité électrique très élevée. A l'opposé de celle des métaux, la résistivité de ces matériaux décroît lorsque leur température augmente.
- **Un diélectrique** est 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.

I.3. matériaux isolants

Les matériaux isolants trouvent des applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. Ils ont joué un rôle prépondérant dans les progrès faits par les matériels électriques. Ils constituent sans aucun doute les facteurs clés du développement des matériels électrotechniques de demain.

Les matériaux utilisés aujourd'hui sont extrêmement nombreux et variés. Le choix et l'emploi posent les problèmes les plus délicats, il doit répondre à un processus complexe. Le plus difficile à maîtriser est non seulement l'interaction de toute les contraintes que peuvent influencer sur la tenue du système d'isolation mais aussi de l'impact sur l'environnement et la sécurité des biens et des personnes.

Les contraintes auxquelles est soumis un système d'isolation sont :

- **Contraintes électriques** : champ électrique, charge d'espace, décharge partielle, arborescence électrique, etc....
- **Contraintes thermiques** : échauffement des conducteurs par effet joule et par effet de Foucault, pertes magnétiques (transformateur), pertes diélectriques, etc....
- **Contraintes mécaniques** : effort sur les conducteurs, forces dues aux mouvements (machines tournantes), vibrations, forces de charge (isolateur de ligne), etc....
- **Contraintes climatiques** : rayonnement solaire, intempéries, pollutions (marine, industrielle), humidité, pluie, gel, air, ozone, etc....
- **Contraintes radiatives** : dans les applications nucléaires, spatiale, médicale, résistants aux rayonnements, etc.
- **Contraintes environnementales** : impact sur l'environnement en termes de rejet de toute nature (gazeux, solides, liquides), la toxicité des produits, traitement en fin de vie (recyclage), etc....

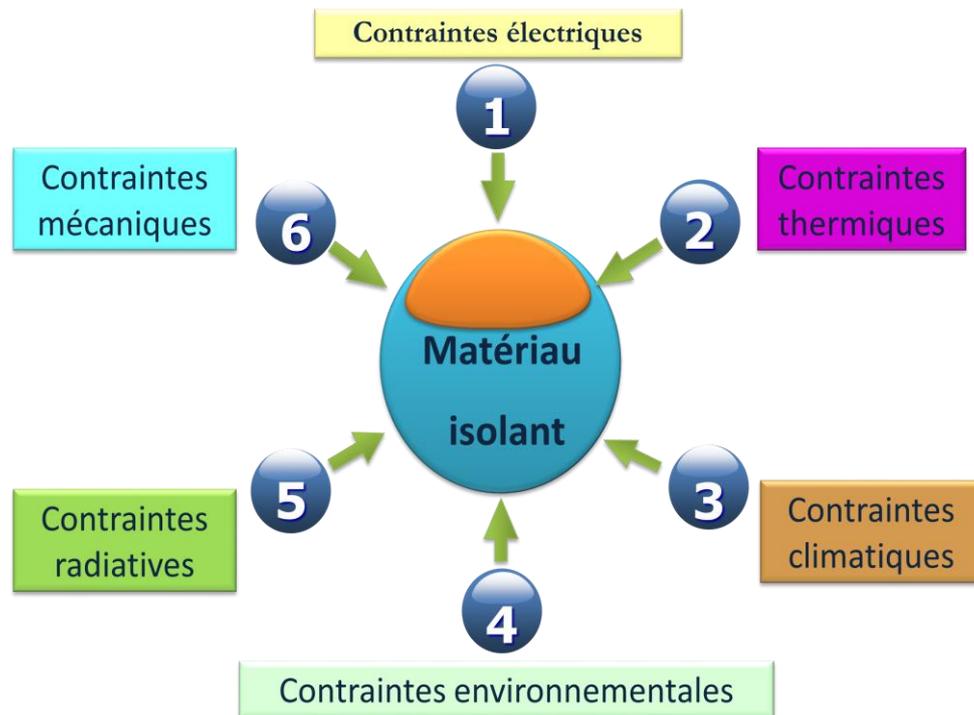


Figure I.1. Les contraintes aux quelles est soumis un système d'isolation [11]

I.3.1. Différentes structures d'un matériau solide

L'arrangement des atomes dans les solides peut prendre un caractère ordonné ou désordonné et conduire à plusieurs types de structures :

I.3.1.1. Structure cristalline

La structure cristalline est caractérisée par une distribution périodique régulière de particules constituant le matériau (ordre à longue distance, réseau cristallin).

L'ensemble des matériaux métalliques et un grand nombre de céramiques ont une structure cristalline [12, 13].

I.3.1.2. Structure amorphe

La structure amorphe est une structure dense et peu ordonnée. Elle est de type pelote statique dans laquelle on ne distingue aucun ordre à grande échelle. Cette structure est rencontrée dans certaines céramiques ainsi que dans de nombreux polymères organiques tels que le polyméthyle méthacrylate (PMMA), le styrène acrylonitrile (SAN) et le polystyrène (PS).

I.3.1.3. Structure semi- cristalline

Cette structure est une structure complexe caractérisée par la coexistence de phases amorphes et cristallines en proportion variable (présence de cristallinité). Cette structure est rencontrée dans de nombreux polymères organiques tels que le Polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE).

I.3.2. Définition et structure d'un polymère

I.3.2.1. Définition

Un polymère est un matériau organique (plastique ou caoutchouc) à structure macromoléculaire. La macromolécule ou polymère est formée d'un enchaînement covalent de motifs structuraux simples, identiques, appelés monomères [14, 15, 16, 17]. Le nombre de monomères formant le polymère représente le degré de polymérisation peut atteindre plusieurs centaines de milliers [18]. La dimension d'un monomère est de l'ordre de 0.2 à 1 nm alors que celle du polymère peut atteindre quelques milliers de nm [17]. La masse molaire du polymère est supérieure à $10\,000\text{ g. mol}^{-1}$ [15].

Les polymères sont, dans l'ensemble, peu dense, compte tenu de leur origine organique et par la suite d'éléments constitutifs légers (carbone, oxygène, hydrogène etc...). La liaison de base du polymère est la liaison covalente des carbones qui est très forte (100 à 450 kJ/mol). Par conséquent, les polymères possèdent une élasticité élevée dans les sens de la chaîne macromoléculaire [15].

I.3.2.2. Classement des polymères

Les polymères sont souvent classés suivant leurs propriétés thermomécaniques. On distingue :

- **Les thermoplastiques** : les polymères thermoplastiques sont des polymères linéaires sans pont d'une molécule à l'autre, et c'est pour cette raison qu'ils se ramollissent au chauffage et leur mise en œuvre est facile.
- **Les thermodurcissables** : Ils sont fabriqués en mélangeant deux constituants (une résine et un durcissant), qui réagissent et durcissent, tantôt à chaud, tantôt à température ambiante. Le polymère obtenu comprend de nombreuses liaisons covalentes de chaînes à chaînes. Sous l'action de la chaleur, la structure du polymère se ramollit mais ne fond pas.
- **Les élastomères** : Les élastomères sont des polymères linéaires avec juste quelques ponts (1 % monomères). Ces ponts fournissent au matériau une " mémoire" de sa

forme initiale, qu'il retrouve après décharge (déformable d'une manière réversible).
 les principaux élastomères sont : Polyépoxyde (EP), Polyster (UP), Phénol-formaldéhyde.

- **Les polymères naturels** : Les principaux polymères naturels utilisés sont :
- le polyisoprène (caoutchouc), les protéines de la laine et la soie ;
 - les celluloses et les lignines constituantes principales du bois et de la paille.

I.3.2.3. Différents niveaux structuraux

Les polymères sont formés de très grosses molécules (jusqu'à des centaines de millier d'atomes) se présentant sous forme de chaînes reliées entre elles par des liaisons de faible intensité. Ces chaînes se forment par polymérisation c'est-à-dire par adjonction de petites unités (monomères) les unes aux autres. Si au moins deux types de monomère sont chimiquement différents, le polymère est appelé copolymère. Les monomères peuvent être disposés en blocs ou au hasard (copolymère statique). Pour le premier type, le copolymère présente les qualités des deux monomères et pour le second il perd sa régularité et sa capacité à se cristalliser.

Les monomères peuvent présenter des structures variées allant de la forme linéaire la plus simple à une configuration ramifiée sous différentes formes (peigne, dendrite, étoile ou réseau) [15, 19]. Si les macromolécules s'enchaînent dans les trois directions de l'espace, le copolymère est dit réticulé. La figure I.2 illustre les différentes structures des polymères.

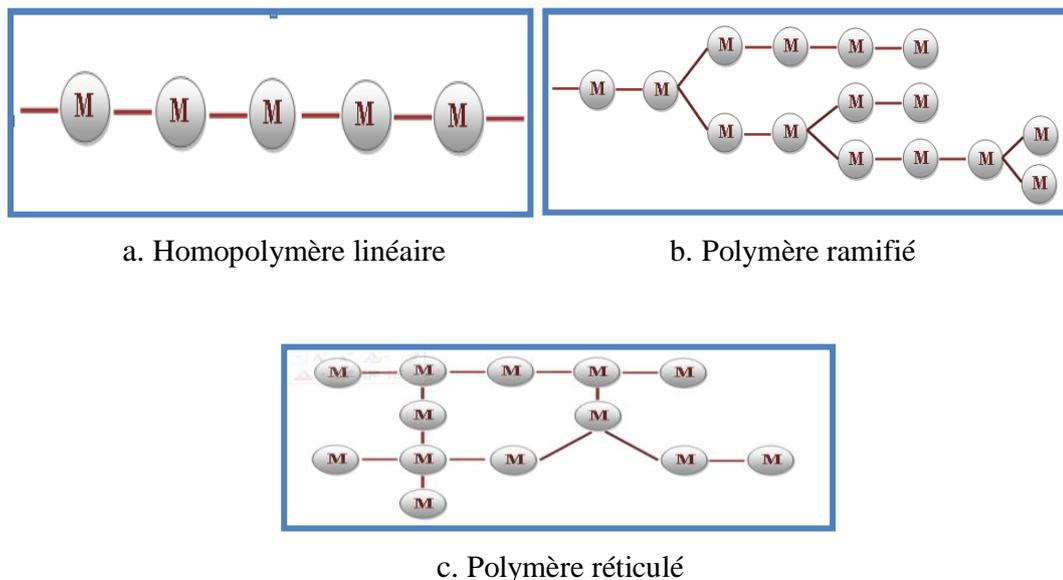


Figure I.2. Différentes structures des polymères [11]

I.4. Notions de bandes d'énergie et définition d'isolants parfait et réel

I.4.1. Rappel sur la théorie des bandes d'énergie

La notion de bande d'énergie est, en général, associée à des réseaux cristallins ordonnés. Dans ce type de réseaux, les interactions entre orbitales moléculaires des atomes forment des états dégénérés conduisant à deux bandes distinctes : la bande de valence et la bande de conduction appelées bandes permises. Dans la bande de valence, les trous peuvent se mouvoir et dans la bande de conduction, les électrons peuvent se déplacer librement. Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite ou gap. Dans les bandes permises, le nombre de places varie en fonction de l'énergie comme une fonction $N(E)$ appelée densité d'état (voir figure I.3). Cette notion de diagramme de bande peut être étendue aux polymères bien qu'ils n'aient pas une structure cristalline parfaite.

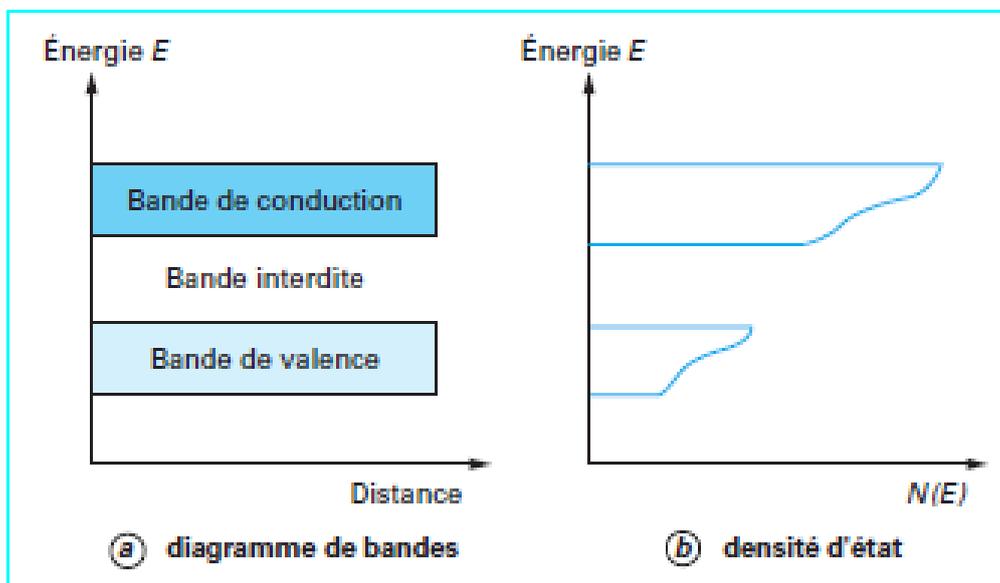


Figure I.3. Diagramme de bande d'énergie dans un milieu isolant [20]

I.4.2. Isolant parfait et isolant réel

Un matériau isolant est dit parfait s'il ne présente aucun défaut de structure et une pureté parfaite de telle sorte que les seules charges existantes soient les électrons et les noyaux des atomes ou molécules du réseau. La largeur de la bande interdite est tellement importante (entre 8 et 10 eV) que la densité des électrons libres liés à l'excitation thermique est négligeable et par conséquent le courant de conduction est nul. Cependant, même en situation parfaite, les électrons de valence peuvent être dissociés des noyaux par un champ électrique fort (10^8 à 10^9 V/m) [21,20].

En réalité, il n'existe pas d'isolants parfaits, ils présentent toujours une très faible conductivité due principalement à :

- l'existence des sources de charges autres que les atomes du réseau ;
- la structure semi cristalline ou amorphe des isolants réels. En effet, le désordre de la structure et la présence d'impuretés introduisent des états électroniques localisés dans la bande interdite comme l'illustre la figure I.4.

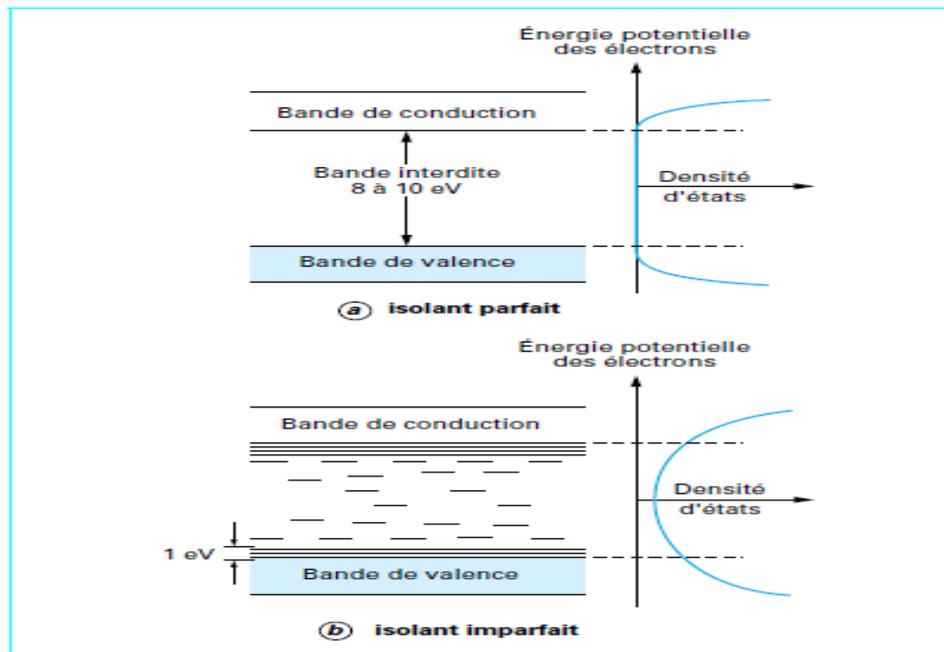


Figure I.4. Diagramme d'énergie d'un isolant idéalisé [21]

Selon le modèle des bandes d'énergie, la matière devient diélectrique, c'est à dire mauvaise conductrice de l'électricité, quand la largeur de la bande interdite est supérieure à 5 eV mais inférieure à 10 eV. Alors, un très petit nombre seulement d'électrons reçoivent, à température ordinaire, l'énergie thermique nécessaire pour effectuer une transition dans la bande de conduction. Quand la température s'élève, la probabilité de transition augmente et la conductivité σ s'exprime par :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \quad (\text{I.1})$$

Où W est l'énergie d'activation du processus de conduction.

La relation (I.1) est valable pour les diélectriques cristallins, amorphes ou partiellement cristallins tels que les polymères.

Le déplacement des électrons dans la bande interdite est favorisé par la densité d'état d'énergie. En effet, les électrons utilisent les différents niveaux comme échelle pour franchir la bande interdite ou pour rester piégés longtemps dans des sites plus profonds [22]. On distingue deux types d'états localisés comme le montre la figure I.5:

- les états localisés proches les uns des autres, c'est-à-dire que leurs orbitales se chevauchent. Cette situation permet un déplacement facile des charges avec un apport modéré d'énergie (quelques dizaines d'électrons-volts). Ces sites se trouvent proche des bordures de bandes.
- Les états localisés qui sont isolés. Ils se situent plus profondément dans la bande interdite et forment des sites de piégeage.

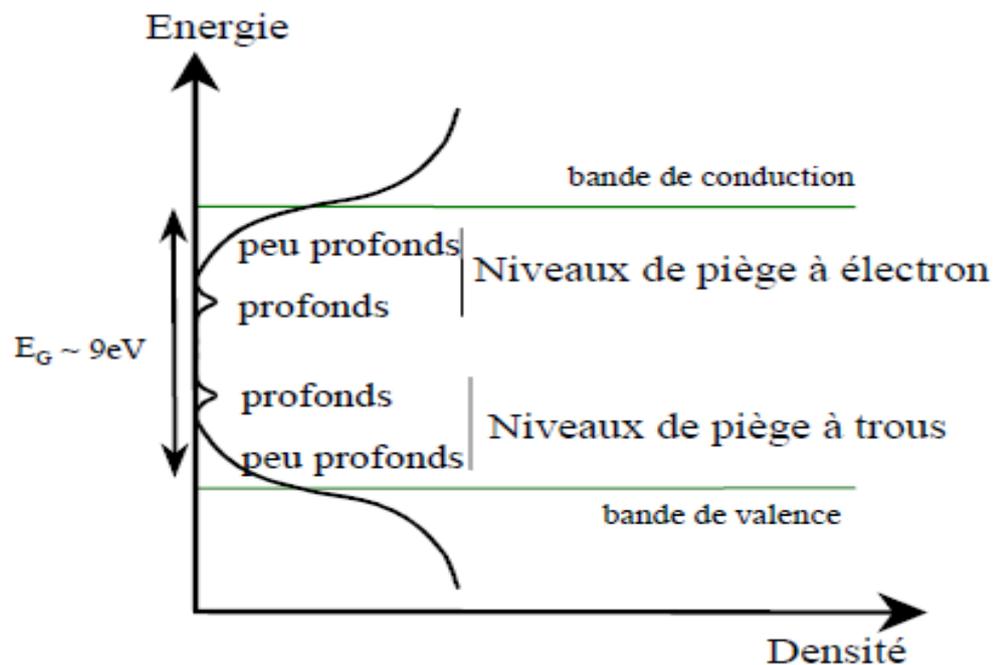


Figure I.5. Répartition des niveaux de pièges [22]

I.5. Polarisation dans les diélectriques

Dans un diélectrique imparfait, la polarisation est due à des mécanismes de déformation de la répartition des charges électriques sous l'influence du champ électrique. Dans un champ électrique alternatif, cette polarisation ne suit pas le champ d'une façon instantanée. Cette relaxation diélectrique induit une perte d'énergie. Un tel condensateur est équivalent à un circuit comportant une résistance en parallèle avec une capacité (Figure I.6) [23]. Le courant alternatif complexe I résultant de l'application de la tension alternative \underline{U} aux bornes d'un condensateur plan rempli de diélectrique s'écrit :

$$I = I_C + I_P \quad (I.2)$$

Avec :

I_C : courant de charge.

I_P : courant de pertes d'énergie dans le diélectrique (dus à la polarisation).

Les courants I_c et I_p sont donnés par les relations suivantes :

$$I_C = j \omega C_S U \text{ et } I_P = \frac{U}{R} \quad (I.3)$$

Avec ω : pulsation du courant alternatif.

C_S : capacité d'un condensateur parfait.

R : résistance du diélectrique réel.

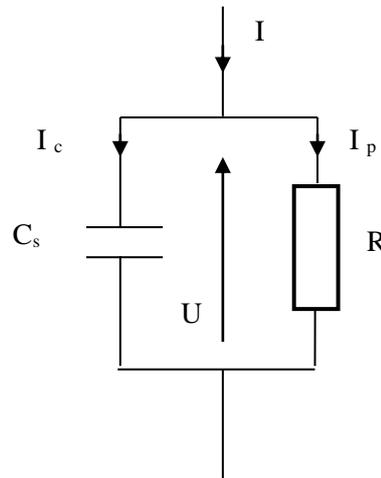


Figure I.6. Circuit équivalent parallèle représentant un diélectrique

En pratique, I est proportionnel à $C_0 U$ et peut être écrit :

$$I = j \omega (\epsilon'_r - j \epsilon''_r) C_0 U \quad (I.4)$$

Avec : C_0 : capacité du condensateur sous vide.

La polarisation du point de vue macroscopique est donc caractérisée par l'apparition de deux minces couches de charges électriques de signes opposés, chacune sur une face du matériau [24]. La relaxation est due au fait, au déphasage entre le déplacement électrique D et le champ électrique E qui fait, qu'en tension alternative, la polarisation par orientation des dipôles est plus difficile et entraîne des pertes d'énergie active, d'où [25] :

$$D = \varepsilon E \quad (I.5)$$

Où : ε est la permittivité complexe absolue du diélectrique définie comme :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (I.6)$$

Avec : ε_0 : la permittivité du vide ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m).

ε_r : la permittivité relative complexe du diélectrique définie comme :

$$\varepsilon_r = \varepsilon'_r - j \varepsilon''_r \quad (I.7)$$

ε_r : Permittivité relative du diélectrique ou la constante diélectrique en courant alternatif.

ε''_r : Indice de pertes diélectriques.

La permittivité absolue ε définit la possibilité d'être traversé par un courant électrique, sous l'action du champ électrique. Ceci résulte de diverses contributions de déplacement de charges : déplacement des électrons, déplacements des atomes et des ions, orientation des dipôles électriques et déplacement des charges d'espace.

Dans le cas d'un diélectrique parfait, $\varepsilon_r = \varepsilon'_r$ est le quotient de la capacité C_s entre deux électrodes, supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité C_0 de la même configuration d'électrodes dans le vide :

$$\varepsilon_r = \frac{C_s}{C_0} \quad (I.8)$$

La séparation des charges positives et négatives ainsi produites entraîne l'apparition de dipôles électriques qui tendent à s'aligner dans la direction du champ électrique [26]. Toutefois, un déphasage subsiste entre la direction du champ électrique et l'établissement des dipôles, entraînant une dissipation d'énergie responsable des pertes diélectriques caractérisées par $\tan \delta$, représentant le facteur de dissipation ou tangente de l'angle de pertes ou facteur de pertes diélectriques (figure .I.7).

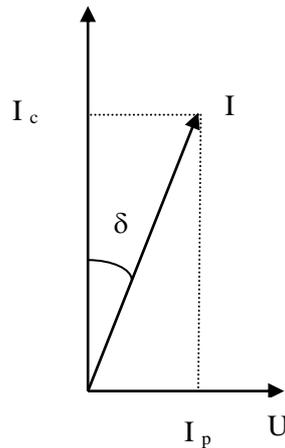


Figure I.7. Diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait

On calcule ce facteur en faisant le rapport entre la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance équivalente du diélectrique :

$$\operatorname{tng}\delta = \frac{I_p}{I_c} = \frac{1}{RC_s\omega} \quad (\text{I.9})$$

Il existe une deuxième configuration où un isolant peut être modélisé par un schéma équivalent série (figure I.8).

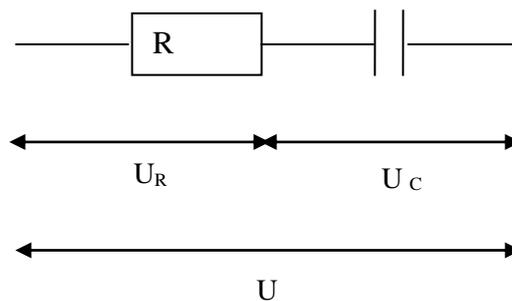


Figure I.8. Circuit équivalent série représentant un diélectrique

Dans ce cas, le diagramme de Fresnel est représenté en figure I.9.

$$\operatorname{tng}\delta = R C_s\omega \quad (\text{I.10})$$

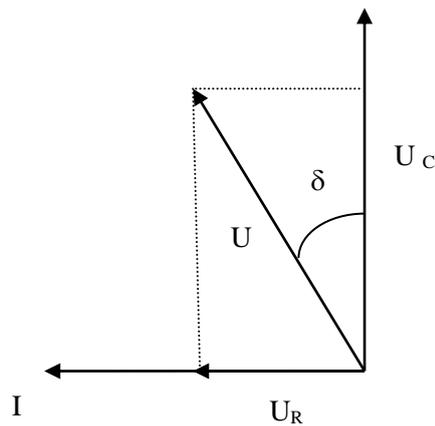


Figure I.9. Diagramme de Fresnel pour un diélectrique imparfait

La conductivité en courant continu est souvent faible et les dissipations d'énergie en courant alternatif proviennent principalement de la relaxation des différentes polarisations [27, 23].

I.6. Types de polarisation

I.6.1. La polarisation électronique

La polarisation électronique est présentée dans tous les diélectriques, sans exception. Quand un champ électrique est appliqué, le nuage électronique de chaque atome est déplacé légèrement par rapport au noyau, donnant un dipôle induit. Cette polarisation résulte donc des déplacements des orbites électroniques externes par rapport au noyau de l'atome et elle s'établit en quelques 10^{-15} s. La déformation de l'orbite qui l'accompagne est élastique, c'est-à-dire que le travail nécessaire à son apparition n'est pas converti en chaleur mais stocké dans le champ électrique. La polarisation élastique électronique ainsi que les dipôles induits disparaissent quand le champ est supprimé.

I.6.2. La polarisation ionique

La polarisation ionique (ou atomique) résulte du déplacement des atomes liés par des liaisons ioniques. Lorsque différents atomes sont présents dans une molécule ne possédant pas de moment dipolaire permanent, les électrons participant aux liaisons de covalence se déplacent préférentiellement vers l'atome le plus électronégatif, créant ainsi, sans contrainte extérieure, un moment de liaison (moment dipolaire induit). Si l'on superpose un champ électrique, les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres, donnant naissance à une polarisation ionique qui met en jeu le déplacement d'atomes au sein de la molécule. On

rencontre les liaisons ioniques dans la plupart des diélectriques solides non-organiques avec une structure cristalline. Vu l'inertie des ions relativement lourds, ce type de polarisation s'établit aux environs de 10^{-13} s, donc plus lentement que la polarisation électronique. La polarisation ionique, de même que la polarisation électronique, créent des dipôles induits, elle ne provoque pas de pertes d'énergie et disparaît avec la suppression du champ appliqué. C'est donc une polarisation élastique.

I.6.3. La polarisation dipolaire

La polarisation dipolaire (ou d'orientation) consiste en l'orientation, sous l'action du champ électrique, des molécules polaires, c'est-à-dire celles qui possèdent un moment dipolaire permanent. La structure de ces molécules est asymétrique : le centre de gravité résultant de toutes les charges négatives d'une telle molécule ne coïncide pas avec celui de toutes ses charges positives. C'est le cas du polychlorure de vinyle (PVC), qui a un fort moment dipolaire permanent.

