

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

/...../...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية و الكهروميكانيك

Département d'Automatique et Electromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

**L'Effet des Défauts d'Isolation sur la Distribution des
Champs Electriques et Magnétiques dans les Câbles
d'Alimentation**

Présenté par :

Ilyes ABDENNOUR

Oussama BELANAGUE

Soutenue publiquement le 19/06/2023

Devant le jury composé de :

BOUCHELGA Fatma

M.C.A

Univ Ghardaïa

Président

MEDOUKALI Hemza

M.C.B

Univ Ghardaïa

Encadrant

BOUKHARI Hamed

M.C.B

Univ Ghardaïa

Examineur

Année universitaire 2022/2023

R E M E R C I E M E N T S

Tout d'abord, nous exprimons notre plus profonde gratitude à ALLAH Tout-Puissant qui nous a éclairés et nous a donné la force de faire ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement nos parents, qui nous ont fourni tous les outils et conditions nécessaires à notre réussite. Leur dynamisme, leur confiance, leurs soins et leurs sacrifices tout au long de leurs dix-huit années d'études (2005-2023) ont été inestimables.

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à M. MEDOUKALI Hemza, notre encadrant, qui a fait de grands efforts en partageant ses connaissances, ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité et ses qualités humaines.

Nous remercions chaleureusement le jury d'avoir accepté d'évaluer la qualité de cette thèse.

Nous exprimons également notre gratitude à tous nos professeurs de l'Université de Ghardaïa pour leurs efforts, les informations fournies et les formations dispensées.

Enfin, nous tenons à remercier tous nos camarades de classe de la promotion 2023 pour leur coopération et leur soutien tout au long de notre parcours.

Dédicace

Nous souhaitons dédier ce modeste travail :

À nos pères et mères, pour leur soutien inconditionnel.

À nos frères et sœurs, pour leur amour et leur encouragement.

À tous les membres de nos familles, pour leur compréhension et leur appui.

À nos chers amis, pour leur amitié précieuse.

À tous les étudiants d'électromécanique, qui partagent notre passion.

*À tous les enseignants de la faculté des sciences et de technologie, pour leur
guidance et leur savoir.*

Ilyes & Oussama

Table de matière

INTRODUCTION GENERALE	8
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les Câbles Electriques

I.1 Introduction :.....	11
I.2 Transport d'énergie électrique :.....	11
I.3 Câbles Souterrains :	12
I.3.2 Avantages des Câbles Souterrains :.....	13
I.3.3 Inconvénients des Câbles Souterrains :	13
I.4 Classifications des câbles :	14
I.4.1 Les câbles souterrains THT :	14
I.4.2 Câbles souterrains HT :.....	14
I.4.3 Câbles souterrains moyenne tension MT :.....	16
I.4.4 Câbles souterrains basse tension BT :.....	16
I.5 Isolation des câbles électriques :.....	17
I.6 Défauts d'isolation des câbles électrique :.....	17
I.6.1 Microcavités dans le matériau :	18
I.6.2 Hétérogénéités :	19
I.6.3 Les impuretés :.....	19
I.6.4 Vieillissement des Câbles :.....	20
I.7 Définition des Décharges Partielles :.....	20
I.8. Champ électromagnétique :	21
I.8.1 Champ électrique :.....	21
I.8.2. Champ magnétique :	21

Chapitre II : Modélisation et Simulation des Contraintes Electromagnétique

II.1 Introduction :	24
II.2 Méthode des éléments finis (MEF) :	24
II.2.1 Principe :.....	24
II.2.2 La méthode des éléments finis comprend les étapes suivantes :.....	25
II.2.3 Avantages de la FEM :	25
II.2.4 Inconvénients de la FEM :.....	26

II.3 Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL :	26
II.3.1 Modèles :	27
II.3.2 AC/DC Module :	27
II.4 Procédure de simulation :	29
II.4.1 Choix du mode d'application :	31
II.4.2 Géométrie du câble MT :	31
II.4.3 Maillage de câble MT :	32
II.5 Calculs des contraintes :	33
II.5.1 Calcul champ électrique :	33
II.5.2 Calcul champ magnétique :	34
II.6 Validation du modèle :	37
II.6.1 Contraintes électriques :	37
II.6.2 Contraintes magnétiques :	38
II.7 Conclusion :	39

