



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Electromécanique*

Spécialité : *Maintenance Industriel*

Par : **KESBI Oussama & DADDIOUAMEUR Youcef**

Thème

**Simulation Numérique des Contraintes Electrique et
Electromécanique dans les Cavités des Câbles HT**

Soutenu publiquement le 30/09/2020

Devant le jury :

Mm.BOUCHELGA Fatma	M.C.B	Université de Ghardaïa	Président
Mr.BOUKHARI Hamed	M.C.B	Université de Ghardaïa	Examineur
Mr. BAHRI Ahmed	M.A.A	Université de Ghardaïa	Examineur
Mr.MEDOUKALI Hemza	M.C.B	Université de Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2019/2020

المخلص:

يستخدم كابل المعزول عن طريق البولي إيثيلين المتشابك كيميائياً أحادي النواة لنقل الطاقة الكهربائية، من بين أكثر الظواهر ضرراً نشاط التفريغ الجزئي في الفجوات الصغيرة التي تتواجد على مستوى الطبقة العازلة للكابل. الهدف من هذا العمل هو تحديد التشوهات الناتجة عن التجايف على توزيع المجال الكهربائي في الطبقة العازلة للكابل عن طريق المحاكاة. تعتمد طريقة الحساب المستخدمة لتحديد المجال الكهربائي على حل معادلة لابلاس باستخدام طريقة العناصر المحدودة.

لقد تم إنشاء نموذج محاكاة ثنائي الأبعاد لكابل معزول بالبولي إيثيلين المتشابك كيميائياً (XLPE) بقدرة 30 كيلو فولت تم تصميمه باستخدام برنامج (COMSOL Multiphysics). في هذا النموذج، يتم إنشاء تجايف في عازل الكابل ونقوم بتجارب مختلفة. تم استخدام النموذج لدراسة تأثير حجم وشكل وموقع وعدد التجايف في عزل كبل الجهد العالي عن طريق إجراء التحليل الكهربائي والكهروميكانيكي.

تُقدر قيمة الضغط الكهروستاتيكي انطلاقاً من تحديد شدة المجال الكهربائي. يتم حساب استطالة التجايف الصغيرة لتقييم تأثير الضغط الكهروستاتيكي على جدران التجايف.

الكلمات المفتاحية: الفجوات، البولي إيثيلين المتشابك كيميائياً، طريقة العناصر المحدودة، التفريغ الجزئي.

Résumé :

Les câbles XLPE unipolaire utilisés pour le transport d'énergie électrique. Parmi les phénomènes les plus nocif sont l'activité des décharges partielles dans les microcavités qui existent au niveau de la couche isolante du câble. Le but de ce travail est de déterminer par simulation, les distorsions provoquées par les cavités sur la distribution du champ électrique dans la couche isolante du câble. La méthode de calcul utilisée pour déterminer le champ électrique est basée sur la résolution numérique de l'équation de Laplace en utilisant la méthode des éléments finis (FEM).

Nous avons été créés, un modèle de simulation 2D d'un câble 30 kV isolé par XLPE conçu en utilisant logiciel COMSOL Multiphysics. Dans ce modèle, des cavités sont créées dans l'isolation (XLPE) du câble à différentes expériences. Le modèle a été utilisé pour étudier l'effet de la taille, la forme, la position et la densité des cavités dans l'isolant d'un câble HT en effectuant une analyse électrique et électromécanique.

La valeur de la pression électrostatique dépend de la densité du champ électrique. L'allongement des microcavités est calculé pour apprécier l'effet de la pression électrostatique sur les parois des cavités.

Mots-clés : Microcavité, XLPE, Contraintes, FEM, Décharges Partielle.

Abstract:

Unipolar XLPE cables used for the transmission of electrical energy. Among the most harmful phenomena is the activity of partial discharges in microcavities that exist at the level of the insulating layer of the cable. The goal of this work is to determine by simulation, the distortions caused by the microcavity on the distribution of the electric field in the insulating layer of the cable. The computational method used to determine the electric field is based on the numerical resolution of the Laplace equation using the Finite Element Method (FEM).

We have been created, a 2D simulation model of a 30 kV XLPE insulated cable designed using COMSOL Multiphysics software. In this model, cavities are created in the insulation (XLPE) of the cable at different experience. The model was used to study the effect of the: size, form, position and density of the cavities in the insulation of an HT cable by performing electrical and electromechanical analysis.

The value of the electrostatic pressure depends on the density of the electric field. The elongation of the microcavities is calculated to assess the effect of the electrostatic pressure on the walls of the cavities.

Keywords: Microcavity, XLPE, Stresses, FEM, Partial Discharge.

REMERCIEMENTS

D'abord, nous remercions ALLAH le tout puissant qui nous éclairé nos chemins et qui nous a donné la force pour accomplir ce travail.

En tout premier lieu, nous remercier vivement mes mères et mes pères qui ont nous donné tous les outils et les conditions de succès. Motivation et de confiance et de soins et des dépenses, durant les dix-neuf années d'études (2001-2020).

Nous tenons à remercier vivement Mr. MEDOUKALI Hemza notre encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements, sa disponibilité, et sa qualité humaine.

Nous remercions affectueusement, le comité de jury d'avoir accepté l'évaluation de la qualité de ce mémoire.

Nous remercions aussi tous mes enseignants de l'université de Ghardaïa, pour tous les efforts déployés et pour les informations et la formation.

Nous voudrions remercier spécialement Mr. ZITANI Brahim, pour ses compétences scientifiques, ses conseils, sa disponibilité, et sa qualité humaine.

Nous remercions tous les collègues de la promotion 2020.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail

Pour nos pères et mères en général

Pour nos frères et nos sœurs

Pour tous les membres de nos familles

Pour nos très chers amis

A tous les étudiants d'électromécanique

A tous les enseignants de la faculté des sciences et

technologie

A tous les travailleurs de l'université de Ghardaïa

Youcef & Oussama

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure I.1 : Quelques types de câbles isolés.....	7
Figure I.2 : Constitution d'un câble isolé	8
Figure I.3 : Organigramme de différents types d'isolants de câble électrique.....	10
Figure I.4 : Molécule d'éthylène	12
Figure I.5 : Processus de polymérisation.....	12
Figure I.6 : Structure macromoléculaire du polyéthylène	13
Figure I.7 : Molécule de Polyéthylène ramifiée	15
Figure I.8 : Image d'un échantillon de polyéthylène contenant des défauts	19
Figure I.9 : Types de Claquage d'isolation des câbles.....	21
Figure I.10 : Arborescence électrique observée dans un câble HT	23
Figure I.11 : Exemple de claquage d'un câble électrique	24

CHAPITRE II

Figure II. 1: Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.	31
Figure II. 2: Organigramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL.....	32
Figure II. 3 : Géométrie du câble électrique avec condition limite.	33
Figure II. 4 Maillage de câble électrique souterrain.....	34
Figure II. 5: Comparaison de la distribution du champ électrique dans l'isolation sans cavité (homogène) entre une étude analytique et une simulation numérique.	36
Figure II. 6 : distribution du champ électrique dans l'isolation contenant une cavité de même permittivité de l'isolant (XLPE).....	37

CHAPITRE III

Figure III. 1: Effet de la présence d'une cavité d'air de diamètre 10 μ m sur le champ électrique.	39
Figure III. 2: Distribution du champ électrique dans la zone contenant une cavité.....	40
Figure III. 3: La polarisation au niveau de la cavité.	41
Figure III. 4: Distribution de la pression électrostatique dans une zone contenant une cavité	41

Figure III. 5: Allongement d'une seule cavité.	42
Figure III. 6 : Variation du champ en fonction de la taille de la cavité.	43
Figure III. 7 : Variation de la pression en fonction de la taille de la cavité.	43
Figure III. 8 : Variation du champ en fonction de la position de la cavité.....	44
Figure III. 9 : Variation de la pression en fonction de la position de la cavité.	45
Figure III. 10: Allongement de la cavité en fonction de son diamètre et position.....	46
Figure III. 11: formes des cavités utilisées.	46
Figure III. 12: Variation du champ en fonction de forme de la cavité.....	47
Figure III. 13 : Variation de l'allongement en fonction de forme de la cavité.	47
Figure III. 14: Distribution du champ électrique en deux cavités en interaction.....	49
Figure III. 15: Distribution de la pression électrostatique en deux cavités en interaction.	49
Figure III. 16: Allongement en deux cavités en interaction.....	50
Figure III. 17 : Distribution radiale de champ électrique dans la région contenant deux cavités : la plus petite située sur le côté du l'âme.	51
Figure III. 18 : Distribution radiale de la pression électrostatique dans la région contenant deux cavités : la plus petite située sur le côté du l'âme.....	51
Figure III. 19: Distribution radiale de la pression électrostatique dans la région contenant deux cavités : la plus grande située sur le côté du l'âme.....	52
Figure III. 20: Distribution radiale de champ électrique dans la région contenant deux cavités : la plus grande située sur le côté du l'âme.	52
Figure III. 21: Distribution radiale du champ électrique dans deux cavités de différentes permittivités.	53
Figure III. 22: Distribution radiale de la pression électrostatique dans deux cavités de différentes permittivités.	54
Figure III. 23: Distribution radiale du champ électrique dans trois cavités de la même taille et avec la même permittivité.....	55
Figure III. 24: Distribution radiale de la pression électrostatique dans trois cavités de la même taille et avec la même permittivité.	55
Figure III. 25: Allongement en trois cavités en interaction.	56

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I. 1: Principales caractéristiques du cuivre et de l'aluminium à 20 °C.....	8
Tableau I. 2: Les principales caractéristiques des polyéthylènes.....	14

CHAPITRE II

Tableau. II. 1 Caractéristiques du câble utilisé comme modèle.....	33
---	----

Liste des abréviations

XLPE: Cross linked polyethylene

PE : Polyéthylène

PVC : Polychlorure de vinyle

HTA : Haute tension classe A

HTB : Haute tension classe B

BT : Basse Tension

UTE : Union Technique de l'Électricité

CEI : Commission Électrotechnique Internationale

SF₆ : Hexafluorure de soufre

PEbd : Polyéthylène basse densité

PEhd : Polyéthylène haute densité

DCP : Décumule peroxyde

EPM : Ethylene-propylene matériel

EPDM : Ethylene-propylene diène monomère

C.E.I : Comite Electrotechnique International

A.S.T.M: Americana Society for Testing and Matériels

FEM : Finite element method

EDP : Equations aux dérivées partielles

EDO : Equations aux dérivées ordinaires

EAD : Equations algèbre-différentiels

AC : Courant alternatif

DC : Courant continu

Liste des symboles

C : Etant une constante

D : Déplacement électrique [$C.m^{-2}$]

U_c : Tension de claquage thermique [V]

f : Fréquence en [Hz]

ϵ_i : Permittivité relative de l'isolation XLPE

ϵ_0 : Permittivité de l'espace libre [$F.m^{-1}$]

ϵ_{eau} : Permittivité de l'eau

ϵ_c : Permittivité relative de la cavité

ρ : la densité de charge libre

E : Champ électrique [kv/mm]

r : Position quelconque par rapport au center de la cavité [mm]

V₀ : Tension du câble [kv]

R_T : Rayon du câble [mm]

R_c : Rayon de l'âme conductrice [mm]

Y : Module d'élasticité de Young [GPa]

d₀ : Epaisseur initiale du matériau [mm]

d : Epaisseur du matériau après déformation [mm]

E_c : Champ critique [kv/mm]

[**D₁, D₂ ... D₆**] : Différentes diamètres de cavité [mm]

[**P₁, P₂ ... P₆**] : Différentes positions de cavité [mm]

Sommaire

Résumé	I
Remerciements.....	II
Dédicace.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	V
Liste des abréviations.....	VI
Liste des symboles.....	VII
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les câbles électriques souterrains

I.1.Introduction	5
I.2 Etat de l'art	5
I.3 Généralités	6
I.3.1. Domaines d'utilisation	6
I.3.2. Règlement	7
I.4 Constitution et caractéristique du câble	7
I.5 Matériaux isolants pour les câbles	10
I.6 Défauts des isolations haute tension	16
I.6.1 Cavités gazeuses	17
I.6.2 Microcavités préexistant au sein du matériau	17
I.6.3 Cavités d'eau.....	17
I.6.4 Cavités de gaz	17
I.6.5 Cavités créées au cours de la mise en œuvre ou du fonctionnement du système	17
I.6.6 Hétérogénéités.....	18

I.6.7 Impuretés.....	18
I.7 Contraintes supportées en service par l’isolation	18
I.8 Claquage des isolants	21
I.8.1 Claquage intrinsèque.....	22
I.8.2 Claquage électronique.....	22
I.8.3 Claquage thermique	22
I.8.4 Claquage électromécanique	22
I.8.5 Claquage par arborescences électriques.....	23
I.8.6 Décharges partielles.....	23
I.9 Conclusion	24

Chapitre II : Modèle Electrostatique et Simulation des Câbles Electriques

II.1. Introduction.....	26
II.2. Méthode des éléments finis (FEM)	26
II.2.1 Principe	26
II.2.2 Étapes de la méthode des éléments finis.....	27
II.2.3 Avantages de la FEM	27
II.2.4 Inconvénients de la FEM	28
II.2.5 Logiciel COMSOL Multiphysics	28
a) Description de logiciel COMSOL Multiphysics	28
b) Modèles	29
c) Procédure de simulation	31
d) Méthodologie de conception avec COMSOL Multiphysics.....	31
II.3. Calcul des contraintes.....	34
II.3.1 Calcul du champ électrique	34
II.3.2 Calcul de la pression électrostatique dans une cavité	35

II.3.3	Calcul de l'allongement des cavités.....	35
II.4.	Validation de modèle.....	36
II.5.	Conclusion.....	37

Chapitre III : Résultats et Discussions

III 1.	Introduction.....	39
III 2.	Résultats et discussion	39
III.2. 1.	Cas d'une cavité.....	39
a.	Variation du champ électrique dans une cavité	39
b.	Variation du champ électrique et de la pression électrostatique en fonction de la taille de la cavité	42
c.	Variation du champ et de la pression électrostatique en fonction de la position de la cavité	44
d.	Variation de l'allongement en fonction de la position et la taille de la cavité	45
e.	Champ électrique en fonction de la forme de cavité	46
III.2. 2.	Cas de deux cavités.....	48
a.	État de deux cavités à la même taille et permittivité relative	48
b.	État de deux cavités de taille différente et à la même permittivité relative	50
c.	État de deux cavités à la même taille et de permittivité relative différente	53
III.2. 3.	Cas de trois cavités	53
III 3.	Conclusion.....	56
	Conclusion générale	58
	Bibliographie	60

Introduction générale

Introduction générale

Introduction Générale :

Dans le domaine de transport d'énergie électrique, deux moyens permettent aujourd'hui d'assurer le transport d'énergie entre les centrales de production et les centres de consommation les lignes aériennes et les câbles souterrains.

La tendance, actuelle et aussi celle des années futures, est de transporter l'électricité au moyen des câbles isolés. Cette évolution du marché est la conséquence de fortes pressions écologiques et environnementales dans le but de réduire l'utilisation des lignes aériennes.

Le polyéthylène réticulé XLPE est principalement plus utilisé aujourd'hui pour les câbles de distribution souterrains, en raison de ses excellentes caractéristiques : rigidité diélectrique, bonne stabilité dimensionnelle, et bon comportement thermomécanique.

Les observations effectuées au microscope électronique à balayage révèlent la présence des cavités gazeuses dans le matériau XLPE. Ces cavités sont le résultat direct de la pénétration de vapeur d'eau dans l'isolant pendant le processus de réticulation et également en raison des opérations incorrectes d'extrusion et de réticulation. Les tailles des cavités sont comprises entre 1 μm et 20 μm et leur répartition dans le câble est plus importante dans la région située aux trois quarts de l'épaisseur des isolants partant de l'âme [1]. L'effet notable de ces cavités est de rendre hétérogène l'isolation dans la zone où elles se sont produites et de provoquer une distorsion dans la distribution du champ électrique. L'amplitude des distorsions dans les cavités gazeuses dépend essentiellement de la permittivité du gaz retenu, de la forme de la cavité et de sa position par rapport à l'âme. Ceci peut entraîner la dégradation de l'isolation par le mécanisme de décharges partielles pouvant aller jusqu'à la perforation complète de l'isolation.

Le but de cette mémoire est d'étudier l'influence des microcavités sur les contraintes (électrique, et électromécanique) des câbles haute tension en utilisant la méthode des éléments finis (FEM) par logiciel COMSOL Multiphysics. Pour analyser le modèle 2D d'un câble souterrain a été conçu avec des cavités à différentes positions ; tailles et formes. A partir des travaux que déjà publier et les résultats obtenir, on peut prédire la présence et l'intensité du phénomène de décharge partielle dans l'isolant, et dans le cas de sa présence avec le temps il conduit à la fatigue et donc le vieillissement, et ainsi limiter la durée de vie d'un câble électrique.

Ce travail comporte trois chapitres :

Introduction générale

- Le premier chapitre : donne une vue générale sur la nature, et la composition des câbles électriques souterrains. Nous définissons les types des matériaux isolants et leurs caractéristiques et les différents défauts dans l'isolation haute tension qui provoquent le phénomène de décharges partielles.
 - Dans le deuxième chapitre, nous soulignerons l'importance de la FEM et son utilisation dans le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Nous allons créer un modèle 2D du câble et afin de valider ce modèle.
 - Le troisième chapitre est la représentation et l'interprétation des résultats de différentes simulations et différents cas que nous avons essayés sur le câble qui contient une ou plusieurs cavités.
- Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les Câbles Electriques Souterrains

I.1 Introduction

Les câbles isolés souterrains sont principalement employés, au moins jusqu'à présent, pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées, parfois pour résoudre des problèmes locaux particuliers, techniques ou d'environnement, lesquels la mise en œuvre de lignes aériennes est difficile ou impossible.

Les matériaux d'isolation et les systèmes d'isolation sont les principaux composants des systèmes de distribution d'énergie électrique. Le système d'isolation en papier a été utilisé dans le passé [1,2] et en raison des différents inconvénients que présente cette isolation, il a laissé de la place pour isolants synthétique (XLPE ; PE ; PVC...). Les câbles à isolation XLPE présentent de grands avantages techniques et économiques. Parmi ces avantages nous pouvons citer : la grande facilité de mise en œuvre, leur volume réduit, leur exploitation aisée et le non nécessité de leur entretien, en plus de ces qualités, ils ont de bonnes propriétés diélectriques et mécaniques ainsi qu'une durée de vie beaucoup plus longue que les câbles des différentes matériaux isolants.

Lorsque l'isolation contenant des inclusions gazeuses (cavité) au cours de son élaboration, ou sous des contraintes mécaniques et thermiques qui permettent d'engendrer une séparation à l'interface isolant/semi-conducteur ou isolant/âme conductrice.

Parmi les phénomènes qui sont mènent le claquage des isolants est les décharges partielles qui est ont prennent naissance dans ces cavités sous des conditions particulières qui conduit à l'apparition des micro-canaux puis la formation des arborescences et se termine par la rupture complète des câbles.

I.2 Etat de l'art

L'influence des cavités sur les contraintes électriques dans l'isolant XLPE d'un câble est étudiée numériquement par différentes méthodes : méthode des différences finies (FDM), méthode des volumes finies (FVM) et méthode des éléments finies (FEM) [1,2], était déterminées les contraintes électriques [3-9] et électromécaniques [10,11] par la résolution numérique de l'équation de Laplace en utilisant l'une des méthodes. Aucune analyse de l'effet des charges d'espace sur les contraintes n'a été faite.

Dans la référence [12] sont déterminées les contraintes électriques et électromécaniques par la résolution numérique de l'équation de poisson en utilisant la méthode FEM, et c'était simulé avec différentes valeurs de la densité des charges d'espace par Matlab et l'interface de "Partial Differential Equation (PDE) Toolbox".

En générale, sont analysées les contraintes (champ électrique, température, pression électromécanique ...) à partir des modèles, des défauts qui peut être existe Pendant le processus de fabrication ou pendant le service sont créées dans l'isolation du câble à différentes simulation (taille, position, forme, permittivité relative, ...).

Le calcul du champ critique par la formule approchée de Paschen permet de distinguer la nocivité de la cavité selon sa taille et sa position.

La pression électrostatique dépend du champ électrique est déterminée par le calcul. L'allongement des microcavités est calculé pour apprécier l'effet de la pression électrostatique sur les parois de la cavité.

I.3 Généralités

I.3.1. Domaines d'utilisation

- Les câbles à haute tension (HTB), en 400 kV, sont principalement employés sur de courtes longueurs (quelques centaines de mètres à 2 ou 3 kilomètres), pour assurer l'évacuation de la puissance de certaines centrales thermiques ou assurer l'alimentation des auxiliaires des centrales nucléaires, lorsqu'il n'est pas possible de le faire par lignes aériennes. Leur puissance unitaire peut atteindre 1300 MVA [13,14].
- L'importance prise par les problèmes d'environnement et la réduction du coût du transport par câbles à haute tension devraient conduire, dans l'avenir, à une utilisation plus large de ce moyen de transport d'énergie.
- Les câbles à moyenne tension (HTA), 3 à 45 kV [13,14], sont très utilisés sur les réseaux de distribution d'énergie électrique. Anciennement isolés au papier imprégné, ils le sont maintenant par des matières synthétiques entraînant une réduction du coût et une plus grande facilité de pose (mécanisation...) et de mise en œuvre.
- Les câbles à basse tension (BT), à 230 ou 400 V [14], constituent le moyen le plus sûr et le plus esthétique de distribution locale d'énergie électrique. Leur isolant est en matière synthétique et l'âme généralement en aluminium. Une application courante consiste à utiliser ces câbles sous forme de réseau aérien, posé en façade d'immeuble.