Quand un champ électrique constant est appliqué, la polarisation d'orientation n'atteint pas immédiatement sa valeur maximale et de même, à la coupure du champ, la polarisation décroît au bout d'un temps t déterminé. La polarisation s'exprime (en C/m^2) généralement par une équation de la forme [23] :

$$P = P_0 \exp(-t/\tau) \quad (I.11)$$

Avec P_0 : polarisation induite par le champ électrique.

τ : temps de relaxation.

La polarisation d'orientation joue un rôle important dans les matériaux macromoléculaires auxquels elle leur confère une valeur relativement élevée de la permittivité relative ϵ_r , une forte variation de cette constante avec la température et une valeur importante du facteur de pertes diélectriques (10^{-3} à 10^{-2}) variant rapidement avec la température.

I.6.4. La polarisation interfaciale

La polarisation interfaciale ou de charge d'espace (effet Maxwell-Wagner-Sillars) apparaît dans les matériaux hétérogènes. Elle provient de l'accumulation de charges aux interfaces des différentes phases constituant les matériaux lorsque ces différentes phases ont des permittivités et des conductivités différentes. C'est le cas du polyéthylène contenant une

charge de conductivité appréciable tel que le noir de carbone. Dans ce cas, des charges d'espace peuvent alors s'accumuler aux interfaces créant des distorsions macroscopiques du champ appliqué. Ces charges d'espace proviennent du fait que les porteurs de charges qui, habituellement, peuvent migrer jusqu'aux électrodes dans un diélectrique homogène, sont piégés aux interfaces. Le temps d'établissement de la polarisation interfaciale est de quelques 10^{-2} à 10^{-1} s [28]. Ce type de polarisation possède aussi un caractère de relaxation ; le temps de relaxation augmente quand la conductivité décroît.

I.6.5. La polarisation macroscopique

La polarisation macroscopique (appelée également polarisation de la charge spaciale) décrit le processus de déplacement limité des charges libres. Elle peut être rencontrée dans les diélectriques ayant surtout une structure non-homogène ou amorphe. La polarisation macroscopique s'établit lentement. Selon le type de matériau et des conditions de mesure (température, hygrométrie), le courant de déplacement qui l'accompagne lorsqu'une tension constante est appliquée, peut être observé durant une période de quelques millisecondes à des centaines d'heures [27].

I.7. Vieillessement électrique des isolants

I.7.1. Scénario standard de vieillissement

Le scénario le plus connu est celui illustré sur la figure I.10, ce scénario s'appuie sur des théories de plusieurs travaux. Ces théories seront d'appui pour illustrer les différentes étapes de ce processus à la fois lent et compliqué.

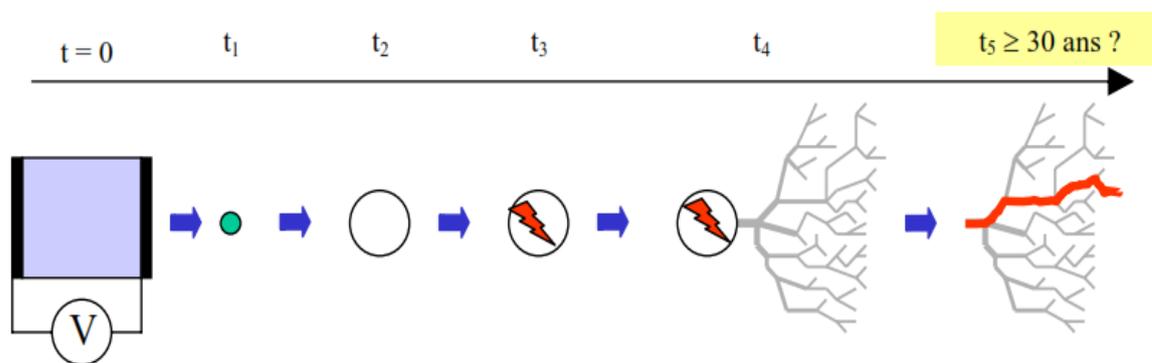


Figure I.10. Schéma représentant le scénario standard de vieillissement [29]

Selon le scénario standard, la rupture diélectrique fait suite à un processus lent dans l'évolution des propriétés physico-chimiques du matériau polymère. Initialement et en début

de service le matériau peut être avec ou sans défauts ($t=0$). L'application d'un champ électrique a pour conséquence une apparition ou une croissance de cavités ($t=t_1$ jusqu'à t_2), cette étape n'est autre que le vieillissement électrique. La création ou la croissance de vacuoles peut conduire à son tour à la dégradation électrique si des décharges électriques prennent naissance, ($t=t_3$).

Les électrons générés dans ces décharges ont suffisamment d'énergie pour briser des chaînes macromoléculaires sur les surfaces internes de la vacuole. Les modifications structurales (chimique et physique) du matériau et le cumul des différents phénomènes vont finir par constituer des segments ionisés préférentiels pour la croissance d'une arborescence électrique ($t=t_4$), qui est la dernière phase de la dégradation électrique. Cette dégradation est susceptible à son tour de conduire l'isolant à la fin de sa vie c'est-à-dire à une rupture dès que les conditions défavorables sont remplies (champ fort, instabilité thermique,...), des conditions qui ne sont pas rencontrées sur un objet normalement isolé, mais elles peuvent résulter de l'évolution préalable du matériau.

Les trois mécanismes fondamentaux décrivent l'endommagement général d'un isolant sous champ électrique à savoir: le vieillissement électrique, la dégradation et la rupture diélectrique sont représentés sur la figure I.11 selon le temps et le champ électrique auxquels ils peuvent avoir lieu.

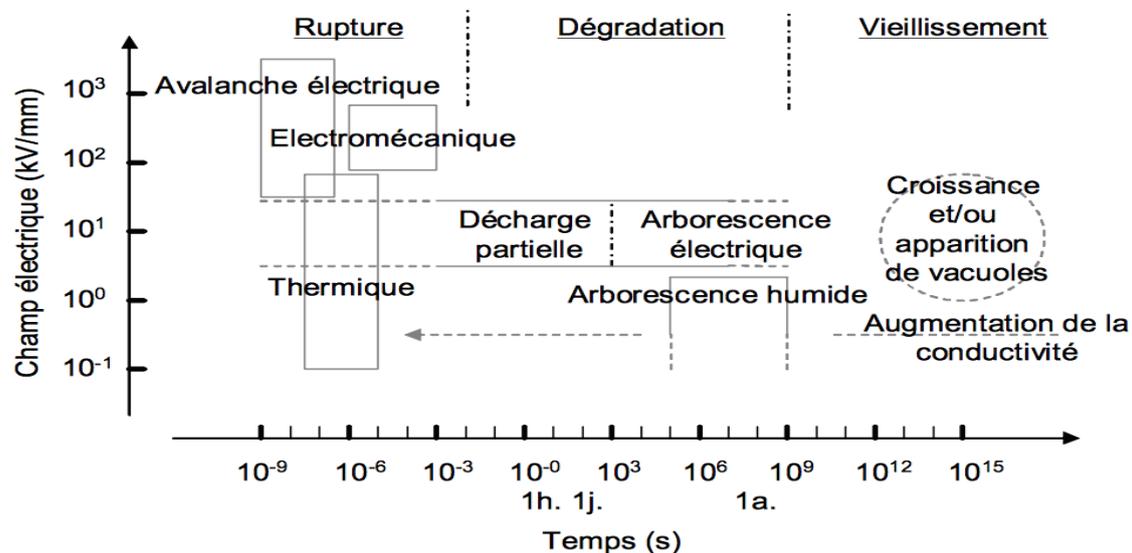


Figure I.11. Vieillessement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et de champs électriques auxquels ces mécanismes ont lieu [30]

I.7.2. Facteurs essentielles du vieillissement électrique des polymères isolants

Les phénomènes cités auparavant sont générés sous l'application d'une contrainte électrique et ils ont une contribution directe au vieillissement électrique. Dans ce qui suit, nous rappelons les caractéristiques principales de chaque mécanisme :

- **Arborescence électrique** : les arborescences électriques sont des structures filamenteuses ramifiées constituées de micro canaux creux susceptibles de se propager sur des distances de plusieurs millimètres en volume et en sub-surface d'isolants [31]. Elles apparaissent surtout dans des régions où le champ électrique est élevé ($>100\text{kV/mm}$) [32] et ont pour l'origine des cavités, des aspérités métalliques ou des éléments polluants. Dissado et Fothergill [33] dénombrent trois sous catégories d'arborescences électriques : l'arborescence type branche, buisson et le mélange des deux : l'arborescence branche buissonnante. Une image de ces trois types d'arborescence est montrée sur la figure I.12.

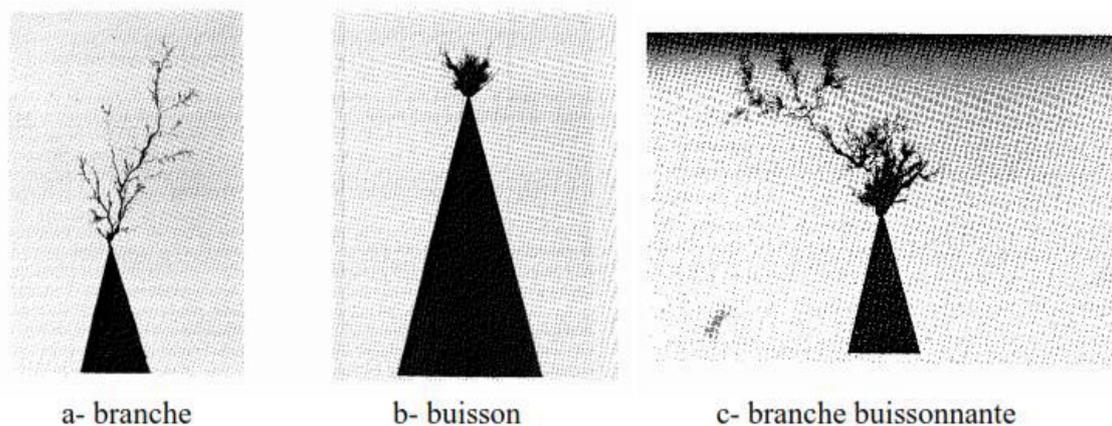


Figure I.12. Trois sous catégories de l'arborescence électrique [30,33]

Le développement de telles arborescences ne constitue pas un mécanisme de rupture par emballement mais participe à la dégradation progressive de l'isolant et à une augmentation de la probabilité de rupture. La propagation des arborescences ainsi que leur modélisation ont fait l'objet de nombreux travaux récents comme ceux de Xie *et al* [34,35] ou les travaux plus anciens de Laurent.

- **Charges d'espace** : Les études effectuées ces dernières années ont montré la contribution directe de la charge d'espace au phénomène de vieillissement électrique du matériau polymère [36].

- **Décharges partielles et cavités :** un système d'isolation polymère contient typiquement des microcavités lors de la fabrication. Sous un champ appliqué, une décharge apparaît dans le gaz lorsque la cavité est suffisamment grande (quelques dizaines de micromètres aux champs et températures de service typiques [37]). Cette décharge est dite partielle car elle ne court-circuite pas l'ensemble de l'isolation. L'extension de la décharge est limitée, soit parce que le champ électrique n'est pas suffisant pour provoquer une propagation totale, soit parce qu'elle est bloquée par un isolant de champ de claquage plus élevé [38]. En ce qui concerne le mécanisme de la décharge, la différence de permittivité entre le gaz et le polymère peut augmenter le champ dans le gaz, mais un électron initial est nécessaire pour amorcer la décharge. La source préférentielle des charges sont les porteurs (électrons primaires) transportés à l'intérieur du polymère par conduction et piégés comme charge d'espace à l'interface polymère – cavité. Par l'ionisation des molécules de gaz sous champ appliqué, une avalanche électronique apparaît, s'accompagnant de dégradations du matériau à travers des processus thermiques (carbonisation), chimiques (action de l'ozone ou de l'acide nitrique produits dans la décharge) et électrochimiques (bombardement par des particules chargées). Une telle analyse du phénomène a été élaborée par Montanari, Mazzanti et Serra [39, 40,37] afin de construire un modèle de vieillissement dû aux décharges partielles. L'activité de décharge partielle à partir de vacuoles produit également une érosion des parois de la cavité, une croissance de la cavité et éventuellement le développement d'arborescence si les contraintes électriques sont suffisantes. Ainsi pour s'affranchir des arborescences, il faut donc ne pas avoir de vacuoles initiatrices de décharges partielles. La question de l'origine et de la croissance éventuelle des vacuoles est donc posée : préexistence ou formation sous contrainte électromécanique.
- **Décharges de surface :** en ce qui concerne les phénomènes de surface de l'isolant, les décharges ou les contournements résultant de la pollution de celle-ci provoquent une augmentation de la conductivité de surface, et donc une diminution de la résistance superficielle [41].

I.8. Rigidité diélectrique et mécanismes de claquage

I.8.1. Définition

La rigidité diélectrique est la valeur maximale du champ auquel peut être soumis un diélectrique, sans apparition d'un claquage. On désigne par l'expression décharge électrique, ou simplement décharge, le passage du courant dans un diélectrique, lors d'un claquage. Dans une décharge, il existe au moins un chemin à haute conductivité reliant les électrodes [42].

I.8.2. Mécanisme de claquage

On appelle claquage la perte subite de la propriété isolante diélectrique soumis à un champ électrique.

La rupture de l'isolation, dénommée claquage, peut intervenir suivants différents mécanismes. Les principaux sont : [43, 44,45].

I.8.2.1. Claquage électromécanique

Il est provoqué par la pression électrostatique exercée par les électrodes sur l'isolant. Une pression trop importante entraîne une diminution de l'épaisseur de l'isolant et ainsi une augmentation du champ électrique, ce qui amplifie encore l'effet. Si la pression exercée devient supérieure à la résistance à la compression, la rupture intervient. La pression électrostatique étant $\epsilon E^2/2$, des champs de l'ordre du MV/mm seraient nécessaires pour vaincre une résistance à la compression de 100 MPa comme celle de l'époxy à l'état vitreux. De tels niveaux de champs ne seraient envisageables que sur des couches très minces.

I.8.2.2. Claquage thermique

Le claquage thermique est dû à une augmentation de la conductivité électrique du matériau avec la température. Une augmentation de la température du diélectrique provoque alors une augmentation de la densité de courant, donc des pertes, ce qui contribue à un échauffement supplémentaire. En l'absence d'une dissipation thermique suffisante, un emballement thermique a lieu. Ce phénomène a pu être observé dans des films de condensateurs soumis à des champs continus très élevés (centaines de kv/mm).

I.8.2.3. Le claquage électronique

Il est susceptible d'intervenir à des champs très élevés. Seul le champ électrique est déterminant ; Plusieurs théories ont été proposées dans lesquelles les électrons acquièrent des énergies considérables ou se multiplient par avalanches. De tels mécanismes n'ont pas reçu de validation expérimentale dans les isolations électrotechniques

I.8.2.4. Le claquage par arborescence

L'arborescence est un phénomène de préclaquage électrique, qui se présente sous forme d'arbre et dont le développement est favorisé par la présence de défauts, ou d'impuretés au sein du matériau. L'arborescence peut être révélatrice d'un stade relativement avancé de la dégradation du matériau, et reste considérée comme un phénomène précurseur de la rupture.

Les arborescences sont classées en deux principales catégories:

- les arborescences électriques,
- les arborescences d'eau.

D'autres types particuliers d'arborescences peuvent être aussi observés telles que les arborescences appelées "chimiques". Ces arborescences sont surtout provoquées par les décharges apparaissant aux bords électrodes, où le matériau isolant solide est en contact avec un autre matériau de permittivité généralement inférieure à la sienne (liquide ou gaz).

I.14. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons donné quelques rappels sur les polymères. En effet, nous avons donné les définitions des différentes structures permettant de différencier entre un matériau cristallin et les polymères amorphes ou semi-cristallins. Nous avons aussi classé les polymères selon leurs caractéristiques thermomécaniques.

Dans la deuxième partie du chapitre nous avons présenté le vieillissement électrique et les différents mécanismes du claquage des diélectriques.

Chapitre II

Décharge électrique dans l'interface air- solide

II.1. Introduction

On pourrait croire que les phénomènes d'amorçage à l'interface d'une isolation mixte solide/Gaz sont connus depuis longtemps, car certains mécanismes élémentaires tels que l'ionisation par collision, photo ionisation, mobilité ionique,... sont maintenant assez bien compris. Mais en réalité, dans une décharge disruptive, tous ces phénomènes élémentaires se combinent de façon extrêmement complexe ce qui a fait l'objet de nombreuses études [46].

Ces décharges sous formes arborescentes conduisent au claquage de l'intervalle d'isolation si la tension atteint une valeur critique dite tension de claquage ou tension disruptive. Dans les solides, le claquage électrique est précédé de la génération et de la propagation de canaux plus au moins conducteurs épousant la forme d'arborescences [47]. Dans les isolations mixtes solide/Gaz, la rupture électrique peut intervenir suite à un claquage ou au contournement de ce dernier. Le contournement est précédé de la génération et de la propagation des décharges surfaciques ou glissantes qui se propagent à l'interface solide/Gaz.

Dans ce chapitre, nous expliquerons les mécanismes d'initiation d'une décharge électrique dans l'air. Nous présenterons sommairement les différentes théories à partir des électrons germes jusqu'à la décharge complète.

II.2. Électrons primaires

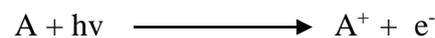
Il est tout à fait bien connu qu'aucune décharge électrique ne peut s'initier dans l'air sans la présence d'au moins un électron dans le volume de gaz couvrant l'espace inter-électrodes. Ces électrons, présents au tout début de la décharge sont communément appelés électrons germes ou encore électrons primaires. Ils permettent d'initier la première avalanche électronique sans laquelle aucun type de décharge ne peut prendre forme encore moins se maintenir. Ils peuvent être produits par radiation cosmique, par les sources naturelles d'ionisation, par les charges résiduelles issues des décharges précédentes ou encore par détachement des ions négatifs par effet de champ [48].

II.3. Ionisation, recombinaison et attachement électronique

L'existence d'une décharge électrique résulte du passage d'un courant dans le diélectrique gazeux et donc de la possibilité de créer des particules chargées ; essentiellement des électrons ; à partir des atomes ou molécules neutres du gaz [49]. Les principaux mécanismes régissant la génération des porteurs de charge dans les gaz sont: les mécanismes

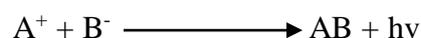
d'ionisation, tendant à augmenter leur densité et les mécanismes de recombinaison et d'attachement, tendant à les réduire.

- **Ionisation** : le phénomène d'ionisation est un processus tout à fait aléatoire mais il peut être formellement lié au libre parcours moyen pour l'ionisation. Le processus est largement décrit dans la littérature scientifique et on peut noter que la nature du gaz et sa densité sont les paramètres les plus influents. Un électron peut ioniser une particule neutre par collision à condition qu'il ait une énergie supérieure à celle d'ionisation de la particule. Cependant à température élevée, surtout avec une forte pression, le gaz de remplissage peut s'ioniser lui-même et fournir ainsi d'autres électrons libres. Un photon suffisamment énergétique, généralement libéré par un atome métastable retrouvant son état d'équilibre peut également contribuer à l'ionisation des particules neutres selon le principe suivant :



D'autre part, l'ionisation peut être également produite par les ions positifs, mais ce processus exige que la particule incidente ait un haut niveau énergétique, de l'ordre de 100 ou 200 eV. Le phénomène n'intéresse que certains types de décharges à basse pression, dans lesquelles les ions accélérés par le champ électrique, peuvent acquérir une énergie importante entre deux collisions. Dans tous les cas, lors de la collision, l'excédent d'énergie de l'électron, de la particule, du photon ou de l'ion est fourni à l'électron nouvellement créé sous forme d'énergie cinétique.

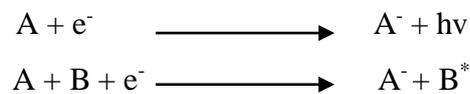
- **Recombinaison** : la recombinaison a été beaucoup moins étudiée que son processus inverse, l'ionisation. Cependant elle reste d'une importance fondamentale pour la bonne compréhension des mécanismes de développement de la décharge et tout particulièrement pour ceux de sa phase d'extinction. La recombinaison est la neutralisation d'un ion positif par capture d'un électron ou d'ion négatif suivant le schéma ci-dessous.



Le taux des recombinaisons ion - ion est généralement beaucoup plus élevé que celui des recombinaisons électron - ion, ce qui est dû à la faible mobilité des ions positifs [49]. Les phénomènes de recombinaison sont en général négligés dans les calculs des

paramètres des décharges électriques mais sous certaines conditions fixées évidemment par les caractéristiques du gaz et la pression, ils ne peuvent plus l'être. Il en est de même de l'attachement électronique qui est le phénomène se produisant quand un électron rentre en collision avec un atome ou une molécule de gaz neutre pour former un ion négatif stable. L'état de stabilité n'est pas toujours atteint car l'ion négatif formé peut rentrer dans un état intermédiaire avant de se dissocier.

- **Attachement** : l'attachement électronique est d'autant plus important que la molécule présente une plus grande affinité électronique. Le processus d'attachement des électrons est le suivant :



L'excédent d'énergie fourni par l'électron incident (c'est-à-dire la différence entre son énergie cinétique et l'affinité électronique de la molécule) peut se retrouver sous forme d'émission radiative dans le cas d'une collision entre deux corps ou sous forme de source d'énergie cinétique pour une troisième particule dans le cas d'une collision à trois corps. Dans le seul contexte des mécanismes d'initiation de la décharge, la recombinaison et l'attachement électronique peuvent jouer un rôle très important. Ils peuvent d'une part retarder l'initiation de la décharge car favorisant la formation d'états intermédiaires et d'autre part l'inhiber tout simplement. Il est certain que sous n'importe quelles conditions, une multiplication électronique ne peut s'initier que dans une région où les phénomènes d'ionisation sont plus importants que ceux de recombinaison et d'attachement.

II.4. Avalanche électronique

Pour initier une avalanche de taille critique (streamer), un électron primaire doit être bien situé, c'est-à-dire dans une zone appelée « volume critique ». Le volume critique est le volume de gaz autour de l'électrode haute tension dans lequel des avalanches peuvent se développer pour atteindre la taille critique des streamers. Bien que le mécanisme d'avalanche soit une décharge non autonome qui ne se draine pas assez de courant, il est intéressant de l'étudier car il constitue toujours le mécanisme précurseur de la perte de rigidité diélectrique d'un gaz.

L'initiation d'une avalanche électronique sous un champ électrique appliqué est tel qu'un ou plusieurs électrons puissent acquérir une énergie suffisante pour ioniser les molécules embrassées au cours de leur trajet vers l'anode. Lors de chaque collision ionisante, cet électron germe va libérer un nouvel électron qui pris dans le champ électrique sera à son tour capable d'ioniser les molécules de gaz. [50]

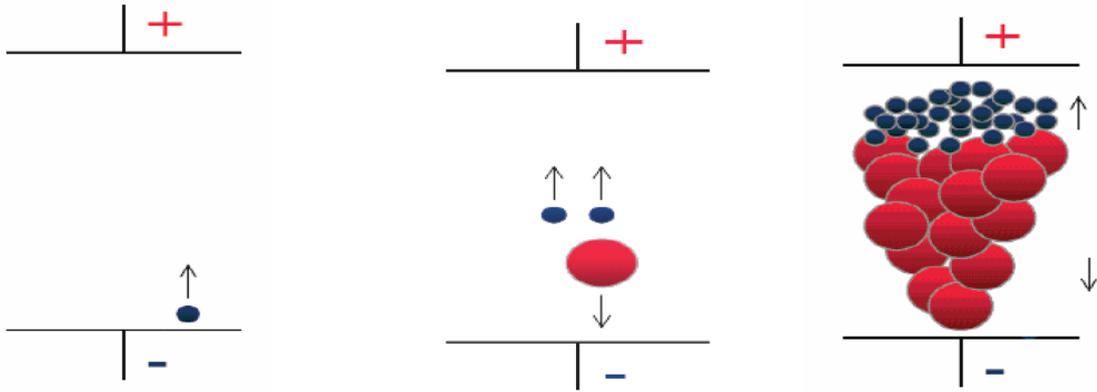


Figure II.1. Processus d'avalanche électronique [51]

Suivant le même processus de multiplication électronique, un électron peut donner naissance à une avalanche contenant N_e électrons. Dans le cas général, le champ électrique varie le long de la ligne de champ suivie par l'avalanche, N_e s'exprime alors [52] :

$$N_e = \exp \int_0^l (\alpha - \eta) \cdot dl \quad (\text{II.1})$$

α : étant le 1^{er} coefficient de Townsend définissant le nombre moyen de paires d'ion-électron créés par un électron primaire sur une distance de parcours d'un centimètre, dans la direction du champ. Le coefficient η représente le facteur d'attachement du gaz de remplissage.

Pour que la décharge passe à une décharge autonome (régime de Townsend), il faut qu'une succession d'avalanches puisse se produire en l'absence de tous agents ionisant. On observe alors un phénomène peu ou pas lumineux (décharge sombre de Townsend).

II.5. Décharge de Townsend

L'énergie cinétique d'un électron détermine sa capacité à exciter ou à dissocier les molécules du gaz plasmagène. L'énergie acquise par un électron placé entre deux électrodes dépend de son libre parcours moyen et du champ électrique auquel il est

soumis ($E=V/d$ dans le cas d'un champ uniforme, V étant la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes tandis que d représente la distance inter électrode). L'obtention d'un nombre d'électrons suffisant pour exciter le gaz de façon significative exige un mécanisme de multiplication. Si l'énergie d'un électron est supérieure à l'énergie d'ionisation d'une molécule M , alors un choc inélastique est susceptible de libérer un électron, ce que traduit l'expression suivante :



Les deux électrons obtenus par ionisation sont alors accélérés par le champ électrique et peuvent à leur tour ioniser de nouvelles molécules. Townsend a proposé en 1914 l'introduire d'un coefficient d'ionisation α (appelé premier coefficient de Townsend) pour traduire mathématiquement ce phénomène d'ionisation [53]. Ce coefficient dépend du champ réduit E/N (avec N désignant la densité du gaz) et son inverse $1/\alpha$ représente le libre parcours moyen d'un électron entre deux collisions ionisantes. L'apparition d'un électron primaire au niveau de la cathode se traduit par l'arrivée de $e^{\alpha d}$ électrons au niveau de l'anode. Ce processus est appelé "avalanche électronique".

La relation de Townsend s'écrit alors :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (\text{II.2})$$

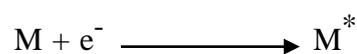
Avec I : courant (A)

I_0 : courant initial dû aux électrons primaires (A)

d : distance inter-électrode (m)

α : premier coefficient de Townsend (m^{-1})

En dehors de ce mécanisme de multiplication des électrons proposé par Townsend, des électrons secondaires peuvent être émis par impact d'ions positifs M^{+} sur la cathode ou par impact de photons (émis par désexcitation radiative après impact électronique :



La probabilité de produire ainsi des électrons secondaires se traduit par l'introduction d'un second coefficient de Townsend γ . Le critère d'auto-entretien de la décharge (nombre adimensionnel) s'écrit alors :

$$\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (\text{II.3})$$

Comme ce mécanisme est consommateur d'électrons, il est compétitif du mécanisme d'ionisation. Pour prendre en compte ce phénomène, il convient alors d'introduire dans la relation de Townsend une probabilité d'attachement électronique η :

$$I = I_0 \cdot e^{(\alpha - \eta) d} \quad (\text{II.4})$$

Le critère d'auto-entretien de la décharge s'écrit donc :

$$\gamma \cdot (e^{(\alpha - \eta) d} - 1) = 1 \quad (\text{II.5})$$

II.6. la loi de Paschen

La tension d'alimentation minimale pour déclencher la décharge est appelée tension de claquage. Il existe une relation qui lie la valeur de cette tension de claquage à la pression du gaz et de la distance inter-électrode (la loi de Paschen). Cette loi est habituellement représentée par la courbe caractéristique $U_c = f(p * d)$, où p est la pression et d la distance interélectrode, et dépend de la nature du gaz introduit [54].