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1 Introduction :	42
III.2 Résultats et discussion Câble électrique :	42
III.2.1 Anisotropie du champ électrique dans les câbles unipolaires :	42
III.2.2 Variation du champ électrique dans un câble tripolaire :	48
III.2.3 Variation du champ magnétique dans câble unipolaire :	51
III.3 Analyse des résultats et discussion des câbles électriques :	53
III.3.1 Paramètres géométriques des câbles électriques souterrains	53
III.3.2 Champ magnétique :	55
III.4 Conclusion :	61
Conclusion Générale :	63
Références	64

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les Câbles Electriques

Figure I.1 Les lignes aériennes [3].	12
Figure I.2 Les câbles souterrains [5].	13
Figure I.3 Constitution d'un câble souterrain THT [1].	14

Figure I. 4 Câbles d'alimentation HT [7].	15
Figure I. 5 Câble Moyenne Tension MT [10].	16
Figure I. 6 Câble Électrique niveau de tension 0.6/1kV [12].	17
Figure I. 7 Imperfections au sein d'un câble unipolaire [14].	18

Chapitre II : Modélisation Electromagnétique et Simulation des Câbles Electriques

Figure II.1: Logiciel COMSOL Multiphysics.	27
Figure II. 2 Les modèles de COMSOL.	27
Figure II. 3 Organigramme des étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics.	30
Figure II. 4 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.	30
Figure II. 5 Géométrie du câble électrique.	32
Figure II. 6 Maillage de câble électrique souterrain.	33
Figure II. 7 Distribution du champ électrique dans l'isolation (unipolaire).	38
Figure II. 8 Distribution du champ électrique dans l'isolation (tripolaire).	38
Figure II. 9. Distribution du champ magnétique dans l'isolation (unipolaire).	39
Figure II. 10 Distribution du champ magnétique dans l'isolation (tripolaire).	39

Chapitre III : Résultats et Discussions

Figure III. 1 L'impact de la cavité d'air sur le champ électrique	43
Figure III. 2 Répartition du champ électrique à l'intérieur et autour de la cavité	43
Figure III. 3 Répartition du champ électrique à l'intérieur et autour de la cavité	44
Figure III. 4 comparaisons entre plusieurs cavités.	44
Figure III. 5 Effet de polarisation dans la zone de la cavité.	45
Figure III. 6 Répartition du champ électrique dans deux cavités en interaction.	46
Figure III. 7 Répartition du champ électrique dans deux cavités en interaction.	46
Figure III. 8 Répartition du champ électrique dans deux cavités.	47
Figure III. 9 Répartition du champ électrique dans deux cavités différentes permittivités	47
Figure III. 10 Module de simulation champ électrique.	48
Figure III. 11 Distribution du champ électrique dans le câble tripolaire	48
Figure III. 12 Module de simulation champ électrique dans la présence de cavité d'air.	49
Figure III. 13 Impact d'une cavité sur la distribution de champ électrique.	49
Figure III. 14 Module de simulation champ électrique dans la présence de cavité d'air.	50
Figure III. 15 Impact d'une cavité sur distribution de champ électrique.	50
Figure III. 16 Effet d'une cavité d'air sur champ magnétique	51
Figure III. 17 Répartition du champ magnétique dans la région contenant une cavité.	51
Figure III. 18 L'effet d'une cavité en fer sur le champ magnétique	52
Figure III. 19 Répartition du champ magnétique dans la région contenant la cavité.	53
Figure III. 20 Comparaison entre plusieurs cavités	53
Figure III. 21 Propriétés géométriques du modèle bidimensionnel	54

Figure III. 22 le champ d'induction magnétique.....	54
Figure III. 23 Distribution du champ magnétique.....	55
Figure III. 24 le champ d'induction près et autour du 3 câbles unipolaires.....	56
Figure III. 25 le champ d'induction près et autour du câble tripolaire	56
Figure III. 26 Le champ d'induction magnétique à proximité et autour des câbles électriques en présence des cavités.	57
Figure III. 27 L'influence de la distance entre les câbles sur le champ magnétique	58
Figure III. 28 Distribution et calcul du champ magnétique près du câble (position 1).....	59
Figure III. 29 Distribution et calcul du champ magnétique près du câble (position 2).....	59
Figure III. 30 Distribution et calcul du champ magnétique près du câble (position 3).....	59
Figure III. 31 La distribution et calcul du champ électrique près du câble (position 1)	60
Figure III. 32 La distribution et calcul du champ électrique près du câble (position 2)	60
Figure III. 33 La distribution et calcul du champ électrique près du câble (position 3)	61
Figure III. 34 Distribution et calcul du champ magnétique au niveau du sol	61

Liste des tableaux

Chapitre II : Modélisation Electromagnétique et Simulation des Câbles Electriques