- De nombreux de types câbles particuliers sont également développés (ayant un comportement amélioré au feu, résistant aux radiations pour centrales nucléaires, résistant aux produits chimiques, à des températures élevées, mécaniquement très souples ou robustes, etc...) ; ils font l'objet de spécifications particulières.
- Afin de mieux rapprocher l'axe d'utilisation des câbles électriques, plaçons-nous dans le cas de l'isolation synthétique utilisée pour le transport de l'énergie. La figure (I.1) donne quelques types de câbles utilisés dans le transport de l'énergie électrique [10].



Figure I.1 : Quelques types des câbles isolés [13]

I.3.2. Règlement

Toutes les règles d'établissement des fils et câbles isolés sont contenues dans les normes éditées par l'Union Technique de l'Électricité (UTE) et la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) [15].

I.4 Constitution et caractéristique du câble

D'une manière générale, un câble unipolaire se présente sous la forme d'un condensateur cylindrique figure (I.2) constitué essentiellement de :

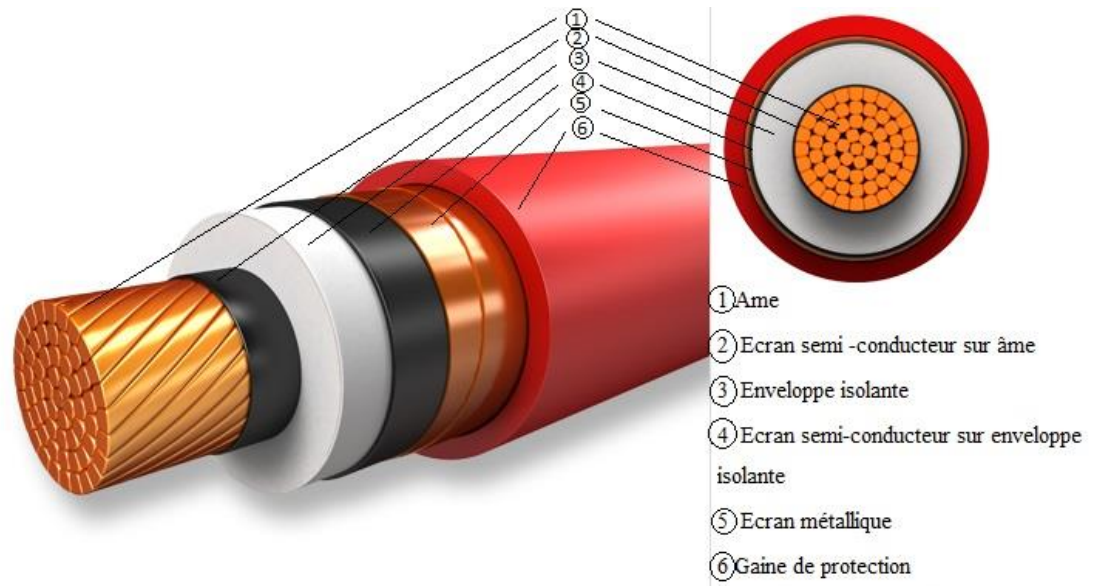


Figure I.2 : Constitution d'un câble isolé [16]

➤ Ame

Les âmes des câbles isolés sont réalisées à partir de cuivre ou d'aluminium. Les spécifications internationales de ces métaux sont reprises dans les normes françaises NF C 30-010 pour le cuivre et NF C 31-122 pour l'aluminium.

Les principales caractéristiques de ces métaux sont données dans le tableau (I.1) :

Tableau I. 1: Principales caractéristiques du cuivre et de l'aluminium à 20 °C [17]

Caractéristiques	Cuivre	Aluminium
Résistivité électrique($\Omega \cdot m$)	$1,7241 \cdot 10^{-8}$	$2,8264 \cdot 10^{-8}$
Coefficient de variation de température. (K^{-1})	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$
Contrainte à la rupture.....(MPa)	200 à 250	120 à 180
Allongement à la rupture.....(%)	30 à 85	0,5 à 3,2
Masse volumique.....($kg \cdot dm^{-3}$)	8,89	2,70
Coefficient de dilatation linéique(K^{-1})	$17 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$

➤ **Ecrans semi-conducteur sur âme et sur enveloppe isolante**

Ces écrans sont obligatoires pour tous les câbles visés par la présente spécification. Chaque écran est constitué d'une ou plusieurs couches d'une matière semi-conductrice.

Il comporte nécessairement une couche extrudée en contact avec l'enveloppe isolante. Cette couche doit être continue, d'épaisseur moyenne constante, ne présenter aucune aspérité, être parfaitement adhérente à l'enveloppe isolante sur toute sa périphérie, dans les conditions de service. Elle peut être éventuellement séparée manuellement de l'isolant.

Ces écrans ne doivent avoir aucune action néfaste sur la bonne conservation des éléments du câble à leur contact et en particulier ne contenir aucun produit nocif susceptible de diffuser dans l'isolant [18].

➤ **Enveloppe isolante**

Une enveloppe isolante en matériau polymérique (polyéthylène, polyéthylène réticulé, caoutchouc, polychlorure de vinyle, les enveloppes isolantes en papier imprégné n'étant plus utilisées que pour les câbles haute tension courant continu) dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 30 mm selon la tension d'utilisation et la nature du matériau [19].

➤ **Ecran métallique**

L'écran métallique dont la nature est proposée par le constructeur doit : contribuer à assurer une protection mécanique du câble, assurer l'étanchéité du câble dans le sens radial, - permettre l'écoulement des courants de court-circuit.

L'écran métallique doit être calculé pour assurer l'écoulement du courant de court-circuit monophasé de l'installation dont la valeur est indiquée à la commande en tenant compte des effets de l'asymétrie supposée maximale [20].

➤ **Gaine de protection extérieure**

Enfin, une gaine de protection externe en matériau polymérique, jouant un rôle de protection contre la corrosion, favorisant l'étanchéité, la protection mécanique à la pose et, lorsque cela est nécessaire, 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 [19].

I.5 Matériaux isolants pour les câbles

Il existe plusieurs types d'isolants qui sont utilisés dans l'industrie des câbles électriques, qui ont évolué au fil des ans. Dans ce Figure (I.3), nous proposons un organigramme qui résumé différents types d'isolateurs actuellement disponibles.

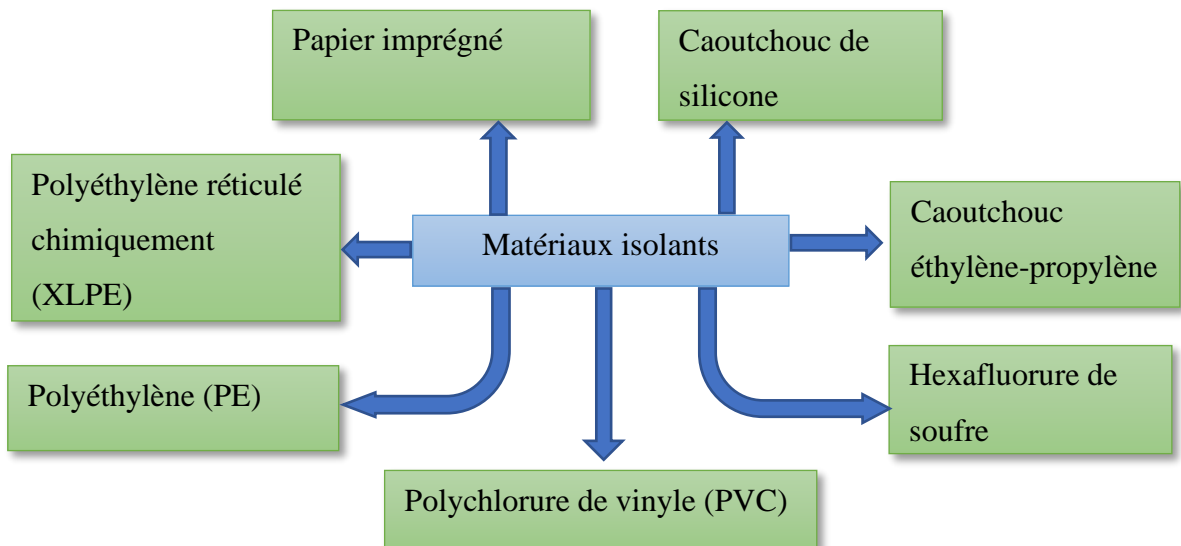


Figure I.3 : Organigramme de différents types d'isolants de câble électrique

I.5.1. Papier imprégné

Pendant des décennies, le papier imprégné d'huile a été l'isolant le plus employé. En France, il n'est plus utilisé pour les liaisons sous tensions alternatives terrestres quelle que soit la tension de service, mais de nombreux réseaux de câbles réalisés avec ce type d'isolant sont encore en service. De tels câbles sont encore fabriqués dans certains pays [21].

I.5.2. Polychlorure de vinyle (PVC)

Le PVC peut intégrer de nombreuses charges, qui sont surtout des minéraux tels que le carbonate de calcium naturel ou précipité, le talc, le kaolin, ou des métaux destinés à améliorer ses propriétés mécaniques, son état de surface et aussi à donner une matière thermoplastique isolante, difficilement inflammable, insensible à l'ozone, résistant aux huiles, aux solvants, aux acides et absorbant peu l'humidité. Ce matériau est sensible à la diffusion éventuelle d'additifs provenant des constituants adjacents (gaines, bourrages). Il sert comme isolant pour la filerie et les câbles d'installation intérieure. On remarque que la permittivité, la résistivité thermique et,

surtout, le facteur de pertes diélectriques sont relativement élevés. Cette dernière caractéristique, en particulier, a limité l'emploi du PVC aux tensions inférieures à 10 ou 15 kV, domaine dans lequel on apprécie sa résistance aux décharges partielles : il est moins sensible à ces dernières que les autres matériaux, et, en particulier, a tendance à s'oxyder en surface [19].

I.5.3. Caoutchouc de silicone

Composé de silicone It self un polymère contenant du silicium avec le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, il résiste bien à l'ozone, à la lumière, à la chaleur, aux huiles et il est utilisable entre $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$. C'est un bon isolant, se transformant, quand le câble brûle, en une masse compacte de silice qui maintient l'isolement. Il est utilisé, essentiellement en BT, pour certaines applications, dans la marine et l'aviation, où la température de l'environnement est très élevée [19].

I.5.4. Caoutchouc éthylène-propylène

Il s'agit de EPR (ethylene-propylene rubber), de EPM (ethylenepropylene matériel) et de EPDM (ethylene-propylene diène monomère). Copolymère ou terpolymère d'éthylène-propylène, réticulable par voie chimique, ce matériau présente une excellente résistance à l'ozone et aux intempéries, et une grande souplesse.

Par ailleurs, on doit souligner son excellente résistance aux décharges partielles et superficielles ainsi qu'aux radiations ionisantes. Ce matériau est surtout réservé aux applications spéciales telles que les câbles souples BT et HTA, où il s'est substitué au caoutchouc butyle [18].

I.5.5. Hexafluorure de soufre

Cet isolant gazeux (SF_6) est de plus en plus employé dans l'appareillage HTA et surtout HTB, compte tenu de ses propriétés particulières : isolement, rigidité diélectrique, tenue à la température. Par analogie avec son emploi dans ces matériels, il est quelquefois utilisé pour des liaisons HTB et THT de relativement courte longueur (dans le monde, typiquement, la longueur unitaire des liaisons faisant appel à ce type de câble est de 230 m en moyenne) et pour lesquelles la puissance transportée est élevée, supérieure ou égale à 2 000 MVA [14].

I.5.6. Polyéthylène (PE)

Le polyéthylène est un polymère de classe des résines synthétiques obtenues par la

polymérisation de l'éthylène gazeux (Figure (I.4)) [17].

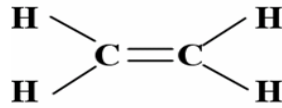


Figure I.4 : Molécule d'éthylène [17]

La polymérisation nécessite l'ajout des réactifs chimiques. Ce sont habituellement des peroxydes (notés R, voir la Figure (I.5)). Sous l'effet de la température supérieur à 150°C par exemple ces réactifs se décomposent en deux radicaux voir la Figure (I.5). Ces derniers permettent d'ouvrir les doubles liaisons et se placent en tête ou en fin de la chaîne. Le centre actif est déplacé à l'extrémité de la chaîne et la réaction peut ainsi continuer.

- Création des radicaux.
- Enchaînement des radicaux avec les molécules d'éthylène.

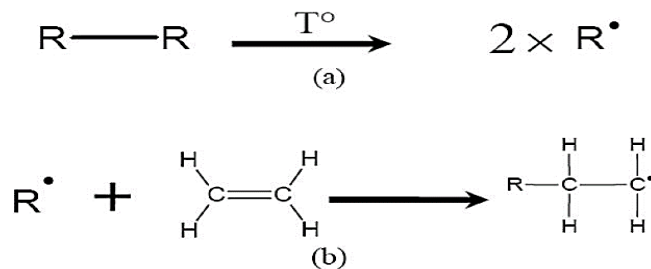


Figure I.5 : Processus de polymérisation [17]

Après la polymérisation, les molécules d'éthylène sont attachées selon l'axe de leur double liaison pour former une longue chaîne contenant uniquement des liaisons simples entre les atomes de carbone. Au niveau macromoléculaire, les chaînes de polyéthylènes peuvent s'associer sous deux structures différentes (figure (I.6)). Une structure cristalline correspondant à l'alignement des chaînes moléculaires qui lui donne les propriétés de permittivité et de résistance mécanique, et une structure amorphe correspondant aux chaînes désordonnées. Cette dernière, étant sensible aux impuretés [17].

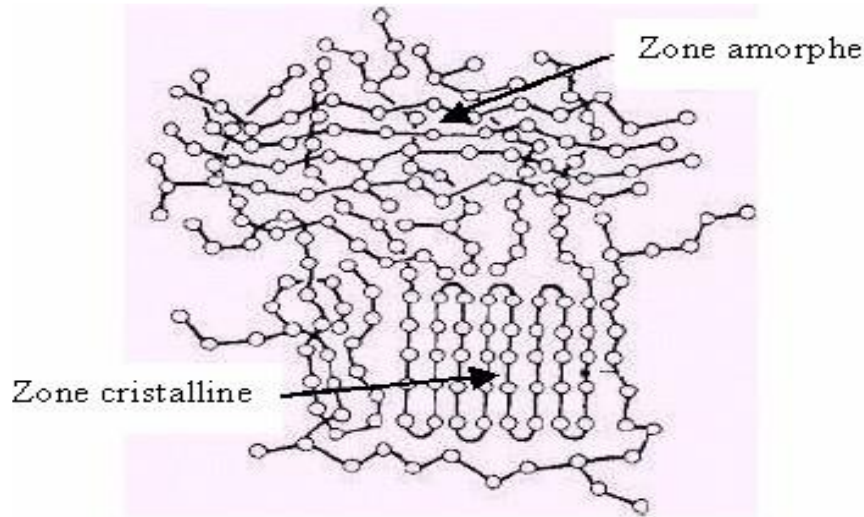


Figure I.6 : Structure macromoléculaire du polyéthylène [13]

➤ Structure amorphe

Les structures amorphes sont caractérisées par l'absence d'ordre des distances entre les macromolécules. Autrement dit, il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation de celles-ci. Les macromolécules peuvent former des points d'enchevêtrement qui sont inévitables à partir d'une certaine longueur de chaînes macromolécules. La longueur des segments entre les enchevêtrements est en général suffisamment grande pour que les segments se comportent comme des chaînes individuelles. Les segments des chaînes sont capables de créer une certaine mobilité moléculaire si des espaces libres sont distribués dans tout le volume [10].

➤ Structure cristalline

Les zones cristallines ou zones à structures ordonnées sont caractérisées par l'arrangement et l'orientation parallèle les unes aux autres des chaînes macromolécules, et entre elles s'établit un réseau d'interaction transversale qui maintiendra la solidité de la structure. Ce qui caractérise le degré de cristallinité de la structure.

Selon la configuration des chaînes de polymères, le polyéthylène est classifié en deux groupes dont les caractéristiques principales sont données dans le tableau (I.2).

Tableau I. 2: Principales caractéristiques des polyéthylènes [18]

Caractéristiques	PEbd	PEhd	XLPE
Température maximale de service (°C)	70	80	90
Température de fusion (°C)	110 - 120	128 - 135	103.5
Température maximale lors d'un court-circuit (°C)	180	130 - 150	250
Permittivité relative ϵ_r à température maximale de service.	2,2 - 2,35	2,3 - 2,4	2,4 - 2,6
Résistivité ($\Omega.cm$)	$10^{15} - 10^{18}$	$10^{15} - 10^{18}$	10^{12}
Résistivité thermique ($K.m.W^{-1}$)	3,5	3	3,5
Conductivité thermique ($W/m.K$)	0,287	0,333	0,287

- Le polyéthylène basse densité (PEbd) est un produit fabriqué sous haute pression environ 3000 bars et une haute température de 400 °C, et il est très ramifié et a une meilleure caractéristique diélectrique.
- Le polyéthylène haute densité (PEhd) est fabriqué sous une pression inférieure à 50 bars et une température inférieure à 180 °C. Il est dit « linéaire » car il est peu ramifié, et il est plus rigide que le PEbd [18].

Les excellentes propriétés électriques du PE (rigidité diélectrique élevée, pertes diélectriques et permittivité relative faible) Par conséquent largement utilisé dans les câbles d'énergie jusqu'à la tension de 500 kV [13 ,15]. Sa résistivité thermique est, de plus, nettement plus faible que celle du papier imprégné et donne ainsi la possibilité de réaliser un refroidissement forcé externe efficace. On ajoute au PE un antioxydant de protection [9].

Afin d'améliorer les propriétés thermiques et mécaniques du polyéthylène, on introduit une autre opération dite de réticulation, on peut obtenir par réticulation le polyéthylène réticulé chimiquement dit XLPE [19].

I.5.7. Polyéthylène réticulé chimiquement (XLPE)

Le matériau (XLPE) constituant l'enveloppe isolante des câbles électriques, chargé d'un antioxydant de stabilisation thermique et de peroxyde de dicumyl l'agent réticulant.

Le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (XLPE) est obtenu par la réticulation du Polyéthylène basse densité (PEbd), qui résulte à son tour, de la polymérisation du gaz éthylène C₂H₄ suivant un procédé à haute pression en présence de traces d'oxygène comme catalyseur. La pression de polymérisation se situe entre 1000 et 5000 bars et la température entre 150°C et 400°C [18]. Le PEbd est constitué par des chaînes macromoléculaires comportant un certain nombre de ramifications de longueurs variables, disposées au hasard du squelette carboné de la molécule Figure (I .7). La réticulation par voie thermochimique du PEbd, pratiquée industriellement au moyen des peroxydes organiques, transforme les chaînes carbonées linéaires ramifiées en un réseau tridimensionnel, par création de liaisons latérales entre atomes de carbone voisins situés sur des chaînes différentes.

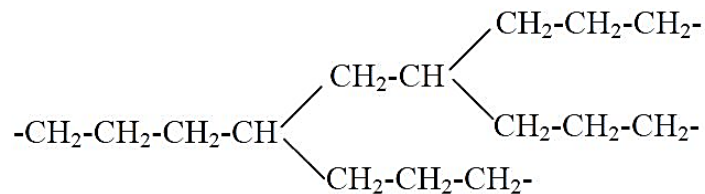
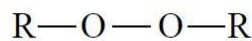
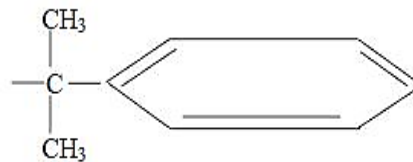


Figure I.7 : Molécule de Polyéthylène ramifiée [10]

Le plus couramment employé est le peroxyde de dicumyl (2% en teneur massique) [19]. Les peroxydes organiques sont des composés dont la structure générale est :



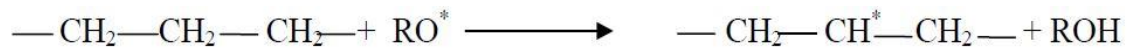
Où R est un radical quelconque aromatique ou aliphatique. Dans le cas du peroxyde de dicumyl, R présente la formule semi-développée suivante :



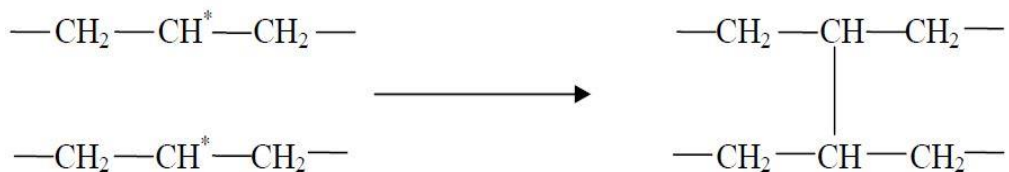
Porté à une température de l'ordre de 180°C et sous une pression de vapeur d'eau ou d'azote, le peroxyde se scinde au niveau des deux atomes d'oxygène pour donner des radicaux libres très réactifs suivant la réaction suivante :



Ces radicaux se combinent avec les hydrogènes de chaînes du polymère pour former des sites réactifs et un alcool :



Puis deux sites réactifs se combinent pour créer un pontage entre deux chaînes :



Le XLPE est un matériau semi-cristallin avec un taux de cristallinité de 35 à 40% ; il est formé d'une phase amorphe hétérogène, de structure non ordonnée et d'une phase cristalline de structure ordonnée, ces deux phases étant fortement imbriquées l'une dans l'autre. Sa température de fusion cristalline est environ 100 à 105°C [20]. La réticulation confère au PEbd des propriétés thermiques et mécaniques améliorées. En effet le XLPE carbonise sans fondre à des températures comprises entre 250°C et 300°C. Il se comporte comme élastomère du point de vue fluage à chaud et donc de la résistance aux courts-circuits. Du fait de la réticulation, la température d'utilisation à la corde est de 90°C et la température tolérée en court-circuit est de 250°C. La réticulation fait disparaître complètement la tendance qu'avait la résine mère à se fissurer au contact d'atmosphères agressives du type oxydante. Les propriétés électriques du XLPE ne sont pas très différentes de celles du polyéthylène. Il semblerait même qu'un XLPE résiste mieux à la propagation des arborescences électriques et au stress-cracking qu'un polyéthylène [10].

