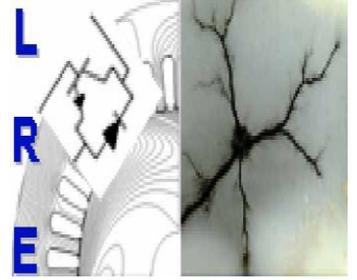


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée par :

MEZIANI Madjid

Magister en Electrotechnique UMMTO

En vue de l'obtention du titre de

Docteur en Sciences en Electrotechnique

Thème

**Etude par simulation numérique du
comportement des matériaux polymères utilisés
dans les isolations moyenne et haute tension en
présence d'inclusions**

Soutenue publiquement le 23/04/2017 devant la commission d'examen :

Président:	BOUBAKEUR Ahmed	Professeur / ENP
Directeurs de thèse:	MEKHALDI Abdelouahab TEGUAR Madjid	Professeur / ENP Professeur / ENP
Examineurs:	SAIDI-AMROUNE Nadia MOULAI Hocine BAYADI Abdelhafid	Professeur / USTHB Professeur / USTHB Professeur / Univ. de Setif

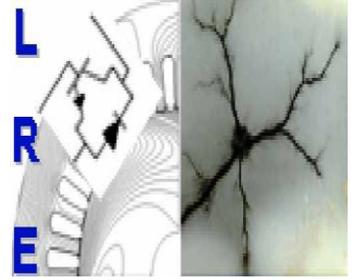
ENP (2017)

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Thèse de Doctorat en Sciences

Présentée par :

MEZIANI Madjid

Magister en Electrotechnique UMMTO

En vue de l'obtention du titre de

Docteur en Sciences en Electrotechnique

Thème

**Etude par simulation numérique du
comportement des matériaux polymères utilisés
dans les isolations moyenne et haute tension en
présence d'inclusions**

Soutenue publiquement le 23/04/2017 devant la commission d'examen :

Président:	BOUBAKEUR Ahmed	Professeur / ENP
Directeurs de thèse:	MEKHALDI Abdelouahab TEGUAR Madjid	Professeur / ENP Professeur / ENP
Examineurs:	SAIDI-AMROUNE Nadia MOULAI Hocine BAYADI Abdelhafid	Professeur / USTHB Professeur / USTHB Professeur / Univ. de Setif

ENP (2017)

Remerciements

*Mes premières pensées vont tout naturellement vers mes directeurs de thèse, Messieurs **MEKHALDI Abdelouahab** et **TEGUAR Madjid** professeurs à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui ont rendu possible ce travail de thèse en me faisant profiter de leurs vastes connaissances et de leur expérience. J'ai grandement apprécié leurs conseils judicieux et leur attention aux détails. Je ne peux que les remercier, pour leurs qualités humaines et pour la confiance qu'ils m'ont toujours témoignée. Leurs soutiens scientifiques et personnels m'ont été indispensables tout au long de ces années de travail.*

*Je remercie profondément Monsieur **BOUBAKEUR Ahmed** professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de soutenance.*

*Que Madame **SAIDI-AMROUNE Nadia** professeur à USTHB, soit vivement remerciée pour l'intérêt qu'elle a accordé au sujet et pour nous avoir fait l'honneur d'accepter l'évaluation de ce travail.*

*Mes sincères remerciements vont également à Monsieur **MOULAI Hocine** professeur à USTHB, pour avoir accepté de participer dans le jury de soutenance.*

*Je tiens vivement à remercier Monsieur **BAYADI Abdelhafid** professeur à Univ. de **Setif**, pour avoir accepté de participer dans le jury de soutenance.*

J'adresse mes sincères remerciements à mes chers parents, qui m'ont toujours encouragé tout au long de mes études.

يتمثل هذا العمل في دراسة تأثير وجود ثنائية من الأشجار المائية $1W$ و $2W$ على توزيع الحقل الكهربائي حيث يحدث تطور هذه الأشجار في نفس الوقت من الطبقة الشبه الناقلة الملتفة حول المادة العازلة الداخلية للكابل متوسط التوتر مع وجود أو عدم وجود الشحنة الحيزية. لهذا الغرض، نحن مهتمون في وضع نموذج رقمي تحت بيئة Comsol Multiphysics. في هذا النموذج، سنأخذ بعين الاعتبار مختلف العوامل المؤثرة على توزيع الحقل الكهربائي وبالتحديد على مستوى الواجهات المادية (الشجرة المائية / العازل / الطبقة شبه الناقلة). في الواقع، هذه العوامل قد تتسبب في تدهور خاصية العزل للبوليمر. من جهة أخرى، تتمثل مساهمتنا في دراسة تغير عامل تضخيم الحقل الكهربائي بدلالة البنية الهندسية للشجرة المائية وبدلالة قيم السماحية الموزعة خطياً داخل ثنائية الأشجار المائية. في وجود هذه الأخيرة، وبدون تواجد الشحنة الحيزية، لاحظنا أن تغير الحقل الكهربائي يتعلق بالبنية والأبعاد الهندسية للأشجار المائية وبمدى توزع السماحية داخلها. بالإضافة، ومن خلال أخذ الشحنة الحيزية بعين الاعتبار، تم تعيين أهمية خاصة لمدى تأثير الاستقطاب، الكثافة وسمك طبقة هذه الشحنة. النتائج المتحصل عليها تثبت أن تركيز الحقل الكهربائي يكون على مستوى الواجهات المادية في حالة وجود استقطاب معاكس، وعلى وجه التحديد من أجل الترتيب سالب - موجب. يمكن أن يترتب عن هذا ولادة الأشجار الكهربائية. لا يبدأ تطور هذه الأخيرة من المستوى العلوي للأشجار المائية فقط، ولكن يبدأ انطلاقاً من جذورها (الواجهات المادية)، هذه المنطقة تعتبر أكثر تعرضاً لظاهرة تطور الأشجار الكهربائية. من المهم أن نذكر أن القليل فقط من الأعمال والدراسات اهتمت بمشكلة الواجهات المتواجدة بين ثلاثة أوساط مختلفة (الشجرة المائية / العازل / الطبقة شبه الناقلة) على مستوى الكابلات الكهربائية.

كلمات البحث: الكابلات الكهربائية، العزل الكهربائي، البوليتيلان المعرق كيميائياً، الأشجار المائية، الشحنة الحيزية، الواجهات المادية، تأثير الاستقطاب، النمذجة العددية، الحقل الكهربائي.

Abstract

This work concerns the study of the impact of two water trees W_1 and W_2 growing simultaneously from both semiconducting layers wrapping the internal insulation of medium voltage cable in presence or not of the space charge, on the electric field distribution. For that, we are interested to develop a numerical model of the water trees under Comsol Multiphysics environment. In this model, we take into account various parameters influencing the electric field distribution, particularly at the level of the physical interfaces (tree structure/XLPE/semiconductor layer). Indeed, these parameters can constitute the cause of the deterioration of this polymer insulation. Moreover, our contribution in this investigation area appears clearly in the study of the variation of the electric field amplification factor according to the geometrical form of the water trees and the values of the permittivity distributed linearly inside the two considered water trees. In presence of water trees, without space charge, we noted that the variation of the electric field depends on the permittivity distribution inside the water trees and the geometrical parameters (length and width) as well as the form and the kind of trees (individual or continuous). With the association of the space charge, a particular interest is assigned to the effect of the polarity, the density and the thickness of space charge layers. The obtained results show that, the electric field concentrates rather at the levels of the physical interfaces in the case of the opposite polarities, especially for the negative-positive configuration. This could lead to the initiation of electrical trees. This latter start not only from the tips of the water trees, but also from the roots (physical interfaces). It is important to note that few researches were interested in this problem of the three medium interfaces (tree structure/XLPE/semiconductor layer) of the electric cables.

Key words: Electrical cable, XLPE insulation, water treeing, space charge, physical interfaces, polarity effect, numerical modeling, electrical field.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de l'impact de la présence de deux arborescences d'eau W_1 et W_2 se développant simultanément à partir des deux couches semi conductrices enveloppant l'isolation interne du câble moyenne tension en présence ou non de la charge d'espace, sur la distribution du champ électrique. Pour cela, nous nous sommes intéressés à l'élaboration d'un modèle numérique d'arborescences d'eau sous environnement Comsol Multiphysics. Dans ce modèle, nous prendrons en considération les différents paramètres influençant la distribution du champ électrique, particulièrement au niveau des interfaces physiques (arborescence/PRC/couche semi-conductrice). En effet, ces paramètres peuvent constituer la cause de la détérioration de cette isolation en polymère. En outre, notre contribution dans ce domaine d'investigations apparaît clairement dans l'étude de la variation du facteur d'amplification du champ électrique en fonction de la forme géométrique de l'arborescence d'eau et des valeurs de la permittivité distribuée linéairement à l'intérieur des deux arborescences d'eau considérées. En présence d'arborescences d'eau, sans la charge d'espace, nous avons constaté que la variation du champ électrique dépend de la distribution de la permittivité à l'intérieur des arborescences d'eau et des paramètres géométriques (longueur et largeur) ainsi que la forme et du type d'arborescences (individuelles ou continues). Avec l'association de la charge d'espace, un intérêt particulier est assigné à l'effet de la polarité, de la densité et l'épaisseur de la couche de la charge d'espace. Les résultats obtenus montrent que, le champ se concentre plutôt aux niveaux des interfaces physiques dans le cas des polarités opposées en particulier pour la configuration négative-positive. Cela pourrait conduire à l'initiation d'arborescences électriques. Ces dernières se développent non seulement à partir du sommet des arborescences d'eau, mais aussi à partir de leur racine (interfaces physiques), une région particulièrement plus vulnérable qu'à l'intérieur de ces arborescences d'eau. Il est important de souligner que peu de travaux de recherche se sont intéressés à ce problème d'interfaces de trois milieux (arborescence /PRC /couche semi-conductrice) des câbles électriques.

Mots clés: Câble électrique, isolation en PRC, arborescence d'eau, charge d'espace, interfaces physiques, effet de la polarité, modélisation numérique, champ électrique.

Sommaire

Introduction générale	8
Bibliographie	11

Chapitre I - Polymères et isolation des câbles électriques

I.1 Introduction.....	15
I.2 Classification des polymères.....	15
I.2.1 Selon leur origine	15
I.2.2 Selon leurs propriétés physiques.....	15
I.3 Principales fonctions des polymères	16
I.4 Matériaux diélectriques.....	16
I.4.1 Propriétés électriques des milieux diélectriques.....	16
I.4.1.1 Résistivité / Conductivité.....	16
I.4.1.2 Permittivité diélectrique.....	17
I.4.1.3 Permittivité complexe, angle de perte et facteur de dissipation.....	17
I.4.1.4 Rigidité diélectrique.....	19
I.5 Principe de la polarisation.....	20
I.5.1 Polarisation sous champ statique.....	20
I.5.2 Différents types de polarisation.....	20
I.5.2.1 Polarisation électronique.....	21
I.5.2.2 Polarisation atomique.....	21
I.5.2.3 Polarisation d'orientation.....	21
I.5.2.4 Polarisation interfaciale (ou de Maxwell-Wagner-Sillars)	22
I.6 Câbles électriques et l'isolation en polymère.....	23
I.6.1 Câble haute tension.....	23
I.6.2 Structure du câble haute tension unipolaire.....	24
I.6.3 Isolation des câbles souterrains.....	24
I.6.3.1 Câbles à isolation au papier.....	25
I.6.3.2 Câbles à isolation synthétique extrudée.....	25
I.6.3.2.1 Polyéthylène (PE)	26
I.6.3.2.2 Polyéthylène réticulé (PRC).....	26
I.6.3.3 Propriétés du PR comparées au PEBD.....	28
I.6.3.4 Epaisseur de l'isolation des câbles et la tenue diélectrique.....	28
I.7 Conclusion.....	28
Bibliographie	29

Chapitre II - Défauts et mécanismes de dégradations et de claquage de l'isolation des câbles électriques

II.1 Introduction.....	32
II.2 Structure et défauts.....	32
II.2.1 Cavités gazeuses.....	33
II.2.1.1 Microcavités préexistant au sein du matériau.....	33
II.2.1.2 Cavités créées au cours de la mise en œuvre ou du fonctionnement du câble...	34
II.3 Différents types de dégradations du polyéthylène réticulé (PRC).....	34
II.3.1 Dégradation chimique.....	34
II.3.2 Dégradation thermique.....	35
II.3.3 Dégradation mécanique.....	35
II.3.4 Dégradation électrique	35
II.3.4.1 Dégradations par arborescence d'eau.....	36
II.3.4.2 Différentes types d'arborescence d'eau.....	36
II.4 Mécanismes d'arborescence d'eau.....	38
II.5 mécanique sur la propagation d'arborescence d'eau.....	39
II.5.1 Effet de la fatigue mécanique sur la propagation d'arborescence d'eau.....	39
II.5.2 Dégradation électrochimique comme mécanisme de la propagation d'arborescence d'eau individuelle dans PRC.....	39
II.5.3 Effet de présence de cavités (air) sur la propagation d'arborescence d'eau.....	40
II.5.3.1 Cavité dans une isolation solide.....	40
II.5.3.2 Paramètres affectant l'activité de la décharge partielle.....	40
II.5.3.3 Champ d'initiation d'une décharge.....	40
II.5.3.4 Effets des décharges partielles.....	41
II.5.3.5 Le modèle de Hvidsten.....	41
II.5.4 Effet de la fréquence.....	42
II.5.4.1 Arborescence d'eau sous tension alternative.....	42
II.5.4.2 Arborescence d'eau sous tension continue.....	42
II.5.5 Effet du champ électrique sur la propagation des arborescences d'eau	43
II.5.6 Effet de la température sur la propagation des arborescences d'eau	43
II.5.7 Influence de la concentration en ion sur le développement des arborescences d'eau.....	43
II.5.8 développement d'arborescences avec le temps de vieillissement en présence d'humidité	43
II.6 Initiation de l'arborescence électrique à partir d'une arborescence d'eau.....	44
II.7 Comparaison entre les deux arborescences d'eau et électrique.	45
II.8 Suppression de la croissance des arborescences d'eau.....	46
II.9 Mécanisme de claquage des isolants solides.....	46
II.9.1 Claquage électrique.....	46
II.9.1.1 Claquage électrique intrinsèque.....	46
II.9.1.2 Claquage électrique par avalanches.....	47
II.9.1.3 Claquage thermique.....	47

II.9.1.4 Claquage électromécanique.....	47
II.9.1.5 Claquage dû au volume libre des polymères.....	48
II.10 Conclusion.....	48
Bibliographie.....	49

Chapitre III- Interface diélectrique/diélectrique et la charge d'espace dans l'isolation des câbles électriques

III.1 Introduction.....	58
III.2 Défauts et charge d'espace	58
III.3 Interfaces dans les câbles électriques.....	58
III.3.1 Interface semi-conducteur/diélectrique	59
III.3.2 Interface diélectrique/diélectrique	60
III.4 Charge d'espace aux interfaces dans les câbles électriques	60
III.5 Mécanismes d'accumulation de la charge d'espace au niveau de l'interface semi-conducteur/isolation	60
III.5.1 Interface d'ionisation	60
III.5.2 Effets de la surface des semi-conducteurs	60
III.5.3 Injection / extraction	60
III.6 Piégeage de la charge d'espace	61
III.6.1 Charge d'espace dans l'isolation en polyéthylène	62
III.6.2 Polarité de la charge d'espace	63
III.7 Effet des particules d'eau sur la charge d'espace	63
III.8 Polarisation des défauts d'isolation localisés tels que les arborescences d'eau	64
III 8.1 Initiation de l'arborescence d'eau.....	64
III 8.2 Croissance de l'arborescence d'eau	65
III.9 Comportement diélectrique de l'arborescence d'eau.....	68
III.9.1 Propriétés électriques de l'arborescence d'eau	68
III.9.1.1 Permittivité relative homogène.....	68
III.9.1.2 Permittivité relative complexe (non-homogène)	68
III.9.1.3 Conductivité électrique homogène	69
III.9.1.4 Conductivité électrique complexe non-homogène.....	69
III.10 Distribution de la charge d'espace dans l'isolation	69
III.10.1 Charge d'espace et interfaces diélectrique/diélectrique.....	69
III.10.2 Théorie de Maxwell Wagner pour la polarisation de l'interface	70
III.10.2.1 Quantité de la charge d'espace.....	71
III.10.2.2 Signe de la charge d'espace.....	73
III.11 Divergence de la théorie de Maxwell-Wagner.....	73
III.11.1 Effet de contact d'interface	73
III.11.2 Modèle de trois couches (modélisation de l'interface).....	74
III.12 Techniques de mesure de la charge d'espace	75
III.13 Mesure de la charge d'espace comme méthode de contrôle non destructif pour la détection des arborescences d'eau	75

III.14	Corrélation entre la quantité de la charge d'espace et la dégradation de l'isolation...	76
III.15	Distribution de la charge d'espace en présence d'arborescence d'eau	76
III.16	Application d'une tension alternative à fréquence de 50 Hz	78
III.17	Conclusion.....	79
	Bibliographie	80

Chapitre IV- Résultats et discussion

IV.1	Introduction.....	88
IV.2	Modèle de câble étudié.....	88
IV.2.1	Présentation du modèle du câble.....	88
VI.2.2	Géométrie des arborescences d'eau.....	89
VI.2.3	Permittivité des arborescences d'eau.....	90
VI.2.4	Equations régissant le système d'isolation.....	90
IV.3	Résultats et discussions.....	91
IV.3.1	Distribution du champ dans une isolation saine.....	91
IV.3.2	Distribution du champ dans une isolation en présence d'arborescences d'eau	91
IV.3.2.1	Influence du type d'arborescence sur la distribution du champ électrique.....	92
IV.3.2.2	Influence de la distribution de la permittivité diélectrique (homogène ou inhomogène) à l'intérieur des arborescences.....	93
IV.3.2.3	Effet de la forme géométrique des arborescences d'eau sur la distribution du champ électrique.....	94
IV.3.2.4	Influence de la longueur de l'arborescence d'eau.....	95
IV.3.2.5	Champ électrique au niveau des interfaces physiques en l'absence de la charge d'espace.....	96
IV.3.3	Distribution du champ électrique en présence de la charge d'espace.....	97
IV.3.3.1	Influence de la polarité de la charge sur la distribution du champ électrique...	97
IV.3.3.1.1	Couches de la charge d'espace (l_{c1} et l_{c2}) avec la même polarité.....	97
IV.3.3.1.2	Couches de la charge d'espace (l_{c1} et l_{c2}) avec des polarités opposées.....	99
IV.3.3.2	Effet de la densité de la charge d'espace.....	101
IV.3.3.3	Variation du champ électrique maximal avec l'épaisseur des couches de la charge d'espace au niveau des interfaces physiques.....	102
IV.3.4	Distribution du champ électrique à l'intérieur des arborescences d'eau sur l'axe y pour différents points d'abscisses x avec et sans la charge d'espace.....	104
IV.3.5	Impact de la nature des microcavités formant l'arborescence d'eau sur la distribution du champ électrique.....	105
IV.3.6	Effet de la dispersion des particules d'eau dans les cavités formées dans l'isolation sur l'atténuation de la propagation des arborescences d'eau.....	107
IV.4	Conclusion	110
	Bibliographie	112
	Conclusion générale	114

Introduction générale

La nécessité d'utiliser des niveaux de tension plus élevés dans les systèmes de puissance a conduit à une forte demande en matériaux isolants avec des performances élevées et un coût accessible. Avec les nouvelles générations de câbles de moyenne et haute tension, beaucoup de modifications sont introduites dans la conception des câbles électriques tels qu'éliminer l'utilisation traditionnelle de l'isolation au papier imprégné. Ceci a permis l'utilisation des matériaux polymères extrudés comme isolation de ces câbles. Le polyéthylène réticulé (PRC) est très utilisé à cause de ses bonnes propriétés électriques (structure non polaire) combinées avec de bonnes propriétés physiques et mécaniques [1]. Ce type de matériau est le plus utilisé dans le transport d'énergie et la distribution de l'électricité jusqu'à 500 kV [2-4].

Les propriétés électriques de ce matériau synthétique, sont tout à fait satisfaisantes pour l'isolation des câbles de moyenne et haute tension, quand elles sont maintenues dans un environnement sec. Cependant, dans un environnement humide, la matière première de l'isolation est exposée aux arborescences d'eau. Ce processus de dégradation connu sous le nom d'arborescence d'eau a été découvert pour la première fois par Miyashita en 1969 [5] et reste toujours l'une des causes principales du vieillissement électrique de l'isolation à base de polymère donc de sa dégradation à long terme [6, 7]. Généralement, les arborescences d'eau poussent dans l'isolation polymère en présence d'un champ électrique élevé et une certaine quantité d'eau [8-11], particulièrement, dans des zones non homogènes qui contiennent des microcavités [12, 13].

Dans certaines conditions, en plus du phénomène d'apparition d'arborescences d'eau, les matériaux polymères se distinguent par la facilité de piégeage des porteurs de charge et leur mobilité dans l'isolation dû à l'ionisation des impuretés qui s'accumulent au niveau des couches semi-conductrices des câbles électriques sous une contrainte électrique [14-17]. Ceci provoque la création de la charge d'espace et un renforcement du champ électrique local à des endroits précis du volume de l'isolation qu'on appelle interfaces physiques. L'existence d'interface citée dans les travaux de Steennis [18] entre l'arborescence et l'isolation, constitue le maillon faible de l'isolation. En effet, cette interface représente la zone idéale où la charge d'espace peut s'accumuler mais le mécanisme associé reste relativement mal compris [19].

Ainsi, les chercheurs ont montré un intérêt particulier pour l'étude de la distribution du champ électrique, car celle ci est l'un des principaux paramètres à prendre en considération dans la conception de l'isolation des câbles électriques. La charge électrique qui a tendance à s'accumuler dans l'isolation, en présence d'arborescences d'eau, constitue un facteur important dans le processus de vieillissement prématuré de l'isolation électrique du polymère, provoqué à la fois par le changement de la constante diélectrique de l'isolation et sa conductivité [20].

Le premier objectif de ce manuscrit est de développer un modèle de simulation numérique d'arborescences d'eau en présence de la charge d'espace, en utilisant la méthode des éléments finis, implémentée sous environnement Comsol Multiphysics. Ce modèle nous permettra de

Introduction générale

décrire le comportement de l'isolation en polyéthylène réticulé des câbles électriques en présence de défauts à travers l'étude de la distribution du champ électrique.

Peu de travaux de recherche ont traité le problème de la modélisation numérique des arborescences d'eau en présence de la charge d'espace. La majorité des chercheurs ont focalisé leurs études sur des essais expérimentaux en utilisant des techniques non destructives pour la localisation de la charge d'espace et sa distribution en présence d'arborescences d'eau dans l'isolation des câbles électriques. L'étude de la dynamique de la charge d'espace et son rôle sur les défauts électriques aussi que sur la distribution du champ électrique dans l'isolation en polymère, ont suscité une attention limitée jusqu'à présent. En effet le comportement de la charge d'espace dans les arborescences d'eau est encore un phénomène mal compris.

Certaines investigations ont été menées afin de développer une meilleure compréhension de l'effet du développement des arborescences d'eau dans les matériaux diélectriques solides [21, 22]. Cependant, étant donné que ces défauts de l'isolation ont des structures à échelle microscopique, le développement de méthodes d'analyse numérique, y compris la méthode des éléments de frontière (BEM) [22], la méthode des éléments finis (FEM) [23], la méthode de charge aux limites (BCM) [24] et la méthode de charge de surface (SCM) [25] sont utiles pour comprendre les phénomènes impliqués. La première tentative de calcul de champ électrique a été faite par Ashcraft [26] dans le cas d'une configuration pointe-plan, en supposant que l'arborescence d'eau est parfaitement conductrice. Meyer et al [27] ont supposé que le champ n'est pas affecté par les arborescences d'eau. Le premier travail sur le calcul tenant compte de la nature diélectrique des arborescences d'eau, a été effectué par Chen et Filippini [28]. Divers auteurs [29-34] ont calculé le champ électrique en présence d'arborescences d'eau. D'autres [34-36] ont examiné seulement l'influence de la charge d'espace. Il est intéressant de noter que, dans la majorité des études antérieures [25, 29-33, 37], les auteurs ont constaté que le champ électrique est accentué au sommet de l'arborescence et que cette région qui représente une interface physique (arborescence/isolation) est considérée comme la plus probable pour l'initiation d'arborescences électriques.

D'autres investigations se sont intéressées à l'analyse de l'effet des arborescences d'eau, ainsi que la charge d'espace (dont la distribution est à l'intérieur et à l'extérieur des arborescences considérées) pour un câble non vieilli [36] ou un câble vieilli [38]. Dans [36, 38] on a constaté que le champ se concentre plutôt aux niveaux des deux semi-conducteurs. Il est important de souligner que les recherches mentionnées ci-dessus n'ont jamais étudié l'effet de la charge d'espace accumulée au sommet des arborescences d'eau sur la distribution du champ électrique au niveau des interfaces de trois milieux (arborescence /PRC /couche semi-conductrice) des câbles électriques. Raison pour laquelle nous avons orienté notre travail dans cette voie.

Introduction générale

Nous avons articulé ce manuscrit en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présentons d'abord un état de l'art sur les polymères et l'isolation des câbles électriques ainsi que le choix du polyéthylène réticulé comme isolation principale de ces câbles.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différents défauts existants dans la structure de l'isolation en polyéthylène et leur influence sur la dégradation de ce matériau. Nous citerons également les différentes dégradations de cette isolation en polymère, nous nous intéresserons plus particulièrement à la dégradation électrique par arborescences d'eau. Ensuite, nous donnerons un aperçu sur le mécanisme de ses arborescences et les différents facteurs influençant leur développement.

Le troisième chapitre est consacré aux mécanismes d'accumulation de la charge d'espace au niveau de l'interface semi-conducteur/isolation et la forte corrélation entre cette charge d'espace et la naissance des arborescences d'eau. Nous rappelons également les propriétés diélectriques des arborescences d'eau à savoir la permittivité et la conductivité et leur distribution à l'intérieur de ces arborescences. Ensuite, nous présentons les paramètres ayant une influence sur la quantité et la polarité de cette charge d'espace ainsi que sa distribution dans l'isolation en présence d'arborescences d'eau.

Enfin, le dernier chapitre traite une étude par une modélisation numérique de deux arborescences d'eau individuelles qui se développent simultanément à partir des deux couches semi-conductrices intérieure et extérieure à l'isolation d'un câble moyenne tension. Pour déterminer les valeurs ainsi que la distribution du champ électrique en tout point appartenant au domaine de l'isolation du câble, nous avons adopté l'approche numérique en termes du champ électrique dans le cas 2D électrostatique. Cette approche est implémentée sous environnement Comsol multiphysics.

Dans cette partie, nous donnerons les résultats de simulation que nous avons entrepris et leurs interprétations et que nous comparons avec les résultats obtenus par d'autres auteurs. Plusieurs paramètres affectant la distribution du champ électrique ont été adoptés: la longueur et la forme physique des arborescences, la distribution de la permittivité diélectrique à l'intérieure des arborescences ainsi que la présence de la charge d'espace et sa distribution aux interfaces arborescences/PRC.

Nous terminons par une conclusion générale et quelques perspectives.

Bibliographie

- [1] S.B. Dalal, R.S. Gorur, M.L. Dyer, “Aging of Distribution Cables in Service and its Simulation in the Laboratory”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, N° 1, pp. 39-146, 2005.
- [2] T. Sato, K. Muraki, N. Sato, Y. Sekii, “Recent technical trends of 500 kV XLPE cable” IEEE, Power Cable and Accessories 10kV-500kV, pp. 59-63, November 1993.
- [3] K. kaminaga, M. Ichihara, M. Jinno, T. Tanabe, S. Fukunaga, M. Kanaoka, H. Takehana, “Development of 500 kV XLPE cables”, Electrical Engineering in Japan, Vol. 118, N° 1, pp. 28-39, 1997.
- [4] G. Teysedre, L. Boudou, “Polymères et composites pour l’électrotechnique”, technique d’ingénieur, D 2335,10 mai 2010.
- [5] T. Miyashita, “Deterioration of Water-Immersed Polyethylene Coated Wire by Treeing”, Proceedings, IEEE-NEMA Electrical Insulation Conference, Boston (USA), September, pp. 131-135, 1969.
- [6] S.V. Nikolajevic, “Investigation of water effects on degradation of crosslinked polyethylene insulation”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, pp. 1682-1688, 1993.
- [7] I. Radu, M. Acedo, P. Notingher, F. Frutos, J.C. Filippini ,“The danger of water trees in polymer insulated power cables evaluated from calculations of electric field in the presence of water trees of different shapes and permittivity distributions”, Journal of Electrostatics, Vol. 40-41, pp. 343-348, 1997.
- [8] N. Yoshimura, F. Noto, “Growth of Water Trees in Polyethylene and Silicon Rubber by Water Electrodes”, IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insul, Vol 12, pp 411- 416, 1977.
- [9] E.F. Steennis, F.H. Kreuger, “Water Treeing in Polyethylene Cables”, IEEE Trans. Electr.Insul.Vol. 25, pp. 989-1028, 1990.
- [10] H.S.B. Elayyan, M.H. Abderrazzaq, “Electric field computation in wet cable insulation using finite element approach”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 12, No. 6, 1125-113, 2005.
- [11] J. Li, X. Zhao, G. Yin, S. Li, J. Zhao, B. Ouyang, “The Effect of Accelerated Water Tree Ageing on the Properties of PR Cable Insulation”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18, No. 5, pp 1562 -1569 ; October 2011.
- [12] C. Stancu, P.V. Notingher, F. Ciuprina, P. Notingher jr, S. Agnel, J. Castellon, A. Toureille, “Electric Field Computation in Water Treed Polyethylene with Space Charge Accumulation”, Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulaion, pp.186-189, 2006.

- [13] C. Stancu, P.V. Notingher, F. Ciuprina, P. Notingher jr, J. Castellon, S. Agnel, A.Tourelle, “Computation of the Electrical Field in Cable Insulation in the Presence of Water Trees and Space Charge”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.45.No.1, January 2009.
- [14] G.C. Montanari, F. Palmieri, “The effect of humidity on space charge accumulation in XLPE”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, , Page(s): 205- 208, 2003.
- [15] K.S. Suh, S.J. Hwang, J.S. Noh, T. Takada, “Effects of Constituents of XLPE on the Formation of Space Charge”, IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul., Vol. 1, pp. 1077-1083, 1994.
- [16] K.S. Suh, C.R. Lee, J.S. Noh, J. Tanaka, D.H. Damon, “Electrical Conduction in Polyethylene with Semi-conductive Electrodes”, IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul., Vol. 1. pp. 224-230, 1994
- [17] R.J. Fleming, S.B. Lang, T. Pawlowski, “space charge in XLPE near the electrode interfaces”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Page(s): 69-72, 2006
- [18] E.F. Steennis, F.H. Kreuger, “Water Treeing in Polyethylene Cables”, IEEE Trans. Electr.Insul.Vol. 25, pp. 989-1028, 1990.
- [19] J.C. Fothergill, “The coming of age of HVDC extruded power cables”, Electrical Insulation Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 8 to 11 June 2014.
- [20] T. Toyoda, S. Mukai, Y. Ohki, Y. Li, T. Maeno, “Estimation of conductivity and permittivity of water trees in PE from space charge distribution measurements”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 8, no. 1, pp. 111-116, Mar. 2001.
- [21] H. Muto, H. Tanaka, Y. Maruyama, “A study of electrical tree initiation from water tree”, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), Knoxville, USA, pp. 361-366, 1991.
- [22] S.S. Bamji, A.T. Bulinski, K.M. Prasad, “Electric field calculations with the boundary element method”, Trans. Electr. Insul., IEEE Vol. 28, No. 3, pp. 420-424, 1993.
- [23] L. Haydock, “Application of a finite element technique to model an electrical power cable”, IEEE Trans. Magn. Vol. 30, No. 5, pp. 3741-3744, 1994.
- [24] N.J. Bowring, F.H. Read, “The boundary charge method for space-charge problems”, IEE Colloq. Comput. Electrostat., London (U. K), Vol.1, pp. 1-6, 1995.
- [25] P.V. Notingher, I. Radu, J. C. Filippini, “Electrical field calculations in polymers in the presence of water trees”, Proc. of the 5th Int. Conf. Conduction and Breakdown Solid Dielectr., Leicester (U.K.), pp. 666-670,1995.
- [26] A.C. Ashcraft, “Water treeing in polymeric dielectrics”, World Electrotechnical Congress, Moscow, June, 1977.

- [27] J.C. Filippini, C.T. Meyer, M.El. Kahel, "Some mechanical aspects of the propagation of water trees in polyethylene", Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 18-21, pp. 629-637, 1992.
- [28] J.L. Chen, J.C. Filippini, "The morphology and behavior of the water tree", IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 2, pp. 271-286 April, 1993.
- [29] C. Kim, J. Jang, X. Huang, P. Jiang, H. Kim, "Finite element analysis of electric field distribution in water treed XLPE cable insulation (1): The influence of geometrical configuration of water electrode for accelerated water treeing test", Science Direct, Polymer Testing, Vol. 26, 482-488, 2007.
- [30] I. Radu, "Electric field calculation and the influence of water trees on insulation breakdown in needle-plane geometry", J. Electr., Vol.60, pp. 49-67, 2004.
- [31] I. Radu, P.V. Notinghamer, J.C. Filippini, "Influence of water trees on the electric field distribution and breakdown in the point-point geometry", J. Electr., Vol.48, pp. 165-178, 2000.
- [32] M. Acedo, I. Radu, F. Frutos, J.C. Filippini, P. Notinghamer, "Water treeing in underground power cables: modeling of the trees and calculation of the electric field perturbation", J. Electr., Vol. 53, pp. 267-294, 2001.
- [33] J.L. Chen, J.C. Filippini, "The morphology and behavior of the water tree", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 28, No. 2, pp. 271-286, 1993.
- [34] F. Rogti, A. Mekhaldi, C. Laurent, "Space charge behavior at physical interfaces in cross-linked polyethylene under DC field", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.15, No.5, pp. 1478-1485, 2008.
- [35] C. Stancu, P.V. Notinghamer, F. Ciuprina, P. Notinghamer jr, J. Castellon, S. Agnel, A. Toureille, "Computation of the electrical field in cable insulation in the presence of water trees and space charge", IEEE Trans. Industry. Appl., Vol. 45, No.1, pp. 30-43, 2009.
- [36] Y. Ohki, Y. LI, J. Kawai, Y. Ebinuma, Y. Fujiwara, "Space Charge behavior under AC voltage application in water-treed polyethylene observed by the pulsed electroacoustic method", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), San Francisco, USA, 23-23 Oct,1996.
- [37] C. Stancu, P. V. Notinghamer, P. Notinghamer Jr, "Computation of the electric field in aged underground medium voltage cable insulation" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 20, No. 5, pp. 1530-1539, 2013.
- [38] F.H. Read, N.J. Bowring, "Ultimate numerical accuracy of the surface charge method for electrostatics", Third Int. Conf. Computation in Electromagnetics, Bath, UK, 10-12 April, 1996.

Chapitre I

Polymères et isolation des câbles électriques

I.1 Introduction

Les polymères sont constitués de longues chaînes moléculaires appelées chaînes macromoléculaires. Ces chaînes sont formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de bases. Ces unités de bases sont appelées molécules monomères unies les unes aux autres par des liaisons covalentes [1]. La structure et les propriétés finales du matériau dépendent de la nature des atomes constitutifs, de l'agencement des unités monomères et de l'organisation des chaînes dans l'espace.

La communauté scientifique a mis du temps pour accepter la notion de macromolécule. Ce n'est que dans les années 1920 que cette notion fut acceptée grâce aux travaux de Hermann Staudinger [2], il a démontré que les matières polymères étaient formées de longues chaînes moléculaires nommées macromolécules.

Une chaîne polymère est représentée par une ligne continue désordonnée dont les petites portions correspondent aux unités monomères. Ces chaînes macromoléculaires constituant les polymères peuvent avoir différentes morphologies : linéaires, ramifiées ou tridimensionnelles (réticulées). Les chaînes sont réticulées ou non suivant l'énergie de liaison existante entre elles. Cette énergie est en fonction de la composition chimique, de la configuration moléculaire des chaînes [2, 3].

Les matériaux polymères sont largement utilisés en tant qu'isolations électriques dans des applications très variées, allant du composant électronique aux machines électriques. La grande diversité des polymères ainsi que leurs bonnes propriétés diélectriques, mécaniques et thermiques en font des matériaux de choix dans l'isolation des câbles moyenne et haute tension pour le transport de l'énergie électrique.

I.2 Classification des polymères

I.2.1 Selon leur origine

Les polymères peuvent être divisés en trois groupes principaux; les polymères naturels (caoutchouc), les polymères artificiels (les matières premières existent dans la nature), les polymères synthétiques (l'unité de base n'existe pas dans la nature : polyéthylène).

I.2.2 Selon leurs propriétés physiques [1,4]

En se basant sur les propriétés physiques, il est facile de distinguer trois types de polymères

- **Les thermoplastiques** : Les thermoplastiques sont des polymères linéaires ou ramifiés. Ils peuvent être fondus et mis en forme par élévation de la température. La cristallisation est possible, mais pas systématique.
- **Les thermodurcissables** : Ces polymères acquièrent une dureté permanente lorsqu'ils sont chauffés et ne ramollissent pas lorsqu'ils sont chauffés à nouveau. Se sont des matériaux amorphes et infusibles. On appelle ces plastiques thermodurcissables car, en générale, une élévation de température favorise la réaction de polymérisation et le degré de réticulation, donc la rigidité thermique et mécanique.
- **Les élastomères ou caoutchoucs** : ce sont des matériaux à haute masse moléculaire et à chaîne linéaire. Ces matériaux sont amorphes, leurs chaînes tendent toutefois à s'aligner au cours de la déformation, il se produit une augmentation de la rigidité mécanique du matériau.

I.3 Principales fonctions des polymères

Les matériaux polymères ou composites utilisés dans le domaine de l'électrotechnique ont pour vocation d'assurer des fonctions diverses telles que l'isolation, le stockage d'énergie, la protection d'éléments.

Les matériaux polymères utilisés en tant qu'isolants constituent une grande famille de par leur nature (polymères, verre, céramique, bois, papier, carton, huile, air, vide, gaz...), et ont des propriétés diverses et variées. C'est également et surtout lié au fait que la fonction d'isolation électrique est primordiale, en ce sens qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique. La fonction première d'un isolant électrique est de s'opposer au passage du courant entre conducteurs. Les propriétés diélectriques des matériaux utilisés sont donc de toute première importance.

I.4 Matériaux diélectriques

Les matériaux diélectriques sont des isolants homogènes qui ne sont pas conducteurs du courant électrique puisque ils ne contiennent pas de charges libres dans leurs structures. Ces matériaux sont constitués d'atomes, de molécules, d'ions liés par des forces électriques [5]. Tous les électrons des isolants participent aux liaisons de la structure (pas d'électrons libres dans la bande de conduction), à moins qu'ils soient soumis à l'action des facteurs ionisants externes provoquant la perte de leurs propriétés diélectriques. Sous l'effet du champ électrique suffisamment intense appliqué, l'énergie ionique sera suffisante pour que les électrons puissent passer de la bande de valence à la bande de conduction.

On peut subdiviser les caractéristiques électriques des matériaux polymères en deux grandes familles [6] :

La première famille groupe des caractéristiques plus directement liées à l'emploi de l'isolant (diélectrique) dans une catégorie de matériels déterminée, donc en liaison étroite avec les diverses contraintes subies par le matériau au cours de son service. Dans certains cas, ces dernières caractéristiques peuvent être les éléments déterminants du choix d'un isolant destiné à une certaine fonction.

La seconde comprend les propriétés diélectriques essentielles, permittivité ϵ , résistivité ρ , facteur de pertes diélectriques ($\tan \delta$) et la rigidité diélectrique, qu'il est utile de connaître dans la plupart des applications où les matériaux sont utilisés. Ces propriétés dépendent de la tension appliquée, de la fréquence et de la température.

I.4.1 Propriétés électriques des milieux diélectriques

Les propriétés électriques des matériaux diélectriques dépendent de leur formulation (composition et constitution moléculaire, etc.) et de leurs conditions d'utilisation ou conditionnement.

I.4.1.1 Résistivité / Conductivité

Un isolant électrique doit conduire le moins possible le courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa résistivité ρ doit être la plus forte possible ; inversement, sa conductivité σ doit être la plus faible possible ($\rho = 1/\sigma$).

La conductivité d'un isolant est due à la présence de charges libres qui se déplacent sous l'effet d'un champ électrique $E(V/m)$ provoquant ainsi un courant de conduction [7], elle est définie comme $\sigma = J/E$, $J(A/m^2)$ est la densité de courant.

La conductivité est une propriété fortement dépendante du conditionnement, elle est influencée par la présence d'impuretés (poussières, particules, gaz, humidité), généralement sa valeur croît avec l'augmentation du taux d'impuretés ioniques dans le système d'isolation [8]. Plus la température est élevée, plus la dissociation des impuretés dissociables en ions est forte, et plus la mobilité des ions est grande [9], et par conséquent plus la conductivité est élevée. σ est reliée à la température avec une relation de type :

$$\sigma(T) = Ae^{-E/kT} \quad (I.1)$$

Avec : k : constante de Boltzman, A : constante, $\sigma(T)$: la valeur de la conductivité à une température T

I.4.1.2 Permittivité diélectrique

La permittivité absolue est la constante macroscopique fondamentale qui caractérise un diélectrique. Elle est définie par la relation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (I.2)$$

Où :

ε_0 est la permittivité du vide dans le Système International ($\varepsilon_0 = 10^9/(36 \cdot \pi) = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$).

