

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF 1

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

THESE

Présentée au Département d'électrotechnique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Option: Réseaux Electriques

Par

BERRAG Amine

THÈME

Effet des dopants en céramique sur les propriétés diélectriques des gaines de câbles en PVC

Soutenue le 18/04/2019 devant le Jury:

| | | | |
|--------------------------|-------------------|--|---------------------------|
| BAYADI Abdelhafid | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Président |
| BELKHIAT Saâd | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Directeur de thèse |
| NOURI Hamou | Professeur | Univ. Ferhat Abbas Sétif 1 | Co-Directeur |
| MIMOUNE Sourî Med | Professeur | Univ. Mohamed Khider. Biskra | Examineur |
| ALLOUI Lotfi | Professeur | Univ. Mohamed Khider. Biskra | Examineur |
| BOUDISSA Rabeh | Professeur | Univ. Abderrahmane Mira. Béjaia | Examineur |

Remerciements

Tout le remerciement est au dieu de m'avoir aidé, de me donner toute cette patience et tout ce courage pour terminer ce modeste travail (el hamdou lilleh)

Je remercie ainsi dans le cadre de cette thèse :

- *L e hall de chimie de m'avoir fournie le PVC*
- *L'unité Calplast Sétif de m'avoir aidé à élaborer les échantillons*
- *Le laboratoire de l'électrochimie de Sétif de m'avoir permis d'utiliser le spectromètre FTIR.*
- *Laboratoires Dosage Analyse et Caractérisation à Haute Résolution (DACHR), université Sétif I, surtout pour le MEB.*

Mes sincères remerciements pour mon encadreur, le directeur de la thèse Mr.Sâad BELKHIAT, Pr. à l'université Ferhat Abbes Sétif.1, pour sa longue patience, ses conseils, sa direction, sa sagesse, ses orientations, ses efforts infinis et ses encouragements tout le long de ma période en temps que doctorant, juste pour aboutir à cette étape vraiment importante de ma vie (Merci Mr).

Je tiens à remercier encore Mr.Hamou NOURI, Pr. à l'université Ferhat Abbes Sétif.1 mon co-encadreur pour son aide infinie, ses conseils et son humanité le long de cette période malgré qu'elle n'a été longue mais vraiment bénéfique.

Mes remerciements se dirigent vers tous les membres de jury, Pr. Bayadi Abdelhafid (comme président de jury), Pr. Sourî Mohammed MIMOUNE, Pr Lotfi ALLOUI, Pr Rabeh BOUDISSA, d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer ce travail.

Mes remerciements particuliers pour Dr. Lakhdar MADANI, Dr. Fayçal KHARCHOUCHE, de m'avoir aidé tout le temps, soit scientifiquement, soit moralement. Merci chers collègues

Sans oublier bien sûre toute ma grande et petite famille pour sa patience, son attention et ces vœux le long de cette période fatigante.

Merci aussi pour tous qui m'on aidé de près ou de loin pour terminer ce modeste travail.

Finir un tel travail, c'est vraiment la fierté absolue que n'importe le qui essaye de l'aboutir..... *Merci pour tous*

Dédicaces

Je dédis ce modeste travail avant tous à mes parents, qu'ils ont vraiment donné tout pour arriver à ce jour.

Ma petite famille surtout mon petit héros Yasser Tedjeddine

Mes sœurs

Mon frère

Ma grande famille

Tous mes collègues (de Sétif et de Bouira)

Table des matières

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Introduction Générale..... | 1 |
|-----------------------------------|----------|

Chapitre I : Généralités sur les diélectriques et leurs applications

| | | |
|-------------|---|----|
| I.1 | Introduction..... | 4 |
| I.2 | Définition d'un diélectrique..... | 4 |
| I.3 | Caractéristiques des diélectriques..... | 4 |
| I.3.1 | Permittivité relative..... | 4 |
| I.3.2 | Rigidité diélectrique..... | 5 |
| I.3.3 | La conductivité..... | 5 |
| I.3.4 | Circuit équivalent d'un diélectrique..... | 6 |
| I.3.4.1 | Calcul des pertes du diélectrique..... | 7 |
| I.3.4.2 | Champ électrique dans un isolant..... | 8 |
| I.3.5 | Influence de la température..... | 8 |
| I.3.6 | Influence de la fréquence..... | 8 |
| I.4 | Différents types d'isolants utilisés en électrotechnique..... | 9 |
| I.4.1 | Les isolants solides..... | 9 |
| I.4.1.1 | Les isolants inorganiques..... | 9 |
| I.4.1.1.1 | Les céramiques techniques..... | 9 |
| I.4.1.1.2 | Verres..... | 10 |
| I.4.1.1.3 | Les micas et produit micacés..... | 10 |
| I.4.1.2 | Les isolants organiques..... | 10 |
| I.4.1.2.1 | Les isolants organiques naturels..... | 10 |
| I.4.1.2.2 | Les isolants organiques synthétiques..... | 10 |
| I.4.1.2.2.1 | Les polymères..... | 10 |
| I.5 | Propriétés des polymères..... | 11 |
| I.5.1 | Propriétés électriques..... | 11 |
| I.5.2 | Propriétés chimique..... | 12 |
| I.5.3 | Propriétés physique..... | 12 |
| I.5.4 | Propriétés thermiques..... | 12 |
| I.6 | Polychlorure de Vinyle (PVC)..... | 13 |
| I.6.1 | Définition..... | 13 |
| I.6.2 | Formule moléculaire..... | 13 |
| I.6.3 | Fabrication..... | 13 |
| I.6.4 | Synthèse du monomère..... | 14 |
| I.7 | Propriétés du PVC..... | 14 |
| I.7.1 | Propriétés chimiques..... | 14 |
| I.7.2 | Propriétés électriques..... | 14 |
| I.7.3 | Propriétés thermiques..... | 14 |
| I.8 | Utilisation des PVC pour le transport d'électricité..... | 14 |
| I.8.1 | Câbles électriques..... | 14 |
| I.8.2 | Avantages et inconvénients du PVC..... | 16 |

| | | |
|------------|---|----|
| I.9 | Le titanate de Baryum BaTiO ₃ | 17 |
| I.9.1 | Caractéristiques de BaTiO ₃ | 18 |
| I.9.2 | Structure..... | 18 |
| I.10 | Vieillessement..... | 19 |
| I.10.1 | Du vieillessement à la rupture des isolants polymères..... | 19 |
| I.10.2 | Vieillessement thermique..... | 22 |
| I.10.3 | Vieillessement sous effet des charges d'espace..... | 22 |
| I.11 | Claquage..... | 22 |
| I.11.1 | Mécanismes de claquage..... | 23 |
| I.11.2 | Claquage thermique..... | 23 |
| I.11.3 | Claquage d'origine électronique..... | 23 |
| I.11.3.1 | Claquage intrinsèque..... | 23 |
| I.11.3.2 | Claquage par avalanche..... | 23 |
| I.11.3.3 | Claquage électromécanique..... | 24 |
| I.12 | Phénomène de polarisations..... | 24 |
| I.12.1 | Différents types de polarisations..... | 25 |
| I.12.1.1 | Notion de la polarisation..... | 25 |
| I.12.1.2 | Mécanismes de polarisation..... | 25 |
| I.12.1.2.1 | Polarisation électronique..... | 25 |
| I.12.1.2.2 | Polarisation ionique..... | 25 |
| I.12.1.2.3 | Polarisation dipolaire..... | 26 |
| I.13 | Polarisation interfaciale..... | 26 |
| I.14 | Phénomène de conduction de charges dans les polymères..... | 27 |
| I.15 | La différence entre la polarisation et la conduction..... | 27 |
| I.15.1 | Relaxation..... | 28 |
| I.15.2 | Définition..... | 28 |
| I.15.3 | Origines de la relaxation diélectrique..... | 28 |
| I.15.3.1 | Phénomène de la relaxation diélectrique dans les polymères..... | 29 |
| I.15.3.2 | Relaxation dans les polymères amorphes..... | 29 |
| I.15.3.3 | Relaxation dans les polymères semi-cristallins..... | 30 |
| I.16 | Variation du temps de relaxation en fonction de la température..... | 30 |
| I.17 | Conclusion..... | 31 |

Chapitre II : Etude du claquage électrique dans les polymères

| | | |
|----------|---|----|
| II.1 | Introduction..... | 32 |
| II.2 | Modèle statistique de Weibull..... | 32 |
| II.2.1 | Bases du modèle..... | 32 |
| II.2.2 | Signification des paramètres..... | 33 |
| II.2.2.1 | Paramètre de localisation..... | 33 |
| II.2.2.2 | Paramètre de forme..... | 33 |
| II.2.2.3 | Paramètre d'échelle..... | 33 |
| II.2.3 | Diagramme de Weibull..... | 34 |
| II.3 | Application du modèle de weibull a l'étude de la rupture diélectrique des isolants Solides..... | 35 |
| II.3.1 | Essais à long terme dits statiques..... | 35 |
| II.3.2 | Essais à court terme dits dynamiques..... | 36 |
| II.4 | Avantages de la loi de weibull..... | 37 |
| II.5 | Préparation des échantillons..... | 37 |
| II.5.1 | Préparation des films PVC..... | 37 |

| | | |
|------------|---|----|
| II.5.2 | Dispositif expérimental..... | 39 |
| II.5.2.1 | Mesure de la rigidité diélectrique..... | 39 |
| II.6 | Partie expérimentale..... | 41 |
| II.6.1 | Essais à court terme..... | 41 |
| II.6.2 | Résultats obtenues..... | 41 |
| II.6.2.1 | Etude de la distribution statistique des tensions de claquage..... | 42 |
| II.6.2.1.1 | PVC Pure..... | 42 |
| II.6.2.1.2 | PVC + 5% BaTiO ₃ | 43 |
| II.6.2.1.3 | PVC + 10% BaTiO ₃ | 44 |
| II.6.2.2 | Influence de la vitesse de montée de la rampe de tension sur la tension nominale de claquage..... | 46 |
| II.6.3 | Interprétation des résultats..... | 47 |
| II.7 | Conclusion..... | 48 |

Chapitre III : Etude du phénomène de relaxation dans les polymères

| | | |
|---------|--|----|
| III.1 | Introduction..... | 49 |
| III.2 | Techniques de mesure..... | 49 |
| III.2.1 | Analyseur d'impédance..... | 49 |
| III.2.2 | Méthode FTIR..... | 49 |
| III.2.3 | Microscopie électronique à balayage (MEB)..... | 52 |
| III.3 | Modèle théorique de la relaxation..... | 53 |
| III.4 | Résultats et interprétations..... | 55 |
| III.4.1 | Caractérisation MEB..... | 56 |
| III.4.2 | Caractérisation par analyseur d'impédance..... | 61 |
| III.4.3 | Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier..... | 61 |
| III.4.4 | Discussion des fréquences de relaxation..... | 62 |
| III.5 | Relaxation dans les échantillons PRC..... | 66 |
| III.5.1 | Avant le vieillissement..... | 67 |
| III.5.2 | Après le vieillissement thermique..... | 68 |
| III.5.3 | Après le test de l'humidification..... | 69 |
| III.6 | Conclusion..... | 70 |

Chapitre IV : Modélisation numériques des diélectriques en présence de la charge d'espace

| | | |
|--------|---|----|
| IV.1 | Introduction..... | 72 |
| IV.2 | Les différentes méthodes numériques utilisées en électromagnétisme..... | 72 |
| IV.2.1 | Méthode des différences finies..... | 72 |
| IV.2.2 | Méthode des éléments finis..... | 75 |
| IV.2.3 | Méthode des volumes finis..... | 78 |
| IV.2.4 | Méthode des charges fictives..... | 78 |
| IV.3 | Le choix de la méthode..... | 80 |
| IV.4 | Les différentes étapes de la résolution numérique..... | 80 |
| IV.5 | Le modèle mathématique utilisé..... | 82 |
| IV.6 | Le modèle géométrique utilisé avec conditions aux limites..... | 82 |
| IV.7 | Conditions de claquage des diélectriques..... | 83 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| IV.8 | Principaux effets induits par la présence de la densité de la charge d'espace..... | 84 |
| IV.8.1 | Définition de la charge d'espace..... | 84 |
| IV.8.2 | Origine de la charge d'espace dans les isolants polymères..... | 84 |
| IV.8.3 | Détermination de la densité initiale de la charge d'espace..... | 85 |
| IV.8.4 | Méthodes des caractéristiques..... | 85 |
| IV.8.5 | Méthode simplifiée des caractéristiques..... | 86 |
| IV.9 | Résultats et discussions..... | 87 |
| IV.9.1 | Modèle électrique..... | 87 |
| IV.9.2 | Modélisation numérique des distributions du potentiel et du champ électriques..... | 90 |
| IV.9.2.1 | Distribution du potentiel électrique..... | 91 |
| IV.9.2.2 | Distribution du Champ électrique..... | 92 |
| IV.10 | Conclusion..... | 94 |
| | Conclusion générale et perspectives..... | 95 |

Liste des figures

Figure I.1 : Circuit équivalent électrique du diélectrique.

Figure I.2 : Condensateur avec deux milieux différents.

Figure I.3 : Microstructure typique d'une surface céramique polie qui illustre les grains monocristallins, joints de grains et pore.

Figure I.4 : Structure d'un câble haute tension.

Figure I.5 : Structure de BaTiO₃.

Figure I.6 : Scénario classique de l'endommagement d'un isolant organique.

Figure I.7 : Vieillessement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et de champs électriques auxquels ils sont soumis.

Figure I.8 : Schéma descriptif de l'avalanche.

Figure I.9 : Signature diélectrique des différents types de polarisation en fonction de la fréquence.

Figure I.10 : Relaxation diélectriques multiples dans un polymère en fonction de la température.

Figure I.11 : Evolution du facteur de pertes diélectriques du polyéthylène en fonction de la température à 10 KHz.

Figure II.1 : Mélangeur à 2 cylindres (Rodolfo Comercio) 1977.

Figure II.2 : Films de PVC vierge et avec BaTiO₃

Figure II.3 : Schéma du dispositif des essais électriques.

Figure II.4 : Un bâti servant l'ensemble d'électrodes.

Figure II.5 : Tension de claquage pour les 25 essais effectués et pour les différentes vitesses de rampe de tension alternative.

Figure II.6 : Diagramme de weibull à 2 paramètres de la tension de claquage pour PVC pure à les vitesses de la rampe de 0,78; 1,29; 2,54; 3,29; 4,37 et 4,75 kV/s.

Figure II.17 : Diagramme de weibull à 2 paramètres de la tension de claquage pour PVC + 5% BaTiO₃ à les vitesses de la rampe de 0,78; 1,29; 2,54; 3,29; 4,37 et 4,75 kV/s.

Figure II.8 : Diagramme de weibull à 2 paramètres de la tension de claquage pour PVC + 10% BaTiO₃ à les vitesses de la rampe de 0,78; 1,29; 2,54; 3,29; 4,37 et 4,75 kV/s.

Figure II.9 : Vitesse de la tension en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension.

Figure III.1 : Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier.

Figure III.2: Interférogramme en sortie du détecteur.

Figure III.3 : Schéma du MEB.

Figure III.4 : Bode's diagram representation

Figure III.5 : Cole-Cole's diagram

Figure III.6 : SEM images of composites ; (a) Sample N°3, (b) Sample N°5, (c) Zoom of SEM image B (five time aggrandizement)

Figure III.7 : EDX mapping of elemental distribution, chlorine, oxygen, titanium and barium of sample number five : (a) Composite morphology, (b) Chlorine distribution, (c) Carbon distribution , (d) Oxygen distribution, (e) Titanium distribution, and (f) Barium distribution, (g) XRD composite spectrum.

Figure III.8 : EDX mapping of elemental distribution of sample two, (a) elemental distribution of Chlorine, Carbon, oxygen, Titanium, and Barium, (b) XRD diffraction of composite.

Figure III.9 : EDX mapping of sample number four, A) elemental distribution of, Chlorine, Carbon, oxygen, Titanium, and Barium; B) XRD diffraction of composite

Figure III.10 : Dielectric constant versus frequency ; (a) Frequency range [20-140Hz]; and (b) Frequency range [115Hz-1MHz]

Figure III.11 : Loss Index versus frequency ; (a) Frequency range [20-140Hz]; and (b) Frequency range [115-1MHz].

Figure III.12 : FTIR spectra of pure PVC and PVC/BaTiO₃ composites.

Figure III.13 : Bode diagram, (a) frequency range [20-140Hz] ; (b) frequency range [115-1MHz].

Figure III.14 : Nyquist diagram, (a) frequency range [20-140Hz] ; (b) frequency range [115-1MHz].

Figure.III.15 : Variation de l'indice de pertes et de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, a)- Diagramme de Bode, b)- Diagramme de Nyquist [avant vieillissement]

Figure.III.16 : Variation de l'indice de pertes et de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, a)- Diagramme de Bode, b)- Diagramme de Nyquist [après le vieillissement thermique]

Figure.III.17 : Variation de l'indice de pertes et de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, a)- Diagramme de Bode, b)- Diagramme de Nyquist [avant le test d'humidification]

Figure IV.1 : Méthode des différences finies. Grille pour les calculs.

Figure IV.2 : Discrétisation de MDF: (a) Maillage carré ;(b) Point central et ses voisins.

Figure IV.3 : Fragment du champ avec le maillage destiné aux calculs par la méthode des éléments finis.

Figure IV.4 : Élément de volume bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.

Figure IV.5 : Exemple de trois points de charges dans un espace libre.

Figure IV.6 : Organigramme présentant différentes étapes du programme.

Figure IV.7 : Le modèle avec les conditions aux limites.

Figure IV.8 : Courbe de Paschen dans l'air à 20°C.

Figure IV.9 : Schéma descriptif des différentes origines de la charge d'espace.

Figure IV.10 : Variation de la capacité pour une cavité de forme cylindrique dans un diélectrique.

Figure IV.11 : Variation de la capacité du diélectrique voisin BaTiO₃.

Figure IV.12 : Variation de la différence de potentiel entre les bornes de la cavité.

Figure IV.13 : Variation du champ électrique moyen à l'intérieur de la cavité.

Figure IV.14 : Variation du potentiel électrique dans l'espace inter électrodes.

Figure IV.15 : Distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode avec et sans cavité d'air.

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Conductivité de quelques polymères.

Tableau I.2 : Caractéristiques de BaTiO₃.

Tableau II.1 : La tension moyenne de claquage en fonction de la vitesse de rampe.

Tableau II.2 : La tension nominale de claquage en fonction de la vitesse de rampe.

Tableau II.3 : L'effet de BaTiO₃ sur les propriétés diélectriques du PVC.

Liste des acronymes

PVC : polychlorure de vinyle.

BaTiO₃ : oxyde de titanate de baryum.

MEB : microscope électronique à balayage.

XRD : diffraction par rayons X

EDS : spectre de dispersion d'énergie (en Anglais EDX : Energy Dispersive X-ray).

FTIR : La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier.

S.I : système international.

PEBD : polyéthylène basse densité.

PEHD : polyéthylène haute densité.

XLPE : cross linked polyethylene.

EPR : ethylene-Propylene-Rubber.

EVA : éthylène-acétate de vinyle.

EPDM : éthylène-Propylène Diène Monomère.

PRC : polymère réticulé chimiquement.

PMMA : polyméthylméthacrylate.

LDPE : low density poly ethylene.

HDPE : high density poly ethylene.

HVDC : high voltage direct current.

MDF : méthode des différences finies.

MEF : méthode des éléments finis.

EDP : équation aux dérivées partielles.

AC : alternatif current.

DC : direct current.

Introduction générale

Tout matériel électrique ou électronique est constitué d'un agencement judicieux de matériaux conducteurs qui servent à transporter l'énergie électrique (ou l'information) là où elle doit être utilisée. Les matériaux isolants permettent en fait d'empêcher cette énergie de se perdre en empruntant le plus « court » chemin d'un potentiel à un autre. Outre leur fonction première qui consiste à s'opposer au passage du courant entre conducteurs, les isolants solides ont également le rôle de maintenir mécaniquement les conducteurs dans des conditions prédéterminées. [1]

L'isolation électrique est un élément critique dans les appareils fonctionnant sous haute tension. La durée de vie d'un matériel étant souvent liée à la durée de vie de son isolation, ce qui représente une problématique à cause de leur effet sur les systèmes isolés. Pour cela beaucoup de travaux ont pour objet la compréhension des mécanismes de vieillissement des matériaux utilisés comme isolants électriques.

Les matériaux, au sens large, ont joué un rôle prépondérant dans les progrès faits par les matériels électriques. Les matériaux isolants sont parmi ceux dont le choix et l'emploi posent les problèmes les plus délicats à résoudre dans la conception, la réalisation et l'exploitation des systèmes électriques. La modélisation du processus de vieillissement des isolants organiques solides ou polymères sous champ électrique constitue le principal intérêt de notre présent travail. C'est dans le but d'améliorer leur fiabilité qu'un nombre important de travaux ont été entrepris dans les laboratoires de recherches. Ces travaux ont pour but de comprendre les défaillances en prenant en compte les contraintes d'utilisation, mais aussi d'améliorer les paramètres de mise en œuvre [2].

La fonction d'isolation est primordiale du fait qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique. Depuis 1995, les travaux sur le sujet de vieillissement électrique ont connu des progrès considérables. En effet, la « durée de vie » des isolants polymères sous haute tension étant estimée à 30 ans. La majorité des systèmes de transport d'énergie électrique posés dans les années 1990 s'approchent de leur fin de service. Les enjeux sont importants et le travail présenté dans ce manuscrit vise une compréhension des phénomènes se rapportant à la dégradation sous champ électrique, et ce avant toute apparition de fracture du matériau qui, lorsqu'elle se produit, provoque rapidement une perte de fiabilité de l'isolant.

Dans l'étude d'un matériau diélectrique, une analyse des propriétés électriques, en particulier celles de la mobilité moléculaire induite par les phénomènes de relaxation, peut s'avérer un instrument intéressant pour apprécier l'état du matériau et quantifier son évolution sous l'influence de certaines contraintes électriques et/ou d'un vieillissement. L'instabilité structurale des isolants organiques rend très difficile l'optimisation de leurs performances, qui peuvent varier en fonction des contraintes auxquelles ils sont soumis. En effet, à cause d'un échauffement local d'un composant par exemple, un diélectrique à base de polymère n'est pas à l'abri d'une modification structurale irréversible qui peut être à l'origine de la défaillance d'un système électrique.

On appelle vieillissement tout phénomène d'évolution lente et irréversible de la structure et/ou de la composition d'un matériau sous l'effet de son instabilité propre, de l'interaction avec l'environnement, de sollicitations mécaniques, ou de la combinaison de plusieurs de ces causes [3].

Notre étude est composée de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur les diélectriques (définition de base, son utilisation, ses caractéristiques...etc). On détaille ensuite les différents problèmes et phénomènes qui peuvent exister dans les diélectriques. Parmi ces derniers on peut citer le vieillissement électrique qui est une cause directe d'un claquage dans le diélectrique. On présente aussi le phénomène de la relaxation dans les diélectriques qui décrit la transition d'état d'un matériau sous l'influence de la fréquence de service. Le matériau utilisé est présenté en fin de ce chapitre. Ce dernier est basé sur le polychlorure de vinyle (PVC) dopé à l'aide d'oxyde de titanate de baryum (BaTiO_3). Nos échantillons sont des films à base de PVC, dopé à différents pourcentages de BaTiO_3 (0%, 2%, 5, 8% et 10%). Il a pour effet d'augmenter la permittivité relative, réduire les pertes du matériau et diminuer la charge d'espace.

Le deuxième chapitre englobe la partie vieillissement électrique du travail. Il consiste à étudier le phénomène de claquage électrique dans les polymères. Les expériences concernant cette partie du chapitre, se sont déroulées au sein du laboratoire haute tension de l'université de Béjaia.

Le troisième chapitre traite le phénomène de relaxation dans les diélectriques. Les travaux expérimentaux se sont déroulés au sein du laboratoire Dosage Analyse et Caractérisation en Haute Résolution (Université Sétif I). Différentes techniques ont été utilisées, MEB, XRD et FTIR.

Le chapitre quatre est consacré à la modélisation des diélectriques par la méthode des différences finies. Ce chapitre traite l'effet de la charge d'espace sur le vieillissement des diélectriques. Les résultats expérimentaux du troisième chapitre nous ont permis de valider les résultats de simulation.

On termine notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur les diélectriques et leurs applications

I.1 Introduction

La fonction d'isolation est primordiale du fait qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique [4]. Les polymères présentent une excellente qualité diélectrique et mécanique pour remplir cette fonction [5].

Cependant et malgré toutes les précautions prises lors de leur mise en œuvre, les polymères connaissent, quand même certaines difficultés liées aux charges d'espace et la distorsion du champ électrique réduisant la durée de vie du matériau isolant [6-7-8].

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les diélectriques : définition, utilisations et caractéristiques des milieux diélectriques. On présentera ensuite quelques problèmes connus dans les diélectriques, tel que le vieillissement qui est la cause principale du claquage et les différents phénomènes qui apparaîtront dans les diélectriques (phénomène de polarisation, de conduction et de relaxation).

I.2 Définition d'un diélectrique

Un matériau est diélectrique s'il ne contient pas des charges électriques susceptibles de se déplacer de façon macroscopique. Autrement dit, c'est un milieu qui ne peut pas conduire le courant électrique. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique. Mais les charges liées peuvent se déplacer localement et induire un courant de polarisation.

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 parlons d'isolant. Par contre notre intérêt est focalisé sur les propriétés découlant de la polarisation ou de la permittivité, nous utilisons plutôt le terme diélectrique. En fin de compte, les mots isolant et diélectrique peuvent être considérés comme des synonymes [9].

I.3 Caractéristiques des diélectriques

I.3.1 Permittivité relative

La permittivité relative ϵ_r se définit comme le rapport entre la capacité C_x d'un système d'électrodes immergées dans le diélectrique et la capacité C_v de la même configuration d'électrodes dans le vide :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_v} \quad (1.1)$$

Il s'agit donc d'un nombre sans dimension. La permittivité absolue ϵ est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la constante diélectrique du vide ϵ_0 :

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (1.2)$$

Avec $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{F/m}$

La permittivité relative du vide est donc égale à 1, celle des gaz est très proche mais très légèrement supérieure à 1 (1.00053 pour l'air). Les valeurs très élevées de la permittivité sont surtout rencontrées dans les diélectriques pour condensateurs. [10]

I.3.2 Rigidité diélectrique

La rigidité d'un matériau est la valeur maximale de champ électrique que l'on peut lui appliquer sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage ou perforation diélectrique. Le claquage est précédé par une augmentation importante du courant circulant dans le matériau avec des conséquences thermiques destructives : fusion, évaporation, décomposition, carbonisation,...

En pratique, la rigidité diélectrique est le rapport entre la tension de claquage et la distance entre les électrodes auxquelles cette tension est appliquée dans des conditions d'essai spécifiées.

$$E = \frac{u}{e} \quad (1.3)$$

Avec : e (m) est la distance entre électrodes

U (v) est la tension pour laquelle le claquage se produit

E (v/m) est la rigidité diélectrique

Pour que cela soit tout à fait exact, il conviendrait que le champ soit uniforme, c'est-à-dire que les électrodes soient planes et parallèles avec des bords tels qu'ils ne provoquent en aucun point le renforcement du champ électrique. On se contente d'utiliser souvent des électrodes dont le rayon de courbure est grand devant la distance inter électrodes.

Divers mécanismes peuvent conduire au claquage.

I.3.3 La conductivité

La conductivité électrique σ est un paramètre important pour toutes les applications électriques surtout sous tension continue.

A partir des mesures de constante diélectrique et de l'angle de perte diélectrique, d'autres paramètres électriques peuvent être obtenus. Concernant les polymères, la conductivité σ peut s'exprimer sous la forme : [11]

$$\sigma = \omega \tan \delta \varepsilon \varepsilon_0 \quad (1.4)$$

Avec :

σ est la conductivité électrique

ω est la pulsation.

δ est l'angle de perte diélectrique.

ε est la permittivité diélectrique.

ε_0 est la permittivité du vide.

Le tableau suivant présente la conductivité de quelques polymères

| Polymère | $\sigma(\Omega.cm)^{-1}$ |
|-------------------------------------|--------------------------|
| Epoxy | 3.10^{-13} |
| Polyamide, Oxyde d'aluminium | 10^{-13} |
| Polyéthylène | 10^{-16} |
| Al ₂ O ₃ pure | 10^{-18} |

Tableau I.1 : Conductivité de quelques polymères. [12]

I.3.4 Circuit équivalent d'un diélectrique

Sous l'effet d'un champ électrique deux phénomènes prennent naissance.

- Polarisation due aux déplacements des charges liées (qui est présentée par le courant de polarisation I_p), d'où : $I_p = I_d + I_a$ (1.5)

I_a est due à la polarisation d'orientation.

I_d est due au déplacement.

- La conductivité est créée par des charges libres (courant de fuite); la résistance correspondante est appelée résistance d'isolement. Ainsi,

$$I_{\text{diel}} = I_f + I_p = I_f + I_a + I_d \quad (1.6)$$

I_{diel} est le courant total qui traverse le diélectrique.

A partir des courants circulant dans le diélectrique, le circuit équivalent du diélectrique est le suivant,

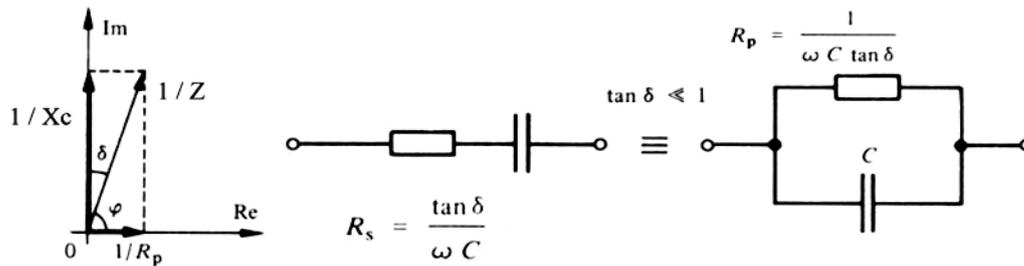


Figure I.1 : Circuit équivalent électrique du diélectrique [13].

Les relations reliant les composantes du circuit série et parallèle sont :

$$C_s = C_p (1 + \operatorname{tg}^2 \delta) \quad (1.7)$$

$$R_s = R_p / (1 + 1/\operatorname{tg}^2 \delta) \quad (1.8)$$

Avec :

$$\operatorname{tg} \delta = 1/\omega \cdot C_p \cdot R_p \text{ (pour circuit parallèle)} \quad (1.9)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_s \cdot R_s \text{ (pour circuit série)} \quad (1.10)$$

I.3.4.1 Calcul des pertes du diélectrique

Pour une tension appliquée continue, la polarisation ne se produit que durant le régime transitoire, en régime permanent :

$$I_f = U/R \quad (1.11)$$

Alors les pertes deviennent :

$$\Delta P = (I_f)^2 R = U^2/R \quad (1.12)$$

En générale (en continu) ΔP reste très faible sauf si l'échantillon contient des impuretés ou de l'humidité.

Le calcul des pertes diélectriques sous tension alternative, peut se faire de la façon suivante : [13]

$$\text{On a : } I_R = U/R \text{ et } I_C = \omega \cdot C \cdot U$$

I_R est le courant traversant la résistance et I_C le courant traversant le condensateur dans le circuit équivalent parallèle.

$$\text{De plus : } \operatorname{tg} \delta = I_R/I_C = 1/\omega \cdot C \cdot R$$

$$\text{Alors : } \Delta P = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I_R$$

D'où :

$$\Delta P = U \cdot I_C \cdot \operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C \cdot U^2 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.13)$$

I.3.4 Champ électrique dans un isolant

Soit un condensateur dont les plaques sont séparées par deux isolants (Fig.I.2).

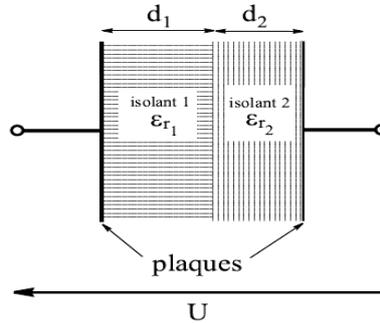


Figure I.2 : Condensateur avec deux milieux différents [14]

Calculons les champs E_1 et E_2 respectivement dans l'isolant 1 et dans l'isolant 2, on a :

$$\begin{cases} E_1 d_1 + E_2 d_2 = U \\ \varepsilon_{r1} E_1 = \varepsilon_{r2} E_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_1 = \frac{U}{d_1 + \frac{\varepsilon_{r1}}{\varepsilon_{r2}} d_2} \\ E_2 = \frac{U}{\frac{\varepsilon_{r2}}{\varepsilon_{r1}} d_1 + d_2} \end{cases} \quad (1.14)$$

C'est le cas du calcul du champ dans les isolants contenant des inclusions d'impuretés (bulles d'air,...).

I.3.5 Influence de la température

La température conditionne de façon générale l'origine de l'organisation moléculaire de la matière, notamment les transitions de phase (évaporation-condensation, fusion-solidification) [15].

Elle influence fortement les propriétés électriques en contrôlant statiquement le mouvement des particules électriques dans les clusters et ceux des clusters les uns par rapport aux autres.

I.3.6 Influence de la fréquence

L'influence de la fréquence de la tension de fonctionnement d'un système électrique, sur le vieillissement des isolants a été mise en évidence sur plusieurs polymères commerciaux [16]. Sur des matériaux secs, une chute de la rigidité diélectrique a été observée ainsi que la diminution de la durée de vie, en faisant varier la fréquence entre 60 Hz et 1 kHz. D'autre part, l'expérience montre que le développement d'arborescence d'eau présents dans les

isolants de câbles tels que PE et PRC augmente de manière significative avec la fréquence et peut conduire à la rupture prématurée [17].

I.4 Différents types d'isolants utilisés en électrotechnique

Les milieux électriques regroupent les isolants solides, liquides et gazeux.

I.4.1 Les isolants solides

Les isolants solides trouvent des applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution de l'énergie électrique. On les regroupe en deux catégories principales selon leur nature organique ou inorganique.

I.4.1.1 Les isolants inorganiques

Les principaux isolants inorganiques regroupent :

I.4.1.1.1 Les céramiques techniques

Le terme céramique évoque souvent des objets rustiques comme des poteries, des briques et des tuiles. Une céramique est un matériau solide de synthèse qui nécessite souvent des traitements thermiques pour son élaboration. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir de poudres consolidées (mise en forme) et sont densifiées par un traitement thermique (le frittage) [18].

La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est-à-dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés par des zones moins ordonnées (joints de grains) comme illustré en figure.1

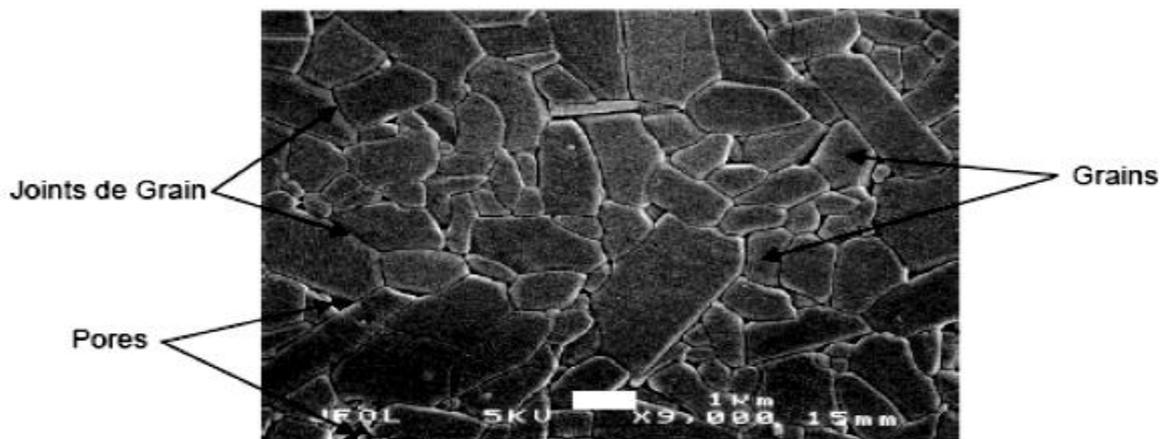


Figure I.3 : Microstructure typique d'une surface céramique polie qui illustre les grains monocristallins, joints de grains et pore.[18]

I.4.1.1.2 Verres

Le verre, dans le langage courant, désigne un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent au rayonnement visible, souvent issu de sable siliceux. Le plus souvent, le verre est constitué d'oxyde de silicium (silice SiO_2) et de fondants [18].

Les verres sont utilisés dans le domaine de l'électrotechnique et les principales applications sont l'isolement électrique de conducteurs ou d'éléments sous tension dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité.

I.4.1.1.3 Les micas et produit micacés

Le mica est un minéral brillant formé de silicate d'aluminium et de potassium. Il présente une importance considérable pour l'industrie électrique, par suite des propriétés particulières qui s'attachent à ce matériau. Il est en effet doté d'une excellente tenue à la température, d'une rigidité diélectrique élevée et d'une inertie chimique remarquable. Le mica continue à être le matériau de choix et de base des systèmes d'isolation moyenne et haute tension. Les technologies d'emploi du mica n'ont pas cessé d'évoluer au cours des années, tant pour répondre à des demandes d'amélioration de performances que de rationalisation ou de réduction de coût [19-20].

I.4.1.2 Les isolants organiques

La catégorie des isolants organiques se subdivise entre matériaux naturels comme les caoutchoucs, paraffines et papier, et synthétiques (élastomères, polymères et composites).