I.6 Défauts des isolations haute tension

Les isolations haute tension contiennent souvent des défauts qui sont généralement l'origine de toutes altérations et dégradations des propriétés de l'isolant sous les contraintes de service (champ électrique, température, rayonnement...). Ces défauts peuvent être classés en trois catégories :

- 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 [22].

I.6.1 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.

I.6.2 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 longueur de refroidissement insuffisante. Dans le cas d'un matériau réticulé, c'est le procédé de réticulation qui est responsable de la formation de cavités. 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 [23].

I.6.3 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 [24].

I.6.4 Cavités de gaz

L'agent de réticulation le plus couramment utilisé est le décumule 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. La densité et les dimensions des microcavités dépendent du mode de réticulation. Les différentes évaluations font état de 10^3 à 10^5 cavités/m³ de dimensions comprises entre 1 et 10µm [23].

I.6.5 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, par suite de défauts de fabrication ou à l'existence de contraintes mécaniques consécutives au fonctionnement du système [23].

I.6.6 Hétérogénéités

Elles peuvent conduire à des concentrations locales du champ électrique. Dans le cas des inhomogénéités de forme sphérique de constante diélectrique ϵ , noyées dans l'isolant sous champ uniforme, le facteur multiplicatif du champ n'excède pas 3. Si l'inhomogénéité est de forme ellipsoïdale, le facteur multiplicatif peut être beaucoup plus important [24].

I.6.7 Impuretés

Il est connu que les impuretés jouent un rôle majeur dans l'initiation et la propagation des arborescences d'eau et électrique dans les câbles isolés au XLPE alors la présence de ces impuretés au sein de l'isolant avec de grandes quantités intervient dans la diminution de la durée de vie des câbles. La connaissance de l'origine des impuretés, leurs mécanismes de diffusion et leurs relations avec les propriétés électriques de l'isolant a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. J.P. Crine et S. Péliou ont étudié la présence des impuretés dans les câbles isolés au XLPE. Ils ont conclu que :

- L'origine des impuretés est généralement la forte contamination des écrans semiconducteurs.
- Le processus de fabrication des câbles (à la vapeur d'eau ou en gaz inerte) joue un rôle Prépondérant dans la contamination de l'isolant.
- Les propriétés électriques telles que la rigidité diélectrique, le facteur de pertes diélectriques et la résistivité sont fortement influencées par la présence des impuretés au sein de l'isolant.
- Le vieillissement électrique n'a pratiquement aucune influence sur le processus de diffusion des impuretés dans l'isolant [17].

I.7 Contraintes supportées en service par l'isolation

Lorsqu'un câble de moyenne ou de haute tension est mis en service, les valeurs élevées des champs électriques appliqués à l'isolateur, font apparaître différentes contraintes sur l'isolateur et qui se traduisent soit à long terme ou à court terme par un vieillissement de l'isolation [13].

I.7.1 Tenue aux contraintes diélectriques

On distingue deux phénomènes influant de façons très différentes sur le comportement de l'isolation :

- La contrainte diélectrique normale en service.
- Les surtensions accidentelles de brève durée qui peuvent apparaître aux bornes de l'appareil (câble) pendant le fonctionnement [23].

I.7.2 Contrainte diélectrique normale en service

Les valeurs du champ électrique appliqué aux isolants sont toujours très inférieures à celles qui conduisent à la perforation de l'isolation. Le problème le plus nocif est celui qui est engendré par l'irrégularité de la structure isolante, par exemple, présence d'impuretés conductrices incluses, ou la présence des bulles gazeuses, des gouttes d'eau (voir figure (I.8)), dont des permittivités sont différentes de celle de l'isolant, et qui représentent des intervalles de décharges partielles, menant à la fatigue, donc à la perforation d'isolateur [23].

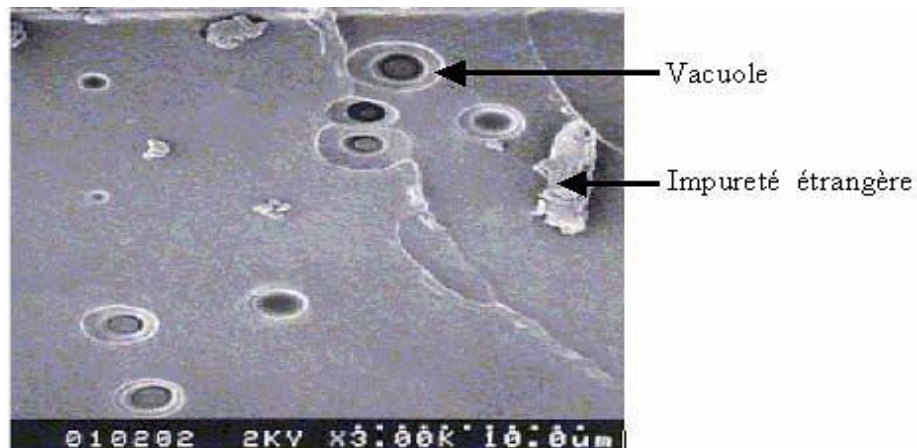


Figure I. 8 : Image d'un échantillon de polyéthylène contenant des défauts [23]

I.7.3 Tenue à la surtension

Les matériaux isolants destinés à supporter les surtensions transitoires qui s'exercent sur l'isolant : chocs diélectriques, chocs thermiques, et mécaniques. Donc, il faut bien entendu connaître, au moins approximativement, l'amplitude admissible de la tension appliquée sans avoir le claquage, et leur durée d'application, et en plus, la forme de ces surtensions dans les cas les plus défavorables pour obtenir une bonne adaptation des isolants aux conditions de service normal, sans surdimensionnement inutile [24].

I.7.4 Tenue aux contraintes mécaniques

Dans tous les matériels, les isolants solides doivent supporter les efforts mécaniques qui s'exercent sur les câbles entre les conducteurs actifs ou entre ceux-ci et l'isolant. Les manifestations les plus courantes, sont les décollements entre conducteurs et leurs gaines isolantes, résultantes à des alternances de dilatation et de contractions répétitives. De ce point, on conclut que l'isolation devra supporter, d'une part les efforts mécaniques normaux et permanents au cours du fonctionnement (les chocs mécaniques, la flexion, la pression, et la torsion), et d'autre part les efforts mécaniques exceptionnels. Il est donc d'une importance capitale de choisir des matériaux isolants dont les caractéristiques mécaniques sont suffisantes pour l'emploi considéré [25].

I.7.5 Tenue aux contraintes thermiques

Dans de nombreuses applications, la température de fusion totale de l'isolant doit être plus élevée que la température maximale de fonctionnement. On notera que les propriétés diélectriques d'isolateur (permittivité relative, résistivité, et le facteur de dissipation diélectrique) dépendent de la température.

On peut prévoir que, les isolants peuvent être soumis à des chocs thermiques exceptionnels très supérieurs à la température maximale de fonctionnement admissible en permanence, notamment lors de court-circuit ou lors de la présence des défauts étrangers. Ce phénomène doit être pris en considération dans le dimensionnement du dispositif, pour qu'on ait une durée et une intensité du courant de court-circuit supportable. En général, ces échauffements n'ont pas une durée suffisante pour produire un vieillissement thermique appréciable, mais dans le cas de la présence d'un corps étranger dans l'isolant, mais il faut tenir compte de :

- Fissurations du diélectrique et décollements dans l'isolant ou entre celui-ci et le conducteur qui fait apparaître des zones de décharges partielles qui prennent naissance à la dégradation de l'isolation.
- Ramollissement des isolations.

Enfin, on conclut que, l'action combinée de tous les facteurs décrits auparavant (contrainte diélectrique, mécanique, thermique) se traduit par un vieillissement d'isolation avec le temps. Et conduira au claquage de l'isolant. Pour comprendre le phénomène de conduction dans les isolants [12].

I.8 Claquage des isolants

Puisqu'aucun isolant ne résiste à une tension illimitée, pour une certaine valeur de tension, il se produit de façon brusque et irréversible un changement d'état qui se manifeste par la perturbation de la propriété isolante d'un diélectrique [26].

Différents Mécanismes de claquage pour les appareils fonctionnant sous haute tension, le diélectrique est un élément délicat. Trois mécanismes principaux décrivent la détérioration globale du diélectrique sous le champ électrique :

- Le vieillissement électrique.
- La dégradation d'un matériel.
- La rupture diélectrique.

Le claquage est la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique, manifesté souvent comme une modification irréversible du diélectrique. Il est le fruit d'une série de processus complexes et interactifs. On peut différencier le claquage intrinsèque du matériau qui est lié à des phénomènes électroniques, thermiques ou mécaniques. Ce sont différents types de claquage [26].

Dans cette Figure (I.9) organigramme qui résumé différents types de claquage des isolants

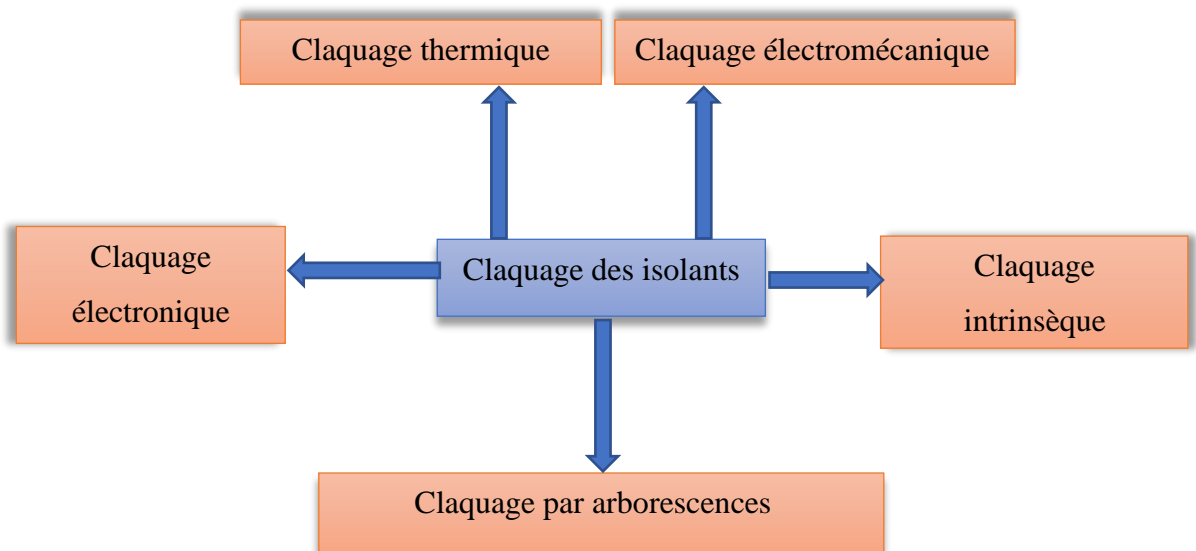


Figure I.9 : Types de Claquage d'isolation des câbles

I.8.1 Claquage intrinsèque

Pour ce type de claquage, on admet que le processus de rupture diélectrique est produit, sous l'effet du champ électrique, il se déroule comme aux gaz produisant des électrons de conduction. Le déplacement des cavités vers la cathode génère des charges qui consolident le champ électrique au voisinage de la cathode. Puis, on obtient une augmentation d'émission des électrons qui conduit à la destruction de l'isolation [27].

I.8.2 Claquage électronique

La présence d'un électron dans le matériau induit une ionisation par collision (sous l'effet du champ électrique) qui entraînera la rupture diélectrique du matériau [28]. Pour produire une avalanche il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit 2 électrons, une avalanche de m générations produit 2^m électrons. La destruction du matériau par avalanche électronique nécessite 40 générations soit 2^{40} électrons (≈ 1099511627776) [29].

I.8.3 Claquage thermique

Les pertes diélectriques provoquent une libération de chaleur dans l'isolant. Lorsque la quantité de chaleur produite est supérieure à celle évacuée, la température augmente, provoquant l'augmentation de la conduction et de la chaleur par l'effet Joule dans une évolution d'instabilité thermique. Il provoque une augmentation de la température de la matière isolante par rapport au milieu ambiant qui produit la dégradation de l'isolant. Le mécanisme se déroule de l'ordre de la seconde. La tension de claquage thermique est reliée à la fréquence f par l'expression suivante :

$$U_c = \frac{C}{\sqrt{f}} \quad (\text{I.1})$$

U_c : Tension de claquage thermique.

C : Etant une constante.

f : Fréquence [28].

I.8.4 Claquage électromécanique

Claquage électromécanique prend en compte l'effort électrostatique qui permet de rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cet effort presse l'isolant solide placé entre les électrodes. Claquage survient si cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module de Young [29].

I.8.5 Claquage par arborescences électriques

Le claquage des isolants est généralement anticipé par une période de croissance d'un défaut, comme la cavité, ou vacuole, dans le matériau. Cette cavité, lorsqu'elle atteint une taille suffisante, est le siège de décharges partielles dont la répétition détruit le matériau et conduit à la formation d'une arborescence où intervient en dernier l'arc électrique.

Les phénomènes d'arborescences sont des facteurs précurseurs du vieillissement du diélectrique Ils constituent une dégradation permanente des matériaux et sont étroitement associés au claquage et à la destruction de tout l'appareillage électrique.

Les arborescences sont des compositions filamenteuses ramifiées constituées de micro-canaux creux sous forme d'arbre susceptibles de se disperser sur des distances de plusieurs millimètres en volume et en subsurface d'isolants figure (I.10).

Ce phénomène destructeur peut apparaitre sans qu'on le sache dans l'isolation et évoluer pendant plusieurs années jusqu'à la destruction [27].



Figure I.10 : Arborescence électrique observée dans un câble HT [1]

I.8.6 Décharges partielles

Le claquage c'est une phase ultime résultant d'une chaîne d'actions des décharges partielles. Ces phénomènes dépendent de la nature du matériau, et de la source d'énergie. Les décharges partielles sont des micros-claquages qui se produisent dans les inclusions gazeuses ou sur les impuretés conductrices piégées dans l'isolant solide. Il est utile de donner la

définition des décharges partiel selon la norme C.E.I (Comite Electrotechnique International) de la publication n° 270. Alors une décharge partielle est définie comme une décharge électrique ne court-circuitant que partiellement l'isolant placer entre les électrodes.

Elle est définie également selon la norme A.S.T.M (Americana Society for Testing and Matériels) comme une décharge localisée engendrée par une ionisation gazeuse transitoire dans un dispositif d'isolation, lorsque les contraintes électriques dépassent une certaine valeur critique [10].

Voilà quelque exemple de claquage de câble électrique figure (I.11).



Figure I.11 : Exemple de claquage d'un câble électrique [23]

I.9 Conclusion

Dans le domaine du transport de l'énergie en HT, la technologie des câbles à isolation synthétique utilisant le polyéthylène réticulé chimiquement (XLPE) est aujourd'hui privilégiée.

Dans ce premier chapitre, nous avons mis en évidence que durant sa phase d'exploitation, le câble ainsi que son isolation sont soumis à des contraintes d'ordre physique (électrique et mécanique) pouvant découler soit de l'exploitation en elle-même (échauffement dû à l'effet Joule, champ électrique).

Ces contraintes peuvent avoir une influence, à plus ou moins long terme, sur les propriétés de l'isolant, et notamment sur ses propriétés diélectriques : génération de pertes, baisse de la tenue en tension, pouvant conduire à une détérioration locale de l'isolant, voire à la rupture diélectrique.

Dans le chapitre suivant, il présentera un modèle pour déterminer les contraintes électriques et électromécaniques dans l'environnement du logiciel COMSOL Multiphysics.

Chapitre II :

Modèle Electrostatique et Simulation des Câbles Electriques

II.1. Introduction

Afin de mieux comprendre l'effet des microcavités sur le phénomène de décharges partielle, Nous simulerons l'isolation artificielle utilisée dans les câbles de transport d'énergie haute tension. Pour déterminer le problème de l'impact des propriétés des cavités sur le phénomène de décharges partielle, il est important de déterminer l'effet de la microcavité elle-même sur la répartition des contraintes électriques et électromécaniques. Les méthodes numériques se sont avérées plus adaptées pour résoudre de tels problèmes. Cependant, cela nécessite des méthodes pour réduire le temps de calcul et améliorer la précision des résultats. Le temps présent, un programme de haute performance a été créé en tant que plate-forme pour résoudre les problèmes matériels avec des termes et des limitations d'une manière d'éléments finis comme COMSOL Multiphysics.

Dans ce chapitre nous allons créer un modèle 2D d'un câble contenant des microcavités. Le modèle planifier pour déterminer les contraintes électriques et électromécaniques dans le câble HT en présence des microcavités, afin de prédire le risque de décharges partielle et la fatigue de câble.

II.2. Méthode des éléments finis (FEM)

La méthode des éléments finis a pris un essor considérable avec le développement des moyens informatiques. Dès les années 1960, elle est devenue, par sa souplesse d'emploi et sa très grande généralité, une méthode numérique indispensable pour la résolution des problèmes aux dérivées partielles [25].

II.2.1 Principe

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante, puisque le choix de la forme de l'élément de maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci, qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude [12].

Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

- Des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions.

- Des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

II.2.2 Étapes de la méthode des éléments finis

Pour une analyse par éléments finis, tout un travail de préparation et de finalisation doit être effectué, c'est ce que nous décrivons dans les étapes suivantes :

1. Discrétisation du domaine : elle consiste à sélectionner la forme des éléments de maillage et sa construction sur l'ensemble du domaine ; numérotation des nœuds et des éléments et des coordonnées.
2. Sélection de la fonction d'interpolation.
3. Dérivation de la formulation variationnelle de l'équation dérivée partielle pour un élément typique.
4. Dérivation de la matrice de rigidité des éléments.
5. Assemblage de la matrice de rigidité globale.
6. Imposition de conditions aux limites.
7. Solution de l'équation globale assemblée.
8. Représentation des résultats sous forme de tableau ou de graphique.

Actuellement, il existe différents logiciels qui utilisent cette méthode comme le Femlab, Maxwell, Flux2D et FEMM. Dans la suite de ce travail, nous allons utiliser le logiciel COMSOL Multiphysics [25].

II.2.3 Avantages de la FEM

- La flexibilité est l'un des plus importants avantages de la FEM. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes, et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
- Les matrices formant le système final d'équations sont symétriques.
- La FEM a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible. Et par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la FEM en détail [12].

II.2.4 Inconvénients de la FEM

- La solution calculée reste toujours dépendante des données numériques initiales (caractéristiques des matériaux, ...) conditions aux limites. En ce sens, l'influence de ces paramètres sur les résultats requiert un nouveau calcul avec d'autres valeurs.
- La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc une remise à zéro dans les calculs.
- Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape. Le traitement d'une problématique par la FEM implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas [12].

II.2.5 Logiciel COMSOL Multiphysics

a) Description de logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique qui englobe toutes les étapes de processus de modélisation : de la définition des géométries, des propriétés des matériaux et de la physique, décrivant des phénomènes spécifiques, à la résolution et au post-traitement de modèles tout en assurant des résultats précis et fiables.

Basé sur la méthode des éléments finis, le logiciel COMSOL Multiphysics® est recommandé pour la création de modèles utilisés dans les domaines d'applications spécialisés ou les domaines d'ingénieries. Pour ce faire, il est possible d'étendre le logiciel par des modules complémentaires de la suite de produits.