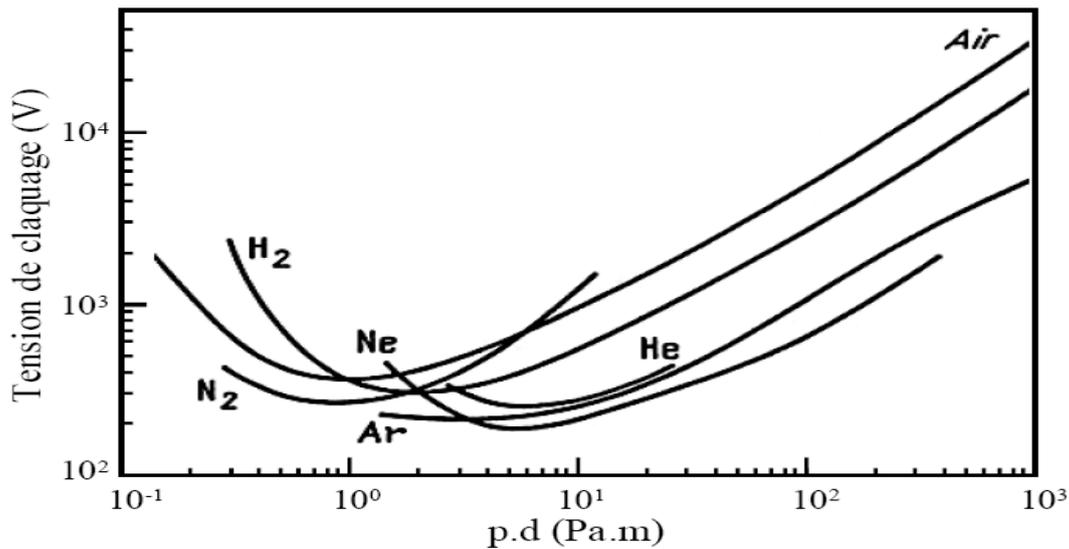


Figure II.2. Tension de claquage pour différents gaz en fonction de (p.d) [54]

Nous pouvons constater que pour un gaz à pression atmosphérique ($p = 1,013 * 10^5 \text{ pa}$), les courbes passent un minimum pour une distance inter-électrode d'environ $10 \mu\text{m}$ ($p * d = 0,5 \text{ à } 5$ environ). Cela signifie que, pour la production des décharges à pression atmosphérique dans des conditions d'utilisation usuelles ($d \geq 1 \text{ mm}$), la tension de claquage est une fonction croissante de la distance inter-électrode.

II.7. Théorie des streamers

Vers 1940, Craggs, Meek et Raether ont établi une théorie des streamers (ou théorie des décharges filamenteuses) complétée après par de nombreuses approches à caractères essentiellement expérimental.

Une avalanche initiée par un électron multiplie exponentiellement le nombre d'électrons en tête de cette avalanche. Ces électrons diffusent et la longueur de l'avalanche s'étend, entraînant une croissance du champ électrique induit par la charge d'espace. Pour une certaine valeur critique de cette longueur, le champ électrique induit devient comparable au champ électrique extérieurement appliqué. Dès lors, l'avalanche électronique se transforme en streamer [55].

Les mécanismes de base de cette théorie sont :

- La création d'une avalanche primaire du type Townsend par un électron germe ;
- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la 1^{ère} avalanche ;

- La transition avalanche-streamer lorsque le champ de charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué.

Phase I

Un électron primaire se trouvant près de la cathode provoque une avalanche électronique primaire. La vitesse des électrons étant 100 plus fois environ supérieur à celle des ions, l'avalanche se développe comme un nuage d'électrons laissant derrière elle une charge d'espace positive figure II.3.a. Les électrons sont absorbés par l'anode, tandis que les ions positifs forment dans le gaz une charge d'espace positive. Le champ E_c de cette charge maximale en tête d'avalanche figure II.3.a.

Phase II

Des électrons secondaires sont créés par photo ionisation autour de la charge d'espace. Ces électrons provoquent en tête d'avalanche de petites avalanches secondaires figure II.3.b. Le champ de la charge d'espace renforce le champ entre la tête de l'avalanche et la cathode et crée également une composante radiale.

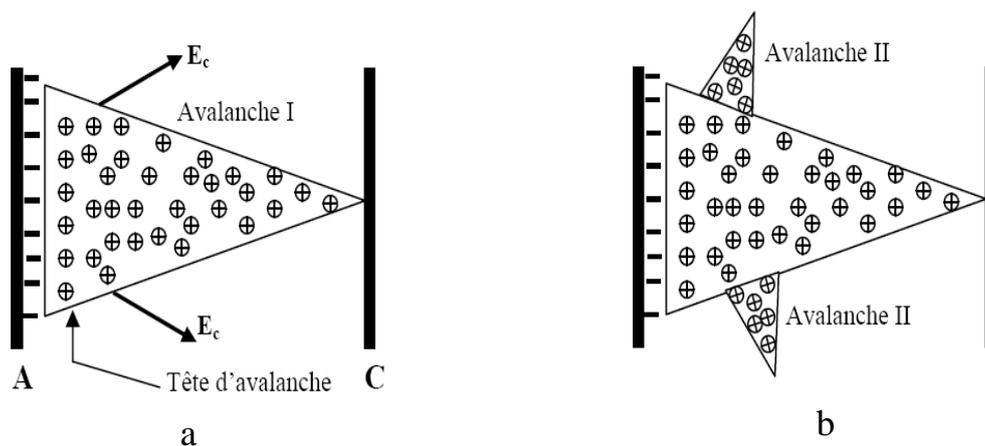


Figure II.3. Création de l'avalanche

La tête d'avalanche est le siège d'une importante activité (collisions entre électrons et ions positifs) qui est une source de photons qui sont absorbés par le gaz environnant. En particulier, les molécules d'azote excitées peuvent émettre des photons ayant une énergie supérieure à 13e.v qui est suffisante pour ioniser les molécules d' O_2 dont l'énergie d'ionisation n'est que de 12,2 e.v [56].

Phase III

La charge d'espace augmente en volume et devient un streamer. De nouvelles avalanches secondaires viennent s'ajouter à l'avalanche primaire et le streamer progresse figure II.4.a. Quand il touche la cathode, à ce moment se produit le claquage figure II.4.b.

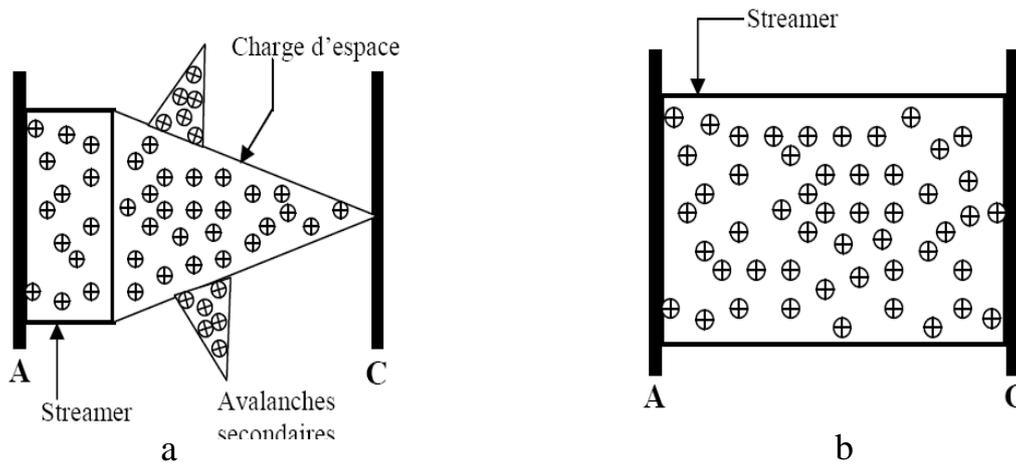


Figure II.4. Propagation des avalanches

II.8. Types de streamers

II.8.1. Streamer positifs

Les streamers positifs ont été beaucoup plus étudiés dans les investigations scientifiques [57] que les streamers négatifs, des différences fondamentales peuvent être notées dans leur développement. Dans le cas du streamer positif, l'avalanche primaire initiée par un électron germe amène la présence d'une charge d'espace positive près de la cathode et une injection d'électrons devant l'électrode figure II.5.

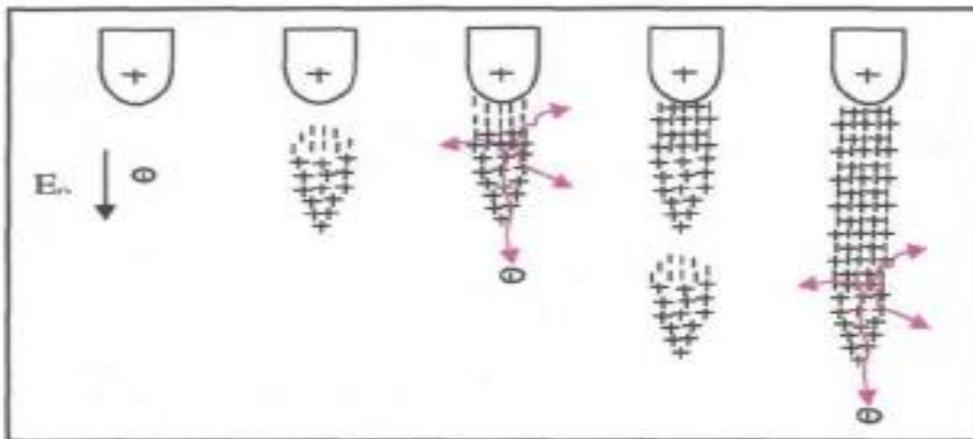


Figure II.5. Processus de développement du streamer positif

Le phénomène est plus complexe dans ce type de streamers car la zone du champ électrique intense n'est plus juxtaposée à la source des électrons. Les électrons qui sont au voisinage de la pointe produisent des avalanches, mais quand les électrons arrivent sur la pointe, ils ne produisent rien qui puisse entretenir le phénomène.

La cathode ne joue pas le rôle de pourvoyeuse des électrons car cette cathode est située loin de la zone où le champ électrique est intense. Si le champ est assez fort, les électrons germes produits sous l'action du rayonnement ultraviolet émis par une avalanche créent des nouvelles avalanches. Le champ est renforcé par l'avalanche, mais la formation d'une chaîne entre électrode est peu probable, le champ devenant trop faible au voisinage de la cathode.

II.8.2. Streamers négatifs

Un électron voisin de la cathode crée une avalanche. Les ions positifs sont attirés dans le sens du champ et se précipitent sur la pointe figure II.6.

Des électrons sont extraits de la cathode par choc, chaque électron ainsi libéré produit une nouvelle avalanche qui s'en dégage. Ces avalanches ont une extension limitée. D'une part, le champ décroît rapidement dès qu'on s'éloigne de la pointe vers l'anode. D'autre part, les avalanches qui se développent laissent derrière elles les ions positifs moins mobiles qui font écran entre les électrons et la pointe. Cette deuxième cause d'affaiblissement du champ vient renforcer la première.

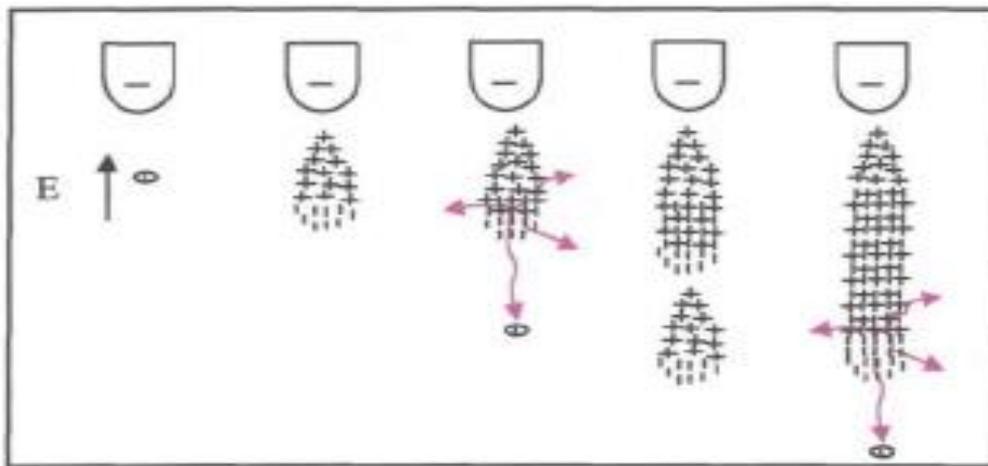


Figure II.6. Processus de développement du streamer négatif

Un nuage d'ions positifs est formé par les avalanches d'électrons. Quand le nuage positif est développé de manière suffisante, les avalanches arrêtent de se produire parce que le champ est très affaibli au-delà. Les ions positifs sont attirés par la pointe, donc ils sont neutralisés par la pointe si bien que la zone positive dont nous avons vu la première disparaît. L'effet d'écran disparaît quand tous les ions positifs ont été captés par la pointe.

Il a une allure cyclique la durée du cycle étant égale au temps mis par la couche positive pour être balayée par la pointe [58].

La distorsion du champ électrique appliqué dépend de la concentration de charge dans l'avalanche. D'après les observations de Raether, si le nombre d'électrons dans l'avalanche est supérieur à 10^{+6} , la longueur de l'avalanche augmente et la distorsion devient importante. Si le nombre d'électrons dans l'avalanche dépasse 10^{+8} , le champ dû à la charge d'espace devient du même ordre de grandeur que le champ appliqué ($E' \cong E_0$) figure II.7.

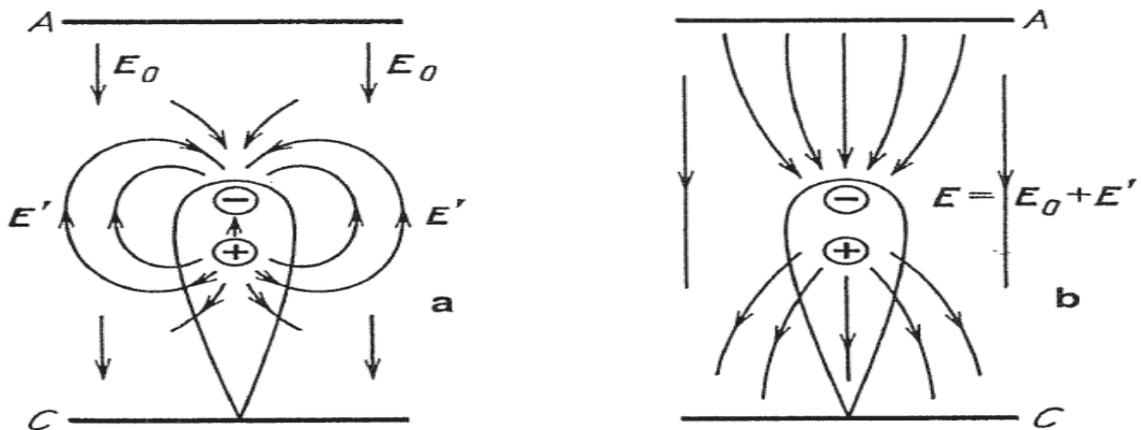


Figure II.7. Champ électrique engendré par la charge d'espace

La théorie des streamers est basée sur l'estimation de la charge d'espace nécessaire à la création d'un champ électrique (E') suffisant pour transformer l'avalanche en streamer. L'initiation du streamer survient, généralement, quand la concentration des charges atteint la valeur critique telle que [59] :

En champ uniforme :

$$n_0 * \exp[\alpha * x_c] \cong 10^{+8} \quad (\text{II.6})$$

Où $\alpha * x_c \cong 18 \text{ à } 20$

Et x_c est la longueur parcourue par l'avalanche figure (II.8).

En champ non uniforme :

$$\int_0^{x_c} \alpha * dx \cong 18 \text{ à } 20 \quad (\text{II.7})$$

Avec ($x_c < d$), d étant la distance inter électrodes

Le streamer ainsi formé, évolue jusqu'à la formation d'un canal conducteur reliant les deux électrodes.

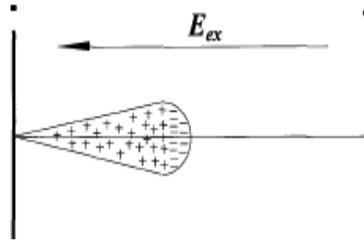


Figure II.8. Champ radial autour de la tête d'avalanche

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté de manière bibliographique le mécanisme de la décharge électrique dans les gaz, ce phénomène reste toujours assez complexe à cause de plusieurs facteurs dépendent l'initiation et le développement de la décharge (la nature et la pression du gaz, le type de tension appliquée et la forme des électrodes).

Chapitre III

Décharge électrique de surface

III.1. Introduction

La décharge électrique partielle se produit en deux catégories selon leur origine, une décharge partielle interne qui se manifeste dans les vacuoles et les défauts piégés à l'intérieur de l'isolant et d'autre qui se manifeste lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique dite décharge surfacique ou superficielle.

Nous intéressons dans ce chapitre à la description des décharges surfaciques et à la présentation des différentes configurations de ce type de décharges.

III.2. Décharge partielle

III.2.1. Définition

Dans le domaine du génie électrique, une décharge partielle (*DP*) est un amorçage électrique localisé dans la partie isolante d'un système électrique qui ne court-circuite pas entièrement l'isolation (solide ou liquide). Celles-ci apparaissent, en général, sous l'application d'une haute tension (HT).

III.2.2. Classification des décharges partielles

Kreuger [60] classe les décharges en fonction de leur localisation figure III.1.

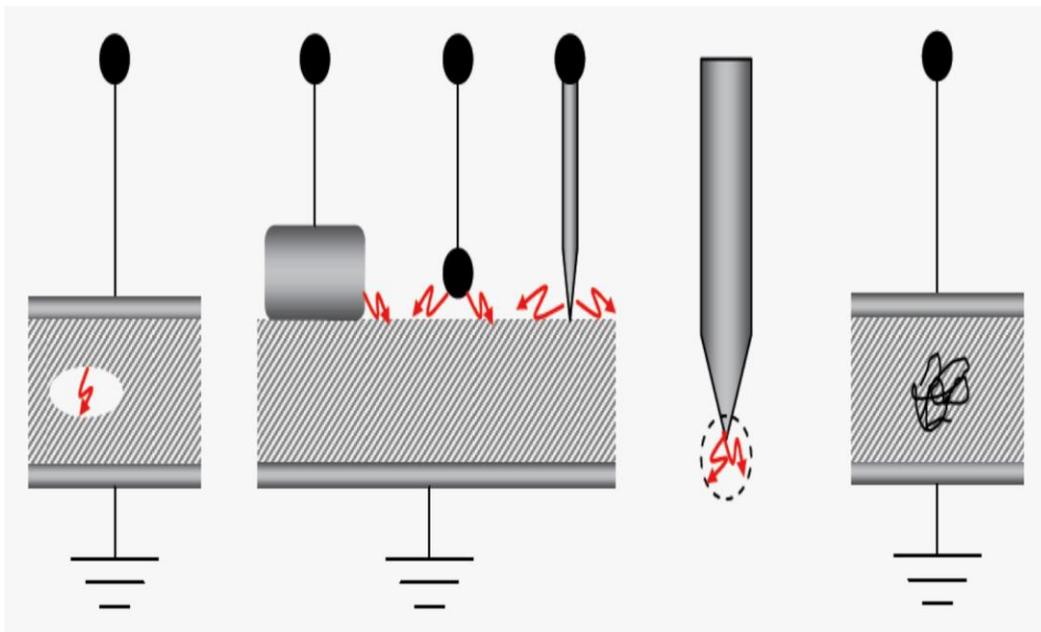


Figure III.1. Types de décharges partielles : a) internes ; b) de surface ;
c) couronne ; d) en arborescence

- Décharges internes : elles apparaissent aux endroits de l'isolant où la rigidité diélectrique est faible. Exemple : une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide.
- Décharges de surface : elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique.
- Décharges couronne : elles prennent naissance au niveau des points où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone très réduite entourant la pointe.
- Décharges en arborescence : se produisent à cause d'un défaut dans l'isolation. Une croissance des différentes branches de l'arborescence produira des conditions propices pour l'apparition d'autres DP.

Kemp [61] définit les décharges partielles plus simplement en considérant les trois types suivants : les décharges dans les cavités gazeuses, les décharges rampantes sur les surfaces isolantes et les décharges couronne sur des pointes et irrégularités conductrices.

D'après ces classifications, notre étude des DP concernera essentiellement les décharges de surface.

III.2.3. Effets des décharges partielles

La présence de décharge partielle constitue un mécanisme de dégradation, et leur détection constitue une méthode de diagnostic très utilisée. L'effet des décharges partielles est variable selon leur intensité et le milieu où elles se déroulent. La décharge partielle est souvent accompagnée d'une génération de gaz (formation de cavités dans le solide), de nouvelles espèces atomiques et moléculaires excitées, de radicaux qui peuvent générer à leur tour des acides attaquant les matériaux. Elles produisent également une érosion mécanique, une carbonisation des surfaces par bombardement d'ions, une élévation de température très localisée. Ces effets engendrent une dégradation irréversible des matériaux diélectriques, en particulier dans le cas des solides, et donc une diminution de la durée de vie de l'ensemble du système électrique.

III.3. Décharge électrique de surface

Elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface de l'isolant. La décharge électrique surfacique désigne une décharge électrique qui se produit en

présence d'un diélectrique solide placé dans un gaz ou un liquide isolant. Selon la disposition et la forme des électrodes, de l'isolant fluide (gaz ou liquide) et de l'isolant solide.

On peut distinguer deux types de décharges se produisant à la surface d'un isolant solide :

III.3.1. Décharges glissantes

Les décharges glissantes où les deux électrodes sont en contact avec la surface du diélectrique solide. La décharge électrique prend naissance et se développe dans le gaz en restant en contact avec la surface du solide isolant sur laquelle elle se propage figure III.2.

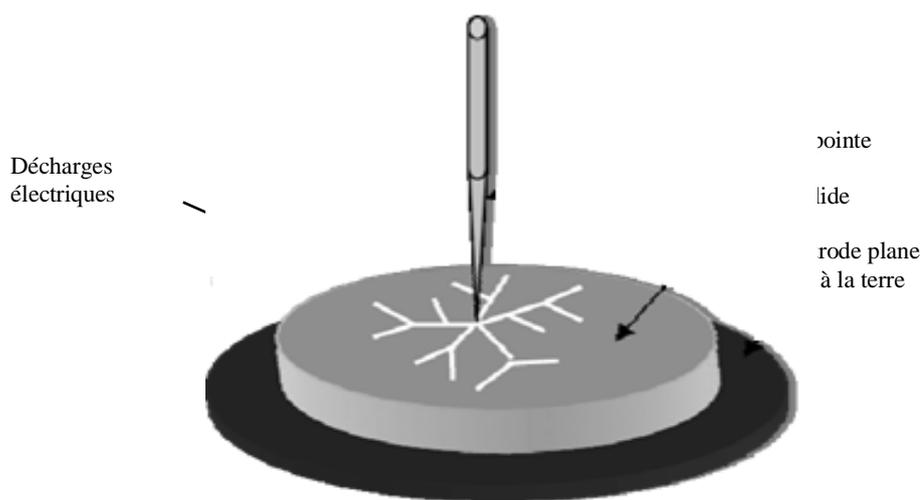


Figure III.2. Système à décharges glissantes

Lorsque l'épaisseur du solide est assez grande pour empêcher une perforation en volume ou lorsque ce dernier est utilisé comme barrière dans un intervalle d'air, des décharges peuvent se propager sur la surface du diélectrique solide et le contourner. En se propageant, ces décharges peuvent creuser la surface du solide et laisser des traces telles des canaux ramifiés de faible diamètre appelées dans la forme globale " figures de Lichtenberg ". Ces figures prennent toujours naissance du côté de l'électrode acérée [62].

III.3.2. Caractérisation optique des décharges glissantes

Les décharges surfaciques ont été découvertes en 1777 [63], quand Lichtenberg découvre par le fait du hasard, la formation de petites figures de poudre sur une surface chargée d'électricité figure III.3. Ces figures dites de Lichtenberg sont appelées aussi figures de poudre. Elles ont suscité un grand intérêt chez beaucoup de physiciens, non seulement parce que leurs formes diverses offrent l'un des plus beaux spectacles de la nature, mais aussi

parce qu'elles ont initié la découverte des décharges électriques et qu'elles sont susceptibles de présenter une dimension fractale.

Pedersen [64] a été le premier à avoir étudié les figures dites de Lichtenberg où des photographies ont été utilisées pour l'étude des surtensions dans les lignes de transmission isolées au gaz. Merrill et Hippel [65] ont proposé une interprétation physique de leur mécanisme de formation, basée sur les théories modernes des décharges dans les gaz. Puis, cette technique a été utilisée par de nombreux chercheurs pour caractériser les décharges surfaciques (ou glissantes). Plusieurs tentatives d'explication du phénomène de ces décharges ont également été proposées [66,67].

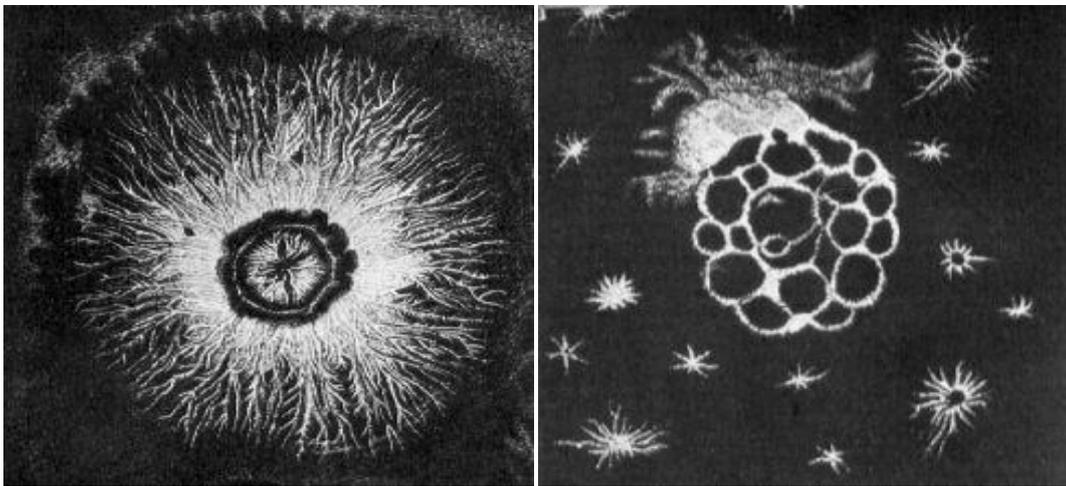


Figure III.3. Figures originales de Lichtenberg [67]

III.3.3. Les décharges à barrière diélectrique

On appelle décharge à barrière diélectrique (DBD), toute configuration de décharge pour laquelle, l'une ou les deux électrodes sont recouvertes d'un diélectrique. Celui-ci peut être constitué de verre, de céramique, d'alumine ou d'une matière polymère comme le PVC. De manière générale, dans ce type de décharge, l'une des deux électrodes est reliée à la terre, l'autre est reliée à l'alimentation électrique. En configuration diélectrique simple, c'est l'électrode reliée à la terre qui supporte le diélectrique figures III .4 et III.5.