I.4.1.2.1 Les isolants organiques naturels

Les papiers et les cartons restent des matériaux de choix pour l'isolation des transformateurs haute tension et moyenne tension. Le choix de l'imprégnant est important étant donné que c'est de lui que dépendent les caractéristiques de l'isolation au papier. Les huiles végétales et la paraffine sont utilisées pour imprégner les papiers isolants, [21].

I.4.1.2.2 Les isolants organiques synthétiques

I.4.1.2.2.1 Les polymères :

Un polymère est un matériau composé de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules composé d'un motif appelé monomère qui se répète le long de la chaîne moléculaire. Un matériau polymère résulte de la polymérisation de la molécule organique de

petite taille. Le degré de polymérisation n correspond au nombre de fois que le monomère est répété. La longueur caractéristique d'une chaîne est d'environ un micron [22].

Un polymère peut être naturel comme les polysaccharides ou artificiel, obtenu par modification chimique d'un polymère naturel (exemple : acétate de cellulose, méthylcellulose, galalithe). Le polymère peut également être synthétique, préparé par polymérisation de molécules monomère, comme le polystyrène, ou polyisoprene synthétique. On distingue deux grandes catégories de réactions chimiques permettant la préparation des polymères [19] :

- La polymérisation en chaîne ou polyaddition qui permet de produire, par exemple, le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène.
- La polymérisation par étapes ou polycondensation permet de fabriquer le polyéthylène téréphtalate (PET).

Il existe des polymères souples tel que le polyéthylène (PE) tout comme des polymères rigides tel que le polyparaphénylène (PPP). Le squelette du polymère est stabilisé par des liaisons chimiques covalentes et il ne se dissout donc pas en solution. La cohésion entre macromolécules est assurée par des liaisons physiques ou hydrogènes, lesquelles se rompent sous l'effet d'un chauffage.

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques. Citons notamment :

- Les polymères thermoplastiques deviennent malléables quand ils sont chauffés, ce qui permet leur mise en œuvre.
- Les polymères thermodurcissables durcissent de façon irréversible sous l'action de la chaleur et/ou par ajout d'un additif.

I.5 Propriétés des polymères

I.5.1 Propriétés électriques

➤ Résistivité superficielle

La résistance à la décharge électrique superficielle est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau, et en le carbonisant, le rendre conducteur. La résistance superficielle est fortement influencée par l'humidité [23].

➤ Résistivité transversale

Elle caractérise le pouvoir isolant du matériau. Pour la majorité des polymères la valeur de la résistivité transversale est supérieure à $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ à la température ambiante [23].

I.5.2 Propriétés chimique

Ces propriétés englobent des caractéristiques diverses : imperméabilité aux liquides et aux gaz, résistance chimique aux solvants et résistance aux rayons ultraviolets.

I.5.3 Propriétés physique

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

➤ **La masse volumique :** La masse volumique des matières est peu élevée. La légèreté des polymères est une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes.

I.5.4 Propriétés thermiques

On peut classer les polymères en deux types, en fonction de leur réaction à la chaleur : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

➤ **Les thermoplastiques**

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécule linéaire ou ramifiées, liées entre elle par des liaisons physiques. Ces matières sont solides à température ambiante. Elles se ramollissent à la chaleur jusqu'à un état plastique dans lequel elles se laissent plus facilement se déformer. Ce processus est réversible, c'est-à-dire que les thermoplastiques se rigidifient de nouveau au refroidissement. Selon la régularité de leur chaîne, ces polymères peuvent se cristalliser (thermoplastique semi-cristallins) ou (thermoplastiques amorphes).

Ce qui caractérise un matériau thermoplastique est la possibilité, après avoir subi un état thermomécanique, d'être ramené par des moyens physiques à l'état initial. [11]

➤ **Les thermodurcissables**

Les matières thermodurcissables diffèrent nettement des matières thermoplastiques, non seulement du point de vue de la structure chimique, mais aussi des technologies de mise en forme requises. Les principaux représentants de la famille des thermodurcissables sont les polyesters insaturés (UP), les époxydes (EP), les phénoplastes (phénol-formaldéhyde PF, notamment), les aminoplastes, les acrylates et les silicones (SI). Ces matières trouvent des

applications, en particulier après renforcement par des fibres, pour l'élaboration d'équipements industriels et sportifs, mais aussi dans la construction aéronautique et d'engins spatiaux.

Les thermoplastiques sont stables même à des températures relativement élevées et présentent en général une bonne tenue vis-à-vis des milieux agressifs. Ils ne peuvent jamais revenir à l'état initial quand leur température a été augmentée [11].

I.6 Polychlorure de Vinyle (PVC)

I.6.1 Définition

Le PVC est une des matières plastiques modernes qui connaît le plus grand succès. Il est utilisé dans notre vie quotidienne pour diverses applications et joue un rôle prépondérant dans la protection de notre santé dans notre sécurité.

Le PVC est fabriqué à partir de deux matières premières naturelles : Le pétrole et le sel. Le pétrole fait office de source de carbone, le sel de fournisseur de chlore. Comme tous les polymères, le PVC est une longue chaîne composée d'éléments identiques ou monomères. Pour le PVC, il s'agit du chlorure de vinyle monomère ($\text{CH}_2 - \text{CHCl}$). Une molécule de PVC contient 750 à 1500 monomères. [9]

I.6.2 Formule moléculaire

Le PVC a pour formule chimique $(\text{CH}_2 - \text{CHCl})_n$ (figure 3). Il est obtenu par polymérisation radicalaire du monomère chlorure de vinyle $\text{CH}_2 - \text{CHCl}$ [21].

I.6.3 Fabrication

Découvert en 1835 par le physicien français Victor Regnault, le PVC est composé à 57 % de chlore et à 43 % d'éthylène, hydrocarbure composé de carbone et d'hydrogène issu du pétrole.

Le chlore est obtenu par électrolyse du sel (chlorure de sodium : NaCl). Par suite de réactions entre le chlore et l'éthylène, on obtient le chlorure de vinyle monomère (CVM) qui, par polymérisation, donne le PVC. La polymérisation est la réaction chimique par laquelle les molécules s'additionnent les unes aux autres pour former une chaîne de grande longueur. [9]

I.6.4 Synthèse du monomère

La synthèse du chlorure de vinyle monomère (CVM) est réalisée suivant deux principaux procédés :

L'addition du gaz chlorhydrique sur l'acétylène :



La chloration de l'éthylène en 1,2-dichloroéthane, puis la pyrolyse de se dernier [24]



I.7 Propriétés du PVC

I.7.1 Propriétés chimiques

Le PVC sans plastifiant possède une bonne résistance aux produits chimiques :

Acides, bases, huiles, alcools, hydrocarbures, aliphatiques. Par contre il est sensible ou hydrocarbures aromatiques et chlorés. Le PVC souple est beaucoup plus sensible aux agents chimiques.

I.7.2 Propriétés électriques

Le PVC a de bonnes propriétés isolantes mais les pertes électriques dans les matériaux sont suffisamment importantes pour permettre le soudage par haute fréquence. [25]

- Le facteur de perte diélectrique a 50 Hz et 20 °C et de l'ordre de $15 \cdot 10^{-3}$ (F/m)
- La constante diélectrique a 50 Hz et 20 °C et de l'ordre 3.4 (F/m)
- La résistivité transversal et de l'ordre de 1016 $\Omega \cdot \text{cm}$.

I.7.3 Propriétés thermiques

- Conductivité thermique : elle est d'environ 0.2 w/m. °k.
- Capacité thermique massique elle est d'environ 1046 J/kg. °K.

I.8 Utilisation des PVC pour le transport d'électricité

I.8.1 Câbles électriques

Au début des années 1960, les câbles à isolation synthétique extrudée ont commencé à concurrencer les câbles à isolation avec du papier imprégné à cause des nombreux avantages indéniables qu'ils présentent. Nous pouvons retenir les plus importants qui sont :

- leur légèreté qui permet une pose plus facile.
- la suppression des problèmes de migration des matières d'imprégnation.

- une fiabilité équivalente à celle d'une technologie à papier imprégné.

Cependant leur point faible reste leur vieillissement sous champ et en présence d'humidité, conduisant à la formation d'arborescences responsables de la rupture diélectrique de l'isolation.

Dans le cas le plus simple d'un câble unipolaire, quatre parties sont élaborées à partir de polymères, à savoir :

- les deux écrans semi-conducteurs
- l'isolant principal ;
- l'enveloppe extérieure de protection.

Les matériaux les plus couramment utilisés sont le polyéthylène, basse et haute densité (PEBD et PEHD), mais surtout sous sa forme réticulée (XLPE). On trouve également des isolations à base de polychlorure de vinyle (PVC) ou de caoutchouc (EPR, EVA ou EPDM). Le matériau d'isolation doit présenter, outre des spécifications diélectriques (résistivité et rigidité diélectrique élevée, permittivité diélectrique et pertes diélectriques faibles), des caractéristiques liées à son utilisation dans le câble (insensibilité aux chocs, aux vibrations et aux attaques chimiques, résistance au feu et tenue au vieillissement). Ces matériaux ont une fonction bien particulière qui détermine leur utilisation :

- Le polychlorure de vinyle (PVC) est surtout utilisé dans les câbles BT (Basse Tension) du fait de ses pertes diélectriques. L'ajout d'un plastifiant, pour diminuer la rigidité mécanique et ainsi pouvoir augmenter la souplesse du câble, diminue également les performances d'isolation du PVC.
- Le polyéthylène (PE) est principalement utilisé pour les câbles moyenne et haute tension en raison de ses excellentes propriétés diélectriques. Il existe sous deux formes : le polyéthylène basse densité (PEBD) et le polyéthylène haute densité (PEHD) qui est utilisé dans les réseaux de transport où la tension peut atteindre 500 kV.
- Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC ou XLPE) est obtenu en créant des liaisons chimiques entre les chaînes macromoléculaires, grâce à un agent réticulant (péroxyde de dicumyle), dans le but d'améliorer les caractéristiques thermiques et mécaniques du polyéthylène. La moins bonne pureté du PRC comparée aux PEBD et PEHD a fait qu'il était utilisé majoritairement dans la fabrication des câbles de 90 kV à 275 kV.

- Les caoutchoucs éthylène-propylène tels que l'EPR (Ethylene-Propylene-Rubber), et EPDM (Ethylène-Propylène Diène Monomère) sont des copolymères dont l'avantage principal est la souplesse obtenue. Ils sont employés dans les câbles basse et moyenne tension, et n'offrent qu'une résistance aux attaques chimiques (huile) et une résistance à la propagation des flammes médiocres.
- Les caoutchoucs de silicone sont destinés à la fabrication de câbles spéciaux, par exemple dans la marine ou l'aviation, notamment grâce à leur excellente tenue aux températures extrêmes (de -80 °C à 250 °C). De plus, leur comportement au feu est remarquable puisque la combustion du câble provoque une transformation en silice qui préserve les propriétés d'isolation du câble. [26]

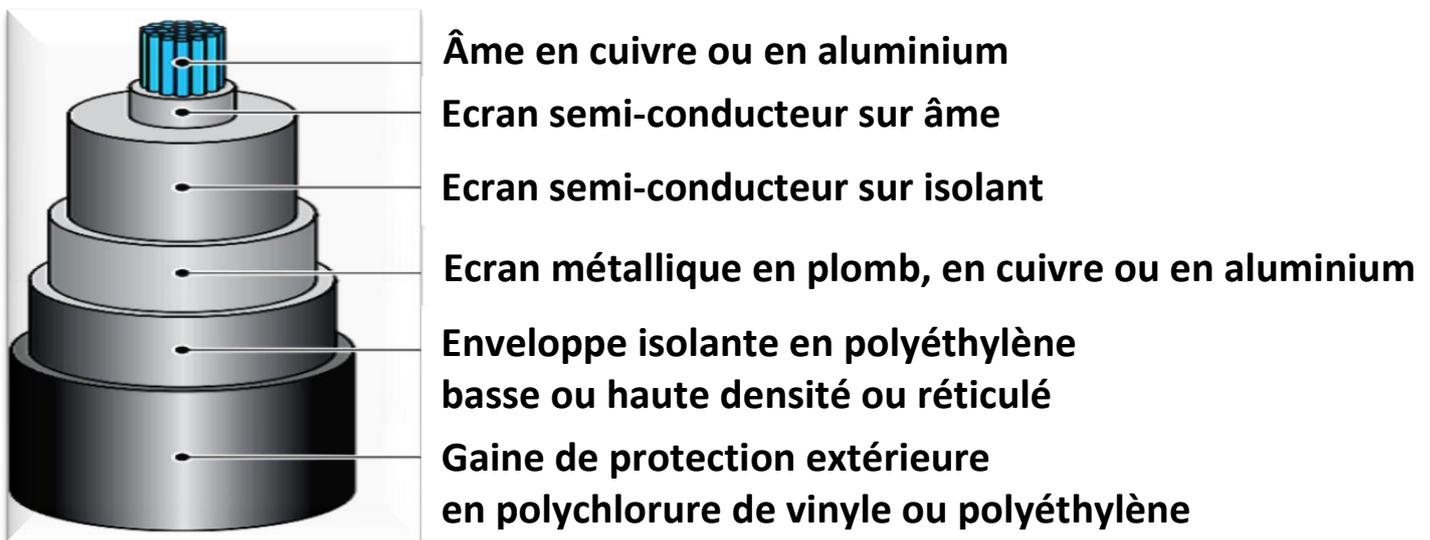


Figure I.4 : Structure d'un câble haute tension. [26]

I.8.2 Avantages et inconvénients du PVC

➤ Les Avantages

Le PVC est un matériau qui offre de multiples avantages :

- Résistant aux intempéries, à l'usure du temps, aux flammes et à la plupart des agents agressifs.
- Insensible aux variations climatiques (contrairement à l'aluminium ou au bois)
- Bon isolant électrique, thermique et phonique
- Léger
- Malléable, le pvc se plie à toutes les contraintes
- Economique (moins cher que l'acier, le bois ou l'aluminium)

- Facile à entretenir
- Difficilement inflammable
- 100% recyclable
- sans entretien
- antichoc
- Transparence et souplesse
- Peu coûteux.
- Collage facile.

➤ **Inconvénients**

A côté de ses nombreux avantages, le pvc présente quelque inconvénient :

- Toxique en cas d'incendie ou de combustion (contient de l'acide chlorhydrique)
- Non biodégradable
- Aspect plastique des produits d'imitation (bois, marbre, etc.)
- produit à base de pétrole
- Peu écologique : 50% du chlore produit par les incinérateurs provient du PVC. En cas d'incendie, le PVC génère de l'acide chlorhydrique corrosif et surtout des dioxines extrêmement toxiques, rendant la maison de toute manière inhabitable par contamination
- sensible au feu
- Faible résistance mécanique par rapport à l'aluminium ou à l'acier (des renforts métalliques sont nécessaires pour rigidifier le profil mais ils dégradent les performances thermiques.
- Ne résiste pas à la chaleur $>70^{\circ}\text{C}$ et à la stérilisation par les rayonnements ionisants.

I.9 Titanate de Baryum BaTiO_3

Le titanate de baryum BaTiO_3 est un composé très intéressant, aussi bien d'un point de vue théorique (structure pérovskite simple qui facilite de nombreux calculs et interprétations théoriques) que d'un point de vue pratique (composé chimiquement et mécaniquement stable qui présente des propriétés ferroélectriques et piézoélectriques dans un large domaine de température incluant la température ambiante).

I.9.1 Caractéristiques de BaTiO₃

Le tableau.1 : regroupe quelques caractéristiques de BaTiO₃.

| Caractéristiques | Valeurs |
|---|---------|
| Densité (g/cm ³) | 6.02 |
| Température de fusion (c°) | 1650 |
| Masse molaire (g/mole) | 233.42 |
| Module d'Young (Gpa) | 67 |
| Dureté (molis) | 5 |
| Constante de déformation piézoélectrique (pC/N) | 78 |

Tableau I.2 : Caractéristiques de BaTiO₃. [27]

I.9.2 Structure

C'est au milieu des années 1940 que Wul et Goldman ont mis en évidence la très grande permittivité diélectrique (plusieurs milliers) du BaTiO₃ [28], dont les propriétés ferroélectriques ont été étudiées par la suite par d'autres chercheurs. Le composé BaTiO₃ possède une structure de type perovskite ayant une symétrie cubique [29].

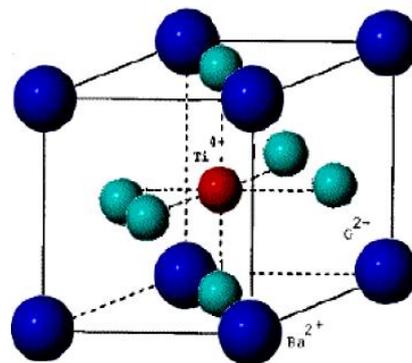


Figure I.5 : Structure de BaTiO₃.

En particulier les dérivés du titanate de baryum BaTiO₃ sont utilisés dans l'industrie de la microélectronique. Ces propriétés piézoélectriques et pyroélectriques remarquables ont en effet permis leur développement en tant que matériaux pour condensateurs, actionneurs et capteurs [30]. La piézoélectricité est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une force mécanique (effet direct) et réciproquement, de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique (effet inverse).

I.10 Vieillissement

La notion de vieillissement décrit une ou plusieurs modifications fonctionnelles diminuant progressivement l'aptitude d'un objet, d'une information ou d'un organisme à assurer ses fonctions. En effet, sous l'action de nombreux facteurs (champ électrique, température, humidité, radiations...) les propriétés de ces isolants se dégradent dans le temps de manière réversible ou irréversible. Ce phénomène présente des effets défavorables pour le matériel électrique pouvant se manifester par l'apparition de défaillances associées à des phénomènes de rupture et de décharges diélectriques des isolants et ceci, sous des contraintes bien plus faibles que celles prises en compte lors de l'élaboration.

La compréhension des mécanismes et des phénomènes de vieillissement conduisent soit à la perte, réversible ou non, des propriétés fonctionnelles, soit à la rupture diélectrique des isolants organiques solides. On doit pouvoir prédire le comportement de ce type de matériaux en tenant compte de la durée d'utilisation envisagée pour le système en question (30 à 40 ans par exemple pour les câbles de transport d'énergie ou les alternateurs [31]). Le comportement du matériau conditionne la durée de vie des systèmes dans lesquels ces matériaux sont intégrés.

I.10.1 Du vieillissement à la rupture des isolants polymères

Nous présentons dans cette section d'une façon très brève l'enchaînement des mécanismes probables qui ont lieu à partir de la mise en service d'un isolant organique jusqu'à la rupture de ce dernier. La Figure.3 présente un scénario probable du phénomène de vieillissement. Un isolant organique en début de service ($t=0$ sur la Figure I.6) peut être avec ou sans défaut initial (cavités, trous...). Sous l'effet de l'application d'une tension, il y a alors croissance ou apparition de vacuoles au sein de l'isolant ($t=t_1$ jusqu'à t_2). Ce phénomène n'est autre que le vieillissement électrique qui pourra conduire à la dégradation si des décharges prennent naissance dans une vacuole ($t=t_3$) et si une arborescence se développe ($t=t_4$). Cette dégradation est susceptible à son tour de conduire l'isolant à la fin de sa vie c'est la rupture ($t=t_5$).

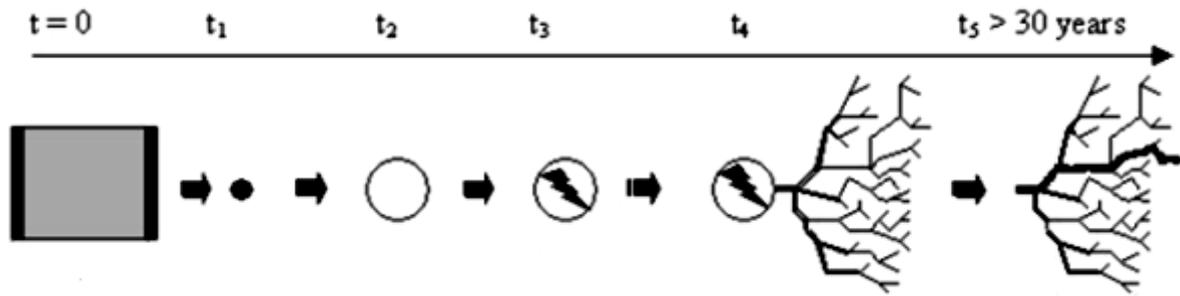


Figure I.6 : Scénario classique de l'endommagement d'un isolant organique [32].

Trois mécanismes fondamentaux décrivent l'endommagement global d'un isolant organique sous champ électrique : le vieillissement électrique, la dégradation et finalement la rupture diélectrique. Ces mécanismes sont répertoriés dans la Figure.4 selon le temps et le champ électrique auxquels ils sont soumis.

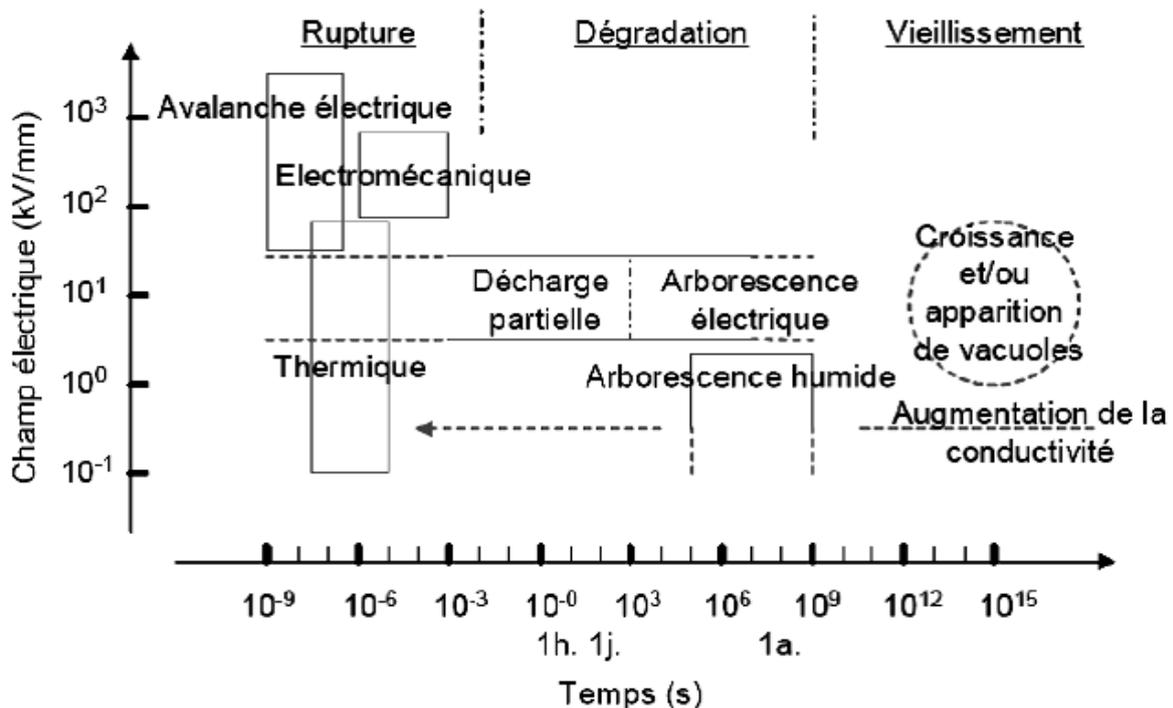


Figure I.7 : Vieillessement, dégradation et rupture d'un isolant en fonction des temps et de champs électriques auxquels ils sont soumis [33].

Si un électron parvient à s'accrocher sur une molécule neutre, ce champ est suffisant pour ioniser le radical anion, puis accélérer l'électron, qui ionise des molécules et déclenche une rupture diélectrique par avalanche. Ce processus intervient très rapidement, en 10^{-8} à 10^{-9} s dès que les conditions de rupture sont remplies (valeur de champ électrique). Ces conditions

ne sont pas rencontrées sur un objet normalement isolé, mais elles peuvent résulter de l'évolution préalable du matériau.

Les mauvais isolants se perforent en général par effet thermique. Le courant qui passe chauffe le matériau, ce qui augmente sa conductivité, et le courant dans le matériau, La rupture intervient par emballement thermique qui génère à terme une avalanche électronique, en un temps court compris entre 10^{-4} et 10^{-8} s.

Un bon isolant électrique peut être peu résistant à la propagation des fissures. Dans ce cas les forces électrostatiques peuvent provoquer la propagation d'une fissure jusqu'au moment où le champ électrique provoque la rupture par avalanche (rupture électromécanique).

Ces trois types de ruptures diélectriques sont normalement absents au sein des matériaux peu âgés, car les équipements diélectriques sont dimensionnés de manière à pouvoir supporter au moins les champs électriques lorsque le réseau électrique ou les équipements électriques sont en service. En pratique les défaillances proviennent du vieillissement du matériau sous l'action combinée du champ électrique et de l'environnement.

Les décharges partielles sont une conséquence habituelle du vieillissement des isolants polymères en champ alternatif. Les arborescences électriques sont une manifestation analogue au vieillissement sous champ mais plus lente à s'établir. Ces deux processus n'interviennent qu'à champ élevé, >10 kV/mm.

Deux autres mécanismes interviennent pour expliquer à plus long terme les défaillances des isolants polymères. D'une part, l'oxydation progressive du matériau et la diminution de la masse moléculaire des chaînes de polymères, ce qui augmente en général la conductivité ionique. Cette évolution peut introduire des ruptures thermiques sur des isolants âgés. D'autre part et en présence d'humidité, ou de vapeur d'eau, les champs électriques, même relativement faibles, provoquent l'apparition d'arborescences humides qui croissent jusqu'à la rupture [34].

Si la rupture est sans conteste le phénomène majeur et irréversible qui mettra fin à la vie de l'isolant, il est tout à fait concevable que l'isolant soit dans plusieurs états à la fois ou bien encore que certains états entraînent d'autres. Ainsi, un vieillissement électrique qui aurait pour conséquence la création de vacuoles pourrait entraîner l'apparition de décharges partielles dans un isolant initialement parfait (sans vacuoles ou trop petites). Ces décharges finiraient par constituer des segments ionisés préférentiels pour la croissance d'une arborescence électrique (par percolation). L'arborescence électrique s'achèverait alors par une rupture électronique et/ou thermique dès que les conditions respectives seraient remplies

(champ fort, excédant de charges électriques, forte conductivité ionique et instabilité thermique).

Nous nous proposons dans ce qui suit de faire une présentation rapide de modèles existant pour la description du phénomène de vieillissement.

I.10.2 Vieillissement thermique

Une élévation de température, que ce soit pendant l'utilisation du matériau ou pendant sa mise en œuvre entraîne une dégradation thermique des matières plastiques imputable à la modification de la structure des chaînes macromoléculaires. Cette dégradation thermique peut provoquer soit une rupture des chaînes (cas du polyéthylène PE), soit une dépolymérisation (cas du polyméthylméthacrylate PMMA), soit une réaction sur les groupes latéraux (formation d'HCl au cours de la pyrolyse du chlorure de polyvinyle PVC). A la limite, la dégradation thermique peut provoquer une combustion, réaction fortement exothermique [35].

I.10.3 Vieillissement sous effet des charges d'espace

Selon les auteurs, dès l'application du champ électrique, les charges d'espace injectées à partir des électrodes, des semi-conducteurs ou des phénomènes de décharge, se dirigent vers des sites où elles peuvent être piégées. Dans les isolants organiques utilisés, la distribution des sites de piégeage des charges n'est pas uniforme au sein du matériau. C'est le cas du PE dans lequel les sites se situent à l'interface des zones amorphes et cristallines. Par conséquent, des concentrations locales de charges vont se former. Cet aspect local a lieu surtout autour des défauts morphologiques, des inclusions et des impuretés. La forme, la taille et la densité des microcavités peuvent varier énormément suivant les matériaux et les systèmes isolants [36].

I.11 Claquage

Dans les isolants solides : le claquage dans un diélectrique peut provoquer la fusion, brûler ou perforer le diélectrique. Après un claquage sous formes de perforation, de fonte ou de brûlure sur le diélectrique peut rester et donner une forme irrégulière à l'isolant. Si une tension est de nouveau appliquée à cet isolant, un claquage survient dans la majorité des cas, suivant le canal tracé par la décharge précédente et même à une tension inférieure.

Dans les isolants liquide et gazeux, la grande mobilité des particules permet à la trace de disparaître et l'isolant est ainsi régénéré. Chaque type de matériaux possède une résistance au

claquage (rigidité diélectrique) différentes des autres. La rigidité diélectrique dépend considérablement de :

- La fréquence du réseau :

La rigidité diélectrique diminue avec l'augmentation de la fréquence.

- La température

La rigidité diélectrique diminue avec l'augmentation de la température et la durée d'application de la tension [37].

I.11.1 Mécanismes de claquage

On appelle claquage la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique intense. On distingue généralement le claquage électronique, le claquage thermique et le claquage électromécanique tout en notant que la distinction n'est pas forcément évidente car un claquage électronique conduit toujours à une destruction locale du matériau par fusion thermique et inversement un claquage est principalement la conséquence d'un phénomène d'injection et/ou de conduction de nature électronique.

I.11.2 Claquage thermique

Les pertes diélectriques de polarisation et de conduction provoquent un dégagement de chaleur dans les isolants. Tant que la quantité de chaleur ainsi produite est supérieure à celle que peut évacuer l'isolant, la température augmente. Avec elle, la conductivité augmente entraînant un accroissement de la chaleur produite par effet joule. [38]

I.11.3 Claquage d'origine électronique

Plusieurs théories ont été proposées. On distingue le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche.

I.11.3.1 Claquage intrinsèque

Lorsque le champ électrique est appliqué à un matériau de telle manière que sa température reste pratiquement inchangée en maintenant ce champ pendant une courte durée et en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur, on peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température. [38].

I.11.3.2 Claquage par avalanche

La condition nécessaire mais non suffisante pour que ce type de claquage se produise est la présence dans la matière isolante d'électrons de conduction pouvant être accélérés pour atteindre l'énergie d'ionisation des atomes. Coelho et Aladenize donnent une explication du processus : lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un électron, de sorte qu'on a alors deux électrons libres qui peuvent acquérir avec le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc deux électrons.

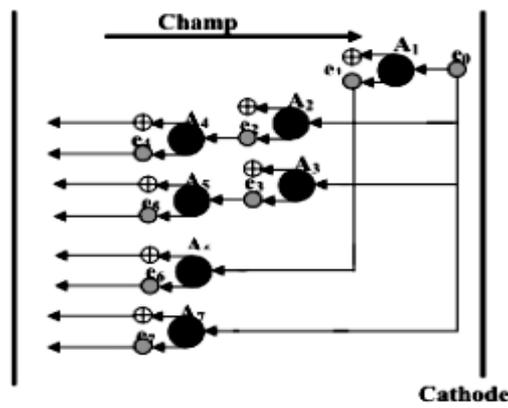


Figure I.8 : Schéma descriptif de l'avalanche. [39]

Pour produire une avalanche, il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit 2 électrons, une avalanche de m génération donne 2^m électrons.

I.11.3.3 Claquage électromécanique

Garton et Stark explique le mécanisme de claquage électromécanique qui est dû à l'effort électrostatique qui tend à rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cette effort comprime l'isolant solide placé entre les deux électrodes et provoque une diminution de son épaisseur. [38]

I.12 Phénomène de polarisations

Les pertes diélectriques sont dues aux mouvements des porteurs de charges. L'effet de ces mouvement est appelé polarisation induite. L'effet de la polarisation diélectrique avait été découvert par Michael Faraday en 1837.

On distingue plusieurs types de polarisation : électronique, ionique, dipolaire, celles-ci peuvent coexister ou apparaître séparément. La polarisation élastique (ou de résonance) et la polarisation de relaxation. La polarisation totale est la somme des différents types de polarisation. [40]

I.12.1 Différents type de polarisations

I.12.1.1 Notion de la polarisation

La plupart des matériaux ferroélectriques sont fabriqués sous forme de céramiques polycristallins mais il est possible d'obtenir ces matériaux sous forme de monocristaux, qui sont par ailleurs extrêmement fragiles. Les céramiques polycristallines ferroélectriques sont formées de grains et de joints de grains. Pour des raisons énergétiques chaque grain est divisé en domaines au sein desquels les dipôles sont orientés dans la même direction.

Deux domaines adjacents possèdent des directions de polarisation différentes définies par la symétrie cristalline et sont séparés par une frontière appelée « mur de domaine ». Cette zone de transition ne détruit pas la cohérence du réseau cristallin. Sous sollicitation électrique, les murs de domaines se déplacent et leur mouvement est responsable de certaines pertes dans la céramique. Cependant il existe des compositions (matériaux dopés) pour lesquelles les murs de domaines sont moins mobiles. [41].

I.12.1.2 Mécanismes de polarisation

Il y a 4 types de polarisation qui contribuent à la variation de la permittivité diélectrique et le facteur de perte d'un matériau :

I.12.1.2.1 Polarisation électronique

La polarisation électronique se produit lorsque la fréquence f est inférieure 10^{15} Hz (UV visible). Elle est engendrée par le mouvement des électrons de valence par rapport aux noyaux sous l'influence d'un champ électrique E :

$$P_e = \alpha_e E \quad (1.15)$$

Ou α_e est la polarisabilité électrique.

I.12.1.2.2 Polarisation ionique

Elle est due aux déplacements des cations ou des anions les uns par rapport aux autres. Cette polarisation apparaît quand $f \leq 10^{12}$ à 10^{13} Hz :

$$P_i = \alpha_i E \tag{1.16}$$

Où α_i est la polarisabilité ionique.

I.12.1.2.3 Polarisation dipolaire

Ce mécanisme a lieu à $f \leq 10^7$ Hz, elle provient des perturbations des dipôles ioniques ou moléculaires :

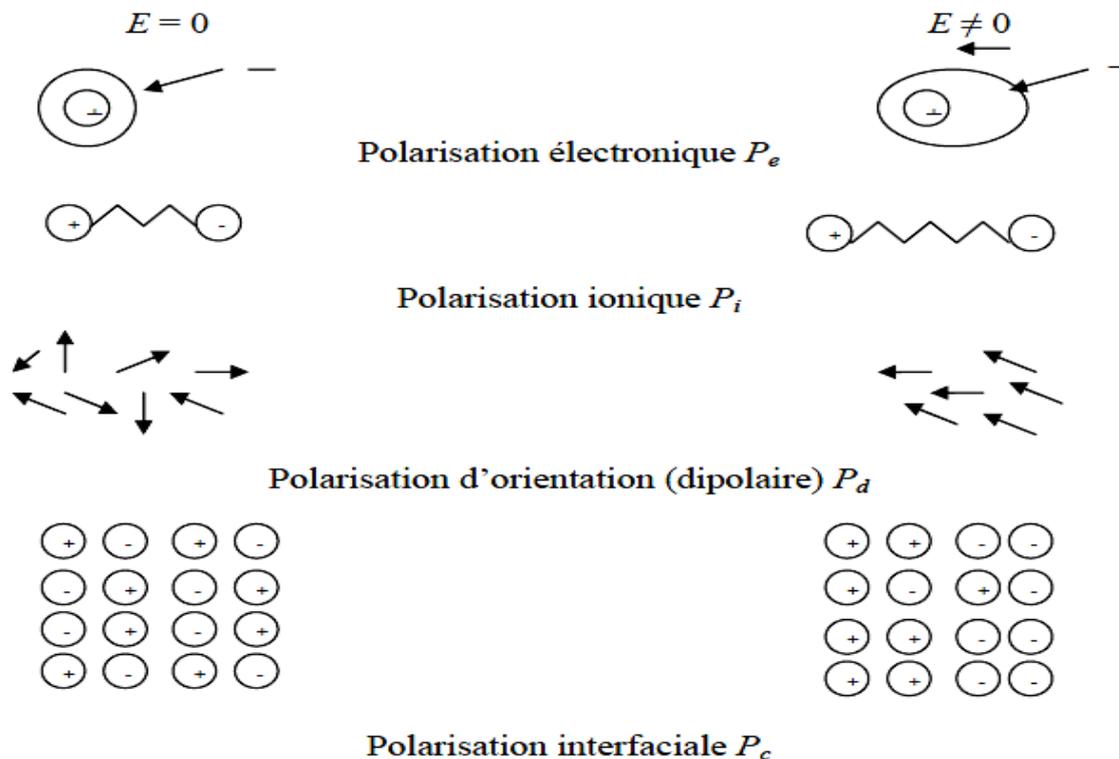
$$P_d = \alpha_d E \tag{1.17}$$

Où α_d est la polarisabilité dipolaire.

I.12.1.2.4 Polarisation interfaciale

Elle est due à l'accumulation des charges mobiles à la surface du matériau, car le mouvement de ces derniers est arrêté par des barrières physiques telles que l'interface et les joints de grains. Dans ce cas, le domaine de f se situe entre 10^{-3} et 10^3 Hz (ondes radio).