Disposant d'interfaces physiques prédéfinies, ce logiciel permet la simulation de plusieurs physiques et applications en ingénierie, et particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Multiplateforme et compatible avec Windows, Mac, Linux, le logiciel COMSOL Multiphysics autorise à l'utilisateur de définir ses propres systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP), soit sous forme différentielle, soit sous formulation faible. Les couplages avec des équations aux dérivées ordinaires (EDO) et des équations algèbre-différentiels (EAD) sont également possibles [26].

b) Modèles :

Plusieurs modèles spécifiques à l'application sont disponibles pour COMSOL

Multiphysics :

- AC/DC
- Acoustics
- Chemical Species Transport
- Electrochemistry
- Fluid Flow
- Heat Transfer
- Optics
- Plasma
- Radio Frequency
- Semiconductor
- Structural Mechanics
- Mathematics

• AC/DC Module

Ce modèle simule les composants électriques et les dispositifs qui dépendent de l'Electrostatique, Magnétostatique et électromagnétique.

➤ Modèle électrostatique

La distribution du champ électrique dans une construction de câble typique est décrite par des modèles de champ bidimensionnels. Le modèle est résolu pour une configuration de système non dégradée comme base pour une analyse plus approfondie.

De plus, la cavité est introduite dans l'isolation du câble modèle pour étudier l'effet de la présence de vide sur le système d'isolation de champ électrique XLPE. Le modèle de champ mathématique pour la distribution de champ électrique dans la cavité est créé en respectant le modèle de champ de câble XLPE monophasé. L'intensité du champ électrique est obtenue à partir du potentiel scalaire à gradient négatif. L'équation de relation de E et V est la suivante [10,26] :

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (\text{II .1})$$

L'équation de la relation constitutive entre le champ électrique E et le déplacement électrique D pour le matériau d'isolation, en termes de permittivité relative de l'isolation et de

l'espace libre, est donnée dans l'équation (II.2). La relation entre le champ électrique E et le déplacement électrique D dans l'espace vide ou libre est donnée dans l'équation (II.3) [5] :

$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon}\mathbf{E} \quad (\text{II .2})$$

Avec : $\boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}_i$

Où :

$\boldsymbol{\varepsilon}$: Permittivité relative.

$\boldsymbol{\varepsilon}_i$: Permittivité relative de l'isolation XLPE.

ε_0 : Permittivité de l'espace libre.

\mathbf{D} : Déplacement électrique du conducteur qui est directement proportionnelle à l'application tension au conducteur.

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad (\text{II .3})$$

Les formes de la loi de Gauss qui implique la charge libre et l'équation du déplacement électrique seront représentées comme [1] :

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (\text{II .4})$$

Où ρ est la densité de charge libre.

En remplaçant l'équation (II.2) et (II.4) dans (II.1) et en introduisant la charge libre comme densité sans charge, l'équation scalaire de Poisson est obtenue comme [1] :

$$-\nabla \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} \nabla V) = -\nabla \cdot (\varepsilon_0 \boldsymbol{\varepsilon}_i \nabla V) = \rho \quad (\text{II .5})$$

Où ρ est la densité de charge.

En raison de l'application d'un matériau de câble ayant une permittivité constante ε appliquée, l'équation (II.5) devient [1,16] :

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{II .6})$$

Si nous admettons que la densité de charges dans l'isolateur est trop faible et peut être négligée, alors l'équation de Poisson (II.6) se transforme en équation de Laplace comme [10,3]:

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{II .7})$$

Le problème est résolu concernant la solution d'équation de Laplace à deux dimensions [10,21] :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{II.8})$$

L'équation (II.8) sera utilisée pour calculer le champ électrique dans l'isolation des câbles et dans la cavité en utilisant la méthode des éléments finis dans le logiciel COMSOL Multiphysics en termes de conditions aux limites [10].

c) Procédure de simulation

COMSOL Multiphysics contient les différentes étapes du processus de simulation « Définition de la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir le domaine physique d'étude, résolution et l'exportation des résultats » sont intégrées dans une interface graphique, représentée dans la figure (II.1).

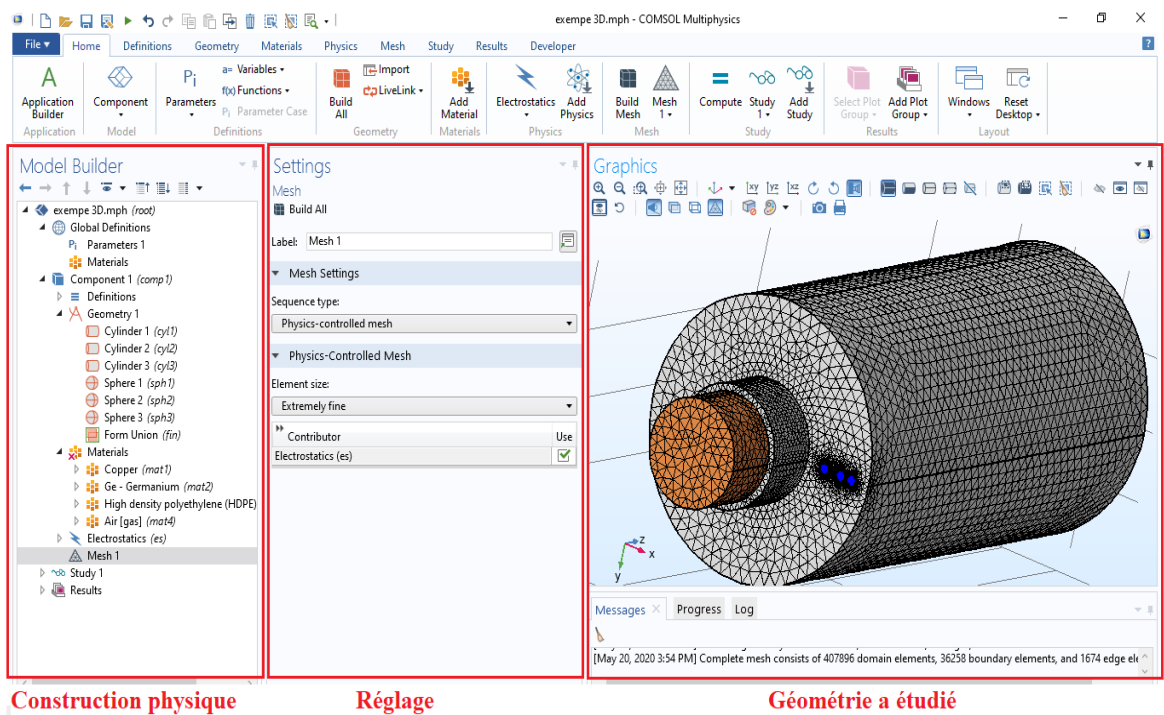


Figure II. 1: Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics

d) Méthodologie de conception avec COMSOL Multiphysics

Dans notre étude on va passer étape par étape commençant par la création de la géométrie du modèle à concevoir.

Après avoir dessiné notre modèle on doit rajouter les caractéristiques de la matière à chacune des formes. Les conditions aux limites et les paramètres du modèle sont rajoutés. La modélisation avec COMSOL Multiphysics il est résumée dans cet organigramme :

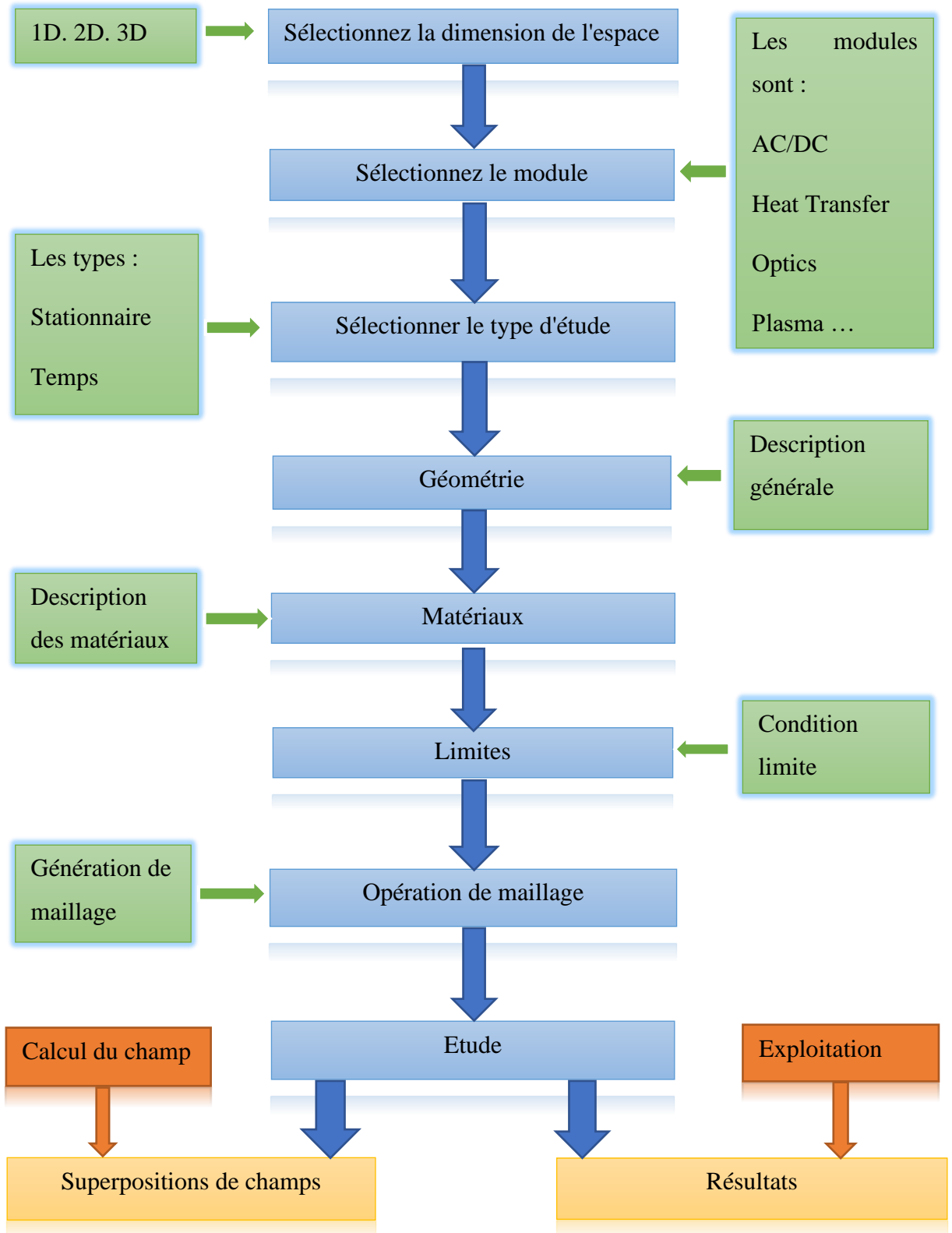


Figure II. 2: Organigramme de différentes étapes de résolution dans COMSOL

➤ Choix du mode d'application

Ce modèle commence par le choix de la dimension géométrique et d'un mode d'application dans la fenêtre Model navigateur qui s'ouvre lorsqu'on lance le logiciel COMSOL Multiphysics. Pour traiter le problème des cavités dans isolateur, nous avons choisi de travailler en deux dimensions.

➤ Géométrie du câble électrique

Dessin et dimension de la géométrie du système

Cette étape consiste à dessiner la forme géométrique et représenter le modèle dans une interface graphique (voire la figure (II. 3)) du logiciel COMSOL Multiphysics pour le modèle de câble en 2D, le tableau.II.1 présente les propriétés du câble utilisé comme modèle :

Tableau. II. 1 Caractéristiques du câble utilisé comme modèle

Type	185 mm ² , Al 30 / 50 kV
Rayon de l'âme	7,65 mm
Couche semi - conductrice sur l'âme	1,00 mm
Enveloppe isolante en XLPE Couche	11,03 mm
Couche semi - conductrice sur l'isolant	1,20 mm
Ecran métallique en fil de cuivre et ruban en cuivre	0,80 mm – 25 × 0,10 mm ²
Gaine de protection en XLPE	5,30 mm
Module de Young du XLPE	0,20 ± 0,44 GPa

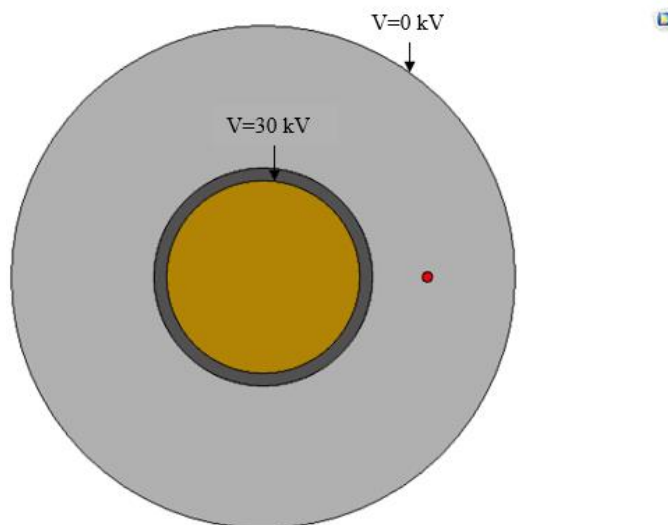


Figure II. 3 : Géométrie du câble électrique avec condition limite

➤ Maillage de câble électrique souterrain

Le maillage de câbles électriques souterrains est fait par la méthode des éléments finis. Le maillage est une discrétisation qui contient un nombre de nœuds, de triangles et d'éléments qui dépendent du système à étudier (la taille la géométrie la nature complexe ou pas) le maillage est représenté dans la figure (II.4).

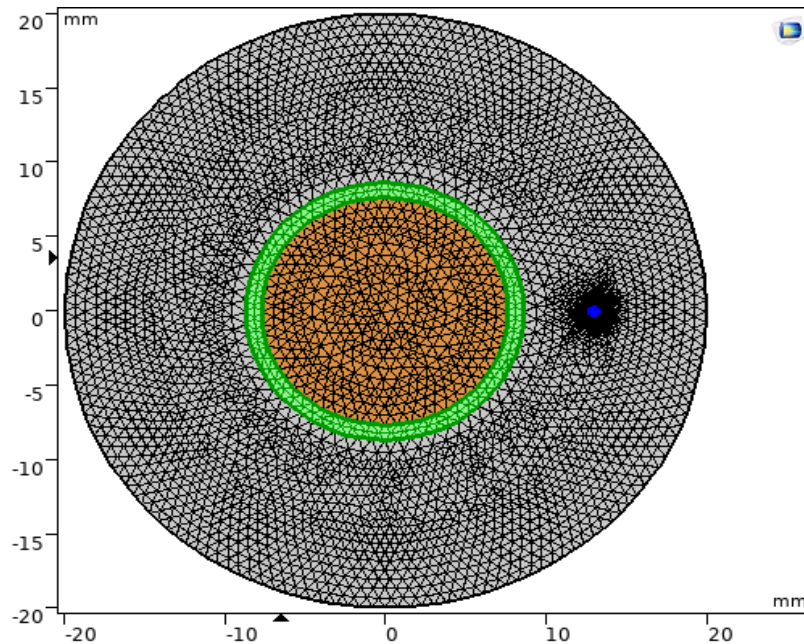


Figure II. 4 : Maillage de câble électrique souterrain

II.3. Calcul des contraintes

II.3.1 Calcul du champ électrique

L'effet de la cavité de permittivité ϵ_c , dans l'isolant de permittivité ϵ_i est évalué en termes de perturbation du potentiel électrique. Le potentiel dans la cavité et dans l'isolant est régi par cette équation [10] :

$$\mathbf{E}_0 = \frac{V_0}{r} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{R_T}{R_C}\right)} \quad (\text{II.9})$$

r : Position quelconque par rapport au center de la cavité

V_0 : Tension du câble

R_T : Rayon du câble

R_C : Rayon de l'âme conductrice

ϵ_i : Permittivité relative de l'isolant (XLPE)

ϵ_c : Permittivité relative de la cavité

On constate que les deux composantes du champ \mathbf{E}_c dépendent de la position et des permittivités des deux milieux. Sachant que $\epsilon_i > \epsilon_c$ le champ à l'intérieur de la cavité est plus élevé que dans l'isolant.

II.3.2 Calcul de la pression électrostatique dans une cavité

Le champ électrique crée une pression sur les parois de la cavité, entraînant ainsi une déformation du défaut. Cette pression électrostatique se calcule selon l'expression suivante [10,21] :

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_i \mathbf{E}^2 \quad (\text{II.10})$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide, ϵ_i est la permittivité relative de l'isolant (XLPE) et \mathbf{E} le champ électrique.

II.3.3 Calcul de l'allongement des cavités

Quand les parois d'une cavité sont soumises à une pression électrostatique, il se produit un allongement de celle-ci dans le sens du champ électrique (allongement dans les sens radial et tangentiel). Si cette pression est suffisante pour une déformation considérable, le champ se trouve renforcé et provoque un claquage local et par conséquent l'affaiblissement de la rigidité diélectrique du matériau isolant. A l'équilibre la pression électrostatique (équation (II.10)) est égalisée par la réaction élastique du matériau [10] :

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_i E^2 = Y \ln \frac{d_0}{d} \quad (\text{II.11})$$

Y : module d'élasticité de Young

d_0 : épaisseur initiale du matériau

d : épaisseur du matériau après déformation

De l'équation (II.11), on définit le taux de compression de l'isolant ou le taux d'allongement de la cavité par l'expression suivante [10] :

$$\frac{d_0}{d} = \exp \left[\frac{\mathbf{P}}{\mathbf{Y}} \right] \quad (\text{II.12})$$

II.4. Validation de modèle

II.4.1 Etat d'isolement homogène

➤ Première étape

Nous avons vérifié la validation de notre modèle de calcul pour nous assurer qu'en l'absence des défauts technique, la diminution du champ électrique sur le long de l'isolateur, par le modèle analytique à l'aide de MATLAB, est similaire à celui calculé à l'aide de la simulation numérique par Logiciel COMSOL Multiphysics Figure (II. 5).

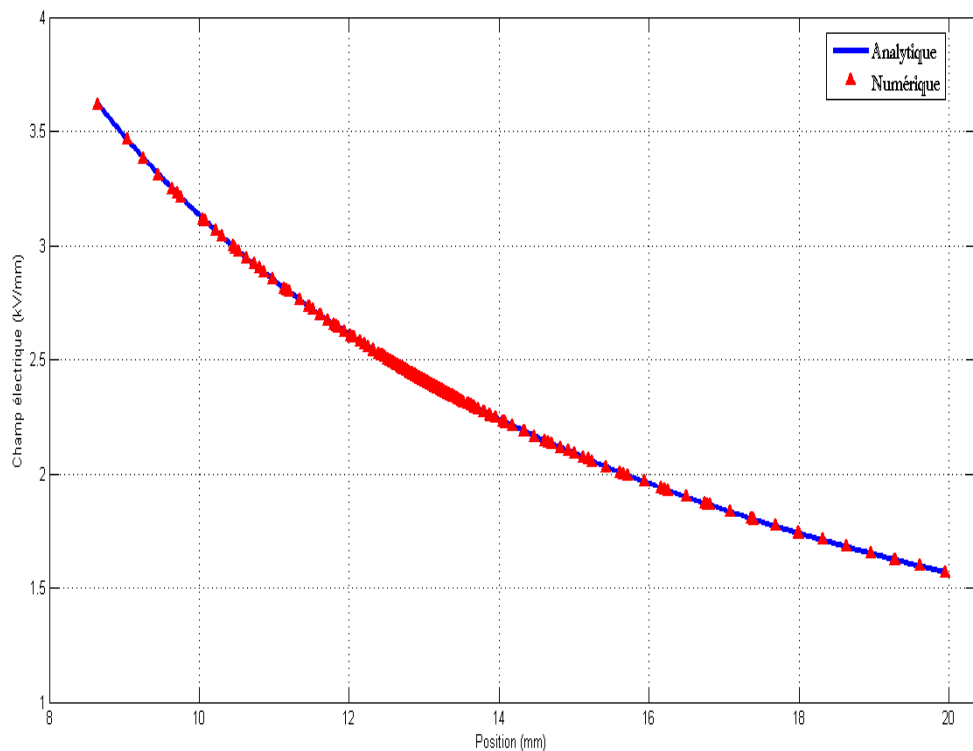


Figure II. 5: Comparaison de la distribution du champ électrique dans l'isolement sans cavité (homogène) entre une étude analytique et une simulation numérique

➤ Deuxième étape

Nous avons réussi à tester la procédure de calcul du champ électrique dans le cas d'une présence de cavité, nous considérons une cavité avec les mêmes propriétés d'isolation ($\epsilon_c = \epsilon_i = 2.3$). La comparaison entre les résultats obtenus et les résultats de condition homogène est satisfaisante. Figure (II.6).