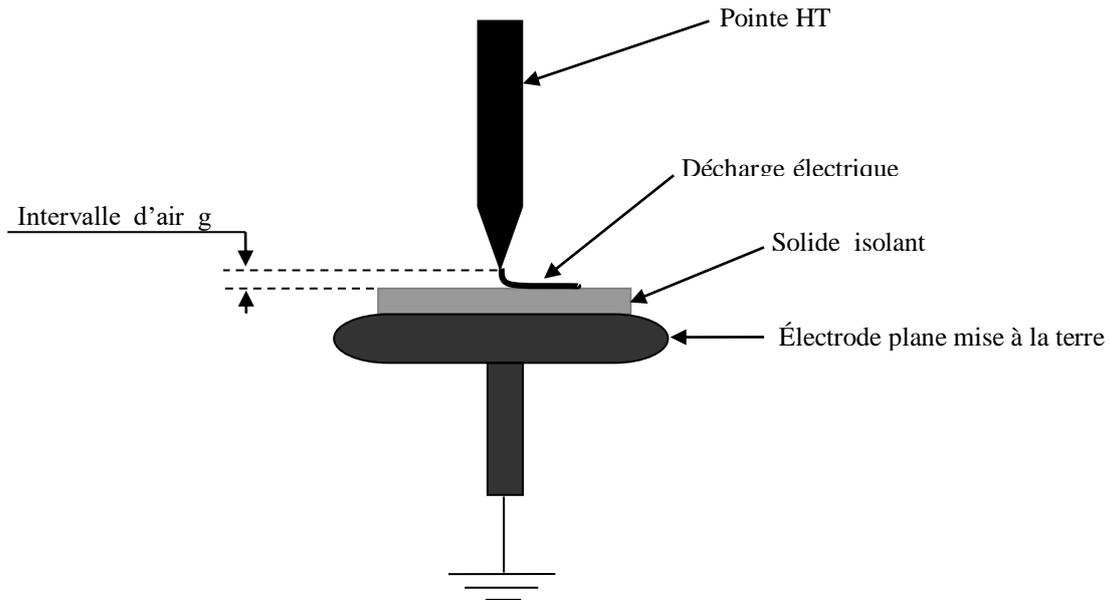


Figure III.4. Système d'électrode pointe-plan

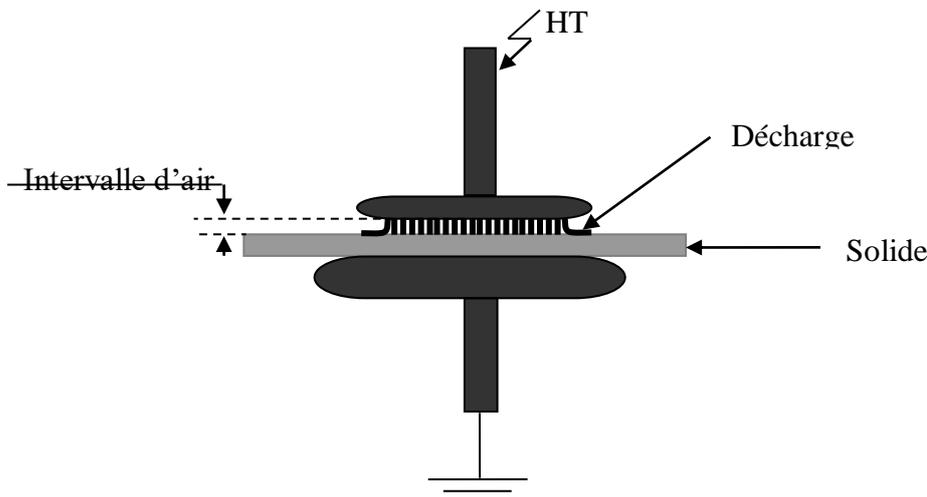


Figure III.5. Système d'électrode plan-plan

III.4. Forme des décharges surfaciques

Deux types de décharges peuvent être observées selon la polarité de la pointe: [68]

- Les décharges surfaciques émanant d'une pointe négative, se distinguent par des branches rectilignes figure III.6. Elles sont constituées d'un tronc principal duquel émanent des ramifications arborescentes. Les extrémités des branches et leurs ramifications forment un contour plus ou moins circulaire, centré sur la pointe. Les branches de la décharge négative, appelés aussi « streamers », sont plus lumineuses à leurs bases qu'à leurs extrémités où on remarque la présence de points lumineux, témoins d'une intense activité d'ionisation.

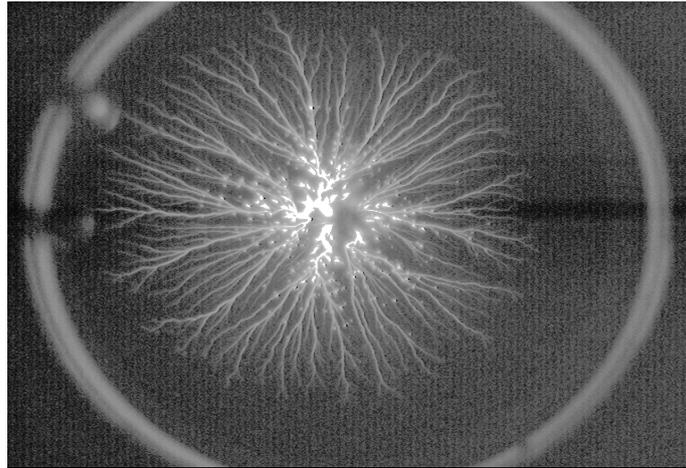


Figure III.6. Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 kV en polarité négative [68]

- Les décharges générées à partir d'une pointe positive ont une forme différente aux décharges négatives figure III.7. Les branches de la décharge ont une structure sinueuse et ramifiée et les ramifications se terminent par des points très lumineux en forme de bourgeon à leurs extrémités. Notons la présence de branches ayant la forme de filaments faiblement lumineux, émanant des points lumineux ou « bourgeons ». Le contour formé par l'extrémité des branches prend une forme aléatoire à la différence des décharges négatives qui ont un aspect quasi circulaire.

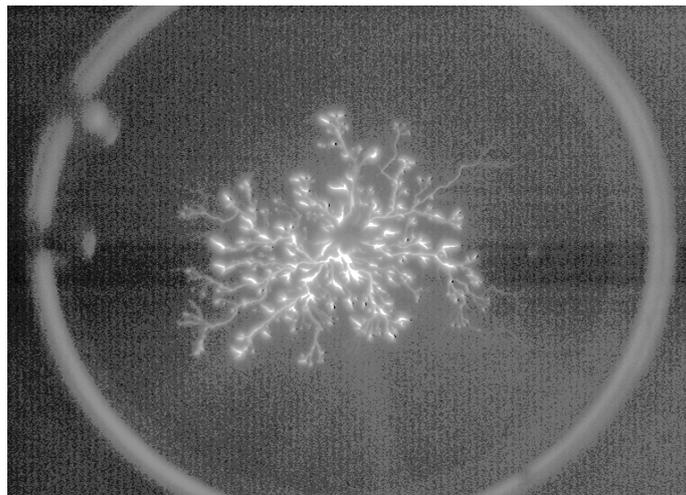


Figure III.7. Photographie de décharges glissantes obtenues sur une interface huile/bakélite sous tension impulsionnelle d'amplitude 40 kV en polarité positive [68]

III.5. Dégradation de la surface du solide

La répétition d'essais engendre la dégradation de la surface du solide isolant et la perte partielle de ses propriétés diélectriques. Ainsi, pour une tension donnée, les décharges observées sur un échantillon soumis à des contraintes répétitives, ont une longueur finale relativement élevée comparée à celle générées sur des échantillons neufs. Et la multiplication des décharges sur le même échantillon, conduit inmanquablement au contournement de ce dernier à des amplitudes de tension relativement basses. Toutefois, la dégradation de surface dépend fortement de la rigidité diélectrique du solide isolant, du nombre de décharges et de l'amplitude de la tension.

III.6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons d'abord évoqué les différentes catégories des décharges partielles selon leur origine, puis nous avons présenté les différentes formes des décharges électriques de surface qui font l'objet de notre étude.

Chapitre IV

Moyens et dispositifs expérimentaux

IV.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les différents dispositifs expérimentaux utilisés pour mesurer les courants de décharge ainsi que l'évolution des propriétés diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). Nous présentons aussi le dispositif utilisé pour le vieillissement électrique accéléré. Puis nous présentons l'analyse FTIR et la microscopie électronique à balayage MEB pour essayer d'avoir plus d'informations en vue de l'interprétation des résultats expérimentaux.

IV.2. Préparation des échantillons

IV.2.1. Matériau d'étude

Le matériau d'étude est le PRC utilisé par la société ENICAB de Biskra (filiale de General cable) pour l'isolation des câbles moyenne et haute tension figure IV.1. Les granulés du polyéthylène réticulable proviennent de la firme autrichienne BOREALIS commercialisé sous l'appellation LE4201R. Les caractéristiques du matériau données par le tableau IV.1 sont fournies par le fabricant dans la fiche technique donnée en annexe (voir annexe.1).

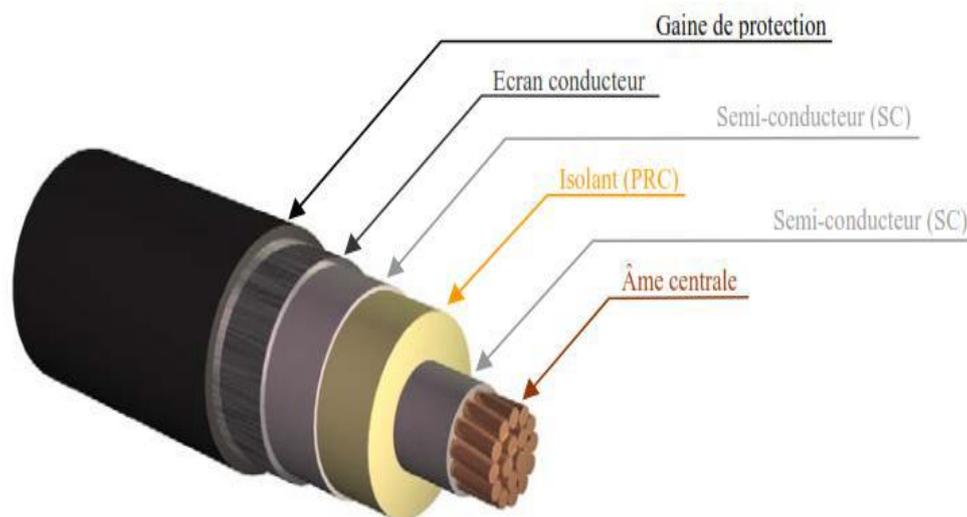


Figure IV.1. Constituants d'un câble à haute tension [22]

Grace à ces excellentes propriétés le Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) est devenu le matériau de remplacement du (PE) dans l'isolation des câbles électriques à moyenne et haute tension.

Propriété	Norme	Valeur
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	ISO 527	>17Mpa
Allongement à la rupture (250mm / min) ²	ISO 527	>450%
Allongement à chaud HST (200°, 0.2Mpa)	IEC 60811-2-1	75%
Résistivité (Base résine), (Kg/ m ³)	ISO 1872-2/ISO 1183	922 Kg/ m ³

Tableau IV.1. Propriétés du polyéthylène utilisé pour la fabrication de plaques du PRC

La valeur de la température de fusion cristalline est entre 105°C et 110°C et le Degré de réticulation, extraction à la décane est de 12%.

IV.2.2. Mode opératoire

Les plaques du PRC sont fabriquées dans le Laboratoire de Chimie de l'ENICAB-Biskra selon le processus suivant : Des granulés de polyéthylène réticulable chimiquement sont placés dans les moules d'une presse POLYSTAT 300S (380V, 50Hz, 11kW), montrée sur la figure IV.2, sous une température de 130° dite température de préchauffage sous plusieurs pressions et durant plusieurs durées. Une fois la fusion totale est obtenue, la pression doit être maintenue à 300 bars et la température augmentée jusqu'à 180°C. Ces conditions (T=180°C et P=300bars) sont maintenues pendant deux minutes pour avoir une réticulation totale du matériau. Par la suite, on refroidit à 45°C, et obtenir ainsi des plaques de polyéthylène réticulé chimiquement de forme carré 13.5 cm×13.5 cm et 2±0.2 mm d'épaisseur.



Figure IV.2. Vue de la presse utilisée pour la fabrication des plaques du PRC

IV.2.3. Dimensionnements des éprouvettes

La forme et les dimensions des éprouvettes dépendent de la nature de la mesure ainsi que de la propriété à étudier. Afin d'assurer la reproductibilité et la précision des résultats, on usine des échantillons de mêmes dimensions appartenant à une même plaque commerciale.

- Les éprouvettes utilisées pour la mesure des courant de décharge sont de forme carrée de 3 cm×3 cm et de 4mm d'épaisseur.
- Les éprouvettes utilisées pour la mesure des propriétés diélectriques (Permittivité, et facteur de pertes diélectriques et de la résistivité transversale) sont de forme carrée de 3 cm×3 cm et de 2mm d'épaisseur.
- Des éprouvettes de forme carrée de 2cm×2cm sont utilisées pour la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FITR) et pour la microscopie électronique à balayage (MEB).

Avant de procéder aux essais, chaque échantillon est bien nettoyé à l'éthanol puis séché dans le but de réduire les poussières et les impuretés fixées sur la surface. Pour chaque essai, nous utiliserons un échantillon différent.

IV.3. Dispositifs expérimentaux

IV.3.1. Mesure du courant de décharge

Le dispositif expérimental utilisé pour mesurer les courants de décharges est montré sur la figure IV.3. L'alimentation haute tension est assurée par un transformateur d'essai monophasé placé dans une cage de Faraday dont les caractéristiques sont : $U = 100 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $P = 10 \text{ kVA}$.

Les décharges électriques sont obtenues à l'aide de deux électrodes, l'une pointue et l'autre plane. L'électrode pointe est reliée à la borne haute tension du transformateur d'essai, et l'électrode plane à la terre. L'ensemble est placé dans l'air à la pression atmosphérique. L'électrode haute tension est un cylindre de 3 mm de diamètre qui se termine par une pointe de 0.03 mm de rayon de courbure.

La variation de la tension se fait à l'aide d'un autotransformateur (voir annexe 2) qui se trouve au niveau du pupitre de commande.

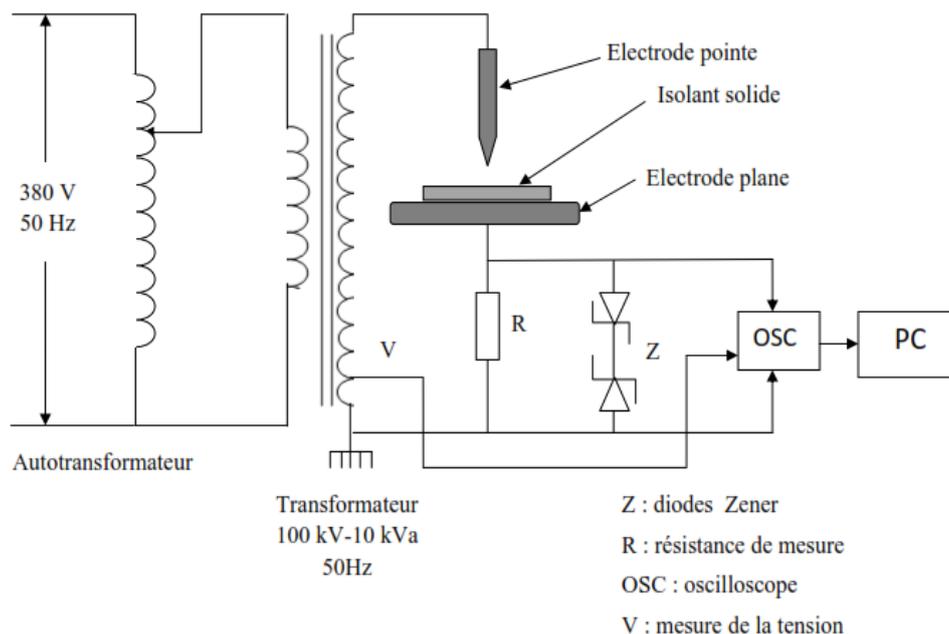


Figure IV.3. Dispositif expérimental pour la mesure des courants de décharge

Afin d'étudier le courant de décharge de surface, nous avons utilisé un oscilloscope à mémoire branché aux bornes d'une résistance R de $45 \text{ k}\Omega$. L'oscilloscope est de marque HAMEG 1507-2 a une bande passante de 150 MHz, une impédance d'entrée de $1 \text{ M}\Omega$ et un taux d'échantillonnage de 20 MS/s . L'oscilloscope à mémoire offre l'avantage de faciliter

l'acquisition de signaux de fréquence élevée. Les informations obtenues sont enregistrées par l'oscilloscope et sont transmises via une interface RS 232 à un ordinateur pour y être traitées.

Pour assurer la protection de l'oscilloscope contre une éventuelle surtension, nous avons placé des diodes Zener en tête bêche qui court-circuiteront la résistance de mesure R dès que la tension atteindra une valeur limite qui a été fixée à ses bornes.

L'oscilloscope est utilisé en mode dual pour visualiser simultanément la tension appliquée à l'échantillon et le courant de décharge et en mode single pour enregistrer la forme des impulsions de courant. Pour chaque niveau de tension nous enregistrerons en mode numérique l'impulsion de plus grande amplitude.

IV.3.2. Vieillesse électrique

Le vieillissement électrique des échantillons est obtenu en les plaçant en sandwich entre deux électrodes planes. Afin d'éviter tout contournement, nous avons placé une barrière diélectrique en polypropylène de 1 mm d'épaisseur entre l'éprouvette et l'électrode reliée à la terre. Les échantillons sont soumis à un champ électrique de $5kV_{eff}/mm$ pendant différentes périodes allant de 4 à 24 heures.

Le schéma du dispositif expérimental utilisé pour cette étude est représenté sur la figure IV.4. Les électrodes cylindriques utilisées sont en acier chromé de 9 cm de diamètre ayant le profil de Rogowski. L'électrode supérieure est reliée à la haute tension et l'électrode inférieure est reliée à la terre.

Les électrodes sont portées par un support en bakélite conçu de manière à ce qu'elles soient parfaitement opposées et perpendiculaires par rapport au plan et faciliter le réglage de la distance inter-électrodes et d'avoir un bon contact avec l'échantillon figure IV.5. La variation de la tension est obtenue par l'autotransformateur se trouvant dans le pupitre de commande (voir annexe. 4).

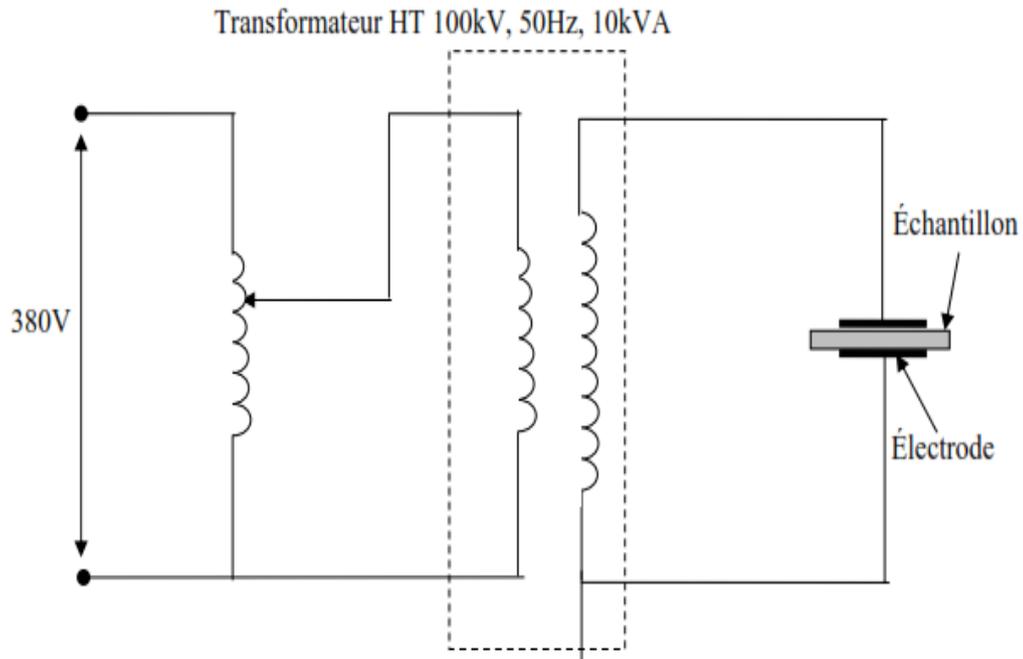


Figure IV.4. Dispositif expérimental pour le vieillissement électrique

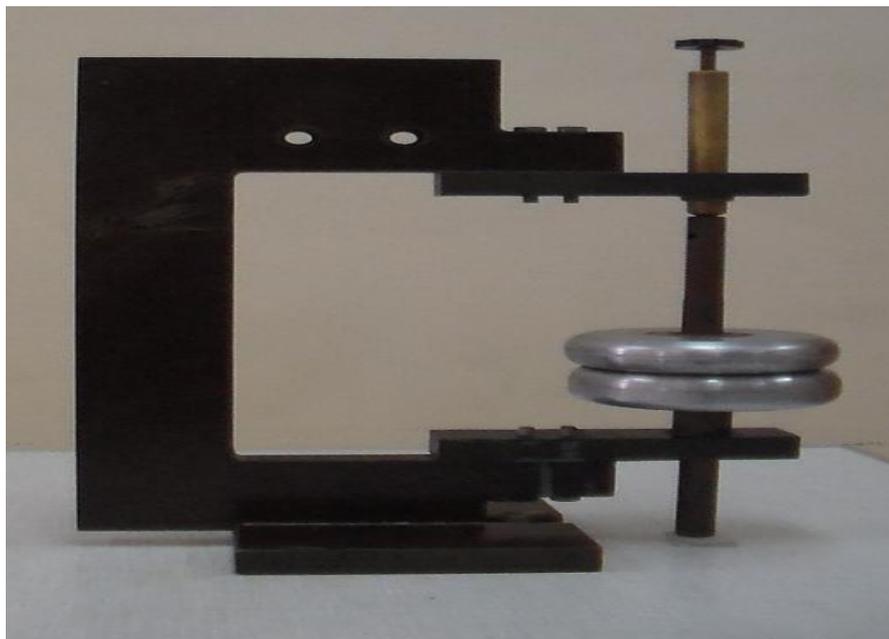


Figure IV.5. Support des électrodes

IV.3.3. Caractérisation diélectrique

Le schéma du dispositif expérimental utilisé pour la mesure des propriétés diélectriques est représenté sur la figure IV.6.



Figure IV.6. Vue des différents éléments de mesure des propriétés diélectriques

La caractérisation diélectrique a été effectuée au Laboratoire des Technologies Avancées du Génie Électrique (*LATAGE*) de l'UMMTO. Les caractéristiques diélectriques des éprouvettes sont mesurées à l'aide d'un LCR-mètre de type Instek-LCR 817. Cet appareil permet la mesure précise de la permittivité relative et du facteur de pertes diélectriques, sous faible tension (n'excédant pas 2V), sur une gamme de fréquence allant de 0.012 kHz à 10 kHz. Le LCR-mètre est relié à une cellule de mesure qui comporte deux électrodes cylindriques et identiques en bronze. Les éprouvettes vierges et soumises aux vieillissements électriques sont placées dans cette même cellule connectée à l'appareil de mesure avec des câbles les plus courts possibles. Les propriétés diélectriques sont mesurées sous une tension de 1V à des fréquences allant de 0.5 kHz à 10 kHz.

IV.3.3.1 Permittivité relative

Généralement, la permittivité écrite sous sa forme complexe est donnée par :

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (\text{IV.1})$$

La partie réelle ε' de la permittivité complexe ε^* représente la permittivité relative ou la constante diélectrique, elle nous renseigne sur la capacité du diélectrique à stocker la charge en présence du champ électrique.

L'éprouvette de PRC et les électrodes de mesure forment un condensateur plan ayant une capacité C donnée par la relation suivante :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{e} \quad (\text{IV.2})$$

D'où on obtient :

$$\varepsilon_r = \frac{Ce}{\varepsilon_0 S} \quad (\text{IV.3})$$

Où C est la capacité de l'éprouvette placée en sandwich entre les électrodes de mesure, e est l'espace inter-électrode qui est égale à l'épaisseur de l'éprouvette, S est la surface de l'électrode de mesure et $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F. m⁻¹ est la permittivité du vide.

La capacité C est lu sur LCR mètre.

IV.3.3.2 Facteur de pertes diélectriques (facteur de dissipation)

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

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (\text{IV.4})$$

Le facteur de pertes diélectriques est lu directement sur LCR mètre.

IV.3.3.3 Indice de pertes diélectriques

La partie imaginaire ε'' 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 :

$$\varepsilon'' = \tan \delta \cdot \varepsilon' \quad (\text{IV.5})$$

IV.3.3.4 Résistivité transversale

A l'aide du LCR mètre, nous mesurons la résistance d'isolement et ensuite nous calculons la résistivité transversale à l'aide de la relation suivante :

$$\rho = \frac{Rs}{e} \quad (\text{IV.6})$$

Avec :

ρ : résistivité transversale [Ω .cm]

R : résistance d'isolement [Ω]

e : épaisseur de l'éprouvette [cm]

s : surface de l'éprouvette

IV.3.4. Analyse microscopique

IV.3.4.1. Constitution d'un microscope électronique à balayage (MEB)

La figure IV.7 montre les différentes parties constitutives du MEB et qui sont :

- Une colonne maintenue sous vide ;
- Une source d'électrons ;
- Un dispositif haute tension pour l'accélération des électrons ;
- Un ensemble de lentilles électroniques pour former le pinceau fin et intense ;
- Un condenseur final (objectif) et un diaphragme de petit diamètre qui permet de focaliser le pinceau fin sur la surface à examiner ;
- Un dispositif de réflexion piloté par un générateur de balayage ;
- Un platine porte objet mobile ;
- Un détecteur d'électrons et un dispositif d'amplification du signal rapide et à faible bruit ;
- Un système de visualisation d'image ;
- Un détecteur d'électrons rétro diffusés et d'un détecteur de rayons X.

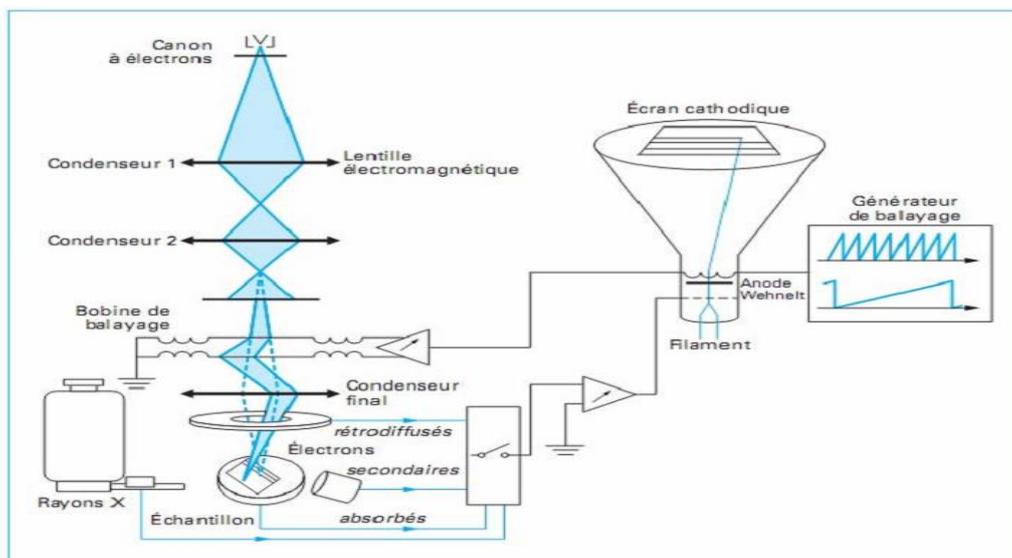


Figure IV.7. Schéma de principe d'un microscope électronique à balayage (MEB) [69]

IV.3.4.2. Principe de fonctionnement du MEB

La microscopie électronique à balayage (MEB) ou (SEM Scanning Electron Microscopy en anglais) est une technique de microscopie électronique pour l'observation de la surface. Elle est basée sur le principe des interactions électrons-matière. Un faisceau d'électrons est projeté sur l'échantillon à analyser. L'interaction entre le faisceau incident d'électrons primaires et l'échantillon génère principalement trois types d'émissions qui apportent différents types d'informations sur la matière dont est constitué l'échantillon :

➤ **Les électrons secondaires**

Ceux sont des électrons peu liés de la bande de conduction de l'atome, éjectés lors de leur choc avec les électrons primaires du faisceau. Ceux sont des particules de basse énergie. Ils sont accélérés vers un détecteur d'électrons secondaires qui amplifie le signal.