La figure I.9 schématise les 4 mécanismes de polarisation



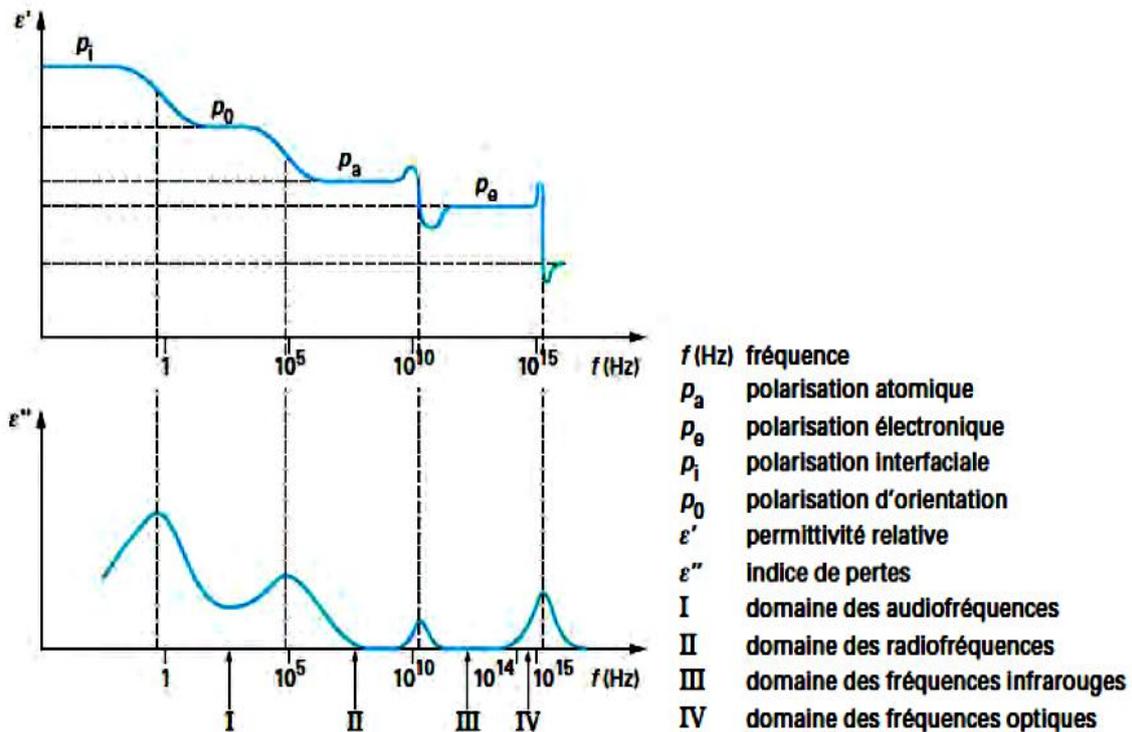


Figure I.9 : Signature diélectrique des différents types de polarisation en fonction de la fréquence. [42]

I.13 Phénomène de conduction de charges dans les polymères

Toute charge électrique entraînée dans un mouvement ordonné par un champ électrique constitue contribue à la conduction électrique. Les charges électriques susceptibles de donner ainsi naissance à un courant électrique sont des ions ou des électrons. [43]

I.14 La différence entre la polarisation et la conduction

Durant la polarisation, les charges sont mises en mouvement mais ne peuvent jamais quitter la molécule. Par contre, la conduction est le déplacement des charges sur de grandes distances, qui se libèrent et quittent les particules.

La conduction dans les diélectriques est pratiquement assurée par les impuretés se trouvant dans l'isolant et non pas due à sa structure de base. La polarisation peut donc être représentée comme un grand nombre de charges se déplaçant sur de très petites distances, sans jamais quitter les molécules. Tandis que la conduction dans les diélectriques comme le déplacement d'une petite quantité de charges mais sur de larges distances.

La polarisation peut être considérée comme un mouvement élastique. Quand l'effet du champ électrique externe disparaît. Les charges reviennent à leur position initiale, ce qui ne se passe jamais pour la conduction.

Tandis que la conduction se produit tant que la tension continue est appliquée, la polarisation ne se produit que lors de l'application ou de la suppression de la tension. La polarisation, et donc le courant capacitif, ne subsistent que lorsqu'il s'agit d'une tension alternative [44].

I.15 La relaxation

I.15.1 Définition

La relaxation peut se résumer par un phénomène général qui consiste en l'existence d'un délai de réponse pour un système soumis à une relaxation extérieure. Il y a relaxation diélectrique lorsqu'on supprime brusquement le champ électrique qui polarisait un matériau. Un temps, dit temps de relaxation, est nécessaire pour que le matériau retourne dans son état de désordre moléculaire de départ. Il est défini comme le temps nécessaire pour que la polarisation décroisse à $1/e$ de sa valeur initiale.

Une molécule dipolaire placée dans un champ alternatif peut effectuer un mouvement rotatoire. En réalité, ce phénomène s'accompagne du phénomène de relaxation. Il s'agit d'un déphasage entre les variations du champ et la rotation du dipôle. [45]

Le champ appliqué a pour équation :

$$E = E_0 e^{-j\omega t} \quad (1.18)$$

Où E_0 est l'amplitude du potentiel et ω la fréquence angulaire (exprimée en radian/seconde).

La polarisation qui résulte de ce champ, déphasée de δ par rapport à celui-ci, vaut :

$$P = P_0 e^{-j(\omega t - \delta)} \quad (1.19)$$

I.15.2 Origines de la relaxation diélectrique

Plusieurs mécanismes ont été reportés dans la littérature comme étant à l'origine du phénomène de relaxation diélectrique. Nous présentons ici quelques-uns qui seront rediscutés dans ce manuscrit [45].

- La conduction par saut
- La polarisation d'électrode
- Relaxation interfaciale.

I.15.3 Phénomène de la relaxation diélectrique dans les polymères

Dans les polymères, des écarts très significatifs par rapport à ces descriptions simplifiées doivent être pris en compte.

Dans les matériaux polymères, de nombreuses molécules de taille variée sont présents (CH_3 , $\text{C}=\text{O}$, chaînes, terminaisons de chaîne, etc). Elles possèdent un moment dipolaire et peuvent donc être à l'origine de phénomène de relaxation diélectrique. Les relaxations multiples observées lors d'une analyse en fréquence et/ou en température peuvent être corrélées avec les structures moléculaires selon lesquelles les polymères sont classés : amorphe, semi-cristallin et cristallin. Ces relaxations apparaissent sous la forme de pics dans les réseaux de courbes isofréquences ou isothermes caractérisant les pertes diélectriques du matériau. [42]

Généralement, les relaxations multiples sont désignées par les lettres α , β et γ pour les courbes iso fréquences dans le sens des températures décroissantes (figure I.10).

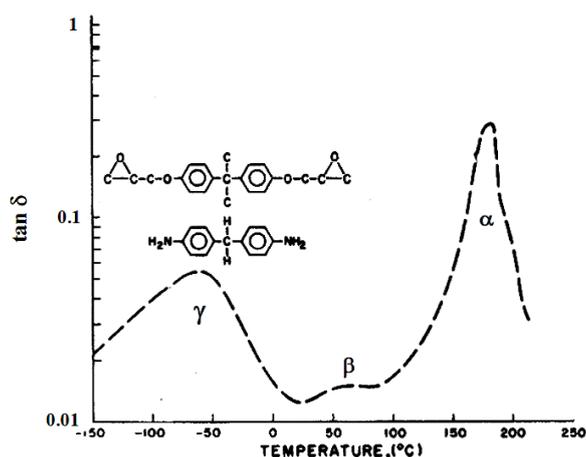


Figure I.10 : Relaxation diélectriques multiples dans un polymère en fonction de la température. [42]

I.15.3.1 Relaxation dans les polymères amorphes

Dans le cas des polymères amorphes le pic de relaxation α est associé à la transition vitreuse du matériau. Ce pic peut se trouver décalé par rapport à la température de transition vitreuse T_g selon la fréquence d'observation. Le pic de relaxation β est attribué à des mouvements locaux de segments de chaîne en particulier des chaînes dites « pendantes », des réarrangements conformationnels ou des rotations de groupements phényles. Les spectres de relaxation diélectrique permettent de déterminer des mouvements de chaîne en les comparant à différentes températures et différentes fréquences. Ils permettent aussi, dans certains cas, de

déterminer certaines caractéristiques telles que la température de transition vitreuse T_g [42-43].

I.15.3.2 Relaxation dans les polymères semi-cristallins

Les polymères semi-cristallins sont en général plus compliqués car les régions cristallines et amorphes participent aux phénomènes de relaxation. L'un des polymères semi-cristallins les plus étudiés est le polyéthylène (PE) pour son intérêt en tant qu'isolation électrique des câbles de transport d'énergie. Il existe principalement sous deux formes :

Le LDPE (Polyéthylène basse densité) et le HDPE (Polyéthylène haute densité) dont la cristallinité peut atteindre respectivement 60 % et 75 %. La figure.8 représente le facteur de pertes diélectriques en fonction de la température de ces deux formes de polyéthylène. Le pic α (haute température) est plus important dans le cas du HDPE et est attribué à la phase cristalline. Le second pic β est associé à la température de transition vitreuse T_g . Le pic γ est attribué aux mouvements de rotation de groupements chimiques de faible dimension dans la phase amorphe. [42]

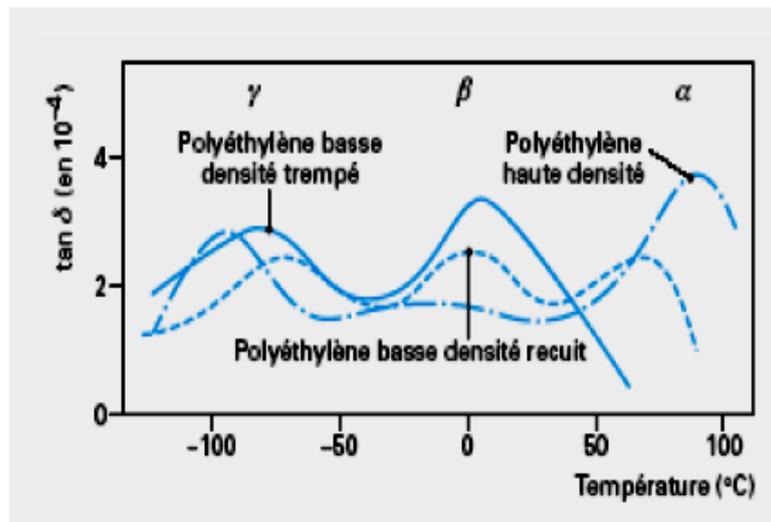


Figure I.11 : Evolution du facteur de pertes diélectriques du polyéthylène en fonction de la température à 10 KHz. [42]

I.16 Variation du temps de relaxation en fonction de la température

La dépendance en température des temps de relaxation est généralement étudiée par le biais du diagramme d'Arrhenius. Il est obtenu en traçant la variation de τ dans une échelle semi-logarithmique en fonction de l'inverse de la température ($\text{Log}(\tau) = f\left(\frac{1}{T}\right)$) [45].

I.17 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, comme une première partie un état de l'art des matériaux (polymères), en commençant par les différentes caractéristiques de ces derniers, ses différentes propriétés et ses différents types.

Par la suite, on a énuméré les différents problèmes rencontrés dans les diélectriques, où on s'est basé sur le vieillissement et ses multiples causes, le phénomène du claquage électrique. Il est l'un des plus importants soucis rencontré dans ces isolants puisque il cause à son tour un vieillissement prématuré. Le phénomène de relaxation, et ses conséquences sur l'isolant ont été décrits.

Finalement, une synthèse des matériaux utilisés en électrotechnique, particulièrement en réseaux électriques comme isolants, a été faite.

Chapitre II

*Etude du claquage électrique dans les
polymères*

II.1 Introduction

La fiabilité est le problème majeur lors du dimensionnement de l'isolation des dispositifs électriques. La rupture est un phénomène aléatoire : pour des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique du champ de rupture, mais une distribution de valeurs. Ce caractère statistique pourrait s'expliquer par l'existence d'hétérogénéités ou de défauts microscopiques locaux dans le matériau diélectrique. Il est donc nécessaire de tester un grand nombre d'échantillons identiques et de mener une analyse statistique sur la dispersion des champs de rupture afin d'en déduire éventuellement des lois de vieillissement. Une base théorique sur les statistiques de la rupture diélectrique a été rapportée dans la littérature. Le modèle le plus adapté est celui de Weibull [46].

II.2 Modèle statistique de Weibull

II.2.1 Bases du modèle

A l'origine, le modèle de Weibull a été établi en mécanique. Il est très utilisé dans l'étude de la rupture des matériaux solides. Il est basé sur le concept de la rupture d'une chaîne : si un maillon de cette chaîne se rompt, toute la chaîne est en panne [47].

La rupture d'une chaîne se produit au niveau de son maillon le plus faible. Ainsi la probabilité de rupture P_n d'une chaîne de n maillons s'exprime en fonction de la probabilité de rupture P d'un maillon de la façon suivante [48] :

$$P_n = P^n \quad (2.1)$$

Le modèle de Weibull se justifie : l'existence d'un défaut microscopique affecte la totalité du système d'isolation. C'est le cas d'un claquage qui prend naissance dans un petit volume d'un diélectrique qui provoque la rupture de toute l'enveloppe isolante. Le modèle est donné par l'expression suivante [49] :

$$P(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} \right)^\alpha \right] \quad X > X_0 \quad (2.2)$$

Avec :

$P(X)$: est la probabilité de rupture.

X : est la variable aléatoire.

X_0 : est le paramètre d'échelle.

X_s : est le paramètre de localisation.

α : est le paramètre de forme.

II.2.2 Signification des paramètres

II.2.2.1 Paramètre de localisation

La variable X_s apparaît comme un seuil en dessous duquel le vieillissement est considérablement freiné, c'est-à-dire $P(X < X_s) = 0$. La valeur du seuil est forcément inférieure à la plus faible valeur trouvée expérimentalement. La recherche du seuil peut se faire en utilisant la méthode des moindres carrés ou la méthode du maximum de vraisemblance [46]. La valeur du seuil dépend des défauts existants dans le matériau ou créés durant le vieillissement.

II.2.2.2 Paramètre de forme

C'est un nombre sans dimension. Il représente la pente de la caractéristique du modèle de Weibull dans sa représentation linéaire. Par conséquent, il est l'image de la dispersion de la variable aléatoire [1-5]. Plus α est grand, moins les valeurs sont dispersées [50-51].

Si $\alpha < 1$, la probabilité décroît avec le temps d'application de la contrainte. Ceci correspond à une mortalité infantile des échantillons : "défauts de jeunesse".

Si $\alpha = 1$, dans ce cas la probabilité de claquage dépend du temps d'application de la contrainte et la loi de Weibull est équivalente à une loi exponentielle.

Si $\alpha > 1$, la probabilité de claquage augmente avec le temps, ceci correspond à un vieillissement.

II.2.2.3 Paramètre d'échelle

C'est la valeur centrale caractéristique de la distribution de la population à étudier. Il est donné dans le formalisme de Weibull :

$$P(x) = 1 - \exp \left[-k \left(\frac{X}{X_0} \right)^\alpha \right] \quad (2.3)$$

Pour caractériser le paramètre d'échelle X_0 , on recherche le maximum de la densité de probabilité $F(X)$:

$$F(X) = \frac{dP(X)}{dX}$$

En posant $X_0 = k^{1/\alpha} \cdot X_0'$, on a :

$$P(X) = 1 - \exp \left(\frac{X^\alpha}{X_0'^\alpha} \right) \quad (2.4)$$

Le maximum de la densité s'obtient en annulant la dérivée de $F(X)$:

$$F(X) = \frac{dP(X)}{dX} = \frac{\alpha X^{\alpha-1}}{X_0^\alpha} \exp\left[-\frac{X^\alpha}{X_0^\alpha}\right]$$

$$\frac{dF(X)}{dX} = \frac{d^2P(X)}{dX^2} = 0$$

$$\frac{d^2P(X)}{dX^2} = \left[\left(\frac{\alpha(\alpha-1)X^{\alpha-2}}{X_0^\alpha} \right) - \left(\frac{\alpha X^{\alpha-1}}{X_0^\alpha} \right)^2 \right] \exp\left[-\frac{X^\alpha}{X_0^\alpha}\right] = 0$$

$$\frac{\alpha(\alpha-1)X^{\alpha-2}}{X_0^\alpha} = \frac{\alpha^2 X^{2\alpha-2}}{X_0^{2\alpha}} \Rightarrow X^\alpha = \frac{\alpha-1}{\alpha} X_0^\alpha$$

D'où :

$$\frac{X}{X_0} = \left(\frac{\alpha-1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2.5)$$

Lorsque $\alpha \rightarrow +\infty$ on a $\lim\left(\frac{X}{X_0}\right) \rightarrow 1$ donc X_0 correspond au maximum de la densité de probabilité. Pour déterminer la valeur de X_0 , on considère l'expression (2.3) sous sa forme linéaire :

$$P(X) = 1 - \exp\left(-\frac{X^\alpha}{X_0^\alpha}\right)$$

$$\text{LogLn} \frac{1}{1-P(X)} = \alpha \text{Log} X + -\alpha \text{Log} X_0$$

Pour $X = X_0$ on aura :

$$\text{LogLn} \frac{1}{1-P(X)} = 0$$

$$\text{D'où : } P = 1 - \frac{1}{e} = 0,632 \quad \Rightarrow \quad P = 63,2\%$$

Dans le contexte expérimental, ces paramètres ont la signification suivante :

Pour les essais sous champ constant, $X_0 = t_0$ est la valeur nominale du temps de rupture.

Pour les essais sous rampe de tension, $X_0 = E_0$ est la valeur nominale du champ de rupture.

II.2.3 Diagramme de Weibull

Théoriquement, il n'existe pas de méthode précise d'estimation des paramètres d'échelle ($X_0 = E_0$) et du paramètre de forme α de la distribution de Weibull. Cependant, certaines méthodes empiriques d'estimation sont utilisées. La méthode graphique est une méthode simple qui permet de vérifier rapidement si la distribution de Weibull est bien adéquate. Cette méthode consiste à classer les valeurs de X_i , $i = 1, 2, \dots, N$ (N étant le nombre total

d'échantillons testés) par ordre croissant. On attribue aux valeurs de X_i la probabilité de rupture P_i donnée par la méthode des rangs moyens. Pour N grand on a [48] :

$$P(i, N) = \frac{i}{N+1} \quad (2.6)$$

Avec :

i : Rang des valeurs de X_i après classement par ordre croissant

N : Nombre d'échantillons testés.

Les résultats sont présentés dans un système d'axes, donnant $\text{Log ln}\left(\frac{1}{1-P}\right)$ en fonction de $\text{Log}X$. Le graphe est une droite de pente α . Le lissage des points expérimentaux peut se faire par des polynômes de degrés 1, 2, ou 3 [52].

II.3 Application du modèle de Weibull a l'étude de la rupture diélectrique des isolants solides

L'application du modèle statistique de Weibull à la caractérisation des isolants solides repose sur deux hypothèses [46] :

- ✓ Le claquage d'un isolant de volume donné est un phénomène caractérisé par une variable aléatoire à deux dimensions dont l'une est le temps t séparant l'instant d'application de la contrainte de celui où s'est produit la rupture et l'autre est l'amplitude E du champ qui a provoqué ce claquage.
- ✓ Le claquage se produit au niveau d'un tout petit volume du diélectrique. Ce phénomène, qui est d'ordre microscopique, entraîne la dégradation de tout le système isolant sur toute son épaisseur.

Nous distinguons deux types d'essais lors de la caractérisation de la tenue diélectrique des isolants solides [53] :

II.3.1 Essais à long terme dits statiques

Dans ce cas nous relevons le temps de rupture t , qui est une variable aléatoire, de l'échantillon soumis à un champ électrique E constant. La probabilité de rupture d'une éprouvette i au temps t_i soumis à un champ électrique E_i est donnée par la relation :

$$P(t_i, E_i) = 1 - \exp\left[-K \int_0^{t_i} t^{a-1} E(t)^b dt\right] \quad (2.7)$$

Avec :

K , a et b sont des constantes caractérisant de l'isolant.

Pour un champ E constant (2.7) devient :

$$P(t) = 1 - \exp(-K_1 t^a) \quad (2.8)$$

$$\text{Avec : } K_1 = K \frac{E^b}{a}$$

II.3.2 Essais à court terme dits dynamiques

Dans ce cas, les échantillons sont soumis à une vitesse de montée de la rampe de tension constante. On a :

$$E = Vt \quad (2.9)$$

Avec :

V est la vitesse de montée de la rampe de tension ;

t est le temps au bout duquel se produit le claquage.

En remplaçant $t = \frac{E}{v}$ dans l'expression (2.6), on aura :

$$P(E_i) = 1 - \exp \left[-K \int_0^{E_i} \left(\frac{E}{v} \right)^{a-1} E^b \frac{dE}{v} \right] \quad (2.10)$$

En posant :

$$\alpha = a + b$$

$$K_2 = \frac{K}{\alpha v^a}$$

On aura :

$$P(E) = 1 - \exp(-k_2 E^\alpha) \quad (2.11)$$

D'après (2.10) et (2.11), les deux expressions ont la même forme. Dans le cas général où la variable aléatoire est $X \leq X_s$ nous aurons :

$$P(X) = 1 - \exp(-K X^\alpha) \quad (2.12)$$

On déduit:

$$\text{LogLn} \frac{1}{1 - P(X)} = \alpha \text{Log} X + \text{Log} K \quad (2.13)$$

L'expression (2.13) est une relation linéaire entre $\text{Log Ln} \frac{1}{1 - P(X)}$ et $\text{Log} X$ qui peut être représentée par une droite de pente α .

II.4 Avantages de la loi de Weibull

Après une comparaison entre la loi de Weibull et la loi log-normale, Oudin et Reyrolle [51] ont montré que pour des probabilités faibles, l'hypothèse de la loi de Weibull correspond à des probabilités plus fortes et par conséquent plus pessimiste que l'hypothèse Laplacienne. On peut considérer que cette prévision pessimiste apporte plus de sécurité. Le modèle de Weibull permet de retrouver la durée de vie donnée par le modèle de puissance inverse.

II.5 Préparation des échantillons

II.5.1 Préparation des films PVC

La préparation des films de PVC s'est déroulée dans le laboratoire de l'unité de calandrage de l'usine de CALPLAST à la zone industrielle de Sétif. Le PVC utilisée pour ces films sous forme de poudre blanche de type (4000M) possède les caractéristiques suivantes :

- La viscosité inhérente 0.903.
- Le pourcentage des volatiles est de 12 ± 1 %.
- La valeur K est égale à 65

Mais pour que le PVC soit utilisable dans l'isolation des câbles il lui faut des adjuvants avec certains poids spécifiques. Pour se faire, pour **100 g** de PVC pure on ajoute :

- **33g** de DOP (Di-Octyle Phatalate) qui est un plastifiant d'une structure cristalline dont la formule chimique est la suivante $C_{24}H_{33}O_4$.
- **2.5g** de l'alliage Baryum-Zinc. C'est un stabilisant complexe avec une bonne stabilité thermique.
- **0.25g** de lubrifiant (Acide stéarique).

On mélange tous ces composants et on obtient une masse de 135.75g, qui représente 100% de PVC.

Pour obtenir les films désirés à notre expérience, on a ajouté différents pourcentages de $BaTiO_3$ comme le montre la relation suivante :

$$\begin{array}{l}
 100(\%) \longrightarrow 135.75 \text{ (g)} \\
 Y (\%) \longrightarrow X(\text{g})
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} 100(\%) \longrightarrow 135.75 \text{ (g)} \\ Y (\%) \longrightarrow X(\text{g}) \end{array}} \right\} \Longrightarrow X(\text{g}) = \frac{Y \times 135.75}{100} \quad (2.14)$$

Tel que :

Y (%) est le pourcentage de $BaTiO_3$ à ajouter.

X(g) est le poids de $BaTiO_3$ à ajouter.

- ❖ 100% de PVC et 0% de BaTiO₃ ce qui correspond a 135.75g de PVC et 0g de BaTiO₃.
- ❖ 95% de PVC et 5% de BaTiO₃ ce qui correspond a 128.97g de PVC et 6.78g de BaTiO₃.
- ❖ 90% de PVC et 10% de BaTiO₃ ce qui correspond a 122.18g de PVC et 13.57g de BaTiO₃.

Ces trois mélanges seront préparés à l'aide d'un mélangeur à deux cylindres tournant à une température de 160°C pendant une durée à peu près de 10 minutes.



Figure II.1 : Mélangeur a 2 cylindres (Rodolfo Comercio) 1977.

A la fin de cette opération on obtient des films d'une épaisseur de 0.3mm. La couleur blanche des films est due à la couleur du BaTiO₃, sinon la couleur des films du PVC vierge est transparente.



Figure II.2 : Films de PVC vierge et avec BaTiO₃

Ces films seront découpés sous forme de plaque de dimensions $(19 \times 35) \text{ cm}^2$.

II.5.2 Dispositif expérimental

Les essais expérimentaux sur les films de PVC ont été réalisés au laboratoire de génie électrique de Bejaia (LGEB), Selon la norme CEI 60243-1 Rigidité diélectrique des matériaux isolants.

II.5.2.1 Mesure de la rigidité diélectrique

Pour la mesure de la tension de claquage nous avons utilisé un dispositif comprenant les éléments suivants (figure II.3) :

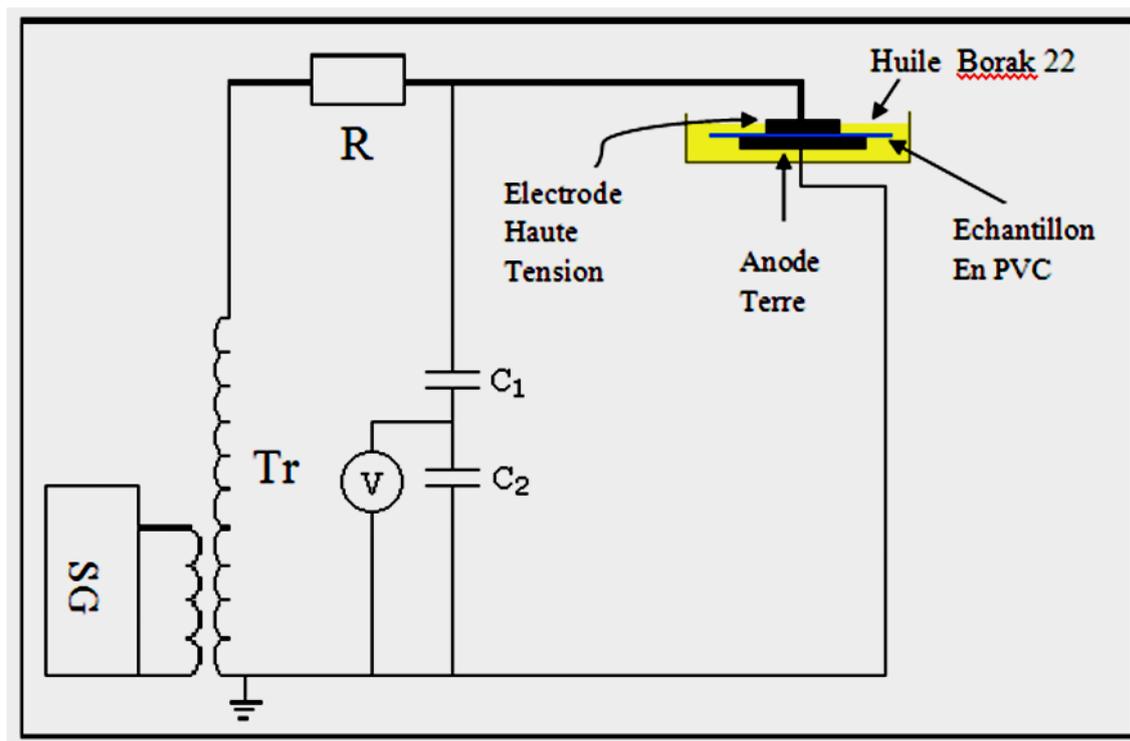


Figure II.3 : Schéma du dispositif des essais électriques.

- Un générateur de haute tension pouvant délivrer une tension allant jusqu'à 100 kV alternative de fréquence 50 Hz, avec plusieurs vitesses de montée de la rampe.
- Un transformateur HT (100) pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV pour des essais en continu.
- Un diviseur de tension capacitif ($C_0 = 0,1 \mu\text{F}$ et $C_u = 41,4 \mu\text{F}$).

- Un voltmètre de crête (U_{cr}) AC/DC MU11, à affichage digital permettant la mesure, selon le montage électrique, des hautes tensions alternatives, ou continues.
- Une résistance de protection $R = 106 \text{ k}\Omega$ limitant le courant.
- Un bâti servant l'ensemble d'électrodes (figure II.4).
- Une cage de protection.

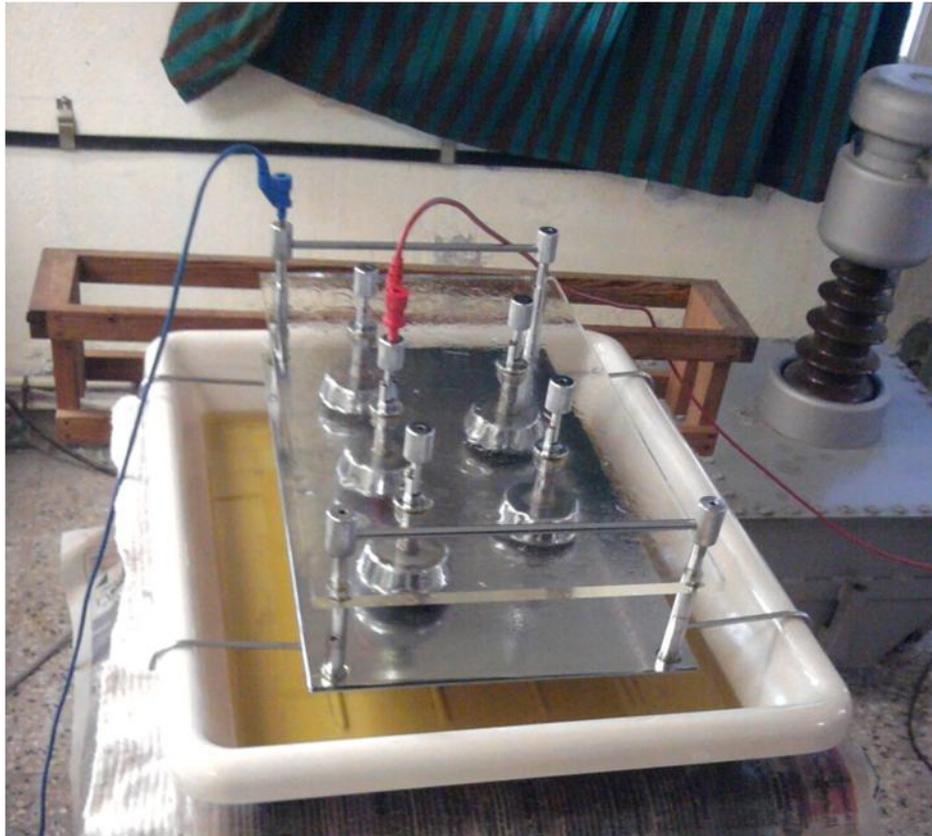


Figure II.4 : Un bâti servant l'ensemble d'électrodes.

II.6 Partie expérimentale

L'essai expérimental sur les films de PVC c'est déroulé dans le laboratoire de Haute Tension, Université de Bejaia. Nous nous intéressons dans ce travail à l'essai à court terme.

II.6.1 Essais à court terme

Les essais consistent à tremper l'échantillon dans de l'huile minérale Borak 22 (Tension de claquage $>70 \text{ KV}$) pour éviter le contournement. L'échantillon considéré est soumis à une tension de vitesse de montée constante jusqu'au claquage (figure II.4). Après la rupture, nous relevons la valeur de la tension, les essais ont été effectuées aux différentes vitesses de rampe

de tension suivantes : 0,78; 1,29; 2,54; 3,29; 4,37 et 4,75 kV/s. Pour chaque vitesse en effectue 25 essais.

II.6.2 Résultats obtenus

Tous les résultats sont en fonction de la vitesse de tension de claquage.

Tableau II.1 : La tension moyenne de claquage on fonction de la vitesse de rampe

| Vitesse (KV/s) | Tension moyenne de claquage (KV) | | |
|----------------|----------------------------------|---------------|----------------|
| | PVC Pure | PVC+5% BaTiO3 | PVC+10% BaTiO3 |
| 0,78 | 15,742 | 27,794 | 40,046 |
| 1,29 | 18,3 | 29,516 | 41,447 |
| 2,54 | 18,934 | 32,082 | 40,026 |
| 3,29 | 22,8 | 38,592 | 44,738 |
| 4,37 | 24,4 | 44,752 | 45,978 |
| 4,75 | 24,686 | 45,858 | 50,678 |

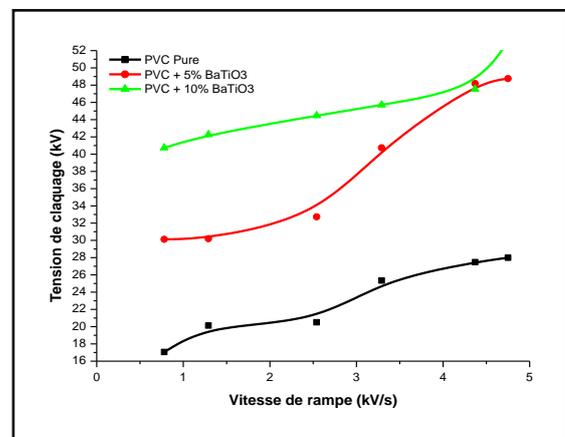
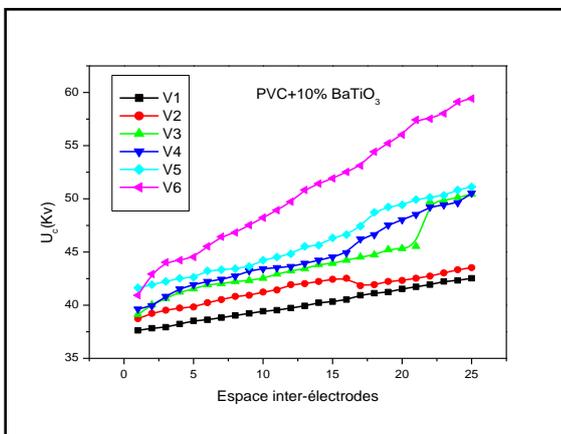
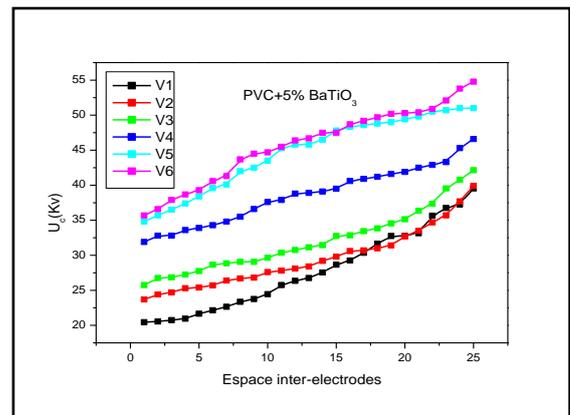
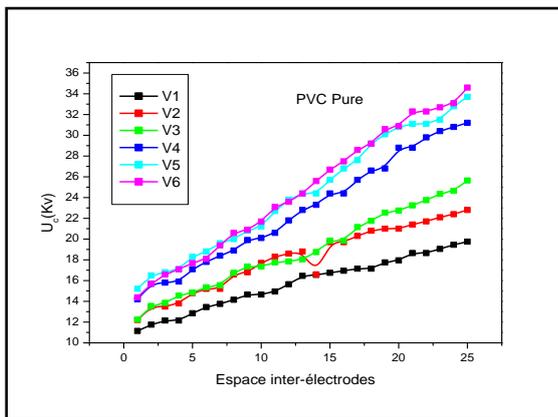


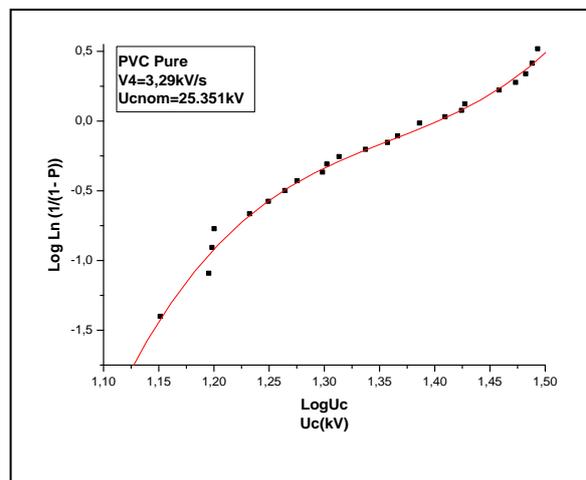
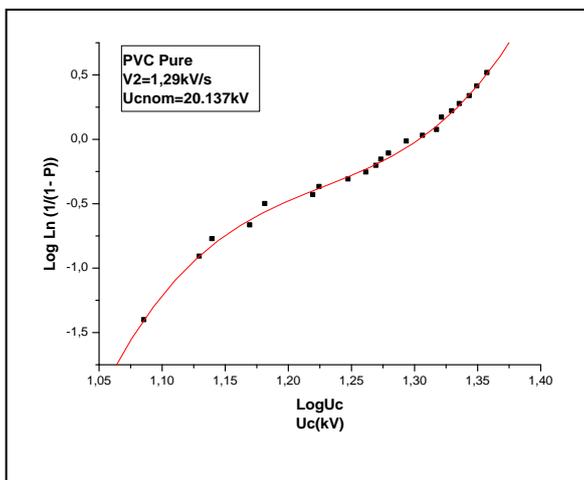
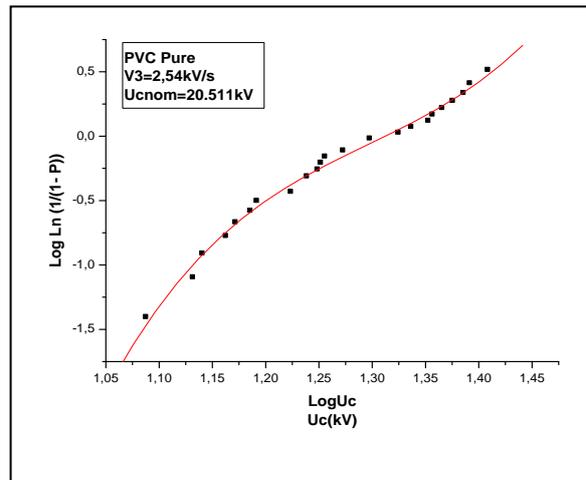
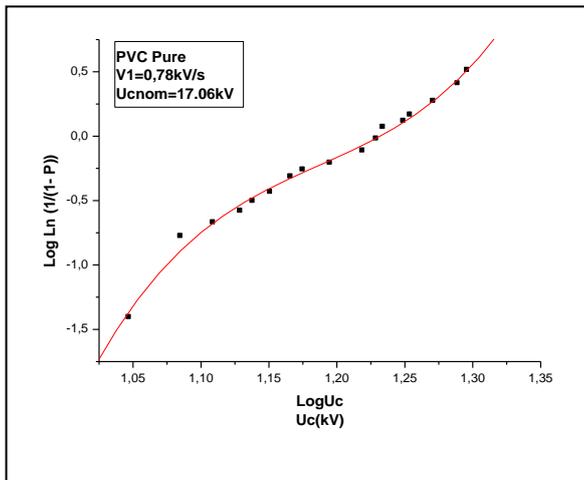
Figure II.5 : Tension de claquage pour les 25 essais effectués et pour les différentes vitesses de rampe de tension alternative.