La permittivité relative ε_r d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité (C_p) entre deux électrodes, par la capacité (C_0) de la même configuration d'électrodes dans le vide.

La constante diélectrique ε_r s'écrit :

$$\varepsilon_r = \frac{C_p}{C_0} \quad (I.3)$$

La permittivité est une caractéristique intrinsèque car elle dépend essentiellement de la structure chimique du produit. Elle caractérise la polarité de la molécule [8]. La permittivité décroît avec l'augmentation de la température et de la fréquence. [7].

I.4.1.3 Permittivité complexe, angle de perte et facteur de dissipation

Dans un diélectrique imparfait, la polarisation est due à des mécanismes de déformation de la répartition des charges électriques sous l'influence du champ électrique. Elle dépend de la structure et des propriétés des chaînes moléculaires du matériau électrique.

Dans le cas d'un champ électrique alternatif, cette polarisation ne suit pas le champ d'une façon instantanée. Cette polarisation diélectrique induit une perte d'énergie [11, 9].

Un tel diélectrique est équivalent à un circuit comportant une résistance en parallèle avec la capacité (**Fig. I.1 (a)**). Dans le diagramme de Fresnel (**Fig. I.1 (b)**), le courant alternatif complexe résultant de l'application de la tension alternative complexe aux bornes d'un condensateur plan rempli de diélectrique contient deux composantes (en valeurs absolues).

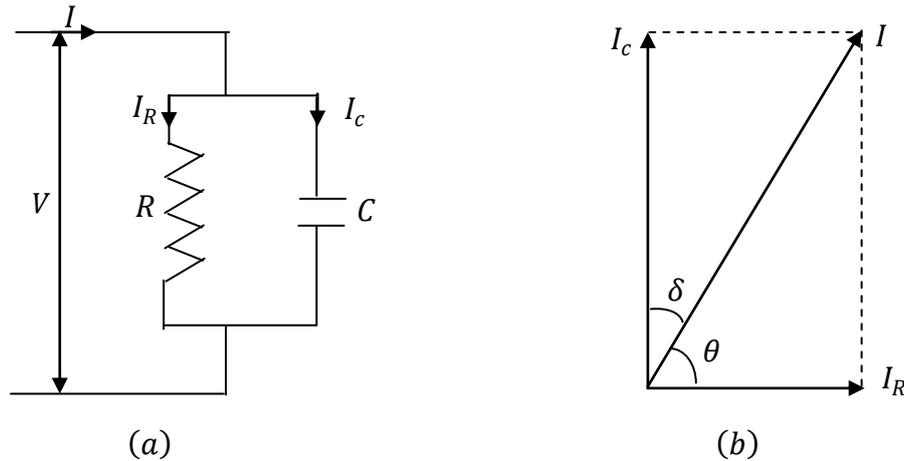


Fig. I.1 : (a) circuit équivalent parallèle d'un matériau diélectrique
(b) diagramme de Fresnel correspondant [8]

$$\underline{I} = \underline{I}_c + \underline{I}_R \quad (I.4)$$

Avec

\underline{I}_c : courant de charge, \underline{I}_R : courant de pertes d'énergie dans le diélectrique (due à la polarisation).

Les courants \underline{I}_c et \underline{I}_R sont donnés par les relations :

$$\underline{I}_c = j\omega C \underline{V} \quad (I.5)$$

$$\underline{I}_R = \frac{V}{R} \quad (I.6)$$

Avec ω (rad/s) pulsation du courant alternatif ($\omega = 2\pi f$), f (Hz) étant la fréquence,
En pratique \underline{I} est proportionnel à $C_0 \underline{V}$ et s'écrit :

$$\underline{I} = j\omega(\epsilon' - j\epsilon'') C_0 \underline{V} \quad (I.7)$$

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (I.8)$$

Avec

C_0 : Capacité du condensateur sous vide

\underline{V} : Tension aux bornes de ce condensateur

ϵ^* est la permittivité relative complexe et souvent appelée constante diélectrique complexe :

la partie réelle ϵ' est la permittivité relative en courant alternatif à une fréquence et une température données.

la partie imaginaire ϵ'' est appelée indice de pertes (sa valeur est également fixée pour une fréquence et une température déterminées).

La tangente de l'angle de pertes ($\tan\delta$), donnée par la relation :

$$\tan\delta = \frac{|I_R|}{|I_C|} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (I.9)$$

Également appelée facteur de dissipation diélectrique (sans dimension). En pratique, on confond ϵ'' et $\tan\delta$.

Les pertes d'énergie dans le diélectrique sont données par la formule :

$$P_E = \omega C V^2 \tan\delta = \omega C_0 V^2 \epsilon' \tan\delta \quad (I.10)$$

En outre σ et δ sont reliées par :

$$\tan\delta = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0\varepsilon'} \quad (I.11)$$

a) Signification

On fait souvent plus attention, lorsqu'il s'agit de choisir un matériau, à son facteur de dissipation diélectrique qu'à sa permittivité. Dans le cas d'isolations à haute tension, la présence simultanée de matériaux à permittivité élevée et de matériaux solides de faible permittivité, ou de gaz, risque de provoquer leur rupture diélectrique. Par contre, dans le condensateur de puissance, l'utilisation de matériaux de forte permittivité permet d'obtenir, sous un volume réduit, des capacités élevées.

b) Classification

Du point de vue évolution de leur permittivité complexe en fonction de la température et de la fréquence, on peut classer les polymères en polymères apolaires et en polymères polaires. Cette subdivision est reliée à la présence ou à l'absence d'une dissymétrie dans la molécule polyatomique. Suivant l'importance de cette dissymétrie, le caractère polaire du matériau sera plus au moins marqué [6].

Les polymères apolaires sont généralement de très bon isolants, avec un indice de pertes faible, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} , variant peu en fonction de la température et de la fréquence, ainsi caractérisés par une permittivité qui demeure presque constante (2.5 à 3) dans un domaine étendu de températures et de fréquences [10].

Les polymères polaires doivent leur comportement à la présence de dipôles permanents dans leur constitution moléculaire. Ces matériaux présentent, en fonction de la fréquence (ou la température), une ou plusieurs bandes d'absorption dipolaire caractérisées par le passage du facteur de dissipation diélectrique par une valeur maximale, ainsi que par une variation assez rapide de la permittivité. En règle générale, la permittivité et le facteur de dissipation de ces matériaux sont plus élevés (respectivement sont de 10^{-2} à 10 et de 3.5 à 10), à basse fréquence, et notamment à fréquence industrielle, que ceux des matériaux apolaires [7, 11].

Aux pertes diélectriques d'origine dipolaire que nous venons de voir, se superposent parfois des pertes par conduction, observées essentiellement à haute température et à basse fréquence. Elles sont négligeables dans les matériaux solides actuellement employés en tant qu'isolants électriques, au moins dans la gamme des températures normales d'utilisation. Ces pertes par conduction sont aisément identifiables du fait que le facteur de dissipation diélectrique correspondant est inversement proportionnel à la fréquence.

I.4.1.4 Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction [6].

De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

Suivant les positions relatives des conducteurs et de la surface des matériaux, on distingue :

- La rigidité diélectrique transversale pour laquelle le champ électrique appliqué est perpendiculaire aux surfaces principales du matériau.
- La rigidité diélectrique longitudinale, obtenue entre deux conducteurs situés sur une même surface de l'isolant.

I.5 Principe de la polarisation

Selon le modèle des bandes d'énergie, la matière est diélectrique quand les bandes de conduction et de valence sont séparées par une énergie supérieure à 5 eV [12]. Dans ce cas, peu d'électrons reçoivent, à la température ordinaire, l'énergie thermique nécessaire pour effectuer une transition dans la bande de conduction. Quand la température s'élève, la probabilité de transition augmente. Les charges présentes dans un diélectrique ne sont pas liées de façon absolument rigide les unes aux autres, pour cela l'application d'un champ électrique E déplace légèrement les charges positives et négatives les unes par rapport aux autres provoquant l'apparition de dipôles [7].

I.5.1 Polarisation sous champ statique

Si on soumet une charge à l'action d'un champ électrique, la force qui apparaît sur cette charge est :

$$\vec{F}_c = q\vec{E} \quad (I.12)$$

La force (\vec{F}_c) tend à déplacer la charge électrique dans la direction du champ. Si la charge est libre, elle se déplace dans la direction du champ. Si la charge est emprisonnée, la force déplace la charge en produisant un moment dipolaire qu'on appelle la polarisation diélectrique \vec{P} :

$$\vec{P} = \chi\epsilon_0\vec{E} \quad (I.13)$$

Le champ électrique \vec{E} est la somme de deux termes, définis par (I.14) [11,12] :

$$\vec{E} = \vec{E}_Q + \vec{E}_P \quad (I.14)$$

\vec{E}_Q dû aux charges réelles (Q et σ) et \vec{E}_P dû aux charges fictives de polarisation (Q_p et σ_p).

$$\vec{D} = (1 + \chi)\epsilon_0\vec{E} = N_0\alpha\vec{E} \quad (I.15)$$

χ est la susceptibilité électrique, N_0 est le nombre de dipôles par unité volumique, α est la polarisabilité de la charge électrique.

En posant $1 + \chi = \epsilon_r$ et $\epsilon_0\epsilon_r = \epsilon$, on obtient :

$$\vec{D} = \epsilon_0\epsilon_r\vec{E} = \epsilon\vec{E}_Q + \epsilon\vec{E}_P \quad (I.16)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0\vec{E} + \vec{P} \quad (I.17)$$

Le terme ($\epsilon_0\epsilon_r\vec{E}$) est appelé déplacement électrique \vec{D} dans le matériau.

L'équation (I.17) montre que le déplacement électrique naît de la contribution géométrique ($\epsilon_0\vec{E}$) et la polarisation du matériau (\vec{P}) et s'écrit aussi :

$$\vec{P} = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0\vec{E} \quad (I.18)$$

I.5.2 Différents types de polarisation

Avec les polymères couramment utilisés, la conductivité en courant continu est souvent faible et les dissipations d'énergie en courant alternatif proviennent principalement de la relaxation des différentes polarisations. Plusieurs types de polarisation peuvent être identifiés

suivant la polarisabilité α de chaque élément : électronique, atomique, d'orientation, dite de Debye et interfaciale.

I.5.2.1 Polarisation électronique

Le champ électrique provoque un léger déplacement des nuages électroniques vis-à-vis du noyau des atomes. Le temps d'établissement de cette polarisation est très court (10^{-15} s) et s'accompagne d'une émission de lumière, et l'on a [relation (I. 13)] :

$$\vec{P}_e = N \alpha_e \vec{E}_1 \tag{I. 19}$$

Où :

La constante α_e dépend essentiellement du rayon r de l'atome. Un modèle électrostatique assimilant l'atome à un noyau positif au centre d'une sphère négative chargée uniformément prévoit : $\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3$

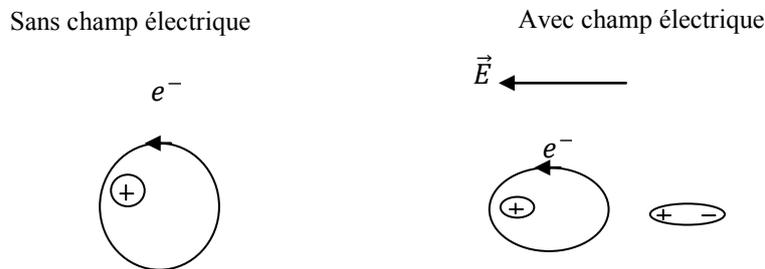


Fig. I.2 : Représentation schématique de la polarisation électronique P_e

I.5.2.2 Polarisation atomique

Elle correspond au déplacement d'atomes ou de groupes d'atome dans la molécule sous l'influence d'un champ électrique externe. Ce phénomène atteint également rapidement l'équilibre (10^{-13} à 10^{-12} s). Dans ce cas, la relation (I. 13) devient :

$$\vec{P}_a = N \alpha_a \vec{E}_1 \tag{I. 20}$$

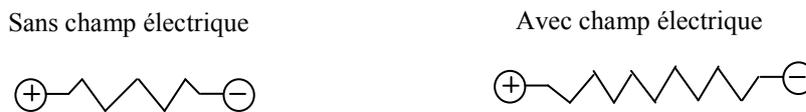


Fig. I.3 : Représentation schématique de la polarisation atomique P_a

I.5.2.3 Polarisation d'orientation

Cette polarisation décrit l'orientation des éléments possédant un moment dipolaire permanent. Les dipôles ont tendance à s'orienter suivant le sens du champ appliqué. Le temps d'établissement, beaucoup plus important que dans le cas des deux polarisations précédentes, varie dans une large gamme de temps (10^{-3} à 10^{-9} s) selon le type de dipôles. La relaxation des dipôles s'accompagne d'une dissipation d'énergie, ainsi sous l'influence d'un champ alternatif, il apparaît des pertes diélectriques. Le temps de relaxation d'un dipôle tournant dans un liquide de viscosité dynamique η a été calculé par Debye [11] :

$$\tau = 4\pi \frac{\eta r^3}{k T} = \frac{3 \eta V}{k T} \tag{I.21}$$

r : rayon de la molécule, T : température thermodynamique, V : volume de la molécule. La polarisation d'orientation, \vec{P}_0 calculée par Langevin et Debye, s'exprime par [11] :

$$\vec{P}_0 = N \alpha_0 \vec{E} \tag{I.22}$$

Avec

$$\alpha_0 = \frac{p^2}{3k T} \tag{I.23}$$

p : étant le moment dipolaire de la molécule



Fig. I.4 : Représentation schématique de la polarisation d'orientation P_0

I.5.2.4 Polarisation interfaciale (ou de Maxwell-Wagner-Sillars)

Elle apparaît dans les matériaux hétérogènes. Elle provient de l'accumulation de charges aux interfaces entre les différentes phases constituant le matériau lorsque ces différentes phases ont des permittivités et des conductivités différentes. Les temps de relaxation correspondants sont plus longs que dans le cas de la polarisation d'orientation. On la retrouvera à des fréquences très inférieures au domaine des audiofréquences (10^{-1} à 10^2 Hz) suivant la conductivité des charges. Elle est fortement dépendante de la température [13].

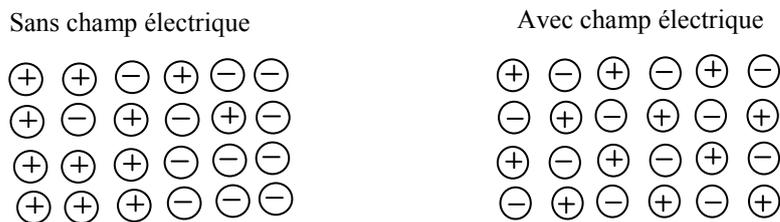


Fig. I.5 : Représentation schématique de la polarisation atomique P_i

- ✓ Chacune de ces polarisations contribue à la valeur de la permittivité relative et donne une relaxation qui se traduit par un pic pour l'indice de pertes (Fig I.6).

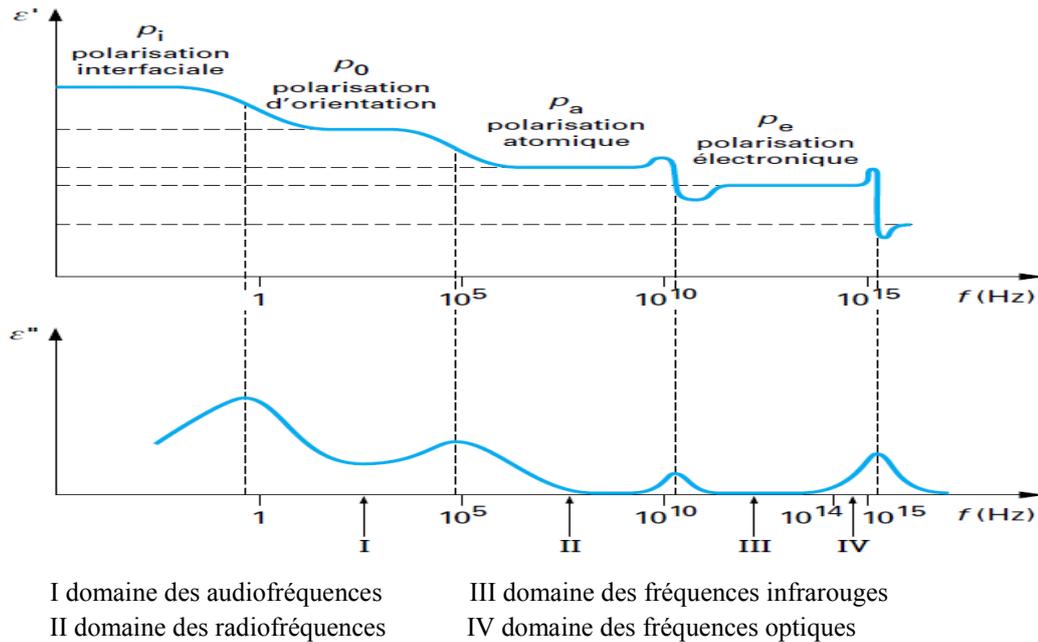


Fig. I.6: Influence des différents types de polarisation sur la permittivité relative (ϵ') et l'indice de pertes (ϵ'') [10]

Les polarisations électroniques et atomiques ne sont pratiquement pas affectées par la température. Dans le domaine des fréquences de l'électrotechnique, leur contribution ne donne pas lieu à une augmentation des pertes diélectriques appréciables. En revanche, la polarisation d'orientation est toujours présente dans les polymères, pour peu qu'ils soient modérément polaires. Les conséquences sont les suivantes [1] :

- ✓ valeur relativement élevée de la permittivité relative : $\epsilon' \gg 4$ ou même 10 dans le cas de polymères très polaires comme le poly (fluorure de vinylidène).
- ✓ forte variation de la constante diélectrique avec la température et avec la fréquence dans le domaine des audiofréquences ou des radiofréquences.
- ✓ tangente de l'angle de pertes élevée (10^{-3} à 10^{-2}), variant rapidement avec la température et la fréquence.

I.6 Câbles électriques et l'isolation en polymère

I.6.1 Câble haute tension

Les câbles électriques souterrains sont de plus en plus utilisés pour la distribution de l'énergie électrique, particulièrement dans l'environnement urbain. Pendant les dernières décennies, le papier imprégné d'huile des anciennes isolations a été progressivement remplacé par l'isolation polymère extrudée, généralement le polyéthylène réticulé, en raison de son coût bas et ses excellentes propriétés diélectriques.

I.6.2 Structure du câble haute tension unipolaire

La structure d'un câble électrique de distribution est représenté sur le la figure I.7

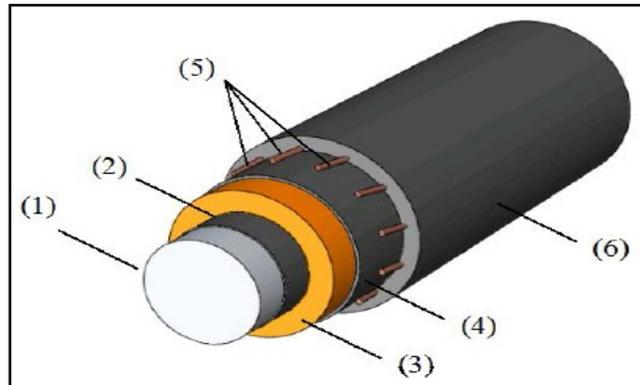


Fig .I.7 Structure de câble de distribution de 12kV [14]

Cette structure de câble unipolaire est constituée essentiellement d'une âme conductrice (1) en cuivre ou en aluminium, son rôle est d'avoir une bonne conduction du courant électrique ainsi que de bonnes propriétés mécaniques. Une couche semi-conductrice interne ; (2) son rôle est d'homogénéiser le champ électrique créé par l'âme conductrice. Une couche d'isolation (3) en matériau polymère (polyéthylène, polyéthylène réticulé), le papier imprégné n'étant plus utilisé que pour les câbles de haute tension en courant continu. Cette couche isolante doit être résistante au champ divergent élevé induit par l'âme conductrice. Une couche semi-conductrice externe (4) est encore une fois présente pour homogénéiser le champ électrique. Des écrans conducteurs (5) (en aluminium ou en cuivre) dont le rôle est de constituer une électrode de référence, de permettre l'évacuation des courants de court-circuit ainsi que d'assurer l'étanchéité radiale, d'orienter et de canaliser les lignes du champ électrique.

Enfin, une gaine de protection externe (6) en matériau polymère, jouant un rôle de protection contre la corrosion et assurant une isolation électrique de l'écran par rapport au sol.

Dans cette structure de câble, les écrans sont tous au même potentiel et reliés à la terre. Les lignes du champ sont toujours perpendiculaires aux couches d'isolations.

I.6.3 Isolation des câbles souterrains

Trois principaux types d'isolations des câbles électriques se sont développés depuis l'origine : les câbles isolés au papier imprégné, les câbles à isolation gazeuse et les câbles à isolation synthétique extrudée.

L'isolation au papier imprégné d'huile-résine ou simplement d'huile a dominé l'industrie des câbles. Malgré une concurrence de plus en plus grande des câbles à isolation synthétique, les câbles isolés au papier imprégné sont encore utilisés dans le monde, principalement pour les très hautes tensions et les grandes puissances. L'abandon des câbles isolés au papier imprégné au profit des câbles à isolation synthétique est dû à l'absence de nécessité de maintenance des câbles « secs » ; aux plus faibles pertes diélectriques; à la plus forte capacité de transport; à l'absence de fuites d'huile et à la limitation des conséquences d'un incendie.

C'est dans les années 60 que l'emploi des matériaux synthétiques extrudés, thermoplastiques ou réticulés a prit son essor. Le matériau le plus utilisé est le polyéthylène pur ou réticulé; mais, l'emploi du caoutchouc d'éthylène-propylène (EPR) se développe également. EPR plus flexible, est plus utilisé dans les installations intérieures. Par contre, le PRC est généralement employé pour les longues distances et dans les installations extérieures [15].

Les propriétés mécaniques de l'EPR comportent certains avantages sur le PRC. En effet, ce matériau est plus souple et son ramollissement à haute température est moindre que celui du PRC. Par contre, les pertes diélectriques du caoutchouc sont au moins 5 fois plus élevées que celles du PRC. La puissance dissipée dans le diélectrique est donnée par l'équation (I.10), c'est pourquoi on ne rencontre pas les câbles au caoutchouc pour les niveaux de tension de transport.

Un nouveau type de matériau utilisé de nos jours dans la fabrication des câbles de distribution est le polyéthylène avec retardateur d'arborescence (TRXLPE). Dans la conception de ce matériau des additifs polaires sont ajoutés au polyéthylène de base. Différents essais de vieillissement en laboratoire ont montré que généralement ces polyéthylènes améliorés présentent une densité moindre d'arborescences d'eau par rapport au PRC standard. Mais l'ajout d'additifs polaires augmente les pertes diélectriques du TRXLPE par rapport au PRC.

Le choix de PRC ou de l'EPR pour l'enveloppe isolante est motivé par des considérations de tenue à température de service élevée, égale à 90°C. Ces isolants autorisent des surcharges occasionnelles portant la température jusqu'à 120°C pendant quelque temps et 250°C sur l'âme en court-circuit. Le PRC est plus souvent retenu que l'EPR.

Les câbles à isolant synthétique extrudé couvrent aujourd'hui tous les besoins courants de la basse tension jusqu'aux plus hautes tensions de transport actuelles (400 kV, 500 kV dans certains pays), cela avec une facilité de mise en œuvre et d'exploitation inégalée et une fiabilité très satisfaisante.

I.6.3.1 Câbles à isolation au papier

La dégradation des performances électriques des câbles isolés en papier imprégné est essentiellement due à la température. En effet, sous l'action de cette dernière, la gaine se déforme d'une manière irréversible et des vides inter-couches de papier se forment favorisant l'initiation des décharges partielles. Si le champ électrique est faible (2 à 3 kV/mm), l'énergie des décharges est faible et ne conduit qu'à une polymérisation des papiers sans conséquence sur la tenue diélectrique du câble ; par contre, pour des champs plus intenses, une carbonisation locale des papiers peut se produire. La dégradation augmente avec le temps et des arborescences apparaissent, caractéristiques d'un vieillissement qui se traduira par un claquage de l'isolation. Ce phénomène est quasi inexistant dans le cas des câbles à pression interne de l'huile, car le maintien en pression de l'isolation principale évite cette dégradation.

I.6.3.2 Câbles à isolation synthétique extrudée

La demande en isolations capables de fonctionner à des températures élevées a suscité le développement des câbles à isolation synthétique extrudée. Ces derniers offrent des avantages significatifs par rapport aux câbles à isolation en papier traditionnels [16].

La synthèse d'un polymère peut se faire de différentes manières : polymérisation radicalaire, ionique, par polycondensation ou polyaddition. Cependant, les polymères purs sont fragiles, et ils peuvent subir, sous l'action de diverses sources (chaleur, humidité, lumière...) des dégradations qui se traduisent par une modification de leur structure chimique, et entraînent une altération des propriétés physiques.

Les additifs incorporés pour améliorer les propriétés de fonctionnement des polymères sont notamment :

- ✓ Des agents de réticulation, qui donnent une meilleure performance mécanique et thermique; ces agents relient les chaînes du polymère par des pontages chimiques pour former des réseaux macromoléculaires géants.

Des agents antioxydants, qui peuvent être ajoutés lors de la fabrication des polymères pour augmenter leur résistance à l'oxydation

1.6.3.2.1 Polyéthylène (PE)

L'isolation des câbles électriques extrudés est généralement à base de Polyéthylène. Ce matériau polymère est composé d'unités répétitives d'éthylène (C₂H₄), formant, comme tout polymère des chaînes de longueur variable, (Fig I.8).

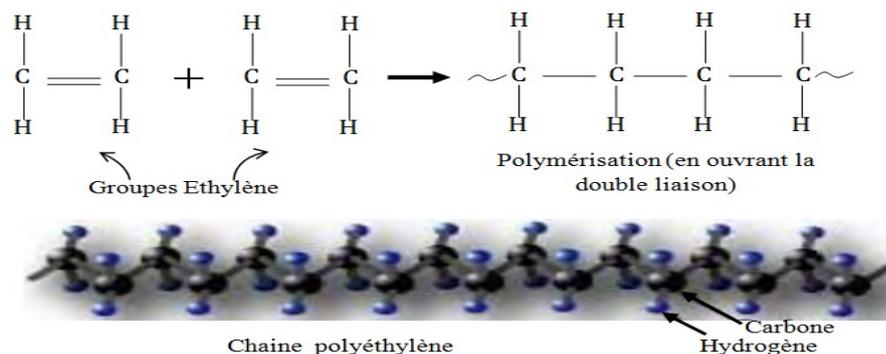


Fig .I.8 Structure du polyéthylène [17]

Le polymère d'éthylène est fabriqué par divers procédés de haute et basse pressions, avec des masses moléculaires très diverses, il s'oxyde très rapidement, et est inflammable. Les procédés haute et basse pressions permettent d'obtenir respectivement des polyéthylènes basse densité (PEBD, d= 0,91 à 0,93) et haute densité (PEHD, d = 0,94 à 0,96) [18]. Par rapport au PEHD, le PEBD est très ramifié, contient environ 50 à 60% de taux de cristallinité et par conséquent, une faible force intermoléculaire, une très faible résistance à la traction et une plus grande ductilité. Les excellentes propriétés électriques du PE telles que la rigidité diélectrique élevée, pertes diélectriques et permittivité faibles, le font largement utiliser dans les câbles de transport d'énergie électrique jusqu'à la tension de 500kV [19]. Le PEBD présente des propriétés électriques remarquables mais sa résistance à la température est faible (la température de fonctionnement du PEBD est d'environ 70°C) ce qui limite son utilisation en tant qu'isolation des câbles d'alimentation.

1.6.3.2.2 Polyéthylène réticulé (PRC)

Le PRC possède sensiblement les mêmes qualités électriques que le polyéthylène, mais de meilleures qualités thermiques. La mise en œuvre de charges minérales dans le PRC améliore

le comportement mécanique à la température de fusion, mais diminue les propriétés diélectriques. Du fait de sa moins bonne pureté comparé aux PEBD et PEHD, le PRC est utilisé majoritairement dans la fabrication des câbles de 90kV à 275kV. Cependant, la meilleure tenue du PRC aux températures de surcharge et de court-circuit a conduit les fabricants à rechercher les moyens et procédés pour obtenir un PRC utilisable sous 500kV. Le premier câble de 500kV isolé au PRC a été testé au Japon en 1990.

Le PRC est obtenu en créant des liaisons chimiques entre les chaînes macromoléculaires dans le but d'améliorer les caractéristiques thermiques [20] et mécaniques du polyéthylène. En effet, les câbles à haute tension sont généralement conçus pour résister aux courants élevés, ces derniers peuvent augmenter la température dans le noyau conducteur du câble par effet Joule.

Pour des températures assez élevées, l'isolation en PRC se ramollit légèrement, sans se fondre, cela revient à la réticulation qui maintient la stabilité dimensionnelle du matériau [20].

Il existe différents procédés de réticulation mais le plus utilisé reste la réticulation par voie chimique. L'agent de réticulation peut être un peroxyde de dicumyle. Sous l'action de la température, le peroxyde se décompose en deux radicaux cumyl. Ces radicaux sont les initiateurs de la réticulation de chaîne grâce aux radicaux créés sur la chaîne qui vont permettre le pontage des chaînes entre elles (Fig I.9).

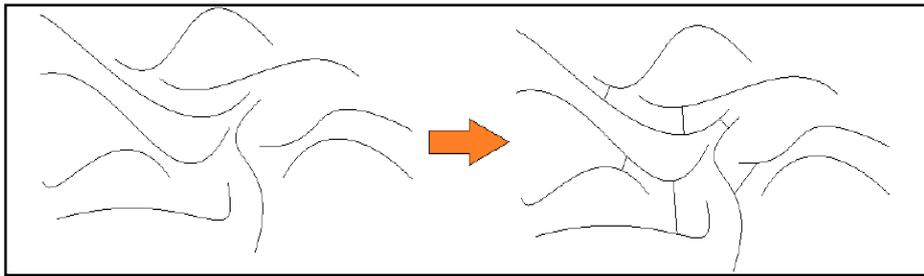


Fig .I.9 Transformation du polyéthylène en PRC en introduisant l'agent de réticulation entre les chaînes polymères [21]

Un schéma représentatif de chaînes de polyéthylène réticulé est donné par la figure I.10 :

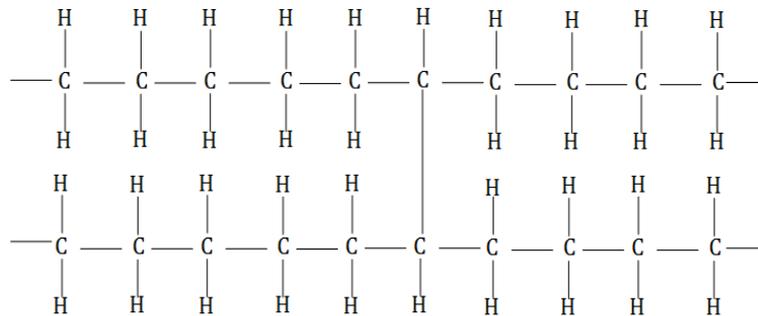


Fig .I.10 Structure moléculaire du PRC, l'angle de liaison n'est pas indiqué [22]

Le polyéthylène réticulé (PRC) est largement utilisé pour l'isolation à haute tension. Cependant, on a constaté que, après la réticulation avec le peroxyde dicumyle, les sous-produits de réticulation, tels que l'acétophénone, styrène α -méthyle, et l'alcool cumyle ont une influence significative sur les propriétés électriques des câbles [23]. En effet, ces sous-produits de réticulation contribuent principalement à la formation des charges d'espace.

I.6.3.3 Propriétés du PRC comparées au PEBD

Les propriétés électriques du PRC ne sont pas très différentes de celles du PEBD. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques que le PE. La réticulation confère au PEBD des propriétés mécaniques améliorées et en particulier une meilleure résistance au fluage. Le produit obtenu est un thermo élastique dont la tenue au vieillissement est améliorée par rapport à celle du PEBD.

I.6.3.4 Epaisseur de l'isolation des câbles et la tenue diélectrique

La réduction de l'épaisseur de l'isolation est désirable pour la réduction de coût du transport et de la construction des câbles extrudés, on bénéficiera non seulement de l'augmentation de la longueur du câble mais aussi de sa performance thermique [24]. Les deux câbles de 10kV et de 15kV correspondent respectivement, à une épaisseur d'isolation de 3.4mm et de 4.3mm. Se basant sur le critère conventionnel de conception de modèle habituel japonais, l'épaisseur de l'isolation d'un câble de 154kV est de 23 mm, 27 mm pour 275kV et de 32mm pour le câble de 500kV. Sur la base des critères de conception révisés au Japon, le câble de 500kV à isolation en PRC correspond à une épaisseur d'isolation de 32mm sans joint, 27mm avec joint (champ de 19kV/mm) [25, 26]. L'épaisseur nécessaire de l'isolation dépend de l'intensité du champ électrique. Le champ électrique en géométrie coaxiale est donné par :

$$E = \frac{U}{R \ln(R_2/R_1)} \quad (\text{I. 24})$$

R_1 et R_2 sont les rayons internes et externes de l'isolation et U est la tension sur l'âme centrale. Le champ maximum survient donc au semi-conducteur interne.

La tenue diélectrique des isolants extrudés est de plusieurs centaines de kV/mm. Pour des raisons de fiabilité à long terme, un câble sera évidemment conçu pour que le champ auquel il est exposé en service corresponde à une fraction de sa tenue diélectrique.

I.7 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de donner un état de l'art sur les matériaux polymères, nous nous sommes intéressés plus particulièrement aux propriétés diélectriques de ces derniers et leur utilisation comme isolation des câbles haute tension. Nous avons présenté les différentes polarisations, en particulier, la polarisation de Maxwell-Wagner (d'interface) qui nous servira principalement à la compréhension du comportement électrique du matériau, mais aussi dans l'interprétation des résultats que nous avons obtenus dans notre travail. En outre, nous avons cité les différents types de l'isolation synthétique, le choix du polyéthylène réticulé comme isolation des câbles souterrains et l'inconvénient de ce type d'isolation.

Bibliographie

- [1] G. Teyssedre, L. Boudou, “Polymères et composites pour l’électrotechnique”, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie électrique, D 2335, 10 Mai 2010.
- [2] H.H. Kausch, N. Heymans, “matériaux polymères propriétés mécaniques et physiques”, presse polytechnique et universitaires romandes, SBN 2-88074-415-6, Lausanne, 2001.
- [3] M. Fontanille, Y.Gnanou, “chimie et physico-chimie des polymères”, Edition Dunold Paris, 2005.
- [4] M.F. Ashby, “Materiaux2 : microstructure et mise en œuvre”, Edition Dunold Paris, 1991.
- [5] J.F. Morel, “Mesures électriques des matériaux diélectriques solides”, Techniques de l’ingénieur, Mesures des télécommunications, R1115, 10 juin 2009.
- [6] B. Fallou, “Caractéristiques des matériaux isolants solides, Méthodes de mesure, valeurs et signification”, Techniques de l’Ingénieur, Convertisseurs et machines électriques D214, 10 sept 1970.
- [7] I. Fofana, H. Borsi, E. Gokenbakh, “Fundamental investigations on some transformers liquids under various outdour conditions”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 8, No. 6, pp. 1040-1047, 2001.
- [8] N.H. Malik A.A.Al. Arainy M.I. Qureshi, “Electrical Insulation in Power Systems”, King Saud University Riyadh Saudi Arabia, series editor H. Lee Willis, ABB Power company, North Carolina, 1997.
- [9] E.J. Murphy, “The generation of gases in the dielectric breakdown of oil”, Journal of Applied Physics, Vol. 4, pp. 917-927, 1970.
- [10] J.C Dubois, “Propriétés diélectriques des plastiques”, Techniques de l’ingénieur, traité plastiques et composites AM 3140, 10 avril 2001.
- [11] J.C. Dubois, “ propriétés diélectriques des polymères”, Technique de l’ingénieur, Traité Electronique, E1850, 1998.
- [12] P. Robert, “Matériaux de l’électrotechnique”, Edition Géorgie, Traité d’électricité, EPF Lausanne, 1982.
- [13] R. Fournié, “Diélectriques bases théoriques”, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie électrique D 2300, Fevrier 2000.
- [14] A.K. Jonscher, “Dielectric Relaxation in Solids”, Chelsea Dielectrics Press, London, 1983.
- [15] N. Ahmed, N. Srinivas, “Cable insulation”, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, J. Webster, Editor, John Wiley and Sons Inc., 2001.
- [16] E. Foottit, “Statistical, electrical and mathematical analysis of water treed cross-linked polyethylene cable insulation”, thesis for the degree of doctor, Queensland University of Technology Brisbane, Australia. 2015.
- [17] T.L. Hanley, R.P. Burford, R.J. Fleming, K.W. Barber, “A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables”, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 19, No. 1, pp. 13-24, 2003.

- [18] T.T.N. Vun, “Etude des phénomènes de charges d’espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d’énergie en haute tension continue (HVDC)”, thèse de doctorat en génie électrique, Université Toulouse III- Paul Sabatier, juillet 2014.
- [19] A. Barlow, “The chemistry of polyethylene insulation”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 7, No.1, pp.8-19, 1991.
- [20] G. Teysse, L. Boudou, “Polymères et composites pour l’électrotechnique”, technique d’ingénieur, d 2335, 10 mai 2010.
- [21] E.H. Doedens, “Organic Contaminants in Crosslinked Polyethylene for Demanding High Voltage Applications”, Diploma Work in the Master programme of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden, 2012.
- [22] J.M.G. Cowie, V. Arrighi, “Polymers: chemistry and physics of modern materials”, Boca Raton, CRC press, Third Edition, 2008.
- [23] E.F. Steennis, F.H. Kreuger, “Water treeing in polyethylene cables”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25, No. 5, pp.989-1028, 1990.
- [24] N. Hussin, “The effects of crosslinking by products on the electrical properties of low density polyethylene”, thesis for Doctor of Philosophy degree, University of Southampton, 2011.
- [25] G. Garcia, “Sur le comportement du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à l’action des décharges partielles”, thèse de doctorat, Université de Paul Sabatier, Toulouse, 1980.
- [26] T. Okamoto, H. Suzuki, K. Uchida, T. Tanaka, M. Inami, J. Shinagawa, “Interfacial diffusion method to improve the breakdown strength of XLPE power cable joints”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Conference Proceedings, Singapore, Singapore, pp.712 -717, 2000.

Chapitre II

*Défauts et mécanismes de
dégradations et de claquage de
l'isolation des câbles électriques*

II.1 Introduction

Durant leur exploitation, l'isolation des câbles électriques est soumise aux efforts électriques, thermiques, mécaniques, environnementaux etc..., contribuant au déclenchement et au développement de certains processus de dégradation. L'un de ces processus est la dégradation par arborescence d'eau. Ce phénomène de croissance des arborescences affecte en générale toutes les isolations en polymère, particulièrement celles installées dans un environnement humide.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents défauts existants dans la structure de l'isolation en polyéthylène et leurs influences sur la dégradation de ce matériau, en particulier, ceux relatifs aux arborescences d'eau naissant dans l'isolation en PRC des câbles électriques. Dans une deuxième partie de ce chapitre, nous nous intéresserons à la présentation aussi bien aux différents facteurs influençant le mécanisme du développement de ses arborescences qu'aux mécanismes de rupture de l'isolant solide en général.

II.2 Structure et défauts

La structure des polymères peut varier entre une structure amorphe totalement désordonnée et une structure plus cristalline (Fig. II.1). En générale, on a affaire à un mélange des deux phases de type semi-cristallin. Une des caractéristiques de ces matériaux est donc le désordre propre à leur structure dont une des conséquences est l'existence de nombreux défauts à l'échelle microscopique (Fig. II.2). Généralement l'interface entre les deux phases (amorphe et cristalline) est considérée comme le maillon faible du système d'isolation, étant donné la formation et le développement des microcavités au niveau de cette région [1].

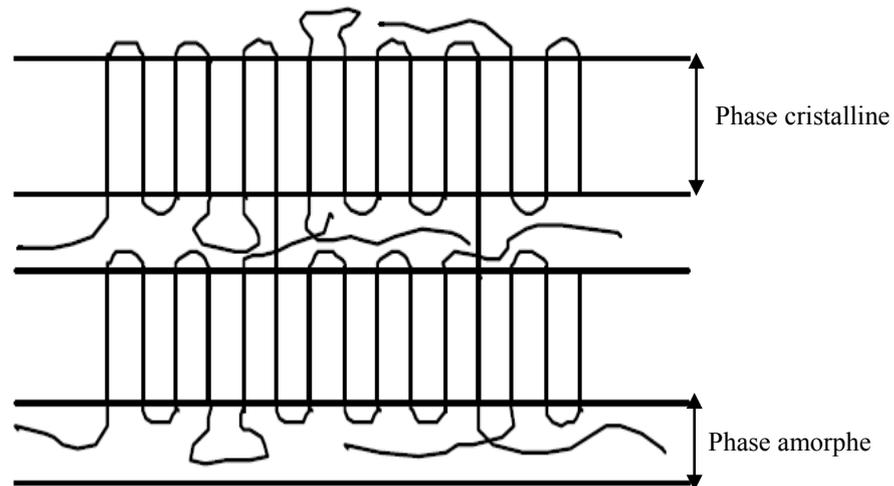


Fig. II.1 Phases cristalline et amorphe [2]

La région cristalline du polyéthylène donne de bonnes propriétés pour l'isolation des câbles, telles que la ténacité et une résistance élevée à la perméabilité de l'humidité et de gaz. D'autre part, la région amorphe augmente la flexibilité et la ductilité du polymère [2].