À chaque point d'impact correspond un signal électrique. L'intensité de ce signal électrique dépend à la fois de la nature de l'échantillon au point d'impact et de la topographie de l'échantillon au point considéré. Ainsi, en balayant le faisceau sur l'échantillon, on obtient une cartographie de la zone balayée.

➤ **Les électrons rétrodiffusés**

Ceux sont des électrons résultant de l'interaction des électrons du faisceau primaire avec des noyaux d'atomes de l'échantillon. Les électrons sont réémis dans une direction proche de leur direction d'origine avec une faible perte d'énergie. Ils permettent de mesurer l'homogénéité chimique d'un échantillon et son analyse qualitative.

➤ **Les rayons X**

L'impact d'un électron primaire à haute énergie peut ioniser un atome à une couche interne. La désexcitation, le remplissage de l'ordre énergétique de la structure électronique, se produit avec émission de rayons X. L'analyse de ces rayons permet d'obtenir des informations sur la nature chimique de l'atome.

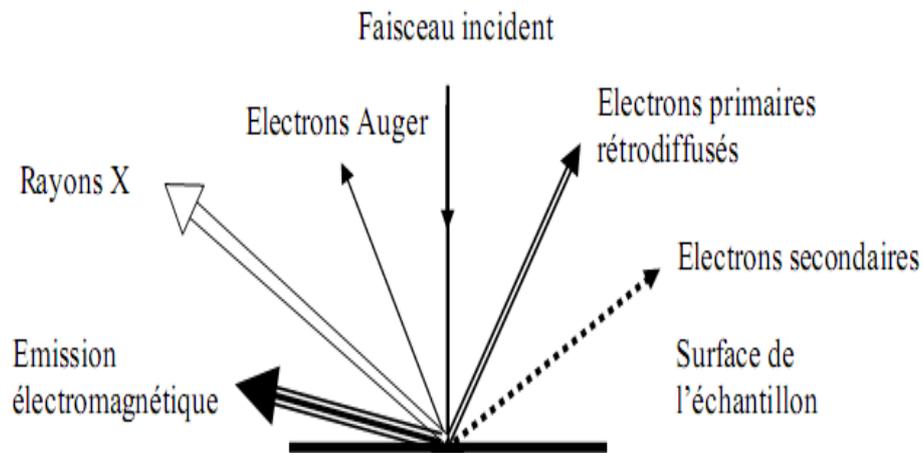


Figure IV.8. Signaux produits par l'interaction d'un électron primaire avec l'échantillon

Le MEB que nous avons utilisé est de type VEGA 3 LMU TESCAN installé dans le laboratoire de physique chimie de l'université de Skikda, est un appareil dit environnemental dans lequel l'échantillon reste à la pression atmosphérique figure IV.9. L'avantage que présente le microscope environnemental par rapport au microscope électronique ordinaire est de permettre l'analyse des surfaces isolantes sans qu'elles soient métallisées.



Figure IV.9. Photographie du microscope électronique à balayage

IV.3.4.3. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge est basée sur l'étude des interactions entre la matière et un rayonnement électromagnétique. Une molécule possède un certain nombre de fréquences de vibrations fondamentales et à chacune d'elles correspond l'absorption d'un rayonnement de même fréquence, c'est le principe d'un oscillateur d'harmonique. Ces fréquences varient de 100 à 4000 cm^{-1} , et les bandes d'absorption se situent dans l'infrarouge.

Le spectre infrarouge d'une molécule complexe peut présenter un grand nombre de bandes d'absorption d'intensités variables, situées à des fréquences quelconques. Le spectre dans sa totalité, est une caractéristique d'une molécule. Deux molécules différentes n'ont pas le même spectre, ce qui fait qu'un spectre infrarouge peut être utilisé comme un moyen d'identification.

À une longueur d'onde donnée, l'absorption d'un composé est définie par le rapport entre l'intensité I du rayonnement transmis par l'échantillon et l'intensité I_0 de la source. Ce rapport est appelé transmission ($T = I/I_0$) exprimé généralement en pour-cent.

L'échantillon à analyser est inséré dans le spectromètre en utilisant un porte échantillon. La chambre de mesure doit être purgée afin d'éliminer la présence de toutes autres constituants qui peuvent erronés les mesures. Pour obtenir un spectre infrarouge complet, un balayage sur une gamme de longueurs d'ondes située entre 400 cm^{-1} et 4000 cm^{-1} avec une résolution de 4 cm^{-1} est effectué. Nous effectuons une moyenne de 32 scans (enregistrements) pour chaque échantillon.

Le déroulement de l'essai est complètement automatisé, un PC relié directement au spectromètre permet l'acquisition et le traitement des données. Cette analyse est effectuée à l'aide d'un logiciel de type BIO-RAD.

Le spectromètre que nous avons utilisé est de type Shimadzu 8400 S installé au laboratoire de chimie de l'université d'Annaba figure IV.10. L'analyse est menée sur des films d'environ 200 μm d'épaisseur pour PRC préparés selon le procédé décrit dans le paragraphe IV.2.2.



Figure IV.10. Vue des différents éléments de mesure lors d'un essai FTIR

IV.4. Protocole des essais

La procédure expérimentale pour les essais effectués est la suivante:

- Afin de prendre en compte la dispersion des résultats, six éprouvettes sont utilisées pour mesurer le courant maximum de décharge, parmi ces six éprouvettes, quatre sont destinées à la variation de la distance d'interface Air-solide, les deux autres destinées à la variation de la tension appliquée et au temps d'exposition aux décharges.
- Les mesures pour le vieillissement électrique sont faites avec un pas de 4 heures de vieillissement. La durée maximale est de 24 heures.
- Une éprouvette vierge et six éprouvettes vieillis sont utilisées à l'étude de l'évolution des propriétés électriques. Les sept éprouvettes sont destinées à l'étude des variations du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité relative, de l'indice de pertes diélectriques et de la résistivité surfacique.
- Après chaque période de 10 heures de vieillissement électrique, nous prélevons quatre éprouvettes. La première est destinée pour le suivi du changement de couleur, la seconde pour la microscopie optique, la troisième pour la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la dernière pour la microscopie électronique à balayage (MEB).

IV.5. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description du dispositif expérimental, que nous avons utilisé pour effectuer les essais de cette étude.

L'étude électrique, qui fera l'objet du chapitre suivant, portera sur la mesure du courant maximum de la décharge, en fonction de la distance inter-électrodes, et de la tension appliquée, ainsi que l'influence de décharge électrique surfacique sur les propriétés diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).

Le chapitre suivant, présentera les résultats obtenus sur l'effet de l'interface air-solide sur les courants de décharges et la charge associée dans une configuration d'électrodes pointe-plan en régime de tension alternative. Ainsi que les mesures des propriétés diélectriques des échantillons du PRC soumis au vieillissement électrique accéléré.

Chapitre VI

Résultats et discussions

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux caractérisant l'influence de la distance d'interface air-solide et la tension appliquée sur les impulsions du courant de décharge ainsi que l'influence des décharges surfaciques sur les propriétés diélectriques du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) utilisé dans l'isolation des câbles de transport d'énergie électrique. L'évolution des propriétés diélectriques du PRC sont discutées en fonction du temps de vieillissement, et de fréquence.

Une étude optique par microscope électronique à balayage MEB accompagnera cette étude pour visualiser l'état de surface de l'isolant solide (PRC), vierge et d'autres soumis aux décharges. L'analyse spectroscopique FTIR est présentée également dans ce chapitre.

V.2. Essais préliminaires

Une fois le montage expérimental est prêt, nous devons alors faire quelques essais préliminaires dans un montage simple, pour cela nous avons mesuré la tension de la source d'alimentation fournie par le réseau (220V) figure V.1, afin de se familiariser avec le logiciel fourni avec l'oscilloscope ainsi que ses différentes fonctions.

Les essais préliminaires sont nécessaires pour la mise en forme des essais expérimentaux, ils nous permettent de prendre une marge sécuritaire pour le matériel afin d'éviter le contournement de l'isolation solide qui risque d'endommager l'oscilloscope.

Lors des essais préliminaires, nous avons constaté la présence de parasites qui peuvent influencer les mesures, donc les fausser. Pour atténuer leur influence, à défaut de les éliminer complètement, nous avons mis à la même terre toutes les masses et nous avons utilisé des câbles coaxiaux.

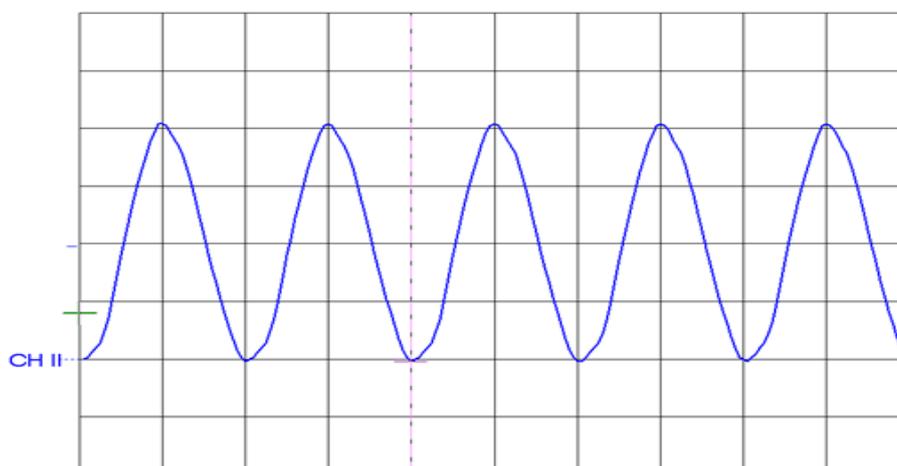


Figure V.1. Courbe de tension

V.3. Courant de décharge de surface

Une explication du processus de décharge peut être obtenue à partir de l'étude de la forme de l'impulsion de courant de décharge. Avec le développement des techniques de mesure, il est possible d'obtenir les caractéristiques des impulsions de courant, ce qui nous permettra une meilleure compréhension du comportement de l'isolation, en particulier le processus de dégradation sous l'action des décharges électriques.

Dans cette partie nous présentons les résultats expérimentaux de l'étude des courants de décharge sur des échantillons de PRC. En faisant varier la tension appliquée, l'épaisseur de la couche d'air et le temps d'exposition des échantillons aux décharges, ces mesures sont faites sous tension alternative en système d'électrodes pointe-plan.

V.3.1. Courant maximum de décharge

La figure V.2 montre la forme du courant de décharge avec ses deux composantes distinctes :

- La composante capacitive qui est due principalement à la présence de diélectrique entre les deux électrodes qui se comporte comme un condensateur ou capacité. Ce courant est proportionnel à la tension appliquée avec laquelle il est déphasé de $\frac{\pi}{2}$.

$$I_0 = -C \frac{dv}{dt} \quad (V.1)$$

Où : C : capacité du solide isolant

- la composante impulsionnelle qui est due aux décharges à la surface de l'isolant solide. Les impulsions du courant sont moins nombreuses mais elles ont une amplitude plus grande en alternance positive qu'en alternance négative.

Ces impulsions sont une succession des micros décharges dans l'espace inter électrode. La durée de chaque impulsion est très courte, de l'ordre de la micro seconde (5 μ s). Elles n'ont lieu que lors des phases vers l'extremum de chaque alternance du signal appliqué aux anodes. De plus, pour chaque inversion du signal, le signe des pics du courant s'inverse. Les impulsions de courant apparaissent durant le premier cadran de chaque alternance positive et négative de la tension [71] figure V.2.

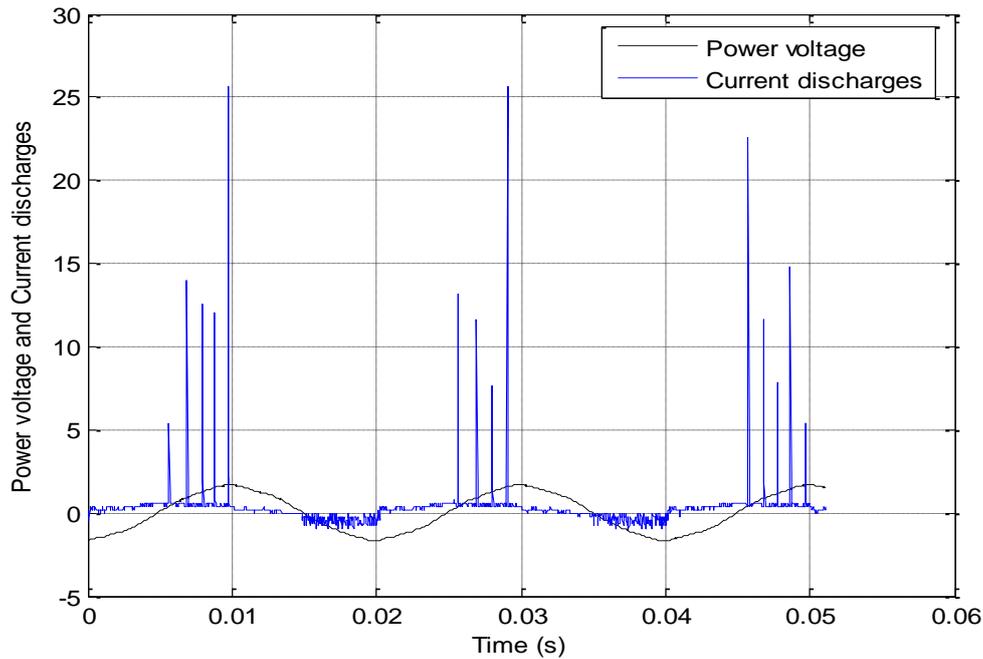


Figure V.2. Courbe du courant de décharge et de la tension en fonction du temps (V=10kV)

Nous étudions le courant impulsionnel qui correspond aux décharges électriques dans la couche d'air en série avec l'échantillon du PRC. En faisant varier la tension appliquée et l'épaisseur de l'intervalle d'air, nous enregistrons les impulsions positives et négatives de plus grande amplitude.

L'amplitude des impulsions varie dans une grande plage, c'est pourquoi nous nous intéresserons, pour chaque niveau de tension, aux impulsions de courant négative et positive ayant la plus grande amplitude. En fonction de la distance d'interface air-solide et de la tension appliquée, nous caractériserons ces impulsions maximales de courant par leur: amplitude et charge.

Nous enregistrons d'abord l'impulsion de courant maximale en utilisant le mode numérique d'acquisition de signaux de l'oscilloscope. En jouant sur la position du curseur de déclenchement on détermine l'impulsion maximale pour chaque valeur de tension appliquée à l'échantillon. Pour choisir la polarité de l'impulsion à mesurer, il suffit de placer ce curseur au-dessus de la ligne de référence 0 volt pour la polarité positive et au-dessous pour la polarité négative en adoptant le mode de déclenchement front montant pour la première et front descendant pour la deuxième. Une fois l'impulsion maximale enregistrée, toutes les données

de l'enregistrement seront transmettre à l'ordinateur via l'interface RS 232, nous procédons au calcul de la charge par intégration du courant en utilisant le logiciel de calcul Matlab.

La figure V.3 représente la forme des impulsions du courant positive. Cette impulsions a une grande amplitude avec un faible temps de montée qui correspond aux déplacement des électrons qui ont une grande mobilité.

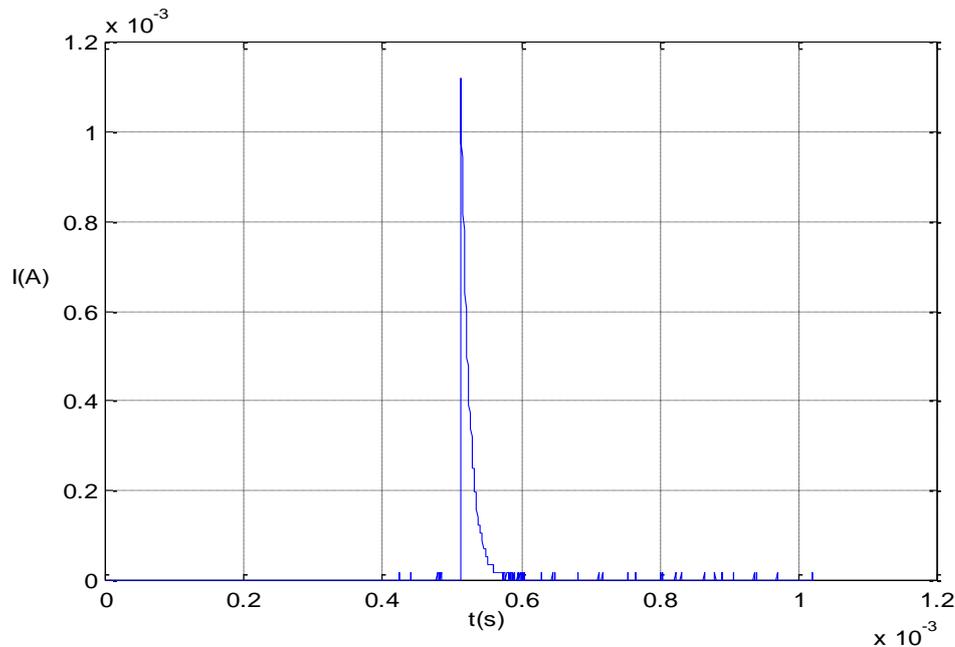


Figure V.3. Forme des impulsions positives

La période d'activité (temps entre l'apparition de la première impulsion et l'extinction de la dernière impulsion pendant une alternance) s'élargit quand la tension appliquée augmente. L'apparition par intermittence des décharges est due à l'accumulation puis la disparition de la charge sur le solide isolant. En effet, la charge qui s'accumule à la surface du solide réduit le champ électrique appliqué et la décharge s'éteint [71].

V.3.2. Influence de la tension appliquée sur le courant maximum de décharge

La figure V.4 montre le courant maximum de décharge en polarité positives et négatives pour un échantillon du PRC de 4 mm d'épaisseur avec une couche d'air de 3 mm.

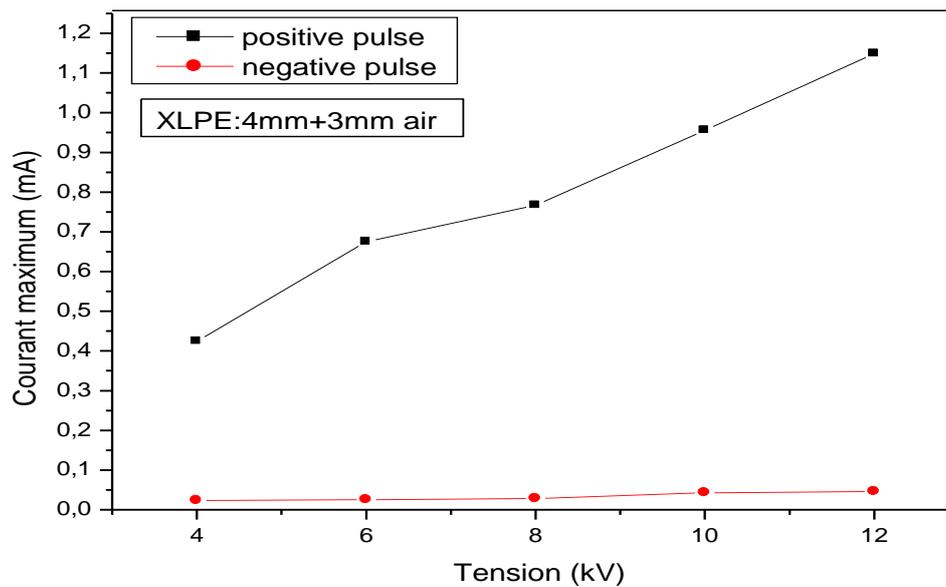


Figure V.4. Courant maximum de décharge en fonction de la tension pour les deux polarités

D'après la figure V.4 on constate que l'intensité du courant augmente avec la tension appliquée pour les deux polarités, mais celles des impulsions positives croissent rapidement et plus grandement. Alors que les impulsions du courant négatives varient relativement moins en fonction de la tension.

Dans le cas où la pointe est négative, les électrons se déplacent dans la direction du champ d'intensité décroissante. Par conséquent, la vitesse se dérive et l'efficacité d'ionisation diminue en s'éloignant de la pointe. Il est plus difficile pour une décharge électrique de se propager à travers l'espace inter électrodes dans un champ convergent vers la cathode (pointe négative) que dans un champ divergent de l'anode (pointe positive).

Le champ électrique est aussi réduit par l'accumulation d'ions négatifs formés par attachement d'électrons libres avec les molécules d'oxygène dans l'intervalle d'air, l'oxygène étant électronégatif [72].

L'amplitude maximale des impulsions positives du courant croît avec la tension et diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de l'intervalle d'air, ce qui est dû à l'augmentation de l'impédance de la couche d'air [73] figure V.5.

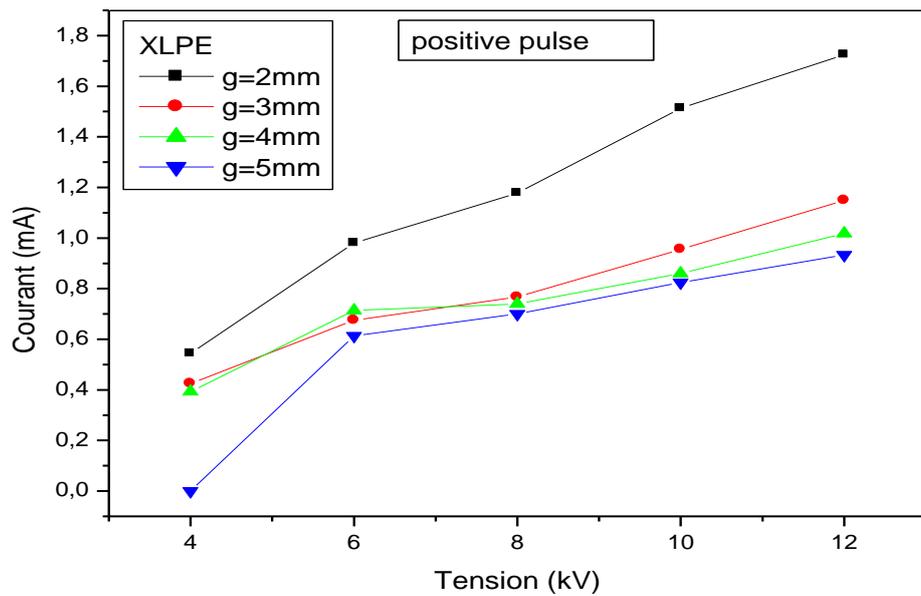


Figure V.5. Courant maximum de décharge en fonction de la tension

V.3.3. Influence de l'épaisseur de la couche d'air sur le courant maximum de décharge

Nous avons fait varier l'épaisseur de la couche d'air entre la pointe de l'électrode haute tension et l'isolant solide de telle sorte que la décharge se produit dans le volume d'air avant d'atteindre la surface de l'isolant solide figure V.6.

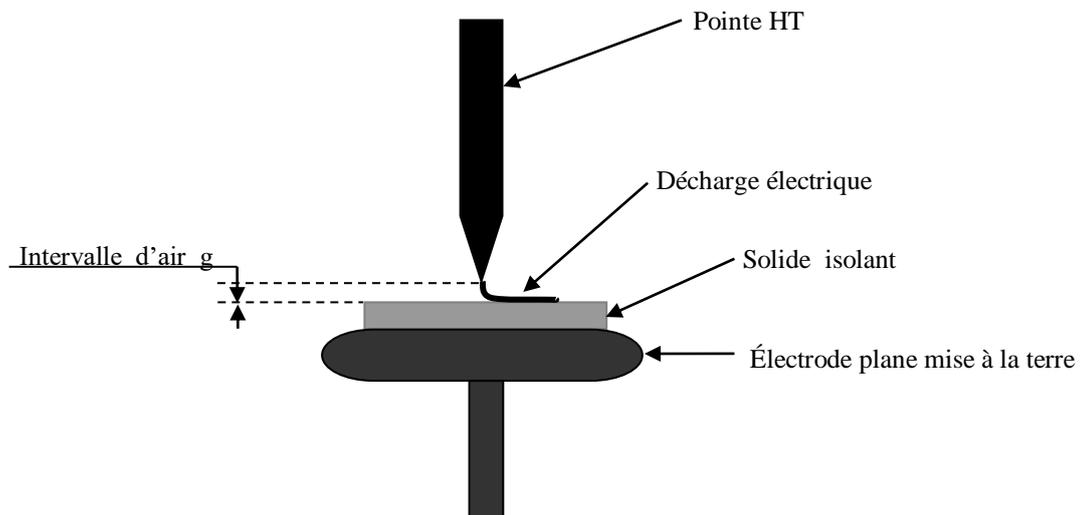


Figure V.6. Système d'électrodes pointe-plan avec inclusion d'une couche d'air entre la pointe et le solide isolant

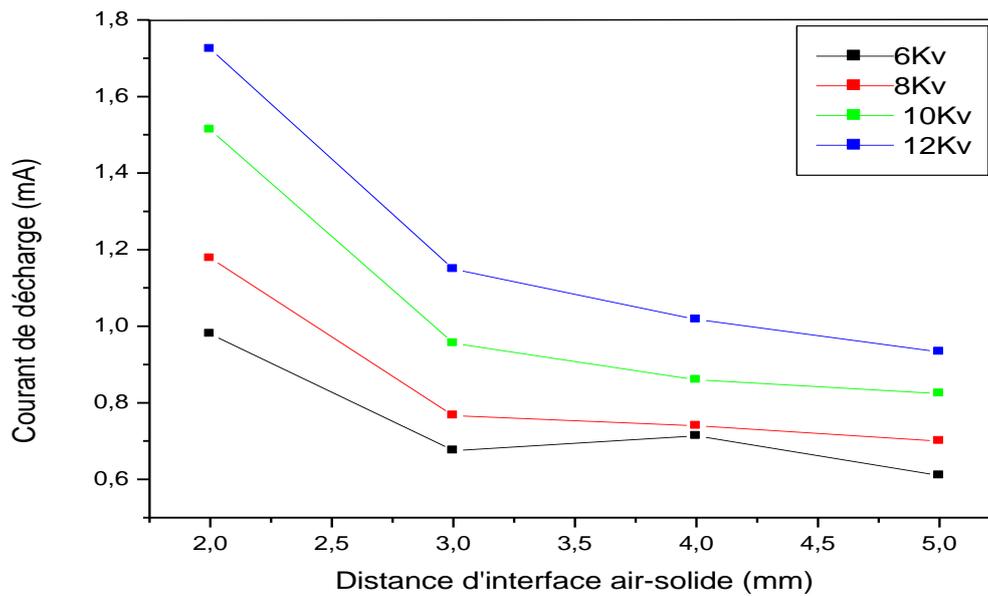


Figure V.7. Courant de décharge en fonction de la distance d'interface air-solide

On voit que les résultats sont sensiblement différents en fonction des deux paramètres considérés. Pour une valeur de tension appliquée donnée, le courant maximum de la décharge décroît lorsqu'on augmente la distance d'interface air-solide. En revanche, pour une distance d'interface air-solide fixe, le courant maximum de la décharge augmente lorsque la tension appliquée prend les valeurs plus élevées. On peut expliquer ces variations par l'augmentation de l'impédance de la couche d'air.

En effet, pour une tension appliquée fixe (e.g 10Kv) et une distance d'interface donnée (e.g 4mm), les électrons présents naturellement dans le milieu gazeux vont être accélérés par le champ électrique E et dérivent vers l'anode. Au cours de leur dérive, les électrons vont effectuer des collisions ionisantes avec les molécules du gaz générant ainsi des avalanches électroniques. Plus le champ électrique est élevé, et plus les électrons seront énergétiques entraînant une amplification de l'avalanche électronique plus forte et plus rapide, la conséquence macroscopique de cette augmentation de la tension appliquée à la pointe se traduit notamment par l'augmentation du courant maximum constaté sur la figure V.7, ceci est également été observé dans la littérature [74] [75] et [76].