Tableau II. 1 Caractéristiques du câble unipolaire utilisé comme modèle [10].....	31
Tableau II. 2 Caractéristiques du câble tripolaire utilisé comme modèle [10].	31
Tableau II. 3 Caractéristiques des matériaux des câbles.....	32

Chapitre III : Résultats et Discussions

Tableau III. 1 La distance entre les câbles de terre et de terre [5].	53
--	----

INTRODUCTION GENERALE

Les lignes de transport jouent un rôle essentiel dans le réseau électrique en assurant le transport de l'énergie électrique, que ce soit par des lignes aériennes, câbles souterrains ou câbles sous-marines. Les perturbations et les défauts présents dans les lignes électriques engendrent la création d'un champ électromagnétique significatif dans les environs des lignes, La présence d'objets entraîne des interférences électromagnétiques à proximité des lignes. Les courts-circuits, les harmoniques et les opérations de manœuvre, Le transfert de l'alimentation électrique d'une partie du système à une autre s'effectue via les conducteurs., créant ainsi des effets sur l'ensemble du réseau électrique.

Les câbles souterrains sont des composants électriques coûteux qui nécessitent d'être caractérisés de manière à prolonger leur durée de vie. Ces câbles sont dotés d'une isolation en polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) ou en anglais, cross-linked polyethylene (XLPE). Avec le temps, cet isolant se dégrade en raison de l'utilisation dans les réseaux. Par conséquent, il est essentiel d'avoir une méthode de diagnostic permettant d'identifier rapidement les câbles présentant des problèmes et nécessitant un remplacement. Étant donné le coût élevé de remplacement des câbles, il est primordial d'évaluer avec précision leur niveau de dégradation afin d'éviter de les remplacer prématurément.

Les effets du champ électromagnétique sur l'humain, Parmi les nombreux effets biologiques observés, certains peuvent avoir des conséquences nocives sur la santé.

Diagnostic préventive et des techniques de simulation peuvent être utilisées pour évaluer l'état des câbles électriques et surveiller par conséquent les raisons probables lié au processus de défaillance des systèmes.

L'objectif principal du travail est étudié les effets des défauts sur la distribution des champs électriques et magnétiques dans les câbles d'alimentation. A l'état sans défauts et a l'état avec des défauts et des perturbations. Ce mémoire propose une simulation des défauts présents dans les câbles électriques souterrains par le programme COMSOL Multiphysics, qui repose sur la méthode des éléments finis (MEF) pour son fonctionnement. Cette approche nous aide à mieux comprendre l'impact des défauts sur les câbles et d'analyser la répartition du champ magnétique et champ électrique. La simulation numérique est faite dans plusieurs types de câbles : unipolaire et tripolaires et dans la présence des défauts de différentes caractéristiques.

Le présent manuscrit est structuré de la façon suivante :

- Premier chapitre : nous avons présenté une recherche générale sur les câbles électriques. Nous commençons par définir les types de câbles électriques souterrains, en détaillant leurs caractéristiques ainsi que certains avantages et inconvénients.
- Deuxième chapitre : de ce mémoire aborde la présentation des concepts fondamentaux et des équations d'électromagnétisme, ainsi que la méthode des éléments finis (MEF) pour la modélisation et la simulation des caractéristiques électromagnétiques des câbles électriques souterrains. De plus, il inclut la validation du logiciel COMSOL Multiphysics de câble Unipolaire et Tripolaire.
- Troisième chapitre : se concentre sur la présentation et l'interprétation des résultats de simulation des deux modèles unipolaire et tripolaire dans l'état de la présence des défauts : cavités avec différents (permittivité, perméabilité, taille), la position des câbles entre elles et par rapport la terre et le cas de la présence des particules métalliques sur la distribution du champ électrique et du champ magnétique.

Enfin, notre travail est complété avec une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les Câbles Electriques

I.1 Introduction :

Le réseau électrique est un ensemble d'infrastructures de transport d'énergie électrique depuis les centres de production jusqu'aux consommateurs. Les moyens de transport de l'énergie électrique principaux comprennent les lignes aériennes, les câbles souterrains et les câbles sous-marine. Les lignes aériennes sont fixées à des supports tels que des pylônes ou des poteaux, tandis que les câbles électriques souterrains sont installés sous terre. Les câbles électriques souterrains sont couramment utilisées pour le transport de l'énergie à des niveaux de tension moyenne et élevée, en raison de la demande énergétique plus importante. Les câbles souterrains sont largement préférés dans les réseaux électriques en raison de leur niveau de sécurité accru en cas de conditions météorologiques défavorables (tempêtes ou foudre), de leur coût inférieur sur de courtes distances et de leur faible besoin d'entretien. Lors de l'étude d'un projet, le choix entre des lignes électriques aériennes ou des câbles souterrains pour un réseau électrique dépend de diverses contraintes telles que la topographie de la région, les aspects opérationnels et de maintenance, ainsi que des avantages et des inconvénients propres à chaque type de système. Ce chapitre, nous présentons une révision bibliographique sur les câbles électriques, ainsi que les différents types de câbles disponibles.