II.6.2.1 Etude de la distribution statistique des tensions de claquage

Une analyse statistique des valeurs de claquage à été faite en utilisant le modèle de Weibull. La méthodologie de calcul à été décrite auparavant. On a obtenu les courbes suivantes :

II.6.2.1.1 PVC Pure

Nous présentons dans cette section le diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage du PVC. Les essais ont été effectués avec les vitesses suivantes de la rampe de 0,78; 1,29; 2,54; 3,29; 4,37 et 4,75 kV/s.



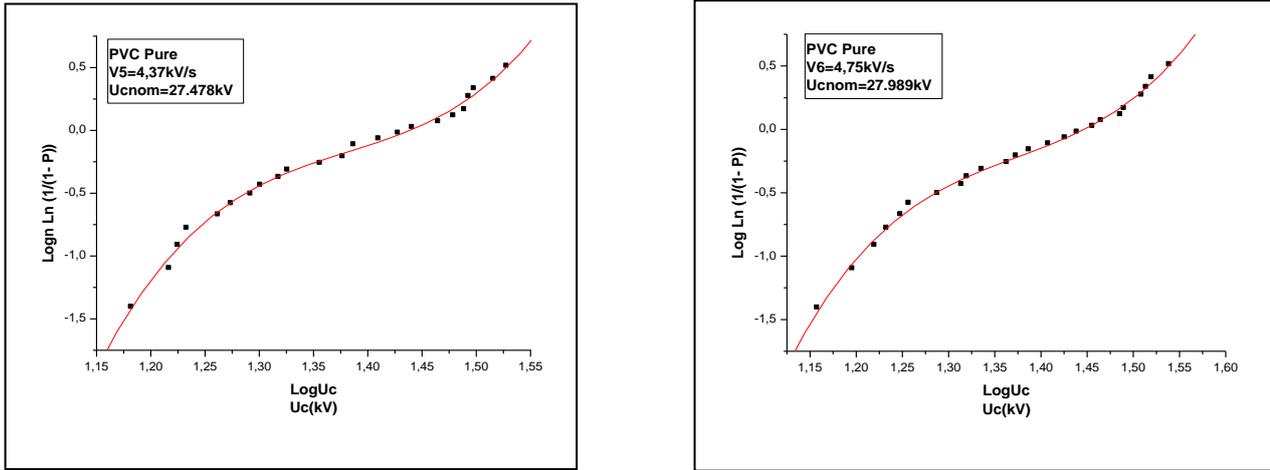
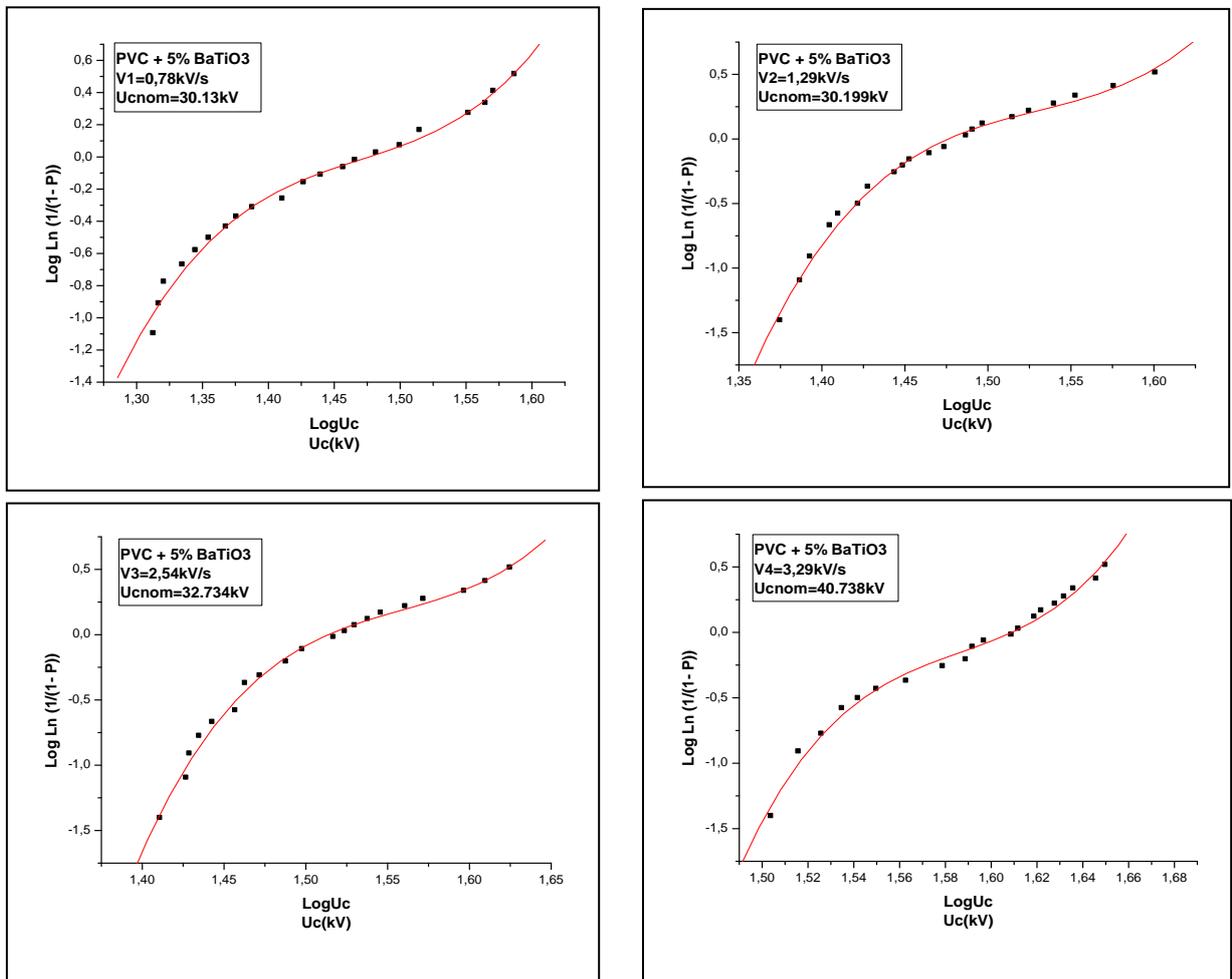


Figure II.6 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage du PVC pure

II.6.2.1.2 PVC + 5% BaTiO₃

Nous présentons dans cette section le diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage du PVC dopé à 5% en poids de BaTiO₃. Les essais ont été effectués avec les vitesses suivantes de la rampe de 0,78; 1,29; 2,54; 3,29; 4,37 et 4,75 kV/s



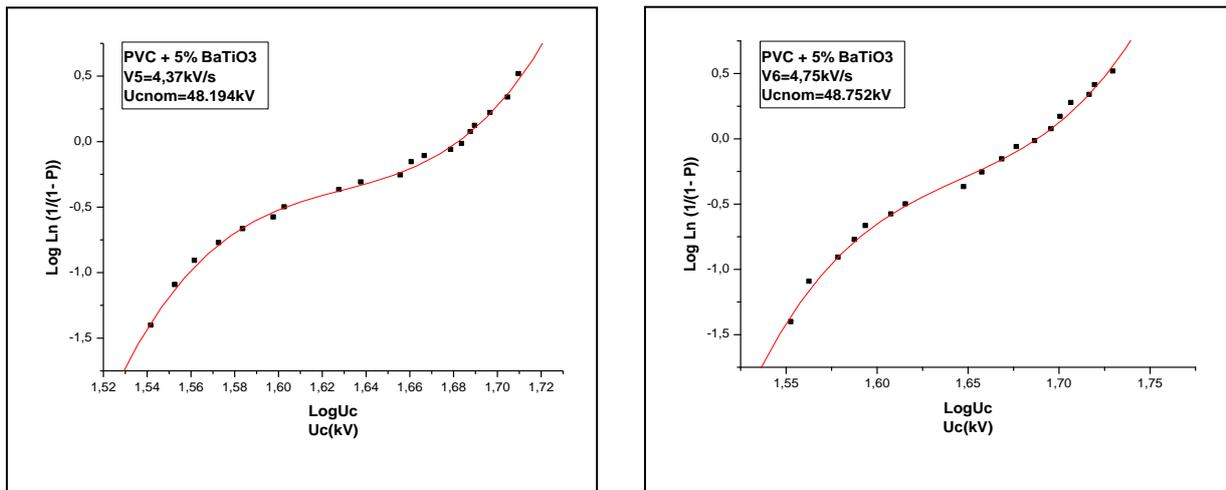
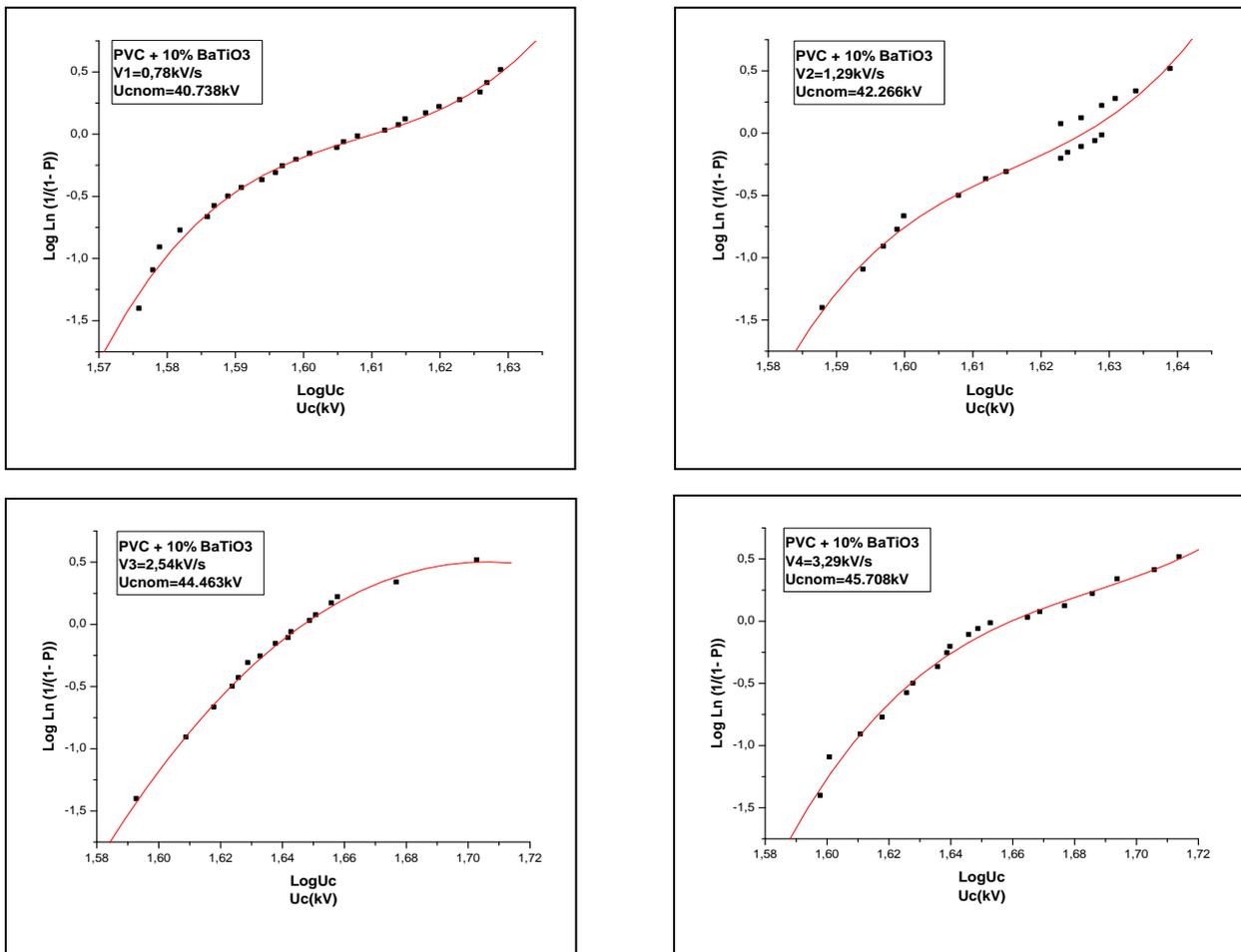


Figure II.7 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage du PVC + 5% de BaTiO₃

II.6.2.1.3 PVC + 10% BaTiO₃

Nous présentons dans cette section le diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage du PVC dopé à 10% en poids de BaTiO₃. Les essais ont été effectués avec les vitesses suivantes de la rampe de 0,78; 1,29; 2,54; 3,29; 4,37 et 4,75 kV/s.



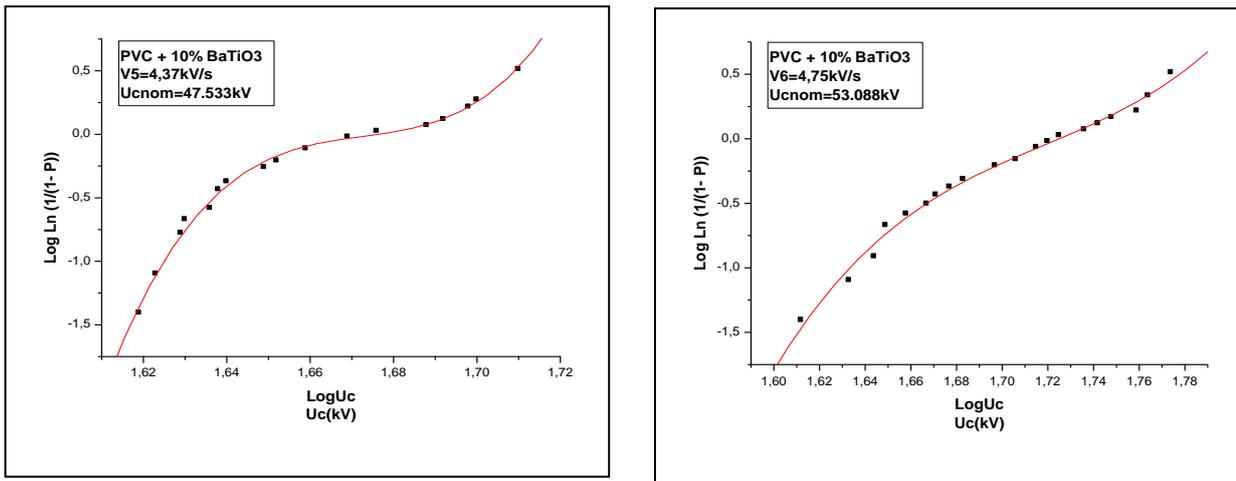


Figure II.8 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage pour PVC à 10% de BaTiO₃

II.6.2.2 Influence de la vitesse de montée de la rampe de tension sur la tension nominale de claquage

Compte tenu des résultats de l'analyse statistique, nous avons étudié l'évolution de la tension nominale de claquage qui correspond à une probabilité de 63.2%, en fonction de la vitesse de montée de la rampe (figure II.9). Le tableau II.2 donne la tension nominale de claquage en fonction de la vitesse de la rampe.

Tableau II.2 : La tension nominale de claquage en fonction de la vitesse de rampe

| Vitesse (KV/s) | Tension de claquage nominale (KV) | | |
|----------------|-----------------------------------|---------------|----------------|
| | PVC Pure | PVC+5% BaTiO3 | PVC+10% BaTiO3 |
| 0,78 | 17,06 | 30,13 | 40,738 |
| 1,29 | 20,137 | 30,199 | 42,266 |
| 2,54 | 20,511 | 32,734 | 44,463 |
| 3,29 | 25,351 | 40,738 | 45,708 |
| 4,37 | 27,478 | 48,194 | 47,533 |
| 4,75 | 27,989 | 48,752 | 53,088 |

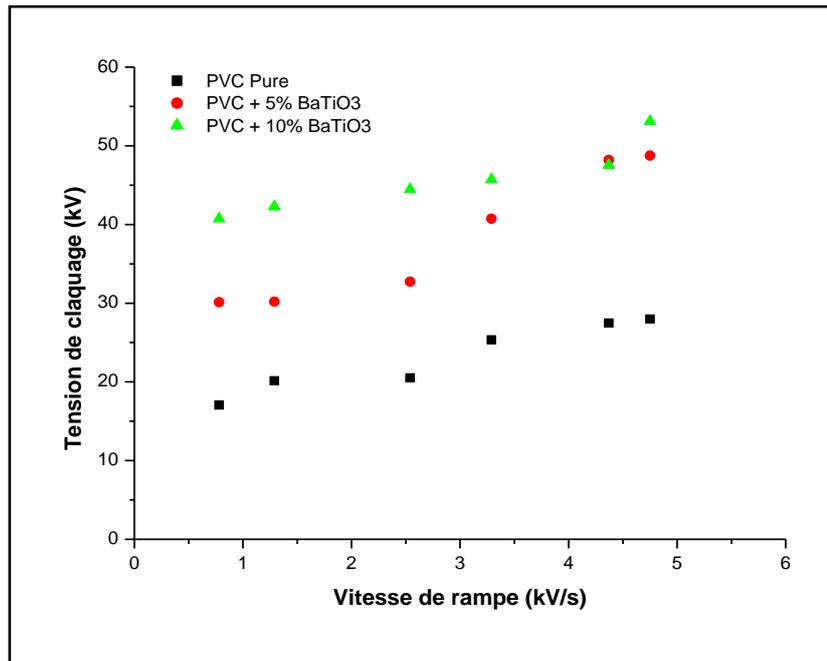


Figure II.9 : Vitesse de la tension en fonction de la vitesse de montée de la rampe de tension.

II.6.3 Interprétation des résultats

Nous constatons qu'à faible vitesse, la tension de claquage croît d'abord linéairement. Au-delà de la vitesse 2,54 kV/s, la tension de claquage, comme on pourrait le prévoir, tend vers une certaine saturation. Ainsi, Les tensions de claquage augmentent avec l'augmentation des vitesses de rampe : entre la vitesse 0,78kV et la vitesse 4,75 kV il y a plus de 10 kV de différence. L'effet du dopant BaTiO₃ est clair, plus le taux de dopage croît plus la tension de claquage augmente. Dans le cas par exemple de l'échantillon de PVC dopé à 10% de BaTiO₃, la tension de claquage est le double de celle du PVC pure. Les tensions de claquage nominales calculées par la méthode de Weibull sont grandes par rapport aux tensions de claquage calculé par la méthode de la moyenne. Il y a une différence de 2 à 3 kV.

Dans la perspective de l'existence du temps de conditionnement au cours duquel s'opère l'accumulation de défauts et charges provoquant la rupture, il apparaît que la vitesse de montée de la rampe de tension appliquée à l'isolant joue un rôle important. On peut s'accorder, a priori, que l'accroissement de la raideur de la rampe, en réduisant le délai laissé à l'incubation, augmente l'amplitude du champ de rupture du moins tant quand on n'atteint pas le claquage dit intrinsèque du matériau. On tend progressivement vers un claquage intrinsèque. On peut dire, en simplifiant, qu'il s'agit d'une illustration de l'action combinée du champ et du temps, c'est-à-dire de l'amplitude et de la durée de la contrainte. On note que

la tension normale de rupture tend, vers une certaine saturation qui correspond à des vitesses sensiblement plus élevées, probablement en raison du plus grand nombre de défauts dans le matériau ainsi que leur nature. On peut penser que la tension de claquage est très liée à la structure du matériau et à un des ses défauts intrinsèques.

- Quand on augmente la dose de BaTiO₃ dans les échantillons de PVC, nous avons amélioré la rigidité diélectrique du matériau PVC.
- Leur résistivité augmente à cause de sa résistance très élevée.
- La constante diélectrique ϵ_r' augmente (Tableau II.3). Il peut être expliqué par le réarrangement de la structure moléculaire.
- Le facteur de perte $\text{tg}\delta$ diminue. Il peut s'expliquer par la diminution de la viscosité du polymère, donc à une grande mobilité des porteurs de charges ce qui donne le chemin à la polarisation dipolaire ou d'orientation.
- l'indice de perte ϵ_r'' diminue. L'ajout de BaTiO₃ réduit les pertes dans les polymères.
- Les tensions de claquage nominales calculées par la méthode de Weibull sont plus précises pourtant le claquage est un phénomène aléatoire qui se caractérise par des variables aléatoires. Toutes les probabilités de rupture ont été prises en considération pour chaque essai.

Tableau II.3 : L'effet de BaTiO₃ sur les propriétés diélectriques du PVC

| Fréquence 50 Hz | PVC Pure | PVC+5% BaTiO ₃ | PVC+10% BaTiO ₃ |
|----------------------|----------|---------------------------|----------------------------|
| ϵ_r' (F/m) | 3.31 | 4,3 | 5.4 |
| ϵ_r'' (F/m) | 0,283 | 0,178 | 0,115 |
| Tg δ | 0,085 | 0,041 | 0,021 |

II.7 Conclusion

La procédure expérimentale d'élaboration des échantillons est exposée. Trois échantillons de PVC dopés respectivement de 0%, 5% et 10% en poids de BaTiO₃ ont été élaborés en plus d'un échantillon témoin de PVC pure. Le générateur, haute tension de teste des tensions de claquage, utilisé, a été décrit. Les essais de vieillissement électrique des échantillons réalisés ont été effectués à différentes vitesses de la rampe. Vingt cinq mesures ont été réalisées pour chaque vitesse de rampe. La mesure de la rigidité diélectriques des trois

échantillons pure, dopés à 5% et 10% en poids de BaTiO₃ a été mesurée. La méthode statistique de Weibull a été exposée et appliquée à notre étude. Les résultats obtenus sont très proche de la tension de claquage réelle. L'augmentation de la vitesse de la rampe diminue la vitesse du vieillissement électrique ce qui prolonge, par conséquent, la durée de vie de l'isolant. L'effet du dopant BaTiO₃ sur le vieillissement électrique a été caractérisé par l'augmentation de la tension de claquage avec le taux de BaTiO₃ améliorant en conséquence la durée de vie de l'isolant.

Chapitre III

*Etude du phénomène de relaxation dans
les polymères*

III.1 Introduction

Malgré les différents avantages qu'offre l'utilisation des matériaux diélectriques (à base de polymères) dans l'isolation électrique, l'expérience montre que pour de nombreuses raisons ces isolants ont des défaillances qu'ils soient utilisés sous champs continus ou alternatifs. C'est dans le but d'améliorer leur fiabilité qu'un nombre important de travaux ont été entrepris dans les laboratoires de recherches. Ces travaux ont pour but de comprendre les défaillances en prenant en compte les contraintes d'utilisation, mais aussi d'améliorer les paramètres de mise en œuvre [2]

Dans ce chapitre nous présentons les différentes techniques utilisées, pour la mesure, l'analyse et la caractérisation de nos échantillons.

III.2 Techniques de mesure

III.2.1 Analyseur d'impédance

Pour effectuer les mesures des paramètres diélectriques d'un matériau, l'échantillon est inséré entre deux électrodes planes en cuivre connectés à l'analyseur d'impédance (principe d'un condensateur). Ce qui permettait d'éviter l'effet de la conduction surfacique. Le potentiel appliqué était de 2V. La capacité (C_P) et le facteur de dissipation (D) étaient mesurés dans une gamme de fréquences 20Hz-1MHz. L'analyseur d'impédance de précision permet de fournir des mesures précises effectuées sur un matériau dont la fréquence de travail peut atteindre 1MHz. La précision de mesure est de $\pm 0.05\%$.

L'analyseur d'impédance donne ainsi la possibilité de mesurer beaucoup d'autre paramètres, qui sont des éléments de base des différents circuits électriques, dont leur domaine reste très vaste (électronique, électrotechnique, chimie,...etc). Les éléments à mesurer sont les suivants : la capacitance (C), l'inductance (L), la résistance (R), la réactance (X), la conductance (G), la susceptance (B), Le facteur de qualité (Q), l'impédance (Z), l'admittance (Y) et l'angle de Phase (δ).

La précision et la variété de manipulation possible font de l'analyseur un instrument de choix idéal pour beaucoup de tâches différentes et applications y compris la conception de composant passif, la caractérisation matérielle diélectrique et le test industriel.

III.2.2 Méthode FTIR

L'infrarouge est le domaine classique d'étude des molécules organiques donnant des informations sur les groupements fonctionnels présents dans une molécule. Les modes de vibration d'un groupement chimique dépendent fortement du reste de la molécule; chaque

molécule produit un spectre d'absorption que lui est caractéristique [54]. Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchiée ou transmise.

Le domaine infrarouge entre 4000 cm^{-1} et 400 cm^{-1} ($2.5\text{--}25\mu\text{m}$) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules.

Toutes les vibrations ne donnent pas lieu à une absorption, cela va dépendre aussi de la géométrie de la molécule et en particulier de sa symétrie. Pour une géométrie donnée on peut déterminer les modes de vibration actifs en infrarouge grâce à la théorie des groupes. La position de ces bandes d'absorption va dépendre en particulier de la différence d'électronégativité des atomes et de leur masse.

Par conséquent à un matériau de composition chimique et de structure donnée va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier le matériau.

L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde que le matériau absorbe et les intensités de l'absorption. La figure III.1 décrit le schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier.

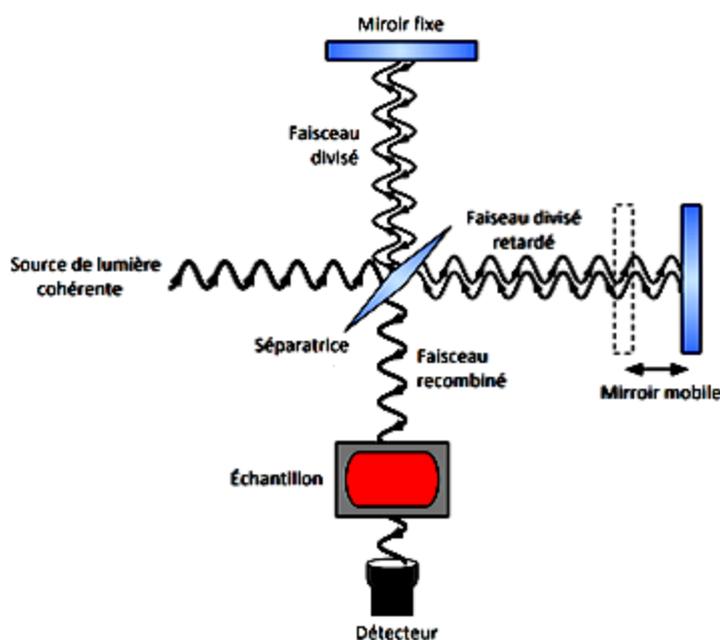


Figure III.1 : Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier. [54]

Le faisceau infrarouge provenant de la source A est dirigé vers l'interféromètre de Michelson qui va moduler chaque longueur d'onde du faisceau à une fréquence différente. Dans

l'interféromètre le faisceau lumineux arrive sur la séparatrice. La moitié du faisceau est alors dirigée sur le miroir fixe, le reste passe à travers la séparatrice et est dirigé sur le miroir mobile. Quand les deux faisceaux se recombinaient, des interférences destructives ou constructives apparaissent en fonction de la position du miroir mobile. Le faisceau modulé est alors réfléchi des deux miroirs vers l'échantillon, où des absorptions interviennent. Le faisceau arrive ensuite sur le détecteur pour être transformé en signal électrique.

Le signal du détecteur apparaît comme un interférogramme (Figure III.2), c'est à dire une signature de l'intensité en fonction de la position du miroir. L'interférogramme est la somme de toutes les fréquences du faisceau.

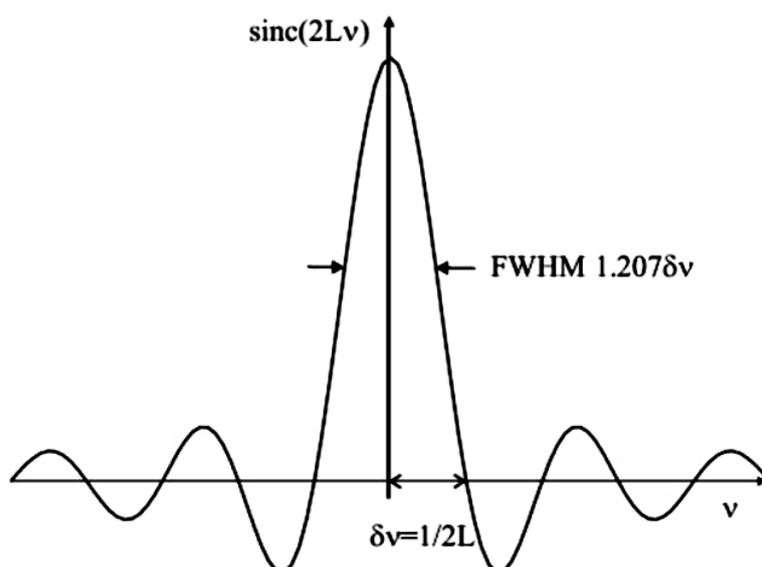


Figure III.2 : Interférogramme à la sortie du détecteur [55].

Cet interférogramme est ensuite converti en un spectre infrarouge par une opération mathématique basée sur la transformée de Fourier. Le domaine qui représente le plus grand intérêt est très limité et s'étend de 4000 à 660cm^{-1} . Les molécules absorbent l'énergie de ces radiations en modifiant leurs énergies de vibration [55].

L'absorption de l'infrarouge s'observe pour des complexes métalliques liés par covalence qui sont généralement actifs dans la région infrarouge de grande longueur d'ondes.

Les analyses FT-IR des échantillons est effectués par un dispositif de type JASCO FT/IR4200, avec la gamme de fréquences de 600 à 4000cm^{-1} et à $0,5\text{cm}^{-1}$ comme résolution maximale.

III.2.3 Microscopie électronique à balayage (MEB)

C'est une technique basée sur la détection des électrons secondaires collectés après bombardement de l'échantillon. Elle permet d'obtenir une image à haute résolution et à grande profondeur de champ. La microscopie électronique à balayage apporte des informations sur la forme et la taille des grains. Cette technique permet d'estimer la distribution granulométrique, la taille moyenne des grains après le frittage et d'évaluer qualitativement la présence de porosité. Les micrographies sont réalisées à l'aide d'un Microscope Electronique à Balayage du type (MEB, JEOL JSM modèle 7001F).

La figure III.3 est une coupe schématique d'un microscope électronique à balayage. L'ensemble des éléments permettant d'obtenir un faisceau d'électrons focalisé au niveau de l'échantillon constitue la colonne électronique [56,57].

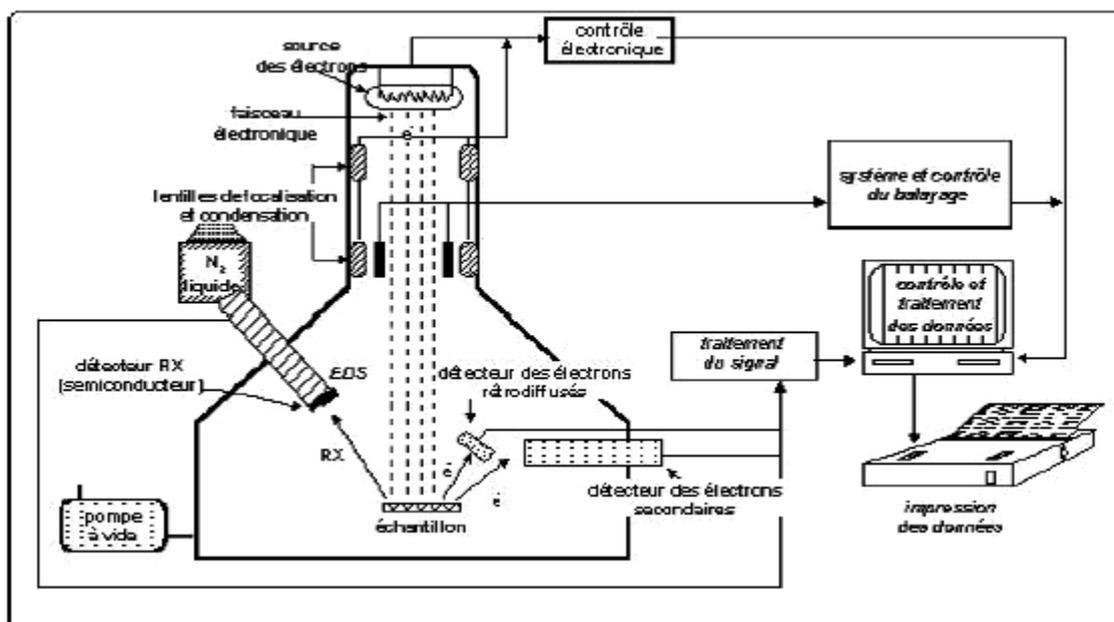


Figure III.3 : Schéma du MEB [107].

En plus, le microscope électronique à balayage (MEB, JEOL JSM modèle 7001F) est équipé d'un analyseur à spectre de dispersion d'énergie (EDS). Des mesures EDX (Energy Dispersive X-ray) ont également été réalisées par Micro-analyse EDS, du type Kevex (132 keV) ce qui nous a permis de déterminer la composition chimique sur nos échantillons. Cette technique consiste à utiliser les électrons du faisceau MEB. Ces électrons ont une énergie très supérieure à l'énergie de liaison des électrons de covalence.

Ces électrons, en traversant l'échantillon, vont engendrer plusieurs effets. L'un des plus importants consiste en une émission de rayons X, caractéristique de l'atome. Le spectromètre de dispersion en énergie EDX va convertir l'énergie du photon en paires électron-trou. Ces paires électron-trou permettent le passage d'un courant électrique sous forme d'une impulsion. L'amplitude de ce courant est proportionnelle à l'énergie de chaque photon, ce qui nous permet donc de retrouver la nature des éléments constituant le matériau. Ces mesures ont montré que ces échantillons étaient composés essentiellement d'oxygène (O), de carbone (C), de baryum (Ba), de titanate (Ti) et d'hydrogène (H). L'or (Au) provient du support du porte échantillon nécessaire pour réaliser cette mesure. A l'aide du logiciel microanalyst [Micr] nous avons déterminé les proportions de ces éléments.

III.3 Modèle théorique de la relaxation

Plusieurs modèles exprimant les propriétés diélectriques et le processus de relaxation qui se produisent dans l'isolation solide (tels que les polymères amorphes, les polymères semi-cristallins) ont été développés dans la littérature [58-59]. Ces phénomènes physiques sont généralement mal identifiés et complexes. Pour cela, des modèles souvent empiriques sont plutôt utilisés sans explication formelle du phénomène de relaxation. Le modèle des frères Cole, basé sur le formalisme de Debye, était le plus utilisé en raison de sa simplicité [60]. Le formalisme de Debye a été développé à l'origine dans plusieurs modèles [61]. Cependant, une approche théorique générale décrivant la relaxation diélectrique est exprimée par la réponse temporelle suivante :

$$P(t) = P_{\infty} + (P_s - P_{\infty}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3.1)$$

Où τ est la constante de temps de relaxation, P_{∞} est la polarisation instantanée et P_s est la polarisation statique. La transformée de Laplace de l'expression de la permittivité, en utilisant l'équation de Debye, permet de déduire la réponse de l'harmonique moyenne (Eq.3.2) [62] :

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (3.2)$$

Cette équation décrit le phénomène de relaxation dans le cas d'un diélectrique pur. De l'équation (3.2) on peut extraire la constante diélectrique ε' et l'indice de perte diélectrique ε'' comme suit :

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3.3)$$

$$\varepsilon''(\omega) = (\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}) \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3.4)$$

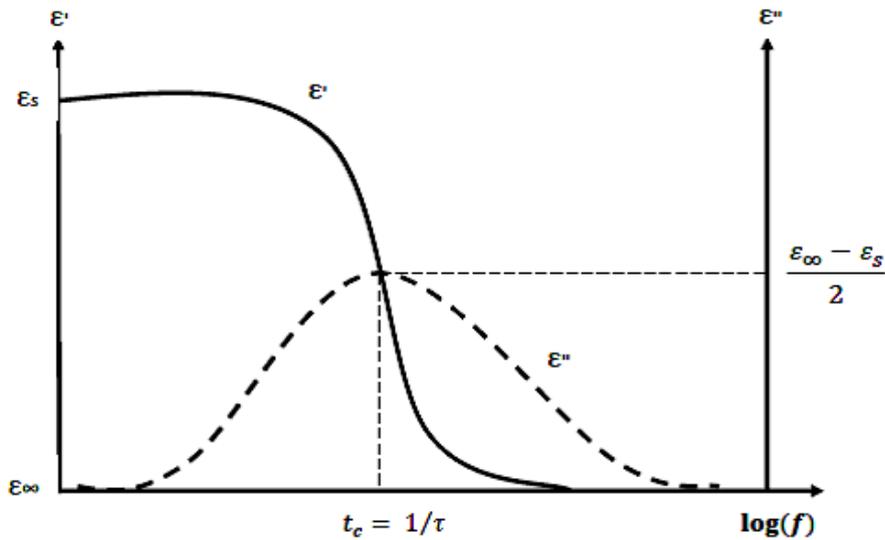


Figure III.4 : Représentation du diagramme de Bode

La figure III.4 représente les diagrammes de Bode tracés à partir des équations (3.3) et (3.4). $t_c = 1 / (\tau)$ représente la fréquence de relaxation (f_c). Après élimination du terme $(\omega\tau)$ entre les deux équations (3.3) et (3.4), on obtient l'équation suivante :

$$\epsilon'^2 + \epsilon''^2 - \epsilon'(\epsilon_s + \epsilon_\infty) + \epsilon_s\epsilon_\infty = 0 \tag{3.5}$$

La représentation de l'équation dans le système d'axes (ϵ', ϵ'') est un cercle centré sur l'axe ϵ' par rapport au demi-cercle de points $((\epsilon_s + \epsilon_\infty) / 2, 0)$ et le rayon $(\epsilon_s - \epsilon_\infty) / 2$. Le modèle de Cole-Cole est représenté sur la figure III.5.