En revanche, pour une tension appliquée bien déterminée, si on fait croître la distance d'interface air-solide, on constate que la valeur du courant maximum de la décharge décroît, car les électrons qui vont dériver vers l'anode seront moins énergétiques pour ioniser et/ou exciter les molécules du gaz. La densité électronique dans le milieu sera plus faible que le cas

précédent en raison des processus d'attachement qui seront plus efficaces lorsqu'on augmente la distance d'interface air-solide pour une tension donnée par ce que dans le cas de l'air l'attachement est plus efficace lorsque le champ est plus faible. C'est pourquoi, on observe sur la figure V.7 une diminution de la valeur du courant maximum de la décharge en fonction de l'augmentation de la distance d'interface air-solide.

V.3.4. Influence du temps du vieillissement sur le courant de décharge

Un vieillissement sous décharges d'une plaque de PRC de 4 mm en série avec un intervalle d'air de même épaisseur a montré que le courant de décharge augmente avec la durée du vieillissement figure V.8.

La figure V.8 montre le courant maximum de décharge en fonction du temps du vieillissement.

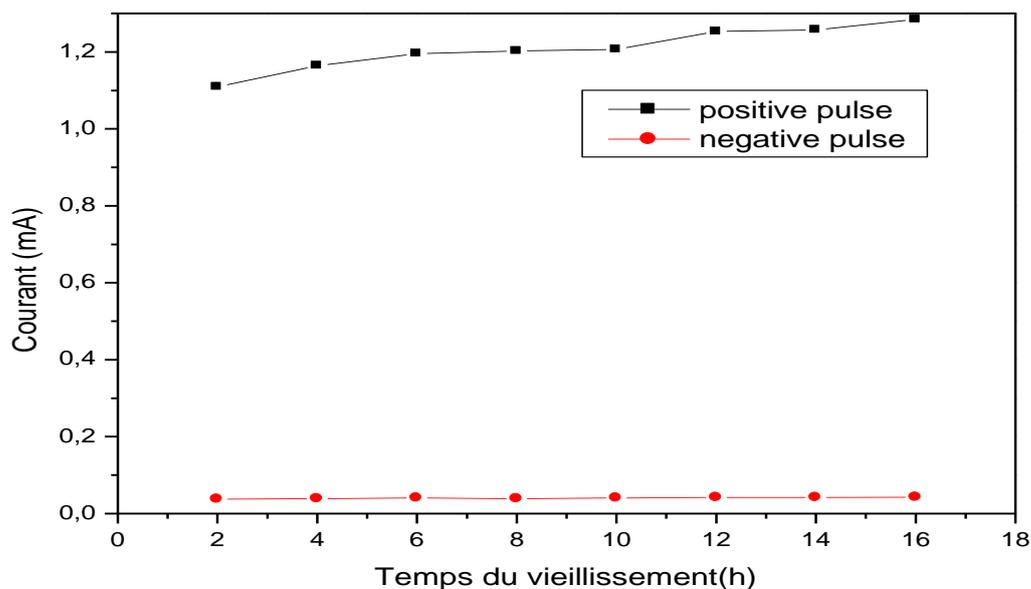


Figure V.8. Influence du vieillissement sur le courant maximum de décharge

D'après la figure V.8 on constate que le vieillissement électrique entraîne un accroissement des amplitudes maximales du courant de décharge, cet accroissement est d'autant plus important que le temps du vieillissement est grand notamment au-delà de 2 heures de vieillissement. Ceci est dû aux phénomènes régissant la charge d'espace qui favorise plus ou moins le régime de décharge. Cette dégradation est constatée visuellement consiste en l'apparition d'une couche d'humidité et d'une couronne blanchâtre.

V.4. Charge associée à la décharge électrique

La charge associée à la décharge électrique joue un rôle fondamental dans le développement de la décharge partielle, elle a toujours une influence sur le phénomène de claquage de l'isolant soumis à un champ électrique élevé [77]. Les modifications chimiques induites par les décharges à la surface du solide isolant dépendent de la charge produite [78]. Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer la charge associée : figures de Litchenberg [79], sonde électrostatique [80], effet Pockels (méthode électro-optique) [81].

Nous avons utilisé une méthode indirecte pour évaluer la charge associée en recourant à l'enregistrement de la courbe de courant impulsionnel puis au calcul de la charge par intégration de $i(t)$.

La charge représente le nombre d'électrons qui, lors du développement des avalanches électroniques, sont recueillis ou émis (suivant la polarité) au niveau de l'électrode haute tension. Le courant de décharge à la surface de l'isolant solide sera transmis à la terre à travers la résistance de mesure après avoir traversé l'isolant solide sous forme d'un courant de déplacement. L'intensité étant définie comme le nombre des charges électriques traversant un circuit par unité de temps, la charge impulsionnelle est calculée comme suit :

$$Q = \int i(t) dt \quad (V.3)$$

La charge impulsionnelle est donc donnée par le calcul de l'aire des impulsions de courant.

La figure V.9 montre la variation de la charge maximale de l'impulsion de courant en alternance positive en fonction de la tension pour différentes épaisseurs de l'isolant solide.

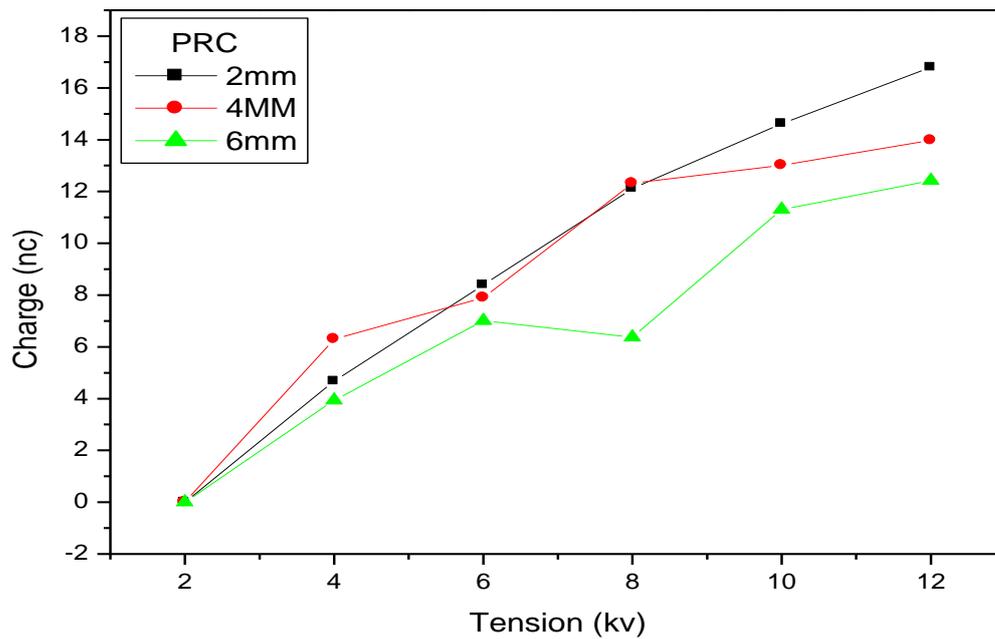


Figure V.9. Charge positive maximale en fonction de la tension appliquée

Nous pouvons interpréter l'allure de la courbe $Q=f(U)$ de façon suivante :

Lorsqu'une impulsion de courant est enregistrée, la décharge correspondante s'étend sur une longueur L à la surface d'un isolant d'épaisseur d . la capacité du diélectrique à l'endroit où se produit la décharge est proportionnelle à la longueur de cette dernière.

$$C = \frac{K_1 \cdot L}{d} \quad (\text{V.4})$$

Avec :

C : capacité du diélectrique

K_1 : constante

L : longueur de la décharge

d : épaisseur du diélectrique

Comme la longueur de la décharge est proportionnelle à la tension appliquée [82], nous pouvons écrire :

$$C = \frac{K_1 \cdot (K_2 U)}{d} \quad (\text{V.5})$$

Nous savons aussi que la charge est égale au produit de tension par la capacité

$$Q = C \cdot U \quad (\text{V.6})$$

D'où l'expression de la charge en fonction de la tension appliquée et de l'épaisseur du solide isolant est comme suit :

$$Q = \frac{K_1 \cdot K_2 U^2}{d} ; Q = \frac{K \cdot U^2}{d} \quad (\text{V.7})$$

La charge est proportionnelle au carré de la tension et inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique ceci est confirmé par la figure V.10.

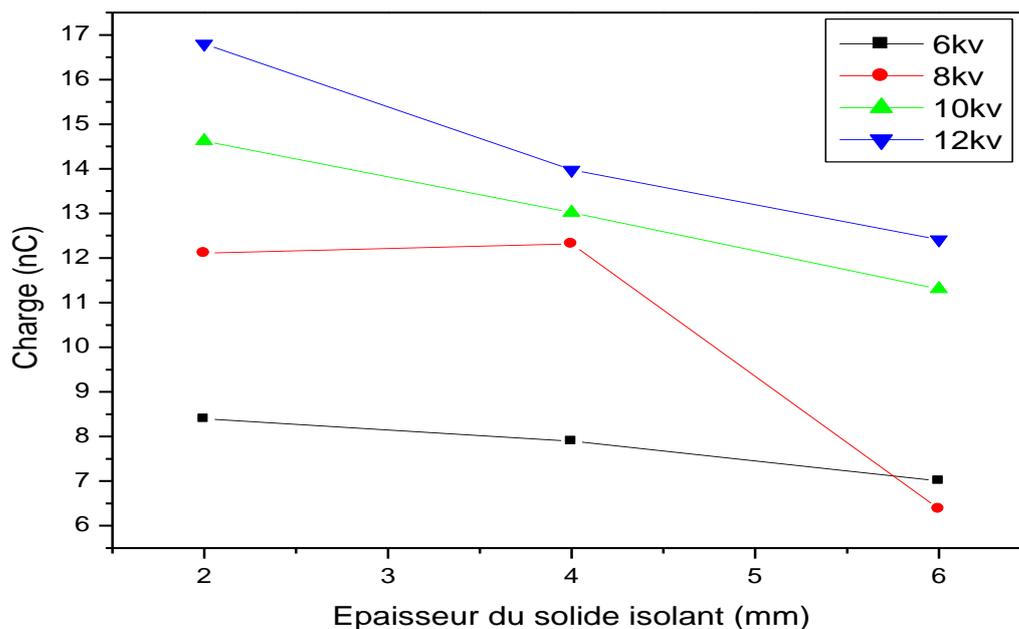


Figure V.10. Charge positive en fonction de l'épaisseur du solide isolant

Lorsque la surface d'un isolant est soumise à la décharge pendant un certain temps, il apparaît une modification rapide et importante des propriétés de surface [83]. Grâce à la présence de l'Oxygène, l'ensemble de la surface présente une structure différente sous forme de couche dégradée fortement oxydée [84]. Les propriétés physico-chimiques de cette couche sont très différentes de celle du matériau initial. Il en résulte une importante conductivité de surface.

Dans ce contexte la charge qui s'accumule sur la surface des échantillons du PRC favorise la conduction superficielle du matériau.

V.5. Morphologie de la surface du solide isolant soumis aux décharges

La micrographie SEM de la surface d'un échantillon du PRC vierge et un autre vieilli électriquement pendant 14 h sous une tension alternative de 10Kv est représentée sur la figure V.11.

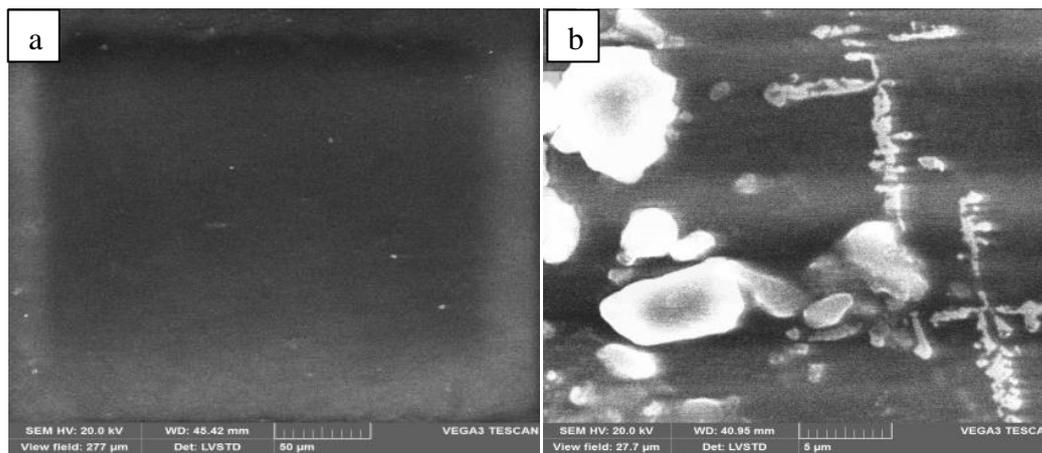


Figure. V.11. Micrographie MEB du PRC, a) vierge, b) vieilli électriquement sous 10Kv pendant 14 heures

L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la surface de l'échantillon du PRC vierge et un autre soumis aux décharges électriques a montré le développement d'une arborescence de surface (figure V.11.b). Cette dernière serait générée par déstabilisation électrique de la charge déposée à la surface du matériau par le faisceau du microscope électronique [85]. Par contre la surface d'échantillon vierge présente une surface lisse, homogène exempte de toute dégradation (figure V.11. a).

V.6. Caractérisation électrique

V.6.1. Variation des propriétés diélectriques en fonction du temps du vieillissement

Dans cette partie, nous présenterons les résultats correspondant à l'évolution des propriétés diélectriques du PRC (constante diélectrique, du facteur de pertes diélectriques, et de la résistivité transversale) sous contrainte électrique en fonction du temps de vieillissement.

V.6.1.1. Permittivité relative (Constante diélectrique)

La variation de la constante diélectrique en fonction du temps du vieillissement est représentée sur la figure V.12.

Lorsqu'un diélectrique est soumis à l'action d'un champ électrique, il se produit à l'échelle moléculaire diverses modifications qui ont pour effet de créer un champ électrique propre à l'intérieure de la substance, s'opposant au champ électrique extérieur appliqué. À cet effet, on constate sur la figure V.12 que la permittivité relative présente des variations non monotones en fonction du temps de vieillissement, avec présence de quelques pics. À la fin du vieillissement la constante diélectrique enregistre une légère augmentation par rapport à la valeur d'origine, ceci peut être du au champ électrique appliqué qui favorise la polarisation du matériau.

Il est connu que le vieillissement électrique entraînera le changement des degrés de réticulation et de la structure chimique dans les polymères [86], ce qui entraînera l'augmentation ou la diminution du degré de la polarisation du matériau, conduisant au changement de la constante diélectrique. Du point de vue global, la diminution du degré de réticulation sous la contrainte électrique est due à la rupture des liaisons moléculaires [87], ce qui conduira aux changements de la taille des chaînes du polymère, qui rend le mouvement des groupes polaires dans la direction du champ appliqué plus facile. Cela conduira à l'augmentation de la constante diélectrique

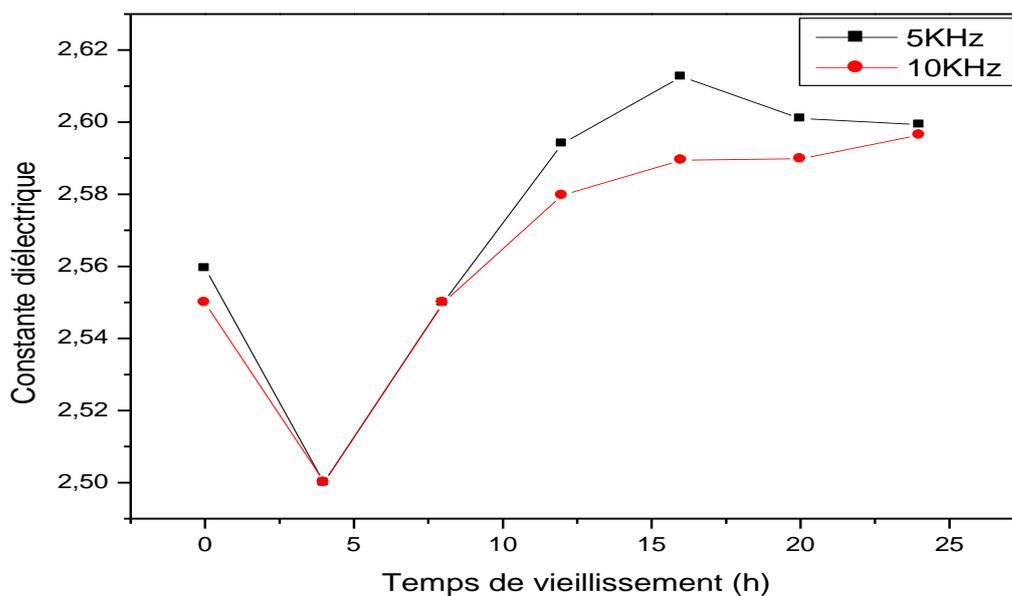


Figure V.12. Constante diélectrique en fonction du temps du vieillissement

V.6.1.2. Facteur de pertes diélectriques

La variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps du vieillissement électrique est représentée sur la figure V.13.

Tout isolant soumis à un champ électrique alternatif intense est traversé par des courants de conduction et d'absorption qui donne à lieu des pertes diélectriques.

On constate sur la figure V.13 que le facteur de pertes diélectrique présente également des variations non monotones en fonction du temps de vieillissement, avec présence de quelques pics. Ces pics occasionnels sont attribués à l'augmentation des groupes polaires en raison de l'absorption d'eau, ce qui se traduit par la participation de plus de groupes polaires au phénomène de polarisation [91]. L'énergie dissipée par ces groupes sous forme de chaleur entraîne une augmentation brusque de $\text{tg}\delta$ [91]. Le facteur de pertes diélectriques dépend de la conductivité électrique et des phénomènes de polarisation (notamment la polarisation dipolaire) [92]. Le nombre de porteurs de charges et la fréquence du champ électrique appliqué sont deux paramètres qui influencent sur la conductivité électrique et le facteur de pertes diélectriques.

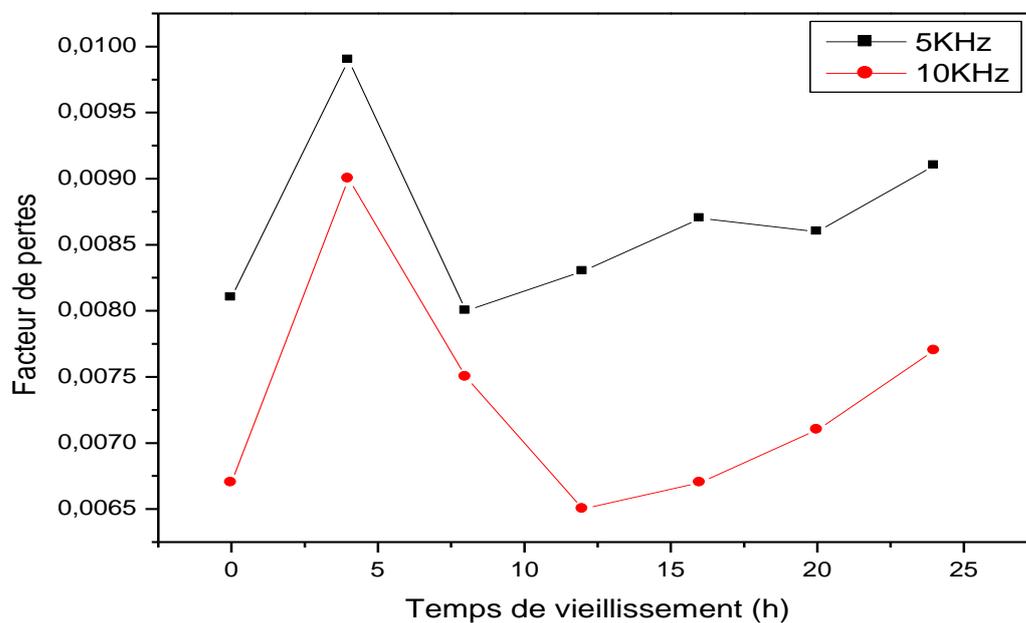


Figure V.13. Facteur de pertes diélectrique en fonction du temps du vieillissement

V.6.1.3. La résistivité transversale

La variation de la résistivité transversale en fonction du temps de vieillissement électrique est représentée sur les figures V.14.

La résistance transversale du matériau a subi une forte réduction au cours des premiers stades du vieillissement, puis elle s'est approchée d'une valeur asymptotique [98]. Ce comportement de saturation a également été observé par Handala et *al.* [99]. La diminution de la résistance est une indication de la modification des propriétés physiques et chimiques du PRC. La mouillabilité de la surface est renforcée par le phénomène d'oxydation résultant du vieillissement [98]. Ce phénomène d'oxydation peut conduire à l'augmentation de la mouillabilité du matériau [99].

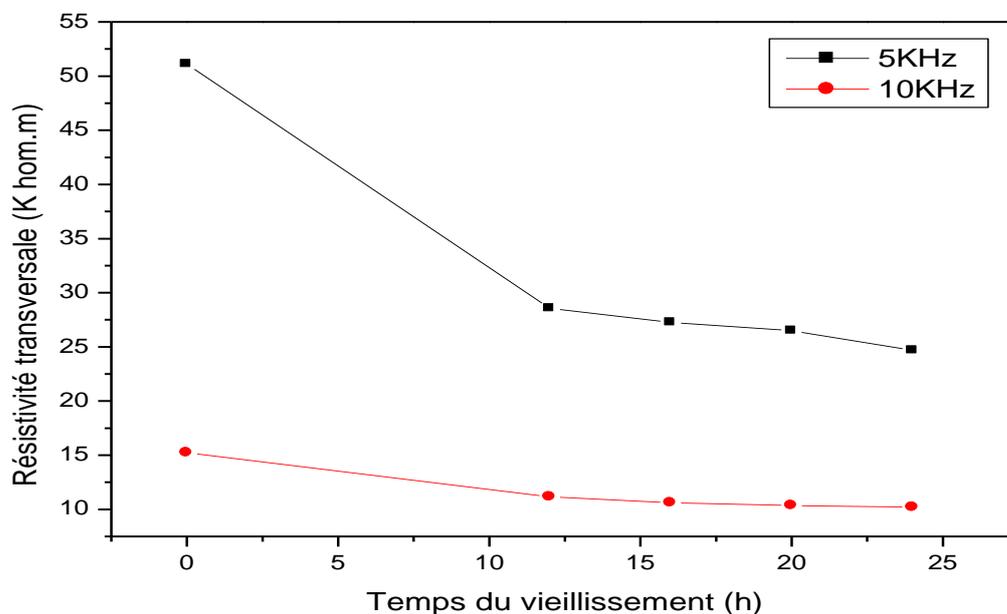


Figure V.14. Variation de la résistivité en fonction du temps du vieillissement

V.6.2. Variation des propriétés diélectriques en fonction de la fréquence

Pour présenter les résultats correspondant à l'évolution des propriétés diélectriques du PRC (constante diélectrique, du facteur de pertes diélectriques et de la résistivité transversale) en fonction de la fréquence, nous avons utilisé un LCR mètre dans la plage allant de 0.5 kHz à 10 kHz.

V.6.2.1. Permittivité relative (Constante diélectrique)

La variation de la constante diélectrique en fonction de la fréquence est représentée sur la figure V.15.

D'après la figure V.15 on constate que la permittivité décroît avec l'augmentation de la fréquence, ce qui implique que les dipôles induit par polarisation ne suivent pas l'oscillation du champ électrique

Les mécanismes de polarisation dépendent à la fréquence du champ électrique appliqué, ces mécanismes régissent l'évolution de la constante diélectrique [88]. La constante diélectrique d'un polymère dépend de la capacité des groupes polaires à suivre les oscillations d'un champ électrique alternatif appliqué [89]. L'évolution de la permittivité en fonction de la fréquence a été effectuée dans la plage allant de 0.5 kHz à 10 kHz, La polarisation dominante dans cette plage de fréquence est la polarisation dipolaire [90]. Aux basses fréquences, tous les groupes fonctionnels libres dans le PRC tendent à s'orienter dans la direction du champ électrique appliqué, ce qui donne une valeur de constante diélectrique plus élevée à ces fréquences. Dès que la fréquence du champ appliqué augmente, les groupes dipolaires notamment les plus grands ont du mal à s'orienter et leur contribution à la constante diélectrique diminue.

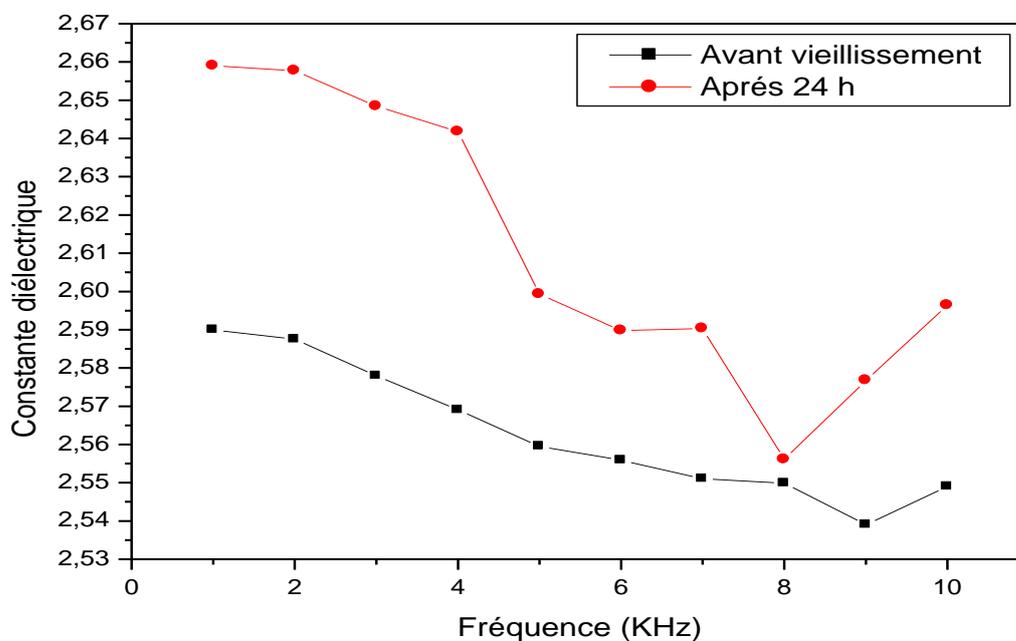


Figure V.15. Constante diélectrique en fonction de fréquence

V.6.2.2. Facteur de pertes diélectriques

La variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la fréquence est représentée sur la figure V.16.

La diminution du facteur de pertes en fonction de la fréquence est due à l'atténuation du phénomène de polarisation [93], et due également à la dispersion des groupes polaires qui ne suivent pas l'oscillation du champ électrique.

Dans le schéma équivalent d'un diélectrique présenté dans le chapitre I (équation I.9) le facteur de pertes diélectriques dépend de la fréquence selon la relation suivante:

$$\operatorname{tng}\delta = \frac{1}{RC2\pi f} \quad (\text{V.8})$$

D'après cette relation le facteur de pertes diélectriques est inversement proportionnel à la fréquence.

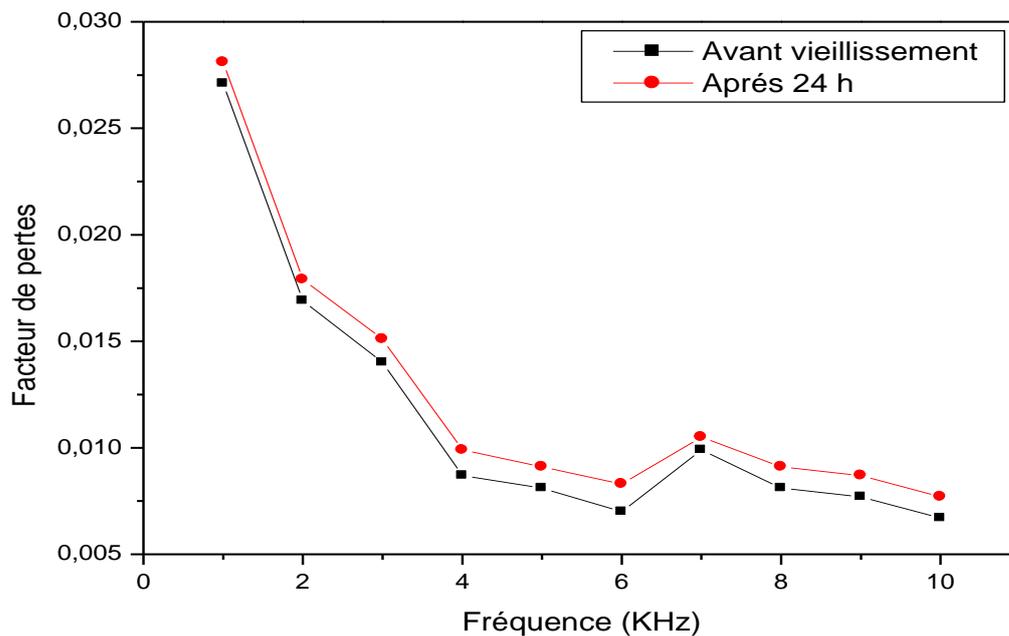


Figure V.16. Facteur de pertes diélectrique en fonction de fréquence

V.6.2.3. La résistivité transversale

La variation de la résistivité transversale en fonction de la fréquence est représentée sur la figure V.17.