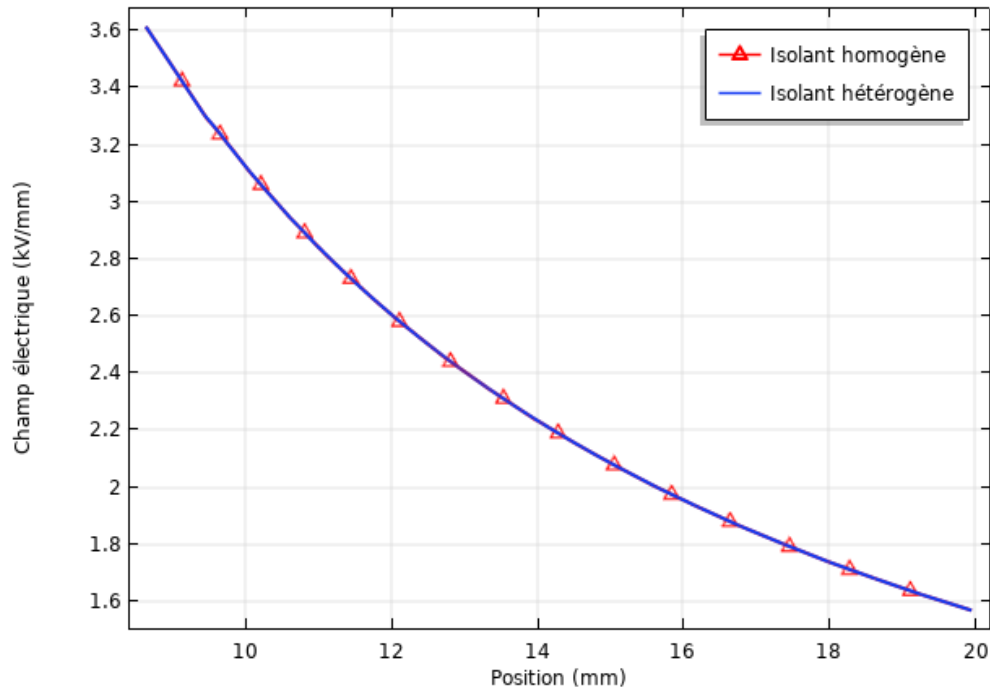


Figure II. 6 : distribution du champ électrique dans l'isolation contenue une cavité de même permittivité de l'isolant (XLPE)

Maintenant notre modèle est validé, nous pouvons dire que ce modèle est intact et qu'il n'y a aucun défaut technique, et nous pouvons maintenant faire des expériences avec lui.

II.5. Conclusion

La détermination de la distribution du champ électrique de tout système de haute tension, est un problème de calcul complexe. Pour remédier à ce problème, la Méthode des Éléments Finis était la mieux adaptée aux nécessités imposées par le problème.

Logiciel COMSOL Multiphysics peut servir d'une manière puissante et interactive à résoudre en se fondant sur FEM. Nous avons créé un modèle et l'avons validé pour prouver qu'il ne présente aucun défaut technique.

Dans le dernier chapitre qui suit nous allons présenter et interpréter les résultats de simulation concernant la distribution du champ électrique, pression électrostatique et allongement des microcavités contenant dans l'isolateur (XLPE).

Chapitre III :

Résultats et Discussions

III 1. Introduction

Un modèle d'analyse de la géométrie 2D d'un câble a été développé par logiciel COMSOL Multiphysics pour prédire en régime statique l'activité des paramètres physiques : champ électrique, pression électrostatique, et allongement de la cavité dans l'isolation XLPE.

Dans ce chapitre, nous avons divisé notre étude par simulation en trois parties : cas d'une seule cavité, deux cavités et présence de trois cavités dans l'isolant. Où l'on change la position, la taille, la forme et la permittivité relative de la microcavité, puis interpréter les résultats obtenus.

III 2. Résultats et discussion

III.2. 1. Cas d'une cavité

a. Variation du champ électrique dans une cavité

Ce cas (cas hétérogène) simuler l'isolant de câble contenant une seule cavité. On suppose que la partie isolante contient une cavité d'air de diamètre $10\mu\text{m}$ et de position 13mm du centre de l'âme conductrice. Cependant la figure (III.1) montre bien que la présence d'une cavité influencée sur la distribution du champ électrique dans la région où elle est localisée. On voit clairement la distorsion des lignes de champ de la cavité.

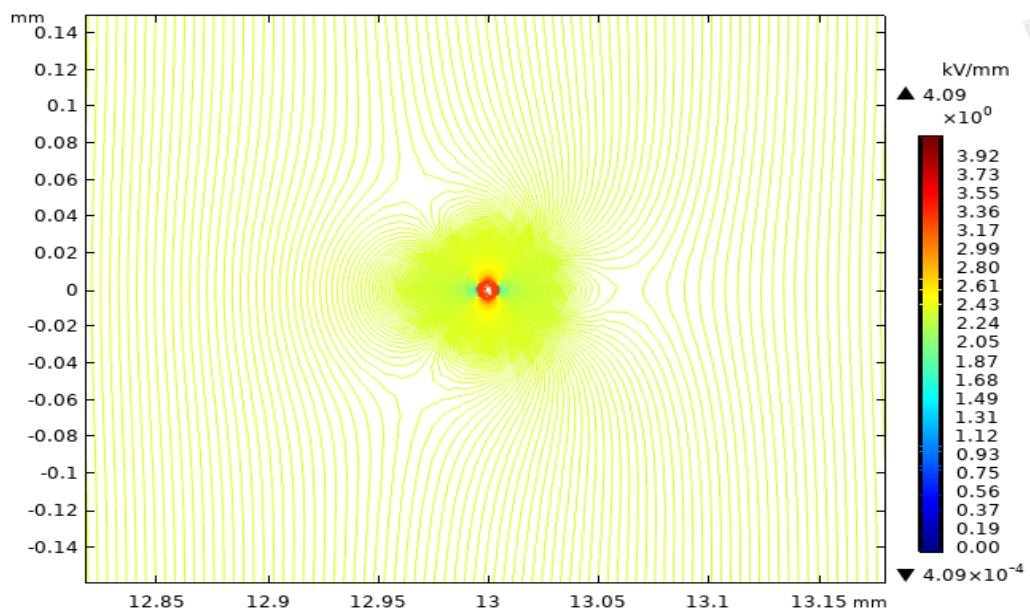


Figure III. 1: Effet de la présence d'une cavité d'air de diamètre $10\mu\text{m}$ sur le champ électrique

On note que la présence d'une cavité affecte la répartition du champ électrique dans la région où il se situe et cette région est appelée région d'influence, elle montre bien une augmentation de la valeur du champ électrique, comparée à sa valeur initiale (cas homogène) figure (III.2), cette augmentation de la valeur du champ expliqué par la faible valeur de permittivité de l'air ($\epsilon_r = 1$).

Les résultats montrent que la valeur du champ à travers les parois d'une cavité est inférieure à celle d'un champ à l'intérieur de la cavité. Ceci nous mène à dire qu'aux bords de la cavité une polarisation s'établie [7], comme le montre la figure (III.3), qui s'oppose au champ électrique extérieur et diminue donc le rapport des champs à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité.

L'augmentation du champ électrique dans la cavité affecte la pression électrostatique où l'on note en figure (III.4). Les résultats de la pression électrostatique décroît aux interfaces cavité-isolant et croît jusqu'à la valeur double pression dans la cavité.

Quand les parois d'une cavité sont soumises à une pression électrostatique, il se produit un allongement de celle -ci dans le sens du champ électrique figure (III.5).

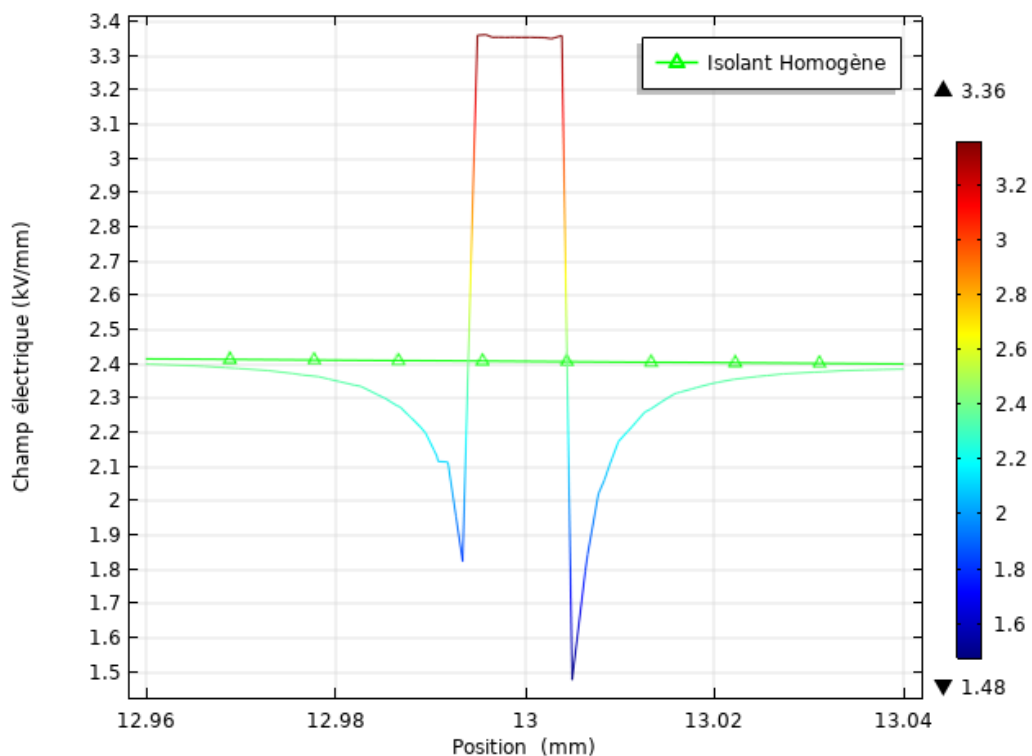


Figure III. 2: Distribution du champ électrique dans la zone contenant une cavité

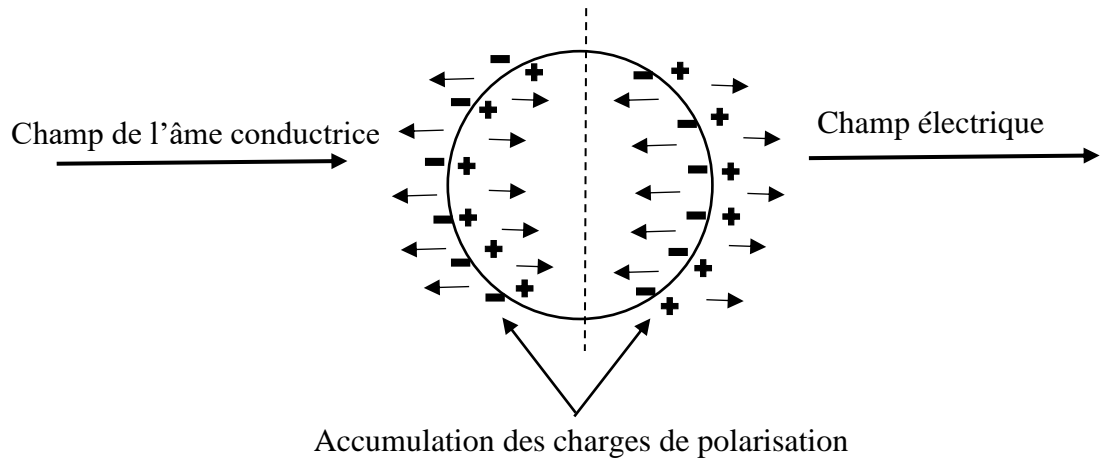


Figure III. 3: Polarisation au niveau de la cavité

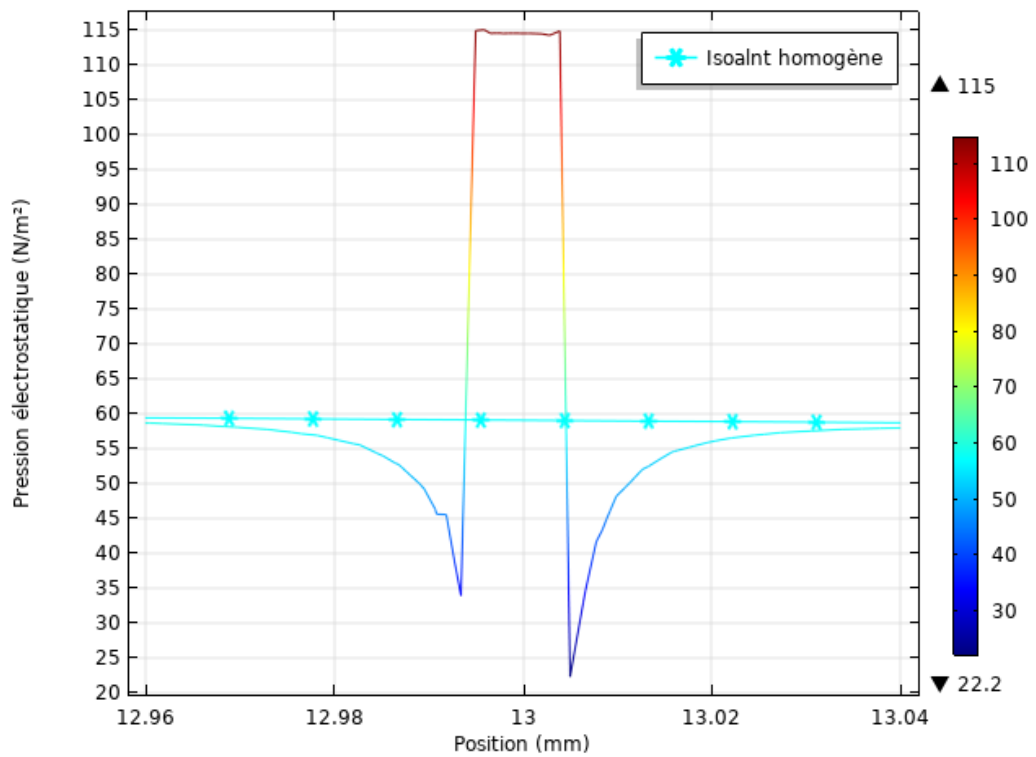


Figure III. 4: Distribution de la pression électrostatique dans une zone contenant une cavité

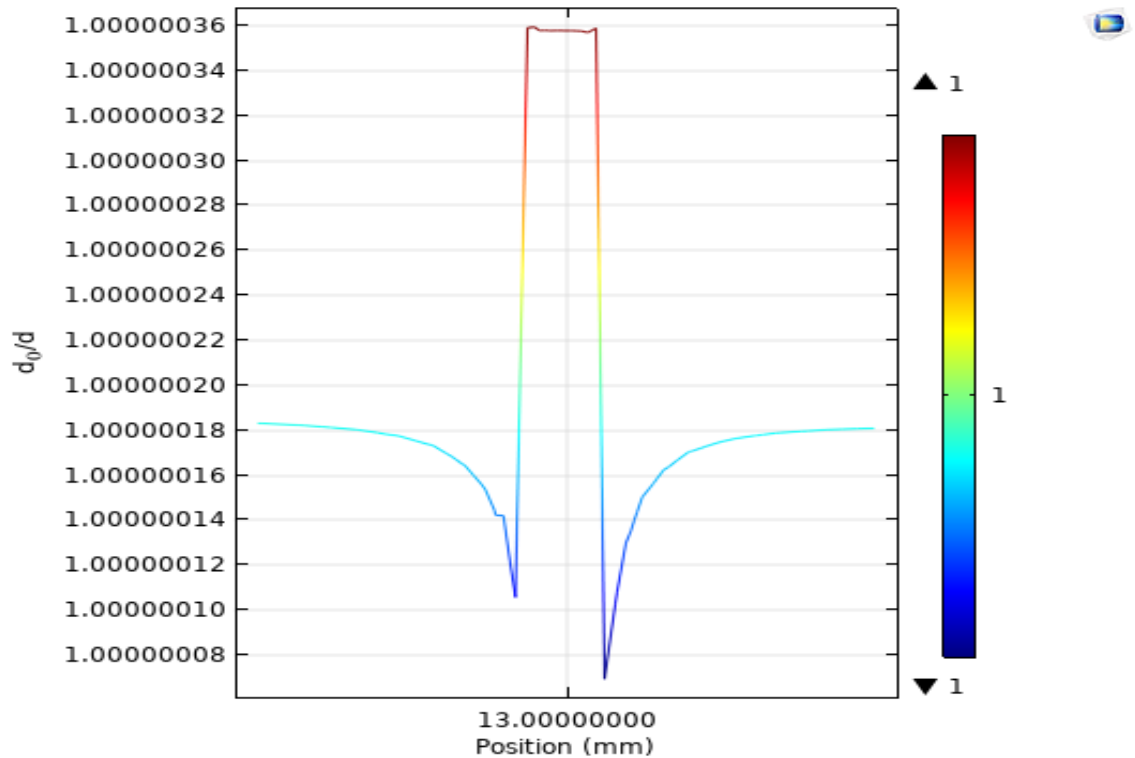


Figure III. 5: Allongement d'une seule cavité

b. Variation du champ électrique et de la pression électrostatique en fonction de la taille de la cavité

Dans cette partie nous s'intéressons à l'influence de la taille de la cavité sur la valeur maximale du champ électrique et de la pression électrostatique dans la cavité. La distribution de champ électrique et la pression électrostatique dans des cavités de différentes tailles (1 μm , 3 μm , 5 μm , 10 μm , 12.5 μm , 15 μm , 17.5 μm , 20 μm , 25 μm) est calculée pour une seule position.

D'après les figures (III.6) (III.7) qui donnent la variation des contraintes (champ électrique et la pression électrostatique) en fonction de la taille de la cavité, montre que la taille des cavités n'a aucune influence sur les valeurs maximales des contraintes.

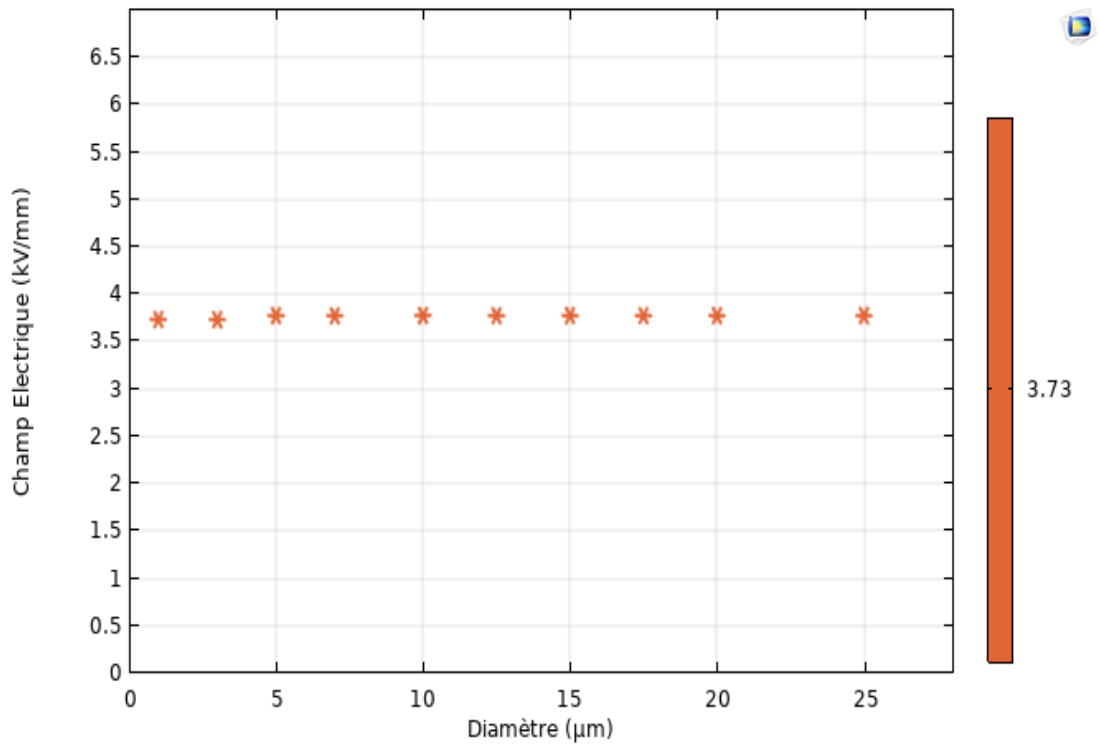


Figure III. 6 : Variation du champ en fonction de la taille de la cavité

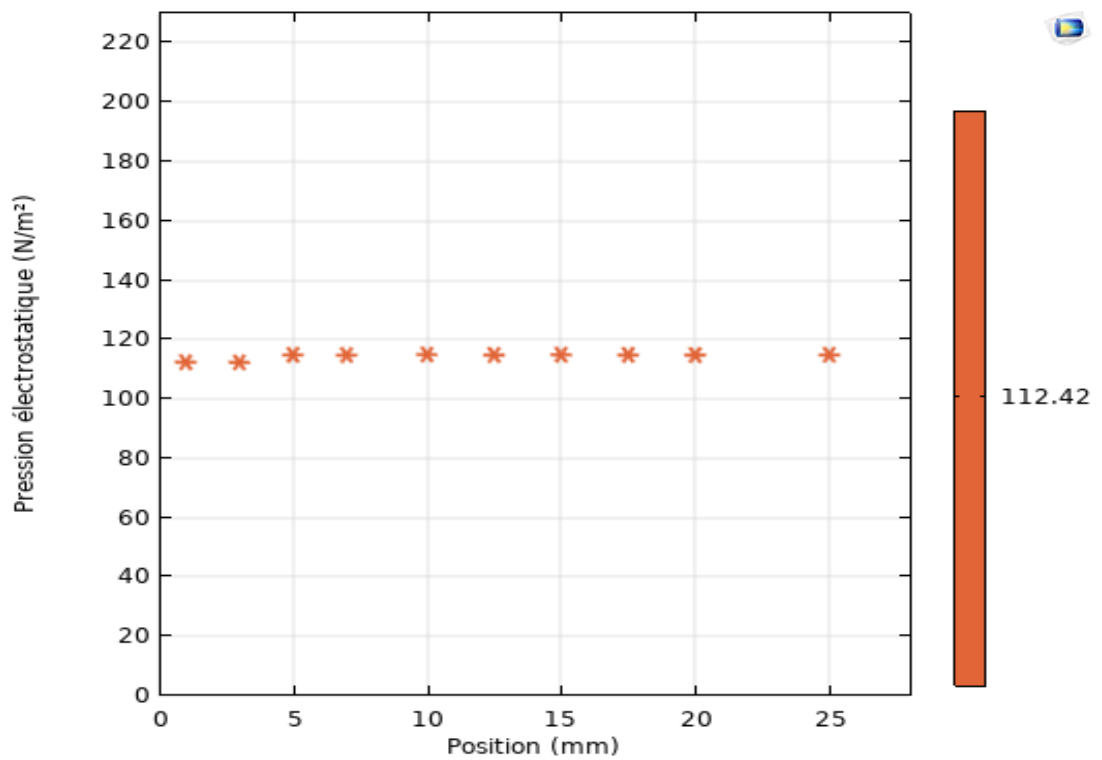


Figure III. 7 : Variation de la pression en fonction de la taille de la cavité

c. Variation du champ et de la pression électrostatique en fonction de la position de la cavité

Afin de mettre en évidence l'influence de la localisation de la cavité, nous avons introduit une cavité de diamètre de 10 μm dans six différentes positions d'une partie isolante (9,10,12,15,17,19) (mm) par rapport le centre de l'âme conductrice.