I.2 Transport d'énergie électrique :

Depuis 1994, les compagnies d'électricité ont adopté une politique visant à éviter la construction de nouvelles lignes aériennes en dessous de 150 kV. Cette tendance a conduit au développement progressif des réseaux de distribution et de répartition à l'aide de câbles souterrains. Les câbles à haute tension posent des défis technologiques majeurs, notamment au niveau des jonctions, et ils sont également très coûteux. Bien qu'il existe quelques cas d'utilisation de câbles à 220 kV, 400 kV et 500 kV, leur utilisation reste limitée. En 2006, le coût approximatif d'une ligne aérienne de 400 kV était d'environ 1 million d'euros par kilomètre, ce qui renforce la préférence pour les câbles souterrains [1].

Une ligne électrique est composée de conducteurs et d'éléments accessoires utilisés pour le transport de l'énergie électrique. Les conducteurs sont généralement fabriqués en aluminium ou en cuivre. Les isolants des lignes électriques sont constitués d'une partie solide, telle que de la porcelaine, du verre ou du papier en matières composites, combinée à un gaz, comme l'air ou le SF₆, ou à un liquide, comme l'huile. Les lignes électriques peuvent être classées selon plusieurs critères, tels que leur position dans

l'espace (aériennes ou souterraines), leur classe de tension (basse, moyenne ou haute tension) et la nature de la tension (continue, alternative, monophasée ou triphasée).

Les deux principaux types de lignes électriques sont les lignes aériennes et les câbles souterrains [1].

I.2.1 Lignes aériennes :

Une ligne aérienne est constituée de conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, qui sont fixés aux pylônes à l'aide de chaînes d'isolateurs. Ces pylônes sont mis à la terre. La ligne aérienne comprend également un ou plusieurs conducteurs supplémentaires appelés câbles de garde, qui sont reliés à la terre à chaque pylône. Ces câbles de garde servent principalement à protéger les conducteurs de phase contre la foudre. Le rôle principal de la ligne aérienne est de transporter l'énergie électrique de la source de production jusqu'à la zone de consommation [2].

La ligne aérienne présente les caractéristiques suivantes :

- La tension reste constante sur toute la longueur de la ligne, quelles que soient les charges entre zéro et la charge nominale.
- Elle offre un bon rendement.
- Les pertes joules ne doivent pas entraîner une surchauffe des conducteurs.



Figure I.1 Les lignes aériennes [3].

I.3 Câbles Souterrains :

I.3.1 Définition :

Les câbles souterrains sont composés d'un ou plusieurs conducteurs centraux, d'une isolation à rigidité diélectrique élevée, avec une permittivité et des pertes diélectriques minimales, ainsi que d'un

manteau conducteur généralement mis à la terre. La présence du manteau permet d'homogénéiser la répartition radiale du champ électrique E , ce qui rend les caractéristiques électriques du câble indépendantes du mode de pose. Les câbles souterrains se différencient des lignes aériennes par le fait qu'ils possèdent une isolation interne dont les paramètres peuvent être contrôlés [1].

Les lignes de transmission souterraines sont un moyen courant de transport d'énergie à moyenne et haute tension, en raison de la demande énergétique plus élevée. Les câbles souterrains ont été largement appliqués dans les réseaux électriques car ils sont plus sûrs par mauvais temps (orages ou foudre), moins chers pour des distances plus courtes, respectueux de l'environnement et peu d'entretien [1].



Figure I.2 Les câbles souterrains [5].

I.3.2 Avantages des Câbles Souterrains :

- La capacité à maintenir la tension.
- Impact visuel moindre que la ligne aérienne.
- Moins sensible aux changements climatiques.
- Les effets des pertes Joule sont plus faibles dans les câbles souterrains.
- Génère moins de champ électrique et magnétique [6].