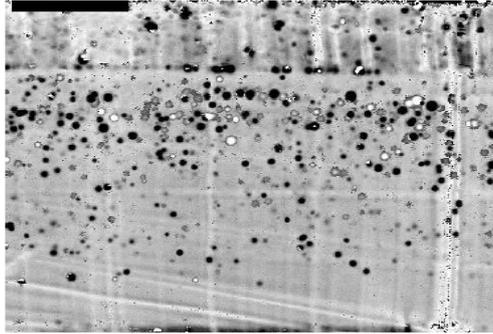


Fig. II.2 Microcavités observées dans du polyéthylène extrudé [3]

La transformation de ces matériaux en polymères en vue de leur utilisation dans les systèmes d'isolation peut elle même introduire d'autres anomalies. Ces considérations ont amenés à distinguer trois types de défauts de ces isolants : les cavités gazeuses, les inhomogénéités de structure et les impuretés.

Au cours de différentes phases de fabrication d'un câble, des imperfections (contaminants, défauts de protubérances ou vides) de diverses formes et tailles microscopiques peuvent être incorporées à l'isolant ou créées à l'interface des zones conductrices ou semi-conductrices. Ces défauts peuvent être classés en trois catégories : [4]

- ✓ Les cavités gazeuses qui peuvent donner lieu à des phénomènes de décharges,
- ✓ Les hétérogénéités aux interfaces ou dans la masse de l'isolant autour desquelles le champ électrique peut prendre des valeurs importantes.
- ✓ Les impuretés

II.2.1 Cavités gazeuses

Elles peuvent avoir deux origines:

- ✓ Microcavités préexistantes au sein du matériau
- ✓ Cavités créées au cours de la mise en œuvre ou du fonctionnement du système

II.2.1.1 Microcavités préexistant au sein du matériau

Deux cas sont à envisager en fonction de la nature réticulée ou non réticulée de la structure du matériau. La réticulation s'accompagne d'un dégagement de gaz qui a tendance à former des bulles si la technologie de fabrication n'est pas bien adaptée : pression ou refroidissement insuffisants. Généralement, l'eau, les impuretés et les produits résiduels de la réticulation se concentrent dans la région amorphe du polymère, ce qui permet la création des cavités [5].

Dans le cas d'un matériau semi-cristallin non réticulé, c'est la cristallisation qui pourrait donner naissance à des cavités de dimensions beaucoup plus petites [6].

a) Cavités d'eau

Elles se forment dans le matériau lorsque la réticulation est réalisée par voie humide. Dans le polyéthylène, à la température de fusion, l'eau est plus soluble dans le matériau qu'à température normale et se mélange au polymère. Au refroidissement, les phases se séparent et donnent naissance à la formation de gouttelettes d'eau qui diffusent au bout d'un certain temps, laissant des cavités [6].

b) Cavités de gaz

L'agent de réticulation le plus couramment utilisé est le dicumyle peroxyde (DCP). Certains produits de décomposition de cet agent sont gazeux (méthane). Ils restent piégés dans le matériau au cours de la cristallisation, puis diffusent laissant ainsi des microcavités localisées [7]. La densité et les dimensions des microcavités dépendent du mode de réticulation. Les différentes évaluations font état de 10^3 à 10^5 cavités/mm³ [8]. De petits vides et des cavités ont des dimensions comparables aux dimensions des régions inter-lamellaires, dans la plupart des matériaux isolants en polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), des vides et des cavités ont des diamètres de 10µm [5]. Dans des cas exceptionnels, des vides beaucoup plus grands sont observés avec des diamètres de 500µm [5].

II.2.1.2 Cavités créées au cours de la mise en œuvre ou du fonctionnement du système

Des décollements peuvent être créés entre les parties isolante et conductrice, suite à des défauts de fabrication ou à l'existence de contraintes mécaniques consécutives au fonctionnement du système.

a) Inhomogénéités

Des inhomogénéités dans la structure de l'isolant peuvent être créées au cours de l'extrusion ou de refroidissement de la couche isolante.

b) Impuretés

Les impuretés interviennent dans la diminution de la durée de vie de l'isolation en polymère. Pour assurer le bon contact électrique et pour éviter les décharges partielles aux frontières de l'isolation, aujourd'hui, tous les câbles électriques sont fabriqués avec deux couches semi-conductrices interne et externe. L'un des principaux problèmes est la présence des impuretés dans le carbone noir employé pour établir la conductivité désirée des semi-conducteurs. La présence d'une quantité significative d'impuretés dans la couche semi-conductrice d'un câble électrique a été confirmée par Crine et al [9], Johnson et al [10]

II.3 Différents types de dégradations du polyéthylène réticulé (PRC)

Les processus de dégradation de l'isolation en PRC peuvent être classés en deux groupes principaux en tant que : intrinsèque ou extrinsèque.

-Dégradation intrinsèque: due aux changements physiques, chimiques et aux charges d'espace emprisonnées [11]. Toutefois, ce processus de dégradation intrinsèque peut affecter un volume important de l'isolation. Comme exemple, la dégradation thermique de l'isolation.

-Dégradation extrinsèque: due aux cavités, contaminants ou encore aux imperfections physiques ou aux composants mal dispersés. La dégradation extrinsèque a comme conséquence un changement local du matériau. Les dégradations chimique et électrique sont les principaux mécanismes représentant cette dégradation.

II.3.1 Dégradation chimique

On appelle dégradation chimique tout phénomène incluant une modification de la composition chimique du matériau sous l'influence de l'environnement [12]. Les différents

mécanismes de vieillissement chimique des polymères sont de type : thermochimique, thermo-oxydatif, photochimique, radiochimique, hydrolytique et biochimique [12].

Le mode de vieillissement chimique du PRC implique la consommation chimique des antioxydants et l'oxydation du polymère. L'oxydation se produit essentiellement dans la phase amorphe du polymère [13] et elle conduit à :

- des coupures le long de la chaîne polymère, un processus connu sous le nom de dépolymérisation qui réduisent la masse moléculaire du polymère (les chaînes deviennent plus courtes) et génèrent de petites molécules volatiles si elles se produisent près des extrémités de chaînes [14], mais aussi, parfois, des ramifications voire une réticulation du polymère [15, 16].
- une modification des groupes latéraux de la chaîne polymère, en particulier des doubles liaisons susceptibles de réagir avec les radicaux et, ainsi, de contribuer à la réticulation. Les radicaux libres chimiquement réactifs font partie de la réaction. Ces radicaux libres sont formés pendant l'oxydation de l'isolation. Le taux de formation de radicaux libres dépend de la température, de la quantité de l'oxygène et de la présence du rayonnement.

II.3.2 Dégradation thermique

Dans les conditions normales, les températures de l'isolation PRC ne devraient pas dépasser les 90°C tandis que pendant les conditions de défaillance, les températures peuvent augmenter jusqu'à 120°C. Aux températures entre 150 et 225°C, les radicaux libres peuvent s'attacher à d'autres chaînes polymères entraînant la réticulation. Cette plage de température diminuera la rigidité mécanique de l'isolation, sa densité ainsi que ses liaisons cristallines. À des températures très élevées au-dessus de 350°C, la dégradation thermique prend place par dépolymérisation et formation inachevées de fissurations de l'isolation en polyéthylène [17].

II.3.3 Dégradation mécanique

La structure moléculaire du polyéthylène peut être modifiée par la dégradation mécanique. Cette dernière génère la déformation des liens et permet la création de radicaux libres, et les groupes carbonyliques en polyéthylène, ainsi que la rupture diélectrique de l'isolation en polymère [18]. En effet, l'application de l'effort mécanique peut créer des déformations et des microfissures dans la matrice polymère affectant les propriétés physiques de l'isolation et aide à la formation des décharges partielles et le développement d'arborescences [19]. Les défauts créés par la dégradation mécanique représentent des points sensibles où le vieillissement électrique peut débiter [20,21].

II.3.4 Dégradation électrique

Les défauts les plus dangereux dans l'isolation polymère sont provoqués par la dégradation électrique. Cette dernière peut se présenter sous forme de trois mécanismes importants, les décharges partielles, les arborescences d'eau et les arborescences électriques. La dégradation électrique n'affecte pas la longueur entière du câble, comme dans le cas de la dégradation thermique, mais affecte localement l'isolation polymère.

La structure finale cristalline ne s'accomplit pas juste après la fabrication du polyéthylène, mais se produira plutôt pendant plusieurs années [17]. Dans ce processus lent, des microcavités et des secteurs localement plus denses peuvent être formés à l'intérieur de

l'isolation. Les irrégularités de la structure d'isolation augmenteront l'effet de la dégradation électrique et le risque de la panne électrique. En effet, la dégradation électrique commence dans les zones qui présentent des densités importantes de contamination, d'impuretés et de vacuoles [22, 23]. L'isolation polymère est sensible même aux petites décharges partielles [24].

Le vieillissement électrique des polymères implique un changement permanent de leur structure chimique qui affaiblit leur capacité de supporter un champ électrique élevé.

II.3.4.1 Dégradation par arborescences d'eau

Sous l'action du champ électrique en courant alternatif, l'eau peut pénétrer dans l'isolation particulièrement en présence de quelques défauts d'interface où le champ électrique est amplifié créant différentes arborescences dans l'isolation.

Le seul véritable phénomène de vieillissement des câbles électriques connu actuellement est lié à la présence d'arborescences électrochimiques. Plusieurs théories ont été bâties (phénomènes électrochimiques ou électromécaniques...) sans permettre pour autant de donner une explication totalement satisfaisante. Cependant, tous les spécialistes s'accordent à dire que ces arborescences conduisent irrémédiablement au claquage de l'isolation principale des câbles.

La dégradation par arborescences d'eau est la formation d'un grand nombre de microcavités avec des surfaces intérieures probablement oxydées ou chimiquement modifiées. La présence d'un champ électrique est essentielle pour le développement de ces arborescences. Selon Dissado [20], les arborescences d'eau peuvent se produire déjà avec un champ électrique de 1.9 kV/mm. Un autre facteur principal et essentiel pour le développement d'arborescence d'eau est la présence d'un électrolyte aqueux dans les microcavités. Il est possible cependant qu'une arborescence disparaisse en éliminant les particules d'eau existantes dans l'isolation. Par la nature hydrophile du PRC (avec une hydro-solubilité approximative de 2.65 mg/100ml) [25], l'arborescence réapparaîtra dès que le matériau est exposé à l'humidité. L'eau se concentre dans les fissures et les microcavités plutôt que de se disperser dans tout le volume du polymère, cela permet la croissance des arborescences d'eau [25].

II.3.4.2 Différentes types d'arborescences d'eau

Généralement, deux types d'arborescences d'eau et une variété de formes géométriques ont été observées dans l'isolation en PRC [5]. Toutefois, dans les isolations récentes en PRC, l'arborescence d'eau apparaît sous forme individuelle (Fig. II.3 (a) et II.3 (b)) ou bien continue Fig. II.3 (c), car dans les nouvelles technologies des câbles électriques, le nombre des défauts d'interface et de volume, qui sont les points de l'initiation des arborescences, est considérablement réduit.

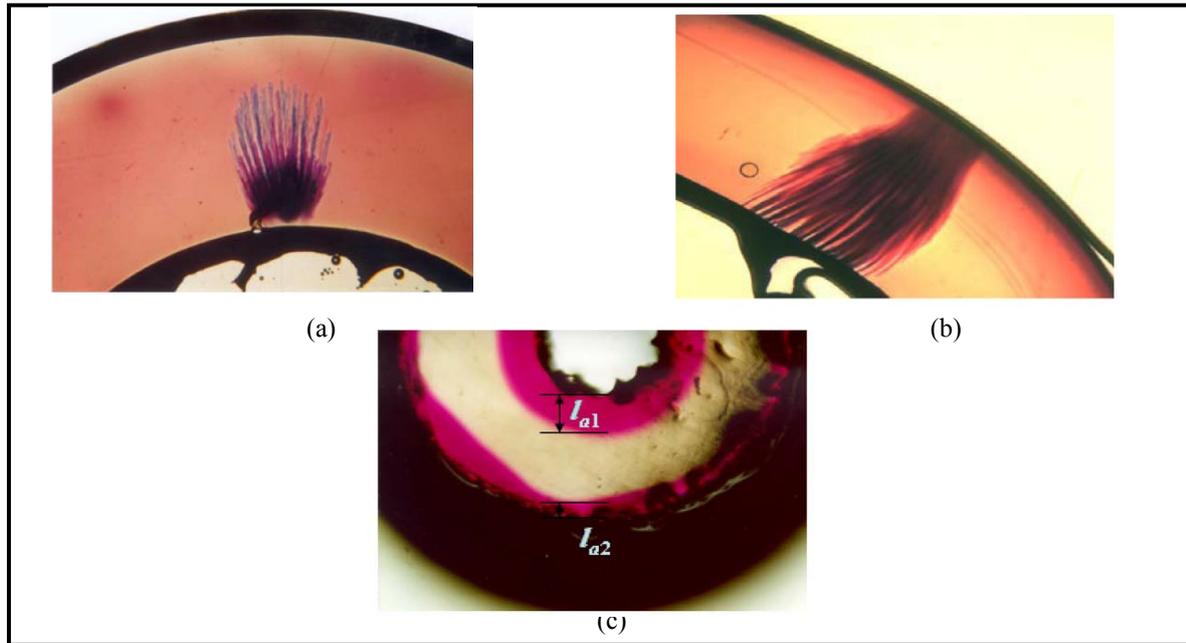


Fig. II.3: Différents types d'arborescences d'eau ; (a) arborescence d'eau individuelle se développant à partir de l'écran conducteur ; (b) arborescence d'eau individuelle traversant l'ensemble de l'isolation du câble [26], (c) arborescence d'eau de type continu se développant à partir des deux couches semi-conductrices intérieure et extérieure [27].

Ces arborescences peuvent se développer à partir des déformations ou des contaminants présents au niveau des couches semi-conductrices. Plusieurs facteurs agissent sur la formation des arborescences d'eau d'une manière significative tels que:

- 1 Fréquence appliquée [28].
- 2 Degré de réticulation [29].
- 3 Morphologie de la matrice polymère [30].
- 4 Importance du champ électrique appliqué [31].
- 5 Présences d'humidité (teneur en eau) [32].

Un autre type de structure que l'on rencontre pour les arborescences d'eau est la structure dite nœud papillon. Ce type de défaut se trouve dans le volume de l'isolation et généralement s'initie à partir d'une cavité ou d'une impureté. Ce type de défaut est très commun pour les câbles extrudés immergés sans gaine métallique d'imperméabilité. Ces arborescences ne poussent que très lentement et semblent même s'immobiliser après un certain temps de telle sorte que des câbles peuvent se maintenir en service durant de très longues périodes malgré une quantité importante d'arbres nœud papillon.



Fig. II.4 Arbre nœud papillon dans un câble extrudé

II.4 Mécanismes d'arborescences d'eau

Différentes théories décrivent le processus d'arborescences d'eau comme une combinaison simultanée ou séparée de différents facteurs électriques, chimiques et mécaniques [20, 33, 34]. De nos jours, deux voies principales existent décrivant ce processus : l'explication électrochimique de Steennis [5] et de Dissado [35] et électromécanique de Crine [36, 37].

Le déclenchement des arborescences d'eau se produit en raison de l'agrandissement des nano-cavités existantes déjà dans le matériau dû au volume libre. Dissado [35] explique le processus par la dissociation de l'eau dans ces emplacements formant des radicaux. Ces derniers réagissent avec la séparation des chaînes polymères et peuvent produire des radicaux polymères. Les chaînes cassées peuvent s'attacher avec d'autres chaînes voisines, agrandissant le vide.

Selon Crine [36], le déclenchement des arborescences débute par les nano-cavités dans le matériau polymère qui se raccordent en raison des forces mécaniques créées dans le polymère par le champ électrique, produisant de plus grands vides tels que les microcavités. Le processus de propagation des arborescences d'eau comporte la création des vides additionnels dans le matériau. Le raccordement entre ces vides est assuré par un électrolyte aqueux [20] qui explique aussi que se raccordement entre les nano-cavités additionnelles créées dans le matériau et l'augmentation du champ électrique au sommet de l'arborescence d'eau permettent à cette dernière de se propager dans l'isolation polymère, et si un processus chimique complexe existe, c'est simplement un processus secondaire [36].

Les travaux de Zeller [38, 39] ont été orientés aussi dans ce sens (en accord avec l'explication électrochimique de Steennis [5] et de Dissado [35]). Zeller a examiné les divers phénomènes mécaniques et électromécaniques suggérés pour le développement d'arborescences d'eau. Il a conclu qu'aucune explication satisfaisante des données n'a été fournie par ses travaux expérimentaux. En particulier, le champ nécessaire pour produire des efforts mécaniques menant à la rupture de l'isolation en polyéthylène (de l'ordre de 8-18MPa pour TR-XLPE) ne peut être atteint avant que le champ n'excède la valeur critique permettant la génération d'une arborescence électrique. Zeller [39] a orienté ses travaux pour une étude de l'effet de la thermodynamique sur la croissance de l'arborescence d'eau. Il a conclu qu'un champ électrique important dans l'isolation pourrait soulever le potentiel chimique, favorisant de ce fait la réaction chimique, qui rompt des liaisons internes du polymère et affaiblit le matériau en provoquant la rupture de l'isolation.

Tanaka et al [40] ont étudié le lien entre les efforts mécaniques internes et l'arborescence d'eau. Ils ont observé des efforts mécaniques entre 1 et 8 MPa (10 à 80 barre). Ce sont des valeurs élevées, mais non destructives pour l'isolation en polymère. De tels efforts mécaniques peuvent être le résultat du procédé de production ou de l'installation des câbles électriques. La limite inférieure à laquelle l'effort mécanique peut mener à la dégradation est de 10 MPa (100 barre). Une relation entre le processus électrochimique et les efforts mécaniques dans l'isolation a été écartée. On assume que la propagation des arborescences individuelles n'est pas affectée par ces efforts. Ceci n'est pas valable dans le cas d'une dégradation avancée, quand beaucoup de chaînes du polymère seront oxydées et où la scission des chaînes du polymère et la formation des vides et des fissures sont probablement favorisées par ces efforts mécaniques.

Selon Steennis [5], dans beaucoup de cas, il est difficile de trouver l'origine du déclenchement des arborescences d'eau. Parfois, l'origine de ce phénomène est due aux dommages mécaniques de l'isolation, telle que l'éraflure de l'isolation. Une autre origine de déclenchement de ces arborescences est la présence des irrégularités dans les couches semi-conductrices en contact avec l'isolation interne d'un câble électrique.

II.5 Facteurs influençant la propagation d'arborescences d'eau

II.5.1 Effet de la fatigue mécanique sur la propagation d'arborescences d'eau

Wang Igor et al [41, 42] ont révisé les modèles de Zeller pour le développement des arborescences d'eau dans le polyéthylène ; ils ont trouvé que la fatigue mécanique de l'isolation en polyéthylène, due aux efforts diélectrophorétiques cycliques autour des défauts tels que les cavités ou les inclusions, est un mécanisme possible pour le développement des arborescences d'eau. Ces efforts sont de l'ordre de quelques MPa, mais peuvent être suffisant pour endommager l'isolation à long terme. En outre, en présence de charges d'espace, il est important de rajouter les efforts de Coulomb aux efforts diélectrophorétiques agissant sur le défaut.

Les résultats obtenus par "l'école électromécanique" [36, 37] ne contredisent pas ceux de "l'école électrochimique" [38, 39]. En effet, leurs travaux indiquent qu'ils sont tous les deux corrects ; et que les réactions chimiques et les forces mécaniques, interagissent ensemble, et peuvent être les facteurs les plus probables dans le développement des arborescences d'eau.

II.5.2 Dégradation électrochimique comme mécanisme de la propagation d'arborescences d'eau individuelles dans le PRC

Les différents paramètres souvent mentionnés en relation avec la croissance de l'arborescence d'eau sont l'osmose et l'action capillaire, les forces de Coulomb, la dégradation thermique, les décharges partielles, les efforts diélectrophorétiques et la dégradation électrochimique.

- L'osmose et l'action capillaire ne dépendent pas de l'effort électrique, raison pour laquelle elles ne peuvent pas être considérées comme la cause qui permet la croissance de l'arborescence d'eau. Cependant, les deux processus jouent un rôle secondaire, par exemple pendant le déclenchement de l'arborescence d'eau ou en poussant l'eau dans un canal polarisé [43, 44].

- Les forces de Coulomb exercées au sommet de l'arborescence d'eau sont trop faibles pour expliquer la dégradation mécanique du polyéthylène [39, 45].

- La dégradation thermique du polyéthylène n'est pas probable, car la température dans une arborescence est négligeable [46, 47].

- Les décharges partielles n'ont jamais été détectées pendant la croissance d'une arborescence sous des conditions de vieillissement modéré donc les décharges ne peuvent pas être considérées comme résultat de la croissance de l'arborescence d'eau [48, 49].

- Les efforts diélectrophorétiques [50, 51] ne peuvent pas expliquer la croissance de l'arborescence d'eau. Dans un champ électrique, les efforts diélectrophorétiques pourraient avantager l'acheminement de la vapeur d'eau au bout de l'arborescence, cependant, l'effet de

ce processus est minime, le fait que la concentration du champ électrique au bout de l'arborescence d'eau est limité.

Selon les conclusions de Steennis [52] la dégradation électrochimique est le mécanisme le plus probable permettant la naissance et la croissance d'arborescences d'eau.

II.5.3 Effet de la présence de cavités d'air sur la propagation des arborescences d'eau

II.5.3.1 Cavité dans une isolation solide

Un des types les plus importants de la rupture diélectrique des isolants solides résulte de l'action des décharges électriques dans des cavités gazeuses internes.

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants : d'une part la permittivité relative des isolants solides étant plus élevée [53] (2 à 6 fois) que celle des gaz occlus ($\epsilon_i = 1$), le champ électrique dans les vacuoles est proportionnellement plus élevé. D'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus faible (environ 10 fois moins) que celles des solides.

Ces deux constatations, allant dans le même sens, font que des décharges dites partielles apparaissent dans les vacuoles de gaz incluses dans les isolants solides pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui entraîneraient la perforation du diélectrique solide [54].

II.5.3.2 Paramètres affectant l'activité de la décharge partielle

Par leurs dimensions, leur pression et les contraintes de tension auxquelles sont soumises les cavités, des décharges y prennent naissance.

a) Paramètres extérieurs au défaut

Les contraintes extérieures qui affectent la décharge partielle dans une cavité sont : l'amplitude, la fréquence, et la forme d'onde de la tension appliquée ainsi que la température ambiante du matériel [55-59]

b) Géométrie et conditions de défaut

Les conditions de la cavité qui influencent sur l'activité de la décharge partielle sont la taille et la forme de la cavité, la position de la cavité dans l'isolant, le coefficient diélectrique de la cavité [60], le niveau d'humidité et la pression initiale dans la cavité [61, 62, 63].

II.5.3.3 Champ d'initiation d'une décharge partielle

Le champ d'initiation d'une décharge partielle est le champ minimum dans la cavité pour qu'une décharge se produise. Le champ d'initiation d'une décharge dans une cavité dépend de la géométrie de la cavité, de la pression dans la cavité, de la constante diélectrique, des caractéristiques de procédé d'ionisation dans le gaz et de la distance inter-électrodes. La quantité ($E_{in} - E_{ext}$) est calculée par Pederson en termes de l'équation [64-66].

$$\frac{E_{in}}{p} = \left(1 + \frac{B}{(pd)^n}\right) \frac{E_{ext}}{p} \quad (\text{II. 31})$$

où : E_{ext} est le champ d'extinction de la décharge partielle, B et n sont des paramètres liés aux procédés d'ionisation dans le gaz, p est la pression. Pour l'air, $(E_{\text{ext}}/p) = 24.2 \text{ V}/(\text{Pa} \cdot \text{m})$, $n = 0.5$ et $B = 8.6 \text{ Pa}^{0.5} \cdot \text{m}^{0.5}$.

II.5.3.4 Effets des décharges partielles

L'effet des décharges partielles est variable selon leur intensité et le milieu où elles se déroulent. La décharge partielle est souvent accompagnée d'une génération de gaz (formation de cavités dans le solide), de nouvelles espèces atomiques et moléculaires excitées et de radicaux qui peuvent générer à leur tour des acides attaquant les matériaux. Ces décharges partielles produisent également une érosion mécanique, une carbonisation des surfaces par bombardement d'ions, développement d'arborescences d'eau si les contraintes électriques sont suffisantes.

Steennis [52] a montré un exemple d'une arborescence d'eau qui se développe à partir d'une cavité d'air. Cette cavité est située dans la couche semi-conductrice intérieure d'un câble vieilli de 10 kV. En effet la cavité (vide) contenait toujours des quantités significatives de diverses espèces, telles que le silicium, le soufre et le calcium.

Les décharges partielles s'attaquent au polyéthylène et cause son oxydation. L'eau peut ensuite entrer dans les régions polaires. Cela permet aux décharges partielles de s'amorcer sous des conditions de contraintes électriques normales. Donc les décharges partielles dans une cavité d'air sont une source de risque potentielle pour le déclenchement des arborescences d'eau.

Deux grandes voies sont suivies pour se prémunir de ces phénomènes et éviter toute détérioration de l'isolation de haute tension [67]: soit un durcissement des matériaux qui les rend résistants aux décharges; soit exiger des conceptions et des qualités de produits qui permettent de s'affranchir de ces phénomènes (élimination des défauts pour les câbles de transport d'énergie).

Le câble de 500 kV en polyéthylène réticulé a été conçu et développé avec succès par des industries énergétiques japonaises en utilisant de nouvelles technologies pour réduire au minimum les défauts tels que les impuretés [68]. La ligne d'interconnexion de la centrale hydroélectrique de Kazunogawa (Tokyo), a été programmée pour entrer en service en décembre 1999 comme première ligne au monde avec une tension de 500kV [69]. Un vrai progrès technique accompli dans l'isolation en PRC et son processus de fabrication.

II.5.3.5 Le modèle de Hvidsten

La description des arborescences d'eau proposée par Hvidsten et Ilstad (1998) [70] est maintenant largement acceptée (voir Dubickas et l'Edin, 2008)[28], (Fig. II.9).

Hvidsten [71], explique que les arborescences d'eau sont constituées de canaux creux de quelques microns de diamètres dans lesquels des décharges électriques s'amorcent sous l'effet du champ. Sous l'action de ces décharges partielles, les gaz remplissant les canaux deviennent conducteurs et provoquent des claquages qui font progresser les arborescences d'eau.

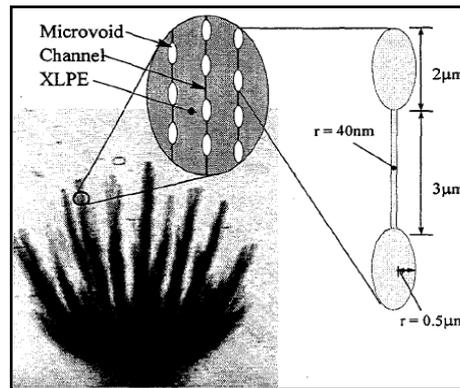


Fig. II.9 modèle d'arborescence d'eau décrit par Hvidsten [71] montrant des cavités de forme elliptique interconnectées par des nano canaux.

II.5.4 Effet de la fréquence

Selon Visata et al [72] l'arborescence d'eau est un phénomène de dégradation importante de l'isolation des câbles électriques sous un champ alternatif. La dégradation par arborescence d'eau est un processus long, les expériences accélèrent généralement le processus en augmentant la fréquence et en employant un champ appliqué élevé (toujours assez bas pour empêcher les arborescences électriques de se produire). Donc, les arborescences d'eau dépendent de plusieurs paramètres, spécialement de la fréquence. En effet, le champ alternatif accélère considérablement le processus et induit une fatigue qui joue certains rôles dans le développement des arborescences d'eau [73, 74]. Dans ce cas, le taux de croissance varie linéairement avec le nombre de cycles (fréquence), à condition que les autres paramètres d'expérimentation soient constants [73, 75].

II.5.4.1 Arborescences d'eau sous tension alternative

Le taux de propagation des arborescences d'eau individuelles est fortement lié à la fréquence du champ électrique. Yoshimura et al [47] ont trouvé une relation linéaire entre la croissance des arborescences d'eau et la fréquence de la tension appliquée dans une gamme de 200 Hz à 3 kHz. Les arborescences d'eau croissent avec l'augmentation des fréquences [76, 77, 78] et plus rapidement en hautes fréquences [79].

II.5.4.2 Arborescences d'eau sous tension continue

La croissance des arborescences d'eau sous tension continue a été étudiée par Yamada et al [80] et Paye et al [81]. Les auteurs ont trouvé que la naissance et la croissance des arborescences d'eau de petites tailles nécessite l'application de contraintes électriques importantes et que la forme de ces arborescences diffère de celles développées sous tension alternative. La différence se situe peut-être dans le mécanisme de croissance des arborescences d'eau développées sous l'application de tension continue et celles développées sous l'application de la contrainte alternative.

II.5.5 Effet du champ électrique sur la propagation des arborescences d'eau

Le champ électrique joue un rôle important dans le mécanisme de croissance des arborescences d'eau [72]. Les arborescences d'eau se développent quand le champ électrique est amplifié au cours de la durée de vie des câbles.

En utilisant la méthode à aiguille d'eau, la croissance de l'arborescence d'eau a augmenté de 0,1 μm à 1 μm [82, 83].

II.5.6 Effet de la température sur la propagation des arborescences d'eau

La température est un autre facteur significatif qui peut changer les caractéristiques mécaniques d'un matériau polymère, influençant de ce fait le déclenchement et la croissance des arborescences d'eau [84]. L'augmentation de la température réduit le retard à l'apparition des arborescences et une modification morphologique au niveau du polymère. En effet, la température provoque une dégradation interne importante (augmentation de la teneur en eau dans le matériau) permettant la croissance des arborescences d'eau [5, 84]. Ce phénomène d'action de la température sur la dégradation interne a été mis en évidence par des mesures de transmission de la lumière et de pertes diélectriques.

II.5.7 Influence de la concentration en ions sur le développement des arborescences d'eau

Le développement des arborescences d'eau est fortement influencé par différents facteurs, l'intensité du champ électrique et la concentration en ions en présence d'eau [85, 86] jouent un rôle important dans ce processus. La concentration d'ions dans la solution dépend de la conductivité de la solution. Donc, les concentrations en ions augmente la croissance des arborescences d'eau [77, 82, 87]. La nature chimique des ions influence aussi grandement le déclenchement et la vitesse de propagation des arborescences d'eau [88-90]. Bamji et al [46] ont constaté que la longueur des arborescences d'eau est affectée par le type de sels dissous dans l'eau, et que dans la plupart des cas la quantité la plus élevée de sel augmente le taux de propagation des ces arborescences. Les expériences effectuées dans différents laboratoires montrent que la vitesse d'augmentation de la longueur des arborescences est engendrée par la présence de NaCl, suivie de CuSO₄ [85, 91]. Aucune arborescence n'a été observée avec de l'eau distillée.

II.5.8 Développement d'arborescences avec le temps de vieillissement en présence d'humidité

La figure II.10 représente différents types de développement d'arborescences d'eau dans le temps. On peut voir que, avec l'augmentation du temps de vieillissement, les dimensions et la densité des arborescences augmentent. Ceci est dû, d'une part, aux ions par la dissociation des particules d'eau (sous l'action de champ électrique), d'autre part à l'augmentation de la teneur en eau [92] et que les arborescences d'eau n'apparaissent pas pour une humidité relative inférieure à la valeur critique. Pour le PRC, cette valeur est de 70% RH [93, 94]. Sletbak et al [95] et Yoshimitsu et al [96] ont constaté que les arborescences d'eau deviennent rares à une humidité relative de 65 % à 70 % ou moins. Les arborescences d'eau augmentent avec le niveau d'humidité relative.

L'initiation et la croissance des arborescences d'eau peuvent ainsi être retardées en réduisant la quantité d'eau qui pénètre dans l'isolation électrique aussi longtemps que possible, prolongeant ainsi la durée de vie du câble [97].

Dans leurs travaux, Knut et al [98] ont fait des calculs numériques sur la vitesse de diffusion axiale de l'eau dans l'isolation d'un câble électrique. Des simulations numériques du temps nécessaire pour que l'humidité atteigne le seuil critique de la croissance d'une arborescence ont été réalisés par Hellesø [99].

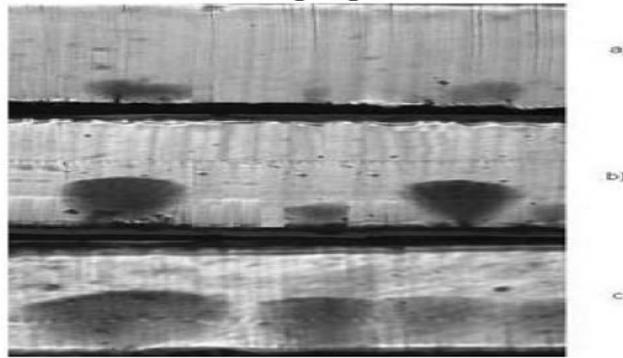


Fig. II.10 Arborescences d'eau dans une isolation PRC pour $t=48h$ (a), $t=72h$ (b), $t=96h$ (c), ($E=4kV/mm$, $f=5kHz$) [92].

Due à l'existence simultanée d'humidité, d'inclusions et de champ électrique, l'arborescence d'eau peut se transformer en arborescence électrique conduisant au claquage de l'isolation [100].

II.6 Initiation des arborescences électriques à partir d'une arborescence d'eau

Sous certaines circonstances, la croissance d'une arborescence d'eau peut être transformée en une arborescence électrique (cas d'une surtension). La figure II.11 illustre la formation de deux arborescences d'eau et électrique dans un câble souterrain. Après une telle transformation, une panne de l'isolation ne peut pas être exclue. Un tel mécanisme a été décrit par Tabata et al [101]. Steennis [52] a suggéré que la cause de cette transformation est la présence d'une inclusion, telle qu'une impureté ou une cavité d'air. Ces travaux indiquent que le déclenchement des arborescences électriques à partir des branches d'une arborescence d'eau ont été lancées à partir des inclusions où une grande quantité d'impuretés est présente.

Etant donnée le grand nombre d'inclusions dans le polyéthylène et également dans le chemin emprunté par l'arborescence d'eau, l'augmentation du champ électrique peut être prévue au niveau de ces inclusions.

Une étude sur l'influence de la présence de cavités d'air ou d'eau dans la zone proche d'une arborescence individuelle se développant de la couche semi-conductrice intérieure à l'isolation d'un câble électrique sur la distribution du champ électrique a été réalisée par Meziani et al [102]. Dans leur travail, ils ont pu constater que la distribution du champ est affectée par le nombre et la taille des microcavités, ainsi que par la distance séparant l'arborescence d'eau et les microcavités. En effet, le champ électrique augmente sensiblement dans des cavités de faible diamètres et celles proches de l'arborescence d'eau. En particulier, en présence de micro cavités de même nature, (eau-eau) ou bien (air-air), qui entrent en interaction. Ainsi, ils ont conclu que l'effet nocif des cavités se manifeste d'une façon plus

accentuée par la présence d'eau que d'air. A cet effet, le déclenchement d'une arborescence électrique est plus probable dans le cas des cavités d'eau que dans le cas d'une cavité d'air et que l'interaction mutuelle entre les cavités contribue grandement à cette apparition.

Une arborescence électrique s'initie à partir d'un point de concentration de champ électrique et se propage à l'intérieur de l'isolation sous forme de canaux carbonisés. A l'intérieur de ces canaux, une intense activité de décharges partielles peut avoir lieu et va contribuer à dégrader davantage le matériau.

L'arborescence électrique est due à des décharges électriques internes qui détériorent localement le matériau en formant des radicaux libres. Ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène, il s'ensuit une dégradation généralisée ou localisée des isolants [103]. Pendant cette étape, on observe l'émission électroluminescente [104, 105], des petites étincelles de rupture locale se produisent aux intensités de champ excédant 3 kV/mm [106]. Ces étincelles créent l'érosion dans le matériau en bombardant le défaut (cavité) avec des ions et des électrons d'énergie élevée. Ce bombardement peut lancer la croissance de l'arborescence électrique. Quand les structures de détérioration commencent à se développer et s'étend à travers l'isolation, l'arborescence électrique entre dans la nouvelle étape appelée l'étape de propagation. Après un certain temps et sous une tension donnée, l'étape de la rupture se produit quand l'arborescence court-circuite l'ensemble de l'isolation [107].



Fig. II.11 Formation d'une arborescence électrique dans une arborescence d'eau dans l'isolation d'un câble souterrain, après deux ans sous une très basse fréquence (0,1 Hz) [108]

II.7 Comparaison entre les deux arborescences d'eau et électrique

a) Arborescence d'eau

- ❖ Présence d'humidité
- ❖ Développement long (mois, années)
- ❖ Formation d'un buisson
- ❖ Microcavités connectés par un chemin

b) Arborescence électrique

- ❖ Absence d'humidité
- ❖ Un développement rapide (heures, semaines), défaillance courte après la formation
- ❖ Formation d'arbre
- ❖ Carbonisation de la région

II.8 Suppression de la croissance des arborescences d'eau

La suppression de la croissance des arborescences d'eau dans l'isolation des câbles électriques devrait être effectuée comme suit :

- 1) une réduction du niveau d'impuretés global dans l'isolation et dans les deux couches semi-conductrices.
- 2) une réduction de la formation des molécules oxydées du polymère.
- 3) l'utilisation des additifs polaires.

II.9 Mécanisme de claquage des isolants solides

Le claquage ou la décharge disruptive est l'apparition d'un chemin conducteur dans l'isolant lorsque la différence de potentiel aux bornes de l'isolant atteint une certaine valeur limite. A la différence des gaz et des liquides, le claquage des isolants solides entraîne la destruction du matériau, et par conséquent, l'arrêt de fonctionnement du composant ou du système dont il fait partie. En général, on distingue quatre types de mécanismes de claquage des isolants solides actuellement utilisés dans l'isolation à haute tension : claquage électrique, claquage thermique, claquage électromécanique et claquage dû au volume libre des polymères.

A ceux-ci, il faut ajouter d'autres phénomènes secondaires liés à des défauts introduits lors de la fabrication, et des défauts apparaissant dans le temps en volume ou à la surface du matériau, au mode opératoire et aux conditions expérimentales. Dans ces cas, on parle de claquage par ionisation (décharges partielles) et de claquage par vieillissement.

II.9.1 Claquage électrique

Selon les processus de pré-claquage, on distingue deux groupes de théories de claquage électrique : les théories de claquage intrinsèque et les théories de claquage par avalanches. Pour le premier groupe, c'est l'intensité du champ pour laquelle apparaît une instabilité du courant électronique dans le diélectrique qui correspond au champ critique provoquant le claquage intrinsèque. Pour le deuxième groupe, on admet comme critère de claquage l'intensité du champ électrique pour laquelle le processus de multiplication d'électrons dans le diélectrique atteint des proportions inadmissibles le matériau cesse d'être diélectrique et devient conducteur.

II.9.1.1 Claquage électrique intrinsèque

D'après Fröhlich [109] seuls les électrons situés dans la bande de conduction prennent part dans le mécanisme de claquage. Ces électrons peuvent provenir d'absorption de rayonnement d'énergie importante ou des perturbations du réseau cristallin ou encore être des électrons de valence issus d'atomes (impuretés) excités pouvant être ionisés par l'énergie thermique. La détermination de la tenue diélectrique selon la théorie de claquage intrinsèque de Fröhlich consiste à analyser le comportement d'électrons pris singulièrement dans un champ électrique intense. On admet que la densité d'électrons de conduction dans le diélectrique est si faible que leur mouvement est seulement imposé par le champ électrique extérieur et l'action du réseau cristallin du diélectrique.

II.9.1.2 Claquage électrique par avalanches

La théorie de l'avalanche a été développée initialement par Seitz et al [110]. Elle suppose qu'un électron est présent à l'origine dans le matériau. Cet électron produit une ionisation par collision qui entraîne une avalanche. On estime généralement le nombre d'électrons nécessaires pour produire une avalanche suffisamment destructive à 10^{12} , ce qui correspond à 40 générations de collisions (en effet : $2^{40} \approx 10^{12}$)[111]. En effet l'augmentation du courant de conduction électronique continue jusqu'à l'instant où le diélectrique commence pratiquement à conduire.

II.9.1.3 Claquage thermique

Lorsqu'on applique un champ électrique à un matériau isolant, on sait qu'un courant (généralement très faible) circule entre les électrodes. En champ continu, ce courant est lié à la conduction tandis qu'en champ alternatif, se superpose à ce courant de conduction, un courant de pertes diélectriques. La circulation de ces courants dans le matériau a pour conséquence un transfert d'énergie qui chauffe le matériau. Cet échauffement doit être compensé par les pertes thermiques par conduction dans le matériau pour que l'équilibre soit conservé.

L'équilibre entre la dissipation thermique et l'énergie prise au champ est décrit par l'équation différentielle de Wagner [111]:

$$\sigma E^2 = C_V \rho \frac{dT}{dt} - \text{div}(K \text{grad } T) \quad (\text{II. 1})$$

Avec :

C_V : la capacité thermique massique à volume constant ($J. kg^{-1}.K^{-1}$), ρ : masse volumique ($kg. m^{-3}$), T : température (K), σ : conductivité électrique ($S.m^{-1}$), E : champ électrique ($kV. mm^{-3}$), K : conductivité thermique ($W.K^{-1} m^{-1}$), t : temps (s).