Selon les figures (III.8 - III.9) montre que l'augmentation des contraintes (champ électrique, pression électrostatique) dans la cavité dépend de sa position dans la partie isolante, donc montré bien que cette augmentation soit plus importante lorsqu'elle est située près du l'âme conductrice.

Elle laisse conclure que les cavités forment une condition critique si elle est située près du l'âme conductrice. Le champ électrique est plus fort et il peut atteindre une valeur critique $E_c = 3 \text{ kV/mm}$, pour cela se produit une décharge partielle dans la cavité [7].

Donc la conclusion à tirer est qu'avant que la position soit à 14,7 mm du centre de l'âme conductrice (53% de l'isolant), elle est grande probabilité qu'il y ait des décharges partielles dans les cavités, affectant tout risque instantané pour le comportement du câble.

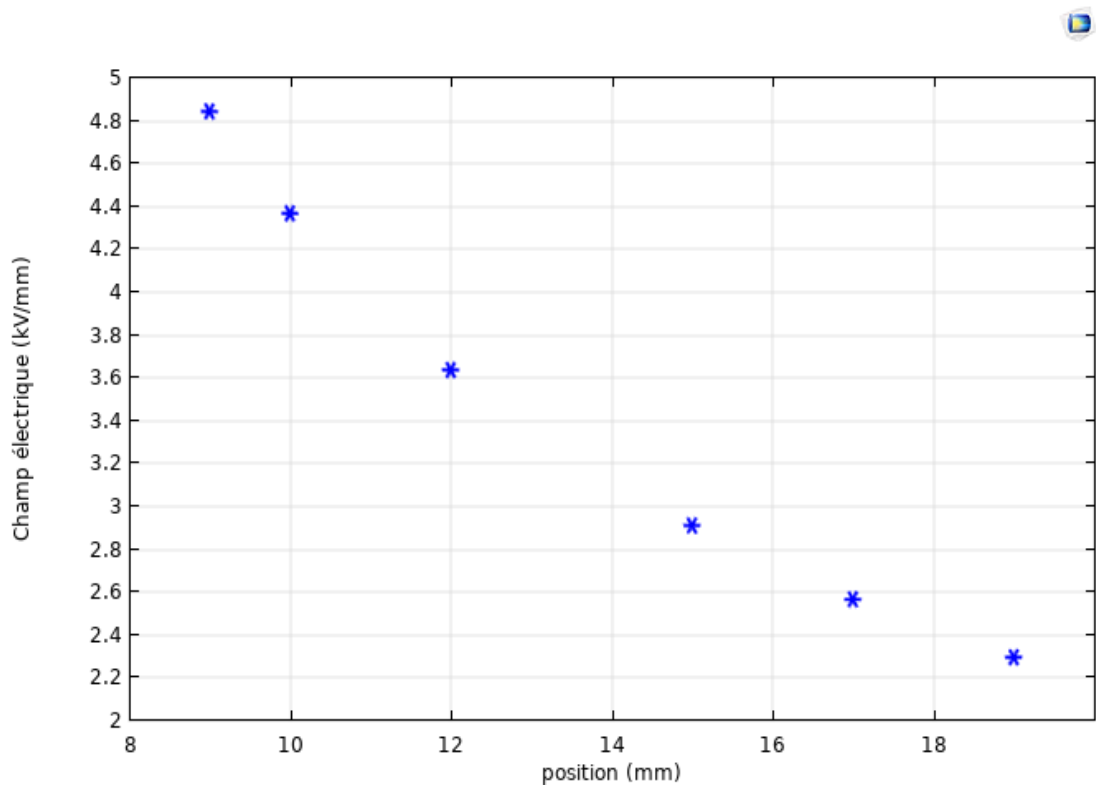


Figure III. 8 : Variation du champ en fonction de la position de la cavité

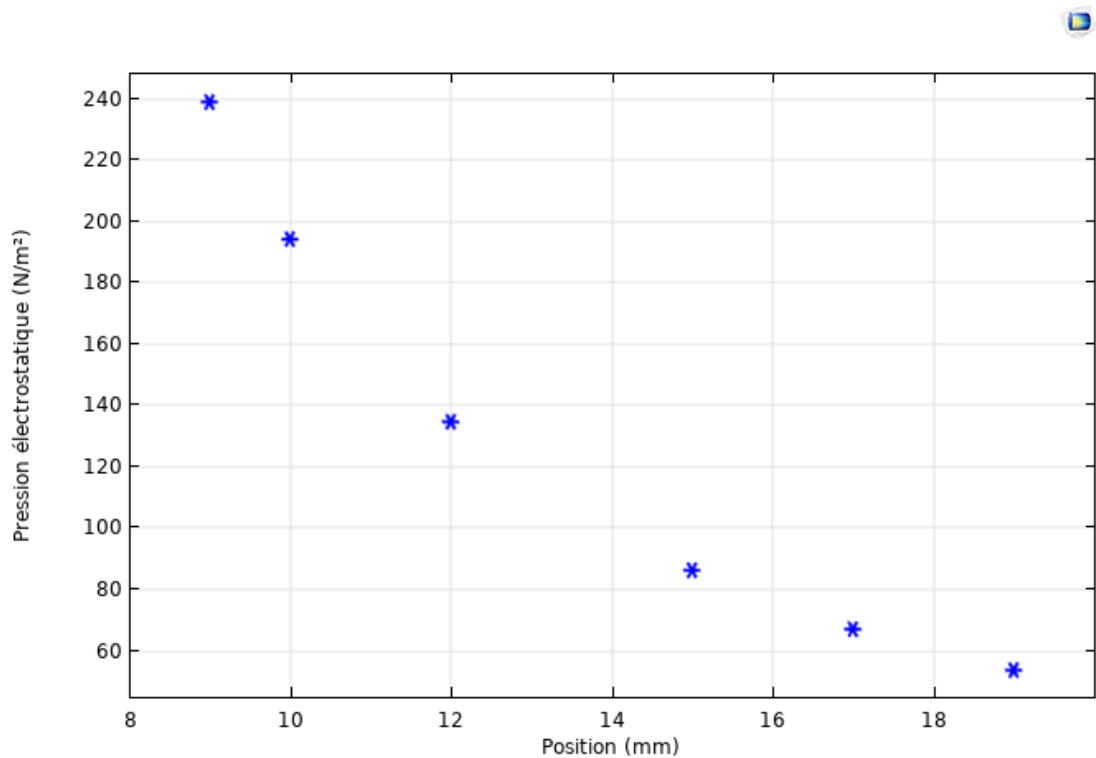


Figure III. 9 : Variation de la pression en fonction de la position de la cavité

d. Variation de l'allongement en fonction de la position et la taille de la cavité

Dans cette étape, nous avons calculé l'allongement de la cavité par rapport à son changement de taille et la position, où nous avons identifié différentes position ($P_1 = 8.67mm$. $P_2 = 9.67mm$. $P_3 = 11mm$. $P_4 = 13mm$. $P_5 = 16mm$. $P_6 = 19.93mm$). Dans chaque position, la taille de la cavité est modifiée par cinq cas différents ($D_1 = 1\mu m$. $D_2 = 5\mu m$. $D_3 = 10\mu m$. $D_4 = 15\mu m$. $D_5 = 20\mu m$) et les résultats obtenus sur la figure (III.10).

Nous remarquons à partir de la figure (III.10) plus la cavité est près de l'âme, plus l'allongement de la cavité est important.

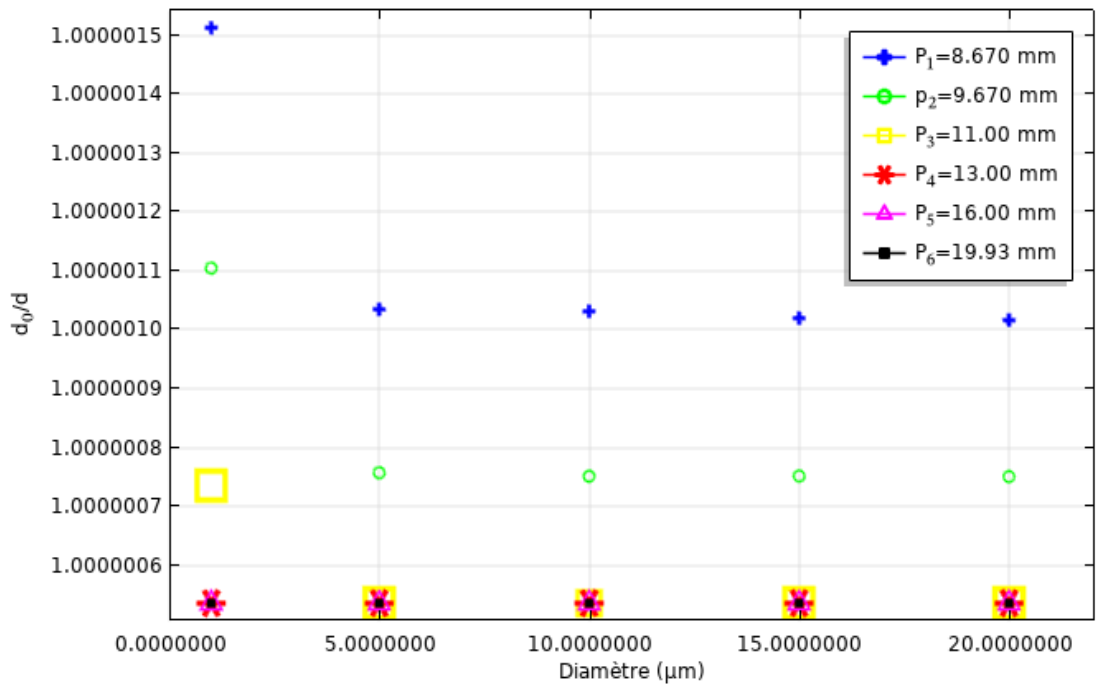


Figure III. 10: Allongement de la cavité en fonction de son diamètre et position

e. Champ électrique en fonction de la forme de cavité

Nous avons trouvé des formes de cavité qui peuvent réellement être trouvées dans la taille de l'isolant, le choix de la forme sphérique et elliptique :

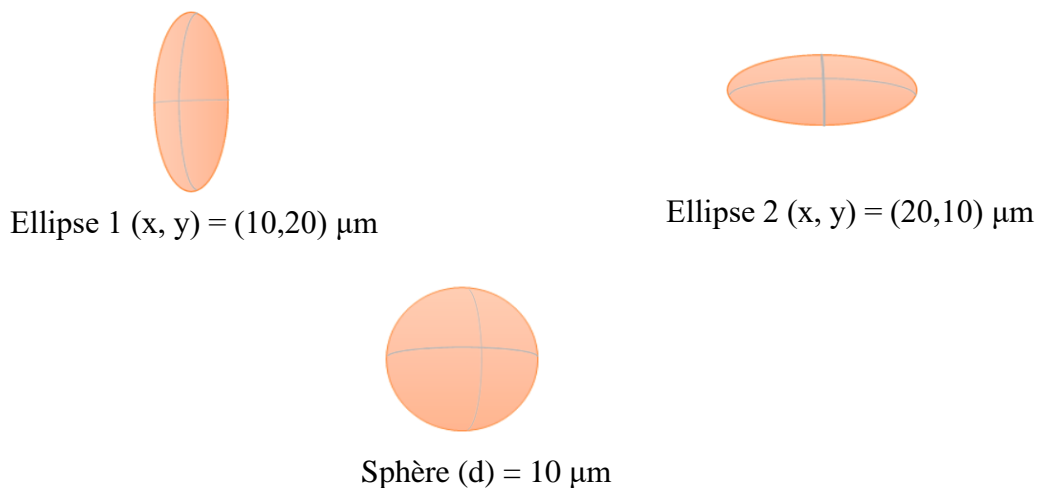


Figure III. 11: Formes des cavités utilisées

Ellipse 1 : Cavité elliptique dans le sens transversal du champ électrique.

Ellipse 2 : Cavité elliptique dans le sens du champ électrique.

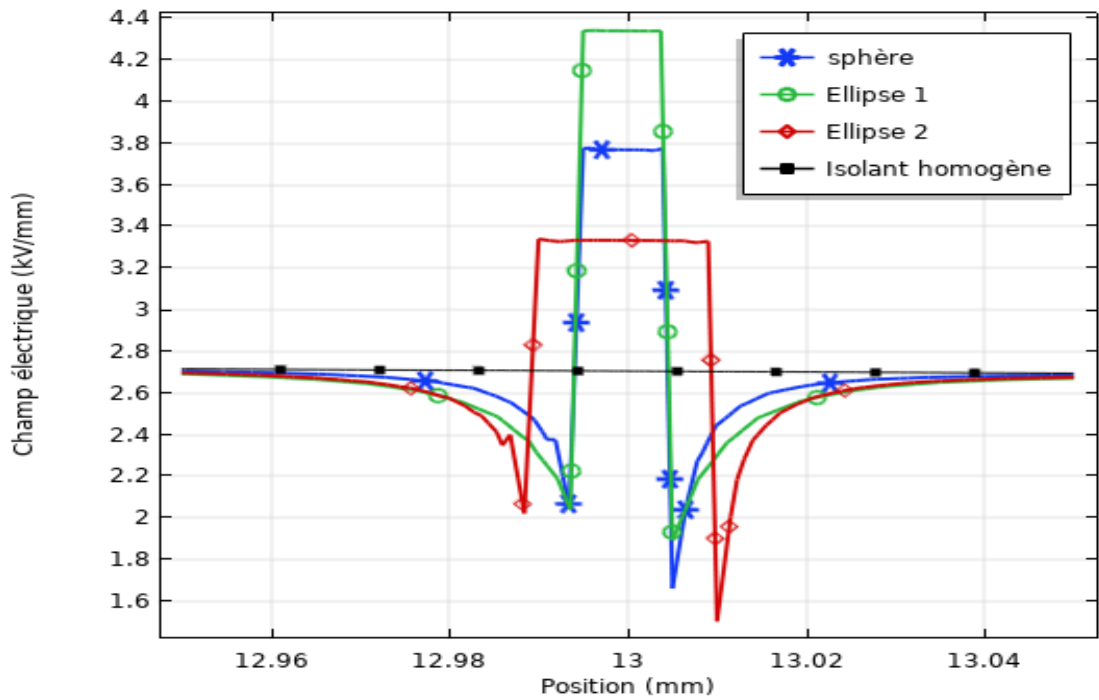


Figure III. 12: Variation du champ en fonction de forme de la cavité

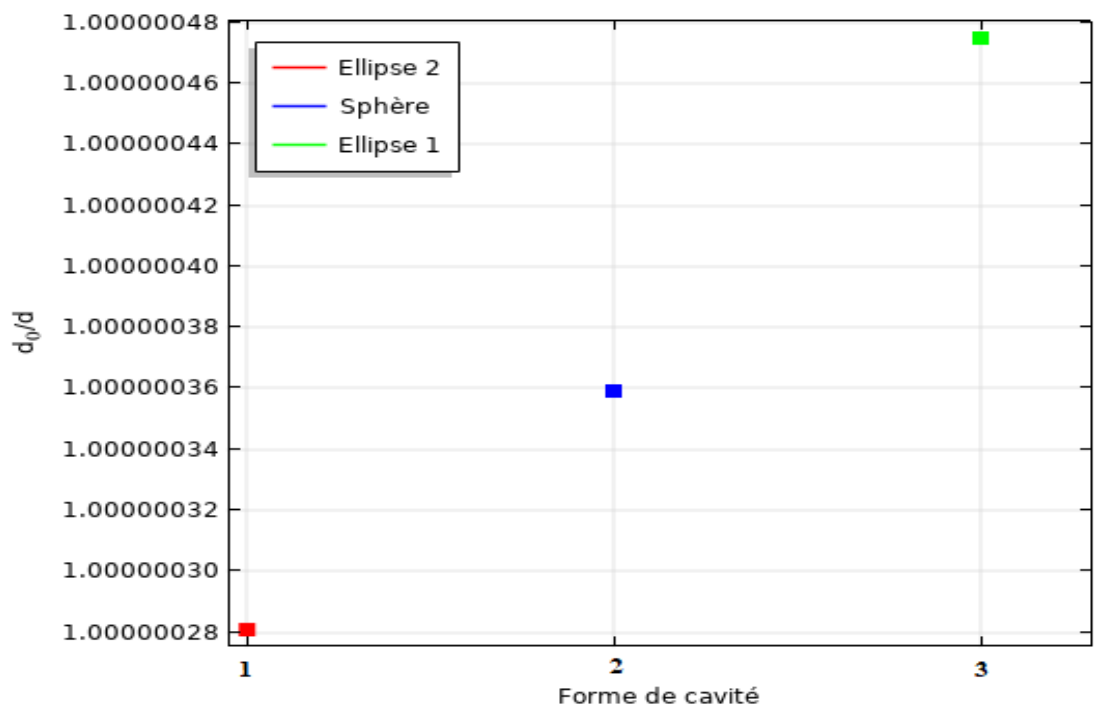


Figure III. 13 : Variation de l'allongement en fonction de forme de la cavité

Pour ces formes utilisées Figure (III.11), il est tout à fait clair que la présence d'une cavité de forme elliptique dans le sens transversal du champ électrique représente le cas le plus

dangereuse. Le champ électrique augmente de 34 % par rapport à la valeur de champ électrique de forme sphérique, figure (III.12).

Nous concluons que l'augmentation importante de la valeur du champ électrique associée à l'augmentation de taille de la cavité transversalement par rapport la direction d'un champ électrique Figure (III.13).

III.2. 2. Cas de deux cavités

a. État de deux cavités à la même taille et permittivité relative

Nous déterminons l'effet de deux cavités qui ont la même taille ($d=10 \mu\text{m}$) et la même permittivité relative ($\epsilon_r = 1$) sur les contraintes (champ et pression) et allongement de la cavité.

Selon la figure (III.14) montre la distribution radiale du champ électrique pour les deux cavités en interaction, à une distance inférieure à trois fois la taille de cavité. Les valeurs du champ électrique sont de valeurs moindres par rapport au cas où une cellule était seule dans la même position et on note le champ dans la cavité situé à le côté de la gaine est élevé que le champ dans la cavité située du côté du l'âme, cela est dû à l'influence mutuelle entre les cavités.

Peut s'expliquer comme suit : la cavité située du côté de la gaine joue le rôle d'une source supplémentaire de polariser la cavité adjacente [21].

Sur la figure (III.15), la pression électrostatique à l'intérieur des cavités est de valeur inférieure par rapport à la cavité unique, qui est affectée par le champ électrique. Ainsi la valeur de l'allongement des deux cavités correspond (figure III.16).

On conclure que pour les cavités se rapprochent suffisamment pour qu'une influence mutuelle puisse avoir lieu, les deux cavités deviennent moins vulnérables à l'apparition des décharges partielles que dans le cas d'une isolation contenant une seule cavité.