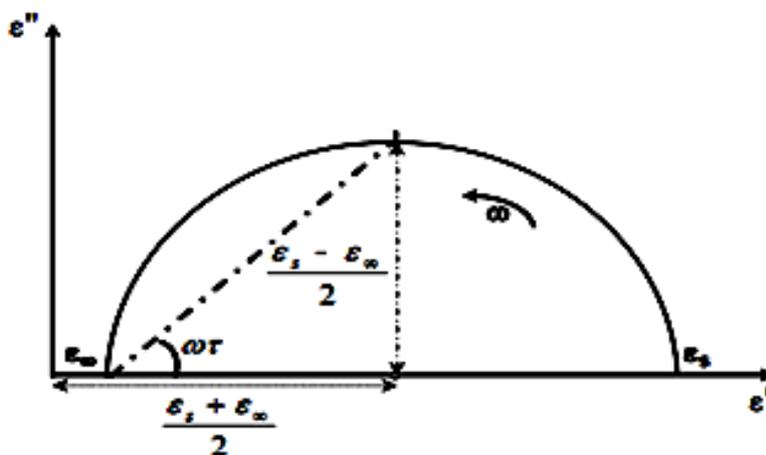


Figure III.5 : Cole-Cole's diagram

Sinon, la relaxation dans le domaine fréquentiel est représentée par le diagramme de Nyquist de la figure III.5. Celui-ci fournit un diagramme permettant de déduire les paramètres de dispersion suivants:

- f_c est la fréquence à laquelle le facteur de perte diélectrique était maximal et correspond au sommet du demi-cercle. A cette fréquence, la constante diélectrique est réduite à la moitié.
- La projection $\Delta\epsilon'$ de la constante diélectrique lié à la dispersion est le diamètre du demi-cercle.
- Le facteur de perte maximum $\Delta\epsilon''$ est le rayon du demi-cercle.
- Les constantes diélectriques statiques (ϵ_s) et instantanées (ϵ_∞) sont les intersections du cercle avec l'axe ϵ' .

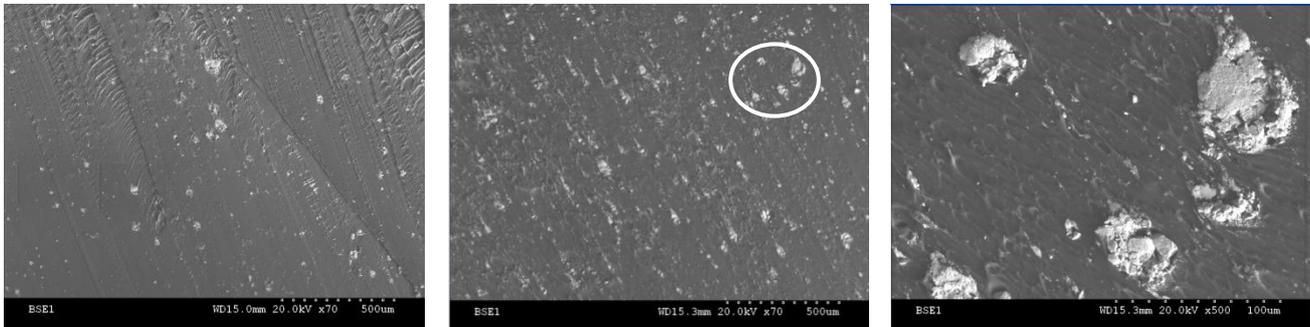
III.4 Résultats et interprétations

En plus du PVC, une étude similaire a été réalisée sur le comportement diélectrique des composites XLPE / BaTiO₃ sous l'effet de l'eau et le vieillissement thermique [63]. Les résultats obtenus recommandent que le meilleur taux de BaTiO₃, en charge, soit d'environ 10% en poids. Puisque moins de 5% en poids est faible, et plus de 10% en poids, conduit à la formation des fissures, agrégats et des pores dans les échantillons. Cet état des échantillons contribue fortement à la multiplication des charges d'espace et être par conséquent source d'arc électrique. Nous concentrons donc l'étude en particulier sur les échantillons contenant 5% et 10% en poids de BaTiO₃. Il a également été montré dans le travail précédent [63], que la diffusion de l'eau dans le composite diminue avec l'augmentation de la teneur en BaTiO₃ de 5% en poids à 10% en poids. Cependant, nous donnons par la suite quelques résultats obtenus sur des échantillons contenant 2% et 8% en poids.

III.4.1 Caractérisation MEB

L'analyse par MEB de plusieurs échantillons contenant 5% et 10% en poids de BaTiO₃, montre que la répartition du dopant dans la matrice PVC contenant 10% est plus homogène que celle contenant que 5% en poids de BaTiO₃. C'est ce que l'on peut voir sur la figure III.6. L'image de la figure III.6 (c) est le zoom de la zone repérée par une étoile dans l'image MEB. Celle-ci montre bien la distance homogène entre les grains du composite. La distance moyenne inter-granulaire est évaluée à 9 μm . A partir des images MEB, dans l'échantillon numéro trois (5%wt.), nous avons observé 100 grains dans une zone de $\sim 5,2 \text{ mm}^2$. Les grains

de BaTiO₃ prennent 18.09% de la surface totale. Cependant, dans l'échantillon numéro cinq (10% wt.), il y a exactement deux fois (200 grains dans un espace de $\sim 5,2 \text{ mm}^2$) dans la même surface. Celui-ci correspond également à 36,18% de la surface de l'échantillon. Ce calcul simple est en accord avec la teneur en BaTiO₃ dans les échantillons composites.



(a)

(b)

(c)

Figure III.6 : Images MEB des composites :

(a) Echantillon N°3 ; (b) Echantillon N°5 ; (c) Zoom de 5 fois plus de (b)

La figure III.7 montre la cartographie EDX de la distribution élémentaire de Ba, Ti, C, Cl et O dans la matrice PVC de l'échantillon numéro trois. Le zoom (échelle 50 μm) de l'image MEB (Fig.III.6.c) est reproduit sur Fig.III.7.a. L'agrandissement était dix fois plus. Les régions claires correspondent à la localisation de la charge (BaTiO₃). Fig.III.7.b et Fig.III.7.c représentent respectivement la distribution de Cl et C constituant la matrice PVC. La localisation de la charge (BaTiO₃), sélectionnée par un cercle, apparaît moins sombre dans l'image MEB (Fig.III.7.b) et elle est peu visible dans l'image MEB de la Fig.III.7.c. Cependant, dans les images MEB (Fig.III.7, d, e et f), nous pouvons bien observer que l'oxygène, le titane et le baryum sont distribués dans toute la masse de la matrice. La Fig.III.7.g montre le spectre XRD du composite où l'on peut observer que le pic de Cl est plus résolu alors que la formule chimique du chlorure de polyvinyle est $(\text{CH}_2\text{-CHCl})_n\text{Cl}$. L'intensité du pic semble être en accord avec l'image MEB de la Fig.III.7.b comparativement à C et O.

Les échantillons numéro deux et numéro quatre contenant respectivement 2% en poids. et 8% en poids. du BaTiO₃ sont caractérisés par EDS dans la section suivante. Pour l'exemple deux (Fig.III.7), nous pouvons voir quelques agrégats apparaissant plus brillants dans l'image MEB du composite (première image à gauche). Ces agrégats sont attribués à la charge (BaTiO₃). Les distributions élémentaires de Ba, Ti et O sont représentées sur la Figure III.6.a.

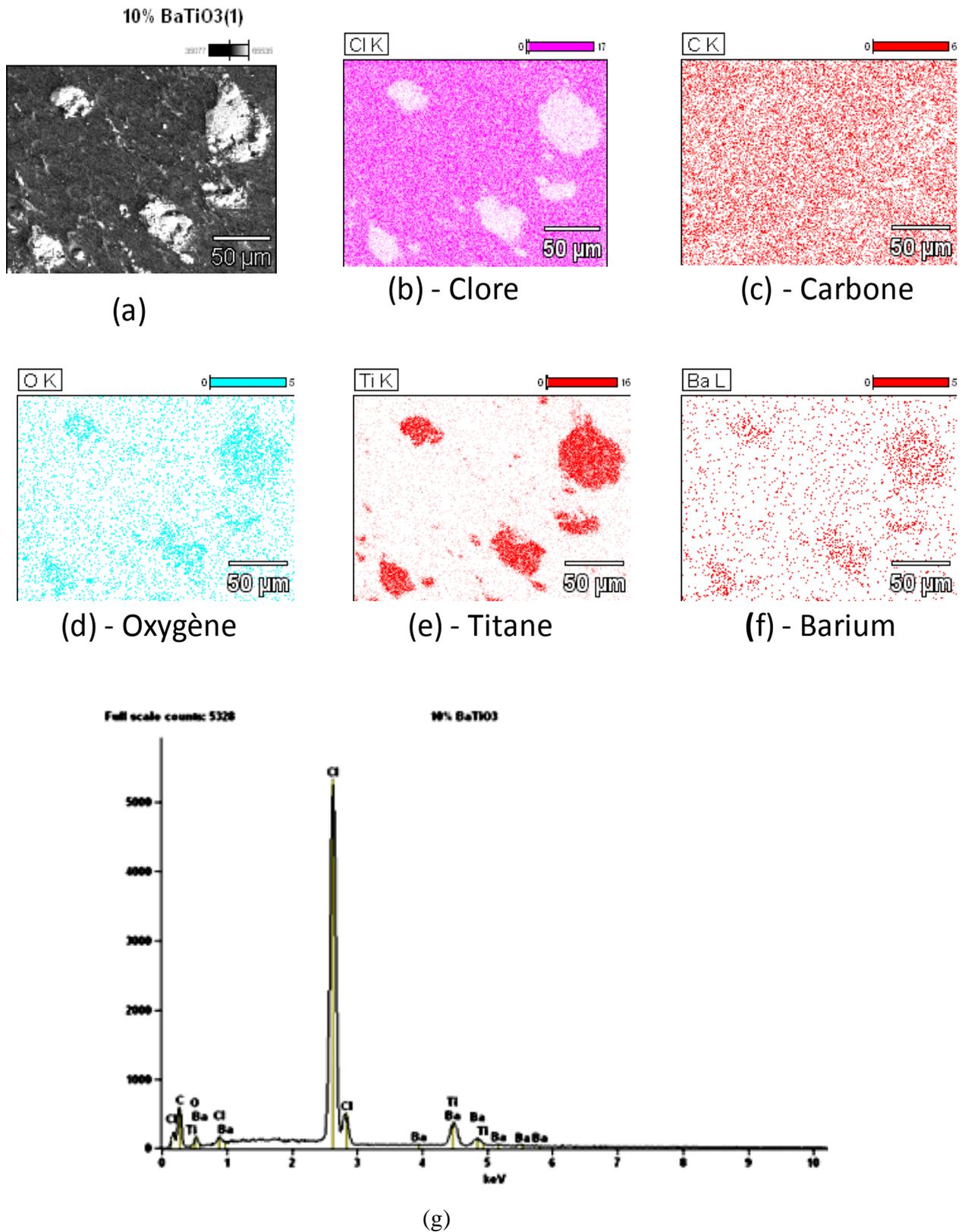
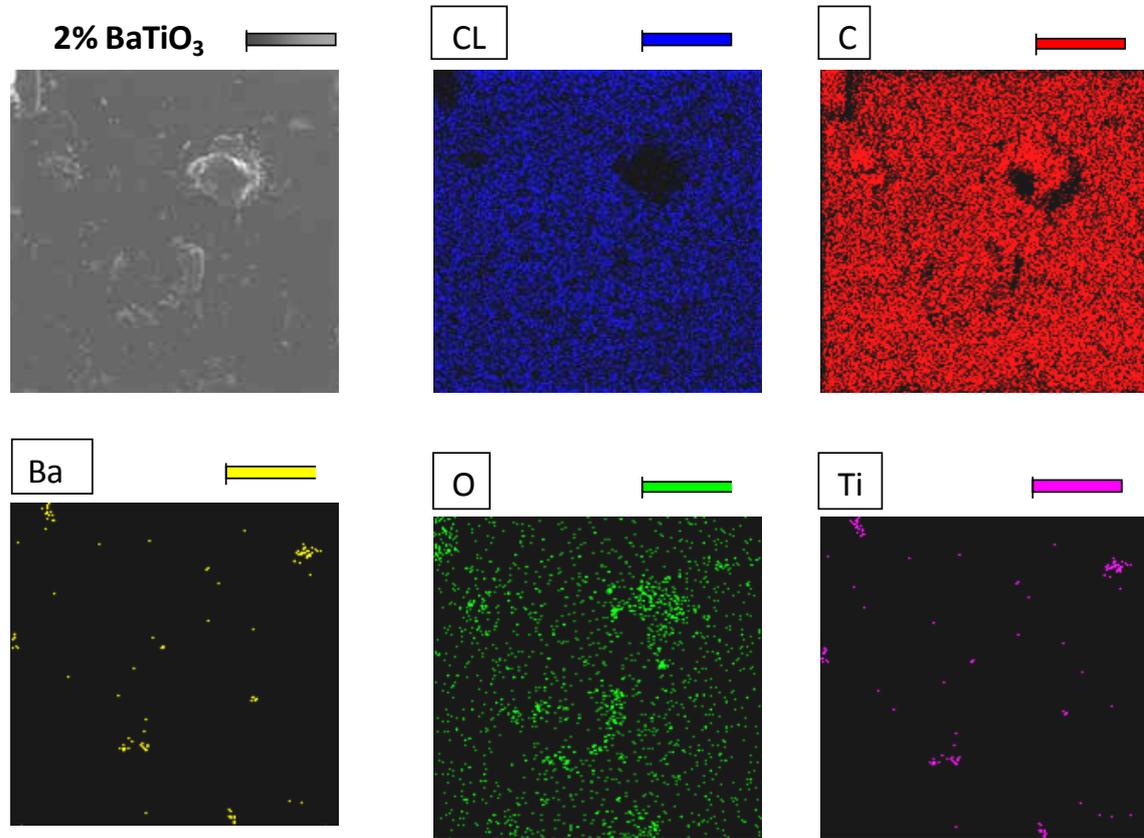


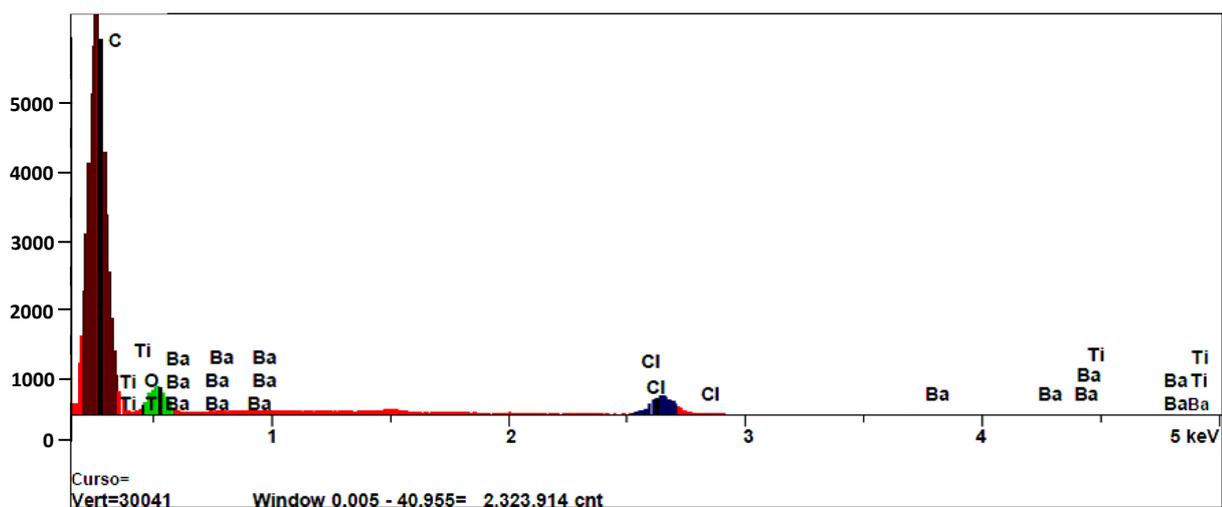
Figure III.7 : Cartographie EDX des distributions élémentaires (a) morphologie du composite ; (b) chlorite, (c) carbone ; (d) oxygène ; (e) titanium ; (f) baryum ; (g) le spectre du composite XRD.

Comparativement à la (Fig.III.7.e) et la (Fig.III.7.f), il y a peu de Ba et Ti puisque l'échantillon numéro deux ne contient que 2% en poids de BaTiO₃. Sinon, nous pouvons observer dans le spectre XRD que le pic de carbone est plus résolu que d'autres éléments chimiques (Ba, Ti, Cl et O) (Fig.III.8.b).



(a)

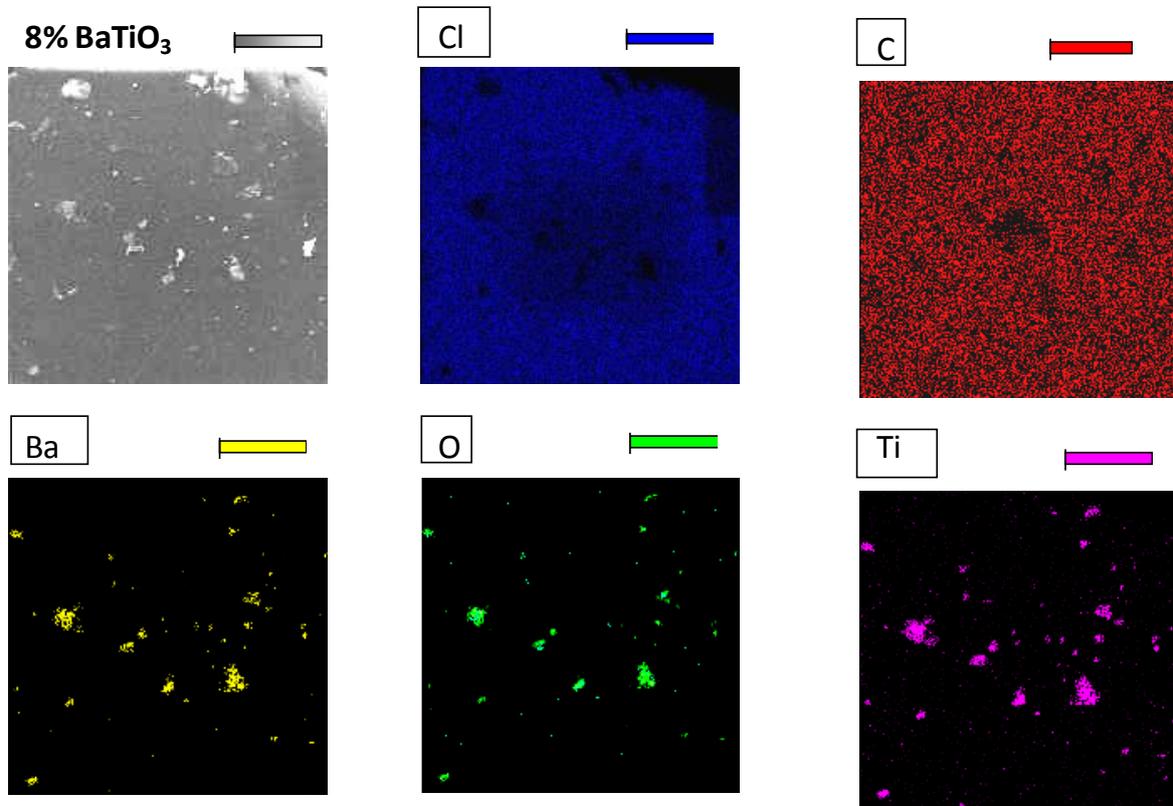
Full scale counts



(b)

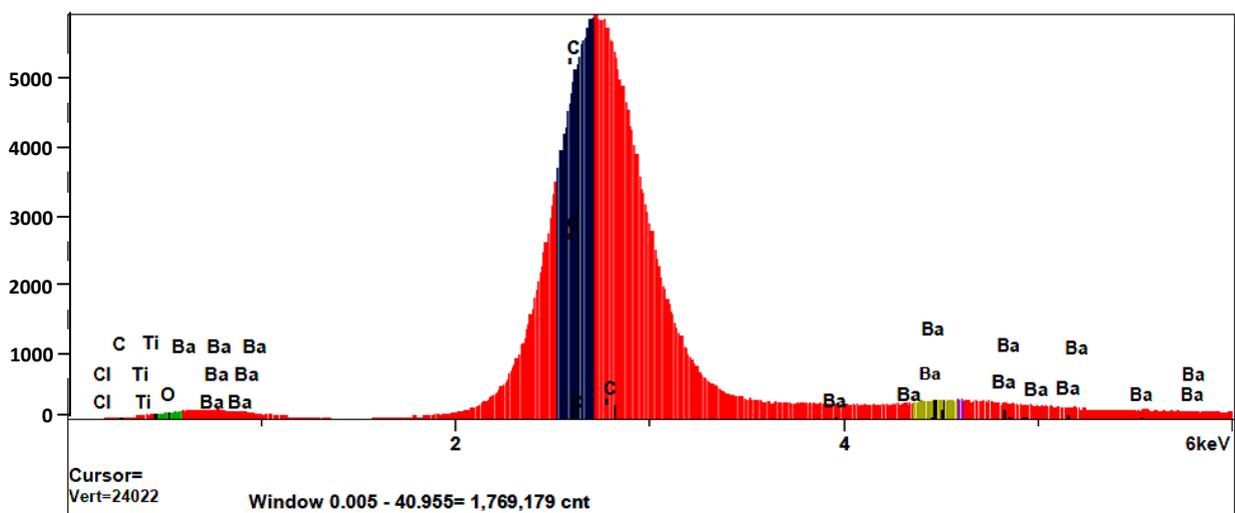
Figure III.8 : Cartographie EDX du deuxième échantillon
(a) distributions élémentaires ; (b) le spectre du composite XRD

Cependant, l'image MEB de l'échantillon 4 (Fig.III.9) montre donc plus d'agrégats plus brillants (première image à gauche) qui sont également attribués à la charge (BaTiO_3).



(a)

Full scale counts



(b)

Figure III.9 : Cartographie EDX du quatrième échantillon
 (a) distributions élémentaires ; (b) le spectre du composite XRD

Par conséquent, la distribution élémentaire des teneurs en Ba et Ti est plus grande dans la matrice (Fig.III.9.a). Cependant, nous pouvons observer dans le spectre XRD que le pic Cl est plus résolu que les autres éléments chimiques (Ba, Ti, Cl et O) (Fig.III.9.b).

III.4.2 Caractérisation par analyseur d'impédance

La dépendance en fréquence de la permittivité et de l'indice de perte pour le PVC pur et les échantillons trois et cinq est représentée sur les (Figures III.10.a), (10.b), (11.a) et (11.b) pour les gammes de fréquences respectivement 20 -140 Hz et 115-1M Hz.

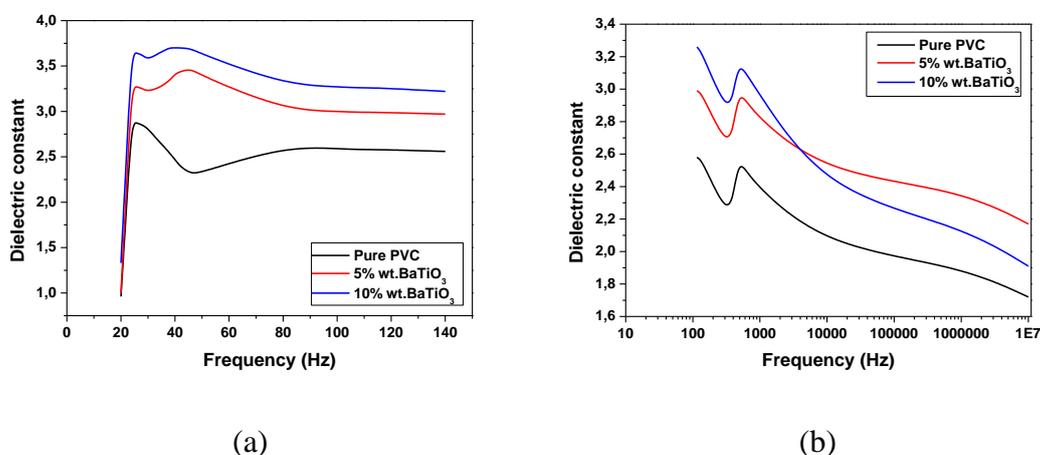


Figure III.10 : Variations de la permittivité en fonctions de la fréquence

(a) $f = [20-140\text{Hz}]$; (b) $f = [115\text{Hz}-1\text{MHz}]$

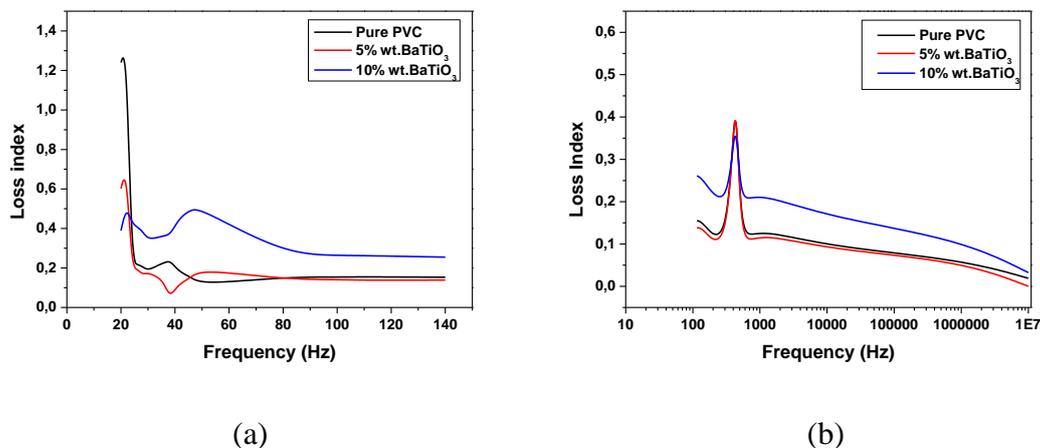


Figure III.11 : Variations de l'indice de perte en fonctions de la fréquence

(a) $f = [20-140\text{Hz}]$; (b) $f = [115\text{Hz}-1\text{MHz}]$

III.4.3 Caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

La figure III.12 montre les spectres FTIR du PVC pur et des composites PVC / BaTiO₃. Les spectres d'absorption présentent cinq absorptions. Ceux situés respectivement à 3000 cm⁻¹ et à 1750 cm⁻¹ sont caractéristiques de C-H et de flexion (C-O). Le second pic est dû à la formation de groupes carbonyle, similaire à celle trouvée dans Réf. [63]. Il est la caractéristique de l'oxydation détectée dans le PVC. La bande d'absorption observée à 1250 cm⁻¹ peut être attribuée probablement à la flexion du carbone (C-C). Cependant, les bandes d'absorption situées à 1000 et 700 cm⁻¹ sont bien résolues et toutes les deux sont dues à une flexion C-Cl. On peut voir que les spectres sont superposés au spectre caractéristique de l'échantillon pur. Ceci suggère qu'il n'y a pas d'effet de BaTiO₃ sur le PVC ; cela signifie qu'il n'y a pas de réaction chimique entre le PVC et BaTiO₃ dans lequel une nouvelle fonctionnalité peut apparaître. Sinon, les spectres composites particulièrement ceux, caractéristiques des échantillons numéro quatre (8% en poids de BaTiO₃) et numéro cinq (10% en poids de BaTiO₃), tendent à diminuer en amplitude pour probablement apparition de pics d'absorption attendus vers 570 et 440 cm⁻¹. Deux larges pics d'absorption caractéristiques respectivement du mode de vibration Ti-O et de BaTiO₃ tels que rapportés dans la littérature étaient attendus à 570 et 440 cm⁻¹ [64-65]. Ceux-ci ne peuvent pas être enregistré avec le spectromètre IR utilisé puisque 610 cm⁻¹ est sa limite de nombre d'ondes courtes. Aucune modification chimique induite par BaTiO₃ n'a d'effet sur le PVC.

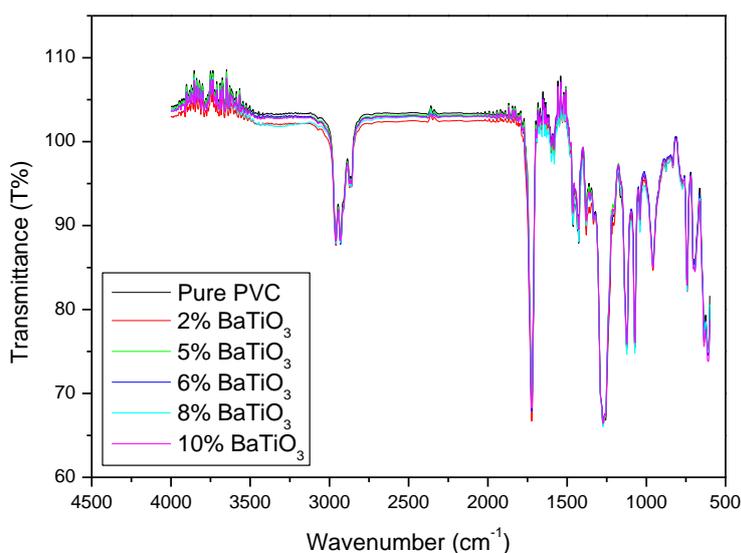


Figure III.12 : Spectre FTIR pour PVC et composites PVC/BaTiO₃.

III.4.4 Discussion des fréquences de relaxation

Un pic apparaît dans la courbe de constante diélectrique et en parallèle dans la courbe de l'indice de perte autour de la valeur 20 Hz. Le deuxième pic plus résolu dans la constante diélectrique et une inflexion dans les courbes d'indice de perte a été enregistrée à la fréquence 500 Hz. Ces valeurs de fréquences de relaxation ont été indiquées dans la référence [66].

Cependant, plus la teneur en BaTiO₃ augmente, plus la constante diélectrique augmente, en particulier dans la plage 20-500 Hz (Figures III.10.a, III.10.b, III.11.a), alors qu'après 500Hz la constante diélectrique de l'échantillon trois dont le contenu est seulement de 5% de BaTiO₃ diminue. Ce dernier semble diminuer plus aux hautes fréquences autour de 1MHz (Fig.III.10.a). Le pic de la relaxation le plus intense apparaît dans la région basse fréquence, semble dépendre de la teneur en BaTiO₃ et de l'accumulation de charges à l'interface entre l'échantillon et les électrodes, comme indiqué dans [66-67-68] car la polarisation inter-faciale est attendue à cette fréquence.

Pour les valeurs des fréquences de relaxation après dopage (20 Hz et 500 Hz), Les pics de relaxation apparaissant dans les courbes de constante diélectrique sont également présents dans l'une des courbes d'indice de perte. Ils sont situés dans les mêmes fréquences (20Hz et 500Hz). Le résultat est en accord avec celui réalisé dans [69].

Cependant, la courbe d'indice de perte peut être divisée en deux parties, dans les gammes de fréquences (20Hz-25Hz) et dans la gamme de fréquence (115Hz-1MHz). Dans la première partie, l'indice de perte diminue lorsque la teneur en charge augmente. Pour le deuxième intervalle, l'intensité du pic de relaxation diminue lorsque la teneur en charge augmente.

Si la fréquence est supérieure à 25 Hz pour le PVC pure, l'indice de perte de l'échantillon trois reste inférieur à celui du premier l'échantillon. Dans la gamme de fréquences (25Hz-1MHz), l'indice de perte de l'échantillon cinq est supérieur à celui des échantillons un et trois.

Nous avons tracé les diagrammes de Bode (Fig.III.13) et Nyquist (Fig.III.14) basé sur le modèle de Cole-Cole et Debye, pour évaluer les paramètres diélectriques tels que la constante diélectrique, l'indice de perte et le point de relaxation.

Tous les composites à température ambiante, comme on peut le voir, présentent une relaxation à la même fréquence. À température ambiante, le modèle de Cole-Cole fournit plus d'informations sur le mécanisme de relaxation.

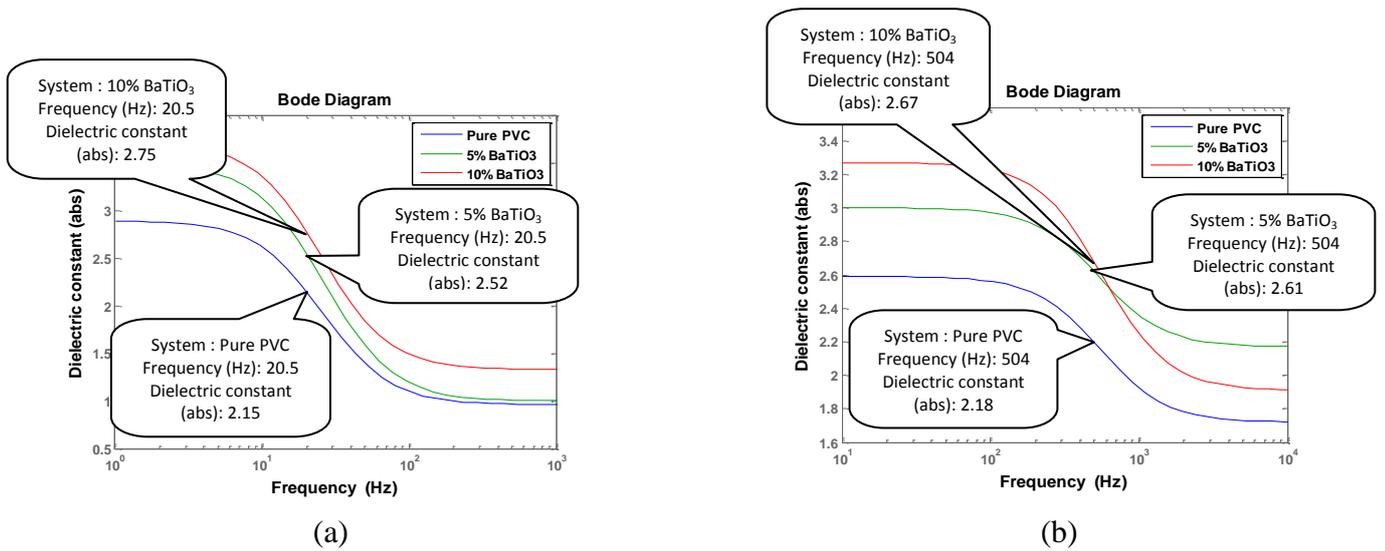


Figure III.13 : Diagrammes de Bode : (a) $f = [20-140\text{Hz}]$; (b) $f = [115\text{Hz}-1\text{MHz}]$

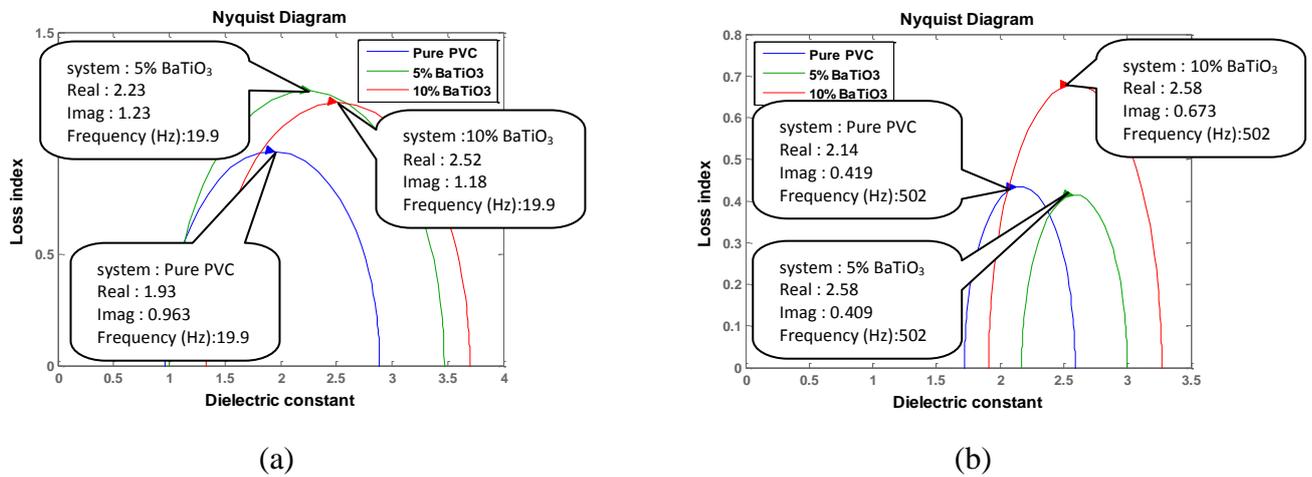


Figure III.14 : Diagrammes de Nyquist : (a) $f = [20-140\text{Hz}]$; (b) $f = [115\text{Hz}-1\text{MHz}]$

Dans notre cas, deux demi-cercles formés sont clairement distincts. Ils correspondent aux échantillons, numéros trois et cinq. Les fréquences de relaxation sont respectivement évaluées à 19,9 Hz pour les échantillons un, trois et cinq dans la gamme de fréquence 20-140 Hz. Cependant, dans la gamme des fréquences (150 Hz - 1 MHz), les fréquences de relaxation ont été évaluées à 504 Hz pour les trois échantillons (un, trois et cinq). Les valeurs correspondent bien à celles mesurées expérimentalement.