II.9.1.4 Claquage électromécanique

Le claquage survient lorsqu'on applique un effort de compression dépassant la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module de Young. On rencontre ce type de claquage principalement dans les polymères thermoplastiques, notamment lorsque l'on se rapproche de la température où leur module d'Young baisse significativement [111]. La force de compression est donnée par la relation suivante [112]:

$$P = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \left(\frac{V}{e} \right)^2 \quad (\text{II. 2})$$

Où P est la pression électrostatique, ϵ_0 est la permittivité du vide, ϵ_r est la permittivité relative du matériau isolant, E est le champ électrique auquel est soumis l'isolant et V est la tension électrique.

II.9.1.5 Claquage dû au volume libre des polymères

Les électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie avec le champ électrique en traversant le volume libre pour causer la rupture diélectrique de l'isolant. La théorie s'applique aux polymères purement amorphes et permet de calculer la plus grande distance parcourue par les électrons qui ont provoqué le claquage. La structure chimique (poids moléculaire, réticulation, additifs) et physique (cristallinité, microcavités, contraintes mécaniques) influent directement sur le claquage [113]. Selon Fou [114], une bonne corrélation existe entre la distance moyenne entre les chaînes du polymère et la rigidité diélectrique. À température croissante [115], il se produit un réarrangement de la structure du polymère qui, en modifiant son volume libre, provoque une réduction de la rigidité diélectrique.

II.10 Conclusion

Comme celle de tout matériau, la rigidité diélectrique de l'isolation polymère est naturellement limitée par la présence de micro-défauts et les impuretés. Sous un champ électrique, ces inclusions contribuent grandement à la croissance des arborescences d'eau. Dans ce sens, deux théories peuvent être distinguées : électrochimique et électromécanique. Dans le cas de la présence des cavités ; le mécanisme le plus dominant est le mécanisme électromécanique. Par contre, pour la croissance de ces arborescences en présence d'impuretés le modèle électrochimique peut être la cause principale de ce phénomène.

Bibliographie

- [1] J. Li, X. Zhao, G. Yin, S. Li, J. Zhao, B. Ouyang, "The Effect of Accelerated Water Tree Ageing on the Properties of XLPE Cable Insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 5, pp 1562 -1569, October 2011.
- [2] L. Hubert, Propriétés physiques et mécaniques du polyéthylène pour application tube en relation avec l'architecture moléculaire, Thèse de doctorat, Ecole doctorale matériaux de Lyon, INSA de Lyon, 2001.
- [3] S.M. Avila, D.A. Horvath, "Microscopic void detection as a prelude to predicting remaining life in electric cable insulation", Proceedings of International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and Human Machine Interface Technologies (NPIC & HMIT), Washington, November 2000.
- [4] L. Boukezzi, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension", thèse de doctorat, Ecole Nationale polytechnique, Juin 2007.
- [5] E.F. Steennis, F.H. Kreuger, "Water treeing in polyethylene cables", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25 No. 5, pp.989 -1028, October 1990
- [6] M. Nedjar, "Evaluation de la tenue diélectrique a court et long termes des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension", Université de MMTO, thèse de doctorat en électrotechnique Juin 2003.
- [7] J. Muccigrosso, P.J. Phillips, "The morphology of crosslinked polyethylene insulation", IEEE Trans.on Electr. Insul, Vol. EI-13, No. 3, pp 172-178, 1978.
- [8] N. Yoshimura, M.S.A.A. Hamman, M. Nishida, F. Noto, "Effect of microvoids on the characteristics and tree growth in crosslinked polyethylene", IEEE, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), pp. 342-351, Oct. 30-Nov, 1978.
- [9] W.P. Crine, S. Pelissou, H. St-Onge, J. St-Piere, G. Kennedy, A. Houdayer, P. Hinrichsen, "Elemental and ionic impurities in cable insulation and shields", Jicable 87, International Conference on Polymer Insulated Power Cables, Paris, pp. 206- 213, 1987.
- [10] J.F. Johnson, J.H. Groeger, M.S. Mashikian, B.S. Bernstein, A.R. Cooper, "Sensitive analytical methods for early diagnosis of ageing in solid insulation under voltage stress", Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques a Haute Tension (CIGRE), pp.15-01, August/September,1988.
- [11] J. Densley, R. Bartnikas, B.S. Bernstein, "Multi-stress ageing of extruded insulation system for transmission cables", IEEE Electrical insulation magazine, Vol. 9, No. 1, pp 15-17, 1993.
- [12] J. Verdu, "Vieillissement des plastiques", AFNOR technique, Eyrolles: Paris, 1984.
- [13] F.H. Winslow, C.J. Aloisio, W.L. Hawkins, W. Matreyek, S. Matsuoka, "Oxidative crystallization of polythene", Chemistry and Industry, Vol.35, p.1465, 1963.
- [14] Y. Sun, Y. Sun, L. Fan, K. Watkins, J. Peak, C. P. Wong, "An electrical approach to monitor wire and cable thermal oxidation aging condition based on carbon black filled conductive polymer composite", Journal of Applied Polymer Science, Vol.93, No.2, pp. 513-520, 2004.

- [15] X. Colin, B. Fayolle, L. Audouin, J. Verdu, X. Duteurtre, “Vieillessement et durabilité des matériaux”, Série Arago 28, édité par G. Pijaudier-Cabot, OFTA, Paris, p. 65, 2003.
- [16] X. Colin, B. Fayolle, L. Audouin, J. Verdu, “About a quasi-universal character of unstabilised polyethylene thermal oxidation kinetics”, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 80, No.1, pp. 67-74, 2003.
- [17] P. Hyvönen, “Prediction of insulation degradation of distribution power cables based on chemical analysis and electrical measurements”, Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology, Finland, 2008.
- [18] J.P. Crine, “Influence of electro-mechanical stress on electrical properties of dielectric polymers”, *IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation*, Vol. 12, No. 4, pp. 791-800, 2005.
- [19] C. Stancu, M.G. Plopeanu, P.V. Notingher, S. Grigorescu, “ Lifetime estimation method of polyethylene power cables insulation subjected to electric field in the presence of water”, *International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials*, Bucharest, Romania, pp. 143-150, 24-26 May, 2012.
- [20] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, “Electrical degradation and breakdown in polymers”, *IEE Materials and Devices, Series 9*, Peter Peregrinus, pp. 601, 1992.
- [21] T. Miyashita, “Deterioration of water-immersed polyethylene-coated wire by treeing”, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-6, No. 3, pp. 129-135, 1971.
- [22] O.G. lavallee, “Etude de la charge d’espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d’une résine époxy utilisée dans l’isolation haute tension”, Thèse de Doctorat ès sciences, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2004.
- [23] J.C. Fothergill, G.C. Montanari, G.C. Stevens, C. Laurent, G. Teyssedre, L.A. Dissado, U.H. Nilsson, G. Platbrood, “Electrical, microstructural, physical and chemical characterization of HV XLPE cable peelings for an electrical aging diagnostic data base”, *IEEE, Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.10, No. 3, pp. 514-527, 2003.
- [24] P. Hyvönen, B. Oyegoke, M. Aro, “Advanced diagnostics test and measurement methods for power cable systems on-site”, Literature review with discussion. Report TKK SJT-49. Helsinki University of Technology, High voltage institute, Espoo, Finland, 2001.
- [25] E. Foottit, “Statistical, electrical and mathematical analysis of water treed cross-linked polyethylene cable insulation”, thesis for the degree of doctor, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, 2015.
- [26] B. Holmgren, L. Adeen, S. Hvidsten, J. Wetterstrom, “Condition assessment of 12 and 24 kV XLPE cables installed during the 80’s: results from a joint Norwegian / Swedish research project”, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 21, No.6, pp.11, 17-23, 2005.
- [27] C. Stancu, P.V. Notingher, F. Ciuprina, P. Notingher.jr, J. Castellon, S. Agnel, A. Toureille, “Computation of the Electrical Field in Cable Insulation in the Presence of Water Trees and Space Charge”, *IEEE TIA*, Vol. 45, No. 1, pp.30-43, 2009.
- [28] Dubickas and Edin, “Dielectric model of water trees in an XLPE cable”, *Proc. Intl. Symp. on Electrical Insulation Materials*, Japan, pp. 448-451, Sept. 7-11, 2008.
- [29] S. Nilsson, “The effect of crosslinking on morphology and electrical properties in LDPE intended for power cables”, Thesis for the Degree of Doctorate of Engineering, Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology, 2010.

- [30] J.J. de Bellet, G. Matey, L. Rose, V. Rose, J.C. Filippini, Y. Poggi, V. Raharimalala, "Some aspects of the relationship between water treeing, morphology, and microstructure of polymers", *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, Vol. EI-22, No. 2, pp. 211-217, 1987.
- [31] C.T. Meyer, "Water absorption during water treeing in polyethylene", *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, Vol. EI-18, No.1, pp.28-31, 1983.
- [32] L. Hui, J.K. Nelson, L.S. Schadler, "The influence of moisture on the electrical performance of XLPE/silica nanocomposites", *IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.
- [33] S.L. Nunes, M.T. Shaw, "Water treeing in polyethylene-a review of mechanisms", *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, Vol. EI-15, No. 6, pp. 437-450, 1980.
- [34] C.N. Sanniyati, Y.Z Arief, Z. Adzis, N.A. Muhamad, M.H. Ahmad, M.A.B. Sidik, "Water tree in polymeric cables: A Review ", *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, Vol.11, No.4, pp.191-200, 2015.
- [35] A. Eccles, L.A. Dissado, J.C. Fothergill, J.A. Houlgreave, "Water tree inception-experimental support for a mechanical/chemical/electrical theory", *Dielectric Materials, Measurements and Applications, Sixth International Conference on*, pp.294-297, 7-10 Sep 1992.
- [36] J.P. Crine, J. Jow, "A water treeing model", *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, Vol.12, No.4, pp. 801- 808, 2005.
- [37] K. Abdolah, "The polymer-water interaction in water treeing: an NMR study", *Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, pp.267-271, Cambridge, MA, USA, 5-8 Jun, 1988.
- [38] H. Zeller, "Noninsulating properties of insulating materials", *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP)*, Knoxville, TN, USA, pp. 19-30, 20-23 Oct, 1991.
- [39] H. Zeller, "Thermodynamics of water treeing", *IEEE Trans. Electr.Insul.*, Vol. 22, N.6, pp.677-681, 1987.
- [40] T. Tanaka, T. Fukuda, "Residual strain and water trees in XLPE and PE cables", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Downingtown, PA, USA, pp. 239-249, 21-23 Oct. 1974
- [41] Z. Wang, P. Marcolongo, J.A. Lemberg, B. Panganiban, J.W. Evans, R.O. Ritchie, P.K. Wright, "Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE", *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol.19, No.1, pp.321-330, 2012.
- [42] I. Paprotny, P.K. Wright, R.M. White, J. Evans, T. Devine, "Fault analysis in underground cables", *University of California Berkeley, Final Project Report, CIEE Electric Grid Research*, 2012.
- [43] R.F. Fedors, "Water-treeing as an osmotic phenomenon", *Polymer*, pp.863-865, Vol. 21, 1980.
- [44] J. Sletbak, "A theory of water tree initiation and growth", *IEEE Trans.* Vol. 98, No. 4, pp.1358-1365, 1979.
- [45] C.T. Meyer, J.C. Filippini, N. Felici, "Water tree propagation in relation to mechanical properties of polyethylene", *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*: pp.374-381, 30 Oct-2 Nov, 1978.

- [46] S. Bamji, A. Bulinski, J. Densley, A. Garton, N. Shimizu, “Water treeing in polymeric insulations”, Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electriques à Haute Tension (CIGRE), Vol.7, pp.15-07, 1984.
- [47] N. Yoshimura, P. Noto, K. Kikuchi, “Growth of water trees in polyethylene and silicone rubber by water electrodes”, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-12, No. 6, pp. 411-416, 1977.
- [48] F.H. Kreuger, “Detection and location of discharges: in particular in plastic-insulated high-voltage cables”, thesis Delft University, 1960.
- [49] F.H. Kreuger, “Partial discharge detection in high voltage equipment”, Temple Press, London, Butterworth. London, 1989.
- [50] S. Isshiki, M. Yamamoto, S. Chabata, T. Mizoguchi; M. Ono, “Water tree in cross-linked polyethylene power cables”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.93, No.5, pp.1419-1429, 1974.
- [51] R. Patsch, “Effects of moisture and electrical field strength on polymer insulations”, Colloid Polym. Sci, Vol.259, pp.885-893, 1981.
- [52] E.F. Steennis, “Water treeing, the behavior of water trees in extruded cable insulation”, Thesis University Delft, Kema, Arnhem, 1989.
- [53] M.G. Danikas, G.E. Vassiliadis, “Models of partial discharges (pd) in enclosed cavities in solid dielectrics: a study of the relationship of pd magnitudes to the sensitivity of pd detectors and some further comments on insulation lifetime”, Journal of Electrical Engineering, Vol. 54, No. 5-6, pp. 132-135, 2003.
- [54] S. Gherbi, “Etude de l’influence d’une barrière dans un intervalle pointe – plan, par la mesure de la tension disruptive, du champ électrique et des décharges partielles”, Thèse de Doctorat en Génie Electrique Magister en Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, Novembre 2008.
- [55] B. Florkowska, M. Florkowski, J. Furgal, P. Zydron , “Influence of different voltage wave forms on PD formation in HV insulation systems”, Proc. of the 29th Electrical Insulation Conference, IEEE EIC, pp. 51-54, Montreal, Canada, 31 May - 3 June, 2009.
- [56] E. Lindell, T. Bengtsson, J. Blennow, S. M. Gubanski, “Measurement of partial discharges at rapidly changing voltages”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 3, pp. 823-831, 2008.
- [57] C. Forssen, H. Edin, “Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 2: Measurements and modeling”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 15, No. 6, pp. 1610-1616, 2008.
- [58] R. Bodega, A. Cavallini, P.H. F. Morshuis, F.J. Wester, “The effect of voltage frequency on partial discharge activity”, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 685-689, Cancun, Quintana Roo, Mexico, October 20-24, 2002.
- [59] R. Bodega, P.H. F. Morshuis, M. Lazzaroni, F.J. Wester, “PD recurrence in cavities at different energizing methods”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 53, No. 2, pp. 251-258, 2004.
- [60] B. Florkowska, M. Florkowski, J. Roehrich, P. Zydron, “Partial discharge mechanism in non-homogenous electric field at higher pressure”, Proc. of the Int. Conference on High Voltage Engineering and Application, pp. 326-330, Chongqing, China, November 9-13, 2008.

- [61] S. Lachini A. Gholami M. Mirzaie, “Determining Electric Field Distribution In High Voltage Cable In Presence Of Cavity”, Universities Power Engineering Conference (UPEC), 45th International Conference, Shah Alam, 31st Aug - 3rd Sept, pp.1-7, 2010.
- [62] C. Forssen, H. Edin , “Influence of cavity size and cavity location on partial discharge frequency dependence”, The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS), Boulder, CO, USA, pp. 438-441, 2004.
- [63] N. Zainuddin, M. Yoshinabu, H. Naohiro, N. Masayuki , “Effect of humidity on time lag of partial discharge in insulation-gap-insulation system”, 8th International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, Bali, Indonesia, pp. 199-203, 2006.
- [64] F. Gutfleisch, L. Niemeyer , “Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids”, IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insul, Vol. 2, No. 5, pp 729-742, 1995.
- [65] N.P. Kolev, E.D. Gadjeva, M.G. Danikas, N.R. Gourov, “An Approach to Develop a Partial Discharge Investigation”, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Cincinnati, OH, USA, pp 507-510, 28-28 Oct, 1999.
- [66] Y. Cheng, C. Ren, X. Chen, “ Study on the Partial Discharge Characteristics in Different Solid and Gaseous Dielectric by Simulation”, Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Kitakyushu, Japan, June 5-9, 2005.
- [67] G. Teysedre, L. Boudou, “Polymères et composites pour l’électrotechnique”, Techniques de l’Ingénieur, traité Génie électrique, D 2335, 10 Mai 2010.
- [68] M. Kosaki, M. Nagao, N. Shimizu, Y. Mizunoi, “Solid insulation and its deterioration”, Cryogenics 38, Elsevier Science Ltd, Number 11, 1095-1104, 1998.
- [69] S. Sakuma, N. Shinagawa, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings, “Experience on 400-500kV XLPE Insulated Cables and Their Accessories”, Singapore, Singapore, pp 681-685, 23-27 Jan, 2000.
- [70] S. Hvidsten, E. Ildstad, J. Sletbak, H. Faremo, IEEE Trans. DEI, “Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods”, Vol.5, No.5, pp. 754-760, 1998.
- [71] S. Hvidsten, E. Ildstad, H. Faremo, “Mechanisms causing nonlinear dielectric response of water treed XLPE cables”, IEEE International Conference Conduction and Breakdown in solid Dielectrics, Västerås, Sweden, pp.73-78, 22-25 June, 1998.
- [72] O.I. Visata, G. Teissedre, J.C. Filippini, P.V. Notingher, “An investigation on the distribution of ions and water in water trees by FTIR microspectroscopy”, IEEE 7th Intern. Conf. on Sol. Dielectr., Eindhoven, Netherlands, p. 373- 376, 25-29 June, 2001.
- [73] J. Crine, “Electrical. Chemical and Mechanical Processes in Water Treeing”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 5, No. 5, pp. 681-694, 1998.
- [74] F. Noto, “Research on Water Treeing in Polymeric Insulating Materials”, IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 15, No. 3, pp. 251-258, 1980.
- [75] E. Ildstad, H. Barsden, H. Faremo, B. Knutsen, “Influence of Mechanical Stress and Frequency on Water Treeing in XLPE Cable Insulation”, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Ont, pp. 165-169, 3-6 June, 1990.
- [76] M.H. Kim, N. Hozumi, Y. Murakami, M. Nagao, T. Kurihara, T. Okamoto, T. Tsuji, K. Uchida, “Water Tree in Polymeric Cables: A Review”, Intern. Conf. on Cond. Monit. and Diagn., pp. 141-144, Bali, Indonesia, 23-27 Sept. 2012.

- [77] S. Jaruman, "Effects of artificial acid rain on water tree in Crosslinked Polyethylene", Insulation Material, Master Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, 2009.
- [78] J.P. Crine, J. Jow, "Influence of frequency on water treeing in polyethylene", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, BC, Canada, pp. 351-354, 15-18 Oct, 2000.
- [79] B. Hennuy, Q.D. Clerck, A. Francois, D. Tenret, P. Leemans, J. Marginet, "Water Tree in Polymeric Cables", 8th Intern. Conf. on Insul. Power Cable, Jicable 2011.
- [80] Y. Yamada, S. Yamanouchi, S. Miyamoto, "Treeing phenomena in XLPE insulation under DC voltage", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 500-510, 1979.
- [81] M. Pays, M. Louis, J. Perret, C. Alouie, J. Ewinger, "Behavior of extruded HVDC power transmission cables: tests on materials and cables", International Conference on large High Voltage Electric Systems, CIGRE. Paper 21-07: pp. 11, 1988.
- [82] M. Acedo, F. Frutos, I. Radu, J. C. Filippini, "Dielectric characterization and conduction modelling of a water tree degraded LDPE", IEEE Trans. on Dielec. And Electr. Insul., Vol.13, No. 6, pp. 1225-1235, 2006.
- [83] I. Radu, M. Acedo, J.C. Filippini, P. Notingher, F. Ftutos, "The effect of water treeing on the electric field distribution of XLPE. Consequences for the dielectric strength", IEEE Trans. on Dielec. and Electr. Insul., Vol.7, No. 6, pp. 860-868, 2000.
- [84] R. Bouzerara, « Effet de la température sur la dégradation du polyéthylène par le phénomène d'arborescences d'eau », sn, 1989.
- [85] E. Stennis, F. H. Kreuger, "Water treeing in polyethylene cables", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, No. 5, pp. 989-1028, Oct. 1990.
- [86] O. Visata, "Influence des arborescences d'eau sur les propriétés diélectriques des polymères", PhD dissertation, Politechnica, Bucharest, Romania, 2001.
- [87] G. Teissedre, O.I. Visata, J. C. Filippini, Conf. on, Electr. Insul. and Dielectr. Phenom., "On the role of ions in the formation of water trees in polyethylene cable insulation", pp. 942-945, Cancun, Mexico, 20-24 Oct, 2002.
- [88] M. J. Given, R. A. Fouracre, B. H. Crichton, "The role of ions in the mechanism of water tree growth," IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-22, No. 2, pp. 151-155, Apr. 1987.
- [89] J. A. Koo, "An effect of salt solution on the water tree propagation in polyethylene", Trans. Korean IEE, Vol. 34, pp. 435-439, 1985.
- [90] T. Boonraksa, B. Marungsri, "Role of ionic solutions affect water treeing cable propagation in XLPE insulation for high voltage", International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, Vol.8, No.5, pp. 788-791, 2014.
- [91] R. Ross, "Inception and propagation mechanisms of water treeing", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 5, No. 5, pp. 660-680, 1998.
- [92] C. Stancu, P.V. Notingher, M. plopeanu, R. Setnescu, A. Mantsch, T. Setnescu, M. Dumitru, "Water trees influence on the power cables insulation breakdown during operation", Journal of Science and Arts, Chemistry Section, Vol. 12, No. 1, pp. 59-66, 2010.

- [93] D.W. Auckland, R. Cooper, "Investigation of water absorption by electrically stressed polythene", Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol.122, No.8, 860-864, 1975.
- [94] E. Ildstad, H. Faremo, "Importance of relative humidity on water treeing in XLPE cable insulation", in Proc. of 7th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Dredsen, pp. 207-210, 1991.
- [95] J. Sletbak, E. Ildstad, "The effect of service and test conditions on water tree growth in XLPE cables", IEEE Trans. Vol.102, No. 7, pp. 2069-2076, 1983.
- [96] T. Yoshimitsu, H. Mitsui, K. Hishida, H. Yoshida, "Water treeing phenomena in humid air", Electrical Insulation, Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-18, No.4, pp. 396-401, 1983.
- [97] S. M. Hellesø, S. Hvidsten, G. Balog, K. M. Furuheim, "Calculation of water ingress in a HV subsea XLPE cable with a layered water barrier sheath system", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 121, pp. 2127-2133, 2011.
- [98] K.B. Liland, S.M. Hellesø, S. Hvidsten, K.M. Bengtsson, A. Ryen, "Axial water ingress in water tight MV XLPE cable designs", IEEE Conference Record on Electrical Insulation (ISEI), IEEE International Symposium on, San Juan, PR, pp.327-331, 10-13 June 2012.
- [99] S. M. Hellesø, V. C. Henøen, S. Hvidsten, "Simulation of water diffusion in polymeric cables using Finite Element Methods", Conference Record in IEEE International Symposium on, pp.595-598, Vancouver, BC, 9-12 June 2008.
- [100] B. Pinel, "Fonction isolation dans les matériels électriques", Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique, D 2302,1999.
- [101] T. Tabata, T. Fukuda, Z. Iwata, "Investigations of water effects on degradation of crosslinked polyethylene insulated conductors", IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing, pp.1361-1370, Portland, Ore, 18-23 July 1971.
- [102] M. Meziani, A. Mekhaldi, M.Teguar, "Impact of presence of water tree and micro-cavities on the electric field distribution in XLPE Insulation", IEEE International Conference on Electrical Engineering (IGEE), Boumerdes, December 13th-15th, 2015.
- [103] R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique-essais et mécanismes de dégradation applications industrielles", Edition Eyrolles, 1990.
- [104] S. Bamji, "Electrical trees: physical mechanisms and experimental techniques", in Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Ed. J. g. Webster, 1999.
- [105] M. H. Ahmad, H. Ahmad, N. Bashir, M. F. Dolmat, Y. Z. Arief, Z. A. Malek, A.A.A. Jamil, "Effects of oil palm empty fruit bunch filler on electrical tree propagation in Epoxy resin", International Conference on High Voltage Engineering and Application, Shanghai, China, pp. 203-206, 17-20 Sept, 2012.
- [106] M. H. Ahmad, H. Ahmad, N. Bashir, Y. Z. Arief, R. Kurnianto, F. Yusof, Z. Abdul-Malek, A. Darus, "A new statistical ranking of tree inception voltage distribution of silicone rubber and epoxy resin under AC voltage excitation", International Review of Electrical Engineering, Praise Worthy Prize, Vol. 6, No. 4, 2011.
- [107] A.L. Barclay, G.C. Stevens, "Statistical and fractal characteristics of simulated electrical tree growth", Dielectric Materials, Measurements and Applications, Sixth International Conference, pp. 17-20, 7-10 Sep, 1992.

- [108] P. Werelius, "Development and application of high voltage dielectric spectroscopy for diagnosis of medium voltage XLPE cables", TRITA-ETS-ISSN, Department of Electrical Engineering Division of Electrotechnical Design Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm, Sweden, 2001.
- [109] M. Fröhlich, "Theory of dielectrics", Oxford Univ. Press, 1949.
- [110] D.A. Seanor, "Electrical properties of polymers", Academic Press, 1982.
- [111] C. Menguy, "Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides", Techniques de l'ingénieur, Matériaux à propriétés électriques et optiques, D 2310, 10 août 1997
- [112] C. Oudet, "Polymères, structure et propriétés", éditions Masson, 1994.
- [113] M. Ieda, "Dielectric breakdown process of polymers", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 15, No. 3, pp. 206-224, 1980.
- [114] R. Fournié, "Les isolants en électrotechnique, concepts et théories", Edition Eyrolles, Paris, 1986.
- [115] G. Mossadek, "Etude par simulation numérique de l'effet des contraintes électrique et électromécanique sur l'apparition des arborescences électriques dans l'isolation des câbles de moyenne tension", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Juillet 2009.

Chapitre III

Interface diélectrique/diélectrique et la charge d'espace dans l'isolation des câbles électriques

III.1 Introduction

De nombreuses études ont été menées afin de comprendre le comportement des charges d'espace dans les diélectriques sous contrainte électrique [1] et en particulier sur le polyéthylène [2-4]. Cependant, peu de travaux de recherches portent sur la génération de ces charges aux interfaces. Dans les câbles électriques il existe toujours des contacts semi-conducteur/isolant ou même isolant/isolant. Conformément à la théorie de Maxwell-Wagner, une charge d'interface, s'établit en présence d'une discontinuité du rapport entre conductivité et permittivité des deux matériaux [5]. En effet, la présence d'arborescences d'eau dans l'isolation permet aux charges d'espace de s'accumuler aux interfaces (arborescence/diélectrique).

Ce chapitre est consacré aux mécanismes d'accumulation de la charge d'espace au niveau de l'interface semi-conducteur/diélectrique. Ainsi, nous nous sommes intéressés à l'effet des particules d'eau sur la charge d'espace et la forte corrélation entre la charge d'espace et la naissance des arborescences d'eau. Nous décrivons l'origine de la charge d'espace au niveau de l'interface physique diélectrique/diélectrique. Ensuite, nous présentons les paramètres ayant une influence sur la quantité et la polarité de cette charge d'espace ainsi que sa distribution dans l'isolation en présence d'arborescences d'eau.

III.2 Défauts et charge d'espace

Dans le cas d'un matériau diélectrique, le terme "charge d'espace" correspond aux porteurs de charges (électrons, trous et ions) qui se déplacent sous l'effet d'un champ électrique appliqué. La présence des charges d'espace dans un diélectrique est liée au nombre de charges en mouvement et de celles piégées. En effet, la faible mobilité des porteurs de charge et le piégeage de la charge dans le polymère donne lieu à la charge d'espace. Cette charge électrique peut être électro-statiquement attirée par des points au sein de l'isolation pour former des liaisons chimiques, ou bien par d'autres points (des contre charges) dus à des défauts physiques ou des inhomogénéités [6]. Le rôle majeur des défauts dans l'isolation en polyéthylène a été rapidement mis en évidence et tout particulièrement leur capacité à piéger les charges électriques. En outre, l'effet de cette charge d'espace devrait être pris en considération dans les essais de conception et de tenue diélectrique du câble. En effet, il est important d'étudier le mécanisme de la formation et d'accumulation de la charge d'espace dans le câble électrique et de discuter de la possibilité de la suppression de cette dernière par des mesures appropriées.

III.3 Interfaces dans les câbles électriques

Il existe deux types principaux d'interfaces dans les systèmes de câbles: interfaces semi-conducteur/diélectrique et interfaces diélectrique/diélectrique, appelées aussi interfaces diélectriques. Les deux types d'interfaces sont représentés sur la figure III.1.

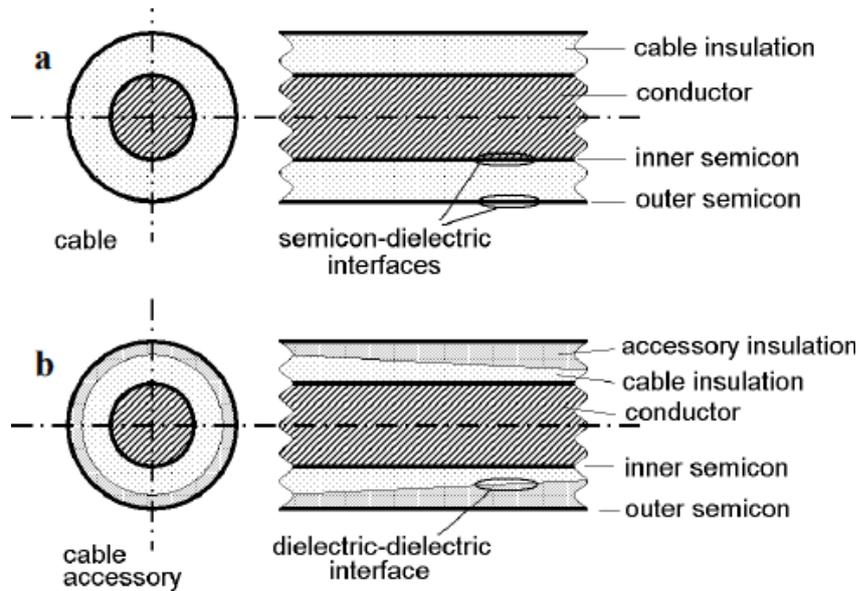


Fig. III.1 Interfaces dans un câble à isolation extrudée [7]
 a) Interface semi-conducteur/diélectrique
 b) Interface diélectrique/diélectrique

III.3.1 Interface semi-conducteur/diélectrique

Le semi-conducteur intérieur assure un contact entre l'isolation et le noyau conducteur du câble, évitant l'effet des cavités qui peuvent mener aux décharges partielles [8, 9]. De même, le semi-conducteur externe assure le contact entre l'isolation et l'écran de terre. Les deux couches semi-conductrices sont chimiquement collées avec l'isolation de câble [10].

La douceur de l'interface semi-conducteur/diélectrique est très importante pour le câble. En effet, l'interface entre le semi-conducteur et l'isolation peut induire une concentration du champ locale [11]. La Figure III.2, montre une image optique d'une interface (semi-conducteur/ isolation PRC) pour un câble électrique.

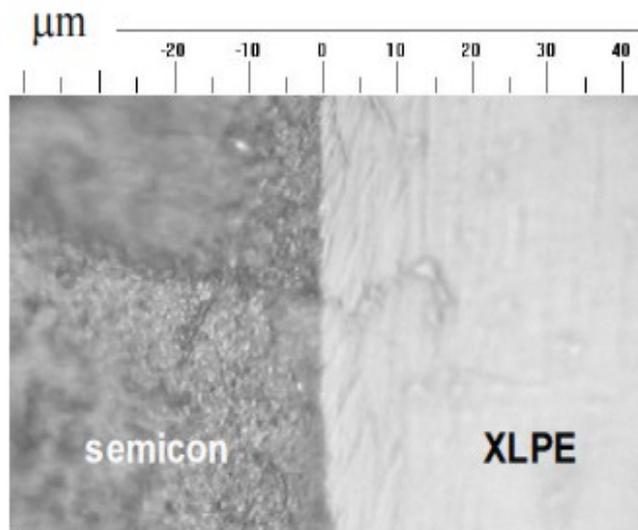


Fig. III.2 Image microscopique d'une interface semi-conducteur/ PRC d'un câble électrique [7]

III.3.2 Interface diélectrique/ diélectrique

Contrairement à l'interface semi-conducteur /isolation, où les liaisons chimiques existent, dans le diélectrique le lien de connexion entre les deux diélectriques est généralement physique [9]. Deux corps durs idéaux mis en contact ne peuvent pas se toucher en plus de trois points. Dans ces points de contact, la pression mécanique est infinie. Entre ces contacts, des cavités microscopiques sont inévitables.

III.4 Charge d'espace aux interfaces dans les câbles électriques

Les résultats d'investigations ont prouvé que les interfaces dans des systèmes de câbles électriques sont particulièrement critiques en ce qui concerne l'accumulation de la charge d'espace.

III.5 Mécanismes d'accumulation de la charge d'espace au niveau de l'interface semi-conducteur/isolation**III.5.1 Interface d'ionisation**

Les câbles de transport d'énergie à isolation synthétique utilisent des gaines semi-conductrices constituées d'un mélange isolant-noir de carbone [12]. Les analyses ont montré que ces gaines pouvaient être la source d'impuretés ioniques organiques et inorganiques qui diffusent dans l'isolant lui-même. La nature et la concentration des ions sont fortement dépendantes du noir de carbone utilisé. Citons à titre d'exemple, les ions inorganiques qui ont été trouvés à des concentrations de l'ordre du ppm [13].

Sous l'influence du champ électrique, des espèces ioniques dans le diélectrique peuvent être produites dans l'isolation des câbles par la dissociation des molécules neutres d'impuretés, telles que la réticulation de sous-produits. Des ions moléculaires avec une certaine polarité dérivent vers l'électrode de polarité opposée. Cependant, les électrodes permettent le transfert de charge, mais pas le transfert de masse. Par conséquent, les ions sont bloqués conduisant à un régime d'hétéro-charge à moins qu'ils ne soient compensés par des charges de polarité opposée injectées aux électrodes [14]. Bien que ce phénomène se produise à l'interface semi-conducteur/isolation, les espèces ioniques sont généralement formées dans l'ensemble de l'isolation et non seulement à proximité des électrodes.

III.5.2 Effets de la surface des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont généralement polaires cela permet de faciliter la dispersion du noir de carbone dans le polymère. Ainsi, la composition chimique des semi-conducteurs diffère sensiblement de celui des composés non polaires utilisés comme diélectriques [15]. Selon [15, 16], la diffusion des impuretés à partir du semi-conducteur dans le diélectrique, aide à la formation d'homo-charge et augmente la conductivité de l'isolation en contact avec la couche semi-conductrice.

III.5.3 Injection / extraction

Selon Dissado [17], si le débit des charges injectées aux électrodes est plus grand que le flux de charges à travers le diélectrique, un régime d'homo-charge s'établira. En présence d'homo-charge, le champ électrique aux électrodes diminue. Cela finira par arrêter

l'accumulation de la charge d'espace. Dans ce cas, le flux de charge à travers le diélectrique égalise le flux de charges injecté à l'électrode. Un tel mécanisme d'accumulation de charges est souvent appelé injection de champ élevé. D'autre part, si le débit de charges à travers le diélectrique est plus grand que le débit de la charge injectée aux électrodes, un régime d'hétérocharge s'établira. Ce mécanisme d'accumulation est souvent appelé blocage de la charge.

Les différents processus de transfert de charge sont basés sur le concept qu'un électron doit surmonter une barrière de potentiel pour quitter l'électrode et entrer dans l'isolation. Néanmoins, aucune théorie spécifique n'a été développée pour la charge injectée à l'interface semi-conducteur-polymère. La principale raison en est que l'interface semi-conducteur/polymère est assez complexe et difficile à caractériser. L'observation de la charge d'espace accumulée à l'interface semi-conducteur/polymère est aujourd'hui précise et fiable, grâce à l'amélioration des techniques de mesures de la charge d'espace développées au cours de la dernière décennie. Cependant, comme l'a souligné Lewis [18], le transfert de charge aux électrodes est un phénomène très localisé. Puisque ni le diélectrique, ni l'électrode n'ont des conditions de surface uniformes, l'injection, l'extraction et le blocage peut se produire simultanément sur la même interface. Par conséquent, seul l'effet global des phénomènes de transfert localisés peut être observé expérimentalement [11].

III.6 Piégeage de la charge d'espace

Les défauts dans les solides peuvent être de différentes natures : ponctuels (lacunes, interstitiels), linéaires (dislocations) ou surfaciques (interfaces : joints de grains, entre différentes phases). Tous ces défauts entraînent une variation de la permittivité du milieu et constituent donc des sites possibles pour le piégeage de la charge d'espace. La profondeur de ces pièges dépend de leur nature (Fig. III.3).

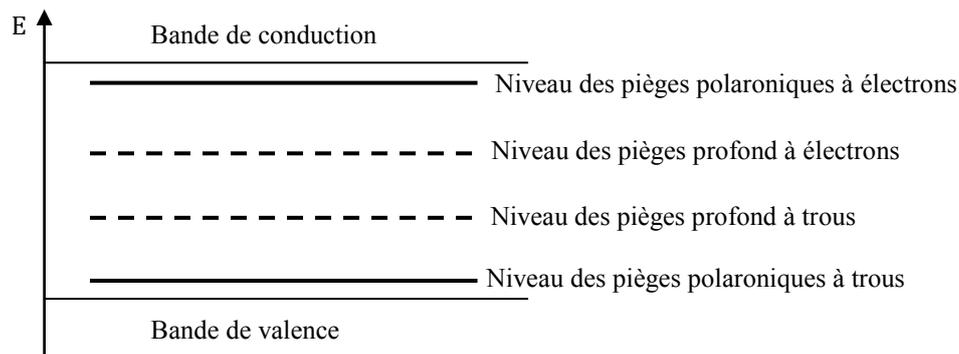


Fig. III.3 Schéma de bandes d'un isolant avec les différents niveaux de piégeage [19]

La polarisation locale du matériau a pour effet de créer une bande de conduction dite polaronique au sein de la bande interdite [19]. Elle constitue un puit de potentiel d'énergie W_p pour électrons (appelés polarons). La présence de défauts induit des perturbations locales du réseau cristalin. L'énergie de polaron peut se trouver modifiée d'une valeur ΔW_p , ce site va se comporter comme un piège pour le polaron (Fig. III.4). La stabilisation de polaron dans ce site va accentuer la polarisation autour de l'électron, et renforcer le piégeage. La mobilité des

porteurs de charge peut être ainsi considérablement augmentée par un processus de conduction par saut d'un puit à un autre appelé également (hopping conduction).

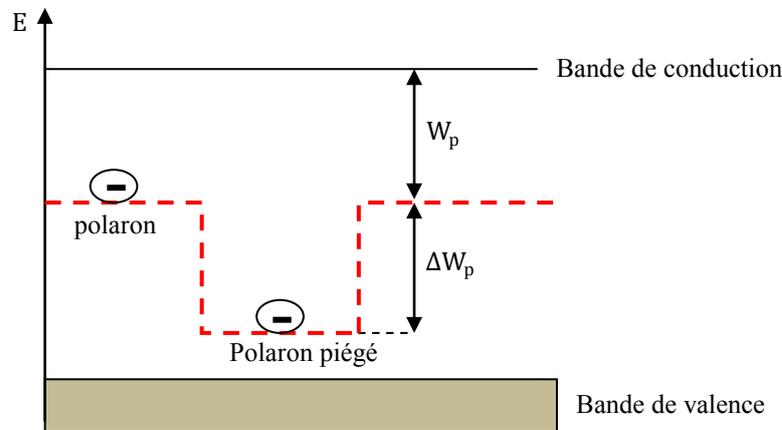


Fig. III.4 Schéma du mécanisme de piégeage polaronique [19]

III.6.1 Charge d'espace dans l'isolation en polyéthylène

Des chercheurs [20] ont trouvé qu'il existe une relation entre le faible poids moléculaire du polyéthylène basse densité (PEBD), sa structure physique et chimique ainsi que les pièges dans ce matériau avec l'accumulation de la charge d'espace.

La présence des radicaux libres et interface entre les deux phases cristalline et amorphe, ont une forte influence sur la bande d'énergie de la molécule en causant une augmentation des états locaux de sorte qu'ils puissent agir en tant que pièges pour les porteurs, c'est à dire qu'il existe beaucoup de pièges dans les polymères de faible mobilité tels que le polyéthylène [20, 21].

Il n'y a aucune exception pour le PRC (simplement la densité de piège). L'impureté dans l'isolation du câble électrique en PRC comprend principalement le résidu du peroxyde, c'est à dire la réticulation. D'une manière générale, les caractéristiques de la charge d'espace dans l'isolation PRC sont attribuées à la nature physique et chimique de ce matériau diélectrique [22].

Dès la génération, les charges d'espace ont une tendance à s'accumuler et se diriger vers des sites où elles sont susceptibles d'être piégées. La modélisation détaillée de ces pièges a fait l'objet d'investigations menées par Quirke et al [23]. Le temps de séjour des charges d'espace dans des pièges en polyéthylène a également été calculé par Meunier et Quirke [24]. Les pièges peuvent être considérés comme des régions à faible potentiel d'énergie. Ces charges d'espace peuvent échapper à des pièges en acquérant spontanément suffisamment d'énergie thermique, vibrations, etc., où les conditions physiques locales peuvent changer conduisant à la disparition effective du piège. Un champ électrique élevé peut également aider au dé-piégeage de la charge. Sekii et al [25], Hui et al [26] ont montré que la présence de la charge d'espace dans des zones à pièges, comme l'interface entre les phases amorphe-cristalline, peut produire un champ électrique interne très important pouvant conduire à la rupture diélectrique et au vieillissement prématuré du matériau. En effet, l'injection de la charge dans l'isolant entraîne une augmentation de l'énergie locale de réseau cristallin tant

statique que mécanique par déformation de réseau et l'apparition d'une charge d'espace. C'est la relaxation de cette énergie qui peut entraîner la formation d'onde de choc thermique et mécanique pouvant conduire au claquage diélectrique, la rupture mécanique et à l'usure.