I.3.3 Inconvénients des Câbles Souterrains :

- Le coût extrêmement élevé est le principal inconvénient des câbles souterrains.
- Les câbles souterrains présentent une impédance trois fois moindre que celle d'une ligne aérienne,
- L'impact environnemental élevées (Les travaux de construction des câbles souterrains),

-Le terrain au-dessus de l'ouvrage doit être laissé vierge de toute plantation d'arbres et d'arbustes et de toute habitation après la mise en service.

-La réparation des câbles souterrains nécessite plus longue durée que les lignes aériennes [6].

I.4 Classifications des câbles :

I.4.1 Les câbles souterrains THT :

L'utilisation principale des câbles souterrains de très haute tension (THT) est pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones urbanisées, telles que les grandes villes.

En raison de la complexité et du coût élevé de leur installation, les câbles souterrains THT sont généralement utilisés de manière sélective, là où les avantages qu'ils offrent surpassent les contraintes techniques et financières associées à leur mise en place figure (I.3) [4].

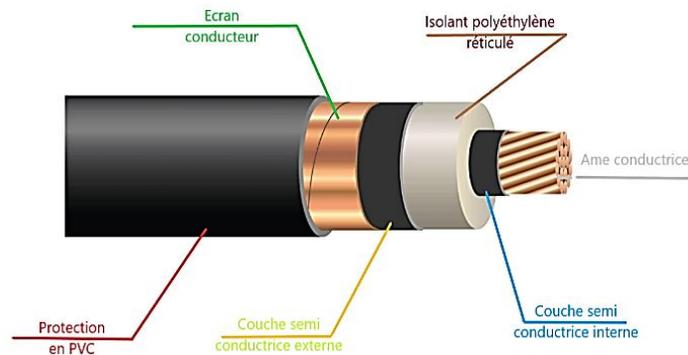


Figure I.3 Constitution d'un câble souterrain THT [1].

I.4.2 Câbles souterrains HT :

Les principales fonctions des câbles HT de transmission sont de transférer l'énergie électrique entre les emplacements désignés, dans les performances prescrites, les conditions de fonctionnement et d'environnement et d'isoler les composants sous tension des structures mises à la terre aux tensions de fonctionnement nominales et aux impulsions de commutation et de foudre spécifiées. Les fonctions secondaires des câbles HT de transmission sont les suivantes [7] :

- Maintenir la sécurité électrique et minimiser les effets néfastes sur l'environnement.
- Fournir un service rentable tout au long de la vie [7].

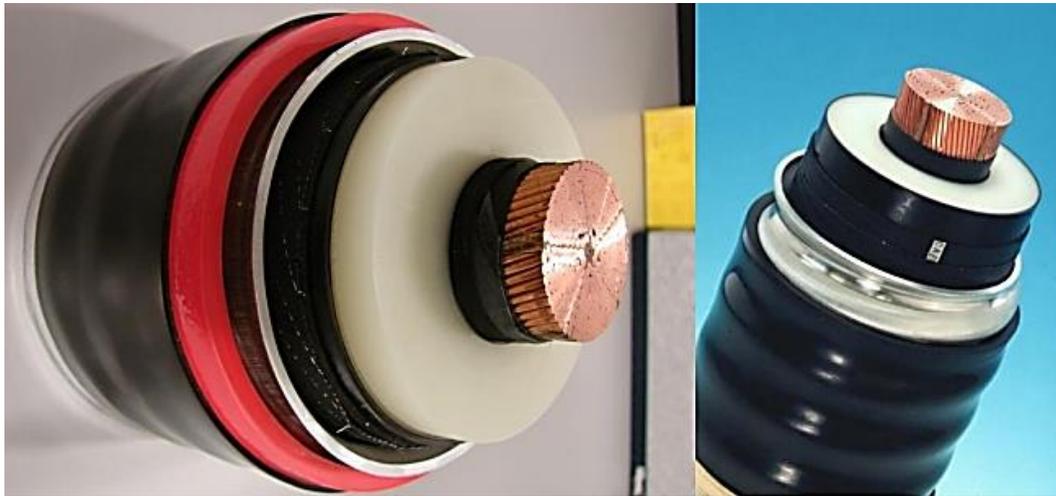


Figure I. 4 Câbles d'alimentation HT [7].

I.4.2.1 Structure du câble haute tension en XLPE [8] :

Il y a deux types de conducteur (rond compact, segmentaire) :

- **Le conducteur** : de grande section est subdivisé en plusieurs segments, généralement de 4 à 7, qui sont isolés les uns des autres à l'aide de rubans semi-conducteurs ou isolants. Cette configuration, connue sous le nom de structure de type Milliken, permet de minimiser les effets néfastes de la peau et de la proximité qui pourraient se produire.