Il est bien connu que l'effet Maxwell Wagner Sillars se produit dans des systèmes complexes qui présentent l'hétérogénéité électrique due à l'accumulation de charges aux interfaces du système [73-75]. Ceci peut être clairement observé, avec la permittivité diélectrique de BaTiO₃ qui est remarquablement plus élevée que celle du PVC. BaTiO₃ et les charges ne peuvent pas être bien diffusés dans la matrice PVC, résultant de la phase de

préparation des échantillons; par conséquent, une grande quantité de dipôles se produit dans la matrice. Ces dipôles induits devraient avoir des difficultés à suivre le champ électrique alternatif, de sorte que le processus de relaxation se produit dans la région des basses fréquences. Cela implique un processus de relaxation plus lent (processus α -relaxation). De même, le temps nécessaire pour une réorientation des dipôles est appelé le temps de relaxation τ est l'inverse de la fréquence de relaxation f . Lorsque la fréquence du champ électrique est beaucoup plus élevée que la fréquence de relaxation d'un type de polarisation, la polarisation peut ne pas se produire. Inversement, si la fréquence du champ électrique est très inférieure à la fréquence de relaxation, la polarisation se produit instantanément et la différence de phase entre P (polarisation) et E (champ électrique) est nulle. Mais si la fréquence du champ électrique et la fréquence de relaxation sont similaires, la différence de phase (δ) augmente jusqu'à une valeur maximale. Ainsi, la fréquence de résonance (f_c) est également la fréquence de relaxation [70].

La concentration de particules de BaTiO_3 affecte la variation maximale de la perte. Comme le BaTiO_3 est un matériau ferroélectrique typique, $\sim 140^\circ \text{C}$ (T_c) correspond sa transition de température caractéristique, de la phase ferroélectrique à la phase para-électrique [66]. D'autre part, les échantillons ont été élaborés à 150°C et les mesures ont été effectuées à température ambiante. Au dessous de cette température (T_c), le BaTiO_3 consiste en un grand nombre de grains dont l'orientation est similaire à celle des domaines (aires). Ces domaines possèdent une polarisation spontanée, due à la faible symétrie du réseau cristallin par rapport à la cellule unitaire dans la phase para-électrique. Sous l'influence du champ électrique, le moment dipolaire au moins d'un côté de ces zones pourra suivre le champ appliqué contribuant à la polarisation globale de l'échantillon [66-70]. Par conséquent, le volume et la quantité de charge de BaTiO_3 dans la matrice, donc, l'intensité de la relaxation globale de l'échantillon sera influencée et sans ce temps de relaxation, va changer.

Il est à noter qu'à faible concentration de particules de BaTiO_3 , il y a une diminution de l'indice de perte (au moins jusqu'à 5% en poids de BaTiO_3); cependant, pour des teneurs plus élevées en BaTiO_3 (de 5% à 10%), l'indice de perte augmente, indiquant que les pertes diélectriques sont augmentées lorsque des quantités considérables de particules de BaTiO_3 (jusqu'à 10%) sont incorporées dans le PVC. Le résultat est inverse à celui réalisé dans [76] pour le polyéthylène basse densité (LDPE); plus le BaTiO_3 est présent, plus la perte diélectrique est faible. Le même résultat a été obtenu dans le travail précédent [77]. Dans nos échantillons de PVC, la quantité des charges d'espace, dues aux défauts et à BaTiO_3 , semble

être plutôt atteint à 5% en poids (Fig.III.11.a, III.11.b). Cependant, dans le composite (XLPE / BaTiO₃), les pertes diélectriques ont augmenté, pour les échantillons contenant plus de 10% en poids [11]. Le résultat est attribué aux charges d'espace et à la distribution hétérogène de BaTiO₃ alors que les agrégats peuvent être vus dans l'image MEB (Fig.III.6.c).

La réponse diélectrique du composite PVC-BaTiO₃, dans les gammes de fréquences (20-140 Hz, 150 Hz -1 MHz) et à température ambiante, a été étudiée dans le présent travail. L'étude nous a permis d'évaluer l'utilisation potentielle d'un nouveau matériau pour fournir une fonction d'isolation pour les applications à basse fréquence, alors que cette gaine de câble devrait être utilisée en haute tension.

Les travaux portent principalement sur la caractérisation des propriétés diélectriques du polymère (PVC) chargés BaTiO₃, en fonction de la fréquence de service, et sur l'influence de la charge sur le phénomène de relaxation. Pour cela, différentes méthodes de caractérisation ont été utilisées. L'analyseur d'impédance RLC nous permet d'estimer la fréquence de relaxation. Ils sont évalués respectivement à 19,9 Hz et à 504 Hz dans les gammes 20-140 Hz et 1(150 Hz-1 MHz) avec $\pm 0,05\%$ comme plage d'erreur.

Le modèle théorique basé sur le modèle de Cole-Cole et les données expérimentales, nous a permis de valider les valeurs trouvées. Le phénomène de relaxation était présent dans tous les échantillons et à la même fréquence dans chaque gamme de fréquences. Tous les processus de relaxation qui ont été enregistrés sont attribués aux Maxwell Wagner Sillars à effet de polarisation inter-faciale du polymère amorphe, ou mouvement local du groupe des chaînes macromoléculaires [70-71-72-75].

La relaxation peut être modifiée à haute fréquence, supérieure à 1 kHz. Une autre relaxation due à la présence de BaTiO₃ dans le composite peut exister, mais à une fréquence plus élevée, telle que rapportée dans la littérature [78-79]. Ces relaxations ne peuvent être observées ici, puisque les réponses en fréquence sont enregistrées en basse fréquence.

La caractérisation par spectroscopie FTIR montre bien que les spectres sont superposés. Ces résultats montrent que l'incorporation de BaTiO₃ ne modifie pas la structure du PVC. Aucune bande supplémentaire IR, n'est trouvée dans les échantillons composites, par rapport à celle du PVC pure, ce qui indique l'absence de dégradation et, par conséquent, des changements chimiques dans la matrice au cours du traitement qui pourrait influencer sur les

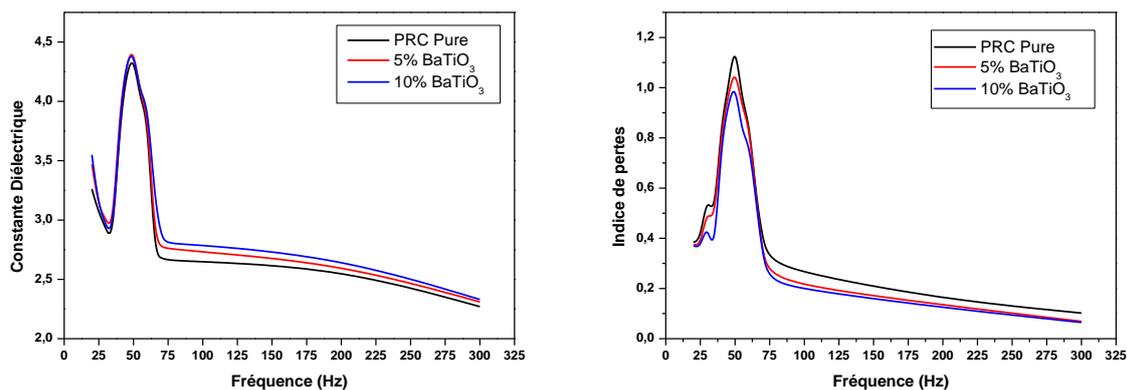
propriétés électriques. Les mêmes résultats ont été obtenus par J. Gonzalez-Benito et al. [66] concernant le HDPE rempli de BaTiO_3 .

III.5 Relaxation dans les échantillons PRC

Puisque le PRC (polymère réticulé chimiquement), est l'un des polymères les plus utilisés dans le domaine d'isolation, et puisque la relaxation est l'un des phénomènes très important dans le comportement des polymères et dans le but d'enrichir notre travail, une étude sur des échantillons en PRC a été réalisée, en gardant le même pourcentage de dopage (0%, 5% et 10% de BaTiO_3). En se basant sur la permittivité relative et l'indice de pertes comme paramètres de caractérisation, les échantillons PRC et PRC dopés et sous différents testes de vieillissement (vieillessement thermique et hydrique [80]), ont été étudiés.

III.5.1 Avant le vieillissement

La figure.III.15 présente la variation de la permittivité et de l'indice de pertes dans le domaine fréquentiel. En observant les deux premières courbes, on remarque qu'il y a un pic aux alentours de la fréquence 50 Hz (fréquence de relaxation), seulement la permittivité augmente avec la teneur de BaTiO_3 ; plus le pourcentage augmente plus la permittivité croit, inversement à l'indice de perte qui diminue avec la croissance du dopage. On voit clairement que les diagrammes de Bode et Nyquist, sont conformes au modèle de Cole-Cole.



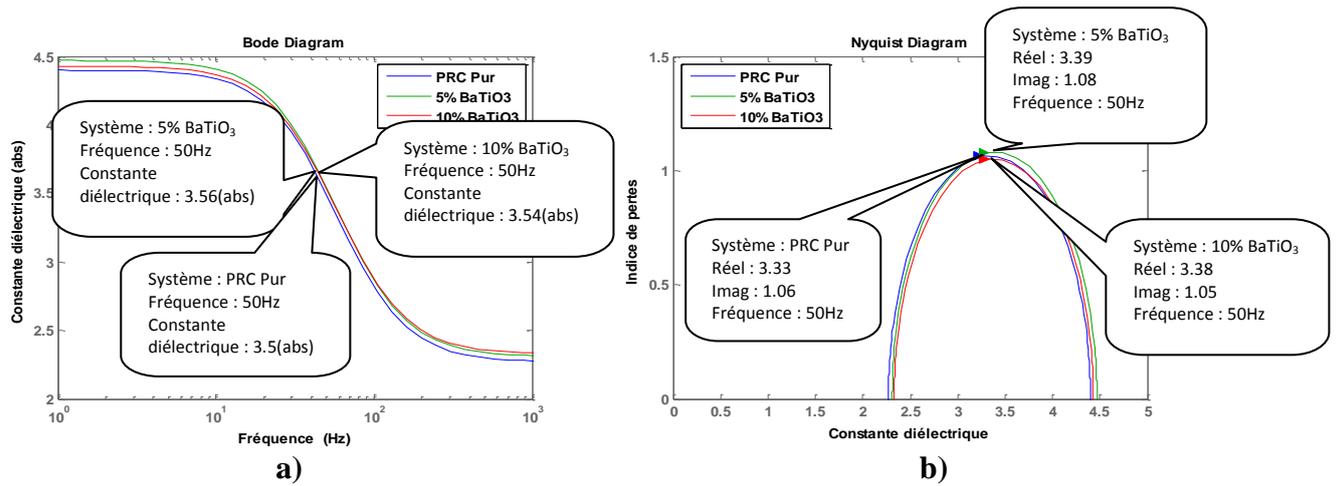
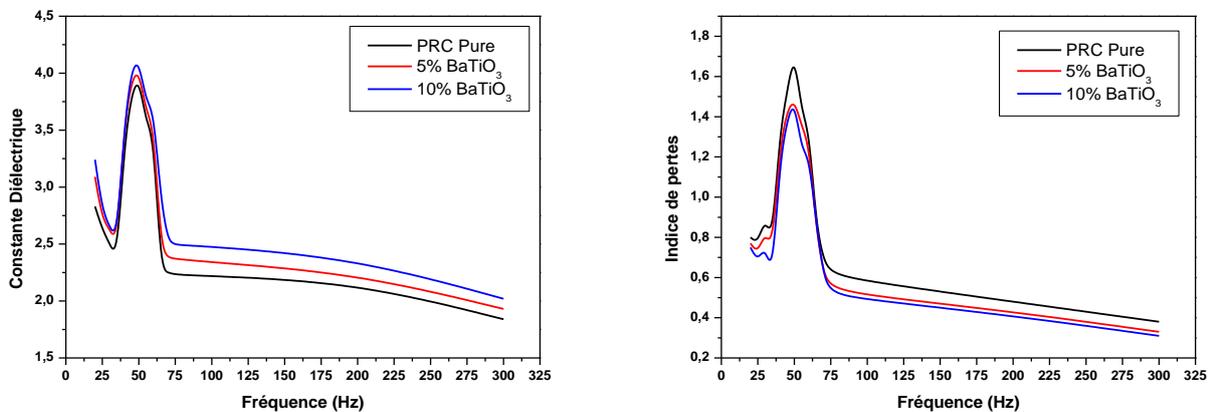


Figure.III.15 : Variation de l'indice de pertes et de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, a)- Diagramme de Bode, b)- Diagramme de Nyquist [avant vieillissement]

III.5.2 Après le vieillissement thermique

Le premier test de vieillissement réalisé était le vieillissement thermique [80], qui est considéré comme test important, puisque l'inconvénient de la chaleur (qui est un paramètre essentiel surtout dans nos régions), reste un vrai souci pour n'importe qu'elle isolation.



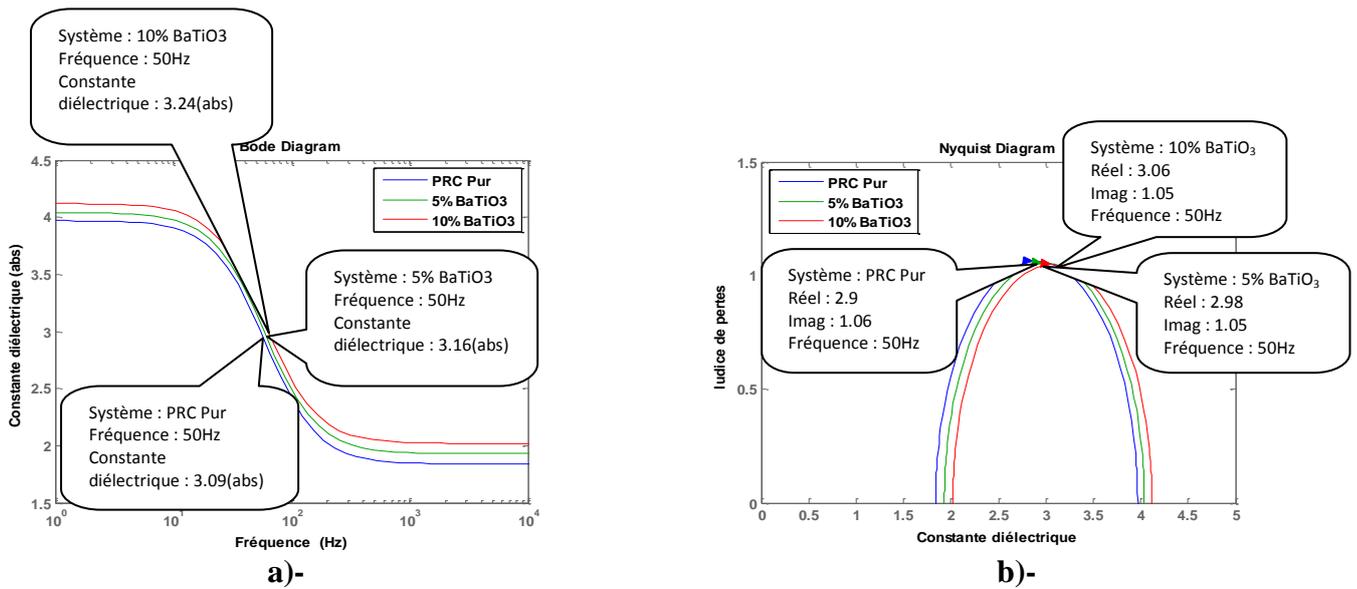
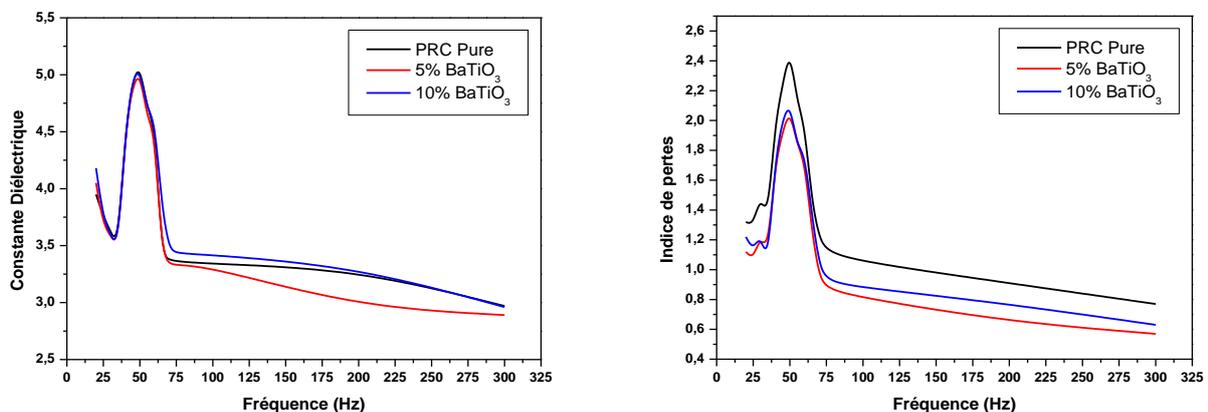


Figure.III.16 : Variation de l'indice de pertes et de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, a)- Diagramme de Bode, b)- Diagramme de Nyquist (après le vieillissement thermique)

En observant les courbes de la permittivité et de l'indice de pertes, on constate qu'il y a toujours une fréquence de relaxation autour de la fréquence 50 Hz, et que les valeurs de la permittivité et de l'indice de pertes varient avec la teneur du BaTiO₃.

III.5.3 Après le test de l'humidification

Puisque les gaines de câble sont appelés à être installés dans différentes régions et soumises à l'humidité de la pluie, la neige et même l'humidité des régions du littorale, l'absorption d'eau est considérée aussi comme paramètre important pour n'importe qu'elle isolation surtout les câbles souterrains.



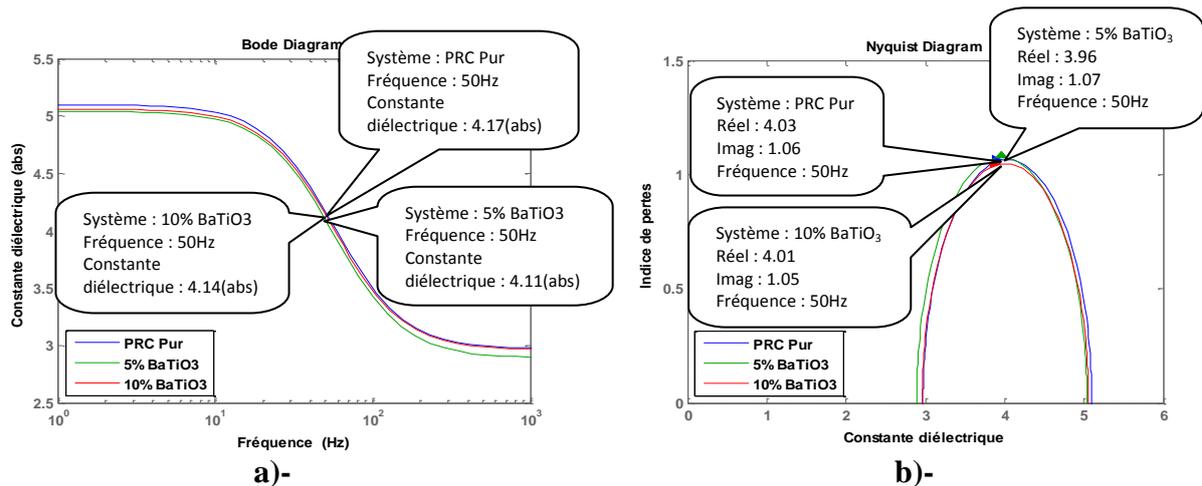


Figure.III.17 : Variation de l'indice de pertes et de la constante diélectrique en fonction de la fréquence, a)- Diagramme de Bode, b)- Diagramme de Nyquist (avant le test d'humidification)

On voit bien les résultats obtenus sont conformes aussi au modèle Cole-Cole. La forme des courbes est similaire aux courbes précédentes avant l'effet de l'humidité. Cependant tel qu'escompté les valeurs de la permittivité et de l'indice de pertes ont changé avec la présence de l'eau. L'eau est un liquide polaire très proche des liquides conducteurs.

D'après cette étude des échantillons PRC (avant et après vieillissement), on peut déduire que le phénomène de relaxation existait toujours, mais avec d'autres valeurs de fréquence, puisque l'eau est un liquide polaire très proche des liquides conducteurs. Ceci traduit l'importance de la présence des câbles dans un environnement humide. D'autre part, la fréquence de relaxation varie d'un matériau à l'autre. En comparant avec les résultats obtenus avec les échantillons en PVC et PVC dopé, on voit que la fréquence de relaxation décale d'une faible valeur vers les hautes fréquences (de 20 Hz pour le PVC à 50 Hz pour le PRC).

Le deuxième point concerne le composite BaTiO₃. On voit que toutes les courbes sont presque superposées, ce qui confirme que la fréquence de relaxation pour ce dernier n'existe pas dans cette gamme de fréquence. La relaxation du BaTiO₃ est attendue dans la gamme des hautes fréquences de l'ordre du GHz.

L'apparition du pic dans toutes les courbes, est expliquée par la polarisation inter-faciale, qui est la polarisation la plus dominante dans cette gamme de fréquence. Cependant il existe une inflexion au début des courbes qui peut être expliquée par une polarisation d'orientation.

L'augmentation de la valeur de la permittivité et la diminution de la valeur de l'indice de pertes confirme l'influence du composite BaTiO₃. La présence de ce dernier diminue la

charge d'espace par incorporation des grains d'additifs dans les différentes cavités susceptibles d'exister par défaut dans les échantillons due à la technique d'élaboration ou de traitement. Pour limiter les microfissures qui peuvent être provoquées par le champ électrique élevé appliqué à cette isolation et augmenter sa durée de vie, on ne doit pas dépasser une certaine valeur de la charge 5% et 10%, puisque une charge supérieure à plus de 15%, dégrade l'état des échantillons [80].

III.6 Conclusion

Les résultats de l'étude obtenus sur les composites (BaTiO_3 / PVC) sont résumés comme suit :

- L'étude nous a permis d'évaluer l'utilisation potentielle d'un nouveau matériau en vue d'une meilleure fonction d'isolation pour les applications à basse fréquence, puisque cette gaine de câble devrait être utilisée dans les réseaux électriques basse et haute tensions.
- La constante diélectrique augmente lorsque BaTiO_3 augmente, mais sa valeur reste comprise dans la limite admissible pour une bonne isolation.
- La perte diélectrique diminue en fonction de la charge jusqu'à 10% en poids de BaTiO_3 . Pour une quantité de charge supérieure à 10% en poids, les pertes diélectriques augmentent, puisque la répartition des particules de BaTiO_3 était hétérogène formant, par conséquent, des agrégats qui sont à l'origine des pores, par conséquent de charge d'espace. Ces pertes diélectriques restent néanmoins inférieures à celles du PVC pur.
- A faible concentration de particules de BaTiO_3 , il y a une diminution de l'indice de perte (au moins jusqu'à 5% de BaTiO_3); cependant, pour des teneurs plus élevées en BaTiO_3 (de 5% à 10%), l'indice de perte augmente mais reste inférieur à celui du PVC pur.
- Le phénomène de relaxation était présent dans tous les échantillons. Tous les processus de relaxation enregistrés (du plus lents au plus rapides) sont attribués à l'effet de polarisation inter-faciale. Les fréquences de relaxation ont été évaluées respectivement à 19,9 Hz et 504 Hz dans les gammes 20-140 Hz et 150 Hz-1 MHz. Ces valeurs ont été validées en utilisant le modèle de Cole-Cole.
- L'incorporation de BaTiO_3 ne modifie pas la structure du PVC. Pas de bandes IR supplémentaires, trouvées dans les échantillons composites, par rapport à celle du PVC pur, ce qui indique l'absence de dégradation et, par conséquent, des changements chimiques dans la matrice pendant le traitement qui pourraient influencer les propriétés électriques.
- Ces résultats indiquent que la présence de particules de BaTiO_3 n'exerce aucune influence

sur la structure du PVC, et montre bien que BaTiO₃ en tant que charge améliore les propriétés diélectriques du PVC.

- L'utilisation du PRC montre des performances plus ou moins mieux que le PVC (concernant la permittivité et l'indice de pertes), et le phénomène de relaxation reste toujours présent, seulement l'effet du vieillissement (thermique ou hydrique) reste inévitable.

Chapitre IV

*Modélisation numériques des
diélectriques en présence de la charge
d'espace*

IV.1 Introduction

La modélisation consiste à mettre au point un ensemble d'équations ou de règles pour décrire un phénomène de façon reproductible et simulable. Le modèle issu de la modélisation sert à prédire le comportement d'un système en fonction de sollicitations connues.

Schématiquement le modèle est une boîte noire qui fournit des valeurs de sortie en fonction des valeurs d'entrée. En tant que boîte noire, le modèle sert à définir un jeu de paramètres optimum pour obtenir des valeurs de sorties souhaitées en fonction de valeurs d'entrée données [80].

Dans ce chapitre, on présente les différentes méthodes numériques. Cependant par la suite de notre étude, on se base sur la méthode des différences finies. Cette méthode nous a aidé à modéliser le diélectrique en focalisant l'étude sur la charge d'espace, qui est l'une des problèmes majeurs qui provoque le claquage électrique, donc le vieillissement et par conséquence la rupture de l'isolation.

IV.2 Les différentes méthodes numériques utilisées en électromagnétisme

IV.2.1 Méthode des différences finies

La première méthode à résoudre les équations différentielles par ordinateur était la méthode des différences finies (MDF). Elle comprend la résolution locale des équations de Maxwell par la discrétisation du domaine (domaine en 2D), en utilisant une grille dont l'avantage est d'avoir une bonne approximation du domaine (Figure IV.1) [53].

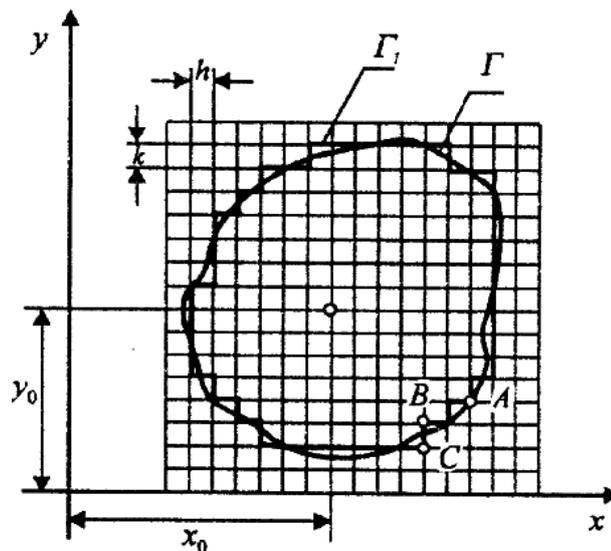


Figure IV.1 : Méthode des différences finies. Grille pour les calculs [53].

Dans le cas d'un domaine en 3D, la grille deviendra un volume. On fait une approximation des dérivées à chaque point de la grille en utilisant des différences finies (approximation dans le développement de Taylor, jusqu'au second ordre). Alors, la MDF consiste à remplacer les dérivées dans les équations aux dérivées partielles et les conditions aux limites, par des différences finies calculées à chaque nœud du maillage.

L'emploi d'un maillage carré simple (qui est l'un des maillages réguliers), permet d'avoir à chaque point la même forme d'équations (Figure IV.2.a). Chaque point est placé sur l'un des sommets du carré. D'autres maillages réguliers peuvent également être utilisés. Par exemple, dans le maillage carré, on peut prendre un point numéroté 0 et ses quatre points voisins de 1 à 4 (Figure IV.2.b), la longueur de chaque tronçon est égal à h [53].

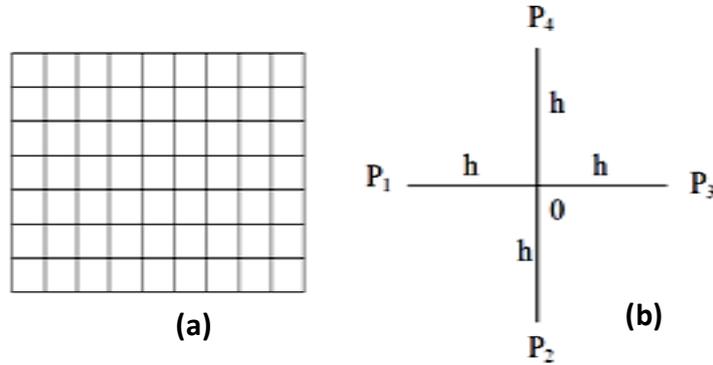


Figure IV.2: Discretisation de MDF: (a) Maillage carré ;(b) Point central et ses voisins [53].

Pour exprimer le potentiel V en fonction du potentiel 0 , il est nécessaire de développer ce dernier en séries de Taylor au voisinage du point 0 ($x = x_0$), et cela à chaque point du segment P_1 - P_3 (P_2 - P_4) [53].

$$V = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{(x - x_0)^n}{n!} \frac{\partial^n V}{\partial x^n} \right\} x_0 \quad (4.1)$$

Pour le point P_1 ($x = x_0 - h$) nous avons :

$$V_1 = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ (-1)^n \frac{h^n}{n!} \frac{\partial^n V}{\partial x^n} \right\} x_0 \quad (4.2)$$

De la même manière, pour le point P_3 ($x = x_0 + h$) nous obtenons :

$$V_3 = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{h^n}{n!} \frac{\partial^n V}{\partial x^n} \right\} x_0 \quad (4.3)$$

En prenant des valeurs suffisamment faibles pour h , on peut négliger les termes d'ordre supérieur à 2:

$$V_1 = V_0 - \partial \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (4.4)$$

$$V_3 = V_0 + \partial \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \quad (4.5)$$

En additionnant ces deux équations on aura :

$$\frac{\partial^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = V_1 + V_3 - 2V_0 \quad (4.6)$$

De façon similaire, en considérant le segment $[P_2P_4]$, il vient :

$$\frac{\partial^2}{2} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = V_2 + V_4 - 2V_0 \quad (4.7)$$

Pour résoudre l'équation de Laplace en coordonnées cartésiennes, dans l'espace à deux dimensions:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0 \quad (4.8)$$

Nous remplaçons les différentes dérivées par les équations (4.6) et (4.7). Ceci conduit à :

$$V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4V_0 = 0 \quad (4.9)$$

Si l'on écrit l'équation ci-dessus en considérant successivement chaque point comme le centre d'une étoile, on obtient un système algébrique qui peut s'écrire sous forme matricielle :

$$[A]\{X\} = \{B\} \quad (4.10)$$

Où $\{X\}$ est le vecteur des inconnus, c'est à dire les potentiels de tous les points à l'intérieur du domaine.

Toute méthode à ses inconvénients, et le problème de celle-ci, est que si l'une des frontières est de forme curviligne, dans ce cas nous sommes obligés de chercher des points d'intersection du maillage avec la frontière et donc et par conséquent un algorithme plus consistant.

Cette méthode ne permet pas de prendre en compte les matériaux à structures aléatoires et les matériaux à géométries complexes [82, 83].

C'est pourquoi, la recherche d'une autre méthode plus persistante est vraiment indispensable, comme la méthode des éléments finis (MEF), qui permet de faire des approximations de la fonction inconnue, alors que le MDF fait une approximation des opérateurs d'une équation différentielle.

IV.2.2 Méthode des éléments finis

Parmi les méthodes les plus utilisées dans la résolution des équations différentielles, la méthode des éléments finis (MEF), surtout les équations de Maxwell qui traitent des phénomènes électromagnétiques. Elle a été utilisée en premier lieu pour résoudre les équations d'élasticité et de la mécanique avant de l'adapter à l'électromagnétisme [84]. Elle est apparue après la MDF dans les années 70.

Cependant, son histoire revient à l'année 1943 [85-86]. La MEF est destinée à la plupart des problèmes rencontrés en pratique, que ce soit des problèmes permanents ou transitoires, linéaires ou non linéaires, définis dans un domaine à une, deux ou trois dimensions. Elle s'applique bien aux milieux mixtes. Son principe est d'approcher les variables inconnues par un polynôme aux nœuds du maillage. Les géométries connues sont mieux présentées par ce maillage aux éléments finis qu'aux différences finies. La variété de forme permet un maillage avec une densité variable et des conditions aux limites facilement choisies.

La MEF est présentée par une théorie mathématique très riche, qui préserve les propriétés des opérateurs mathématiques. Cependant, cette méthode nécessite un traitement spécial des équations, qui sont transformées à l'aide d'une formulation intégrale, puis discrétisées pour aboutir à un système d'équations algébriques. Dans le MEF, contrairement au MDF, l'attention n'est pas focalisée sur la résolution de l'équation de Laplace (ou autre), mais plutôt sur un problème de variation, concernant le principe d'énergie minimale dans un champ électrostatique fermé. La région du champ électrique considérée est divisée en éléments de n'importe quelle forme et taille (Figure IV.3).

Pour résoudre une équation différentielle, la MEF utilise une approximation par parties de la fonction inconnue. Néanmoins, la complexité des différentes géométries existantes des systèmes rend cela très difficile, voir impossible, pour trouver une approximation de la solution du problème étudié.

Donc pour éviter ce problème, on divise le domaine en sous-domaines (de la même façon que pour la MDF), appelés éléments finis, sur lesquels on réalise une interpolation dans le but d'approcher la fonction inconnue. Le domaine étudié est limité par une frontière où la valeur du potentiel est considérée connue.

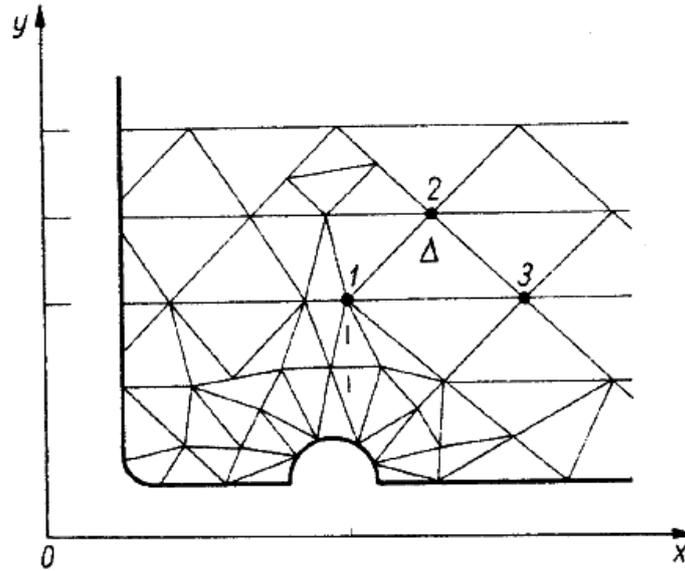


Figure IV.3: Fragment du champ avec le maillage destiné aux calculs par la méthode des éléments finis [53].

Les éléments finis utilisés pour discrétiser le domaine sont dans la plupart du temps associés en familles topologiques (segments, parallélépipèdes, prismes,...etc). Chaque élément est représenté par des points appelés nœuds géométriques. A chaque élément, la fonction modélisant le phénomène est définie par une interpolation polynomiale où l'inconnu sera calculé.

$$V = \sum_{i=1}^n \lambda_i V_i \quad (4.11)$$

Où n est le nombre de nœuds d'interpolations; λ_i sont les fonctions d'interpolation et V_i les valeurs nodales.

Le principe de base consiste à trouver la distribution des valeurs nodales qui vérifient les équations aux dérivées partielles et satisfont les conditions aux limites. Cela peut être mis en œuvre par une méthode variationnelle qui minimise une fonction au problème différentiel, ou en utilisant une méthode de projection telle que la projection de Galerkin qui traite directement l'équation différentielle partielle.

L'ordre du polynôme dépend du type d'élément; par exemple, pour un élément quadratique unidimensionnel, décrit par l'abscisse curviligne μ placée dans l'intervalle $[-1, 1]$, les fonctions d'interpolation sont [86-87] :

$$\begin{cases} \lambda_1(\mu) = \frac{1}{2}\mu(\mu - 1) \\ \lambda_2(\mu) = 1 - \mu^2 \\ \lambda_3(\mu) = \frac{1}{2}\mu(\mu + 1) \end{cases} \quad (4.12)$$

Considérons par exemple, l'équation de Poisson. Nous cherchons une approximation V' de V qui minimise la quantité R tel que :

$$R = \left(\Delta V + \frac{\rho}{\varepsilon} \right) \quad (4.13)$$

Où ρ est la densité de charge volumique.