On remarque que l'augmentation de la fréquence induit une diminution dans les valeurs de la résistivité. La résistivité est déduite de la mesure de la résistance à l'aide d'une relation qui dépend de la fréquence, elle est inversement proportionnelle à la fréquence.

$$R = \frac{1}{C_0 \varepsilon_r \omega} \quad (\text{V.9})$$

$$\rho = \frac{S}{C_0 \varepsilon_r e 2\pi f} \quad (\text{V.10})$$

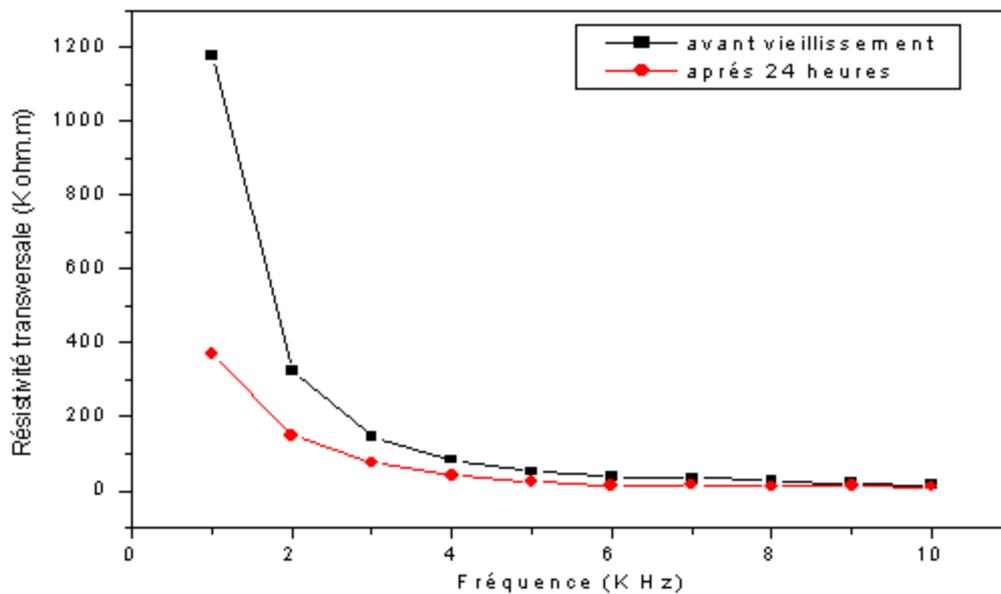


Figure V.17. Variation de la résistivité transversale en fonction de fréquence

V.6.3. Indice de pertes diélectriques

L'utilisation de cette propriété présente l'avantage de réunir en un seul terme deux particularités du matériau. Comme l'indice de pertes diélectrique est le produit de la permittivité relative et du facteur de pertes diélectriques, alors il présente pratiquement la même allure de variation que celle du facteur de pertes diélectriques. En effet, la variation de l'indice de pertes diélectriques en fonction du temps du vieillissement électrique et de la fréquence est représentée sur les figures V.18 et V.19.

On constate sur la figure V.18 qu'une augmentation ou diminution du facteur de pertes correspond à une augmentation ou diminution de l'indice de pertes. Ces variations

correspondent à l'énergie perdue par effet joule dans le PRC [92, 94,95]. La figure V.19 montre que l'indice de pertes diminue progressivement avec l'augmentation de la fréquence. La diminution est plus accentuée en basses fréquences. Ce déclin serait dû au phénomène de relaxation dipolaire prenant naissance dans le matériau [96,97].

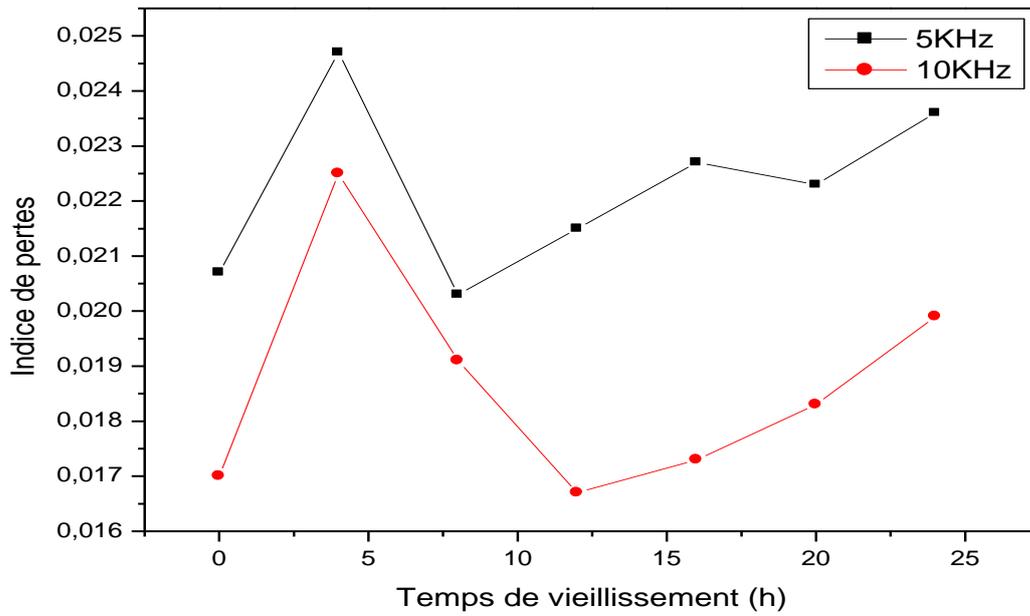


Figure V.18. Indice de pertes diélectrique en fonction du temps de vieillissement

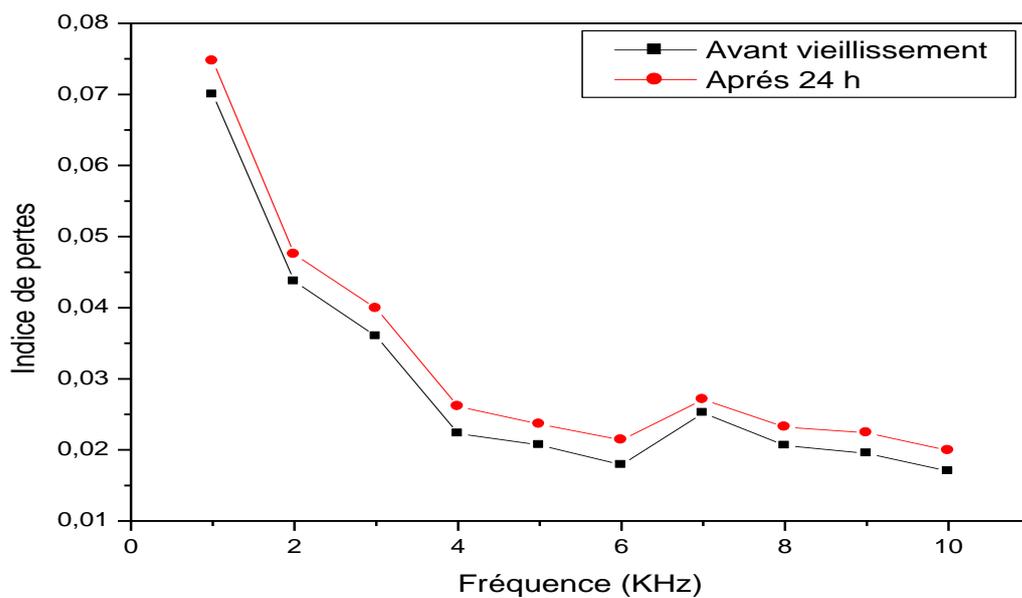


Figure V.19. Indice de pertes diélectrique en fonction de fréquence

V.7. Observations visuelles des dégradations causées par le vieillissement électrique

Juste après vieillissement électrique, les surfaces des échantillons se dégradent. Un changement de couleur est visuellement constaté. En effet, une couronne blanchâtre se forme sur la surface comme le montre les photographies de la figure V.20. De l'humidité est aussi observé sur la surface. L'épaisseur de la couronne ainsi que la quantité de l'humidité observée sur la surface sont d'autant plus importante que le temps de vieillissement est important. Ce changement de couleur est évoqué par plusieurs chercheurs [100, 101, 102]. Ce phénomène de changement de couleur qui est la première manifestation de la dégradation est attribué à l'oxydation en éliminant des groupes fonctionnels le long de la chaîne [102].

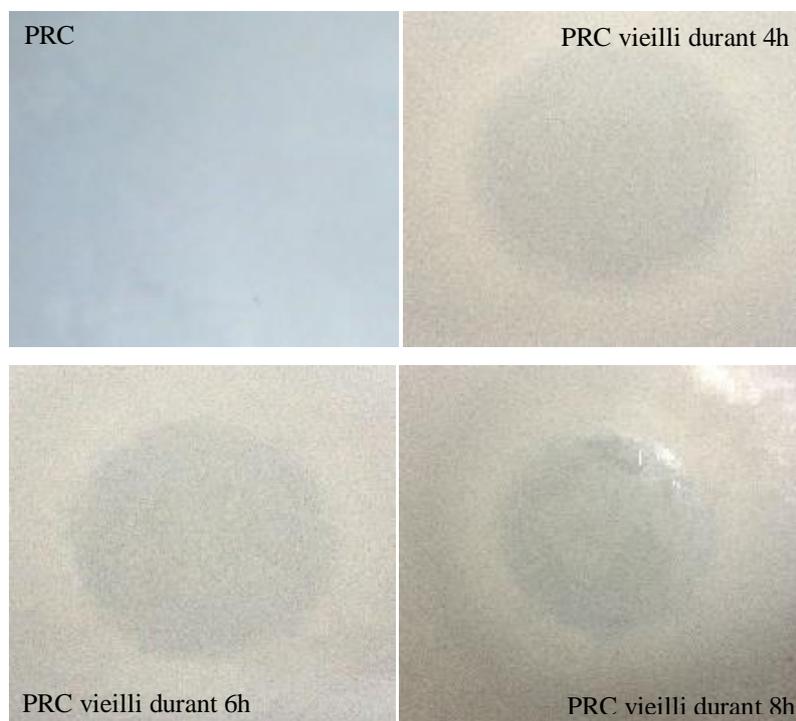


Figure V.20. Photographies de la surface des échantillons vierge et vieillis

V.8. Caractérisation physico-chimique

Dans cette partie, nous présentons les résultats relatifs à l'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la microscopie électronique à balayage (MEB). Ces résultats sont ensuite corrélés avec l'évolution des autres propriétés.

V.8.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

Le principe de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) repose sur le comportement des groupements chimiques et fonctionnels des molécules sous un rayonnement électromagnétique. Elle a été utilisée pour la première fois dans l'évaluation de la dégradation du polyéthylène par Tabb et Koenig [103].

En se basant sur la littérature existante sur ce sujet, l'analyse du spectre de l'échantillon vierge révèle l'existence de plusieurs bandes qui correspondent à l'absorption des différents groupements chimiques :

- La bande qui se manifeste à une longueur d'onde de 720 cm^{-1} correspond au balancement des groupes méthylènes ($-\text{CH}_2$) qui est un pic caractérisant du PRC [104, 105,106]. Cette bande est confirmée par des bandes à 1471 cm^{-1} , 2856 cm^{-1} et 2937 cm^{-1} qui correspondent aux vibrations de valence, aux vibrations symétriques et aux vibrations asymétriques du groupe ($-\text{CH}_2$) [106-107].
- Les bandes observées à 889 cm^{-1} , 966 cm^{-1} et 1635 cm^{-1} sont attribués aux absorptions des groupes non saturés : vinylidène, transvinyle et vinylène [108, 109,110-111].
- Le groupe méthyle est caractérisé par des bandes d'absorptions à 1377 cm^{-1} (vibration de déformation symétrique), 2150 cm^{-1} , 2632 cm^{-1} et 2953 cm^{-1} (vibration de valence symétrique) [105, 112, 113,114].
- On suggère que les bandes d'absorptions caractérisées par 1078 cm^{-1} , 1159 cm^{-1} et 3604 cm^{-1} caractérisent un antioxydant de type Irganox 1035 [112, 115,116], qui peut être incorporé dans la résine de polyéthylène par le fabricant de la matière première (formule confidentielle du fabricant).
- La longueur d'onde se manifestant à 1740 cm^{-1} caractérise l'absorption de la cétone.
- La région entre 3300 cm^{-1} et 3500 cm^{-1} présente une zone d'absorption de la fonction ($-\text{OH}$) des groupes hydroxyles.

Après 20 heures de vieillissement électrique, les changements à noter sont les suivants :

- Apparition d'une bande d'absorption à 3500 cm^{-1} qui correspond à l'absorption de la phase amorphe du PRC.
- Augmentation de l'absorbance dans la région 800 cm^{-1} - 1100 cm^{-1} est attribuée aux groupes insaturés $\text{C}=\text{C}$.
- Manifestation d'un pic à 2361 cm^{-1} qui peut décrire l'apparition du CO_2 .
- Absorption d'acétophénone appuyée par l'apparition d'un pic à 1316 cm^{-1} .

- Diminution de l'intensité des bandes (2856 cm^{-1} et 2937 cm^{-1}) caractérisant le balancement des groupes méthylènes ($-\text{CH}_2$). Ce résultat indique que le champ électrique réduit les forces de cohésion entre les chaînes et conduit l'augmentation de la mobilité de la chaîne figure V.21.

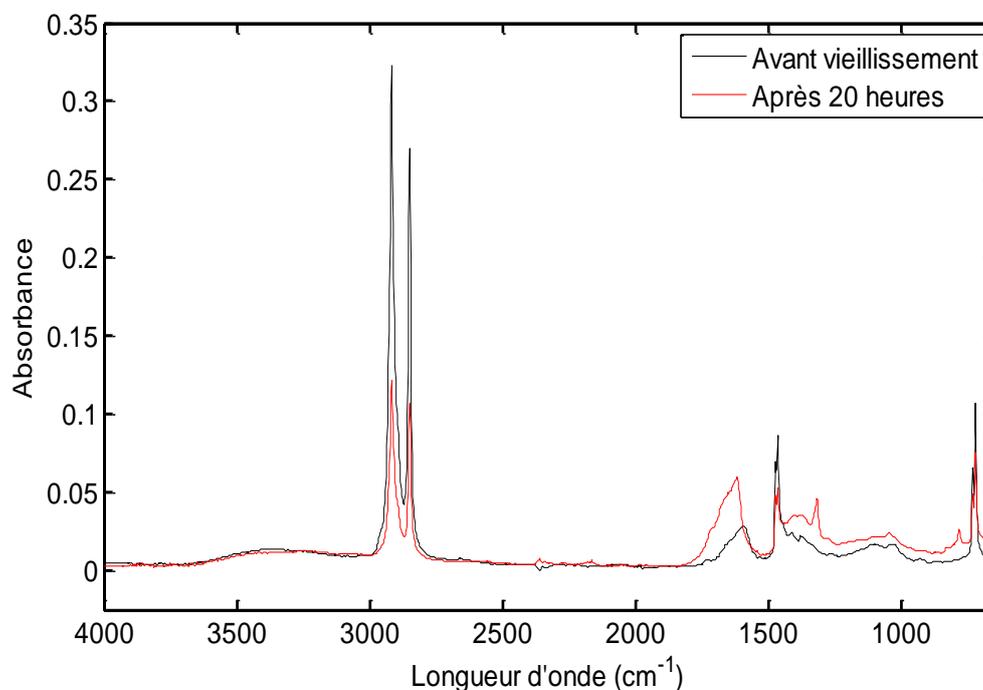


Figure V.21. Spectres infrarouges du PRC avant et après vieillissement électrique

V.8.2. Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La figure V.22 montre que la contrainte électrique affecte l'aspect morphologique du Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).

Avant vieillissement, la surface du PRC est uniforme, lisse et sans fissures. Après 10 heures, des défauts commencent à prendre naissance, la surface devient ainsi plus rugueuse avec apparition de quelques trous. Après 20 heures, la surface du PRC est plus détériorée, elle est divisée en blocs et les fissures augmentent en nombre et en taille. L'apparition des trous peut être attribuée à l'évaporation de la vapeur d'eau ou d'autres gaz lors du processus du vieillissement [117], ces gaz prennent place suite au refroidissement du PRC durant la procédure de réticulation. En effet, la répartition de la surface en blocs et l'apparition des fissures est un signe de vieillissement du matériau [118]. Les résultats sont en bon accord avec ceux reportés dans d'antérieurs travaux [119, 118,120].

Nous avons constaté l'extension maximale des arborescences au delà de 14 heures de temps de vieillissement. Ces arborescences sont des sièges de conductivité électrique du polymère par l'accumulation des charges d'espaces.

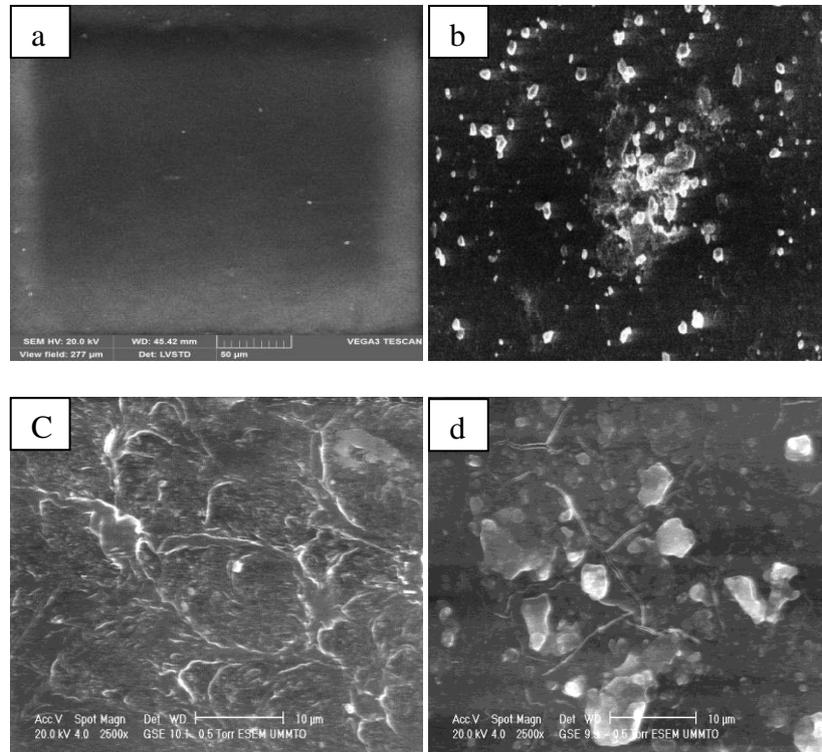


Figure V.22. Micrographie MEB du PRC a) non vieilli, b) vieilli pendant 6heures, c) vieilli pendant 10heures, d) vieilli pendant 20heures

V.9. Discussions

Lorsque la surface d'une éprouvette est soumise à la décharge électrique pendant un certain temps, il apparait une charge déposée sur la surface ; cette dernière modifie le champ existant dans le matériau sous l'action du champ électrique créé par ces charge surfacique, on parle alors de polarisation de l'échantillon ; des dipôles s'orientent sous ce champ ; les dipôles les plus proches de la surface s'orientent de telle manière qu'ils viennent compenser la charge surfacique. Ce phénomène est caractérisé par l'accumulation d'une mince couche de charge. A l'intérieur, il y a compensation des charges de polarisation. La circulation de la charge peut être alors expliquée en partie par l'apparition de charges de polarisation. Ce phénomène est caractérisé par la constante diélectrique.

Les micrographies MEB montrent que les surfaces des échantillons se dégradent après vieillissement. Les dégradations constatées sont l'apparition de cratères et de fissurations et

changement de couleur. Comme on observe aussi une dégradation visuelle qui consiste en la formation d'une couronne blanchâtre et d'une couche d'humidité sur la surface.

Les déformations engendrées par le vieillissement constituent de nouveaux sites potentiels de piégeage [121]. Le vieillissement entraîne aussi un changement dans la distribution et l'énergie des pièges existants [122, 123]. Par conséquent, ces nouveaux sites de piégeage et ces changements dans les pièges existants favorisent l'accumulation de charge d'espace. Cette accumulation de charge joue certainement un rôle important dans le transport de charges et par conséquent dans l'élévation de la conductivité électrique du polymère après un vieillissement électrique. Le rôle que joue la charge d'espace sur la conductivité est très complexe reste à présent non totalement élucidé. Plusieurs travaux de recherches sont consacrés à ce sujet [124, 125, 126, 127, 128]. En effet, la charge d'espace est soupçonnée d'être responsable de l'apparition des défauts dans les polymères isolants et dans l'accélération de leurs vieillissements [129]. La charge d'espace est générée par l'injection à partir des électrodes et par la dissociation des molécules des impuretés présentes dans le polymère tel que les anti-oxydants, catalyseurs, résidus de réactions etc... [130, 129].

Donc une charge d'espace se forme durant le vieillissement électrique sous champ alternatif. Une partie de cette charge d'espace persiste dans l'échantillon après la mise hors champ de l'échantillon pendant environ 2 heures [129].

Les résultats de l'analyse à la FTIR et le constat visuel montrent que le vieillissement électrique induit la formation d'une couche d'humidité sur la surface de l'échantillon. La présence de molécules d'eau sur la surface du polymère serait l'une des raisons de l'accroissement de la conductivité électrique du polymère par l'effet du vieillissement. Les molécules d'eau peuvent être adsorbées, absorbées ou déposées sur la surface. Les molécules d'eau sont liées au polymère par des liaisons hydrogène. Les molécules sont liées à deux sites hydrophiles par l'intermédiaire de leurs deux hydrogènes formant ainsi des ponts. Ces ponts se forment et se détruisent en permanence.

V.10. Conclusion

La mesure des grandeurs électriques, en particulier les courants de décharge, est très sensible dans le domaine de la haute tension. Pourtant c'est une mesure indispensable au contrôle des décharges ainsi qu'au calcul de la charge associée.

Le nombre et l'amplitude des impulsions de courant augmentent avec la tension. Leur nombre est plus important en alternance négative qu'en alternance positive. Cependant leur amplitude est plus grande en alternance positive.

La présence d'une couche d'air entre l'électrode pointe et la surface du diélectrique influe fortement le comportement des impulsions du courant décharge. Dans les zones de fort champ électrique (épaisseur faible de la couche d'air) les amplitudes maximales des impulsions du courant pour les deux polarités sont plus prononcées par rapport aux couches d'air du niveau supérieur. Ce qui même à dire que plus on augmente l'espace électrode-diélectrique plus les probabilités du processus d'ionisation seront moins important.

La permittivité relative, la résistivité électrique et le facteur de pertes diélectriques dépendent de la fréquence et de la durée de l'application du champ électrique. La diminution de toutes les propriétés diélectriques avec l'augmentation de la fréquence du champ appliqué est attribuée aux différents phénomènes de polarisation.

L'analyse des spectres infrarouges (FTIR) montre que le vieillissement électrique conduit à l'apparition de groupes fonctionnels autres que ceux d'avant vieillissement. Les micrographies (MEB) montrent que la surface du diélectrique se dégrade après vieillissement. Les dégradations constatées sont l'apparition des arborescences et changement de couleur. Comme on observe aussi une dégradation visuelle qui consiste en la formation d'une couronne blanchâtre et d'une couche d'humidité sur la surface.

Conclusion et perspectives

Conclusion et perspectives

Ce travail de thèse de doctorat a été réalisé au sein du laboratoire haute tension du département d'électrotechnique de l'université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou en collaboration avec les laboratoires de physique et chimie de l'université 20 Aout 1956 de Skikda et le laboratoire de chimie de l'université Badji Mokhtar d'Annaba. Il a été complètement dédié à l'étude expérimentale des caractéristiques des impulsions du courant de décharge et la charge associée dans une configuration d'électrode pointe plan, ainsi que l'étude du vieillissement électrique accéléré sur des échantillons du matériau organique nommé sous l'abréviation PRC ou XLPE (polyéthylène réticulé chimiquement) en anglais (Cross-linked polyethylene). Dans ce but, nous nous sommes d'abord intéressés à étudier les impulsions du courant de décharge et la charge associée dans une isolation composée air-solide, dans nos expériences nous avons traité l'influence de la tension appliquée sur les amplitudes maximales du courant de décharge dont laquelle nous avons constaté que la polarité positive est la plus contraignante car les amplitudes maximales des impulsions positives sont plus importantes par rapport à celle de la polarité négative. Plus nous augmentons l'espace inter électrode plus les amplitudes du courant de décharge seront moins importantes. En effet, les amplitudes maximales du courant décharge dans les deux polarités augmentent avec la diminution de la capacité inter électrode.

Ensuite, dans un premier temps, nous avons réalisé une étude de l'influence du champ électrique sur l'évolution des propriétés diélectriques (facteur de pertes diélectriques, permittivité relative et résistivité transversale) en fonction du temps de vieillissement et de la fréquence. La permittivité relative, la résistivité et le facteur de pertes diélectriques dépendent de la fréquence et de la durée de l'application du champ électrique. La diminution de toutes les propriétés diélectriques avec l'augmentation de la fréquence du au champ électrique appliqué est attribuée aux différents phénomènes de polarisation.

Dans un deuxième temps, nous avons fait une analyse physico-chimique sur des échantillons vierges et d'autres soumis au vieillissement, les analyses FTIR et MEB ont montré qu'après vieillissement, le matériau subit une dégradation. Les dégradations constatées sont l'apparition des arborescences et changement de couleur, comme on observe aussi une dégradation visuelle qui consiste en la formation d'une couronne blanchâtre et d'une couche d'humidité sur la surface. L'analyse des spectres infrarouges (FTIR) montre

que le vieillissement électrique conduit à l'apparition de groupes fonctionnels autres que ceux d'avant vieillissement.

Afin de réaliser une étude complète sur le polyéthylène réticulé chimiquement, nous citons les perspectives suivantes:

- L'étude du comportement du matériau sous champ électrique continue ainsi que l'augmentation des durées du vieillissement électrique.
- L'étude des décharges partielles internes (dans les vacuoles).
- Des analyses physico-chimiques supplémentaires peuvent être envisagées pour une analyse plus complète du comportement du matériau, l'utilisation de la Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) dans le but d'étudier l'évolution de la température de transition vitreuse du PRC en fonction du temps de vieillissement,
- La réalisation des essais d'analyses physico-chimiques complémentaires telles que la Thermogravimétrie (ATG) afin de déterminer les températures de dégradation thermique (température initiale, température de dégradation maximale, température finale), ce qui permettra de voir l'impact de la température sur la stabilité thermique du matériau.
- L'étude de l'effet d'autres contraintes (mécanique, humidité, environnement...) permettrait de progresser encore plus dans la compréhension du mécanisme de dégradation du PRC.
- L'étude du vieillissement thermique, afin d'étudier l'effet d'autres contraintes tel que la température sur les propriétés diélectriques du matériau.

Annexes

Annexes

Annexe 1. Caractéristiques du polyéthylène de base utilisé pour la fabrication de plaques de PRC.

Annexe 2. Photo du transformateur d'essai utilisé.

Annexe 3. Photo de la plaque signalétique du transformateur d'essai utilisé.