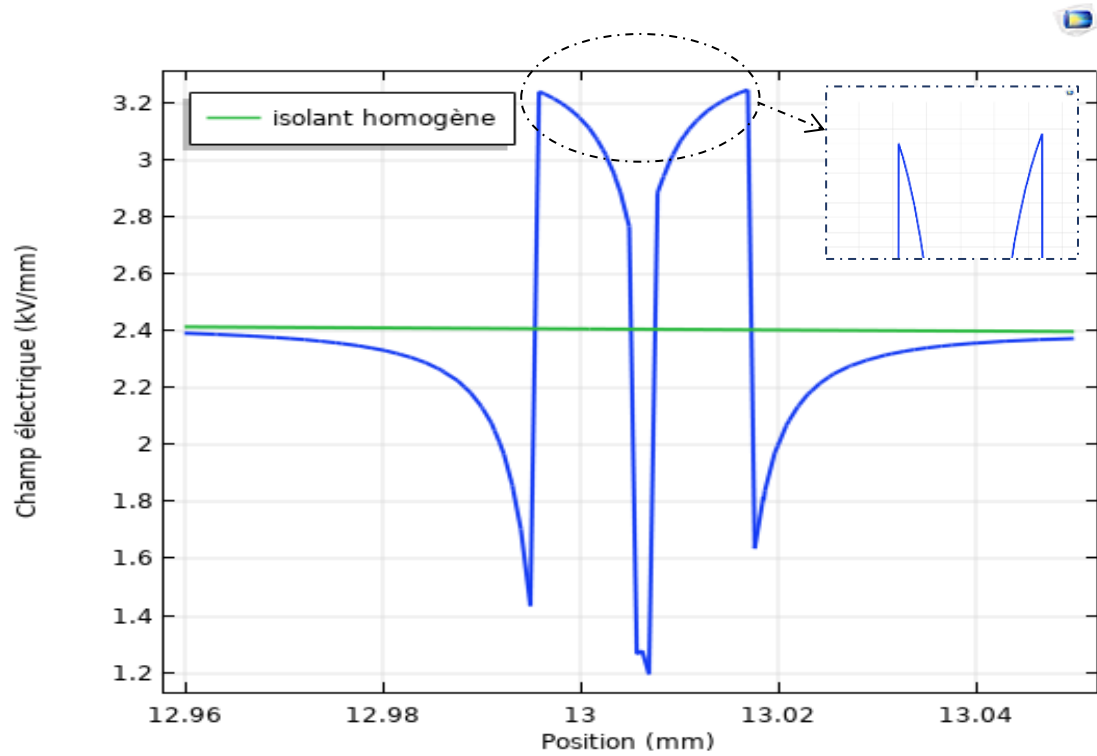


Figure III. 14: Distribution du champ électrique en deux cavités en interaction

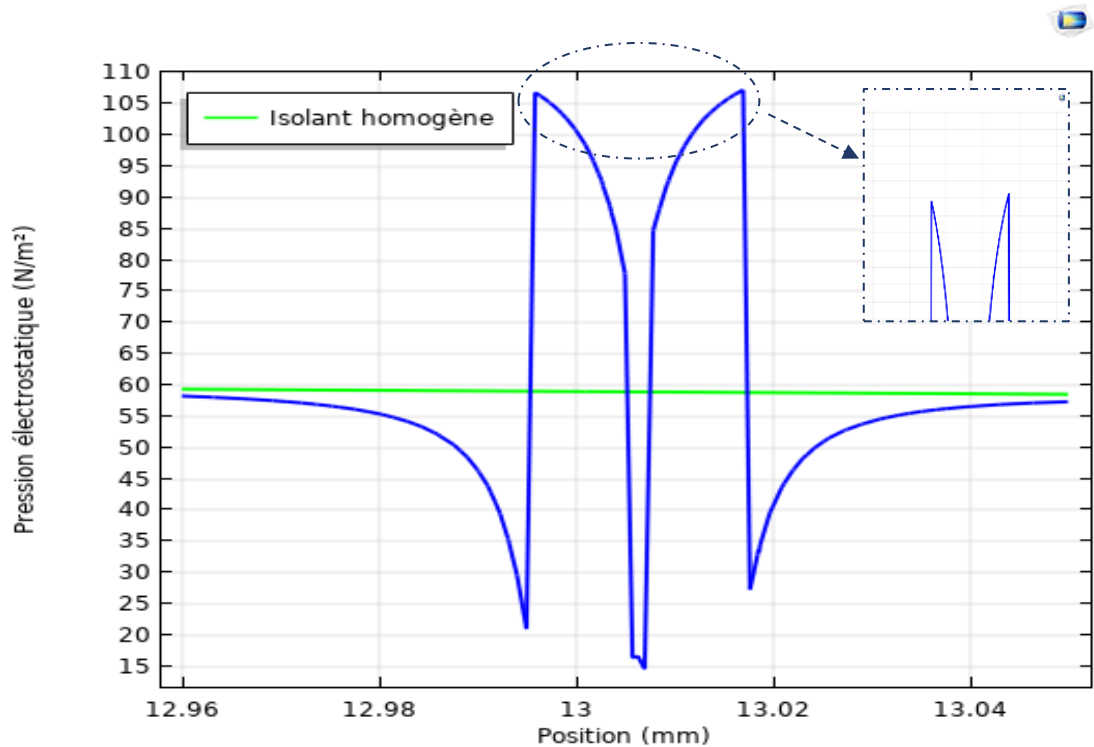


Figure III. 15: Distribution de la pression électrostatique en deux cavités en interaction

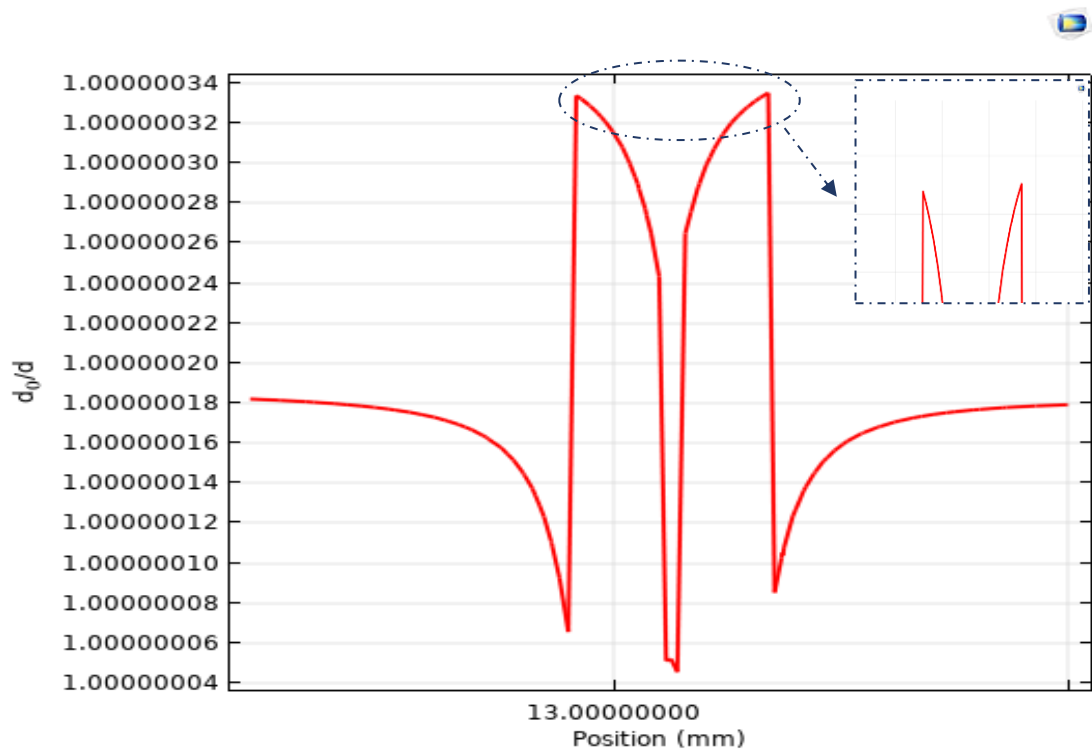


Figure III. 16: Allongement en deux cavités en interaction

b. État de deux cavités de taille différente et à la même permittivité relative

Nous déterminons l'effet de deux cavités qui ont de taille différente et avec la même permittivité sur la distribution radiale du champ électrique.

L'effet interaction de deux cavités avec des tailles différentes est présenté dans les figures (III.17-19), et on note sur la figure (III.17), la cavité située au côté de la gaine d'une taille ($d_1=20\mu\text{m}$) entraîne une augmentation du champ supérieur au champ d'une cavité située du côté de l'âme d'une taille ($d_2= 10\mu\text{m}$), contrairement à ce qui a été trouvé sur la figure (III.19).

On peut s'expliquer comme suit : La valeur du champ électrique associée aux tailles de la cavité varie en présence d'une autre cavité. Plus la taille de la cavité est grande, plus la valeur électrique du champ sera élevée, Quel que soit son emplacement par rapport aux secondes cavités.

Pour deux cavités de diamètres différents, la pression électrostatique sur la ligne passant par le centre de la cavité de plus grand diamètre, positionnée du côté de la gaine, est supérieure que celle de sa voisine de diamètre inférieur (côté de l'âme) (figure III.18).

En inversant la position de ces deux cavités figure (III.20), la situation précédente est la même : la pression est plus importante dans la cavité la plus grande. Contrairement au cas précédent.

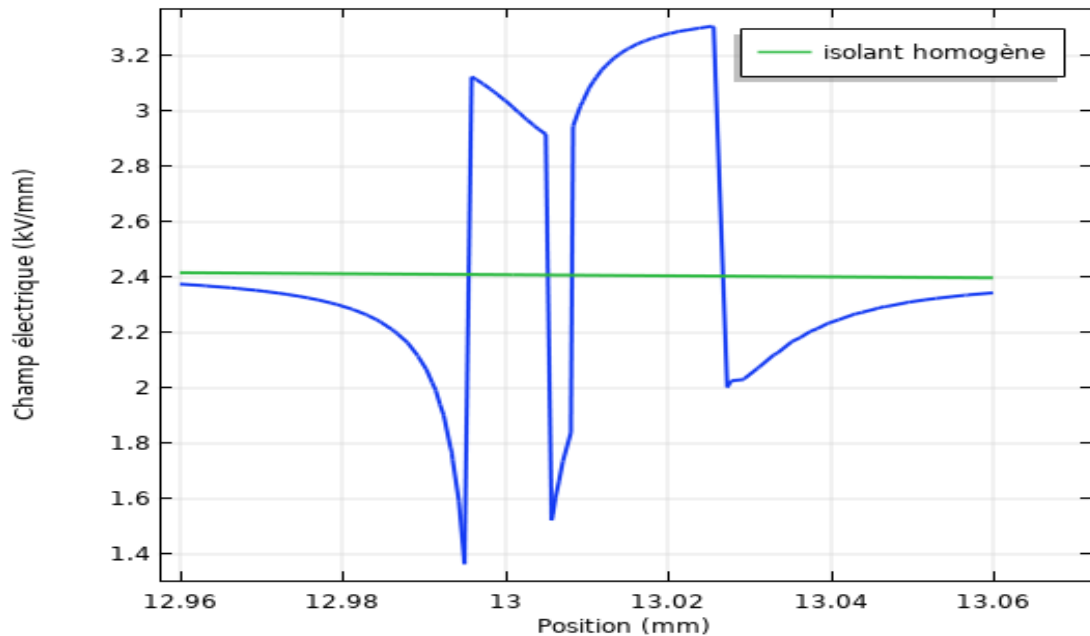


Figure III. 17 : Distribution radiale de champ électrique dans la région contenant deux cavités : la plus petite située sur le côté de l'âme

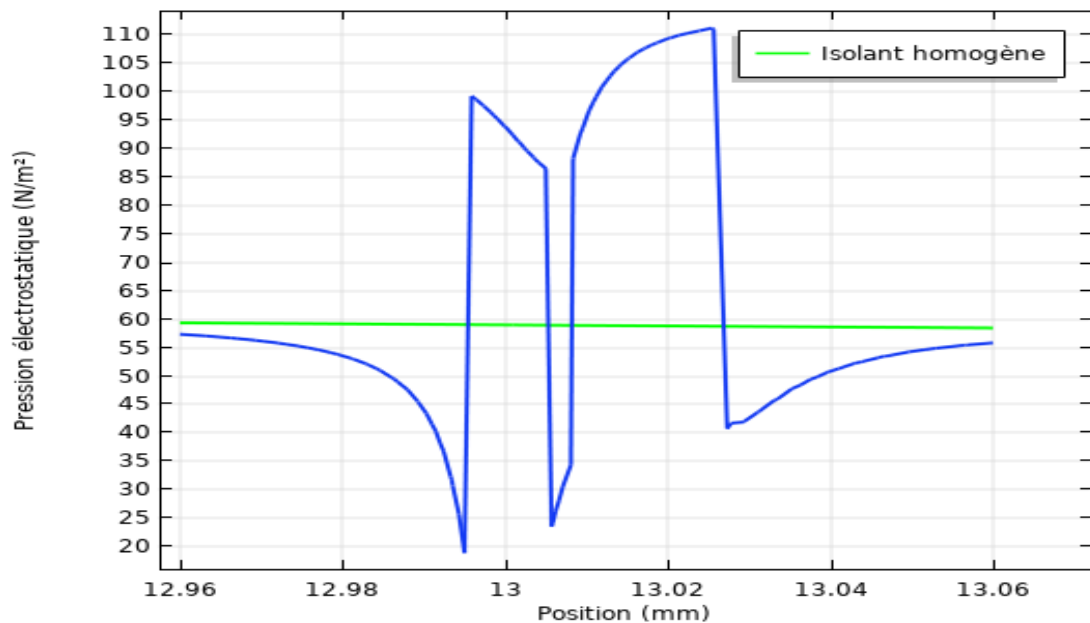


Figure III. 18 : Distribution radiale de la pression électrostatique dans la région contenant deux cavités : la plus petite située sur le côté de l'âme

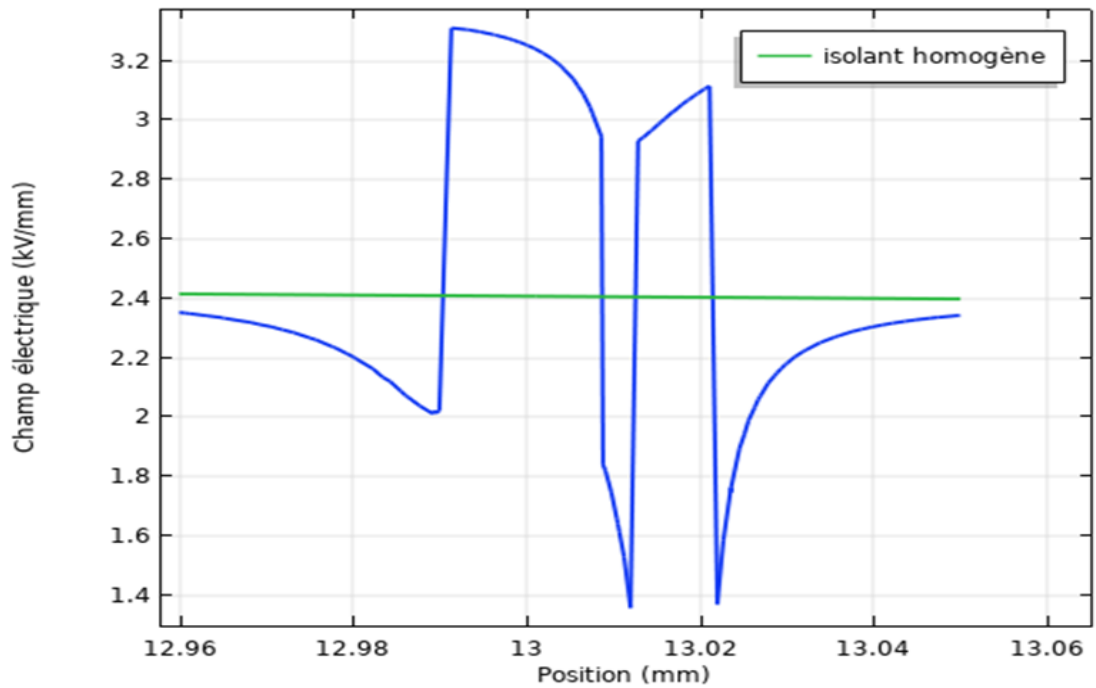


Figure III. 19: Distribution radiale de champ électrique dans la région contenant deux cavités : la plus grande située sur le côté de l'âme

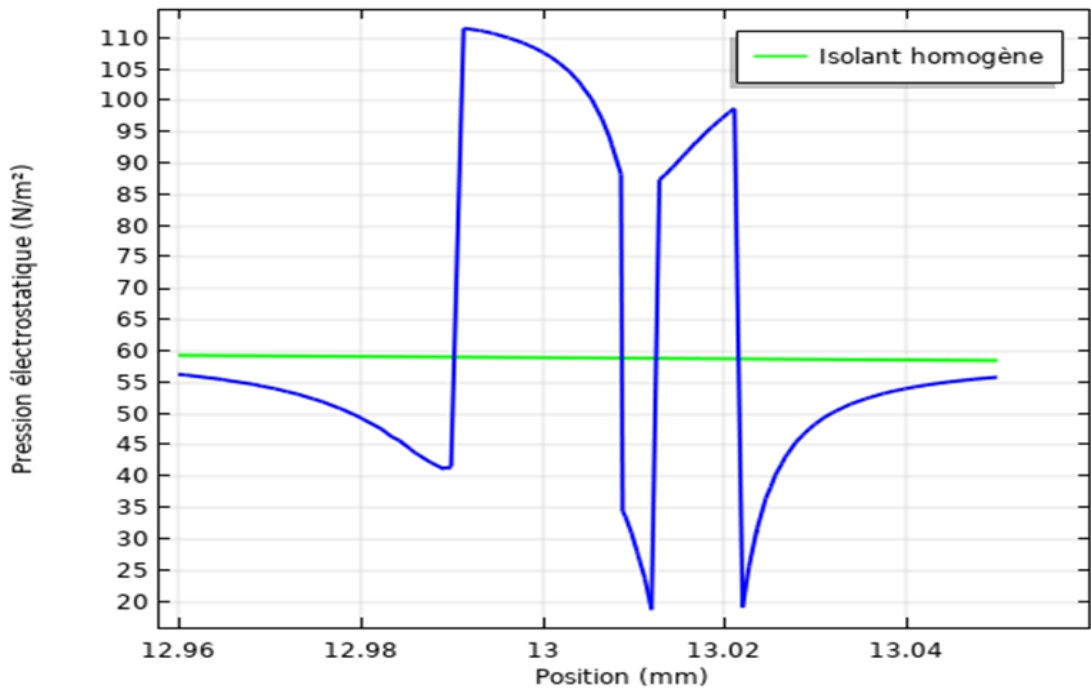


Figure III. 20: Distribution radiale de la pression électrostatique dans la région contenant deux cavités : la plus grande située sur le côté de l'âme

c. État de deux cavités à la même taille et de permittivité relative différente

Nous déterminons l'effet de deux cavités qui ont la même taille et avec de différente permittivité sur les contraintes (champ électrique, pression électrostatique).

L'effet interaction de deux cavités avec des permittivités différentes est présenté dans la figure (III.21-22), la cavité située au côté de la gaine contient de l'eau ($\epsilon_{\text{eau}}=80$). La présence d'eau dans la cavité entraîne une augmentation importante des contraintes dans la première cavité située à la coté du l'âme et atteint pratiquement 4.7 kV / mm (223.5 N/m²) au centre et 3.6 kV/ mm (134.2 N/m²) sur les parois de la cavité.

Comme la dégradation de l'isolation est proportionnelle à la concentration des cavités et à leur nocivité, le résultat obtenu permet de constater que la présence d'eau dans le câble a un effet plus dangereux que la présence d'air [17].