Parmi les méthodes d'annulation d'une quantité donnée dans un domaine Ω , il y a la méthode des résidus pondérés; cette dernière est bien connue et souvent utilisée. On choisit un système de fonctions linéaires indépendantes W_n , appelées fonctions de projection, puis on annule toutes les intégrales (4.14) à chaque élément fini.

$$I_n = \int_{\Omega} W_n R d\Omega \quad (4.14)$$

Ceci donne une formulation intégrale de la méthode des éléments finis. Il existe également des sous-méthodes de la méthode des résidus pondérés (collocation point par point, collocation de sous-domaine, Galerkin, moindres carrés), tout dépend du choix des fonctions pondérées. La méthode de Galerkin est la plus utilisée. Elle consiste à prendre les mêmes expressions mathématiques des fonctions de projection et d'interpolation :

$$\lambda_i(\mu) = W(\mu) \quad (4.15)$$

Pour chaque élément, on annule les n intégrales (4.14) correspondant aux n fonctions de projection. Ce système d'équations peut être écrit sous une forme matricielle :

$$[A_e]\{V_e\} = \{b_e\} \quad (4.16)$$

$[A_e]$ est la matrice associée à l'élément considéré. Les coefficients dépendent des coordonnées des nœuds de l'élément. Les composantes de $\{V_e\}$ sont les inconnues aux nœuds du même élément. Les vecteurs $\{b_e\}$ prennent en compte les conditions aux limites possibles à certains nœuds de l'élément considéré. En écrivant l'équation (4.16) pour tous les éléments, on obtient une série d'équations algébriques parmi lesquelles la solution de potentiel dans le domaine étudié [106].

IV.2.3 Méthode des volumes finis

Dans cette méthode, le domaine d'étude est subdivisé en un nombre fini d'élément de volume de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (Figure IV.4). L'équation de dérivées partielles (EDP) est intégrée sur chaque volume élémentaire. Pour calculer l'intégrale dans ce volume élémentaire, la fonction inconnue est présentée à l'aide d'une fonction d'approximation entre deux nœuds consécutifs, ensuite la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude [88].

Grâce à un libre choix de la fonction de liaison entre nœuds consécutifs, la procédure conduit à une solution plus précise [89]. Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles en 3D. Cependant, cette méthode permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme quelconque, donc de traiter des géométries complexes ce qui est un avantage [90].

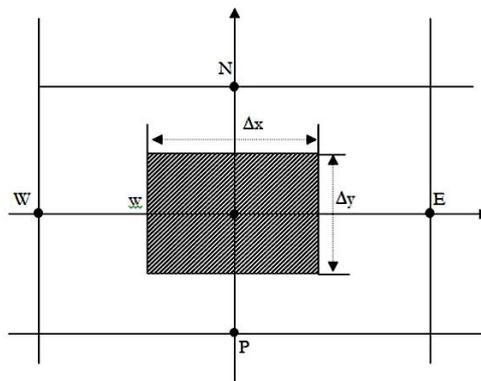


Figure IV.4 : Élément de volume bidimensionnel en coordonnées cartésiennes.

IV.2.4 Méthode des charges fictives

La méthode de simulation des charges est basée sur les notions des charges discrètes. Le principe consiste à remplacer la distribution des charges électriques surfaciques des conducteurs par des charges fictives discrètes placées à l'intérieur des conducteurs (Charge ponctuelle, charge linéiques de longueur infinie où finie, charge annulaire). Par exemple, sur la figure (4.5), qui montre trois charges q_1 , q_2 et q_3 , dans l'espace libre. En appliquant le principe de superposition, une relation peut être trouvée entre le potentiel V_i au point c_i et le nombre des charges fictives [91].

$$V_i = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2} + \frac{q_3}{4\pi\epsilon_0 r_3} = \sum_{j=1}^3 P_{ij} q_j \quad (4.17)$$

Le potentiel V_i du point c_i dû à toutes les charges fictives q_j introduites sera donné par :

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} q_j \quad (4.18)$$

Où: q_j est la charge fictive ;

p_{ij} est le coefficient de potentiel dépendant des types de charges et de la distance entre les points i et j ;

V_i est le potentiel du point i ;

n est le nombre total des charges fictives.

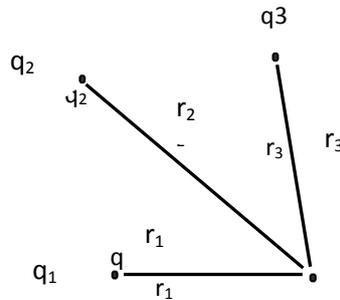


Figure IV.5 : Exemple de trois points de charges dans un espace libre [91].

L'expression de l'intensité du champ électrique est calculée par la superposition des grandeurs vectorielles de différents composants. Par exemple, dans un système de coordonnées cartésiennes, la composante E_i du champ électrique d'un point i est donnée par :

$$E_i = \sum_{j=1}^n F_{ij} q_j \quad (4.19)$$

F_{ij} , le coefficient de champ électrique est exprimé par :

$$F_{ij} = -\frac{\partial P_{ij}}{\partial x} \quad (4.20)$$

L'application de l'équation (4.20) pour un nombre de points d'un contour choisi dont le potentiel V_{ci} est connu, nous permet d'établir la forme matricielle suivante :

$$[q_j] = [P_{ij}]^{-1} [V_{ci}] \quad (4.21)$$

Après avoir déterminé les valeurs des charges fictives, on choisit alors n autres points de vérification (P_{vi}) situés aux frontières des conducteurs, et on calcule les potentiels V_{vi} donnés par les charges (q_j)

$$[V_{vi}] = [P_{vi}] [q_j] \quad (4.22)$$

L'écart entre le potentiel calculé V_{vi} et le potentiel réel V auquel est soumis le conducteur actif au point P_{ci} représentera la précision de calcul :

$$\varepsilon = \left| \frac{V_{ci} - V_{vi}}{V_{ci}} \right| \cdot 100 \quad (4.23)$$

La simulation est acceptable si cette valeur est inférieure à la précision du calcul souhaitée sinon il faudra redistribuer les charges et refaire tous les calculs. Dans le cas

général, la détermination de la distribution des charges fictives se base sur l'expérience de l'utilisateur de cette méthode. Néanmoins, il existe certaines relations empiriques permettant d'optimiser ces emplacements dans certains cas de figures simples [91].

IV.3 Le choix de la méthode

La méthode des différences finies que ce soit dans les domaines temporel ou spectral est particulièrement bien adaptée à l'étude des interactions entre une onde électromagnétique et un système hétérogène, notamment ceux formés par des matériaux complexes multiphasés dont les caractéristiques morphologiques, comme par exemple, les interfaces sont difficiles à appréhender. Cette méthode est un instrument de choix depuis les travaux de pionniers de Yee en 1966 [92], puis de Taflove [93] dans les années 1975. Ses atouts résident dans sa capacité à modéliser des structures à la fois bidimensionnelles (2D) et tridimensionnelles (3D).

De plus, elle peut s'appliquer en faisant usage soit de systèmes de coordonnées orthogonales, ou non-orthogonales. Elle permet notamment la résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel sur une structure dont les distributions spatiales de la permittivité et de la conductivité sont arbitraires. Les équations de base sont très simples et vérifient les formes dérivées et intégrales des équations de Maxwell.

IV.4 Les différentes étapes de la résolution numérique

Les différentes étapes de la résolution numérique sont résumées dans l'organigramme de la Figure (IV.6)

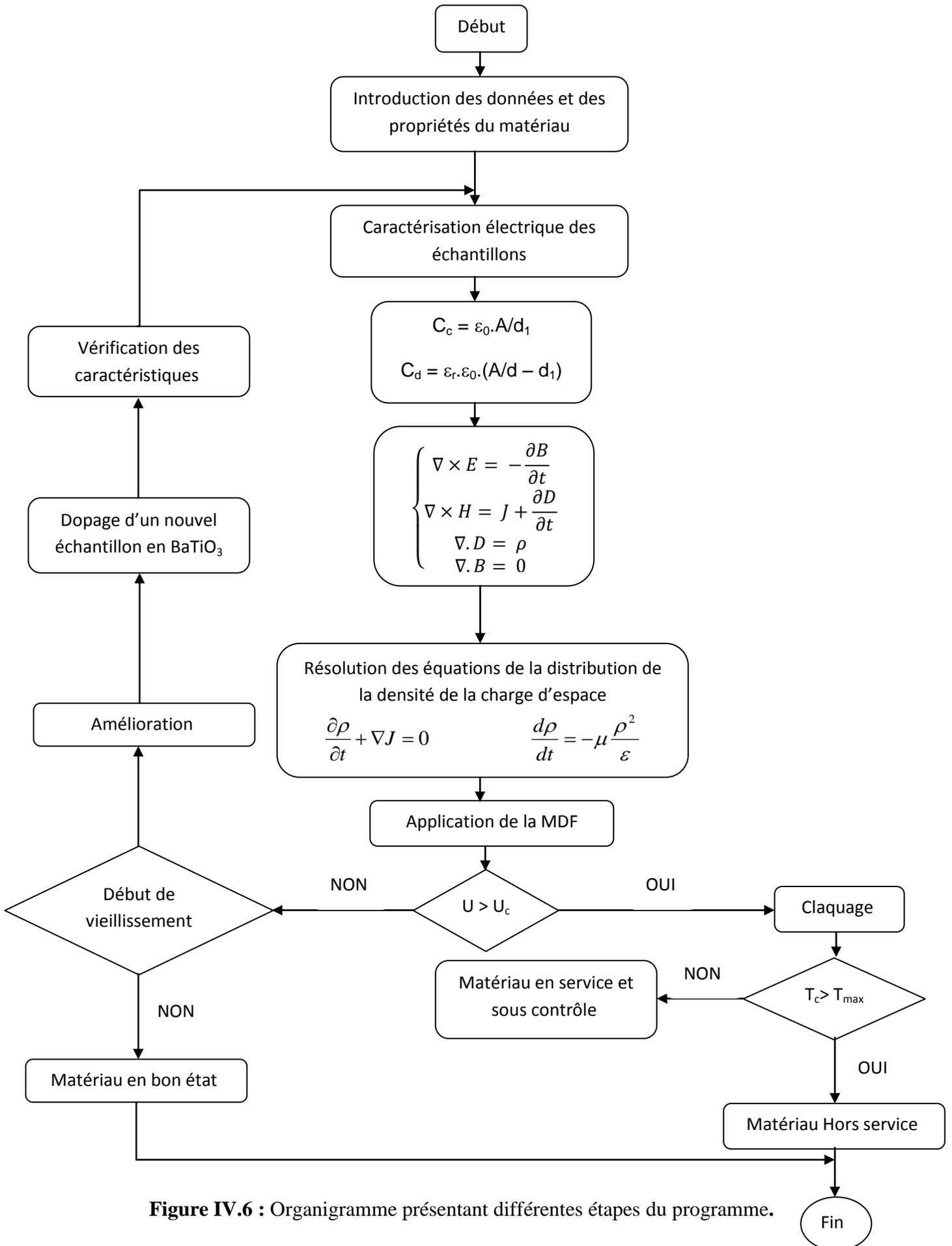


Figure IV.6 : Organigramme présentant différentes étapes du programme.

IV.5 Le modèle mathématique utilisé

Les équations de Maxwell décrivent les phénomènes électromagnétiques sont données par le système d'équations (4.24) [94] :

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot D = \rho \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

La première équation est la loi d'induction de Faraday. La seconde est la loi d'Ampère modifiée par Maxwell pour inclure le courant de déplacement $\partial D / \partial t$. La troisième et la quatrième sont les lois de Gauss pour les champs électriques et magnétiques. Le terme courant de déplacement $\partial D / \partial t$ dans la loi d'Ampère est essentiel pour prédire l'existence d'ondes électromagnétiques propagatrices.

Les quantités E et H sont les intensités de champ électriques et magnétiques et sont mesurées en [V/m] et [A/m], respectivement. Les grandeurs D et B sont les densités de flux électrique et magnétique et sont exprimées en [coulomb /m²] et [weber /m²], ou [tesla]. D est également appelé le déplacement électrique, et B l'induction magnétique.

Les quantités ρ et J sont la densité de charge volumique et la densité de courant électrique (flux de charge) de toute charge externe (c'est-à-dire n'incluant aucune polarisation induite de charges et de courants). Ils sont mesurés respectivement en [C/m³] et en [A/m²].

Le terme à droite de la quatrième équation est zéro car il n'y a pas de monopole magnétique des charges. La densité de charge et du courant ρ , et J peuvent être considérée comme les sources du rayonnement électromagnétique des champs. Leurs applications aux problèmes de propagation des ondes, ces densités sont localisées dans l'espace.

IV.6 Le modèle géométrique utilisé avec conditions aux limites

Nous avons utilisé un échantillon de même propriétés et dimensions que le cas réel. Nous avons supposé que la cavité de l'air est de forme cylindrique (Figure IV.7).

Pour la résolution numérique du problème il faut bien définir les conditions aux limites. Il n'y a pas de difficulté quant aux conditions aux limites de l'équation de Poisson: conditions de Dirichlet sur les deux électrodes et condition de Neumann sur l'axe de symétrie et les frontières extérieures (suffisamment éloignées). Les conditions aux limites de l'équation de conservation de la charge sont plus compliquées et moins claires.

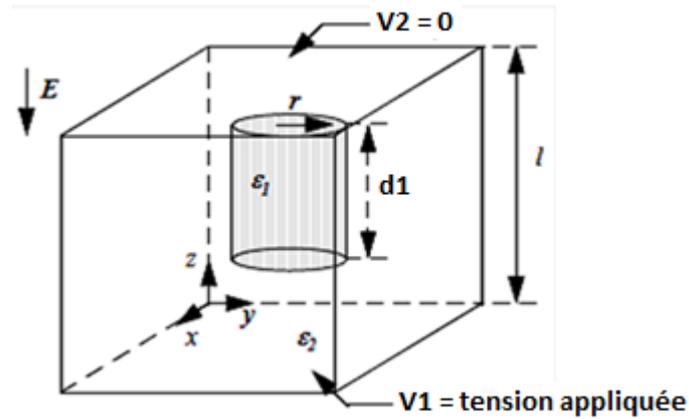


Figure IV.7 : Le modèle avec les conditions aux limites

IV.7 Conditions de claquage des diélectriques

L'étude du claquage des isolants jusqu'à ce jour, se réfère aux travaux de Paschen. La courbe fournit la tension de claquage d'un gaz en champ uniforme en fonction du produit [pression-distance] inter-électrode [102]. Celle de l'air à 20°C est représentée sur la Figure [IV.8]. Cette courbe présente le minimum de Paschen pour un tel claquage.

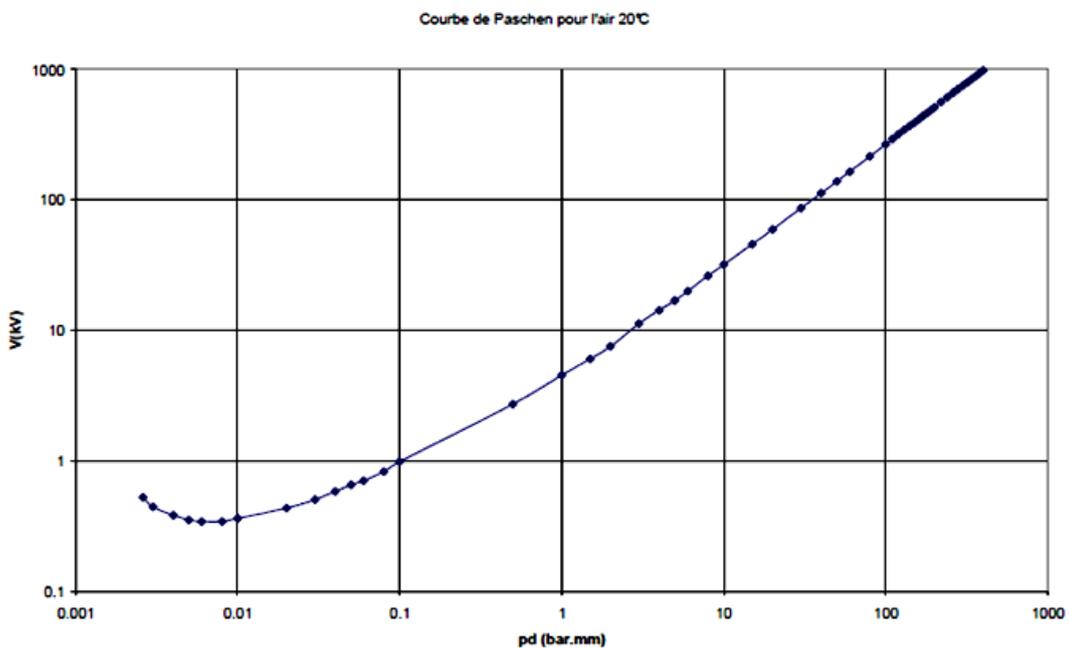


Figure IV.8 : Courbe de Paschen dans l'air à 20°C [103].

IV.8 Principaux effets induits par la présence de la densité de la charge d'espace

IV.8.1 Définition de la charge d'espace

La charge d'espace caractérise la non-neutralité électrique dans une région d'un milieu dense (liquide, solide ou gazeux). L'accumulation de charges dans un solide peut conduire à une conductivité électrique non uniforme. La non-homogénéité de la conductivité implique que le champ ne réponde pas à une distribution Laplacienne par la présence de charges dans l'isolant [101]. Plusieurs phénomènes sont à l'origine de la formation de charges d'espace dans le polymère. Outre les charges accumulées sous l'effet du gradient de conductivité, la quantité et la distribution des charges d'espace sont régis par les mécanismes de génération, de transport et de piégeage de charges. Dans le plus simple des cas, la conductivité s'exprime par l'équation (4.25) où interviennent la densité n et la mobilité μ des espèces chargées :

$$\sigma = e.n.\mu \quad (4.25)$$

IV.8.2 Origine de la charge d'espace dans les isolants polymères

Les charges peuvent être générées sous contrainte DC par différents mécanismes, allant de l'injection aux électrodes, aux phénomènes d'ionisation ou à la présence de résidus ioniques (Figure IV.9). L'équilibre entre génération et déplacement des charges n'étant pas toujours respecté, il se produit une non-homogénéité de la distribution de charges soit la formation de charge d'espace.

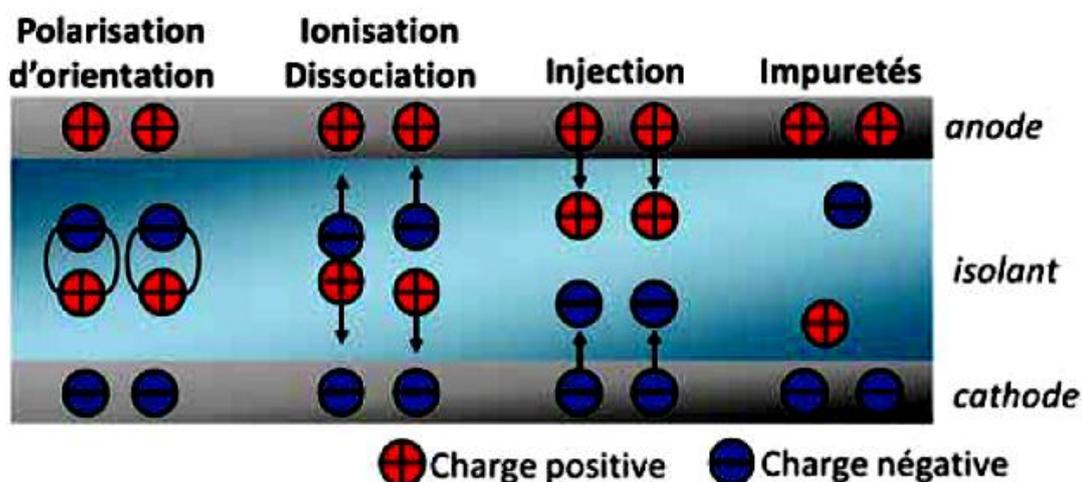


Figure IV.9 : Schéma descriptif des différentes origines de la charge d'espace [101].

Sous contrainte AC, le champ électrique suit une distribution capacitive déterminée par la permittivité de l'isolant ou de l'association d'isolants. Au contraire, le champ électrique sous contrainte DC est contrôlé par la résistivité de l'isolant. Or, la résistivité des polymères dépend fortement de la température, et dans une moindre mesure du champ (effets non-linéaires). En présence d'un gradient thermique, le champ électrique est redistribué et tend à être reporté vers les régions les plus froides [99].

Ces matériaux sont définis comme de bons isolants électriques, mais aussi thermiques. Ainsi, lors de leur utilisation dans le transport d'énergie HVDC, les pertes par effet Joule dans le conducteur amènent à un échauffement du câble et à un gradient thermique selon le rayon, et, d'autre part, le champ est dépendant du rayon en raison de la géométrie divergente. La conductivité qui est une grandeur dépendante de ces deux paramètres, champ et température, est à l'origine de la redistribution du champ et de la formation d'une charge d'espace associée à cette redistribution [100].

IV.8.3 Détermination de la densité initiale de la charge d'espace

La valeur initiale de la densité de charge d'espace est déterminée par les expressions suivantes [95-104]:

$$\rho_0 = k \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{V_{app}}{d^2} \quad (4.26)$$

Avec k est une constante qui dépend du diélectrique, V_{app} est la tension appliquée et d est la distance inter-électrodes.

L'estimation de la charge d'espace pour les autres nœuds du maillage est obtenue en utilisant la méthode simplifiée des caractéristiques vérifiant l'équation de continuité du courant, dans laquelle les lignes caractéristiques représentant l'évolution spatiale de la charge d'espace sont celles du champ électrique.

IV.8.4 Méthodes des caractéristiques

A l'extérieur de la zone d'ionisation, la conservation de la charge est interprétée par l'équation (4.27) [96-97]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla J = 0 \quad (4.27)$$

La relation entre E et J est donnée par :

$$\vec{J} = \rho \mu \vec{E} \quad (4.28)$$

La combinaison des équations (4.27) et (4.28) donne une équation aux dérivées partielles gouvernant l'évolution de la densité de charge :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\mu \vec{E}) \nabla \rho = -\mu \frac{\rho^2}{\varepsilon_0} \quad (4.29)$$

Quand il s'agit d'un cas de phénomène stationnaire nous avons : $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

La longueur de la trajectoire espace-temps est défini par :

$$\frac{dr}{dt} = \mu E \quad (4.30)$$

Le terme " $-\frac{\mu \rho^2}{\varepsilon_0}$ " de l'équation (4.29) représente la dérivée convective de la densité de charge. Alors l'équation (4.29) devient une équation différentielle ordinaire le long de la ligne caractéristique :

$$\frac{d\rho}{dt} = -\mu \frac{\rho^2}{\varepsilon} \quad (4.31)$$

L'équation (4.31) admet une solution analytique :

$$\rho(t) = \left[\frac{1}{\rho_0} + \left(\frac{\mu}{\varepsilon} \right) t \right]^{-1} \quad (4.32)$$

Où ρ_0 est la valeur de la densité de charge au point de départ de la ligne caractéristique [104].

IV.8.5 Méthode simplifiée des caractéristiques

Considérons le cas de la polarité positive et en considérant la mobilité des ions constante, nous aurons :

$$\nabla \cdot (\mu \cdot \rho \cdot E) = 0 \Rightarrow \nabla \rho (\mu \cdot E) + \rho \cdot \mu \cdot \nabla \cdot E = 0 \Rightarrow \nabla \rho \cdot (\mu \cdot E) + \frac{\mu}{\varepsilon_0} \cdot \rho^2 = 0 \quad (4.33)$$

Alors nous avons :

$$\nabla \rho = -\frac{\rho^2}{\varepsilon_0 E} \quad (4.34)$$

Le long des lignes de champ, l'équation (4.33) peut s'écrire :

$$\frac{\partial \rho}{\partial r} = -\frac{\rho^2}{\varepsilon_0 E} \quad (4.35)$$

L'intégration de (4.35) donne les valeurs de la densité de la charge d'espace aux nœuds localisés le long des lignes de champ.

Nous utilisons la méthode des différences finies (MDF) pour résoudre l'équation (4.35). Cette méthode repose sur le principe de l'itération, c'est à dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation, plus précise, et ainsi de suite. L'idée est que la valeur suivante (ρ_{i+1}) est approchée par la somme de la valeur actuelle (ρ_i) et du produit de la taille de l'intervalle (h) par la pente estimée [105].

IV.9 Résultats et discussions

Dans cette partie, on présente l'influence de la charge d'espace et du dopage (avec le composite BaTiO₃) sur la différence de potentiel entre les électrodes (cavité plus le reste de l'échantillon) et sur la distribution du champ électrique. On étudie aussi le cas de cavité susceptible d'exister dans l'échantillon. On étudie l'exemple d'une cavité. Différents pourcentages du composite ont été utilisés (0%, 5% et 10% du BaTiO₃). Le choix du pourcentage du dopage était basé sur une étude précédente [107], où les meilleurs résultats ont été observés pour des taux de 5% et 10% de BaTiO₃. Moins de 5%, on remarque peu d'influence, presque négligeable ; et plus de 10% le matériau perd ses caractéristiques diélectriques et on se trouve confronter à d'autres phénomènes tel que la fissuration de l'échantillon et à une distribution hétérogène du dopant : formation d'agrégats de BaTiO₃ en différents points de l'échantillon.

IV.9.1 Modèle électrique

Dans cette partie de l'étude, on s'est basé sur le modèle géométrique représenté sur la Figure IV.7 et les résultats expérimentaux des chapitres 2 et 3.

La capacité de la cavité est donnée par la relation (4.36)

$$C_c = \frac{A \cdot \epsilon_0}{d_1} \quad (4.36)$$

Les variations de la capacité de la cavité sont représentées dans la figure (IV.10). Nous constatons que cette capacité est inversement proportionnelle au volume de la vacuole.

D'après cette figure, on voit clairement que la capacité de la cavité diminue avec l'augmentation de l'épaisseur, et c'est tout à fait logique selon l'équation (4.36).

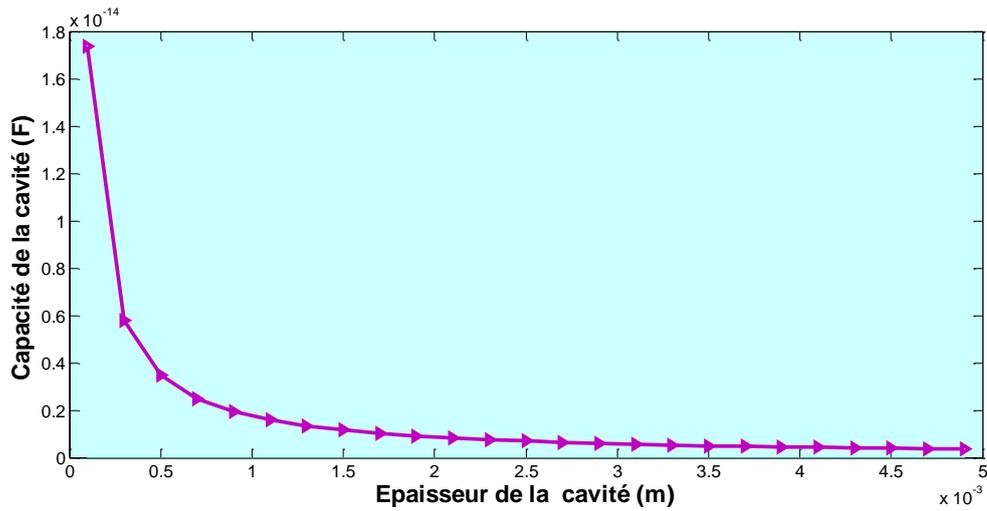


Figure IV.10: Variation de la capacité pour une cavité de forme cylindrique dans un diélectrique.

Les variations de la capacité C_d sont représentées dans la figure (IV.11). On admet que le gaz à l'intérieur du disque à une permittivité relative $\epsilon_r = 1$. La capacité du diélectrique voisin, d'aire A et de hauteur « d - d1 » et de permittivité ϵ_r est :

$$C_d = \frac{A \cdot \epsilon_r \epsilon_0}{d - d_1} \quad (4.37)$$

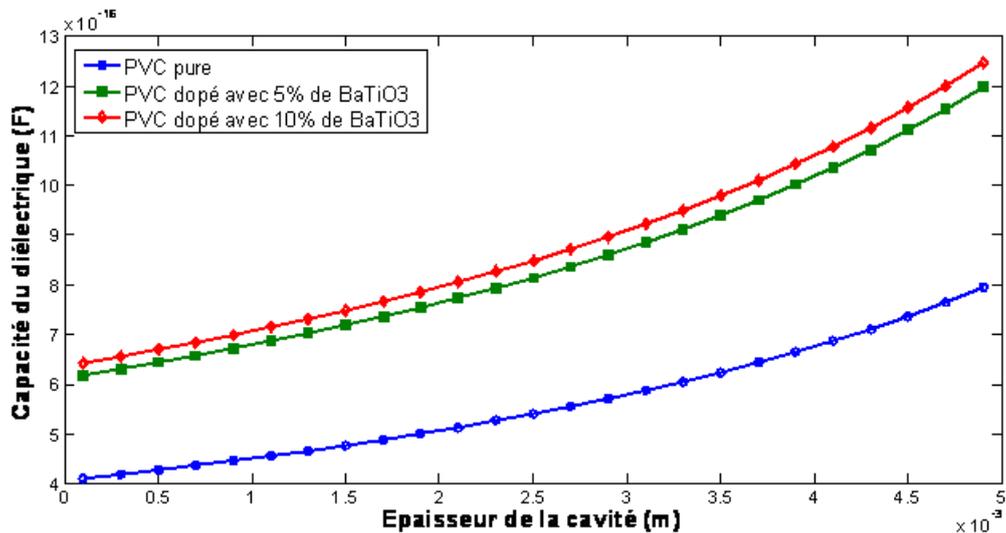


Figure IV.11 : Variation de la capacité du diélectrique au voisinage de la cavité

On remarque que la capacité du diélectrique (hors cavité), augmente par rapport à la capacité de la cavité calculée précédemment puisque celle ci est multipliée par ϵ_r ce qui conduit à l'augmentation du numérateur. En plus le dénominateur (d - d1) décroît à chaque fois que le

d_1 augmente, ce qui conduit à la croissance de la capacité du diélectrique en se déplaçant d'une électrode à une autre.

L'effet du dopage est bien observé sur la courbe, on voit que l'échantillon qui a le pourcentage le plus élevé (10%) a la plus grande capacité, et cela se justifie par sa grande permittivité conformément aux résultats expérimentaux.

La tension se répartit en raison de l'inverse de la valeur de la capacité (capacités en série). D'où la tension U_c aux bornes de la cavité :

$$U_c = U \cdot \frac{C_d}{C_c + C_d} \quad (4.38)$$

Avec U est la tension appliquée à l'électrode active.

La figure (IV.12) présente la variation de la différence de potentiel à l'intérieur de la cavité, elle augmente avec l'augmentation de l'épaisseur, puisque en s'éloignant de la première électrode, la différence de potentiel augmente de plus en plus. De même l'effet du dopage est remarquable pour les mêmes raisons que ceux cités précédemment.

En revanche du point de vue charges d'espace et effet du $BaTiO_3$, et partant d'une cavité d'épaisseur d_1 , sous l'effet du $BaTiO_3$ certains grains de la céramique pénètrent dans la cavité ce qui réduit son épaisseur. Plus d_1 diminue, plus le potentiel électrique diminue, plus les charges d'espace diminuent. Si la cavité est complètement remplie (épaisseur de la cavité $d_1=0$), la charge d'espace dans la cavité sera nulle et le potentiel électrique sera très réduit par rapport au potentiel de la cavité vide. La valeur du potentiel sera égale à celle du diélectrique, tel qu'on voit bien sur la figure IV.12, à $d_1 = 0$ pour les trois échantillons étudiés.

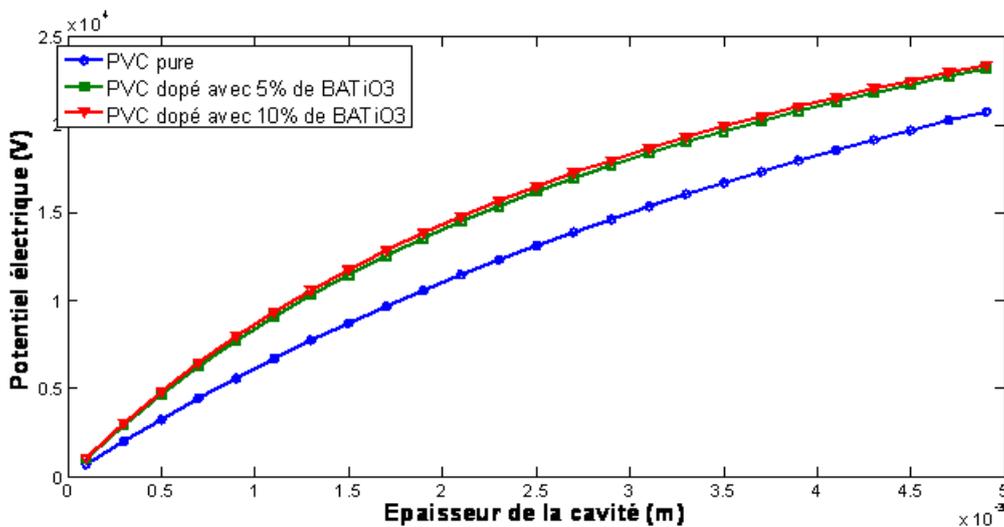


Figure IV.12 : Variation de la différence de potentiel entre les bornes de la cavité

Si E_c est le champ de claquage dans la cavité, la tension limite de l'apparition des décharges sur la plaque sera donc :

$$U_{lim} = E_c \cdot d_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d}{d_1} - 1 \right) \right\} \quad (4.39)$$

De même, comme l'épaisseur d_1 peut diminuer par incorporation de grains de BaTiO₃ dans la cavité, la tension limite de l'apparition des décharges sur la plaque diminue et le champ de claquage par conséquent augmente. L'addition d'oxyde de titanate de baryum à la matrice de PVC contribue donc à augmenter le champ limite, à réduire les charges d'espace et par conséquent à réduire les décharges partielles.

A partir des variations de la tension de claquage et en divisant chaque valeur par la distance d_1 , on détermine les variations du champ de claquage ($U_c = E_c \cdot d_1$). Ces variations sont représentées dans la figure (4.13).

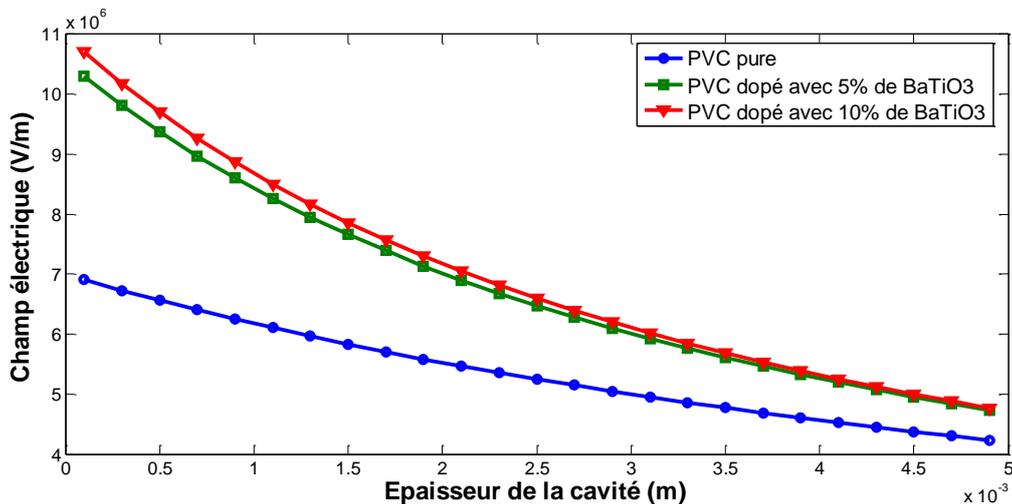


Figure IV.13 : Variation du champ électrique moyen à l'intérieur de la cavité

Comme la différence de potentiel augmente avec l'augmentation de l'épaisseur de la cavité, le champ électrique diminue, puisque on se rapproche de la deuxième électrode dont la tension est petite. Cependant comme le champ E_c est inversement proportionnel à l'épaisseur d_1 quand celle-ci diminue le champ électrique augmente.

IV.9.2 Modélisation numérique des distributions du potentiel et du champ électriques

Cette étape est la résolution numérique de l'équation de Poisson en tenant compte de la densité de la charge d'espace.

La résolution de l'équation de Poisson est réalisée par l'utilisation de la méthode des différences finis en 1D sous le logiciel Matlab. Nous avons étudié deux cas : isolant pure et isolant avec une seule cavité d'air.

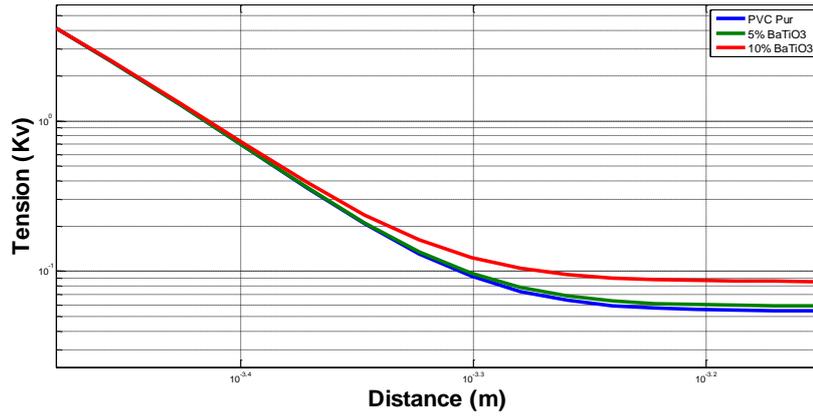
IV.9.2.1 Distribution du potentiel électrique

Par définition de l'opérateur gradient, le champ électrique traduit les variations du potentiel d'un point de l'espace à un autre. Nous constatons que :

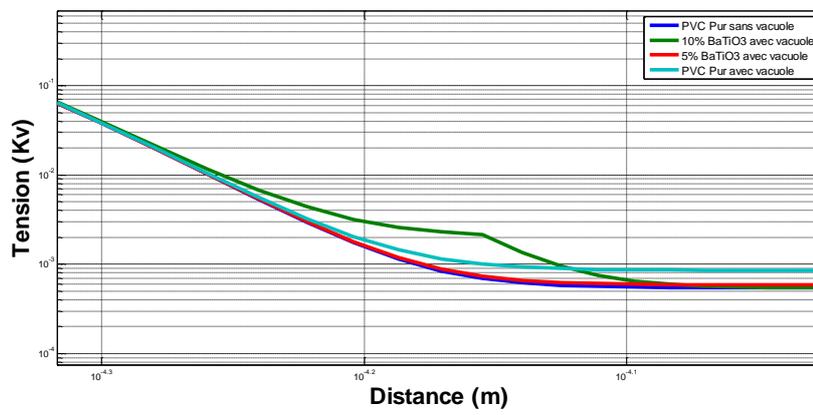
- ✓ plus les variations de potentiel sont importantes, plus le champ électrique est intense ;
- ✓ si le potentiel est constant, le champ électrique est nul ;
- ✓ le champ électrique est orienté du potentiel le plus élevé vers le potentiel le plus faible.