- **Écran semi-conducteur intérieur** : est utilisé sur le conducteur pour éviter la concentration du champ électrique, est présente entre le conducteur et l'isolant pour assurer une répartition uniforme du champ électrique.

- **Isolation XLPE** : a pour rôle d'isoler le conducteur lorsqu'il fonctionne à haute tension par rapport à l'écran qui est maintenu à un potentiel de mise à la terre. L'isolation doit être capable de résister au champ électrique dans des conditions de fonctionnement normales et transitoires. Elle assure ainsi la sécurité et la performance du câble en empêchant les fuites de courant et les perturbations électriques.

- **Écran semi-conducteur extérieur** : remplit la même fonction que l'écran conducteur. Il permet une transition progressive entre un milieu isolant, où le champ électrique est non nul, et un milieu conducteur, représenté par l'écran métallique du câble, où le champ électrique est nul.

- **Écran métallique** : est nécessaire lorsque la tension atteint des niveaux élevés, tels que des dizaines ou des centaines de kilovolts. Sa principale fonction est d'annuler le champ électrique à l'extérieur du câble.

- La gaine de protection anticorrosion :

- Elle assure l'isolation de l'écran métallique par rapport à la terre, en particulier pour les lignes équipées de connexions d'écran spéciales.
- Elle protège les composants métalliques de l'écran contre l'humidité et la corrosion, en assurant ainsi la durabilité et la fiabilité du câble dans des conditions environnementales défavorables.

I.4.3 Câbles souterrains moyenne tension MT :

La constitution et la forme des câbles électriques souterrains de moyenne tension ont similaires à celles des câbles THT (très haute tension) et HT (haute tension), mais le diamètre est inférieur en raison du niveau de puissance transmise [9].

– Câble unipolaire.

– Câble tripolaire.

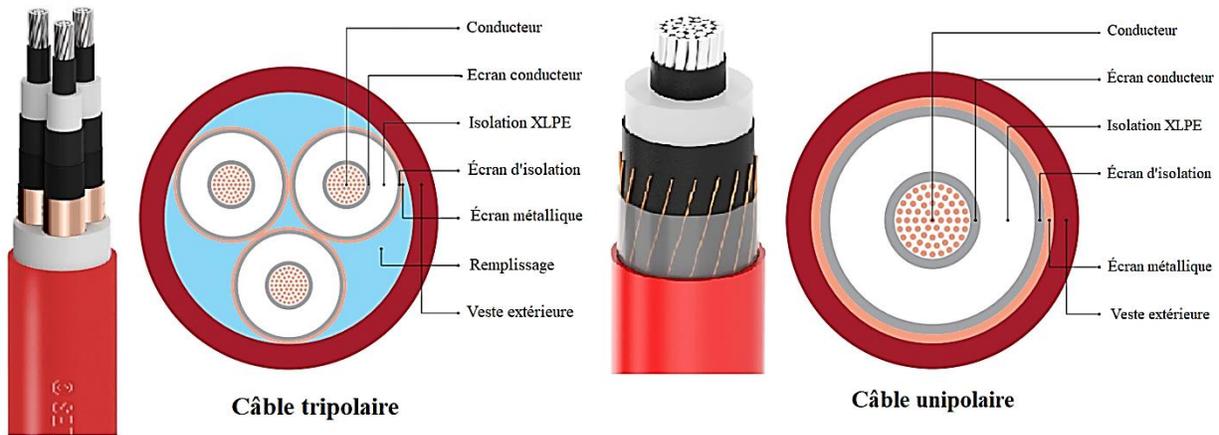


Figure I. 5 Câble Moyenne Tension MT [10].

I.4.4 Câbles souterrains basse tension BT :

Les câbles basse tension sont utilisés pour des niveaux de tension jusqu'à 1 kV. Les contraintes électrostatiques dans le câble BT ne sont pas dangereuses, par conséquent, aucune construction spéciale n'est utilisée pour ce câble. Le papier est utilisé comme isolant dans ces câbles BT. Parfois, de la résine est également utilisée, ce qui améliore la viscosité et aide à prévenir le drainage [11].

La fabrication des câbles souterrains à basse tension à partir de conducteurs en cuivre et en aluminium, qu'ils soient rigides, solides ou torsadés, ainsi que de conducteurs en cuivre flexibles, qu'ils soient nus ou étamés. Pour ces types de câbles, les principaux composés utilisés pour l'isolation et la

protection sont les XLPE, PVC, LSF/LSOH et les composés élastomères. Ils offrent une protection contre les influences extérieures (voir Figure I. 6) [1].