III.6.2 Polarité de la charge d'espace

Les Homocharges et les hétérocharges sont des termes qui sont souvent utilisés pour décrire la polarité des charges d'espace. Homocharges se réfèrent aux charges avec la même polarité que l'électrode adjacente tandis que les hétérocharges se réfèrent à la polarité opposée. Quand une tension est appliquée à travers le polymère, les petites molécules (hétérogénéités) peuvent devenir ionisées et donc déviées vers l'électrode de polarité opposée en produisant par la suite des hétérocharges. Ce type de charges d'espace (hétérocharges) accentuera la contrainte au niveau de l'électrode mais réduira la contrainte électrique dans le volume. Par contre, la présence d'homocharges diminue le champ interfacial et augmente le champ volumique. C'est la situation qui prévaut lorsque des charges électriques sont injectées à partir des électrodes [27, 28].

III.7 Effet des particules d'eau sur la charge d'espace

L'isolation polymère a tendance à absorber l'humidité une fois exposée à un environnement humide. La quantité moyenne en eau qui peut être absorbée par l'isolation du câble, varie entre 2 et 6% du volume total de l'isolation [29]. Cette quantité d'eau qui diffuse habituellement dans les câbles électriques dépend de la structure, de la température ainsi que de l'humidité du polymère utilisé comme isolation interne de ces câbles [30]. En raison de la nature dipolaire et conductrice de l'eau, l'eau pure a une conductivité électrique de l'ordre de 10^5 S/m, plus importante que celle d'un polymère, les propriétés électriques telles que la rigidité diélectrique, la permittivité et la conductivité de l'isolation en polymère peuvent être sensiblement affectées.

Des investigations sur l'effet de l'eau sur la charge d'espace dans l'isolation polymère ont été effectuées sur divers matériaux, y compris le PRC [31, 33]. Les auteurs ont constaté que l'eau affecte l'accumulation de la charge d'espace, à cause de la présence importante des pièges de porteurs de charge [32] et que l'eau affecte l'injection de trous [31]. De plus les particules d'eau interagissent avec les sous-produits de réticulation [33]. Dans le PRC, l'homocharge est injectée à proximité des deux électrodes quand elles sont sèches [34] et que l'hétérocharge peut être attribuée à l'autodissociation des molécules d'eau produisant des ions (OH^- , H_3O^+). Ces ions peuvent se déplacer sous l'effet du champ électrique jusqu'à ce qu'ils soient capturés par des pièges locaux qui existent dans cette région [35].

Les propriétés de mobilité et d'accumulation de la charge d'espace à l'interface influenceront considérablement la durée de vie de l'isolation, donc, la sécurité du câble électrique. Par conséquent, plus de travaux de recherches sont nécessaires pour une meilleure compréhension du rôle de l'interface et de son influence sur la rupture diélectrique de ces matériaux isolants.

III.8 Polarisation des défauts d'isolation localisés tels que les arborescences d'eau

Dans des conditions particulières, des arborescences d'eau individuelles peuvent être développées à partir de l'interface semi-conducteur/isolation. Des charges d'espace avec la même polarité que celle de l'électrode d'initiation des arborescences d'eau s'accumulent aux sommets de ces dernières (interface diélectrique/diélectrique) [36, 37].

III 8.1 Initiation de l'arborescence d'eau

-Pénétration d'eau et création des régions amorphes polaires

L'eau est capable de pénétrer dans les régions amorphes si les chaînes du polymère dans ces régions contiennent des groupes polaires ou des impuretés (polaires). Ce phénomène engendre l'attachement des groupes polaires aux chaînes du polymère (Fig. III.5), par exemple, l'attachement par des processus d'oxydation.

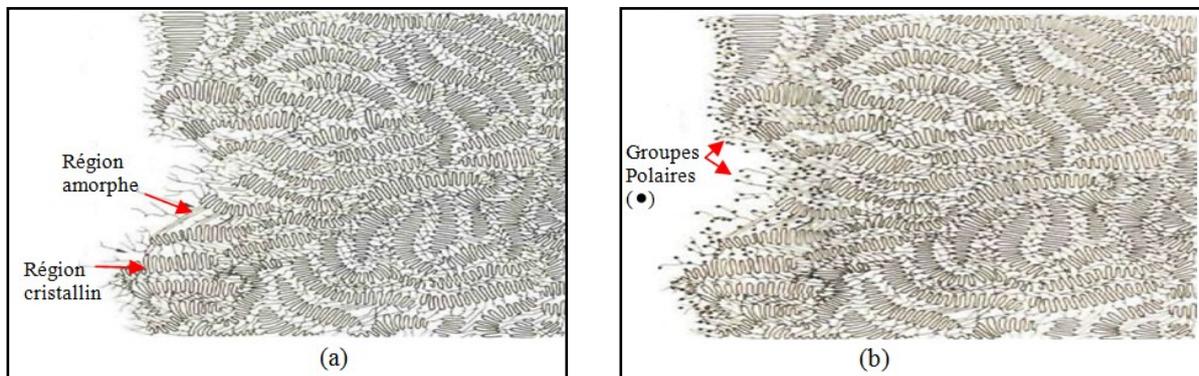


Fig. III.5 Modèle d'une section transversale du polyéthylène : (a) région amorphe saine, (b) région amorphe contenant des groupes polaires (●) fixés sur les chaînes du polymère [38]

Steennis [38] a trouvé que l'eau pénètre dans la région amorphe du polymère si des impuretés polaires sont présentes, et que la création des régions polaires peut être vue comme un processus d'initiation d'arborescences. Pélissou et al [39, 41] ont étudié la présence des impuretés dans les câbles isolés en polyéthylène réticulé et les mêmes conclusions que Steennis ont été tirées.

Certains exemples de la création des régions polaires sont donnés ci-dessous :

- 1- La pollution ou bien l'oxydation de l'isolation des câbles est effectuée durant le processus de fabrication (vapeur d'eau ou gaz inerte).
- 2- L'éraflure de la surface d'isolation pendant et après la production des câbles produira des extrémités des chaînes qui peuvent facilement être oxydées.
- 3- La présence d'une quantité importante d'impuretés dans les couches semi-conductrices et avec une action combinée de la diffusion et de l'effet de la pression osmotique dans toutes directions, ces impuretés trouvent refuge dans les régions amorphes du polyéthylène.

La diffusion d'impuretés des semi-conducteurs dans la surface d'isolation a été établie par Crine [42] et al et Johnson et al [43]. Sur la figure III.6 un exemple de concentration d'impuretés à l'interface semi-conducteur/isolation d'un câble électrique.

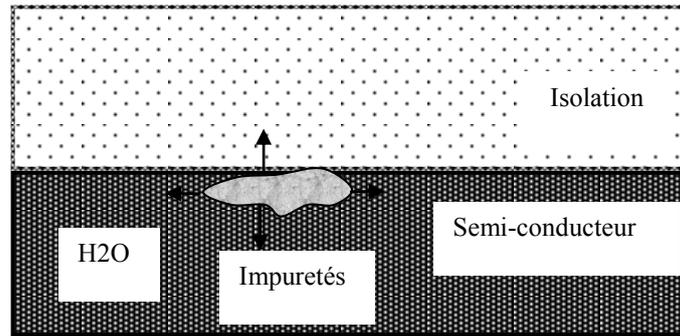


Fig. III.6 Diffusion des impuretés à l'intérieur de l'isolation [44]

Les propriétés électriques telles que la rigidité diélectrique, le facteur de pertes diélectriques et la résistivité sont fortement influencées par la présence de ces impuretés au sein de l'isolant.

III 8.2 Croissance de l'arborescence d'eau

Pendant l'application d'un champ électrique \vec{E}_0 , l'interface F peut être considéré comme une interface où le transfert de charges peut se produire. En particulier les zones perpendiculaires au champ électrique \vec{E}_0 agissent en tant qu'interfaces avec un transfert de charges. Un modèle simplifié d'une telle interface est donné par la figure III.7.

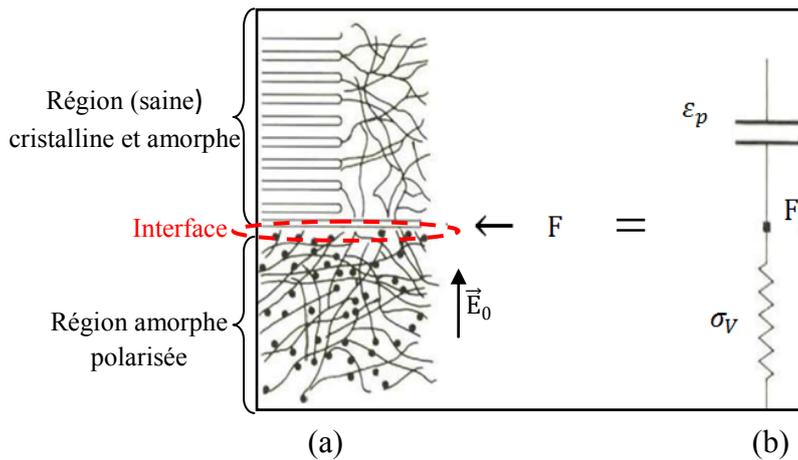


Fig. III.7 Modèle d'interface (région polarisée/région saine) : (a) physique, (b) électrique [44]

Dans le polyéthylène deux régions différentes peuvent être distinguées Fig. III.7(a) :

- La région polarisée (région amorphe avec des groupes polaires) contenant l'eau et les impuretés où le transport de charges par des ions est la cause principale de la conduction. La présente partie est représentée par une résistance avec une conductivité σ_v dans la Fig. III.7(b).

- La région libre de toute attaque (saine) contient deux parties ; cristalline et amorphe au-dessus de l'interface F dans la Fig. III.7(a), cette région agit en tant que diélectrique et transmet le courant capacitif. Cette présente partie est représentée par une capacité avec une permittivité diélectrique ϵ_p (Fig. III.7(b)).

A l'interface des deux régions où la mobilité de charges par des ions devient impossible, l'électrolyse se produit en causant davantage l'oxydation du polyéthylène. Par conséquent, l'interface (F) décale plus loin dans l'isolation (Fig. III.9).

Ce processus cause la croissance d'une arborescence d'eau. Ces réactions peuvent mener à la détérioration du polyéthylène [45].



Fig. III.8 Formation de l'interface F (arborescence d'eau /isolation) [38, 44]

Pour différentes raisons, l'attaque chimique se produit principalement dans les régions amorphes : la mobilité des espèces ioniques dans les régions amorphes est plus importante que dans les régions cristallines et la stabilité chimique des chaînes du polymère dans des régions cristallines est plus importante.

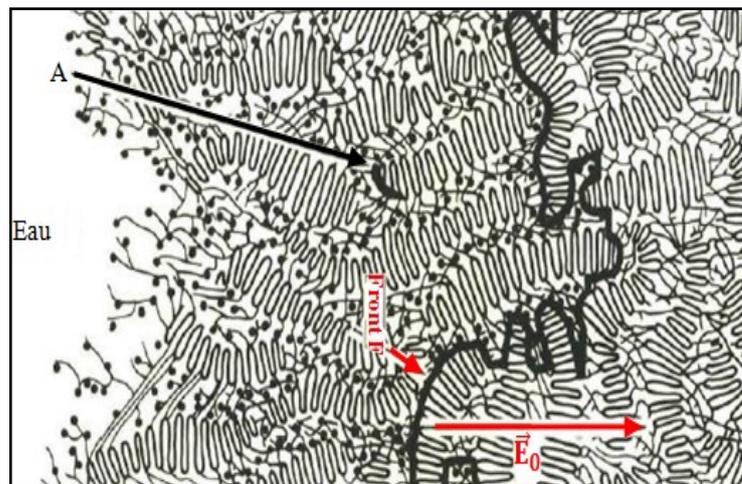


Fig. III.9 Progression de la dégradation à l'intérieur de l'arborescence [38]

a) Electrolyses

L'électrolyse est un processus bien connu du transfert des charges électriques à travers une interface de métal/liquide : dans l'électrolyte la conduction ionique est possible.

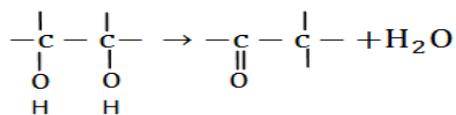
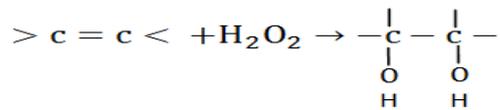
Un des produits souvent mentionné en ce qui concerne l'électrolyse est H_2O_2 . La formation de H_2O_2 dépend des conditions ambiantes et peut prendre plusieurs mesures. Il commence par l'oxydation de OH , donnant le radical OH et un électron. Une réaction alternative est l'oxydation de $2H_2O$, ceci peut produire H_2O_2 , $2H^+$ et $2e^-$.

b) Dégradation électrochimique

Le processus électrochimique à l'interface F (arborescence d'eau /isolation) où H₂O₂ est généré en présence d'eau, successivement attaque le polyéthylène.

La présence de H₂O₂ peut résulter dans d'autres processus : beaucoup de liens doubles à carbone-carbone sont présents dans le polyéthylène, favorisant les espaces inter-lamellaires. Ces liens sont facilement oxydables avec H₂O₂ donnant ainsi le glycol :

De tels glycols peuvent subir un réarrangement selon :



Il est également possible que les ions agissent en tant que catalyseurs pour former des radicaux de polymère avec H₂O₂. De tels radicaux de polymère peuvent oxyder le polyéthylène pendant la formation des carbonyles et des cétones.

D'une manière générale et comme récapitulatif de dégradation électrochimique de steennis [38, 44], les processus d'oxydation, provoqués par exemple par des dommages mécaniques de la surface d'isolation, peuvent avoir comme conséquence les groupes polaires, attachés aux chaînes du polymère. Ces régions polaires dans le polyéthylène attireront les particules d'eau.

À l'interface des deux régions, l'électrolyse se produit provoquant davantage d'oxydation du polyéthylène et l'interface se décale plus loin dans l'isolation. Ce processus cause la croissance d'une arborescence d'eau.

Rose [46] a donné un modèle nano-scopique avancé d'une arborescence d'eau (Fig. III.10). Dans ce modèle, la nature hydrophile de l'arborescence d'eau est expliquée par la présence de substances chimiques ou bien physiques de groupes ioniques liés. On a supposé que l'oxydation se survient au cours de la croissance de l'arborescence d'eau sous forme de groupes carboxylate et les groupes d'ions d'oxygène sulfurique (observé avec FTIR). Rose [46] a constaté que les groupes d'acides d'oxygène sulfurique peuvent être les résultats de l'oxydation d'antioxydants, qui dérivent leur fonctionnalité à partir de l'atome de soufre ; en contacte avec l'eau, ces groupes se convertis en sels. On a constaté que les antioxydants peuvent jouer un rôle important dans le processus de développement des arborescences d'eau.

affectée par l'arborescence d'eau. Ils ont constaté que l'arborescence d'eau a une influence sur la distribution du champ électrique.

III.9.1.3 Conductivité électrique homogène

Les différents travaux ont montré aussi que les arborescences d'eau sont électriquement plus ou moins conductrices. En effet, Ozaki et al [55] ont conclu que la valeur de la conductivité de l'arborescence d'eau varie entre 3×10^{-3} et 2×10^{-2} S/m. Si l'eau est distillée sa conductivité est de l'ordre de 10^{-6} S/m [53].

III.9.1.4 Conductivité électrique complexe non-homogène

Toyoda [56] a estimé la conductivité de la région où existe une arborescence d'eau à 10^{10} fois supérieure à celle du PRC sain. En raison de la nature dispersée des nano-canaux formant l'arborescence d'eau, la conductivité varie linéairement à partir de la racine jusqu'au sommet de l'arborescence.

III.10 Distribution de la charge d'espace dans l'isolation

Dans les câbles électriques, les diélectriques sont en contact avec différents composants dont les semi-conducteurs et d'autres matériaux diélectriques. Ainsi, ces interfaces sont incontournables dans les systèmes électriques et elles constituent un point faible dans le sens où elles représentent un des moyens par lesquels des charges d'espace sont générées dans l'isolant à long terme, notamment lorsqu'ils doivent résister à de forts gradients de tension [5]. Des études expérimentales et de simulation [57-59] ont montré l'importance des interfaces dans la génération des charges d'espace à l'intérieur du diélectrique. Il est maintenant bien établi que la formation de la charge d'espace dépend, non seulement des caractéristiques propres des matériaux, mais aussi des phénomènes d'interface. Cependant, s'agissant d'isolants, les mécanismes physiques de génération de ces charges d'espace sont encore mal compris [5].

L'accumulation de charges d'espace peut être une conséquence d'une conductivité [60] et/ou d'une permittivité électriques non-uniforme [61] Le fait que la conductivité et/ou la permittivité ne soit pas homogène implique que le champ ne suit pas une distribution Laplacienne, et que des charges sont présentes au sein de l'isolant [62].

III.10.1 Charge d'espace et interfaces diélectrique/diélectrique

L'accumulation des charges d'espace aux interfaces diélectrique/diélectrique à été un sujet d'intérêt depuis plusieurs années. Différentes techniques de mesures ont été utilisées pour localiser cette charge. Sous un champ alternatif, et à cause de certaines contraintes, les études sur la charge d'espace ne sont pas complètement achevées. En effet, ceci est dû au peu d'intérêt consacré à cette étude et à la faible quantité de charges qui s'accumule dans l'isolation sous tension alternative. Ceci a fait qu'on lui donne moins d'importance par rapport au cas sous tension continue. Une autre raison due au fait que la mesure des charges d'espace demande une acquisition de données plus rapide et une bonne synchronisation sous contrainte alternative pour mesurer la phase liée à la charge [63].

Wang et al [64] et Chong et al [65], ont utilisé la technique des ondes pour mesurer la charge d'espace sous tension alternative.

III.10.2 Théorie de Maxwell Wagner pour la polarisation de l'interface

L'approche la plus usuelle pour modéliser l'accumulation de la charge d'espace aux interfaces diélectriques (la polarisation interfaciale) est la théorie de Maxwell-Wagner.

Nous considérons la structure bicouche (arborescence d'eau/diélectrique sain) comme illustrée sur la figure III.11 où les deux matériaux présentent des différences en termes de permittivité et de conductivité. Donc, il est nécessaire de prendre en considération la présence de charges d'espace, y compris la possibilité que la charge se développe à l'interface entre l'arborescence d'eau et l'isolation.

En raison de la différence de permittivité diélectrique, le champ subit une discontinuité à l'interface de deux matériaux de nature différente formant une interface diélectrique/diélectrique [66].

Lorsque les deux diélectriques présentent par ailleurs des conductivités différentes (sous des conditions de champ et de température données), on assiste à l'accumulation de charges à l'interface entre les deux matériaux modifiant le profil du champ dans la structure diélectrique/diélectrique [67].

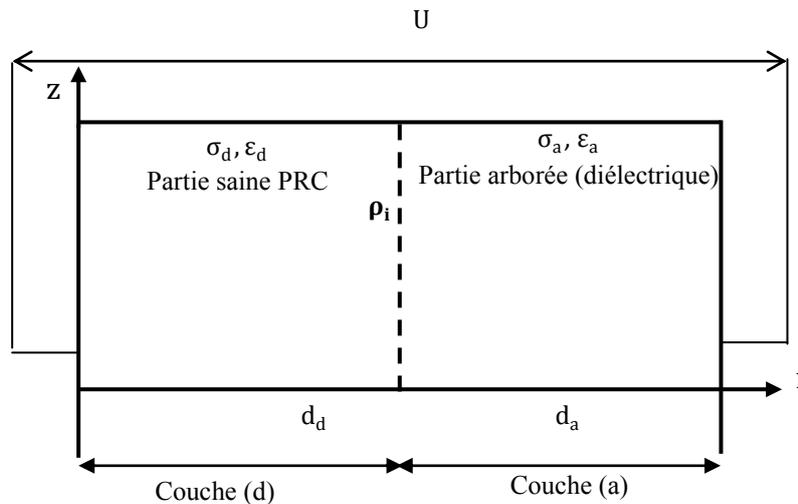


Fig III.11 Charge d'espace dans deux couches diélectriques (Partie saine de l'isolation et la partie arborée)

Où ρ_i est la charge d'interface, ϵ et σ sont respectivement la permittivité et la conductivité électriques. Les indices d et a font références aux matériaux diélectriques respectivement : isolation saine et isolation arborée.

L'influence de la charge d'espace sur la performance de matériau polymère dépend de différents facteurs tels que la quantité et la dynamique des charges d'espace ainsi que leur distribution. A leur tour, ces facteurs sont affectés par l'amplitude et la durée d'application du champ électrique et de la température [68, 69].

III.10.2.1 Quantité de la charge d'espace

D'après Thu et al [70], la quantité et la distribution de la charge accumulée est régie par les mécanismes d'injection de mobilité et de piégeage de la charge dans le matériau. Vu et al [69] ont montré que la polarité et la quantité de la charge d'espace entre les deux couches isolantes (PRC/EPR) peuvent être identifiées avec la théorie de Maxwell-Wagner et dépendent des conditions de température et de champ appliqué.

b) Sous l'application d'une tension alternative

Quand un champ électrique $\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t$ est appliqué sur une isolation diélectrique avec une permittivité ϵ et une conductivité σ , la quantité de la charge accumulée est donnée par :

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho \quad (\text{III. 1})$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot \left(\sigma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = 0 \quad (\text{III. 2})$$

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t \quad (\text{III. 3})$$

$$\rho(\vec{r}, \omega, t) = \sigma \vec{E}_0 \cdot \nabla(\epsilon/\sigma) \cos \omega t - \frac{\epsilon}{\sigma} \frac{\partial \rho(t)}{\partial t} \quad (\text{III. 4})$$

$$\rho(\vec{r}, \omega, t) = \frac{\epsilon \nabla(\epsilon/\sigma) \cdot \vec{E}_0}{1 + \omega^2(\epsilon/\sigma)^2} \left(\frac{\sigma}{\epsilon} \cos \omega t + \omega \sin \omega t - \frac{\sigma}{\epsilon} e\left(-\frac{\sigma}{\epsilon} t\right) \right) \quad (\text{III. 5})$$

Le terme exponentiel est négligeable

$$\frac{\sigma}{\epsilon} e\left(-\frac{\sigma}{\epsilon} t\right) = 0 \quad (\text{III. 6})$$

Donc l'équation (1) s'écrit :

$$\rho(\vec{r}, \omega, t) = \frac{\sigma \vec{E}_0 \cdot \nabla(\epsilon/\sigma)}{\sqrt{1 + \omega^2(\epsilon/\sigma)^2}} (\cos \omega t - \varphi) \quad (\text{III. 7})$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \epsilon}{\sigma} \right) \quad (\text{III. 8})$$

b) Sous l'application d'une tension continue

$$\omega \rightarrow 0 ,$$

$$\rho(\vec{r}) = \sigma \vec{E}_0 \cdot \nabla(\epsilon/\sigma) = \vec{J}_c \cdot \nabla(\epsilon/\sigma) \quad (\text{III. 9})$$

Dans le cas de deux couches diélectriques donné par la figure III.11, la densité de la charge d'interface est ρ_i est donnée par l'équation suivante [71, 72] :

$$\rho_i = \frac{Q_{\text{int}}}{S_{\text{int}}} = \left(\frac{\epsilon_d \sigma_a - \epsilon_a \sigma_d}{\sigma_a d_d + \sigma_d d_a} \right) U \quad (\text{III. 10})$$

Où, Q_{int} est la charge accumulée sur l'interface de deux diélectriques, S_{int} est la surface de l'interface, U la tension appliquée. $\epsilon_d, \sigma_d, d_d$ et $\epsilon_a, \sigma_a, d_a$ sont respectivement, la

conductivité, la permittivité et l'épaisseur de diélectrique des couches (a) et la couche (b). L'équation peut être écrite comme suit

$$\rho_i = \left(\frac{\epsilon_d \sigma_a - \epsilon_a \sigma_d}{\sigma_a \sigma_d} \right) \cdot \frac{1}{\frac{d_a}{\sigma_a} \cdot \frac{1}{U} + \frac{d_d}{\sigma_d} \cdot \frac{1}{U}} \quad (\text{III. 11})$$

Par ailleurs, le courant total (conduction et déplacement) s'écrit en fonction de \vec{E}_a et \vec{E}_d comme suit :

$$\vec{J}_a + \epsilon_a \frac{\partial \vec{E}_a(t)}{\partial t} = \vec{J}_d + \epsilon_d \frac{\partial \vec{E}_d(t)}{\partial t} \quad (\text{III. 12})$$

A partir de la loi d'ohm, la densité de courant dans les deux couches est donnée par :

$$\text{avec} \quad \begin{cases} \vec{J}_a = \sigma_a \vec{E}_a = \sigma_a \vec{U}_a / d_a \\ \vec{J}_d = \sigma_d \vec{E}_d = \sigma_d \vec{U}_d / d_d \end{cases} \quad (\text{III. 13})$$

$$\vec{U}_a = \left(\frac{R_a}{R_a + R_d} \right) \cdot \vec{U} \quad (\text{III. 14})$$

$$\vec{U}_d = \left(\frac{R_d}{R_a + R_d} \right) \cdot \vec{U} \quad (\text{III. 15})$$

$$R_d = \frac{d_d}{\sigma_d \cdot S} \quad (\text{III. 16})$$

$$R_a = \frac{d_a}{\sigma_a \cdot S} \quad (\text{III. 17})$$

$$\vec{U} = \left(\frac{\sigma_d d_a + \sigma_a d_d}{\sigma_a \sigma_d} \right) \cdot \vec{J}_a = \left(\frac{\sigma_d d_a + \sigma_a d_d}{\sigma_a \sigma_d} \right) \cdot \vec{J}_d \quad (\text{III. 18})$$

Initialement à $t=0$ aucune charge n'est présente à l'interface des deux diélectriques, ainsi : \vec{J}_a et \vec{J}_d maintiennent la continuité à l'interface entre les deux diélectriques [73]:

$$\vec{J}_a = \vec{J}_d = \vec{J}_i \quad (\text{III. 19})$$

L'expression de la densité de la charge à l'interface peut être obtenue avec la combinaison de l'équation (10) et (18) comme suit :

$$\rho_i(\vec{r}) = \left(\frac{\epsilon_d}{\sigma_d} - \frac{\epsilon_a}{\sigma_a} \right) \vec{J}_i \quad (\text{III. 20})$$

$$\rho_i(\vec{r}) = \left[1 - \frac{k_\epsilon}{k_\sigma} \right] \epsilon_d \vec{E}_d \quad (\text{III. 21})$$

où \vec{E}_d est le champ électrique dans la région non arborée, k_ε et k_σ sont les rapports de conductivités et permittivités des deux régions arborée et la non arborée, étant donné respectivement par :

$$k_\varepsilon = \frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_d} \quad (\text{III. 22})$$

$$k_\sigma = \frac{\sigma_a}{\sigma_d} \quad (\text{III. 23})$$

III.10.2.2 Signe de la charge d'espace

Les conductivités et les permittivités des deux matériaux jouent un rôle important sur la polarité de l'interface [70]. En effet, nous distinguons les cas suivants :

$$(\sigma_d/\varepsilon_d) < (\sigma_a/\varepsilon_a), \rho_i > 0 \quad (\text{III. 24})$$

$$(\sigma_d/\varepsilon_d) > (\sigma_a/\varepsilon_a), \rho_i < 0 \quad (\text{III. 25})$$

$$(\sigma_d/\varepsilon_d) = (\sigma_a/\varepsilon_a), \rho_i = 0 \quad (\text{III. 26})$$

Dans [74], Rogti montre que le signe positif et/ou négatif de la charge d'interface est relié à la valeur de la conductivité des deux milieux diélectriques et à la direction de champ appliqué.

Le signe de la charge d'espace peut être par ailleurs déterminé par le ratio entre la conductivité et la permittivité des deux milieux [75].

Le champ électrique est ainsi reporté dans le matériau dont le ratio permittivité/conductivité est le plus élevé [76].

III.11 Divergence de la théorie de Maxwell-Wagner

L'approche de Maxwell-Wagner n'inclut pas le fait que la surface des matériaux isolants présente des propriétés électriques différentes de celles de volume de l'isolation. La surface de l'isolation peut montrer une conduction ohmique, par exemple en raison de la présence d'eau condensée ou parce qu'un traitement chimique spécifique y a été appliqué [77].

La conséquence de la différence entre le volume et les propriétés électriques de surface est que la charge d'espace s'accumule généralement aux interfaces entre deux diélectriques identiques [78, 79]. Ceci n'est pas prévu par la théorie de Maxwell-Wagner, où on assume que les propriétés des diélectriques sont isotropes. Plusieurs travaux, par exemple [80, 81] ont prouvé que la polarité de la charge mesurée à l'interface diélectrique est conforme à la théorie de Maxwell-Wagner. Cependant, la quantité de charge accumulée à l'interface est souvent différente de ce qui est prévu par la théorie de Maxwell-Wagner.

III.11.1 Effet de contact d'interface

En réalité, l'interface diélectrique a une épaisseur finie. Elle peut être égale à quelques microns, quand des surfaces assez approximatives sont placées en contact. Le fait que l'interface n'est pas pointue permet l'accumulation de la charge d'espace sur les deux côtés de l'interface. Plusieurs résultats expérimentaux ont montré une distribution bipolaire de la charge au interfaces pour différents matériaux [78, 79]. La pression mécanique appliquée à l'interface a un rôle en définissant l'épaisseur d'interface. Alors que la pression de contact est

un facteur crucial en ce qui concerne l'activité des décharges à l'interface [82], la quantité de la charge d'espace qui s'accumule aux interfaces diélectriques s'est avérée tout à fait insensible à la pression mécanique appliquée [78].

III.11.2 Modèle de trois couches (modélisation de l'interface)

Dans ce modèle (Fig. III.12), l'interface entre les deux couches diélectriques est considérée comme un diélectrique. Une interface réelle entre les deux diélectriques (a) et (b) est modélisée comme un diélectrique fictif 'c' entre deux diélectriques et qui se comporte selon la théorie de Maxwell-Wagner. Le diélectrique (c) représente un contact imparfait entre les deux surfaces diélectriques, avec la possibilité de présence d'une conductivité importante [78]. Entre les deux diélectriques, des microcavités sont inévitables [83]. Leur taille est de l'ordre de quelques microns, selon la rugosité extérieure et la pression appliquée. Les cavités peuvent être remplies d'air ou d'un liquide. La frontière physique, qui fait la séparation entre les deux diélectriques, est une couche d'air ou liquide d'épaisseur finie. En outre, la surface de l'isolation peut présenter une conduction ohmique [84].

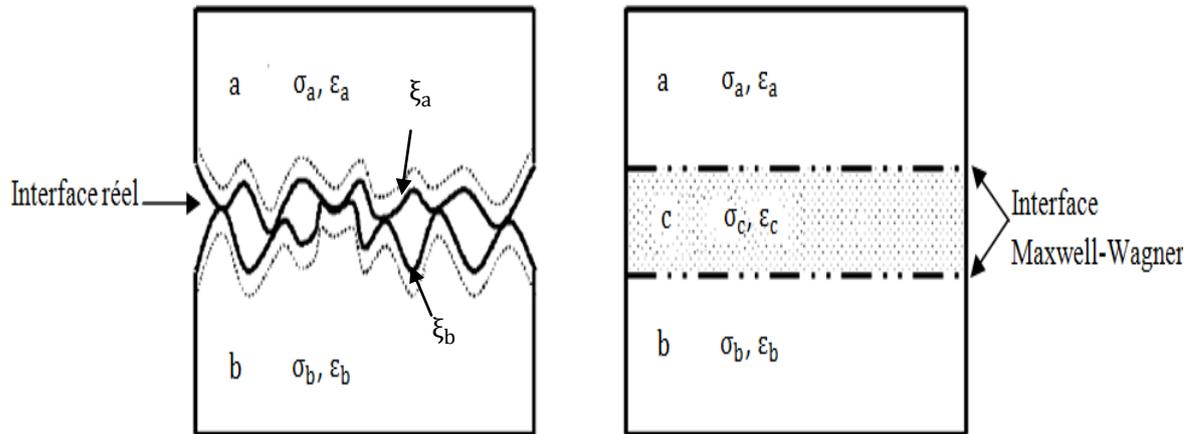


Fig III.12 Interface réelle modélisé comme un diélectrique fictif entre deux interfaces idéales se comportant selon la théorie de Maxwell-Wagner [78]

La partie diélectrique fictive 'c' est caractérisée par une épaisseur d_c , une conductivité σ_c et une permittivité ϵ_c . L'irrégularité des interfaces ξ_a et ξ_b des diélectriques a et b détermine l'épaisseur de diélectrique d_c

$$d_c = \xi_a + \xi_b \tag{III. 27}$$

Selon le modèle présenté, la distribution de la charge bipolaire est au niveau des deux interfaces ξ_a et ξ_b . La quantité de cette charge d'espace dépend de propriétés des deux diélectriques en contact, alors que le temps requis pour la charge bipolaire pour s'accumuler dépend des propriétés de la couche d'interface. La charge bipolaire initiale accumulée a la même polarité que la charge à l'électrode (homocharge). En outre, la charge accumulée sur l'interface ne modifie pas seulement la composante normale du champ à travers la couche interfaciale, mais aussi la composante tangentielle le long des deux cotés de l'interface [78].

La limite essentielle de ce modèle proposé par Bodega [78] est qu'il ne prend en considération que les charges accumulées obéissant à la théorie de Maxwell-Wagner. Néanmoins, des charges peuvent être créées dues aux propriétés microscopiques des

matériaux [76]. En particulier, à une température et à un champ électrique relativement élevés, ces charges affectent largement le comportement du champ aux interfaces.

III.12 Techniques de mesure de la charge d'espace

Le besoin de connaissances sur les mécanismes de formation et d'accumulation des charges d'espace dans les matériaux isolants a conduit au développement de nouvelles techniques de mesure donnant accès à la distribution spatiale de la densité de charges et donc du champ électrique.

La faible mobilité des porteurs dans les isolants polymères permet la mesure, de manière non destructive, de la densité de charge d'espace. Ces techniques non destructives, se décomposent en trois familles, qui diffèrent selon la nature de la perturbation introduite pour sonder la charge : les méthodes thermiques, d'impulsion acoustique et la méthode électro-acoustique [85]. Ces trois groupes de techniques non destructives sont basées sur le même principe dans lequel l'équilibre entre les forces électrostatiques et élastiques est perturbé.

Différentes techniques permettent actuellement d'établir la répartition de la densité de charges dans les isolants polymères sous un champ électrique. Toutefois, selon la technique utilisée, chaque type de technique de mesure présente des avantages et des inconvénients. La plus utilisée est la méthode électro-acoustique pulsée (PEA). Une méthode réalisée en 1985 par des chercheurs japonais [86, 87]. C'est une technique qui permet de faire des mesures dynamiques de la charge d'espace avec une résolution temporelle, adaptée aussi bien à des échantillons plans (quelques centaines de micromètres d'épaisseur) qu'à des échantillons de câbles coaxiaux. Aussi, elle présente l'avantage de pouvoir réaliser des mesures en présence de tension alternative ou continue. Elle est donc tout à fait adaptée à l'étude de l'injection et du transport de charges dans les isolants des câbles Haute Tension [70].

Le développement de ces techniques non destructives nous permet de mesurer l'accumulation de la charge d'espace, et d'étudier son effet sur la distribution du champ électrique dans l'isolation des câbles électriques aussi bien en laboratoire qu'en industrie [88, 89].

III.13 Mesure de la charge d'espace comme méthode de contrôle non destructif pour la détection des arborescences d'eau

Cette méthode est basée sur la mesure de la distribution des charges d'espaces dans un câble en PRC avec un défaut dans l'isolation. En appliquant une tension au matériau, les charges d'espaces s'accumulent autour du défaut. Par conséquent, la position et la taille du défaut sont trouvées en mesurant la distribution des charges d'espaces [90].

Le rapport entre l'existence des arborescences d'eau et la distribution de la charge sous tension continue a été rapporté dans le travail de [91]. La corrélation entre la distribution de la charge dans un câble isolé avec le polyéthylène réticulé vieilli et l'endroit des arborescences d'eau a été étudiée en utilisant la méthode électroacoustique pulsée. Des arborescences d'eau ont été trouvées à la position en laquelle on a observé la charge d'espace. D'autre part, aucune arborescence d'eau n'a été trouvée à des positions où on n'a pas observé la charge d'espace. Le rapport entre l'existence des arborescences d'eau et la présence de la charge a été confirmé par [92, 93, 94]. A partir de ces résultats nous pouvons dire que la mesure de la charge d'espace

semble être utile pour le diagnostic des arborescences d'eau dans l'isolation des câbles électriques.

III.14 Corrélation entre la quantité de la charge d'espace et la dégradation de l'isolation

Jusqu'ici, la communauté scientifique n'a pas une décision définitive au sujet de la charge d'espace comme étant une cause du vieillissement de l'isolation en polymère. Cependant, l'existence d'une relation entre le piégeage de la charge d'espace et le vieillissement électrique a été souvent mentionnée [95].

-La mesure de la charge d'espace dans une isolation en PRC d'un câble dégradé (en présence d'arborescences d'eau) a été réalisée par Hozumi et al [96] avec la méthode PEA, sous une tension continue (DC). Ils ont constaté que :

-Une bonne corrélation a été observée entre la quantité de la charge d'espace et le degré de dégradation de l'arborescence d'eau.

-L'accélération de la diminution de la charge d'espace sous l'application d'une tension alternative (AC) ; présence de 60% de la charge négative et suppression de l'ensemble de la charge positive.

-L'accumulation de la charge d'espace est un bon indicateur de la dégradation avec l'arborescence d'eau. La quantité de la charge d'espace de polarité négative est plus importante que dans le cas opposé (de polarité positive).

III.15 Distribution de la charge d'espace en présence d'arborescence d'eau

Sur la base de la technique de mesure PEA, les chercheurs Ohki et al [97] et Li et al [92] ont constaté que la charge d'espace existe seulement autour du sommet de l'arborescence d'eau et non à l'intérieur. Ce résultat a été en outre confirmé dans d'autres travaux de recherche [98, 99].

Des résultats importants sont observés par Ying Li et al [98] sur le comportement de cette charge d'espace et qui se résument comme suit:

1. La plupart des charges d'espace s'accumulent au sommet de l'arborescence.
2. Lorsque le taux d'humidité est élevé, la densité de la charge d'espace augmente.
3. Lorsque la fréquence de la tension appliquée est élevée, la densité de la charge d'espace diminue, et cette tendance devient claire si la teneur en humidité est faible.
4. La polarité de la charge d'espace est la même que la polarité de l'électrode à partir de laquelle l'arborescence prend naissance.
5. La quantité totale de la charge d'espace est directement proportionnelle au niveau de la tension appliquée.

La distribution de la charge d'espace, dépend fortement de la nature de l'interface entre les deux milieux et conduit à un changement dans la répartition du champ électrique [100, 101].

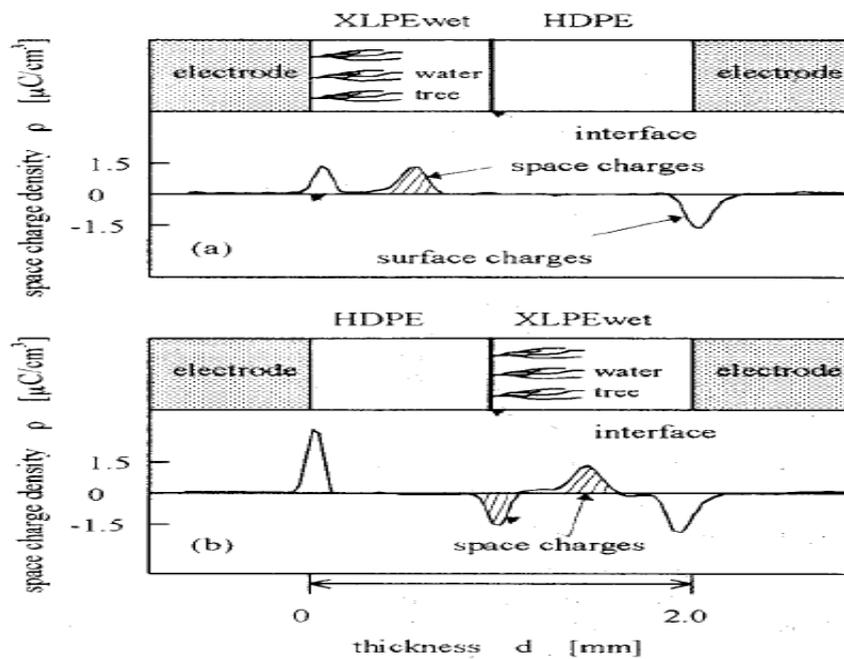


Fig. III.13 Formation de la charge d'espace dans un échantillon à deux couches [97]

Afin de confirmer cette interprétation, la répartition de la charge d'espace a été mesurée dans un échantillon à deux couches constitué de polyéthylène réticulé (PRC) arboré et le polyéthylène haute densité (PEHD) sain. Les résultats sont présentés sur la figure III.13. Si la polarisation de l'interface est causée par les différences de la permittivité et de la conductivité entre l'arborescence et la région saine, la charge d'espace devrait être observée à l'endroit où le changement de la permittivité ou de conductivité a lieu, indépendamment du fait qu'il est à la racine ou au sommet de l'arborescence d'eau. Ceci est clairement démontré par les résultats présentés dans la figure III.13 (b), lorsque des charges d'espace avec la même quantité et de polarités opposées sont observées. Par conséquent, il est confirmé que la charge spatiale obéit à l'équation (III. 20).