Les résultats de simulation montrent que le potentiel électrique décroît quand la distance inter-électrodes augmente. A faible distance inter-électrode (aux environs de la moitié de l'échantillon), les courbes caractéristiques des trois échantillons sont superposées. Au delà de cette distance, celles ci s'éloignent l'une de l'autre. On considère deux cas d'échantillons sans et avec vacuole. Sans vacuole, le potentiel électrique des composites, dans cette partie de la courbe, augmente avec le taux du dopant par rapport au PVC pur (Figure IV.14.a). Cependant en considérant la présence de vacuole, les courbes des potentiels électriques caractéristiques des échantillons, PVC pur sans vacuole, 5% de BaTiO₃ et 10% de BaTiO₃ sont superposées. En revanche l'échantillon contenant 10% de BaTiO₃ présente un pic bien résolu dans la région de la cavité (Figure IV.14.b). Le résultat montre bien donc qu'il y a eu incorporation des grains de BaTiO₃ dans la vacuole, ce qui rapproche le composite au PVC pur sans vacuole.

Cependant la figure (IV.14.b), montre que le potentiel augmente et atteint des valeurs plus aux moins élevées. Ces valeurs concernent particulièrement le composite à 10% de BaTiO₃, ce qui explique les résultats trouvés précédemment. Raison pour laquelle nos études ont été focalisées sur cet échantillon dans les régions des cavités.



a)

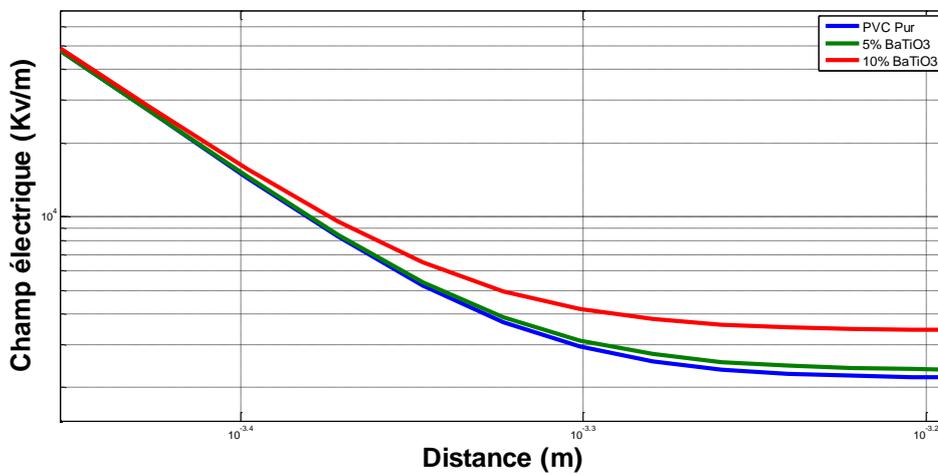


b)

Figure IV.14: Variation du potentiel électrique dans l'espace inter-électrodes avec et sans cavité d'air.

IV.9.2.2 Distribution du Champ électrique

Les variations du champ électrique le long de l'échantillon avec et sans cavité sont représentées sur la figures (IV.15).



a)

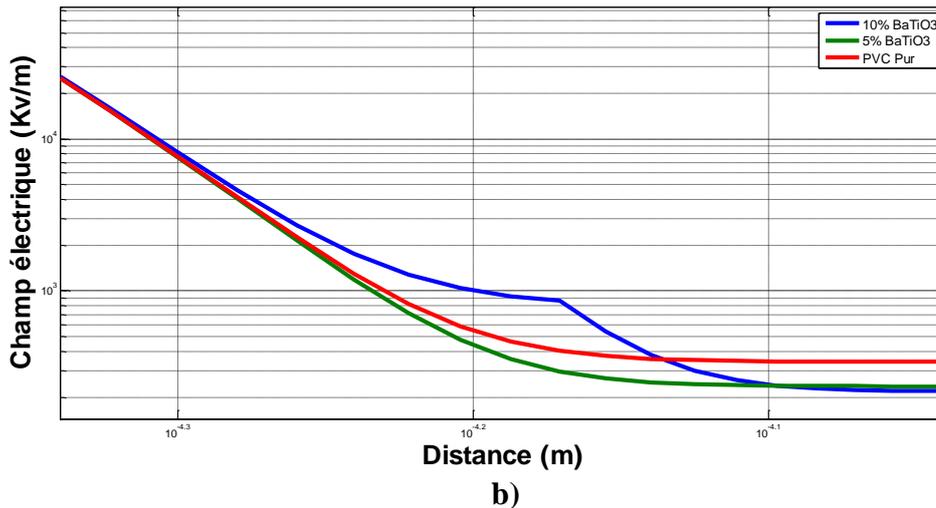


Figure IV.15 : Distribution du champ électrique dans l'espace inter électrode avec et sans cavité d'air.

On voit bien que la distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrode, et dans les deux cas avec et sans cavité, évolue de la même manière que le potentiel électrique (Fig.IV.14). On remarque que le champ électrique décroît avec l'augmentation de l'espace inter-électrodes. La région des cavités, concernant l'échantillon dopé à 10% de BaTiO₃ est caractérisée aussi par un pic de champ électrique plus intense par rapport à l'échantillon de PVC pur.

En effet, un champ électrique est une région de l'espace où une charge électrique est soumise à une force électrique. À proximité d'un corps chargé règne un champ électrique. Tout corps chargé est donc source d'un champ électrique.

Le champ électrique induit une série importante d'effets dans les isolants organiques parmi lesquels certains sont nuisibles et capables de compromettre la durée de vie de ces matériaux. On cite par exemple la baisse de la rigidité électrique à partir duquel la rupture du matériau se déclenche. Un autre effet important due à l'application du champ et pouvant avoir un rôle important dans le processus de dégradation du matériau est le courant électrique induit. Quant aux mécanismes de claquage dans les solides qui font intervenir une cavité gazeuse, il est nécessaire de calculer le champ dans cette cavité et d'évaluer les phénomènes de décharges dont elle peut être le siège. L'étude de la distribution du champ électrique est donc une phase importante dans l'analyse des propriétés des diélectriques.

Le claquage par décharges résulte de la propagation d'une arborescence électrique, structure filamenteuse ramifiée constituée de micro-canaux. Ces arborescences peuvent être engendrées par des renforcements locaux de champ, ou dans les matériels électriques par des

cavités gazeuses, sièges de décharges qui viennent perforer le solide et dans lequel elles se prolongent. Dans les solides, ces arborescences conduisent à une dégradation irréversible du matériau. La présence de dopage diminue le temps de propagation de l'arborescence, donc le temps de retard au claquage, mais celui-ci reste inéluctable.

IV.10 Conclusion

La méthode des différences finies a été choisie, dans ce chapitre, pour modéliser le diélectrique à base de PVC dopé à l'aide de la céramique BaTiO₃. L'étude était focalisée sur la charge d'espace susceptible d'exister dans le diélectrique. Pour valider les résultats expérimentaux obtenus dans le chapitre III, des vacuoles dans le PVC ont été simulées par des cavités cylindriques. L'état des échantillons caractérisés par MEB et la permittivité diélectrique du composite mesurée dans le chapitre III ont été introduits dans l'algorithme de simulation pour suivre l'évolution du potentiel électrique et la distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrode. Les résultats de simulation ont montré que la distribution du champ électrique, dans les échantillons sans cavité est homogène, et son intensité augmente avec le taux du dopant par rapport au PVC pur.

En revanche, les résultats obtenus sur les échantillons des composites ont montré que les grains de BaTiO₃ sont incorporés dans les cavités. Le potentiel électrique, inter-électrodes, du composite est comparable à celui du PVC pur. Le champ électrique inter-électrodes est réduit. L'échantillon chargé à 10% de BaTiO₃ est caractérisé par un pic représentant la distorsion du champ électrique dans la zone de la vacuole.

L'ajout du BaTiO₃ augmente la permittivité du diélectrique, augmente la tension limite de claquage et réduit les charges d'espace tout en gardant les normes requises des isolants ; puisque l'augmentation du champ électrique dans les pores conduit irrémédiablement au développement d'une arborescence électrique et au claquage précoce de l'isolant. La charge d'espace peut donc être l'électron germe du déclenchement de l'arc électrique dans l'isolant.

Finalement, le choix du taux BaTiO₃ est très important quant à l'amélioration des propriétés diélectriques de l'isolant et la réduction des charges d'espace. Les résultats obtenus dans ce chapitre ont confirmé ceux du chapitre III et que le taux de 10% de BaTiO₃ est le plus adapté.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et Perspectives

Connus pour leur grande capacité d'isolation électrique, les polymères ont occupé ce domaine. Ils sont devenus les isolants électriques par excellence.

L'étude traite la compréhension du processus de vieillissement des isolants polymères qui, de part leur utilisation, sont soumis à des champs électriques mais aussi à des contraintes thermiques et mécaniques.

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés aux propriétés structurales des polymères isolants électriques. En effet, ces matériaux imposent leurs propriétés physiques, mécaniques, électriques...etc. Leur structure a la particularité d'être hétérogène à une échelle macroscopique et présente ainsi une distribution spécifique de leurs propriétés. La prise en considération de cette microstructure est nécessaire pour décrire leur comportement sous champ électrique. Dans ce cadre, le travail a été traité en deux parties

Dans la première partie on a étudié le claquage électrique, qui est considéré l'un des majeurs problèmes et inconvénients pour ce genre d'isolation. On a montré qu'il est dû à plusieurs causes, parmi lesquelles, la mise sous champ électrique intense peut provoquer des micros arborescences dans le matériau. Ces dernières conduisent au claquage électrique et au vieillissement de l'isolant. Pour ce faire, l'expérience a été réalisée au sein du laboratoire haute tension à l'université de Béjaia à travers l'application de différentes tensions à différentes vitesses de rampe.

L'élaboration de différents échantillons (PVC vierge et dopé à 5% puis 10% à l'aide du BaTiO_3), nous a permis de comprendre et d'expliquer l'influence de tel composite sur le comportement d'un diélectrique. La constante diélectrique augmente lorsque BaTiO_3 augmente, mais sa valeur reste comprise dans la limite admissible pour une bonne isolation. La perte diélectrique diminue en fonction de la charge jusqu'à 10% en poids de BaTiO_3 . Pour une quantité de charge supérieure à 10% en poids, les pertes diélectriques augmentent, puisque la répartition des particules de BaTiO_3 était hétérogène formant, par conséquent, des agrégats qui sont à l'origine des pores, par conséquent de charge d'espace. Ces pertes diélectriques restent néanmoins inférieures à celles du PVC pur.

Le phénomène de relaxation est le deuxième point étudié dans cette première partie. Le phénomène de relaxation était présent dans tous les échantillons. Tous les processus de relaxation enregistrés (des plus lents au plus rapides) sont attribués à l'effet de polarisation interfaciale. Les fréquences de relaxation ont été évaluées respectivement à 19,9 Hz et 504 Hz

dans les gammes 20-140 Hz et 115-1 MHz. Ces valeurs ont été validées en utilisant le modèle de Cole-Cole.

L'incorporation de BaTiO₃ ne modifie pas la structure du PVC. Aucune bande IR supplémentaire n'est trouvée dans les échantillons composites, par rapport à celle du PVC pur, ce qui indique l'absence de dégradation et, par conséquent, des changements chimiques dans la matrice pendant le traitement qui pourrait influencer les propriétés électriques.

La seconde partie de l'étude concerne la modélisation du diélectrique par la méthode des différences finies (MDF). Le choix de cette méthode était dû à sa simplicité, sa rapidité, sa clarté et son applicabilité quant à l'étude des composites. L'équation de Poisson a été mise à profit pour analyser le composite vis-à-vis des charges d'espace. Le second membre de cette équation est souvent ignoré dans la majorité des travaux traitant ce problème à cause de sa complexité.

L'étude de la charge d'espace est en fait une suite du travail expérimental. Les données mesurées ont été injectées dans le programme de simulation. Le potentiel et le champ électrique entre électrodes ont été mesurés pour différents types d'isolants : air, PVC pur et composite. Les résultats montrent que l'incorporation des grains de la céramique BaTiO₃ dans les pores des échantillons, réduit les charges d'espace et améliore par conséquent la tension de claquage du matériau. En plus, les résultats de simulation valident aussi les valeurs expérimentales des pertes et de la permittivité. Finalement, le nouveau matériau isolant élaboré présente de meilleures performances par rapport au PVC pure et peut être utilisé comme gaine de câble électrique.

Perspectives :

Deux domaines de perspectives sont prévus:

1. Dans le domaine expérimental
 - Etudier d'autre isolation (dans les machines par exemple) avec d'autre composite (Al₂O₃ par exemple).
 - Une autre isolation exige une autre méthode d'élaboration et un autre processus de préparation.
 - Appliquer d'autre contrainte soit mécanique, soit thermique,...etc, pour avoir une idée plus large et plus complète du matériau
2. Dans le domaine modélisation

- Appliquer d'autre méthode numérique telle que la méthode des éléments finis et les volumes finis, en comparant avec les résultats obtenus.
- Appliquer d'autre modèle tel que le modèle du circuit équivalent électrique traitant le comportement des diélectriques.
- Prendre en considération d'autre phénomène réel tel que la charge couronne, dans les modèles de simulation.

Références Bibliographiques

- [1] C. Menguy, "Mesure des caractéristique des matériaux isolants solide", Techniques de l'ingénieur, D2310, Paris, 1997.
- [2] N. Lahoud, "Modélisation du vieillissement des isolants organique sous contrainte électrique, application à la fiabilité des matériaux", thèse de doctorat, université Toulouse III, 2009.
- [3] B. Fayolle, " Vieillissement physique des matériaux polymères", Techniques de l'Ingénieur, am3150, Paris, 2012
- [4] A. Greenwood, "A perspective on insulation systems in the electric power industry", IEEE, Trans on. Electrical Insulation, Vol. EI 15, n° 3, p.134-138, June 1980.
- [5] B. Adhikari, S. Majumdar, "Polymers in sensor applications"; Prog. Polym. Sci. 29, p. 699–766, 2004.
- [6] Bai Han et al., "Proc. Of the 9th International conference on properties and applications of dielectric materials", Harbin, China July 19-23, 2009.
- [7] V. Durman, J. Lelâk; "Influence of radiation on the dielectric properties of XLPE based insulation systems"; Journal of electrical engineering, vol. 61, n°4, p.229–234, 2010.
- [8] L. Boukezzi, M. Nedjar, L. Mokhnache, M. Lallouani, A. Boubakeur, « Annales de Chimie », Science des Matériaux, Vol. 31, n°. 5, p. 561-569, 2006.
- [9] A. Kuechler, *Hochspannungstechnik, Grundlagen, "Technologie, Anwendungen, Berlin"*, Springer, 2005.
- [10] J.J. Blanchard, B. Fallou, « Matériaux isolantes solides. Technique de l'ingénieure », K212.
- [11] S. Kitouni « impact addition en petites et grands proportions sur les propriétés physiques de la porcelaine », thèse de doctorat Université de Constantine 1, 2013.
- [12] Hazar Medhioud Rekik. « Caractérisation Structural et Suivi du vieillissement par diffusion X aux petite angles d'un polymère époxyde Contribution à l'étude des propriétés électriques », thèse de doctorat, faculté des sciences de Sfax (Tunisie), 2009.
- [13] Menguy, "Technique de l'ingénieur, traité génie électrique".
- [14] M.E Slama, « Étude expérimentale et modélisation de l'influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolatrices hautes tensions », thèse de doctorat, école central de Lyon, 2011.

- [15] G. Roussy, J. Francois Rochas, Claude Oberlin, chauffage diélectrique Technique de l'ingénieur, 2008.
- [16] C. Mayoux, C. Lahoud, N. Boudoul, J.V. Martinez, « Phénomènes précurseurs et rupture diélectrique des solides. In, « Matériaux diélectriques pour le génie électrique », Paris : Hermes – (Traité EGEM), Lavoisier, Vol. 1, 8, p 205-231, 2007.
- [17] J.P. Grine, J.A. Jowe, “ review of the influence of frequency on accelerated ageing of PE and XLPE cables”. RGE, Vol. 3, p 9-14, 1998.
- [18] J. Phalippou, « Verre : Aspects théorique », Technique de l'ingénieur, AF3600, Montpellier, Juillet, 2011.
- [19] A. Anton et J.L. STEINLES, « Micas et produits micacés », Technique de l'ingénieur, D2360, Toulouse, Mai 1997.
- [20] R. Fournié, « les isolants en électrotechniques, Essais et Mécanisme de dégradation. Application industrielle », Algérie, 1990.
- [21] Norme CEI 641 – 2, "Spécifications pour le carton comprimé et le papier comprimé à usage électrique", Méthodes d'essais, Juin 1996.
- [22] M. J.BLAZEC, “study of the reaction kinetics of the thermal degradation of the polymer”, thèse de doctorat, Toulouse 2008.
- [23] M. Handala, « Etude de la décharge de surface sous tension alternative 50 Hz - Effets sur une interface isolante air/solide », thèse de doctorat, Tizi Ouzou, 2007.
- [24] D.Christopher, Anderson et E.S Daniels, « Emulsion polymerization and Latex Application », Smothers Rapra publishing, p.160, 2003.
- [25] Peacock A.J, “Handbook of polyethylene: structure, properties, and Applications”, New York: Marcel Dekker, 534, (2001).
- [26] M. Pays, « Câbles de transport d'énergie – Technologies. Caractéristiques », Techniques de l'ingénieur, rubrique Réseaux Electriques Mixtes - Ingénierie des Réseaux, D 4520, décembre 1994.
- [27]. P. K. Dutta, R. Asiaie, S. A. Akbar and W. Zhu, “Hydrothermal synthesis and dielectric properties of tetragonal BaTiO₃”, Chem. Mater., Vol. 6, p. 1542-1548 (1994).
- [28] Wul,W.Goldman,I.M.C.R, Acad.Sci.Russ.Vol 40, 1946.
- [29] H. D. Megaw "Origin of ferroelectricity in barium titanate and other perovskite-type crystals", Acta Cryst.Vol 5, 1952.
- [30] H. Lidjci, « Étude, élaboration et caractérisation de céramiques piézoélectriques », Saarbrücken Editions universitaires européennes 2012.

- [31] C. Laurent, « Diélectriques solides et charge d'espace ». Techniques de l'Ingénieur, Pack Génie électrique, D 2 305, p 1-13, 1999.
- [32] S.W. Rowe, "Electrical ageing of composites: An industrial perspective", Proc. 2007 IEEE Int. Conf. Sol. Dielectr., Winchester UK, p 401-406, 2007.
- [33] G.O. Lavalée, « Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescent comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension », Th.: Génie Electrique: Toulouse : p. 177, 2004.
- [34] J.F. Fauvarque, « Polymères pour isolants électriques. Propriétés électriques des polymères et applications ». Groupe Français d'Etudes et d'Applications des Polymère, GFP, ch. VII, p 273-318, 1993.
- [35] V.Biasi, « Modélisation thermique de la dégradation d'un matériau composite soumis au feu », thèse de doctorat, Toulouse 2014.
- [36] L.Dissado, G. Mazzanti, G.C. Montanari, "The incorporation of space charge degradation in the life model for electrical insulating materials", IEEE Trans. Dielec. Elec. Insul, Vol. 2, pp 1147-1158, 1995.
- [37] P.Rain, « Etude des précurseurs de la rupture diélectrique des isolations composites à matrice époxyde en électrotechnique », thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [38] M.B. Keyrouz , « Etude des matériaux isolantes d'encabulation pour la montée en température des modules de puissance haute tension », thèse doctorat Université de Toulouse ,2011.
- [39] G. L. Roy, C. Gray, B. Hutzler, J. Lalot, Ch Dubanton , " les propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tension", Edition eyrolles, Paris 1984.
- [40] Coelho and B. Aladenize, « Les Diélectriques- Propriétés diélectriques des matériaux Isolantes », Hèmes, paris, 1993.
- [41] R.Fourniés and R.Coelho, « Diélectriques-Bases Théoriques », Techniques de l'ingénieurs, 2000.
- [42] P. Quennehen, « Étude de la dégradation de la fonction isolation de câbles HT isolés au PVC », thèse de doctorat, université de Grenoble, 2014.
- [43] C. Cheballah, « Étude des mécanismes physiques à l'origine de la permittivité colossale observée dans certaines céramiques », thèse de doctorat, université de Toulouse III, 2014.
- [44] F. Saysouk, « Elaboration et caractérisation de films polyimide/nitrure de bore nanocomposites pour l'isolation électrique à haute température », thèse de doctorat, université de Toulouse III, 2014.

- [45] N. Bouhli « Etude physique de la formation de films a base polymères conducteurs et applications en micro –électronique », thèse doctorat, Université bordeaux I ,2009.
- [46] P. Rebort, "Matériaux de l'électrotechnique", Edition Georgi, 1979.
- [47] CEI 93, "Méthodes pour la mesure de la résistivité transversal et la résistivité superficielle des isolants électrique solide", 2eme édition, Genève, Suisse, 1980.
- [48] P. Robert, " Matériaux de l'électronique", Edition Dunod, Paris, 1979.
- [49] M. Fontaine, "Structures macromoléculaires", Techniques de l'ingénieur, A 3041, A 9 I, 1975.
- [50] L.Boukezzi, "Influence du vieillissement électrique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans les câbles de moyenne tension" Thèse de doctorat, école national polytechniques, juin 2007,
- [51] B. Djaffar, "Influence de vieillissement thermique sur les propriétés de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM)" Thèse de doctorat, Université MOULOU MAMMERI, TIZI-OUZOU 2010.
- [52] F.SandrolinI, A. Motori, S. Masoni, G.C. Montanari, G. Pattini et L. Simoni, "Evaluation of thermal and electrical aging of an insulating composite material by dielectric and microstructural investigations" IEEE International Symposium on Electrical Insulation, p. 280–283, 1984.
- [53] S. Orłowska, "Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale", Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de Lyon, 2003.
- [54] J. Chamberain, "The determination of refractive index spectra by Fourier spectrometry", Infrared Physics, Vol. 9, 1969.
- [55] J. Connes, P. Connes, "Near-Infrared Planetary Spectra by Fourier Spectroscopy. I. Instruments and Results", Journal of the Optical Society of America Vol. 56, 1966.
- [56]. P. Sabatier, " Etude du système $Mn_{3-x}Co_xO_4$ ($0 \leq x \leq 3$) sous forme de poudres et de céramiques. Structure, microstructure, propriétés magnétiques et électriques Applications aux thermistances à Coefficient de Température Négatif (C.T.N.) ", Thèse de doctorat. Université Toulouse III, 2009.
- [57] F. Kahoul, "Elaboration et caractérisation de céramiques PZT dopé et détermination de la frontière morphotropique (FMP) ". Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.

- [58] I. K. Bishay a, S. L. Abd-El-Messieh , “ Electrical, mechanical and thermal properties of polyvinyl chloride composites filled with aluminum powder”, *Materials and Design*, Vol. 32 p. 62–68, 2011.
- [59] P. K. Khare, A. Pal, “The effect of electric field stress on pure poly(vinyl chloride), poly(methyl methacrylate) and their polyblend samples”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 68 p. 328–336, 2010.
- [60] M. A. Alam, M. H. Azarian, ”Temperature and voltage aging effects on electrical conduction mechanism in epoxy-BaTiO₃ composite dielectric used in embedded capacitors”, *Microelectronics Reliability*, Vol. 51,p. 946–952, 2011.
- [61] C. V. Bouanga, K. Fatyeyeva, ”Study of dielectric relaxation phenomena and electrical properties of conductive polyaniline based composite films”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 356, p. 611–615, 2010.
- [62] J. Òrrit, J. C. Cañadas, J. Sellarès, J. Belana, “Identification of dipolar relaxations in dielectric spectra of mid-voltage cross-linked polyethylene cables”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 69, p. 119-125, 2011.
- [63] C. S. Ramya, S. Selvasekarapandian, G. Hirankumar, T. Savitha, P. C. Angelo, “Investigation on dielectric relaxations of PVP–NH₄SCN polymer electrolyte”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Vol. 354, p. 1494–1502, 2008.
- [64] R. Brahem, H. Rahmouni, N. Farhat, J. Dhahri, K. Khirouni, L. C. Costa, “Electrical properties of Sn-doped Ba_{0.75}Sr_{0.25}Ti_{0.95}O₃ perovskite”, *Journal of Ceramics International*, Vol. 40, p. 9355–9360, 2014.
- [65] T. Nezakati, A. Tan, A. Seifalian, “Enhancing the electrical conductivity of a hybrid POSS–PCL/grapheme nanocomposite polymer”, *Journal of Colloid and Interface Science* Vol. 435, p. 145–155, 2014.
- [66] K. M. Jadhav and al, “Dielectric relaxation and ac conductivity of polyaniline–zinc ferrite composite”, *Journal of Composites Part B*, Vol. 43, p. 3406–3411, 2012.
- [67] M. Lazebnik, M. Okoniewski, J. H. Booske, S. C. Hagness, “Highly accurate Debye models for normal and malignant breast tissue dielectric properties at microwave frequencies”, *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, Vol. 17, p. 822-824, 2007.
- [68] J. Xiang, D. Cheng, F. S. Schlindwein, N. B. Jones, “On the adequacy of identified Cole–Cole models”, *Computers & Geosciences*, Vol. 29, p. 647–654, 2003.
- [69] L. C. Haynes, J.P. Locke, “Microwave permitivities of cracker dough, starch and gluten”, *Journal of microwave power and electromagnetic energy*, Vol. 30, 1995.

- [70] Y. Marina Koledintseva, "Extraction of Lorentzian and Debye parameters of dielectric and magnetic dispersive materials of FDTD modeling", *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 5, p. 97-100, 2002.
- [71] T. Samiha Bishay, "Numerical methods for the calculation of the Cole-Cole parameters", *Egypt. J. Sol.*, Vol. 23, p. 179, 2001.
- [72] International Standard Norme IEC 60811-3-2, Second edition 2005-03. Norme ICE.
- [73] A. Choudhury, "Dielectric and piezoelectric properties of polyetherimide/BaTiO₃ nanocomposites", *Mater. Chem. Phys.* 121(1-2), p. 280-285, 2010.
- [74] Edward K. Nyutu, Chun-Hu Chen, Prabir K. Dutta, and Steven L. Suib, "Effect of microwave frequency on hydrothermal synthesis of nanocrystalline tetragonal barium titanate", *J. Phys. Chem. C* 112, p. 9659-9667, 2008.
- [75] A. Patsidis, G. C. Psarras, "Dielectric behaviour and functionality of polymer matrix-ceramic BaTiO₃ composites", *Express Polymer Letters*, Vol. 2, p. 718-726, 2008.
- [76] S. Raghu, S. Sanjeev, G. K. Nagaraja, H. Devendrappa, "Effect of electron beam irradiation on polymer electrolytes : Change in morphology, crystallinity, dielectric constant and AC conductivity with dose", *Journal of radiation physics and chemistry*, Vol. 98, p. 124-131, 2014.
- [77] M. Olszowy, "Dielectric and pyroelectric properties of the composites of ferroelectric ceramic and poly(vinyl chloride)", *Condensed Matter Physics*, Vol. 6, p. 307-313, 2003.
- [78] A. M. Y. El-Lawindy, "Studies of Electrical and Physico-Mechanical Properties of EPDM Structure Foams", *Egypt. J. Solids*, Vol. 28, p. 97-107, 2005.
- [79] Ke Yu, Hong Wang, Yongcun Zhou, Yuanyuan Bai and Yujuan Niu, "Enhanced dielectric properties of BaTiO₃/poly(vinylidene fluoride) nanocomposites for energy storage applications", *Journal of Applied Physics*, Vol. 113, 034105, 2013.
- [80] L. Madani, S. Belkhat, A. Berrag and S. Nemdili, "Investigation of dielectric behavior of water and thermally aged XLPE/BaTiO₃ composites in the low-frequency range", *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 29, n°27, 1550186, 2015.
- [81] E. Hibert, « Modélisation de la combustion des gaines de câbles électriques », thèse de doctorat, université de Poitiers, 1999.
- [82] R. Sikora, *Teoria pola elektromagnetycznego*, WNT, Warszawa, 1997.
- [83] Z. Flisowski, *Technika wysokich napięć*, WNT, Warszawa 1999.
- [84] A. Krawczyk, *Podstawy elektromagnetyzmu matematycznego*, INBZT, Warszawa 2001.
- [85] R. Courant, *Variational methods for solution of problems of equilibrium and vibrations*, *Bull. Amer. Math. Soc.* Vol. 49, p. 1-23, 1943.

- [86] P. Silvester, *Finite elements for electrical engineers*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [87] P. Hunter, A. Pullan, *FEM/BEM Notes*, The University of Auckland - Department of Engineering Science, New Zealand 2001.
- [88] X. Cheng, « Quantification de l'incertitude paramétrique dans le calcul de débit d'absorption spécifique d'un téléphone mobile », thèse de doctorat, université de Paris-Saclay, 2015.
- [89] D. Benyoucef, « Modélisation particulière et multidimensionnelle des décharges hors équilibre à basse pression excitées par champs électromagnétique », thèse de doctorat, université Toulouse III, 2011.
- [90] E.G.D. Silva, « Méthodes et Analyse Numériques », Engineering school. Institut Polytechnique de Grenoble, p.99, 2007.
- [91] R.Djekidel, “calcul et réduction du champ électrique au voisinage d’une ligne de transport d’énergie électrique HT”, Mediamira Science Publisher, vol.55, p. 1-2, 2014.
- [92] K. S. Yee, *IEEE Trans. Antennas Prop.* AP-14, 303, 1966.
- [93] A. Taflove, *Computational Electrodynamics-The Finite-Difference Time-Domain Method* (Artech House Inc., Norwood MA, 1995) ; A Taflove et S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics : The Finite-Difference Time Domain Method* (Artech House Publishers, Boston, 2000), 2nd ed.
- [94] S. J. Orfanidis, “*Electromagnetic Waves & Antennas*”, June 21, 2004.
- [95] K.H. Stark, C.G. Garton, “Electrical strength of irradiated polyethylene”, *Nature*, 176, p 1225, 1955.
- [96] J. Blok, D.G. Legrand, “Dielectric breakdown of polymer films”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, p 288, 1969.
- [97] Cours LP203 – 2012-2013 – Chapitre.1.
- [98] Gabriel Cormier, GELE3222, chapitre 3, Matériaux.
- [99] M.S. Khalil, “International Research and Development Trends and Problems of HVDC Cables with polymeric Insulation,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 13, n°. 6, p 35–47, 1997.
- [100] T. T. Nga Vu, B. Vissouvanadin, S. Le Roy, M. Mammeri, I. Denizet, G. Teyssedre and C. Laurent, “Distribution de champ électrique dans des cables modèles MV-HVDC sous gradient thermique : simulation et mesure de distribution de charges d'espace”, *PROC.Symposium de génie électrique (SGE'14)*, 2014.
- [101] I.W. McAllister, G.C. Crichton, and A. Pedersen, “Charge Accumulation in DC Cables.

- A Macroscopic Approach,” Proc. IEEE Int. Symp. Electr. Insul. -ISEI-, p 212–216, 1994.
- [102] J.M. Meek and J.D. Craggs, *Electrical breakdown of gases*, John Wiley & Sons, New-York, 1978.
- [103] T.W. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind and H. Winkelkemper, “Breakdown of gases in uniform fields. Paschen curves for nitrogen, air and sulfurhexafluoride”, *Electra*, n°32, p. 61-82, 1974.
- [104] S. Abdel-Sattar, H. Singer, “Sutured corona profiles at ground surfaces and underneath HVDC”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, N°. 6, p. 1138-1144, 1990.
- [105] H. Nouri, H. Ait Said, Y. Zebboudj, N. Zouzou, L. Dascalescu, “Analysis of Electric Field and Current density in an Electrostatic Precipitator”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 23, Issue 2, p. 665-670, 2016.
- [106] K. Adamiak, “Adaptative approach to finite element modelling of corona fields”, *IEEE Transactions on industry applications*, Vol. 30, N°. 2, p. 387-393, 1994.
- [107] L. Madani, « Etude du comportement diélectrique des isolateurs en composite », thèse doctorat de l’université Sétif.1, 2016.

Les travaux de l'auteur

- **Publications :**

1. L. Madani, A. Berrag and S. Belkhiat, "BaTiO₃ effect on the dielectric properties of PVC", Ann.Chim. Sci. Mat., 2013, 38(3-4),pp. 167-177
2. L. Madani, S. Belkhiat, A. Berrag and S. Nemdili, "Investigation of dielectric behavior of water and thermally aged of XLPE/BaTiO₃ composites in the low-frequency range", International Journal of Modern Physics B, 29, N°27(2015)1550186.
3. A.Berrag, S.Belkhiat and L.Madani, "Investigation of dielectric behavior of the PVC/BaTiO₃ composite in low-frequencies", International Journal of Modern Physics B, Vol. 32, N°9 (2018) 1850110

- **Communications Internationales :**

1. A-Berrag ; S-Belkhiat : « Influence du BaTiO₃ sur les propriétés diélectriques du PVC ». Third International Meeting on Dielectric Materials, 14 – 18 December 2011 Monastir – Tunisia.
2. A.Berrag ; S.Belkhiat : « Influence de vieillissement sur les propriétés diélectriques des polymères dopés BaTiO₃ (application sur les câbles d'énergie MT/BT) ». 8ème conférence de la société française d'électrostatique, 3-5 Juillet 2012, Site universitaire, Cherbourg-Octeville, France.

- **Communications nationales :**

1. A-Berrag, M-Ayad, K-Saoudi et M-Benziane : « Vieillissement électrique des polymères dopés (PVC/BaTiO₃) ».1st National Conference on Electronics and Electrical Engineering (NCEEE'16). November 14-15, 2016, University of Bouira, Algeria.

Résumé

Le travail de cette thèse intitulé vise à améliorer les propriétés diélectriques du PVC comme gaine d'isolation du point de vue vieillissement et claquage. Afin d'augmenter la durée de vie des gaines, Les polymères ont été dopés à différents pourcentage (5%, 10%) du BaTiO₃. Différentes techniques de caractérisation et d'analyses tels que le microscope électronique à balayage (MEB) muni de diffraction de rayon (XRD) et EDS, la spectroscopie infrarouge, générateur haute tension et l'impédance-mètre ont été utilisées. La permittivité électrique, les pertes électriques, l'indice de perte, le vieillissement électrique et la tension de claquage ont été mesurés. Les fréquences de relaxations ont été mesurées et validées à l'aide du modèle Cole-Cole. En utilisant la modélisation par la méthode des différences finies, les testes de claquage ont permis de confirmer la réduction des charges d'espace et de valider les mesures expérimentales effectuées sur les échantillons élaborés.

Mots clés : Polymères composite, vieillissement électrique, claquage électrique, relaxation, charge d'espace, BaTiO₃, diélectrique.

Abstract

The work of this thesis aims to improve the dielectric properties of PVC as insulation sheath from the point of view aging and breakdown. In order to increase the life of the sheaths, the polymers were doped with different percentage (5%, 10%) of BaTiO₃. Different characterization and analysis techniques such as Scanning Diffraction (XRD) and EDS scanning electron microscope (SEM), infrared spectroscopy, high voltage generator and impedance meter were used. Electrical permittivity, electrical losses, loss index, electrical aging and breakdown voltage were measured. Relaxation frequencies were measured and validated using the Cole-Cole model. Using finite difference modeling, the breakdown tests confirmed the reduction in space loads and validated the experimental measurements made on the elaborated samples.

Key words : Composite polymers, electrical aging, electrical breakdown, relaxation, space charge, BaTiO₃, dielectric.

ملخص

يهدف عمل هذه الأطروحة إلى تحسين الخصائص العازلة للـ PVC كغمد عازل من وجهة النظر والشيخوخة . من أجل زيادة عمر الأعماد ، تم تعاطي البوليمرات بنسب مختلفة (5 % ، 10 %) من BaTiO₃ واستخدمت تقنيات مختلفة للتوصيف والتحليل مثل مسح حيود (XRD) ومجهر المسح الإلكتروني (SEM) EDS ، مطيافية الأشعة تحت الحمراء ، مولد الجهد العالي ومقاومة المعاوقة . تم قياس السماحية الكهربائية والخسائر الكهربائية ، ومؤشر الخسارة ، والشيخوخة الكهربائية والانهيال الكهربائي . تم قياس ترددات الاسترخاء والتحقق من صحتها باستخدام نموذج كول كول . وباستخدام نمذجة الاختلاف المتناهي ، أكدت اختبارات الأعطال انخفاض الأحمال الفضائية وصادقت القياسات التجريبية التي أجريت على العينات المفصلة.

الكلمات المفتاحية : بوليمرات مركبة ، شيخوخة كهربائية ، تعطل كهربائي ، استرخاء ، شحن مساحة ،

عازل BaTiO₃ ،