Figure I. 6 Câble Électrique niveau de tension 0.6/1kV [12].

I.5 Isolation des câbles électriques :

Les matériaux isolants sont utilisés dans de nombreux dispositifs impliqués dans la production, le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Un isolant est un matériau qui ne permet pas le passage du courant électrique. Son rôle principal est de prévenir tout contact entre des éléments métalliques portant des potentiels électriques différents.

Un diélectrique est un matériau qui possède une résistivité élevée et une bande d'énergie interdite de quelques électronvolts. Il est polarisable, ce qui signifie qu'il contient des dipôles électrostatiques (dans le cas d'un diélectrique polaire) ou qu'il peut former des dipôles induits en présence d'un champ électrique. Les matériaux diélectriques sont largement utilisés dans l'industrie des équipements électriques tels que les câbles de puissance, les générateurs, les transformateurs et les composants électroniques. Ils jouent un rôle crucial dans l'isolation électrique, la capacité électrique et d'autres propriétés électriques des dispositifs [13].

I.6 Défauts d'isolation des câbles électrique :

La fiabilité des équipements électriques dépend en partie de la qualité des matériaux isolants utilisés. Ces matériaux ne sont jamais parfaitement homogènes, et lors de leur fabrication, il est possible que des gaz se trouvent piégés à l'intérieur, formant ainsi des cavités d'air de tailles et de formes variables appelées vacuoles. De plus, lors de la mise en contact de l'isolant avec les parties conductrices, des décollements peuvent se produire entre le matériau isolant (diélectrique) et le conducteur. Ces défauts de fabrication peuvent inclure la présence de particules étrangères (contaminants) ou de protubérances dans l'isolant des câbles. Tous ces facteurs peuvent affecter la performance et la durabilité des

équipements électriques, ce qui souligne l'importance d'une fabrication et d'un contrôle de qualité rigoureux des matériaux isolants.

Les contraintes thermiques et mécaniques auxquelles les câbles sont soumis pendant le transport et l'installation, ainsi qu'une mauvaise application de la tension, peuvent également causer ces défauts. La Figure (I.7) présente les différents types de défauts pouvant se produire dans l'isolant d'un câble unipolaire [14].

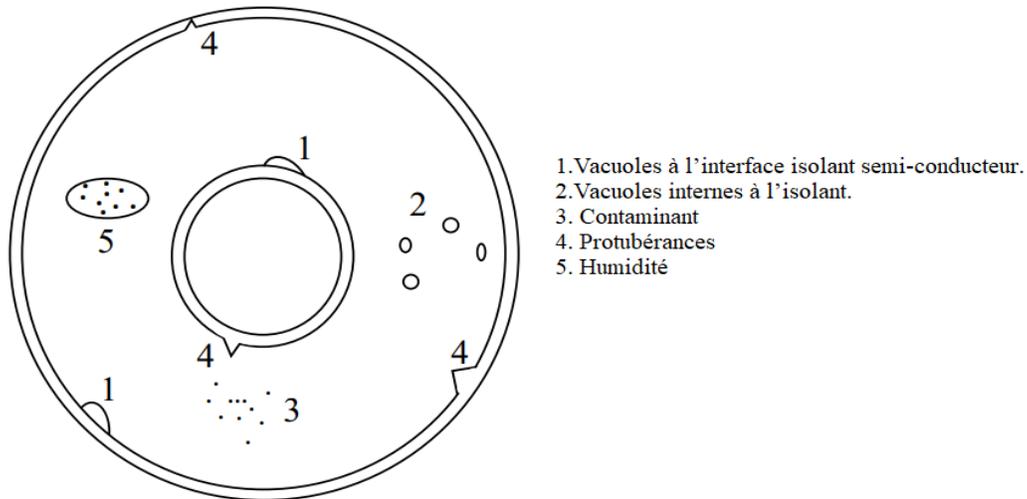


Figure I. 7 Imperfections au sein d'un câble unipolaire [14].

Lorsque le matériau isolant est soumis à un champ électrique, les imperfections mentionnées précédemment, telles que les cavités d'air, les décollements et les particules étrangères, créent des sites propices à l'apparition de décharges partielles. En effet, en raison de l'hétérogénéité du matériau et la présence de défauts, la répartition du champ électrique au sein de celui-ci n'est pas homogène [14].