Annexe 4. Photo du pupitre de commande



Polyethylene LE4201R

Crosslinkable Insulation Compound

Description

LE4201R is a crosslinkable natural polyethylene compound, specially designed for insulation applications.

Applications

LE4201R is intended for insulation of XLPE power cables with rated voltages up to 72 kV.

Specifications

LE4201R meets the applicable requirements as below when processed using sound extrusion practice and testing procedure:

AEIC CS8
HD 620 S1, Part 1, table 2A, DIX 3 to 14

IEC 60502

Physical Properties

Property	Typical Value	Test Method
Data should not be used for specification work		
Density (Base Resin)	922 kg/m ³	ISO 1872-2/ISO 1183
Bulk density	500 - 600 kg/m ³	
Melt Flow Rate (190 °C/2,16 kg) ¹	2 g/10min	ISO 1133
Tensile Strain at Break (250 mm/min) ²	> 450 %	ISO 527
Tensile Strength (250 mm/min) ²	> 17 MPa	ISO 527
Retention of Tensile Properties After Ageing (168 h, 135 °C)	< 20 %	IEC 60811-1-2
Hot Set Test (200 °C, 0,20 MPa) ²	Elongation under load Permanent deformation	75 % 5 % IEC 60811-2-1
Monsanto ODR	30 - 38 dNm	
Göttfert Elastograph	0,59 - 0,74 Nm	
Methanol Wash	< 1.200 ppm	
Moisture	< 200 ppm	Karl Fischer-titration

¹ Base Resin

² Measured on crosslinked specimens

Electrical Properties

Property	Typical Value	Test Method
Data should not be used for specification work		
Dielectric constant (50 Hz)	2,3	IEC 60250
DC Volume Resistivity	> 10 POhm.cm	IEC 60093
Dielectric Strength (50 Hz)	> 22 kV/mm	IEC 60243
Dissipation Factor (50 Hz)	0,0003	IEC 60250

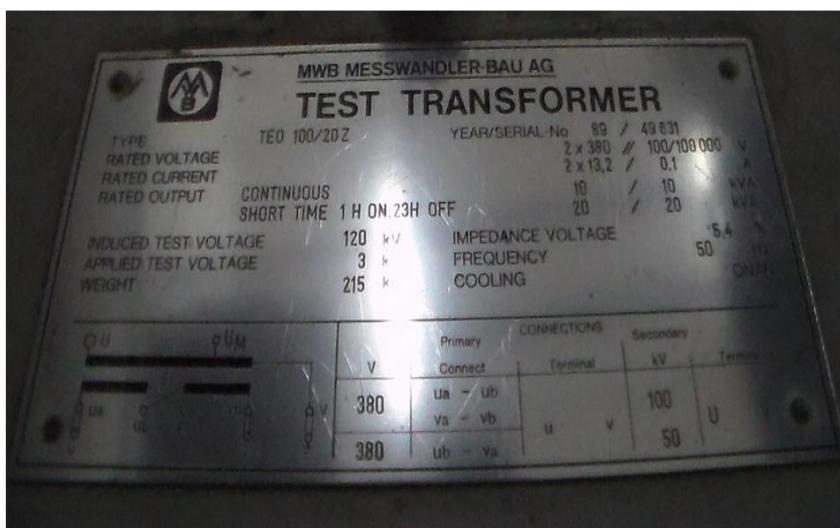
Borealis AG | Wagramerstrasse 17-19 | 1220 Vienna | Austria
Telephone +43 1 224 00 0 | Fax +43 1 22 400 333
FN 269858a | CCC Commercial Court of Vienna | Website www.borealisgroup.com



Annexe 1. Caractéristiques du polyéthylène de base utilisé pour la fabrication de plaques de PRC



Annexe 2. Photo du transformateur d'essai utilisé



Annexe 3. Photo de la plaque signalétique du transformateur d'essai utilisé



Annexe 4. Photo du pupitre de commande

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] L. Ying, C. Xiaolong, *A novel method for the insulation thickness design of HV XLPE cable based on electrical treeing tests*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 4, pp. 1540-1546, August 2014.
- [2] A.M. Nóbrega, M.L. Barreira-Martinez, A.A. Alencar de Queiroz, *Analysis of the XLPE insulation of distribution covered conductors in Brazil*, Vol. 23, No. 3, pp 723-735, March 2014.
- [3] L. Cao, S. Grzybowski, *Accelerated aging study on 15 kV XLPE and EPR cables insulation caused by switching impulses*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 5, pp. 2809-2817, October 2015.
- [4] J.V. Gulmine, L. Akcelrud, *Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE*, European Polymer Journal, Vol. 42, No. 3, pp. 553-562, 2006.
- [5] C. Vanga-Bouanga, H. Couderc, M.F. Fréchette, S. Savoie, G. Malucelli, G. Camino, J. Castellon, L. Bannet, A. Toureille, *Dielectric study of low glass transition temperature cycloaliphatic UV-curable epoxy networks*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 4, pp. 1269-1282, 2012.
- [6] C. Kim, Z. Jin, X. Huang, P. Jiang, and Q. Ke, *Investigation on water treeing behaviors of thermally aged XLPE cable insulation*, Polymer Degradation and Stability, Vol. 92, No. 4, pp. 537-544, April 2007.
- [7] L. Boukezzi, A. Boubakeur, *Prediction of mechanical properties of XLPE cable insulation under thermal aging*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, No. 6, pp. 2125-2134, December 2013.
- [8] M. Nedjar, "Évaluation de la tenue diélectrique à court et à long termes des polymères utilisés dans les dispositifs Haute Tension", Thèse de Doctorat, Université de Tizi- Ouzou, Algérie, 2003.
- [9] M.H.Handala and Omar Amrous, "Study of Pre-breakdown Current in Air-solid Interface" proceeding of the 9th.int.conf on proprieties and applications of dielectric materials. July.19-23,2009.Harbin,China.
- [10] Y.L.Sam.P.L.Lewin,A.E.Davies,J.S.Wilkinson S.J.Sutton and S.G.Swingle, "Surface discharge measurements of polymeric materials" ,IEE Proc, Sci, Meas.Technol.Vol.150, N°2, pp.43-52, 2003
- [11] S.Kasri "Etude et Modélisation de Déclin de Potentiel de Surface par les Réseaux de Neurones" memoir de Magister, Université Annaba 2010.
- [12] S. Kalachnikov "Electricité" Edition de Moscou1980.
- [13] J.P.Mercier, W.Kurz, D.Zambelli " Introduction à la science des matériaux" Ed. Presse Polytechniques et universitaires Romandes. Ed.2002.
- [14] S.Le Roy "Modélisation numérique des phénomènes de transport électrique dans un isolant polyéthylène sous contrainte électrique".Thèse de doctorat UPS Toulouse 2004.
- [15] C.Dutriez "Corrélations entre les propriétés diélectriques et mécaniques des polymères; influence de la température". Thèse de doctorat UPS Toulouse 2004.
- [16] M.F. Ashby et D.R.H.Jones"Matériaux. 2. Microstructure et mise en oeuvre" Ed. Dunod 2003.
- [17] B. Chalmers "Structure et propriétés des solides" Ed. Masson.
- [18] N.Lahoud "Modélisation du vieillissement des isolants organiques sous contrainte électrique : Application à la fiabilité des matériaux ".Thèse de doctorat UPS Toulouse 2009.
- [19] J.Verdu "Analyse physico-chimique des polymères".Techniques de l'ingénieur PE 3 760.
- [20] Y.Segui "Courants de conduction" Technique de l'ingénieur, D2301, 2000.

- [21] C. Lorent " Diélectriques solides et charges d'espace" Technique de l'ingénieur D 2305, 2006.
- [22] G.Tardieu "Apport des mesures de luminescence à la compréhension du piégeage et du transport dans les isolants synthétiques".Thèse de doctorat UPS Toulouse 2003.
- [23] J. C. Dubois, "Propriétés diélectriques", Techniques de l'ingénieur, A 3140, 1984.
- [24] R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique. Concepts et théories", Edition Eyrolles,1986.
- [25] M. Aguet, M. Lanovici , "Haute tension ", Edition Géorgi, 1982.
- [26] P. Robert, "Matériaux de l'électrotechnique", Edition Géorgie, 1979.
- [27] S. Orłowska, "Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériauxcomposites à deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de Lyon, 2003.
- [28] M. E. Baird, Electrical properties of polymeric materials, Plastic Institute Edition, 1958.
- [29] S.W. Rowe, *Electrical Ageing of Composites: An Industrial Perspective*, Proceedings International Conference on Solid Dielectrics, pp. 401-406, 8-13 July 2007. Win-chester, UK
- [30] O. Gallot-Lavallee, Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2004.
- [31] C. Laurent, *Diélectriques solides et charge d'espace*, Traité de Génie Electrique, Techniques de l'ingénieur, Vol. D2, pp. 305-13, 1998.
- [32] G. Teyssedre, L. Boudou, *Polymères et composites pour l'électrotechnique*, Traité de Génie Electrique, Techniques de l'ingénieur, Vol. D2, pp. 335-19, 2010.
- [33] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, Peter Peregrinus Ltd, London, 1996.
- [34] Y. Liu, X. Cao, *Electrical tree growth characteristics in XLPE Cable insulation under DC voltage conditions*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 22, No. 6, pp. 3676-3684, December 2015.
- [35] A. Xie, X. Zheng, S. Li, G. Chen, *Investigations of electrical trees in the inner layer of XLPE cable insulation using computer-aided image recording monitoring*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.17, No. 3, pp. 685-693, June 2010.
- [36] D. Fabiani, G. C. Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre ; P.H. F. Morshuis, R. Bodega, L.A. Dissado, A. Campus, U.H. Nilsson, *Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. part 1: insulation/semicon interface*, IEEE electrical isolation magazin Vol.23, No.6, PP 11-19 Nov-Dec 2007.
- [37] S. Serra, G.C. Montanari, and G. Mazzanti, *Theory of inception mechanism and growth of defect-induced damage in polyethylene cable insulation*, Journal of Applied Physics, Vol. 98, pp. 034102-034102-15, 2005.
- [38] T. Lebey, Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques, J3eA, Vol. 4, 2005.
- [39] G. Mazzanti, G.C. Montanari, and S. Serra, *Aging model of polyethylene based materials for HV cables founded on damage inception and growth from air-filled voids*, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics, 5-9 July 2004. Toulouse, France.
- [40] S. Serra, G. C. Montanari, and G. Mazzanti, *Theoretical study of inception mechanism and growth of defect-induced damages in XLPE cable*, IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001.

- [41] T.T. Anh, Corrélation entre les charges d'espace accumulées et les déformations mécaniques induites dans des isolants organiques solides soumis à un champ électrique, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2011.
- [42] Philippe Robert ; « matériaux d'électrotechnique » ; collection : traité d'électricité. Edition, 1999.
- [43] Bougdad Djafar ; « influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère » ; Thèse de doctorat (U.M.M.T.O), année universitaire 2009-2010.
- [44] Christophe GUILLERMIN ; « vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxyde-silice : étude des charges d'espace et de la conduction » ; Thèse de doctorat (Université Joseph Fourier Grenoble I), Mai 2004.
- [45] Eddy AUBERT ; « Diagnostic optique du vieillissement électrique des résines époxydes sous faible champ électrique » ; thèse de doctorat (Université de Toulouse III), Novembre 2008.
- [46] Issouf Fofana ; « modélisation de la décharge positive dans les grands intervalles d'air » ; these de doctorat(école national de lyon),novembre 1996.
- [47] Lazhar Kebbabi ; « caractérisation des décharges électriques glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension-relation entre propriétés des matériaux et dimensions fractales » (école centrale de Lyon), Mars 2006.
- [48] E.N.Veldhuizen and W.R Rutger(corona discharge,fundamentals and diagnostics) faculty of applied physics private communication,technisch université Eindhoven.
- [49] G.Le Ryo, C.Gary, B.Hutzler,J.Lalot, C.Dubanton(les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions) Editio Eyrolles, Paris 1984.
- [50] T. Guerrero Olivera ; « étude expérimentale du contournement des isolateurs recouverts de glace sous tensions de foudre et de manœuvre » ; mémoire présenté à l'université du Quebec à Chicoutoumi comme (E.P.M.I), juillet 2004.
- [51] Mounir Hairour ; « étude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension » ; Thèse de doctorat (Université de Montpellier II), Octobre 2007.
- [52] Vincent Puech (étude de microdécharges comme source de rayonnement ultra violet intense) these de doctorat université paris sud, décembre 2011.
- [53] J.S.Townsend (Electricity in gases); Oxford,1994.
- [54] L.Alston, D.J.Tedford(High voltage Technology), university d'oxford, 1968.
- [55] Christian Bouquegneau, préface de Gérard Berger « Doit-on craindre la foudre ? » ; Collection Bulles des sciences.
- [56] Cours de A. Tilmatine ; « chapitre III mécanismes de claquage des isolants gazeux ».
- [57] Ibrahima Ndiaye ; « Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace » ; Mémoire présenté a l'université du Quebec à Chicoutoumi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, mai 2003.
- [58] Bassem Khaddour ; « modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectés » ; Thèse de doctorat (école nationale d'aéronautique de Grenoble), Novembre 2006.
- [59] Moudoud Mustapha ; « contribution à l'étude d'une isolation solide/air soumise a une tension alternative 50HZ » ; Thèse de magister en électrotechnique (Université de M.M.T.O), Avril 1997.
- [60] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment*, illustrated edition ed. Butterworth-Heinemann, 3 1990. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/-0408020636/>

- [61] I. Kemp, M. Haddad - *Advances in High Voltage Engineering (IEE Power and Energy)*. The Institution of Engineering and Technology, 2004, ch. 4, p. 139. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/0852961588/>
- [62] D.Jemai (Etude de la propagation des streamers à l'interface liquide/solide sous tension alternative 50Hz). Ecole nationale polytechnique d'alger, 1991.
- [63] Lichtenberg G.C.Novi.Comm.Soc.Reg.Sci.Gott.Vol.8.P.168.1977.
- [64] P.O.Pedersen (Dansk Vidensk Selkab) Vol part I.1919. partII.1922.partIII.1929.
- [65] F.H.Merril and A.V.Hippel (the atmospheric interpretation of lichtenberg figures and their application to the study of gas discharge phenomena); J of phys.D: Appl, Vol.10.P873.1939.
- [66] Y.Kashiwagi and H.Itoh (synchronization of positive surface streamers triggered by vacuum ultraviolet in atmosphere) J.Phys.D;Appl.Vol39.PP.113-118.2006.
- [67] A.T.Morris (Heat developed and powder, Lichtenberg figures and ionization of dielectric surface produced by electrical impulses).British journal of Applied Phys.Vol.2.PP.98-109.1951.
- [68] L.Kebbabi (caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interface liquide/solide sous différentes formes de tension). These de doctorat, école centrale de Lyon, 2006.
- [69] H. Paqueton et J. Ruste "Microscopie électronique à balayage- Principe et équipement " Technique de l'ingénieur P865v2.
- [70] M.A.Handala and M.Moudoud (Prebreakdown current in an air gap with dielectric barrier stressed by 50Hz voltage), Record of fifth international middle east power conference MEPCON'97, alexndria Egypt, jan 4-6 pp.675-678. 1997.
- [71] E.Nasser (development spark in air from a negative point), J.Appl; Phys, Vol.42.PP3829.2347,1971.
- [72] R.J.Van Brunt and S.V.Kulkarni, "Method for Measuring the Stochastic Properties of Corona and Partial Discharge Pulses" , Review Sci. Instrum.60 (9), pp.3012-3023, September 1989.
- [73] R.S Nema, F.Zahra, " Study of Corona Pulses in Air –Solid Interface", Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, Virginia, USA, June 7-10.1998.
- [74] D. Dubois, "Réalisation et caractérisation d'un réacteur plasma de laboratoire pour des études sur la dépollution des gaz d'échappement", Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse, (2006).
- [75] O. Eichwald, O. Ducasse, D. Dubois, A. Abahazem, N. Merbahi, M. Benhenni and M. Yousfi, "Experimental analysis and modelling of positive streamer in air: towards an estimation of O and N radical production", J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 234002, 11pp,
- [76] G. Lan, C. Vernon, T. Rajeev, and S. Viktor, "Study of Cathode-directed Positive Streamers in Air by Streamer Current and Luminosity Measurements", IEEE Annual Report—Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, 19–22 October, (1997), Vol. 2, pp.587–90.
- [77] M.Gamez-Garcia, R.Bartnikas and M.R.Westheimer, "Correlation of surface Degradation and Charge Trapping in XLPE Subjected to Partial Discharges", IEEE pp.287-291, Boston, 1988.
- [78] Y.Takahashi, H.Fujii, S.Wakabayashi, T.Hirano and S.Kobayashi (Discharges due separation of corona-charge insulation sheet from grounded metal cylinder), trans, insul; Vol.24.N 5. Pp;573-580.1989.

- [79] H.Okubo, M.Kanegami, M. Hikita and Y.Kito, "Creepage Discharges propagation in air and SF₆ . Influenced by surface charge on solid dielectric", IEEE Trans. Dielectr,Insul, Vol.1,pp.294-304,1994.
- [80] Y.L.Sam.P.L.Lewin,A.E.Davies,J.S.Wilkinson S.J.Sutton and S.G.Swingle, "Dynamic AC surface Discharge characteristic of PMMA and LDPE"., Proceedings of the 2001 IEEE 7th international conf. Solid Dielectr., pp. 159-162. June 25-29.2001.
- [81] G.Zhang. W.Zho.Y.Sun and Z.Yan, "Surface Discharge Phenomena of Solid in atmospheric air", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003.
- [82] A.B.Saveliev and G.Y.Pietsch, "on the structure of dielectric barrier surface discharges" International symposium on high pressure Low Temperature plasma chemistry, Hackone VIII, Vol.2, pp. 229-233, 2002.
- [83] A. Cris, Etude du declin du potentiel d'une surface chargé par une décharge électrique de type couronne. Rapport pour maitrise de physiquene. LEMD,1996.
- [84] P. Molinie, Etude de la notralisation de la charge électrique déposée par effet couronne à la urface d'un isolant. Application au suivi des premiers stades du vieillissement d'un isolateur époxyde. Thèse de doctorat. Univ Paris VI, 1992.
- [85] C.Le Gressus, F.Valin. M.Henriot, M.Goutier, J.P.Duraud.T.S.Sudarchan and R.G.Bommakanti, "Flashorver in wide-band-gap high-purity insulatord : methodology and mechanisms", J.Appl.Phys, pp.6325-6333, 1991.
- [86] M. Katz, R.J. Theis, *New high temperature polyimide insulation for partial discharge resistance in harsh environments*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.13, No. 4, pp. 24-30, 1997.
- [87] Y. Li, J. Unsworth, B, Gao, *The effect of electrical aging on a cast epoxy insulation*, Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing and amp; Coil Winding Conference, pp. 1-5, 4-7 October 1993, Chicago, USA.
- [88] S. Diahm, M.L. Locatelli, T. Lebey, S. Dinculescu, *Dielectric measurements in large frequency and temperature ranges of an aromatic polymer*, European Physical Journal : Applied Physics, Vol. 49, No. 1, January 2010.
- [89] A. Livi, V. Levita, P. A. Rolla, *Dielectric behavior at microwave frequencies of an epoxy resin during crosslinking*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 50, No. 9, pp. 1583-1590, December 1993.
- [90] J. O. Simpson, A.K. St. Clair, *Fundamental insight on developing low dielectric constant polyimides*, Thin Solid Films, Vol. 308-309, pp. 480-485, October 1997.
- [91] Y. Yang, D. Yin, R. Xiong, J. Shi, F. Tian, X. Wang, Q. Lei, *FTIR and dielectric studies of electrical aging in polyimide under AC voltage*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, No. 2, pp. 574-581, April 2012.
- [92] B.X. Du, J. Li, *Electrical and mechanical ageing behaviors of used heat-shrinkable insulation tubes*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 4, pp. 1875-1881, August 2014.
- [93] A. Hedir, M. Moudoud. M. A. Handala, F. Bellabas, *Effet du champ électrique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension*, 10ème Conférence de la Société Française d'Electrostatique (SFE), 29-31 Aout 2016, Poitiers-France.
- [94] A. Hedir, M. Moudoud, *Effect of ultraviolet radiations on medium and high volt- age cables insulation properties*, International Journal of Engineering and Tech-nology, Vol. 8, No. 5, pp. 2308-2317, October-November 2016.
- [95] M. Plopean, P.V. Notingher, C. Stancu, S. Grigorescu, *Electrical ageing of polyethylene power cables insulation subjected to an electric field in the presence of water*, The

- 7th International Conference on Advanced Topics and Electrical Engineering, 12-14 May 2011, Bucharest, Romania.
- [96] E. Tuncer, S.M. Gubanski, *Electrical properties of filled silicone rubber*, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol. 12, No. 8, pp. 1873-1897, 2000.
- [97] C. Yuan, C. Xie, L. Li, X. Xu, S.M. Gubanski, Z. He, *Dielectric response characterisation of in-service aged sheds (U) HVDC silicone rubber composite insulator*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 3, pp. 1418-1426, June 2014.
- [98] H. Zhang, R. Hackam. *Electrical surface resistance, hydrophobicity and diffusion phenomena in PVC*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 73-83, Vol. 6, No. 1, August 2002.
- [99] M.A. Handala, O. Lamrous, Surface degradation of styrene acrylonitrile exposed to corona discharge, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 18, No. 5, pp.495-505, July 2008.
- [100] M.A.Handala, O. Lamrous "Surface degradation of styrene acrylonitrile exposed to corona discharge" *European Transactions on Electrical Power* Volume 18, Issue 5, 2008, pp 494-505.
- [101] Y. Xiong, S.M.Rowland, J.Robertson and R.J. Day "Surface Analysis of Asymmetrically Aged 400 kV Silicone Rubber Composite Insulators" *IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul.* Vol. 15 N° 3, June 2008, pp 763-770.
- [102] V. Rajini and K. Udaya Kumar "Discrimination of surface tracking patterns of gamma irradiated polymers using fractals" *Bull. Mater. Sci.* Vol. 29, N° 3, June 2006, pp 265-270.
- [103] D.L. Tabb, J.J. Sevicik, J.L. Koenig, "Fourier transform infrared study of the effects of irradiation on polyethylene", *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Editions*, Vol. 13, Issue 4, pp. 815-824, 1975.
- [104] M. Celina, K.T. Gillen, R.L. Clough, "Inverse temperature and annealing phenomena during degradation of Crosslinked polyolefins", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 61, pp. 231-244, 1998.
- [105] D. Srivastava, P. Kumar, G.N. Mathur, "Thermo-oxidative degradation studies of ternary blends of polyethylenes", *Advances in Polymer Technology*, Vol. 23, N° 1, pp. 59-70, 2004.
- [106] L. Boudou, J. Guastavino, "Physico-chemical observations on polyethylene base resin under the effect of thermal ageing", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 35, pp. 1-4, 2002.
- [107] T. Volke-Sepúlveda, E. Favela-Torres, A. Manzur-Guzmán, M. Limón-González, G. Trejo-Quintero, "Microbial degradation of thermo-oxidized Low-Density Polyethylene", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 73, pp. 1435-1440, 1999.
- [108] M. Blazso, B. Zelei, E. Jakab, "Thermal decomposition of low-density polyethylene in the presence of chlorine-containing polymers", *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 35, pp. 221-235, 1995.
- [109] G.A. George, M. Celina, A.M. Vassallo, P.A. Cole-Clarke, "Real-time analysis of the thermal oxidation of polyolefins by FT-IR emission", *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 48, pp. 199-210, 1995.
- [110] W.L. McLaughlin, J. Silverman, M. Al-Sheikhly, W.J. Chappas, L. Zhan-Jun, A. Miller, W. Batsberg-Pedersen, "High-Density polyethylene dosimetry by transvinylene FTIR analysis", *Journal of Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 56, pp. 503-508, 1999.
- [111] M. Gamez-Garcia, R. Bartnikas, M.R. Wertheimer, "Modification of XLPE exposed to partial discharges at elevated temperature", *IEEE, Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 25, N° 4, pp. 688-692, August 1990.

- [112] S.S. Bamji, A.T. Bulinski, H. Suzuki, M. Matsuki, Z. Iwata, "Luminescence in crosslinked polyethylene at elevated temperatures", *Journal of Applied Physics*, Vol. 74, N° 8, pp. 5149-5153, October 1993.
- [113] B. Wojtkowaik, M. Chabanel, "Spectrochimie moléculaire", Technique&Documentation, 1983.
- [114] E. David, J.-M. Fourmigué, J.-L. Parpal, J.-P. Crine, "Correlation between FTIR spectra and birefringence measurements in XLPE cable insulation", *IEEE, Annual Report of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp. 602-609, 18-21 October 1992.
- [115] J.-P. Crine S. Haridoss, "Oxidation and thermal resistance of HMW-PE and XLPE H.V. Cables", *IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation*, pp. 219-224, Boston, MA, June 5-8, 1988.
- [116] J.P. Crine, S. Péliou, Y. McNicoll, H. St-Onge, "A critical evaluation of analytical techniques for the characterization of extruded dielectric cables", *IEEE, Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 26, N° 1, pp. 131-139, 1991.
- [117] E.L. Leguenza, R. Robert, J.A. Giacometti, *Dielectric and viscoelastic properties of cross-linked polyethylene aged under multi stressing conditions*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 11, No. 3, pp. 406-417, June 2004.
- [118] C. Xie, Y. Zhang, J. Wang, Y. Lin, Y. Hao, M. Gao, *Microstructure analysis of AC corona aging of Silicone Rubber*, *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 19-23 July 2009, Harbin, China.
- [119] A.M. Nóbrega, M.L. Barreira-Martinez, A.A. Alencar de Queiroz, *Investigation and analysis of electrical aging of XLPE insulation for medium voltage covered conductors manufactured in Brazil*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 20, No. 2, pp. 628- 640, April 2013.
- [120] A.M. Nóbrega, M.L. Barreira-Martinez, A.A. Alencar de Queiroz, *Analysis of the XLPE insulation of distribution covered conductors in Brazil*, Vol. 23, No. 3, pp 723–735, March 2014.
- [121] J.Martinez-Vega "Matériaux diélectriques pour le génie électrique 1 : propriétés, vieillissement et modélisation" Ed. Lavoisier 2007.
- [122] K.C. Kao "Electrical conduction and breakdown in Insulating Polymers" 6th Int. Conf. on Properties and Appl. of Diel. Materials, June 21-26, 2000 China, pp 1-17.
- [123] L. Boudou and J. Guastavino "Influence of temperature treatment on the electrical properties of low-density polyethylene" *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33 N° 21 , 7 Nov. 2000, pp 129-131.
- [124] T. Mizutani, M.Ieda and I.B.Jordan "Anomalous Transient Currents in High-Density Polyethylene around 50-70°C" *Japanese Journal of Applied Physics* Vol.18, N°1, January,1979, pp.65-70.
- [125] C. Lorent " Diélectriques solides et charges d'espace" *Technique de l'ingénieur D 2305*, 2006.
- [126] F.Boufayed "Simulation de transport électrique dans le PE pour câble d'énergie par modèle de conduction bipolaire avec distribution exponentielle de pièges". Thèse de doctorat UPS Toulouse 2006.
- [127] L.Dissado, G.Mazzanti, G.C.Mantanari "The Incorporation of Space Charge Degradation in the Life Model for Electrical Insulating Materials" *IEEE trans. on Diel. and Elect. Insul.* Vol. 2, N° 6, Dec.1995, pp 1147-1158.
- [128] J.M.Reboul, F.Mady and M.Rouff "A new technique for a complete study of space charge. " 7th Int.Conf. on Properties and Appli. of Diel. Materials, June 1-5, 2003 Nagoa, pp 514-517.

- [129] C.Guillermin "Vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxy-silice : étude de la charge d'espace et de la conduction ". Thèse de doctorat université Joseph Fournier Grenoble I, 2004.
- [130] K.Theodosiou, I.Vitellas, I.Gialas and D.P.Agoris "Polymer films degradation and breakdown in High Voltage AC fields". Journal of Electrical Engineering (JEE), Vol.55 N° 9-10, 2004, pp 225-231.