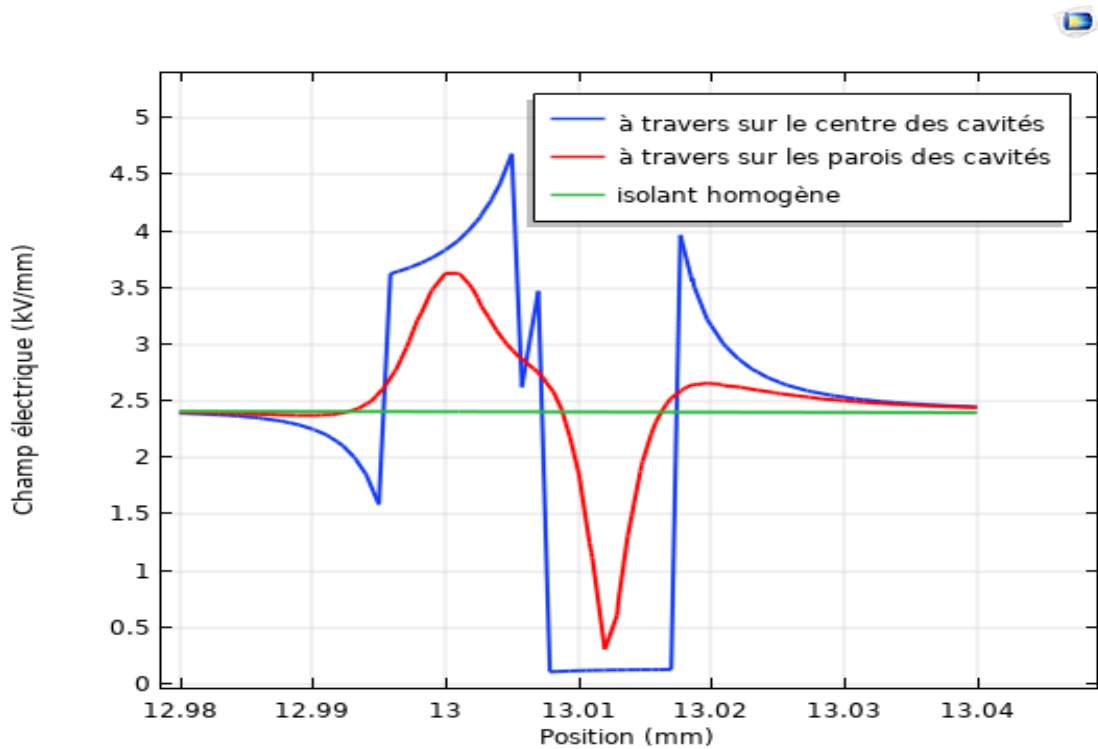


Figure III. 21: Distribution radiale du champ électrique dans deux cavités de différentes permittivités

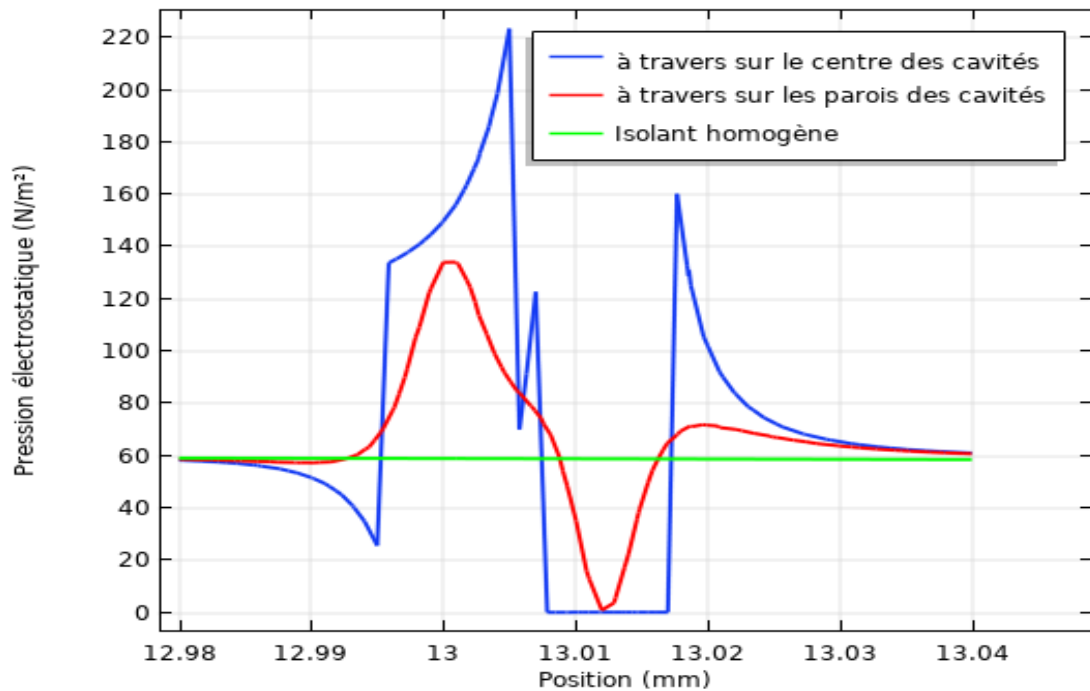


Figure III. 22: Distribution radiale de la pression électrostatique dans deux cavités de différentes permittivités

III.2. 3. Cas de trois cavités

Nous déterminons l'effet de trois cavités qui ont de la même taille et avec la même permittivité relative sur les contraintes (champ et pression) et allongement de la cavité,

L'effet interaction de trois cavités à une distance entre eux inférieure à trois fois la taille de cavité[3] est présentée dans les figures(III.23-25), nous notons que la cavité au milieu est moins valeur que les contraintes par rapport aux deux cavités latérales, pour la raison de l'effet mutuel entre les cavités et sa position entre les deux cavités , quant à la valeur des contrainte dans les cavités latérales, on constate le même résultat au niveau de deux cavités dans l'isolant, dans lequel la cavité à côté de la gaine est plus grand valeurs que celui à côté du l'âme.

Selon les figures précédentes (III.23-24), on peut montrer que les valeurs de champ électrique et de pression électrostatique diminuent par rapport aux valeurs des deux cavités dans l'isolant figure (III.14-15), et cette interaction mutuelle peut s'expliquer par le fait que les cavités sont proches de sorte que chaque cavité se situe dans la zone d'influence de la cavité adjacente. En revanche, la valeur du champ électrique au sein de chaque cavité peut dépasser la valeur critique d'apparition de décharge partielle, ce qui conduit à une augmentation plus augmentation plus importante du risque de dégradation de l'isolant.

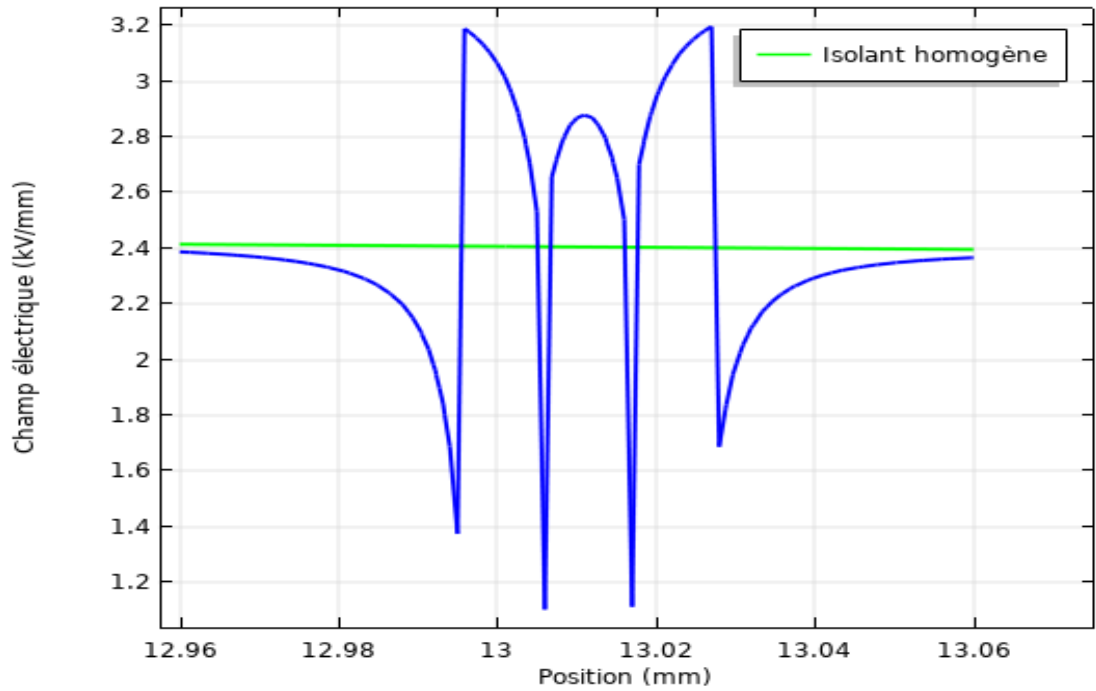


Figure III. 23: Distribution radiale du champ électrique dans trois cavités de la même taille et avec la même permittivité

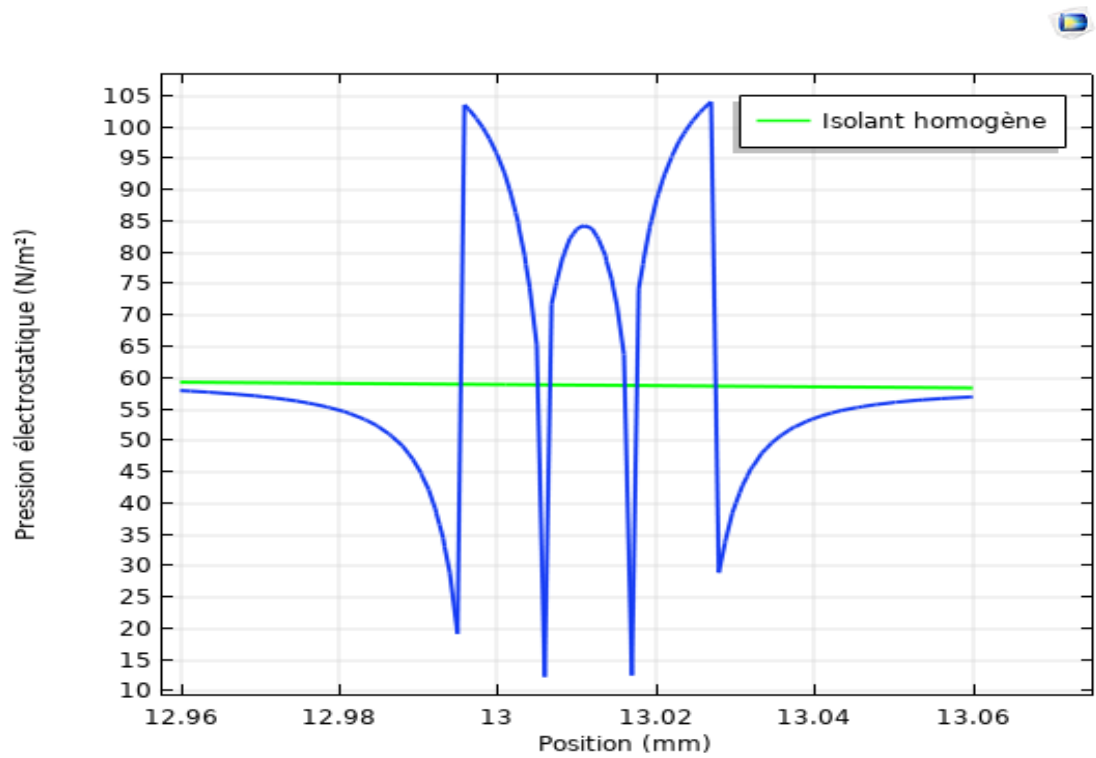


Figure III. 24: Distribution radiale de la pression électrostatique dans trois cavités de la même taille et avec la même permittivité

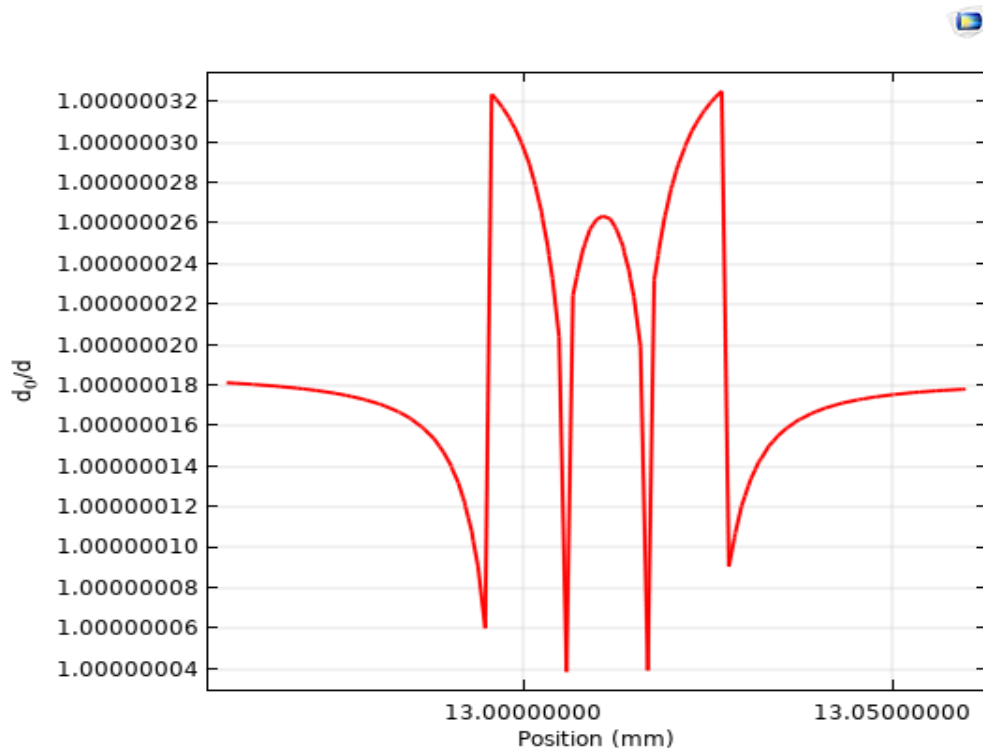


Figure III. 25: Allongement en trois cavités en interaction

III 3. Conclusion

Les décharges partielles qui peuvent se produire dans les microcavités contenues dans un isolant dépendent de plusieurs facteurs. Dans ce chapitre, l'impact de la position, la taille, la forme, et la densité des microcavités sur les contraintes ont été étudiés. En outre, le phénomène d'interaction entre les cavités a été également discuté.

D'après les résultats de cette étude, on peut dire :

- Les contraintes dans une cavité dépendent de sa position « Il est dangereux d'être dans la position avant le 53% par rapport à l'âme de l'isolant ». Par contre cette grandeur est indépendante de la taille.
- La forme elliptique dans le sens transversal du champ électrique représente le cas le plus nocif.
- D'après l'effet de la permittivité relative, nous avons conclu que la présence d'eau dans le câble a un effet plus dangereux que la présence d'air.
- Pour plus de deux cavités en interactions, l'effet mutuel des cavités en fonction de la taille ou de la permittivité relative accélère et limite la durée de vie du câble électrique,

en ce sens que la densité des cavités affecte à la fois le champ électrique et la pression électrostatique de manière plus dangereuse.

- Finalement, nous pensons que l'activité répétée de la pression électrostatique, autrement dit, il y a un allongement au niveau des parois des cavités, va produire un phénomène des arborescences électriques. Les arborescences se développent sous forme des réseaux conducteurs croissants au cours du temps et provoquant un claquage dès que leurs tailles sont suffisantes.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

Cette recherche a été menée au niveau de l'Université de Ghardaïa dans le Département d'Automatique et Electromécanique et vise à étudier l'effet des microcavités dans l'isolant XLPE de câble sur les décharges partielles.

Dans la première partie de ce mémoire, nous sommes intéressés par le calcul des contraintes électriques et électromécaniques sur les microcavités par la résolution numérique de l'équation de Laplace en utilisant FEM sous l'environnement de COMSOL Multiphysics.

Dans la deuxième partie de cette étude, et après la création d'un modèle bidimensionnel du câble électrique qui contient des microcavités et a étudié l'effet de : la position, la taille, la forme et la densité des cavité sur les contraintes. De plus, le phénomène d'interaction entre les cavités a été discuté, et nous avons trouvé ces résultats :

- Si des cavités de contient d'air sont incluses dans la zone de 53% par rapport le coté de l'âme à l'intérieur du matériau isolante. Alors il y a des décharges partielles dans les microcavités, affectant tout risque instantané pour le comportement du câble. Quant aux cavités qui contiennent de l'eau, quel que soit leur position dans l'isolant, elles sont néfastes.
- La forme elliptique dans le sens transversal du champ électrique représente le cas le plus nocif.
- La densité des microcavités effectué négativement sur l'isolant et provoque plus des décharges partielles.

Pour cela, la concentration sur les défauts à une exécution potentiellement néfaste qui peut conduire à un vieillissement rapide de l'isolant.

Perspectives :

Dans le future nous voulons faire des études concernant la présence des défauts de plusieurs natures en fonction du temps, des contraintes électriques, et surtout mécanique, même de faire des simulations et des essaies expérimentaux concernant la détection des défauts dans les câbles électriques par le principe des décharges partielle.

Bibliographie

- [1] M. Hadjadj, " Etude par Simulation de la Probabilité des Décharges Electrique dans un Isolant d'un Cable Unipolaire de Moyenne Tension ", Thèse de Magister, Université de Batna, Algérie 2004.
- [2] M. Kherfi, M. Mimouni Les défauts dans les câbles électriques souterrains", Université Kasdi Merbah Ouargla, Mémoire Master Académique 2019.
- [3] Medoukali, H., Guibadj, M., Zegnini, B.: 'Study of electrical constraints within cavities in high voltage cables', *Int. J. Comput. Exper. Sci. Eng.*, 2015, 1, (1), pp. 30–35.
- [4] A. Nouar, M. Guibadj, "Numerical Study of partial discharges apparition in XLPE insulation of high voltage cables," *IEEE Bologna PowerTech Conference*, June 23-26, Bologna, Italy 2003.
- [5] M Alsharif, P A Wallace, D M Hepburn and C Zhou, "FEM Modelling of Electric Field and Potential Distributions of MV XLPE Cables Containing Void Defect" Excerpt from the *Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan*.
- [6] Abdelkader, Elagoun & Tahar, Seghier. (2013). Etude par simulation de l'influence d'éventuels défauts sur l'isolation d'un cable électrique.
- [7] D. Abarna, B. Vigneshwaran, M. Willjuice Iruthayarajan R.V. Maheswari (2020), "Influence The Effect Of Cavity Size And Position In High Voltage Cable By Using Finite Element Method".
- [8] Khouildi, Emna & Attia, Rabah & Chtourou, N.. (2016). Numerical modeling of the electric field and the potential distributions in heterogeneous cavities inside XLPE power cable insulation. 9. 37-42.
- [9] S. Kahleras, A. Boubakeur and L. Boukezzi, "Numerical study using FVM of three cavities within XLPE insulation of HV cables," *2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, Algiers, 2018, pp. 1-5.
- [10] Guibadj, M., Nouar, A., Lefkaier, I.K., et al : 'Etude des contraintes électrique et électromécanique dans l'isolation des câbles de moyenne tension contenant des cavités', *Rev. Int. Génie Électr.*, 2009, 12, (1), pp. 77–99
- [11] M.Hadjadj, B.Mokhtari and D.Mahi, "Study of Physical Parameters Change, by Static Regime Modeling, in a Heterogeneous Insulating Meterial XLPE, containing three cavities,

Bibliographie

- of a Medium Voltage Cable," Journal of Electrical Engineering , vol. 14, no. 1, pp. 85-99, 2014.
- [12] Medoukali, H., Guibadj, M., Zegnini, B.: 'Study of electrical and electromechanical constraints in the insulation of high-voltage cables containing microcavities: effect of space charges, Int. J. Comput. Exp. Sci. Eng., 2017, 1.
- [13] M. Charoy, L. Deschanps, E. Dorison, P. Gauthier, P. Isnard, A. Pinet., " Câble de transport d'énergie, Technologies. Caractéristiques ", Techniques de l'ingénieur, traite génie électrique, D4 520, 2012.
- [14] M. Kuzyk, " Câbles d'énergie : recherche et identification de défauts", Techniques de l'ingénieur, traite génie électrique, 2013.
- [15] M. MAHDJOUR " Compatibilité Électromagnétique et Composants Electroniques ", Thèse de Thèse de doctorat, Université Larbi BenM'hidi - Oum El Bouaghi, Algérie 2010.
- [16] Site web <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/xlpe>.
- [17] G. Tardieu, " Apport des mesures de Luminescence à la compréhension du piégeage et du transport dans l'isolant synthétiques ", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France 2003.
- [18] M. Aguet, M. Ianoz, "Haute tension, série "Traite d'électricité ", Volume XXXII, édition presses polytechnique et universitaire romand, 1990.
- [19] Bruce S. Bernstein, "Basic properties of power cable insulation ", Electric Power Research Institute - ICC Educational Programs Spring, 2000.
- [20] N. Zouzou, " Etude de la mobilité moléculaire du pend destine à la fabrication des condensateurs : influence de la microstructure ", Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier Toulouse, France 2002.
- [21] R. Fournier " Conception et fabrication d'un câble moyenne tension", édition Eyrolle, Paris 1990.
- [22] D. Ceresoli, E. Tosatti, S. Scandolo, G. Santoro, S. Serra, " Trapping of excitons at chemical defects in polyethylene ", Journal of Chemical Physics, Volume 121, Number 13, 25 June 2004.

Bibliographie

- [23] M. 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, Algérie 2007.
- [24] M. Prat, " Study on conduction mechanisms of medium voltage cable XLPE insulation in the melting range of temperatures", degree of Doctor of Philosophy in Physics, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain December 2011.
- [25] M. Boubakeur, M. Mecheri, "Comportement diélectrique et mécanique du polyéthylène réticulé chimiquement soumis à un vieillissement thermique continu", Exp. Sci. fr, Laboratoire de Haute Tension de l'École Nationale Polytechnique, B.P 182, El Harrach, Alger, Algérie 2000.
- [26] Bao, M., Yin, X., He, J.: 'Analysis of electrical tree propagation in XLPE power cable insulation', Phys. B Condens. Matter, 2011, 406, (8), pp. 1556–1560.
- [27] M. Delfin BRAGA, " Etude des phénomènes de charge des matériaux isolants sous faisceau d'électrons de basse énergie (200 eV - 30 keV) ", Thèse de doctorat, Université paris xi orsay, spécialité : Sciences des Matériaux. Soutenue le 19 décembre 2003.
- [28] Y. SEGUI., " Diélectrique. Courant de conduction ", Technique de l'ingénieur, traité génie électrique D 2 301.
- [29] A. Ishibashi, R. Hanaoka, S. Takata, Y. Kondo, H. Shirai " Tree Discharge in Extended Chain Crystal Polyethylene ", International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials IEEE, 2003.