La charge d'espace d'interface ne peut donc exister que s'il y a un changement de permittivité et de la conductivité. Un tel changement se produit à l'interface entre l'arborescence et l'isolation. Comme on peut le voir sur la figure ci-dessous (Fig. III.14), les densités de la charge d'espace sont localisées à l'extrémité de l'arborescence d'eau comme prévu. Cela a encore été confirmé dans un autre travail [2], ce qui montre que la densité maximale de la charge d'espace correspond aux emplacements et la localisation du sommet de l'arborescence d'eau identifié.

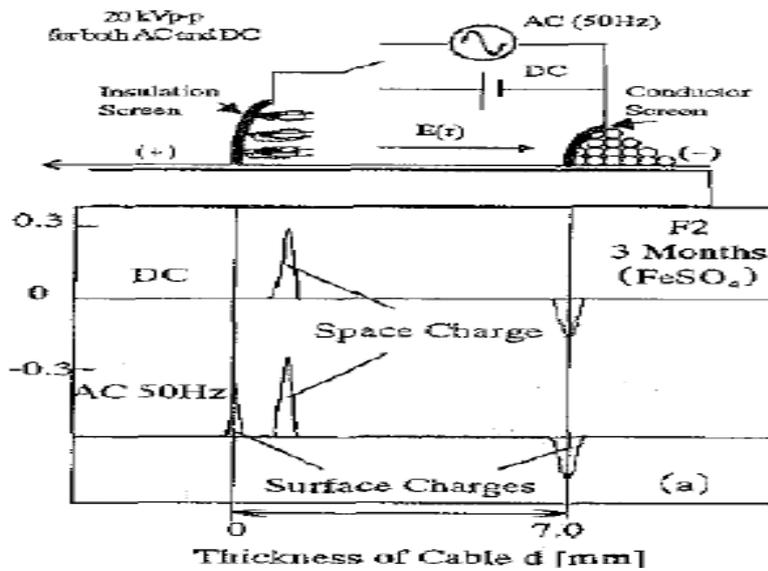


Fig. III.14 Forme de la charge d'espace pour un câble dégradé en présence d'arborescence d'eau [101]

III.16 Application d'une tension alternative à fréquence de 50 Hz

Les auteurs [97, 98, 102] ont étudiés expérimentalement le comportement et le signe de la charge d'espace sous tension alternative 50 Hz dans le cas d'une seule arborescence. Ils ont trouvé que la charge d'espace s'accumule au sommet de l'arborescence (interface arborescence/PRC) et que son signe suit les alternances.

La figure III.15 représente un profil typique de la charge d'espace obtenu à partir d'un échantillon humide en isolation en PRC sous contrainte alternative 50 Hz pour différentes phases : 0, 90, 180, 270 et 360 degrés. Les résultats montrent que les homocharges s'accumulent au sommet de l'arborescence, c'est à dire une charge positive quand l'électrode gauche est une anode (par exemple à 90 degrés), alors que la charge négative s'accumule au sommet de l'arborescence lorsque l'électrode gauche forme la cathode (par exemple à 270 degrés). On voit que le signe de la charge d'espace suit les alternances.

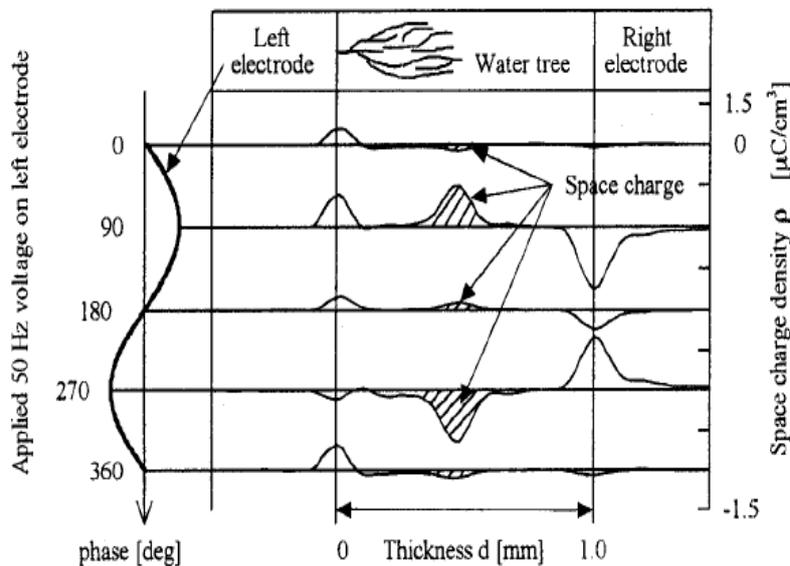


Fig. III.15 Distribution de la charge d'espace pour un échantillon d'un câble vieilli et humide sous un champ alternatif [98]

III.17 Conclusion

La présence d'interfaces entre les diélectriques (arborescence et isolant) et la différence des propriétés électriques de ces interfaces par rapport à la matrice polymère, constituent le maillon faible de l'isolation. En effet, ces interfaces représentent la zone idéale où les charges d'espace peuvent s'accumuler. Sachant que la charge d'espace contribue grandement à la rupture et à la défaillance de l'isolation en polymère, il est important de prendre en considération l'effet des ces charges sur la distribution du champ électrique d'une part, et sur la dégradation du matériau polymère d'autre part.

Pour que les systèmes d'isolation des câbles puissent être développés et comprendre le comportement de cette charge d'espace en présence des défauts dans l'isolation polymère, une évaluation de la distribution de champ électrique est essentielle.

Bibliographie

- [1] K. Kaneko, E. Nakane, Y. Suzuoki, T. Mizutani, "Effects of electrode on space charge properties of polyimide films", Proceedings of International Conference on Properties and applications of Dielectric Materials, Indonesia, pp. 73-76, 26-30 June, 2006.
- [2] T. Mizutani, K. Shinmura, K. Kaneko, T. Mori, "Space charge behaviors near the interface between different low-density polyethylenes" Proceedings of Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, China, pp. 59-62, 21-26 June, 2000.
- [3] G. Chen, Z. Xu, "Space charge dynamics in low density polyethylene under DC electric fields" Journal of Physics, Vol. 142, pp. 1-4, 2008.
- [4] N. Hussin, G. Chen, "The effect of acetophenone and alpha-methylstyrene, on the space charge properties of low density polyethylene", Proceedings of International Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Canada, pp.702-705, 26-29 Oct, 2008.
- [5] M. Taleb, "Phénomènes aux interfaces des isolants : mesure et simulation", these de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011.
- [6] J.C. Fothergill, "The coming of age of HVDC extruded power cables", Electrical Insulation Conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 8-11 June, 2014.
- [7] R. Mason, J. Thomas, G. Stevens, "HVDC project-RD 3012, Work Package 3/4", presentation of the University of Surrey, Stenungsund, Sweden, 2005.
- [8] F.H. Kreuger, "Industrial high DC voltage", Delft University Press, ISBN 90-407-1110-0, 1995.
- [9] F.H. Kreuger, Industrial high voltage, Delft University Press, ISBN 90-6275-561-5, 1991.
- [10] L.J. Hiivala, "Extruded solid-dielectric power transmission cables", Power and Communication Cables: Theory and Applications, R. Bartnikas editor, K. D. Srivastava coeditor, IEEE, McGraw-Hill, New York, 2000.
- [11] K.M. Jäger, L. Lindbom, "The continuing evolution of semiconductive materials for power cable applications", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol.21, No. 1, pp. 20-34, 2005.
- [12] R. Bodega, "Space charge accumulation in polymeric high Voltage DC Cable systems," PhD Thesis, Delft University of Technology, 2006.
- [13] J.P. Crine, S. Pelissou, H. ST-onge, Impuretés élémentaires et ioniques dans l'isolant et les semi-conducteurs de câbles, deuxième conférence internationale sur les câbles d'énergie à isolant synthétique, Versailles, p. 206, 21-25 Septembre, 1987.
- [14] T.J. Lewis, "Polyethylene under electric stress", IEEE Trans. Diel. Electr. Insul., Vol. 9, No. 5, pp. 717-729, 2002.
- [15] J. Hjerrild, J. Holbøll, M. Henriksen, S. Boggs, "Effect of semicon-dielectric interface on conductivity and electric field distribution", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 9, No. 4, pp. 596-603, 2002.
- [16] S. Boggs, "A rational consideration of space charge", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 20, No. 4, pp. 22-27, 2004.
- [17] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, "Electrical degradation and breakdown in polymers", published by Peter Peregrinus Ltd, ISBN 0-86341-196-7, 1992.

- [18] T.J. Lewis, "The micro-physic of charge in solid dielectric", in Space charge in solid dielectric, edit by J. C. Fothergill, L. A. Dissado, ISBN 0-9533538-0- X, pp. 1-17, 1998.
- [19] S. Beauvais, "étude de l'influence de la porosité sur les propriétés électriques de dépôts par projection plasma", thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Paris, 2003.
- [20] W. Xinsheng, H. Yongqing, T. Demin, "Trap density as an indication of electrical aging degree in polymer", 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Brisbane, Australia, pp. 740-743, July 3-8, 1994.
- [21] K.C. Kao, "New theory of electrical discharge and breakdown in low-mobility condensed insulation", J. Appl. Phys., Vol. 55 No. 2, pp. 752-755, 1984.
- [22] X. Wang, D. Tu, Y. Tanaka, T. Muronaka, T. Takada, C. Shinoda, T. Hashizumi, "Space charge in XLPE power cable under dc electrical stress and heat treatment", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 467-474, Vol.2, No.3, June 1995.
- [23] M. Meunier, N. Quirke, A. Aslanides, "Characterisation of charge carrier traps in polymeric insulators", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, BC, Canada, pp 21-24, 15-18 oct, 2000.
- [24] M. Meunier, N. Quirke, "Molecular modeling of electron trapping in polymer insulators", Journal of Chemical Physics, Vol.113, No.1, p 369-376, 2000.
- [25] T.T. ANH, "Corrélation entre les charges d'espace accumulées et les déformations mécaniques induites dans des isolants organiques solides soumis à un champ électrique", These de Doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier ,2011
- [26] K.Y. Lau, A.S. Vaughan, G. Chen, I.L. Hosier, A.F. Holt, K.Y. Ching, "On the space charge and DC breakdown behavior of Polyethylene/Silica nanocomposites", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 21, No. 1, pp. 340-351, 2014.
- [27] C. Laurent, "Diélectriques solides et charge d'espace", Techniques de l'Ingénieur, D2305, pp.1-13, 1999.
- [28] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, "Electrical degradation and breakdown in polymer" London, United Kingdom: Peter Peregrinus, London, pp. 207-241, 1992.
- [29] R. Neimanis, T.K. Saha, R. Eriksson, "Determination of moisture content in mass impregnated cable insulation using low frequency dielectric spectroscopy", IEEE Power Engineering Society Meeting, USA, pp. 661-666, 16-20 July,1995.
- [30] J. Comyn, "Polymer permeability", Elsevier Applied Science Publishers, 1985.
- [31] H. Miyata, A. Yokoyama, T. Takahashi, S. Yamamoto, "Effect of water on the space charge formation in XLPE", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Canada, pp. 670-673, 16-19 June, 1996.
- [32] G.C. Montanari, F. Palmieri, "The effect of humidity on space charge accumulation in XLPE", Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, Albuquerque, NM, USA, pp. 205-208,19-22 Oct, 2003.
- [33] Y. Sekii, T. Ohbayashi, T. Uchimura, T. Hukuyama, T. Maeno, "A study on the space charge formation in XLPE", Annual Report in Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Kitchener, Ontario, Canada, pp. 469-472,14-17 Oct, 2001.

- [34] L. Hui, J.K. Nelson, L.S. Schadler, "The influence of moisture on the electrical performance of XLPE/silica nano-composites", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, pp.1- 4, July 4-9, 2010.
- [35] T. Torbjørn A. Ve, F. Mauseth, E. Ildstad, "Space charge accumulation in XLPE insulation at high temperature and water content", IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, Italy, pp. 435-439 June 30-July 4, 2013.
- [36] Y. Ohki, Y. Ebinuma, S. Katakai, "Space charge formation in water-treed insulation", IEEE Trans. Dielectr. Insul., Vol.5, No.5, pp. 707-712, 1998.
- [37] K. Suzuki, Y. Tanaka, T. Takada, Y. Ohki, C. Takeya, "Correlation between space charge distribution and water-tree location in aged XLPE cable", IEEE Trans. Dielectr. Insul., Vol.8, No.1, pp. 78-81, 2001.
- [38] E.F. Steennis, F.H. Kreuger, "Water treeing in polyethylene cables", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 25 No. 5, pp.989 -1028, October 1990
- [39] S. Péliou, "Impurities in XLPE cables", IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation, pp. 339-342, Toronto Canada, June 3-6, 1990.
- [40] S. Péliou, "Impurities in XLPE cable resins", IEEE, Proceeding of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric materials, pp. 412-415, Brisbane, Australia, July 3-8, 1994.
- [41] S. Péliou, S. St-Antoine, "Influence of cable processing on the insulation impurity content", IEEE, Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation, pp. 97-100, Arlington, Virginia, USA, June 7-10, 1998.
- [42] W.P. Crine, S. Pelissou, H. St-Onge, J. St-Piere, G. Kennedy, A. Houdayer, P. Hinrichsen, "Elemental and ionic impurities in cable insulation and shields", Jicable 87, International Conference on Polymer Insulated Power Cables, Paris, pp. 206- 213, Sept 1987.
- [43] J.F. Johnson, J.H. Groeger, M.S. Mashikian, B.S. Bernstein, A.R. Cooper, "Sensitive analytical methods for early diagnosis of ageing in solid insulation under voltage stress", Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques a Haute Tension (CIGRE), Aug/Sept, 1988.
- [44] E.F. Steennis, "Water treeing, the behavior of water trees in extruded cable insulation", Thesis University Delft. ISBN 90-353-1022-5, KEMA, Arnhem, 1989.
- [45] K. Kao, W. Hwang, "transport in solids (with particular reference lo organic semiconductors)", International Series in the Science of the Solid State, Vol.14, pp.663, Pergamum Press, 1981.
- [46] R. Ross, W. S.M. Geurts, J.J. Smit, J.H.V. Maas, E.T.G. Lutz, "The Hydrophilic Nature of Water trees", Conference record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Canada, June 3-6, 1990.
- [47] J.Y. Koo, J.D. Cross, M. El Kahel, C.T. Meyer, J.C. Filippini, "Electrical behaviour and structure of water trees in relation to their propagation", Ann. Report Conf. Elect. Insul. Dielect. Phenom, pp 301-306, 16-20 Oct, 1983.
- [48] J.D. Cross, J.Y. Koo, "Some observations on the structure of water trees", IEEE Trans. on Elect.Insul., Vol. EI-19, No. 4, pp. 303-306, 1984.

- [49] F. Stucki, A. Schonenberger, "Dielectric properties of single water trees", Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Sestri Levante, Italy, pp 373-377, 22-25 June, 1992.
- [50] I. Radu, M. Acedo, P. Notingher, F. Frutos, J. C. Filippini, "The danger of water trees in polymer insulated power cables evaluated from calculations of electric field in the presence of water trees of different shapes and permittivity distributions" Journal of Electrostatics, Vol.40-41, pp.343-348, 1997.
- [51] M. Acedo, I. Radu, F. Frutos, J. C. Filippini, P. Notingher, "Water treeing in underground power cables: modelling of the trees and calculation of electric field perturbation," Elsevier Journal of Electrostatics, Vol. 53, No. 4, pp. 267-294, 2001.
- [52] I. Radu, M. Acedo, J.C. Filippini, P. Notingher, F. Frutos, "The effect of water treeing on the electric field distribution of XLPE consequences for the dielectric strength", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.7, No.6, pp.860-868, 2000.
- [53] J.L. Chen, J.C. Filippini, "The morphology and behavior of the water tree", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28, No. 2, pp. 271-286, 1993.
- [54] S. Hidsten, E. Ildstad, J. Sletbak, H. Faremo, "Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods", IEEE Trans. Dielec. insul, Vol.5, No. 5, pp.754-760, 1998.
- [55] T. Ozaki, N. Ito, J. Kawai, S. Nakamura, "Relative permittivity and conductivity of water-treed region in XLPE estimated by an equivalent circuit", Electrical Engineering in Japan, Vol. 148, No. 3, pp. 7-14, 2004.
- [56] T. Toyoda, S. Mukai, Y. Ohki, Y. Li, T. Maeno, "Estimation of conductivity and permittivity of water trees in PE from space charge distribution measurements", IEEE Trans.on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.8, No.1, pp.111-116, 2001.
- [57] S. Leroy, "Modélisation numérique des phénomènes de transport électrique dans un isolant polyéthylène sous contrainte électrique", Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III, 2004.
- [58] T. Mizutani, "Behavior of charge carriers near metal/polymer interfaces" Proceedings of IEEE International Symposium on Electrical Insulating Materials, Japan, Kitakyushu, pp.1-6, 5-9 June, 2005.
- [59] G. Chen, "Interfaces and space charge in Polymeric insulating material", Mater. Res. Soc. Symp. Proc., Materials Research Society, Vol. 889, pp. 1-12, 2006.
- [60] I.W. McAllister, G.C. Crichton, A. Pedersen, "Charge accumulation in DC cables: a macroscopic approach", Proc. IEEE Int. Symp. Electr. Insul., ISEI, Pittsburgh, PA, USA, pp. 212-216, 5-8 June, 1994.
- [61] K. Matsui, Y. Tanaka, T. Takada, T. Fukao, K. Fukunaga, T. Maeno, J.M. Alison, "Space charge behavior in low-density polyethylene at pre-breakdown", IEEE TDEI, Vol. 12, No. 3, pp. 406-415, 2005.
- [62] Cigré, Joint TF 21/15. "Interfaces in Accessories for Extruded HV and EHV Cables", 2002.
- [63] J. Zhao, Z. Xu, G. Chen, P.L. Lewin, "Numeric description of space charge in polyethylene under AC electric fields", Journal of Applied Physics, Vol.108, No.12, pp.1 -7, 2010.

- [64] Y.L. Chong, G. Chen, H. Miyake, K. Matsui, Y. Tanaka, T. Takada, "Space charge and charge trapping characteristics of crosslinked polyethylene subjected to AC electric stresses", *Journal of Physics and Dielectric Application*, Vol. 39, No. 8, pp.1658-1666, 2006.
- [65] X. Wang, N. Yoshimura, Y. Tanaka, K. Murata, T. Takada, "space charge characteristics in crosslinking polyethylene under electrical stress from DC to power frequency", in *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 31, No.16, pp.2057, 1998.
- [66] R. Bodega, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, "Space charge measurements on multi-dielectrics by means of the pulsed electroacoustic method," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, Vol. 13, No. 2, pp. 272-281, 2006.
- [67] E. Kanegae, Y. Ohki, Y. Sekiguchi, "Space charge behavior in multi-layered dielectrics with LDPE and LDPE/MgO nanocomposites", *IEEE, International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.
- [68] C. Thomas, "Développement de la méthode électro-acoustique pulsée pour des mesures sous contrainte périodique de forme arbitraire : caractérisation de la charge d'espace dans les isolants polymères," Thèse, Université Paul-Sabatier, Toulouse, 2008.
- [69] T.T.N. Vu, G. Teyssedre, B. Vissouvanadin, S. Le Roy, C. Laurent, "Correlating conductivity and space charge measurements in multi-dielectrics under various electrical and thermal stresses", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 22, No. 1, pp. 117-126, 2015.
- [70] T.T.N. Vu, "Etude des phénomènes de charges d'espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d'énergie en haute tension continue (HVDC)", thèse de doctorat en génie électrique, Université Toulouse III- Paul Sabatier, juillet 2014.
- [71] S. Li, N. Zhao, Y. Nie, X. Wang, G. Chen, G. Teyssedre, "Space charge characteristics of LDPE Nanocomposite/LDPE insulation system" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 22, No. 1, pp. 92-100, 2015.
- [72] G.C. Montanari, P.H.F. Morshuis, "Space charge phenomenology in polymeric insulating materials", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 12, No. 4, pp. 754-767, 2005.
- [73] K. Matsui, Y. Tanaka, T. Takada, T. Fukao, K. Fukunaga, T. Maeno, J.M. Alison, "Space charge behavior in low-density polyethylene at pre-breakdown", *IEEE TDEI*, Vol. 12, No. 3, pp. 406-415, 2005.
- [74] F. Rogti, "Space Charge Dynamic at the physical interface in Cross-linked Polyethylene under DC field and different temperatures", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 18, No. 3, pp. 888-899, 2011.
- [75] S. Delpino, D. Fabiani, G. C Montanari, C. Laurent, G. Teyssedre, P.H.F. Morshuis, R. Bodega, L.A. Dissado, "Polymeric HVDC cable design and space charge accumulation. Part 2: Insulation Interfaces," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, Vol. 24, No. 1, pp. 14-24, 2008.
- [76] Y. Li, M. Yasuda, T. Takada, "Influence on Spatial Charge Distribution of Crosslinking Agent Residues in XLPE", *Proc. 3rd ICPADM*, Waseda, Japan, pp. 1210-1215, 8-12 July, 1991.
- [77] M.P. Pépin, H.J. Wintle, "Charge injection and conduction on the surface of insulators", *Journ. App. Phys.*, Vol.83, No.11, pp. 5870-5879, 1998.

- [78] R. Bodega, P.H.F. Morshuis, E. Redjosentono, J.J. Smit, "Dielectric interface characterization by means of space charge measurements", Proc. IEEE Conf. on Electr. Insul. Diel. Phenom., Albuquerque, NM, USA, pp. 728-733, 19-22 Oct, 2003.
- [79] G. Chen, Y. Tanaka, T. Takada, L. Zhong, "Effect of polyethylene interface on space charge formation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.11, No. 1, pp. 113-121, 2004.
- [80] J. Beyer, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, "Investigation on charge and polarization effects at dielectric interfaces in laminated HVDC insulation", Proc. IEEE Conf. Electr. Insul. Diel. Phenom., Austin, TX, USA, pp. 32-37, 17-19 oct, 1999.
- [81] T. Tanaka, M. Uchiumi, "Some consideration of voltage-induced interfacial space charge in several laminated dielectrics", Proc. IEEE Int. Conf. Cond. Breakdown Solid Dielectr., Vasteras, Sweden, pp. 23-27, 22-25 June, 1998.
- [82] Z. Nadolny, J.M. Braun, R.J. Densley, "Effect of mechanical pressure and silicone grease on partial discharge characteristics for model XLPE transmission cable joint", Proc. Int. Symp. HV Eng., Vol.5, No.467, pp 297- 300, 1999.
- [83] B.A. Jonuz, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, "Space charge measurements, dielectric spectroscopy and breakdown tests on new and aged polycarbonate". The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, Boulder, CO, USA, pp. 275-278, 17-20 Oct, 2004.
- [84] M.P. Pépin, H.J. Wintle, "Charge injection and conduction on the surface of insulators", Journ. App. Phys., Vol. 83, No. 11, pp. 5870-5879, 1998.
- [85] T. Mizutani, "Space charge measurement techniques and space charge in polyethylene", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 1, No. 5, pp. 923-933, 1994.
- [86] T. Takada, T. Sakai, "Measurement of electric fields at a dielectric/electrode interface using an acoustic transducer technique," IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-18, No. 6, pp. 619-628, 1983.
- [87] T. Maeno, T. Futami, H. Kushibe, T. Takada, C.M. Cooke, "Measurement of Spatial Charge Distribution in Thick Dielectrics Using the Pulsed Electroacoustic Method," IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 23, No. 3, pp. 433-439, 1988.
- [88] Y. Li, T. Takada, "Progress in Space Charge Measurement of Solid Insulating Materials in Japan", IEEE Elec. Insul. Mag., Vol. 10 No. 5, pp, 16-28, 1994.
- [89] N. Hozumi, T. Okamoto, T. Imajo, "Space Charge Distribution Measurement in a long Size XLPE Cable Using the Pulsed Electroacoustic Method", Proc. IEEE Symp. Electrical Insulation, Baltimore, MD, USA, pp. 294-297, 7-10 June, 1992.
- [90] T. Sumiimoto, Y. Li, J. Shinagawa, T. Nakagawa, "study of space charge behavior in XLPE cable by pressure wave propagation method", International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, Sept. 27-30, 1998.
- [91] N. Yoshimura, F. Noto, "Growth of water trees in polyethylene and silicon rubber by water electrodes", IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insul, Vol.EI-12, No.6, pp. 411-416, 1977.
- [92] Y. Li, J. Kawai, Y. Ebinuma, Y. Imaizumi, K. Suzuki, Y. Tanaka, T. Takada, "Three-dimensional space charge distribution in water tree tip using the pulsed electroacoustic method", 9th International Symposium on Electrets (ISE 9), Shanghai, China, pp. 217-222, 27-27 Sept, 1996.

- [93] Y. Li, J. Kawai, Y. Binuma, Y. Fujiwara, Y. Ohki, Y. Tanaka, T. Takada, "Space charge behavior under AC voltage in water-treed PE observed by the PEA method", IEEE Trans. On DEI, Vol. 4, No.1, pp. 52-571, 1997.
- [94] J. Li, X. Zhao, G. Yin, S. Li, J. Zhao, B. Ouyang, "The Effect of accelerated water tree ageing on the properties of XLPE cable insulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 18, No. 5, pp. 1562-1569, 2011.
- [95] C. Laurant, "Space charge-induced damage in synthetic insulation", Proc. Int. Symp. HV Eng., p.363, 2003.
- [96] N. Hozumi, T. Okamoto, Y. Ikeda, "Space charge measurement in water tree degraded XLPE cables", Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Paper 5234, Brisbane Australia, July 3-8, 1994.
- [97] Y. Ohki, Y. LI, J. Kawai, Y. Ebinuma, Y. Fujiwara, "Space Charge behavior under AC voltage application in water-treed polyethylene observed by the pulsed electroacoustic method", Annual Report Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), San Francisco, USA , pp.52-57, 23-23 oct, 1996.
- [98] Y. Li, J. Kawai, Y. Ebinuma, Y. Fujiwara, Y. Ohki, Y. Tanaka, T. Takada, "Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.4, No.1, pp. 52-57, 1997.
- [99] Y. Ohki, Y. Ebinuma, S. Katakai, "Space charge formation in water treed insulation", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 5, No. 5, pp. 707-712, Oct. 1998.
- [100] F. Rogti, A. Mekhaldi, C. Laurent, "Space charge behavior at physical interfaces in cross-linked polyethylene under DC field", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.15, No.5, pp.1478-1485, 2008.
- [101] A.J. Thomas, T.K. Saha, "A new dielectric response model for water tree degraded XLPE insulation-part a: model development with small sample verification", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.15, No.4, pp. 1131-1143, 2008.
- [102] J.H. Lee, S.M. Cho, I. K. Song, "Correlation between the AC breakdown strength and space charge distribution of water tree aged XLPE", Annual Report Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), Atlanta, GA, USA, pp. 657-660, 25-28 oct, 1998.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous commençons par présenter le modèle de câble faisant l'objet de notre étude. Ses caractéristiques électro-géométriques ainsi que les différents matériaux des éléments le constituant seront donnés. Nous présentons également la configuration à laquelle nous nous sommes intéressés des deux arborescences d'eau individuelles (w_1 et w_2) qui se développent simultanément à partir des deux couches semi-conductrices intérieure et extérieure de l'isolation d'un câble moyenne tension en présence ou pas de la charge d'espace sur la distribution de champ électrique. Une tension continue positive de 12 kV a été appliquée. Pour déterminer les valeurs ainsi que la distribution du champ électrique en tout point appartenant au domaine de l'isolation du câble, l'approche numérique en termes du champ électrique dans le cas 2D électrostatique est implémentée sous environnement Comsol Multiphysics. Plusieurs paramètres affectant la distribution du champ électrique ont été considérés: la longueur et la forme physique des arborescences ainsi que le type d'arborescences (individuelles ou continues). Aussi, les distributions non homogène (linéaires et paraboliques) et homogène de la constante diélectrique à l'intérieur de ces deux arborescences d'eau ont été étudiées. En présence de la charge d'espace, un intérêt particulier est assigné à l'effet de la polarité, de la densité et de l'épaisseur de la charge d'espace ainsi que le comportement de cette charge initialement accumulée aux sommets des deux arborescences d'eau. Nous supposons que la charge d'espace est distribuée le long des arborescences sous une structure multicouches. Notons que pour l'influence de la polarité, les quatre configurations de polarités liées à la charge d'espace accumulée autour de w_1 et w_2 ont été considérées.

Dans une autre partie de notre étude, nous étudions l'impact de la nature (eau ou air) des microcavités et de la constante diélectrique des nano-canaux formant les arborescences d'eau sur la distribution du champ électrique dans l'isolation. Ces microcavités sont positionnées dans la direction radiale de l'isolation intérieure du câble et séparées par la même distance.

IV.2 Modèle de câble étudié

IV.2.1 Présentation du modèle du câble:

La figure IV.1 représente la section transversale du modèle de câble à étudier :

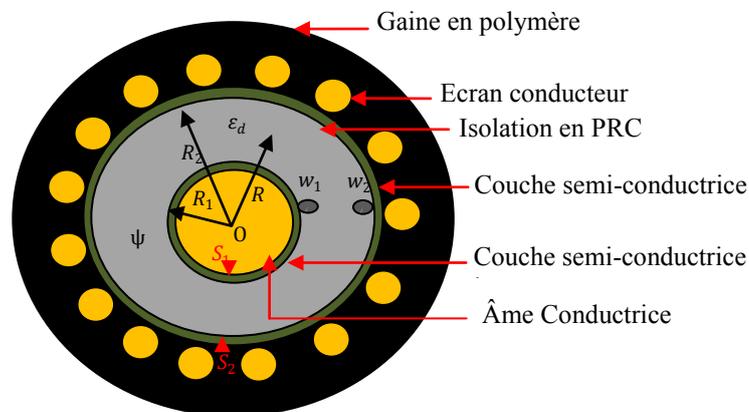


Fig. IV.1 Section transversale du modèle de câble de distribution de 12kV

R_1 et R_2 sont respectivement les deux rayons intérieur et extérieur de l'isolation, w_1 l'arborescence d'eau se développant à partir de la couche semi-conductrice intérieure, w_2 l'arborescence d'eau se développant à partir de la couche semi-conductrice extérieure, ϵ_d la permittivité diélectrique du PRC, ψ le milieu intérieur de isolation.

Les dimensions géométriques et les propriétés physiques (conductivité et permittivité) du modèle de câble sont données respectivement dans les deux tableaux IV.1 et IV.2 [1].

Tableau IV.1 : Propriétés géométriques de câble

Eléments de Câble	Dimension (mm)
Rayon du conducteur	3.5
Epaisseur de l'isolation en polyéthylène ($R_2 - R_1$)	5.5
Epaisseur de la couche semi-conductrice	0.5
rayon de l'écran conducteur	0.65
épaisseur de la Jaquette	2

Tableau IV.2 : Propriétés Physiques de câble

Matériaux constituant le Câble	Conductivité $\sigma(\text{Sm}^{-1})$	Permittivité ϵ_r
Conducteur en Aluminium	3.03×10^7	1
Isolation En Polyéthylène	10^{-15}	2.3
Couche Semi-conductrice	0.1	500
Ecrans conducteurs	5.99×10^7	1
Jacquette En Polyéthylène	10^{-10}	2.3

VI.2.2 Géométrie des arborescences d'eau

L'analyse numérique de cette étude se concentre sur les arborescences individuelles, modélisées à l'aide de la configuration de la figure IV.2.

Dans le but de valider notre analyse numérique et les résultats obtenus, nous avons considéré dans notre travail, les mêmes dimensions concernant les arborescences que celles considérées dans d'autres travaux de recherche [2, 3]. Les deux arborescences d'eau sont identiques (w_1 et w_2), avec la même longueur ($l_w = 0.35\text{mm}$) et les mêmes diamètres de la base ($D_b = 0.15\text{mm}$) et de front ($D_f = 0.3\text{mm}$) et se développent à partir des deux couches semi-conductrices intérieure et extérieure à l'isolation. En cas de présence de charges d'espace, nous considérons l_{c1} et l_{c2} comme des couches de la charge d'espace ayant les mêmes épaisseurs (Fig. IV.2).

Le domaine ψ est subdivisé en deux sous domaines ψ_1 et ψ_2 séparés par la surface S. ψ_1 représente la région affectée de l'isolation avec une permittivité ϵ_w et ψ_2 correspond au polyéthylène réticulé sain (PRC) de permittivité constante ϵ_d . Le champ électrique est déterminé le long des coordonnées x (donc le long de l'épaisseur de l'isolant). D'autre part, le champ électrique a également été calculé le long des coordonnées y. Ceci nous permet de prendre en compte l'effet des interfaces.

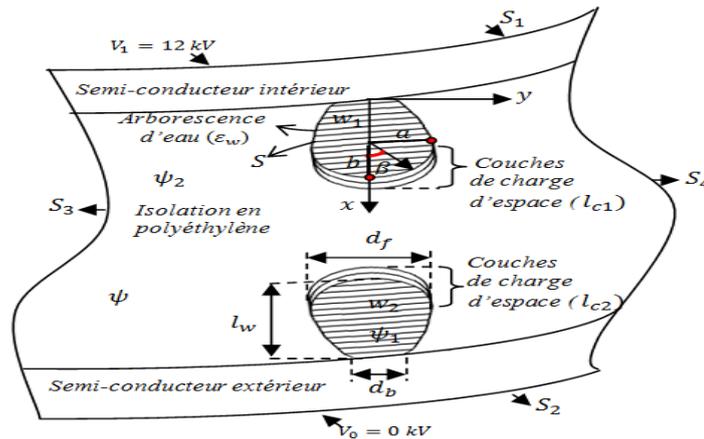


Fig. IV.2 Structure géométrique d'arborescences de type individuelles

VI.2.3 Permittivité des arborescences d'eau

Les arborescences d'eau se composent de microcavités remplies d'eau reliées (ou non) par des nano-canaux (Fig. IV.3). La distribution des microcavités est inhomogène [4]. Comme il a été constaté que la répartition linéaire de la densité de microcavités est une bonne approche [5], nous avons adopté une telle distribution à la permittivité diélectrique à l'intérieur des deux arborescences d'eau. Dans le cas de l'augmentation de la chaleur de l'isolation des câbles électriques (vieillessement thermique), l'état de la distribution inhomogène de la permittivité diélectrique à l'intérieur des arborescences d'eau a tendance à se transformer à l'état homogène [6].

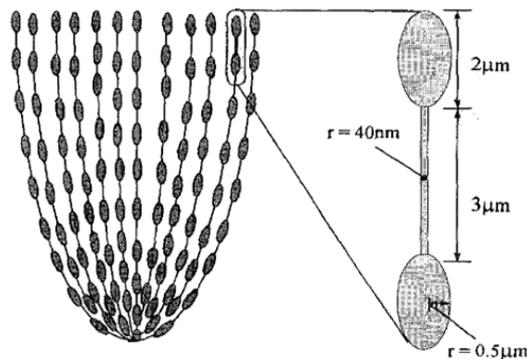


Fig. IV.3 Une image microscopique simplifiée d'une arborescence d'eau montrant des microcavités de forme ellipsoïdale formant une chaîne de perles interconnectées par des nano-canaux. L'ellipticité des microcavités est de $\epsilon_{mc} = 0,87$, avec un rapport de $b/a = 0.5$ [7].

VI.2.4 Equations régissant le système d'isolation

Dans le cas électrostatique, les phénomènes électriques sont décrits par l'équation de Poisson.

$$\vec{\nabla} \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \vec{\nabla} V) = -\rho \quad (IV.1)$$

Où, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m est la permittivité du vide; V est le potentiel électrique.

En l'absence de charges d'espaces ($\rho = 0$) on aura l'équation de Laplace :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (IV.2)$$

Les conditions aux limites de la configuration représentée sur la figure IV.2 sont :

$$V(m) = \begin{cases} V_0 = 12\text{kV} & m \in S_1 \\ V_1 = 0\text{kV} & m \in S_2 \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

La résolution de l'équation de Poisson détermine la répartition du potentiel scalaire et du champ électrique en tout point appartenant aux couches du câble en fonction des conditions aux limites. Nous nous sommes concentrés en particulier sur la partie diélectrique qui sert d'isolation.

IV.3 Résultats et discussions

IV.3.1 Distribution du champ dans une isolation saine

La figure IV.4 montre la distribution uniforme du champ électrique et les lignes équipotentielles dans une isolation saine du câble.

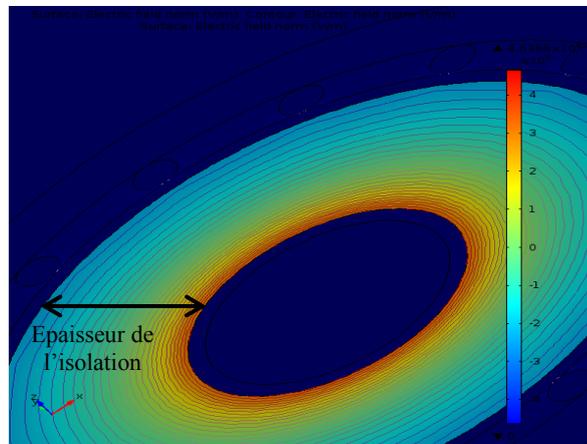


Fig. IV.4 Champ électrique et lignes équipotentielles dans une isolation (PRC) saine

IV.3.2 Distribution du champ dans une isolation en présence d'arborescences d'eau

La figure IV.5 représente la distribution du champ électrique dans l'isolation en polyéthylène réticulé en présence de deux arborescences d'eau. La distribution de la permittivité à l'intérieur des arborescences est considérée ici linéaire.

Le champ électrique est non uniforme ; il est élevé (respectivement faible) à l'extérieur (respectivement à l'intérieur) des arborescences. Cela est dû à la valeur de la permittivité des arborescences ($\epsilon_{wmax} = 4$) qui est supérieure à celle du matériau isolant ($\epsilon_d = 2.3$).

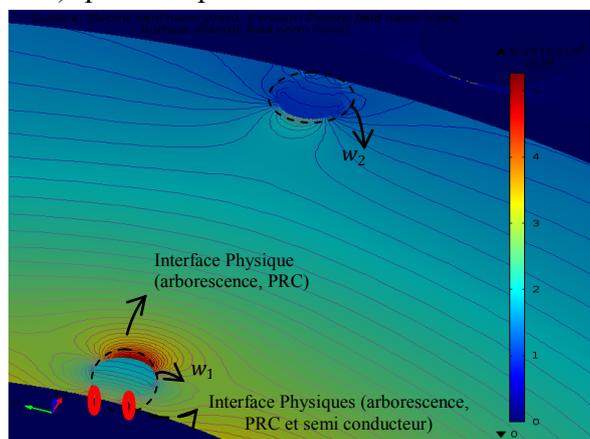


Fig. IV.5 Distribution du champ électrique en présence de deux arborescences d'eau dans l'isolation en PRC

Dans le cas d'une isolation saine, le champ électrique diminue du côté haute tension (conducteur) à la masse. Cependant, la présence des arborescences d'eau dans la zone d'isolation affecte le champ électrique, comme illustré sur la figure IV.6 donnant l'évolution du champ électrique le long de l'axe x de l'isolation de câble en l'absence de la charge d'espace. Cet effet est plus important pour les arborescences d'eau qui se développent à partir de la couche semi-conductrice intérieure (coté conducteur). Pour chaque arborescence d'eau, le champ électrique augmente jusqu'à atteindre son maximum puis diminue vers sa valeur minimale similaire au cas d'une isolation saine. La valeur maximale considérée est 3.5kV/mm pour l'arborescence w_1 et 1.85kV/mm pour l'arborescence w_2 . En effet, les arborescences individuelles modifient la distribution du champ électrique seulement dans les régions où elles se trouvent. Leur influence est négligeable dans le reste du domaine (la partie saine de l'isolation).

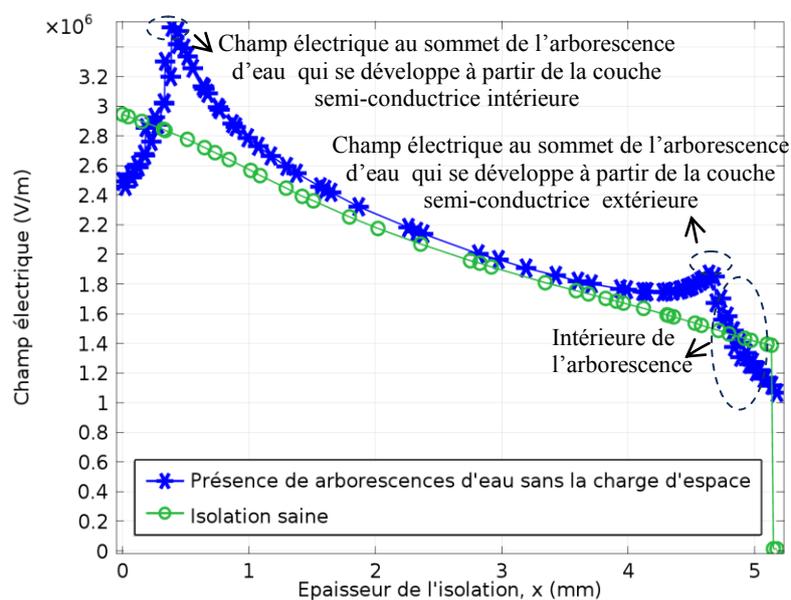


Fig. IV.6 champ électrique le long de l'axe x dans l'isolation de câble en présence d'arborescences d'eau sans la charge d'espace.

IV.3.2.1 Influence du type d'arborescence sur la distribution du champ électrique

La figure IV.7 représente la distribution du champ dans les deux cas d'une arborescence individuelle et continue. Les plus grandes valeurs de champ sont obtenues dans le cas d'arborescences individuelles. Ceci est dû au faible volume des arborescences d'eau dans ce cas. Dans le cas des arborescences continues, le champ augmente le long de la région affectée de l'isolation à une valeur maximale, mais sans revenir à la valeur initiale par rapport au cas d'une isolation saine.

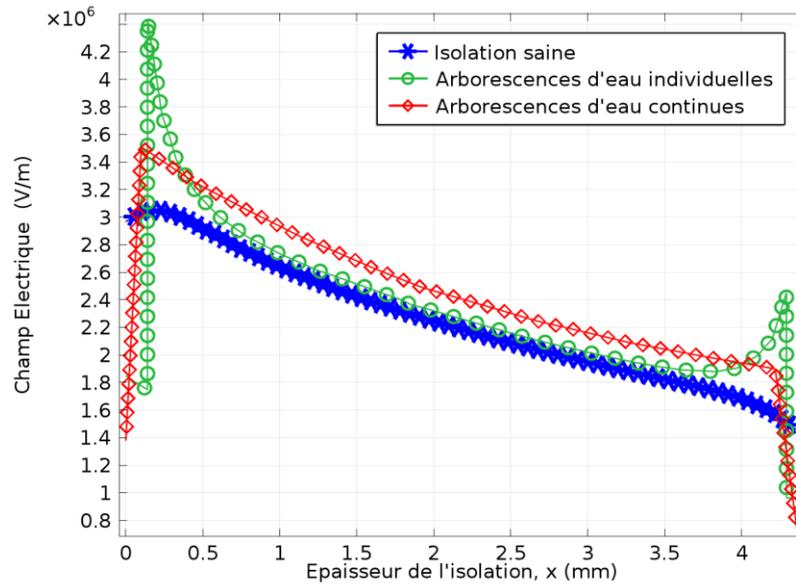


Fig. IV.7 Distribution du champ électrique dans l'isolation en présence d'arborescences d'eau individuelle et continue

IV.3.2.2 Influence de la distribution de la permittivité diélectrique (homogène ou inhomogène) à l'intérieur des arborescences

La figure IV.8 montre la répartition du champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur des arborescences d'eau en fonction des coordonnées x , sous différentes distributions de la permittivité (homogènes et inhomogènes). Il est important de noter que les coordonnées x varient entre 0 et 5,5 mm correspondant à l'épaisseur de l'isolation (Tableau IV.1).

Afin d'étudier l'influence de la non-homogénéité de la permittivité sur la distribution du champ électrique dans les arborescences d'eau, la région affectée de l'isolation du câble prend une structure multicouches telle que représentée sur la figure IV.2. Les deux distributions de cas inhomogènes (linéaire et parabolique) sont prises en compte dans cette partie de notre étude. Selon Kim et al [6], ces distributions sont définies par les équations (IV.4) et (IV.5), respectivement. En effet, on a supposé que la permittivité diminue de manière linéaire et parabolique de la racine au sommet des deux arborescences d'eau.

$$\epsilon_w(x) = \epsilon_{wmax} - 0.181x \quad 0 \leq x \leq l_w \quad (IV.4)$$

$$\epsilon_w(x) = \epsilon_{wmax} - 0.137x + 0.003x^2 \quad (IV.5)$$

où: $\epsilon_w(x)$ est la distribution de la permittivité à l'intérieur des arborescences d'eau par rapport à la coordonnée x , ϵ_{wmax} représente la valeur maximale de la permittivité à l'intérieur des arborescences d'eau et la longueur de ces dernières est $l_w = 0.35\text{mm}$.

Le cas de la distribution homogène de la permittivité a également été pris en compte. Les valeurs maximales de la permittivité et de la conductivité sont respectivement: $\epsilon_{wmax} = 4$ [8], $\sigma_w = 5 \times 10^{-2}\text{S/m}$ à l'intérieur des arborescences d'eau [9], $\sigma_d = 10^{-15}\text{S/m}$ à l'extérieure des arborescences d'eau [9] et $\epsilon_d = 2.3$.

De la figure IV.8, on constate que la répartition homogène de la permittivité à l'intérieure des arborescences induit une augmentation importante du champ électrique locale par rapport à la distribution inhomogène de la permittivité (linéaire ou parabolique).

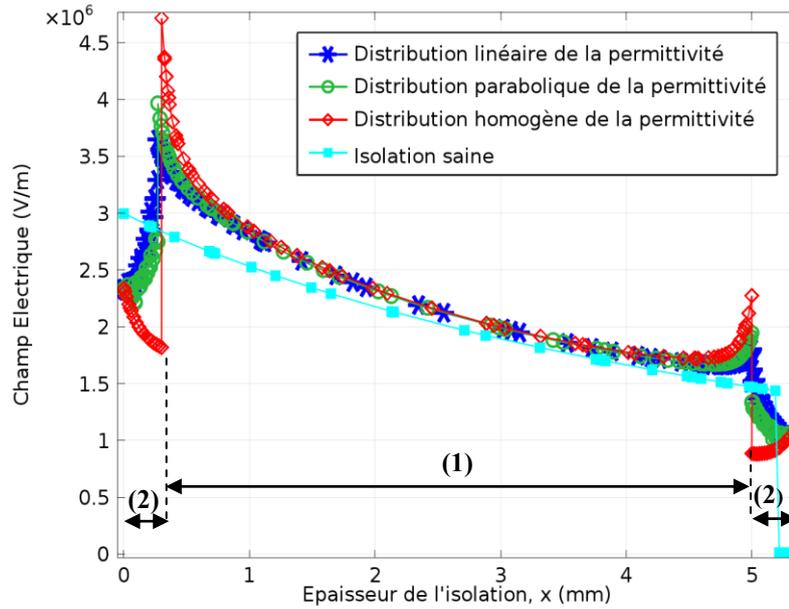


Fig. IV.8 Distribution du champ électrique (1) à l'extérieur de l'arborescence (2) à l'intérieur de l'arborescence avec une permittivity homogène et inhomogène, la longueur de l'arborescence d'eau est de 0.35mm.

IV.3.2.3 Effet de la forme géométrique des arborescences d'eau sur la distribution du champ électrique

Habituellement, les formes géométriques des arborescences d'eau sont elliptiques [5], semi-elliptique [4, 10, 11], sphériques [9, 12] ou semi-sphérique [2, 13]. Pour la forme elliptique, Chen et al [5] ont calculé le champ électrique à l'intérieur et à l'extérieur de l'arborescence. Le champ électrique maximal E_{max} a été obtenu à l'extrémité de l'arborescence, alors que le champ minimum E_{min} a été trouvé à l'intérieur de l'arborescence. Chen et al ont défini l'ellipticité de l'arborescence d'eau comme suit:

$$e = (1 - b^2/a^2)^{\frac{1}{2}} \tag{IV.6}$$

où e est l'ellipticité de l'arborescence, a et b sont les axes mineur et majeur de l'arborescence d'eau de forme elliptique.

Le champ électrique minimum obtenu en prenant $\beta = \pi/2$ (Fig. IV.2) est donnée par:

$$E_{min} = \frac{1}{1 + \frac{(\epsilon_w/\epsilon_d - 1)}{k_f}} E_0 \tag{IV.7}$$

avec E_0 est le champ électrique appliqué et k_f est une constante dépendant de l'ellipticité définie comme suit:

$$E_0(R) = \frac{V_0(R)}{R \ln(R_1/R_2)} \tag{IV.8}$$

$$k_f = \frac{1}{\left(\ln\left(\frac{1+e}{1-e}\right) - 2e\right) \frac{1-e^2}{2e^3}} \tag{IV.9}$$

V_0 la tension appliquée et $R_1 \leq R \leq R_2$; R_1 and R_2 sont respectivement les rayons intérieur et extérieur de l'isolation. Le champ électrique maximum pour $\beta = 0$ (Fig. IV.2) s'exprime par :

$$E_{\max} = \frac{(\epsilon_w/\epsilon_d)}{1 + (\epsilon_w/\epsilon_d - 1)/k_f} E_0 \tag{IV.10}$$

Le facteur d'amplification est défini comme (E_{\max}/E_0) et donné par:

$$k_{\text{amp}} = (E_{\max}/E_0) = \frac{(\epsilon_w/\epsilon_d)}{1 + (\epsilon_w/\epsilon_d - 1)/k_f} \tag{IV.11}$$

La figure IV.9 illustre l'évolution de facteur d'amplification du champ électrique par rapport à la variation du rapport b/a , pour différentes permittivités à l'intérieur de l'arborescence. En se référant aux données de recherches antérieures [14, 17], les trois valeurs maximales de la permittivité relative à la base des arborescences ont été considérées, à savoir 4, 6,6 et 9,9. De telles valeurs correspondent évidemment à une teneur en eau plus élevée de l'arborescence [13]. La distribution de la permittivité choisie est linéaire donnée par l'équation (IV.4).

La figure IV.9 montre que le facteur d'amplification augmente légèrement (5%) lorsque b/a augmente de 0,2 (forme elliptique) à 1 (forme sphérique). La valeur maximale de ce facteur d'amplification est obtenue pour $b/a = 1$ ($b = a$) correspondant à la forme sphérique. En effet, le champ électrique à l'extrémité de l'arborescence d'eau de forme sphérique est supérieur au champ trouvé dans une arborescence de forme elliptique. En outre, cette figure montre que, pour les mêmes coordonnées x , le champ électrique augmente proportionnellement avec la permittivité de l'arborescence. Pour la forme sphérique ($b=a$), le champ électrique augmente de 7% (respectivement 10%) lorsque la permittivité augmente dans la gamme de [4, 6,6] (respectivement 10% [6,6, 9,9]).

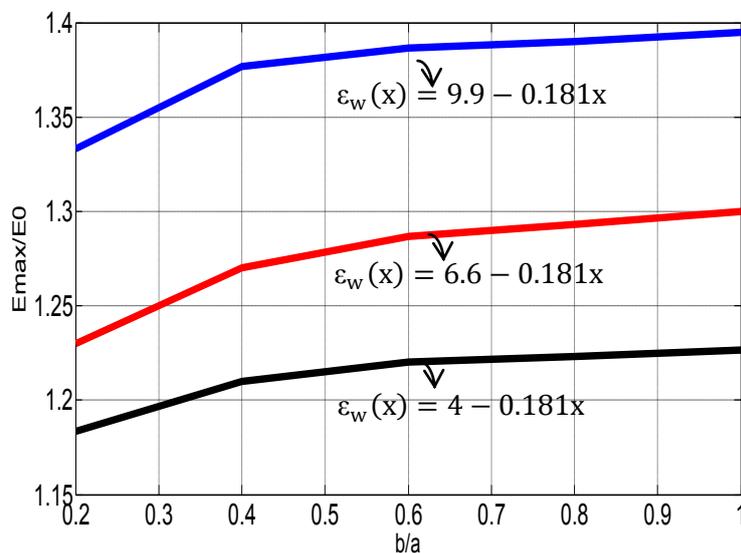


Fig. IV.9 Variation de facteur d'amplification (E_{\max}/E_0) en fonction de rapport (b/a) pour différentes valeurs de permittivité de l'arborescence.

IV.3.2.4 Influence de la longueur de l'arborescence d'eau

La figure IV.10 illustre le champ électrique le long des coordonnées x pour différentes longueurs des arborescences d'eau. Selon [2, 13, 14], les valeurs choisies pour ces longueurs sont 0.35 mm, 0.5 mm et 0.7 mm. La permittivité de l'arborescence est $\epsilon_{w\max} = 4$. Pour une coordonnée x donnée, le champ électrique augmente avec la longueur des arborescences. La

valeur maximale du champ électrique est de 4 kV/mm. Elle est obtenue avec la longueur de 0,7 mm.

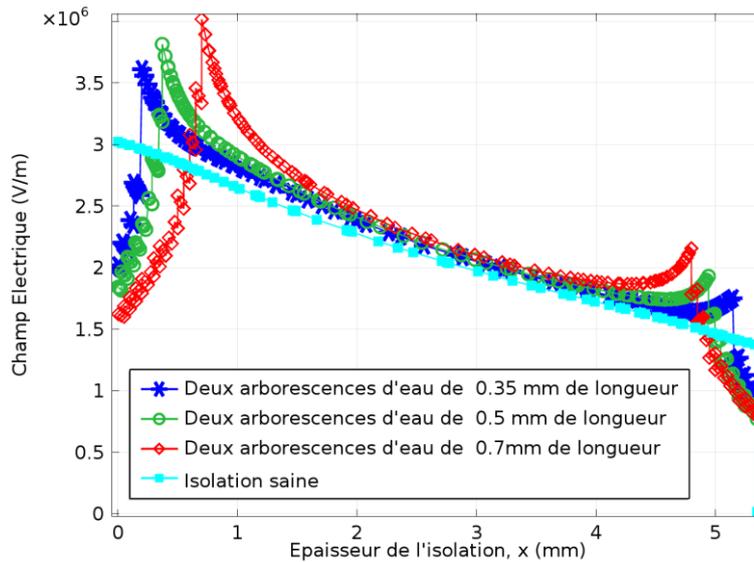


Fig. IV.10 Variation du champ électrique le long des coordonnées x pour différentes longueurs des deux arborescences.

IV.3.2.5 Champ électrique au niveau des interfaces physiques en l'absence de la charge d'espace:

Les interfaces physiques jouent un rôle important dans l'intensification du champ électrique. Avec l'existence des arborescences d'eau (w_1 ou w_2), deux interfaces sont générées et présentées dans la figure IV.5 (la charge d'espace étant inexistante). La première interface est entre trois milieux à savoir : la région affectée, la région saine et la couche semi-conductrice. La deuxième est entre le sommet de l'arborescence d'eau et l'isolation. D'autre part, la figure IV.11 montre l'évolution du champ électrique par rapport à l'axe des ordonnées y (en l'absence de charge d'espace) dans les différentes régions, à savoir à proximité de l'arborescence w_1 , au niveau du semi-conducteur intérieur, à proximité de l'arborescence w_2 , au niveau du semi-conducteur extérieur et enfin, au milieu de l'isolation. Il est intéressant de noter que, les deux interfaces sont le siège d'un champ électrique important.

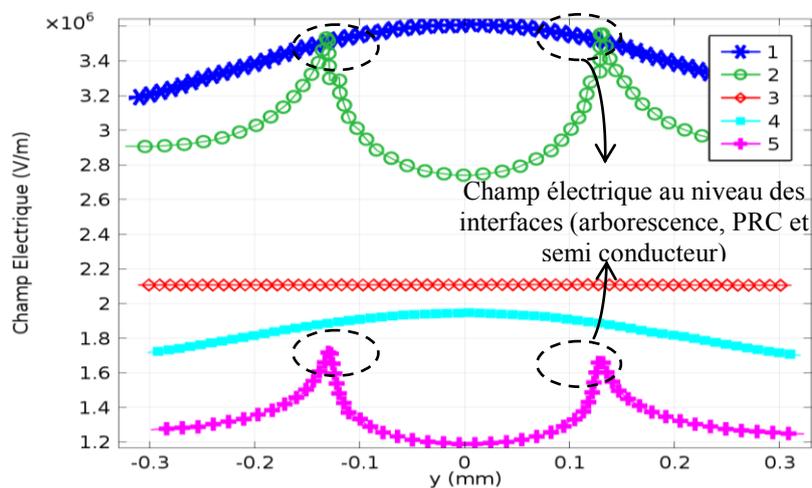


Fig. IV.11 Champ électrique en l'absence de la charge d'espace, (1) à proximité de l'arborescence d'eau w_1 , (2) au niveau du semi-conducteur intérieur, (3) au milieu de l'isolation, (4) à proximité de l'arborescence d'eau w_2 , (5) au niveau du semi-conducteur extérieur.

IV.3.3 Distribution du champ électrique en présence de la charge d'espace

Dans la présente étude, nous avons adopté la même distribution de densité de la charge d'espace autour des arborescences d'eau rapportée dans [2] et donnée par:

$$\rho_V(x) = \rho_{V0} (as^3 + ds^2 + e) \tag{IV.12}$$

ρ_V est la densité de la charge d'espace sur l'axe des coordonnées x et qui varie selon la loi polynômiale (38).

ρ_{V0} représente les valeurs de la densité la charge d'espace aux points situés à la base de l'arborescence et a , d et e sont des constantes.

où: $\rho_{V0} = 2.68 \rho_{Va}$; $\rho_{Va} \in [2, 5.6]C/m^3$, $s = x/l_c$; ($l_{c1} = l_{c2}$) est l'épaisseur des couches de charge d'espace, $a = 0.27m^{-3}$, $d = -1.27m^{-2}$, $e = 1$ [18]. Dans notre cas, nous avons varié l_c de 0.05 à 0.35 mm.

ρ_{Va} est la densité de charge moyenne délimitée par le nombre de couches de la charge d'espace. Les valeurs du ρ_{Va} ont été choisies dans la gamme $[2, 5.6]C/m^3$ (valeurs maximales déterminées expérimentalement dans un échantillon d'isolation d'un câble non vieilli) [2, 18].

IV.3.3.1 Influence de la polarité de la charge sur la distribution du champ électrique

Dans cette section, nous allons étudier le champ électrique dans le câble d'isolation sous différentes densités ($\rho_{va} \in [2, 5,6] C/m^3$ qui implique que $\rho_{V0} \in [5,36, 15] C/m^3$) et quatre configurations des polarités de la charge d'espace autour des arborescences d'eau. De telles configurations sont présentées dans le Tableau IV.

Tableau IV.3 : Différentes configurations des polarités de la charge d'espace aux sommets des arborescences w_1 et w_2 .

Configuration Polarité de la charge d'espace aux sommets de	1	2	3	4
w_1	-	+	-	+
w_2	-	+	+	-

IV.3.3.1.1 Couches de la charge d'espace (l_{c1} et l_{c2}) avec la même polarité

Dans le cas de charge d'espace de polarité négative (configuration 1), le champ électrique a été calculé en fonction des coordonnées y pour les arborescences de longueur $l_w=0.35mm$, d'épaisseur de la couche de la charge d'espace $l_{c1} = l_{c2} = 0.05mm$ et de densité de charge $\rho_{va} = -2C/m^3$. La figure IV.12 illustre l'évolution du champ électrique par rapport aux coordonnées y . A cause de l'accumulation de la charge d'espace, le champ électrique (dont la valeur maximale est de 14,3 kV/mm) est accentué sur la surface semi-conductrice interne en particulier aux interfaces. En effet, la densité de charge modifie la répartition du champ électrique; le champ électrique augmente au niveau du semi-conducteur interne, au front de

l'arborescence w_1 et au niveau de la couche de la charge d'espace l_{c2} . Cependant, il diminue au niveau de la couche de la charge d'espace l_{c1} , au front de l'arborescence w_2 et sur la surface semi-conductrice externe.

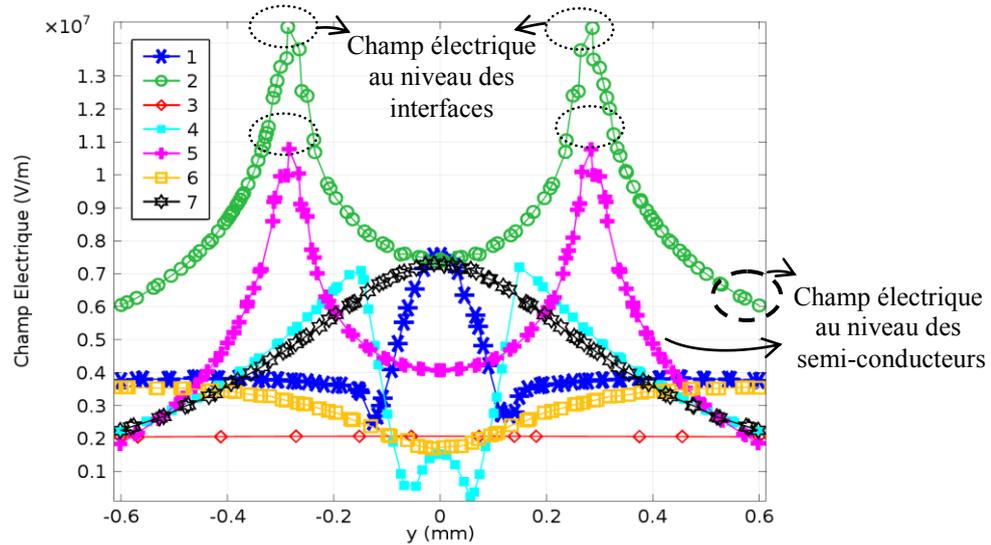


Fig. IV.12 Champ électrique : (1) au sommet de w_1 , (2) au niveau du semiconducteur intérieur, (3) au milieu de l'isolation, (4) au sommet de w_2 , (5) au niveau du semiconducteur extérieur, (6) au niveau de la couche de la charge d'espace intérieure l_{c1} , (7) au niveau de la couche de la charge d'espace extérieure l_{c2} , pour $l_c = 0.05\text{mm}$, $\rho_{va} = -2\text{C/m}^3$, $\epsilon_{w\text{max}} = 4$, $V_0 = 12\text{ kV}$.

Le champ électrique est calculé le long de l'axe des coordonnées y , dans le cas de la charge d'espace de polarité positive. Les résultats correspondants sont illustrés dans la figure IV.13. Le champ électrique est accentué au niveau du semi-conducteur externe, au sommet de l'arborescence w_2 et sur la couche de la charge d'espace l_{c1} . La valeur maximale de 12.70 kV/mm est obtenue au niveau des interfaces physiques. Cependant, le champ électrique est faible au niveau de la couche semi-conductrice intérieure, sur la couche de charge l_{c2} et au sommet de l'arborescence (w_1).

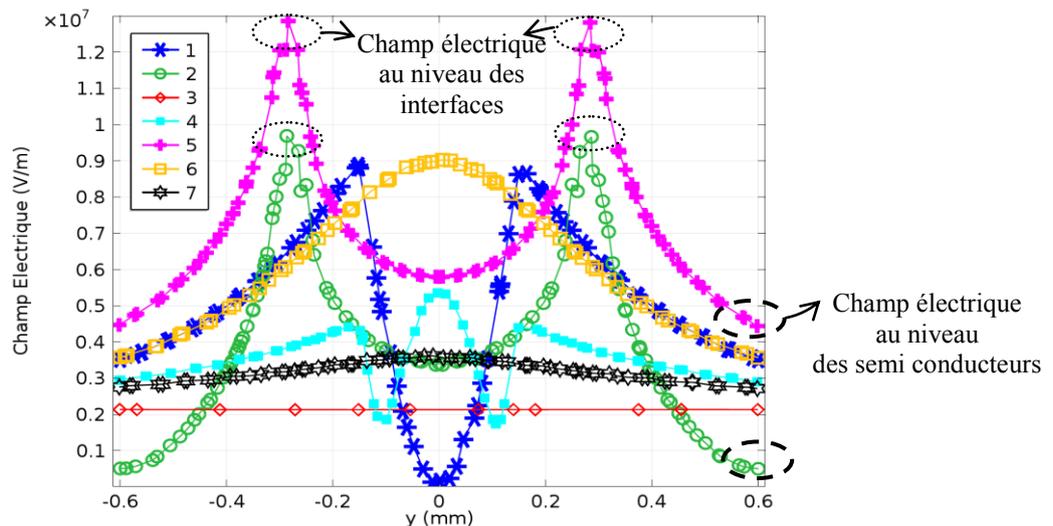


Fig. IV.13 Champ électrique : (1) au sommet de w_1 , (2) au niveau du semiconducteur intérieur, (3) au milieu de l'isolation, (4) au sommet de w_2 , (5) au niveau du semiconducteur extérieur, (6) au niveau de la couche de la charge d'espace intérieure l_{c1} , (7) au niveau de la couche de la charge d'espace extérieure l_{c2} , pour $l_c = 0.05\text{mm}$, $\rho_{va} = 2\text{C/m}^3$, $\epsilon_{w\text{max}} = 4$, $V_0 = 12\text{ kV}$.

IV.3.3.1.2 Couches de la charge d'espace (l_{c1} et l_{c2}) avec des polarités opposées

Dans cette partie, les polarités de la charge d'espace accumulées au niveau des arborescences d'eau w_1 et w_2 sont différentes (configurations 3 et 4). La figure IV.14 (respectivement IV.15) illustrent la variation du champ électrique le long des coordonnées y lorsque la charge d'espace au niveau de l'arborescence d'eau w_1 prend une valeur négative (respectivement positive). Selon la figure IV.14, le champ électrique est plus élevé au niveau des deux couches semi-conductrices et au niveau des deux arborescences d'eau. Cependant, le champ électrique est faible au niveau des deux couches de la charge d'espace (l_{c1} et l_{c2}). Cela pourrait expliquer la raison de la diminution considérable du champ dans le volume de la partie saine de l'isolation.

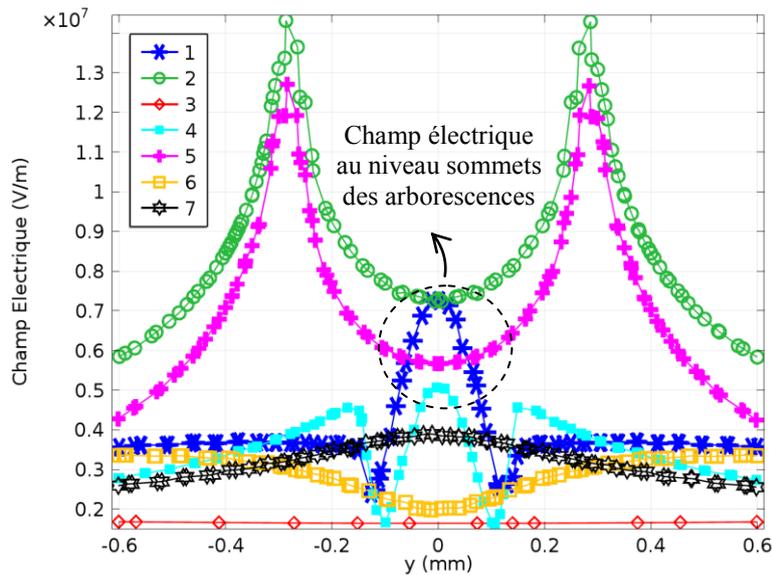


Fig. IV.14 Champ électrique : (1) à proximité de w_1 , (2) au niveau du semiconducteur interieur, (3) au milieu de l'isolation, (4) à proximité de w_2 , (5) au niveau du semiconducteur extérieur, (6) au niveau de la couche de la charge d'espace interieure l_{c1} , (7) au niveau de la couche de la charge d'espace extérieure l_{c2} , pour $l_c = 0.05\text{mm}$, $\rho_{va} = 2\text{C/m}^3$, configuration négative- positive, $\epsilon_{w\text{max}} = 4$, $V_0 = 12\text{ kV}$

L'accumulation de la charge d'espace dans la configuration 3 (polarités négative-positive) induit une augmentation du champ électrique global E_{wj} (donné par la somme du champ appliqué E_0 créé par la tension appliquée V_0 et le champ E_{cj} créé par le charge d'espace) aux extrémités des arborescences d'eau w_1 et w_2 . Le champ total peut être écrit comme suit:

$$E_{wj} = k_{\text{amp}} E_0 + E_{cj} ; j=1, 2 \tag{IV. 13}$$

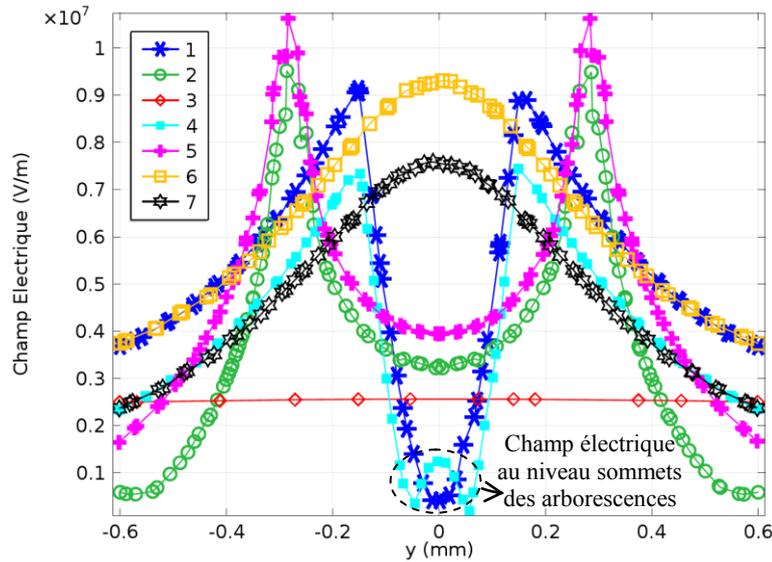
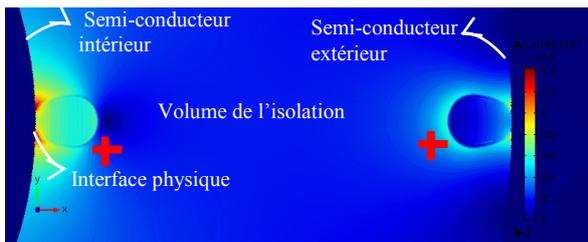


Fig. IV.15 Champ électrique : (1) à proximité de w_1 , (2) au niveau du semiconducteur intérieur, (3) au milieu de l'isolation, (4) à proximité de w_2 , (5) au niveau du semiconducteur extérieur, (6) au niveau de la couche de la charge d'espace intérieure l_{c1} , (7) au niveau de la couche de la charge d'espace extérieure l_{c2} , pour $l_c = 0.05\text{mm}$, $\rho_{va} = 2\text{C/m}^3$, configuration positive- négative, $\epsilon_{w\text{max}} = 4$, $V_0 = 12\text{ kV}$.

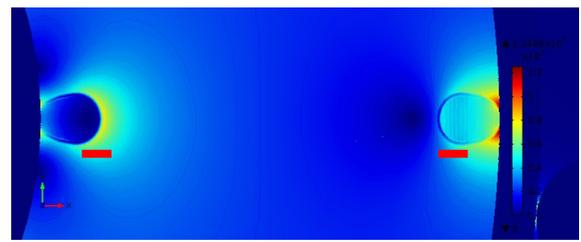
Dans le cas d'accumulation de la charge d'espace positive-négative, représentée par la figure IV.15, le champ électrique est faible au niveau des deux semi-conducteurs et des deux arborescences. D'autre part, le champ électrique est plus accentué au niveau des couches de la charge d'espace (l_{c1} et l_{c2}) et dans la partie saine de l'isolation. En effet, une telle configuration de la charge d'espace conduit à la diminution du champ électrique global aux sommets des arborescences d'eau w_1 et w_2 . Ce champ électrique peut être donné par l'équation (IV. 14):

$$E_{wj} = k_{\text{amp}} E_0 - E_{cj} ; j=1, 2 \tag{IV. 14}$$

✓ **Représentation de la répartition du champ électrique pour les différentes configurations de polarité de la charge d'espace**



Configuration (1): charge d'espace avec une polarité positive



Configuration (2): charge d'espace avec une polarité négative



Configuration (3): charge d'espace avec des polarités négative-positive



Configuration (4): charge d'espace avec des polarités positive-négative

Fig. IV.16 Répartition du champ électrique pour les différentes configurations de polarité de la charge d'espace

La figure IV.16 représente les quatre configurations de polarités de la charge d'espace. les 3^{ème} et 4^{ème} configurations représentent les deux cas critiques.

Dans la 3^{ème} configuration, le champ se concentre au niveau de deux couches semi-conductrices, spécialement aux interfaces physiques (représenté par une couleur rouge). Par conséquent, le champ diminue d'une façon considérable dans le volume de l'isolation.

Dans la 4^{ème} configuration, le champ se concentre au niveau des sommets des arborescences, spécialement aux niveaux des deux couches de la charge d'espace. Par conséquent, le champ augmente d'une façon considérable dans le volume de l'isolation (couleur bleu claire).

Le 3^{ème} cas de configuration de polarités de la charge d'espace peut engendrer une arborescence électrique à partir des interfaces physiques. Par contre le 4^{ème} cas de configuration peut donner naissance à une arborescence électrique à partir des sommets des arborescences d'eau.

IV.3.3.2 Effet de la densité de la charge d'espace

La figure IV.17 illustre l'influence de la densité de la charge d'espace sur la valeur maximale du champ électrique au niveau des couches semi-conductrices et au niveau des arborescences d'eau, pour la configuration de polarité négative-négative. Ce choix a été fait parce que la charge négative est plus influente que la charge positive (donne des valeurs de champ électrique plus importantes) [14]. La densité de la charge d'espace ρ_V varie de 5,36 ($\rho_{Va} = 2 \text{ C/m}^3$) à 15 C/m^3 ($\rho_{Va} = 5,6 \text{ C/m}^3$). Le champ électrique au niveau des deux couches semi-conductrices et aux sommets des arborescences augmente avec la densité de la charge d'espace. En outre, le champ électrique au niveau des interfaces est le plus élevé. Le même résultat a été trouvé par Stancu et al [13] lié au champ au niveau de la couche semi-conductrice intérieure.

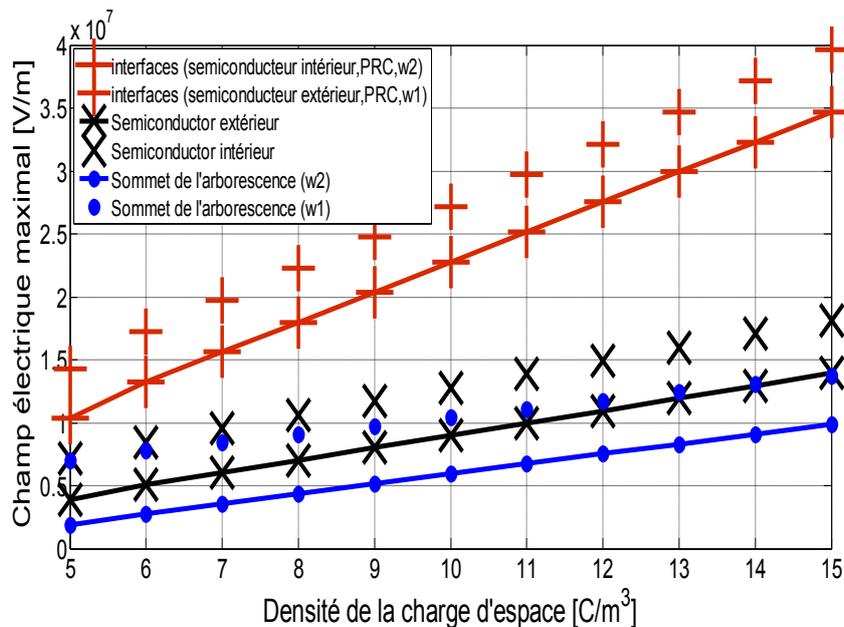


Fig. IV.17 Variation des valeurs maximales du champ électrique en fonction de la densité de la charge d'espace pour la configuration de polarités négative-négative, $\epsilon_{wmax} = 4$, $V_0 = 12 \text{ kV}$.

IV.3.3.3 Variation du champ électrique maximal avec l'épaisseur des couches de la charge d'espace au niveau des interfaces physiques

La figure IV.18 illustre la valeur maximale du champ électrique en fonction de l'épaisseur de la couche de la charge d'espace l_c accumulée sur les deux arborescences w_1 et w_2 . L'augmentation de l'épaisseur de la charge d'espace de 0 à 0,35 mm induit une augmentation importante du champ électrique sur les interfaces physiques internes pour la polarité négative de la charge d'espace ($\rho_{va} = -2C/m^3$). La valeur du champ électrique maximale près de ces interfaces varie de 14,5 kV/mm (pour $l_c = 0,05$ mm) à 34,7 kV / mm (pour $l_c = 0,35$ mm). Le même résultat sur l'influence de l'épaisseur de la couche de la charge d'espace sur le champ électrique au niveau de la couche semi-conductrice interne a été obtenu par Stancu et al [13].

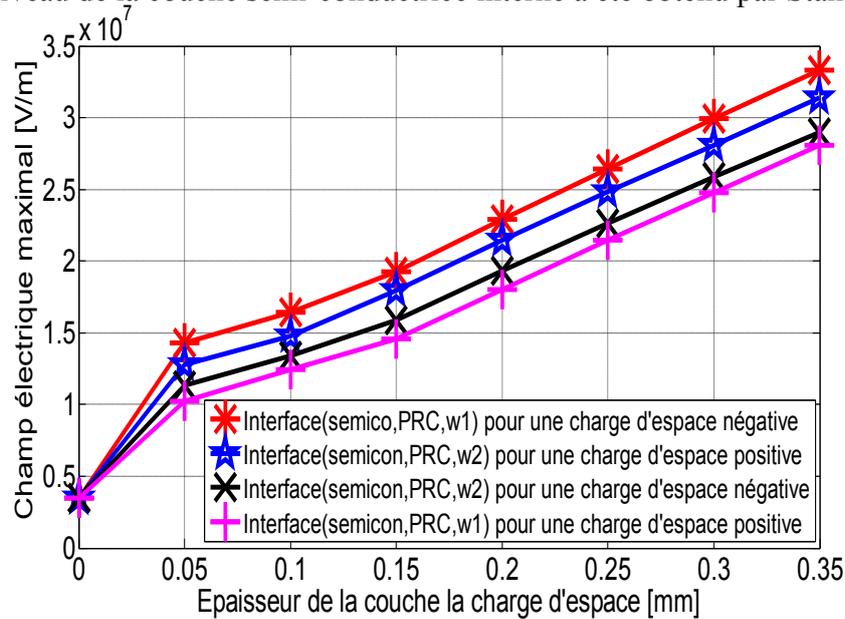


Fig. IV.18 Variation des valeurs maximales du champ électrique en fonction de l'épaisseur des couches de la charge d'espace pour $\rho_{va} = 2C/m^3$, $\epsilon_{wmax} = 4$, $V_0 = 12$ kV.

Les récapitulatifs des résultats du champ électrique obtenu pour les quatre configurations de polarités (déjà présentées dans le tableau IV.3) de la charge d'espace au sommet des arborescences d'eau sont donnés dans le tableau IV.4. Pour chaque configuration, la valeur du facteur d'amplification k_j de champ électrique local ($j = 1, 2$) correspond au rapport entre la valeur maximale de E_{maxj} ($j = 1, 2$) (obtenue en présence d'arborescences d'eau et de la charge d'espace) sur la valeur de E_0 en R_1 ou R_2 dans l'isolation saine. (R_1 et R_2 étant respectivement, les rayons intérieurs et extérieur de l'isolation).

Tableau IV.4: Champ électrique maximum aux interfaces et facteur d'amplification ($k_1 = E_{max1}/E_0$, $k_2 = E_{max2}/E_0$) en présence de la charge d'espace ($l_c = 0.05$ mm, $\rho_{va} = 2C/m^3$).

ρ_{v2} C/m ³	ρ_{v2} C/m ³	E_0 kV/mm	E_{max1} (w_1) kV/mm	E_{max2} (w_2) kV/mm	k_1	k_2
-2	-2	3.0	14.3	-	4.7	-
		1.4	-	10.8	-	7.4
+2	+2	3.0	9.7	-	3.2	-
		1.4	-	12.7	-	8.8
-2	+2	3.0	14.5	-	4.7	-
		1.4	-	12.9	-	8.9
+2	-2	3.0	9.5	-	3.1	-
		1.4	-	10.6	-	7.3

A partir de ce tableau, les valeurs les plus élevées du facteur d'amplification du champ électrique $k_1= 4,7$ et $k_2= 8,9$ ont été obtenues dans le cas des polarités négative-positive de l_{c1} et l_{c2} respectivement. Une telle configuration de polarité est alors considérée comme le cas de polarité le plus dangereux pour l'isolation du câble. La figure IV.18 représente la distribution du champ électrique pour $l_c=0,35$ mm et $\rho_{va} = 2C/m^3$, une telle configuration de polarité confirme l'augmentation de champ électrique au niveau des deux couches semi-conductrices. D'autre part, la concentration de champ électrique est accentuée au niveau des interfaces, cela est compatible avec la diminution du champ dans le volume de l'isolation (couleur bleu foncé dans l'isolation saine) (Fig. IV.19).

Selon l'équation (III. 21), l'intensification du champ électrique engendre une augmentation de la densité de courant au niveau des couches semi-conductrices. Cela pourrait provoquer un échauffement local et faciliter le processus de génération d'arborescences électriques conduisant à une défaillance prématurée. Ces observations ont déjà été faites par Hvidsten et al à travers leur étude expérimentale [19] dans laquelle l'initiation d'une arborescence électrique a été produite à partir de la couche semi-conductrice extérieure (nombre faible de cavités et de canaux correspondant à la faible teneur en eau); cette région est particulièrement vulnérable à l'initiation d'arborescences électriques.

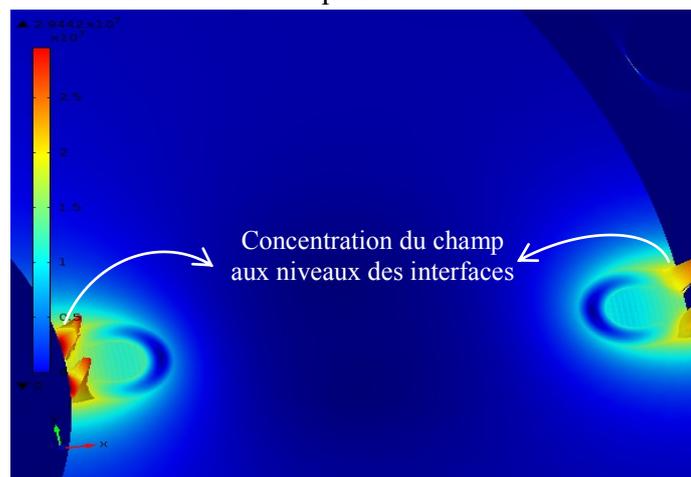


Fig. IV.19 Distribution du champ électrique pour la configuration de polarités négative-positive, pour $l_c = 0.35\text{mm}$ et $\rho_{va} = 2C/m^3$, $\epsilon_{w\max} = 4$, $V_0 = 12$ kV.

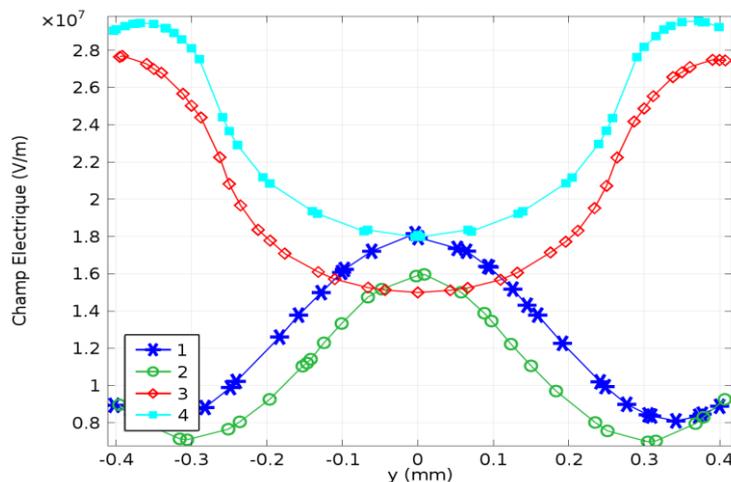


Fig. IV.20 Champ électrique : (1) au sommet de w_2 , (2) au sommet de w_1 , (3) au niveau du semiconducteur extérieur, (4) au niveau du semiconducteur intérieur, ($l_c = 0.30\text{mm}$, $\rho_{va} = 2C/m^3$)

Dans la figure IV.20, nous pouvons voir que la plus grande quantité de la charge d'espace de $\rho_{va} = 2C/m^3$ choisie, induit un champ électrique maximum de 28.5kV/mm, particulièrement, sur la couche semi conductrice intérieure (pour une polarité négative de la charge d'espace).

IV.3.4 Distribution du champ électrique à l'intérieur des arborescences d'eau sur l'axe y pour différents points d'abscisses x avec et sans la charge d'espace

Cette section traite la répartition du champ électrique à l'intérieur de l'arborescence w_1 . Les figures IV.22 et IV.22 présentent le module du champ électrique à l'intérieur de l'arborescence d'eau le long des coordonnées y aux différents points (dont les abscisses sont $x = 0, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3$ et $0,35$ mm), respectivement avec et sans charge d'espace.

En l'absence de la charge d'espace, le champ électrique augmente à partir de la racine au sommet de l'arborescence d'eau (Fig. IV.21). On notera que les abscisses $x = 0$ et $x = 0,35$ mm correspondent respectivement au semi-conducteur interne et à l'extrémité de l'arborescence w_1 . Les autres abscisses (points) sont à l'intérieur de l'arborescence.

La charge d'espace associée à l'arborescence d'eau affecte la distribution du champ électrique. La figure IV.22 (obtenue pour une configuration de polarité négative-positive avec l'épaisseur de la couche de la charge de 0,35 mm et $\rho_{va} = 2 C/m^3$), le champ électrique diminue à partir de la racine au sommet de l'arborescence d'eau. Ce champ électrique est relativement faible à l'intérieur de l'arborescence d'une valeur de 12 kV/mm et important à l'extérieur ; la valeur maximale est de 28.5 kV/mm.

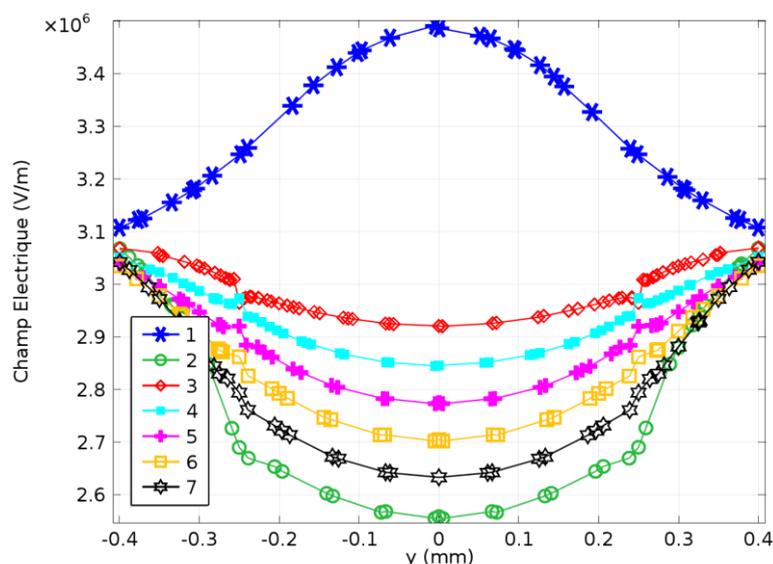


Fig. IV.21 Champ électrique le long de l'axe y à l'intérieur de w_1 sans la charge d'espace ,aux différents points de l'axe x: (1) $x=0.35$ mm (au sommet de w_1), (2) $x=0$ (au niveau de semiconducteur interne), (3) $x=0.1$ mm, (4) $x=0.15$ mm, (5) $x=0.2$ mm, (6), $x=0.25$ mm and (7) $x=0.3$ mm, pour $\epsilon_{wmax} = 4, V_0 = 12$ kV.

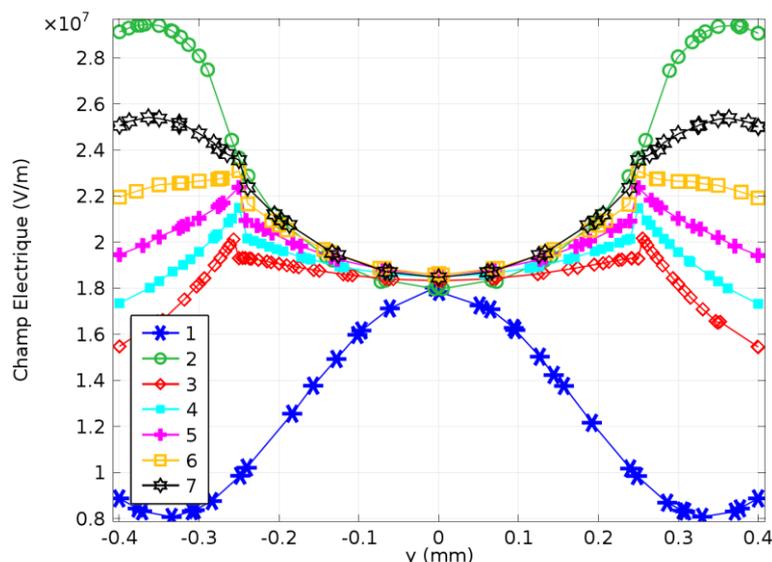


Fig. IV.22 champ électrique le long de l’axe y à l’intérieur de w_1 pour les différents points sur l’axe x: (1) $x=0.35\text{mm}$ (au sommet de w_1), (2) $x=0$ (au niveau de semiconducteur interieur), (3) $x=0.1\text{mm}$, (4) $x=0.15\text{mm}$, (5) $x=0.2\text{mm}$, (6), $x=0.25\text{mm}$ and (7) $x=0.3\text{mm}$, pour $l_{c1} = 0.35\text{mm}$, $\rho_{va} = 2\text{C/m}^3$, configuration négative-positive), $\epsilon_{w\text{max}} = 4$, $V_0 = 12\text{ kV}$.

IV.3.5 Impact de la nature des microcavités formant l’arborescence d’eau sur la distribution du champ électrique

La teneur en eau absorbée par l’isolation en polyéthylène réticulé lors de processus de fabrication est estimée par Tanaka et al [20] autour de 2000 à 3000 ppm. L’eau occupe 20% des microcavités existantes dans l’isolation ce qui donne une apparence d’une bague opaque dans la section du câble [20]. Toutefois, l’état de la distribution de ces cavités à l’intérieure des arborescences d’eau est important. Helleso et al [21] ont confirmé que la distribution des microcavités dans l’arborescence d’eau est radiale et ces dernières se concentrent au milieu de l’arborescence.

Dans cette section, nous étudions l’effet de la nature (eau ou air) des microcavités et les propriétés (permittivité) des nano-canaux formant les arborescences d’eau sur la distribution du champ électrique dans l’arborescence.

Ces cavités d’eau ou d’air de forme elliptique sont positionnées à l’intérieure de l’arborescence d’eau w_2 dans la direction radiale (le long de l’axe x) et séparées par la même distance ($x = (0,3) \mu\text{m}$). Nous avons pris en considération deux différentes permittivités $\epsilon_{rc}=10$, et $\epsilon_{rc}=16$ des nano-canaux reliant ses cavités.

La figure IV.23, illustre l’évolution du champ le long de l’axe x, pour les différentes configurations : chaîne reliant les cavités d’eau, chaîne reliant les cavités d’air et chaîne reliant les cavités d’eau entrent elles avec des nano-canaux.

La concentration du champ électrique est accentuée au niveau des cavités d’eau (couleur rouge au niveau des extrémités de la chaîne reliant ces dernières).

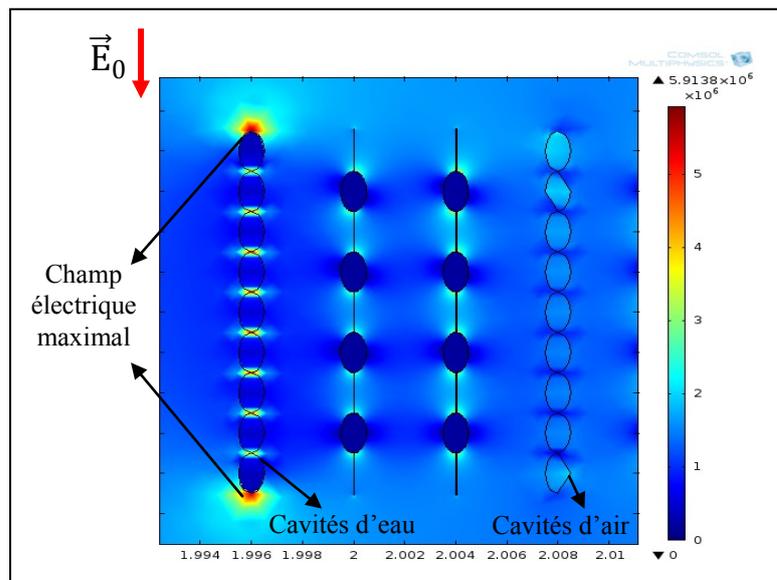


Fig. IV.23 Champ électrique le long de la distribution radiale de l'ensemble des cavités

En raison de la faible valeur de la permittivité diélectrique de l'air, le champ est plus important à l'intérieur des cavités d'air et faible à l'extérieur. La valeur maximale est de 1.6 kV/mm. Par ailleurs, le champ électrique est intense à l'extérieure des cavités d'eau et faible à l'intérieure de ces dernières, car la constante diélectrique d'une valeur de 80 est sensiblement plus grande que celle de l'isolation en polymère. La valeur maximale est de 7,6 kV/mm (figure IV.23). En effet, le champ est important au niveau des extrémités de la chaîne reliant les cavités d'eau.

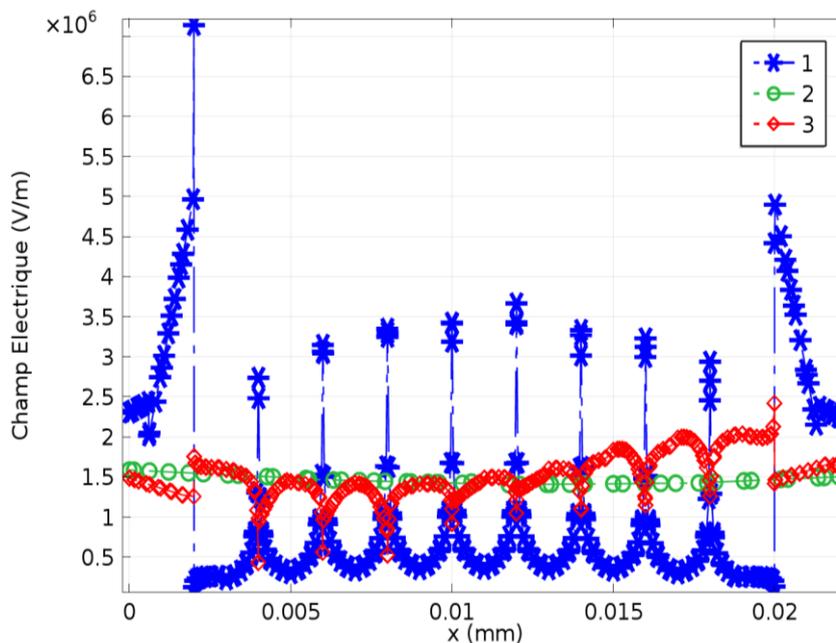


Fig. IV.24 Champ électrique le long de la distribution radiale de l'ensemble des cavités ;
(1) d'eau, (2) dans l'isolation saine, (3) d'air.

La figure IV.25, représente la distribution du champ dans la cavité à l'extrémité de la chaîne reliant les cavités d'eau et dans les nano-canaux pour deux différentes valeurs de la permittivité relative de ces derniers $\epsilon_{rc} = 10$, et $\epsilon_{rc} = 16$.

Le choix de la valeur de la permittivité des nano-canaux de 10 et de 16, augmente la valeur maximale du champ électrique de 2.7 kV/mm à une valeur de 3.5 kV/mm.

La valeur du champ électrique la plus élevée se trouve au niveau de la zone de percolation (courbures de forme elliptique des bulles d'eau). La valeur maximale s'élève à 7,6 kV/mm.

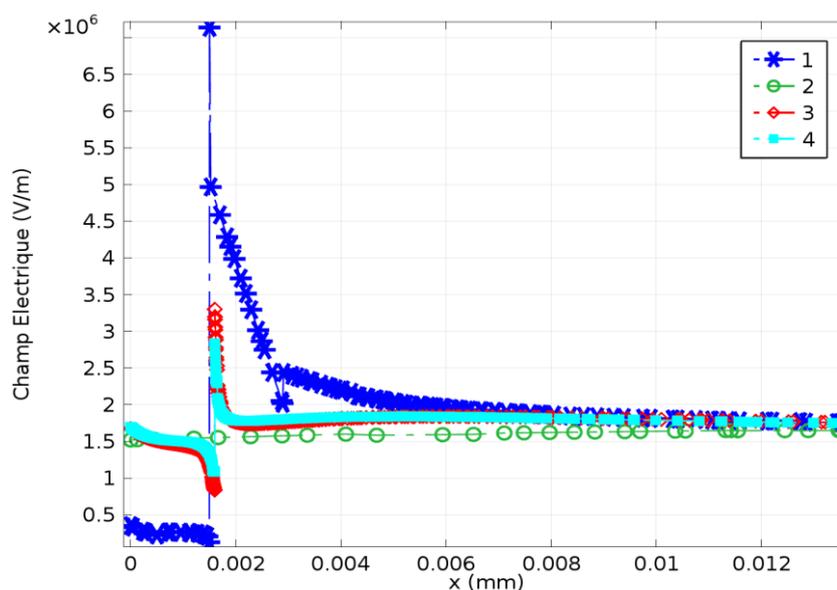


Fig. IV.25 Champ électrique dans : (1) la cavité à l'extrémité de la chaîne reliant les cavités d'eau, (2) l'isolation saine, (3) le nano-canal pour $\epsilon_{rc} = 10$, (4) le nano-canal pour $\epsilon_{rc} = 16$

Le champ électrique dans les différents cas de configurations : isolation saine, chaîne reliant les cavités d'eau, chaîne reliant les cavités d'air et chaîne reliant les cavités d'eau entrent elles avec des nano-canaux sont illustrés dans le tableau IV.5.

Tableau IV.5 : Champ dans les différentes configurations

Cavité	Valeur maximale du champ électrique (V/m)
Isolation saine	1.5×10^6
Cavité d'eau	7.6×10^6
Cavité d'air	1.6×10^6
Cavité avec canaux $\epsilon_{rc} = 10$	2.7×10^6
Cavité avec canaux $\epsilon_{rc} = 16$	3.5×10^6

IV.3.6 Effet de la dispersion des particules d'eau dans les cavités formées dans l'isolation sur l'atténuation de la propagation des arborescences d'eau

Dans le but d'étudier l'impact de la dispersion des particules d'eau à l'intérieure des arborescences d'eau sur la distribution du champ électrique, nous avons simulé les deux types d'arborescences représentés par la figure VI.26.

Les deux figures IV.26(a) et IV.26(b) représentent la morphologie des deux types d'arborescences qui peuvent être créées dans l'isolation selon la distribution des cavités d'eau [22].

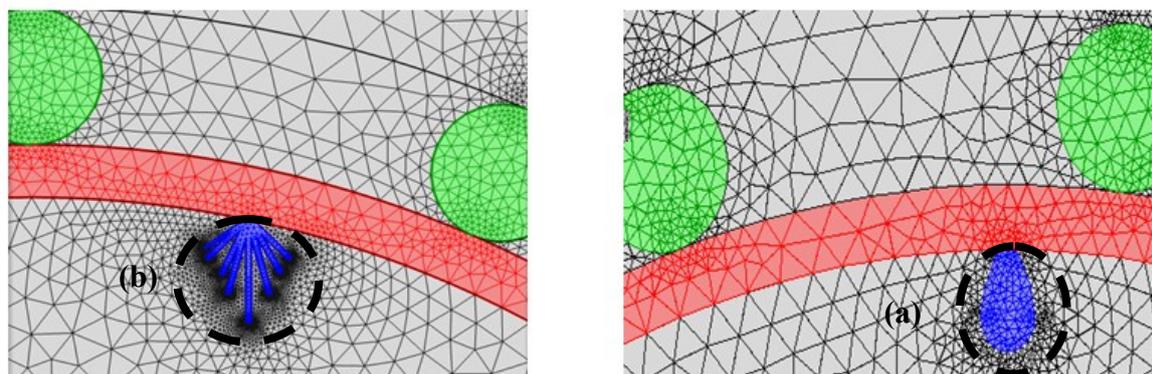


Fig. VI.26 Arborescences d'eau de forme : (a) diffuse (elle se forme en cas de présence des microcavités dispersées), (b) bouquet (elle se forme en cas de présence de faisceaux de microcavités hydrophiles alignés dans la direction radiale)

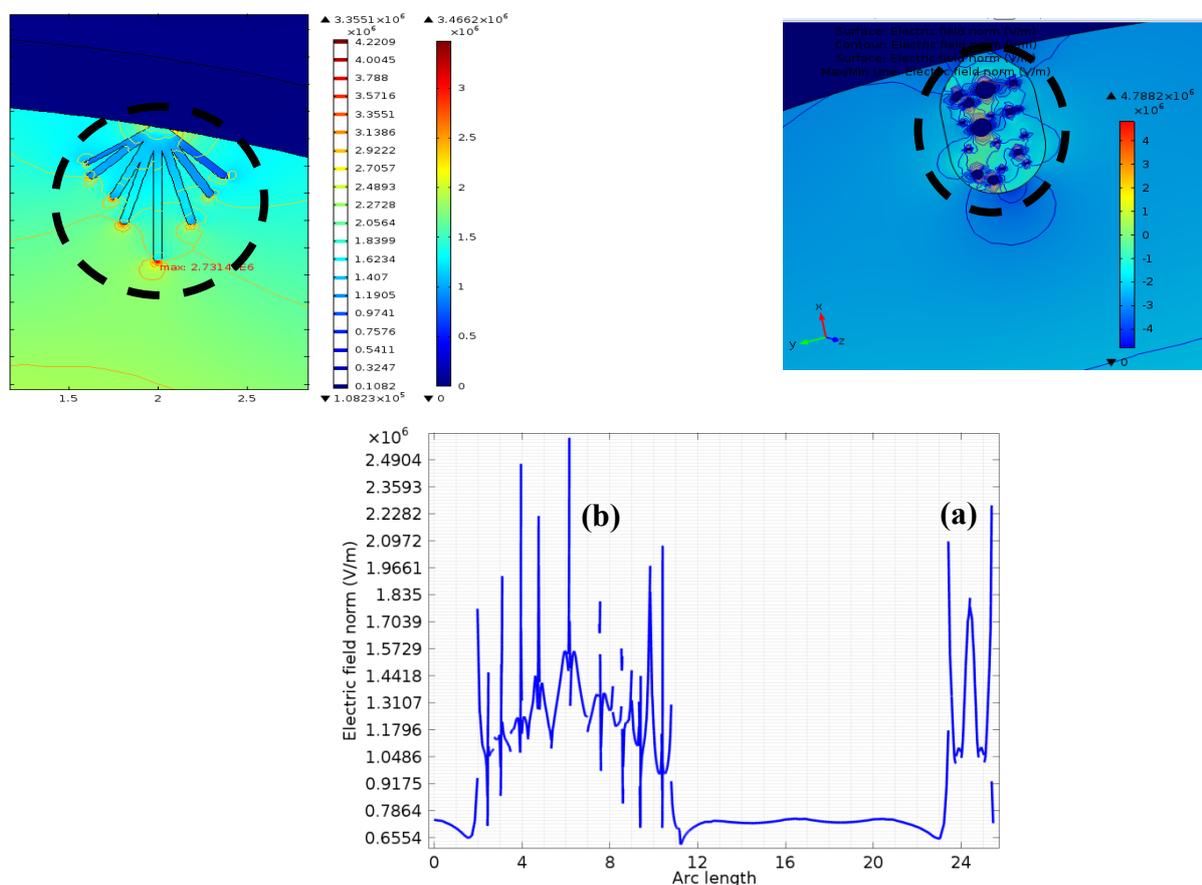


Fig. VI.27 Distribution du champ électrique dans : (a) Arboreescence de forme diffuse
(b) Arboreescences de forme bouquet

La figure VI.27 représente la distribution du champ dans les deux types d'arborescences : arborescence de forme diffuse et arborescence de forme bouquet. Le champ électrique est relativement plus uniforme dans le cas (a) et non uniforme (plutôt divergent) dans le deuxième cas (b). La figure VI.27(b) montre que le champ se concentre plutôt au niveau des sommets de la forme bouquet.

La dispersion des particules d'eau atténue la propagation de l'arborescence d'eau dans le volume. Le champ électrique local sera donc déterminé par la distribution des particules d'eau. En effet, la dispersion des faisceaux moléculaires hydrophiles dans l'isolation PRC

permet d'empêcher la condensation de l'eau dans les régions électro-oxydées voisines [23], de ce fait la réduction de la croissance des arborescences d'eau.

Pour l'arborescence d'eau de forme bouquet, l'eau existe principalement dans les petites cavités menant à un champ électrique local élevé qui peut augmenter la croissance de l'arborescence d'eau. Les mêmes constatations ont été trouvées par Hui et al [22]. En effet, Hui et al [22] ont étudié l'effet de nanocomposites (PRC/silica) sur la morphologie et la propagation des arborescences d'eau. Pour cela, ils ont utilisé deux échantillons arborés, un en PRC et l'autre échantillon en nanocomposites (PRC/silica). Sur le comportement de ces arborescences dans les deux échantillons, les auteurs ont constaté que :

- ✓ les particules de silica empêchent la croissance des arborescences d'eau en dispersant les particules d'eau.
- ✓ Les nanocomposites réduisent le champ électrique local aux alentours des arborescences comparé à celui dans le PRC, par conséquent réduit la croissance des arborescences, comme illustré sur la figure. IV.28.
- ✓ La longueur des arborescences d'eau observée dans les nanocomposites (PRC /silica) est d'environ la moitié de celle observée dans des échantillons en PRC.
- ✓ La morphologie des arborescences d'eau dans les nanocomposites s'avère différente de celle dans un échantillon de PRC. Sur la figure IV.29, la forme bouquet d'arborescence d'eau, qui est observée dans le PRC, a disparu dans le nanocomposite (PRC /silica).

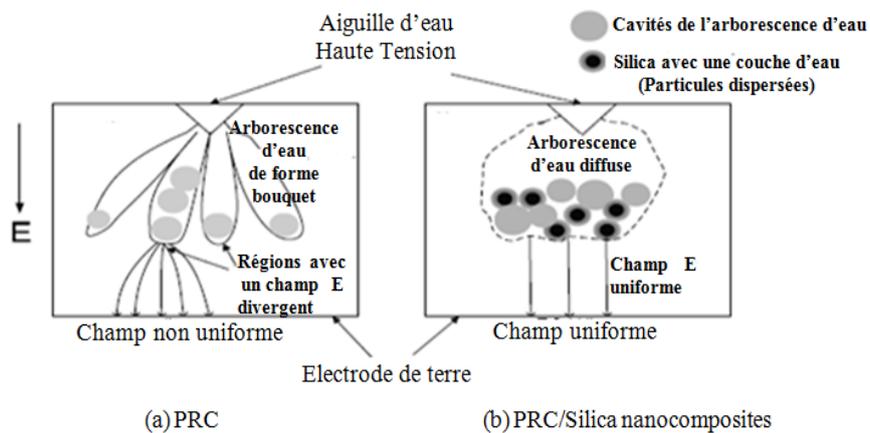


Fig. IV.28 Croissance de l'arborescence d'eau dans :
 (a) l'isolation PRC, (b) nanocomposites (PRC /silica) [22]

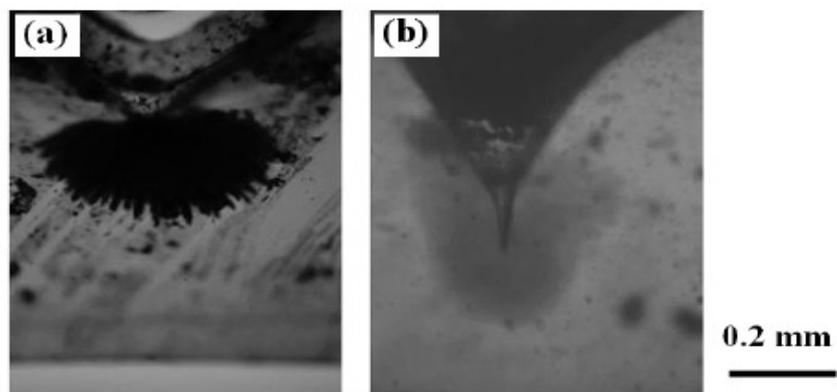


Fig. IV.29 La morphologie de l'arborescence d'eau dans (a) l'isolation PRC et dans (b) le nanocomposites (PRC /silica) [24]

IV.4 Conclusion

L'objectif de notre travail dans cette partie est l'étude de la distribution du champ dans une isolation en polyéthylène réticulé utilisée dans les câbles moyenne et haute tension, affectée par des arborescences d'eau se développant à partir des deux couches semi-conductrices, intérieure et extérieure à l'isolation en polymère. Nous avons pris en considération les différents cas de configurations: une isolation saine, présence d'arborescences, sans et avec la charge d'espace.

Les résultats d'investigation ont montré que la distribution du champ est uniforme dans l'isolation en absence de tout défaut.

Cependant, quand l'isolation est affectée par des arborescences d'eau, le champ et les lignes équipotentielles montrent plus de divergence comparée au cas d'un diélectrique sain. Cette variation non uniforme du champ et de lignes équipotentielles qui devient plus apparente sur l'interface isolation/arborescences d'eau, dépend de la longueur et de la forme géométrique des arborescences, du type d'arborescences (individuelles ou continues) ainsi que de la distribution de la constante diélectrique à l'intérieur de ces deux arborescences d'eau.

En l'absence de la charge d'espace, nous avons constaté que:

- ✓ L'effet des arborescences consiste en l'augmentation du champ électrique dans les régions extérieures aux deux arborescences, dans les deux cas de figures d'arborescences d'eau individuelles et continues.
- ✓ La valeur maximale du facteur d'amplification du champ électrique est obtenue pour le cas de la forme sphérique comparé au cas elliptique.
- ✓ Le champ électrique augmente proportionnellement avec la permittivité des arborescences et la distribution homogène de la constante diélectrique à l'intérieur des arborescences induit une augmentation du champ électrique local remarquable aux sommets des arborescences comparé à la distribution non homogène (linéaire et parabolique).
- ✓ Le champ électrique augmente avec la longueur des arborescences.

Par ailleurs, l'accumulation de la charge d'espace induit une importante variation du champ électrique à proximité des deux couches semi-conductrices. Par conséquent, le champ augmente significativement au niveau de ces deux couches, particulièrement pour la charge de polarité négative. Donc, nous avons constaté que la charge d'espace de polarité négative est plus influente que la charge de polarité positive. En outre, une bonne corrélation a été observée entre la quantité de la charge d'espace (densité et épaisseur de la couche de la charge d'espace) et l'augmentation du champ électrique au niveau des deux couches semi-conductrices.

Les résultats obtenus montrent que, le champ se concentre plutôt aux niveaux des interfaces physiques dans le cas des polarités opposées en particulier pour la configuration négative-positive.

Nous avons examiné l'effet qu'engendre la liaison entre des cavités d'air, cavités d'eau et entre les cavités d'eau et les nano-canaux avec deux différentes permittivités. Nous avons pu faire les constatations suivantes :

Les cavités d'eau ont un effet plus néfaste que celui des cavités d'air, car la concentration du champ électrique au niveau des sommets des cavités d'eau est importante, plus exactement aux extrémités de la chaîne reliant ces cavités d'eau.

L'augmentation de la valeur de la permittivité des nano-canaux de 10 à 16 augmente la valeur maximale du champ électrique. La valeur du champ électrique la plus élevée se trouve au niveau des cavités d'eau car la constante diélectrique d'une valeur de 80 est sensiblement plus grande que celle de l'isolation et des deux permittivités des nano-canaux.

Ces derniers résultats de nos investigations ont montré aussi que la nature de la liaison entre les microcavités constituant les chaînes des arborescences d'eau, peut être un facteur important dans l'augmentation de longueur des arborescences d'eau et la formation de ce chemin conducteur qui court-circuite l'isolation et qu'on appelle arborescence électrique.

En outre, la dispersion des particules d'eau dans les microcavités qui se trouvent dans l'isolation (ce qui veut dire rompre les chaînes reliant les microcavités) permet l'atténuation de la propagation des arborescences d'eau.

Bibliographie

- [1] I. Radu, M. Acedo, J.C. Filippini, P. Notingher, F. Frutos, "The effect of water treeing on the electric field distribution of XLPE consequences for the dielectric strength", IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.7, No. 6, pp. 860-868, 2000.
- [2] C. Stancu, P.V. Notingher, F. Ciuprina, P. Notingher,jr, J. Castellon, S. Agnel, A. Toureille, "Computation of the electrical field in cable insulation in the presence of water trees and space charge", IEEE Trans. Industry. Appl., Vol. 45, No.1, pp. 30-43, 2009.
- [3] C. Stancu, P.V. Notingher, P. Notingher. Jr, "Computation of the electric field in aged underground medium voltage cable insulation" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 20, No. 5, pp. 1530-1539, 2013.
- [4] C. Kim, J. Duan, X. Huang, S. Kim, P. Jiang, H. Kim and S. Hyon, "Numerical analysis on water treeing deterioration of XLPE cable insulation using combination of FEM and Taguchi Method", Euro. Trans. Elect. Power, Vol. 20, pp. 747-759, 2010.
- [5] F. Rogti, A. Mekhaldi, C. Laurent, "Space charge behavior at physical interfaces in cross-linked polyethylene under DC field" IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.15, No.5, pp. 1478-1485, 2008.
- [6] J.Y. Koo, J.D. Cross, M. El-kahel, C.T. Meyer, J.C. Filippini, "Electrical behavior and structure of water trees in relation to their propagation", IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), Buck Hill Falls, USA, pp. 301-306, 1983.
- [7] S. Hidsten, E. Ildstad, J. Sletbak, H. Faremo, "Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods", IEEE Trans. Dielec. insul, Vol.5, No. 5, pp.754-760, 1998.
- [8] Z. Wang, P. Marcolongo, J.A. Lemberg, B. Panganiban, J.W. Evans, R.O. Ritchie, P.K. Wright, "Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.19, no.1, pp. 321-330, 2012.
- [9] I. Radu, M. Acedo, P. Notingher, F. Frutos, J.C. Filippini "The danger of water trees in polymer insulated power cables evaluated from calculations of electric field in the presence of water trees of different shapes and permittivity distributions", J. Electr., Vol. 40-41, pp. 343-348, 1997.
- [10] M. Acedo, I. Radu, F. Frutos, J.C. Filippini and P. Notingher, "Water treeing in underground power cables: modelling of the trees and calculation of the electric field perturbation", J. Electr., pp. 267-294, Vol. 53, 2001.
- [11] I.W. McAllister, G.C. Crichton, A. Pedersen, "Charge accumulation in DC cables: A Macroscopic Approach", IEEE Int'l. Sympos. Electr. Insul. (ISEI), Pittsburgh, PA, USA, pp. 212-216, 1994.
- [12] C. Stancu, P.V. Notingher, P. Notingher Jr, "Influence of space charge related to water trees on the breakdown voltage of power cable insulation", J. Electr.,Vol.71, pp. 145-154, 2013.
- [13] F.H. Read, N.J. Bowring, "Ultimate numerical accuracy of the surface charge method for electrostatics", Third Int'l. Conf. Computation in Electromagnetics, Vol.4, pp. 57-61, 1996.
- [14] Y. Ohki, Y. LI, J. Kawai, Y. Ebinuma, Y. Fujiwara, "Space Charge behavior under AC voltage application in water-treed polyethylene observed by the pulsed electroacoustic

method”, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), San Francisco, USA, pp. 52-57, 1996.

[15] E. Kanegae, Y. Ohki, Y. Sekiguchi, “Space charge behavior in multi-layered dielectrics with LDPE and LDPE/MgO nanocomposites”, IEEE, International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, Germany, July 4-9, 2010.

[16] J.H. Lee, S.M. Cho, I.K. Song, “Correlation between the AC breakdown strength and space charge distribution of water tree aged XLPE”, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), Atlanta, GA, USA, Vol. 2, pp. 657-660, 1998.

[17] C. Stancu, P.V. Notingher, F. Ciuprina, P. Notingher, jr, S. Agnel, J. Castellon, A. Toureille, “Electric field computation in water treed polyethylene with space charge accumulation”, IEEE Int. Sympos. Electr. Insul., Toronto, Canada, pp. 186-189, 2006.

[18] M. Lanca, Electrical ageing studies of Polymeric Insulation for Power Cables, Ph.D. Thesis, Lisabona University, UK, 2002.

[19] S. Hvidsten, E. Ildstad, H. Faremo, “Mechanisms causing nonlinear dielectric response of water treed XLPE cables”, IEEE Int. Conf. Conduction and Breakdown solid Dielectr., Västerås, Sweden, pp. 73-78, 1998.

[20] T. Tanaka, T. Fukuda, S. Suzuki, “water tree formation and lifetime estimation in 3.3 kV and 6.6 kV XLPE and PE power cables”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, no. 6, 1976.

[21] S.M. Helleso, S. Hvidsten, K.M. Furuheim, G. Hakonseth, “Water treeing in subsea XLPE cables with thermal gradient”, Electrical Insulation Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 2 to 5 June, 2013.

[22] Le Hui, Linda S. Schadler, J. Keith Nelson, “The influence of moisture on the electrical properties of Crosslinked Polyethylene/Silica nanocomposites”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 20, No. 2, pp. 641-653, 2013.

[23] J. K Nelson, L. S. Schadler and L. Hui, “Evaluation of moisture influence on XLPE/silica nanodielectrics for utility cable application”, Elec. Power Res. Ins. (ERPI), Palo Alto, CA, USA, Rep. 1022313, 2009.

Conclusion générale

La croissance des arborescences d'eau et l'accumulation de la charge d'espace, ainsi que les déformations du champ électrique induites dans l'isolation en polyéthylène réticulé des câbles électriques, soumis à une contrainte électrique, sont des facteurs importants dans la dégradation du matériau. Le travail présenté dans ce manuscrit est consacré à la mise en évidence des corrélations existantes entre les arborescences d'eau, en présence ou en absence de la charge d'espace, et les déformations du champ, afin de prévoir leurs influences sur la dégradation de l'isolation.

Notre travail consiste à déterminer la distribution du champ dans une isolation en polyéthylène, affectée par deux arborescences d'eau avec en particulier accumulation de la charge d'espace.

Dans un premier temps, une analyse de l'influence de la présence de deux arborescences d'eau individuelles qui se développent simultanément à partir de la couche semi-conductrice intérieure et extérieure à l'isolation d'un câble moyenne tension en l'absence de la charge d'espace sur le comportement électrique de l'isolation a été effectuée. Une tension continue de 12 kV a été appliquée.

Dans le cas d'une isolation saine et en l'absence de tous défauts, le champ électrique diminue le long de l'épaisseur de l'isolation. Les résultats montrent plutôt une distribution uniforme du champ.

En présence d'arborescences d'eau et sans la charge d'espace, nous avons examiné l'influence de deux types d'arborescences (individuelles ou continues), en prenant en considération la nature de la permittivité diélectrique de ces arborescences (homogène et non homogène) ainsi que de la forme géométrique et de la longueur des arborescences sur la distribution du champ électrique.

L'effet des arborescences consiste en l'augmentation du champ électrique dans les régions extérieures aux deux arborescences, dans les deux cas de figures d'arborescences d'eau individuelles et continues.

Le facteur d'amplification du champ augmente légèrement (de 5%) quand b/a augmente de 0.2 (forme elliptique) à 1 (forme sphérique). La valeur maximale de ce facteur d'amplification est obtenue pour le cas de la forme sphérique comparé au cas elliptique.

Le champ électrique augmente proportionnellement avec la permittivité de l'arborescence. Pour la forme sphérique ($b=a$), le champ électrique augmente de 7% (respectivement 10%) lorsque la permittivité augmente dans la gamme de [4, 6,6] (respectivement 10% [6,6, 9,9]).

En comparant la répartition du champ avec les différentes distributions (linéaire, parabolique et homogène) de la permittivité à l'intérieure des deux arborescences, nous avons constaté que la distribution homogène de la constante diélectrique à l'intérieur des arborescences induit une augmentation du champ électrique local plus importante aux sommets des arborescences comparé à la distribution non homogène (linéaire et parabolique).

Le champ électrique augmente avec la longueur des arborescences. La valeur maximale du champ électrique de 3,80 kV/mm est obtenue avec la plus grande longueur considérée de 0,7 mm.

Dans une deuxième étape, en présence simultanée d'arborescences d'eau et de la charge d'espace, nous avons étudié l'impact de la polarité de la charge d'espace (en considérant les

Conclusion générale

quatre configurations), ainsi que de sa densité et de son épaisseur sur la distribution du champ électrique. Nous avons constaté que :

- L'augmentation de la densité de la charge d'espace induit une large variation du champ électrique au niveau des semi-conducteurs, notamment au niveau des interfaces physiques.
- L'augmentation de l'épaisseur de la couche de la charge d'espace de 0 à 0.35mm dans notre cas, provoque une augmentation importante du champ électrique au niveau des interfaces physiques intérieures pour la polarité négative de la charge d'espace.
- La charge d'espace de polarité négative est plus influente que la charge de polarité positive et que le champ électrique est maximum au niveau des interfaces physiques particulièrement pour la configuration de polarités négative-positive. Cela pourrait conduire à l'initiation d'arborescences électriques. Ces dernières se développent non seulement à partir de sommet des arborescences d'eau, mais aussi à partir des interfaces physiques (arborescence /PRC /couche semi-conductrice) du câble électrique.

Dans une dernière étape, nous avons examiné l'effet qu'engendre la liaison entre des cavités d'air, cavités d'eau et entre les cavités d'eau et les nano-canaux avec deux différentes permittivités. Les résultats de nos investigations ont montré que l'augmentation de la valeur de la permittivité des nano-canaux de 10 à 16 augmente la valeur maximale du champ électrique. La valeur du champ électrique la plus élevée se trouve au niveau des cavités d'eau car la constante diélectrique d'une valeur de 80 est sensiblement plus grande que celle de l'isolation et des deux permittivités des nano-canaux. La concentration du champ électrique se situe au niveau des sommets des cavités d'eau, plus exactement aux extrémités de la chaîne reliant ces cavités d'eau.

Ces derniers résultats de nos investigations nous permettent de conclure que la nature de la liaison entre les microcavités constituant les chaînes des arborescences d'eau et l'alignement ordonné des microcavités d'eau dans la direction radiale de l'isolation du câble électrique, peut être un facteur important dans l'augmentation de longueur des arborescences d'eau.

En outre, rompre cette liaison reliant les microcavités (la dispersion des particules d'eau dans les microcavités qui se trouvent dans l'isolation) permet l'atténuation de la propagation des arborescences d'eau.

Nous dressons quelques perspectives qui pourraient servir de point de départ à d'autres travaux de recherches sur cette thématique :

- Le développement de notre modèle sous la contrainte alternative et faire une comparaison avec les résultats obtenus en continu.
- Validation avec essais expérimentaux.
- Etude approfondie sur les problèmes d'interfaces dans les matériaux nano-composites en présence d'arborescences d'eau et la charge d'espace.
- Modélisation des phénomènes électromécanique contribuant à la détérioration des câbles électriques en présence simultanée d'arborescences et la charge d'espace.