Les isolations hautes tension contiennent souvent des défauts qui peuvent être classés en trois catégories [13]:

I.6.1 Microcavités dans le matériau :

En fonction de la structure du matériau, qu'il soit réticulé ou non réticulé, deux cas doivent être considérés. La réticulation du matériau peut entraîner la libération de gaz, qui, si la technologie de fabrication n'est pas appropriée (pression insuffisante, temps de refroidissement inadéquat), peut former des bulles. Dans le cas d'un matériau réticulé, le processus de réticulation est responsable de la formation de cavités. En revanche, dans le cas d'un matériau semi-cristallin non réticulé, la cristallisation peut donner naissance à des cavités de dimensions beaucoup plus petites [13].

➤ **Cavités d'eau :**

Les cavités se forment à l'intérieur du matériau lorsqu'une réticulation par voie humide est réalisée. Dans le cas du polyéthylène, à la température de fusion, l'eau est plus soluble dans le matériau par rapport à la température ambiante, ce qui entraîne un mélange avec le polymère. Lors du refroidissement, les phases se séparent, ce qui entraîne la formation de gouttelettes d'eau qui diffusent progressivement, laissant des cavités dans le matériau.

➤ **Cavités de gaz :**

Lors du processus de réticulation, il peut y avoir une libération de gaz qui a la capacité de former des bulles si la technologie de fabrication n'est pas adéquate. Cela peut être dû à une pression inappropriée ou à une durée de refroidissement insuffisante.

➤ **Cavités créées au cours de la mise en place :**

Des cavités que former pendant la mise en place ou le fonctionnement du système en raison de défauts de fabrication ou de contraintes mécaniques résultant de l'utilisation du système. Ces cavités peuvent provoquer des décollements entre les parties isolantes et conductrices.

I.6.2 Hétérogénéités :

Ces cavités peuvent causer des concentrations locales du champ électrique. Lorsque des inhomogénéités de forme sphérique avec une constante diélectrique ϵ sont immergées dans l'isolant sous un champ électrique uniforme, le facteur multiplicatif du champ électrique reste généralement inférieur à 3 [13].

I.6.3 Les impuretés :

Les impuretés présentes dans les câbles isolés au PRC (Polymère Réticulé Chimiquement) jouent un rôle significatif dans le déclenchement et la propagation des arborescences électriques et des arborescences d'eau, ce qui réduit la durée de vie des câbles. La présence de grandes quantités d'impuretés dans l'isolant contribue à cette diminution de durée de vie.

Les chercheurs ont constaté que les impuretés ont généralement pour origine une contamination importante des écrans semiconducteurs. Le processus de fabrication des câbles, qu'il s'agisse d'une exposition à la vapeur d'eau ou à un gaz inerte, joue un rôle prépondérant dans la contamination de l'isolant.

La présence d'impuretés dans l'isolant a un impact significatif sur les propriétés électriques telles que la rigidité diélectrique, le facteur des pertes diélectriques et la résistivité.

Par ailleurs, les chercheurs ont observé que le vieillissement électrique n'a pratiquement aucune influence sur le processus de diffusion des impuretés dans l'isolant [13].

I.6.4 Vieillissement des Câbles :

Le vieillissement dans les câbles électriques à isolation synthétique est subordonné à la présence d'arborescences électriques. Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, la dégradation des câbles est caractérisée par une modification des propriétés électriques et mécaniques (augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité) [15] :

- **Vieillissement thermique** : Elle est causée par l'effet à long terme de la température sur un isolant.
- **Vieillissement électrochimique** : Il est généré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse qui se produit dans l'isolant.
- **Vieillissement électrique** : se caractérise par la détérioration des propriétés diélectriques d'un matériau, sous l'effet d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée pendant de longues périodes. Il se caractérise par des pertes diélectriques accrues et une résistance transversale plus faible du matériau.

I.7 Définition des Décharges Partielles :

Est une décharge électrique localisée qui se produit à l'intérieur d'un matériau isolant. Elle est qualifiée de "partielle" car elle ne court-circuite pas l'ensemble de l'isolation. La propagation de la décharge est limitée soit parce que le champ électrique local n'est pas suffisamment élevé pour permettre sa propagation complète (comme dans le cas d'une décharge couronne dans un gaz ou un liquide), soit parce que la décharge est arrêtée par un isolant ayant une résistance plus élevée à la propagation des décharges (généralement un matériau solide avec un champ de claquage élevé).

Elles peuvent provoquer des dommages thermiques, des pertes de performance et une diminution de la durée de vie du système isolant. Par conséquent, la présence de ces imperfections dans l'isolant est préoccupante en raison de leur contribution potentielle à l'amorçage des décharges partielles. La détection et la surveillance des décharges partielles sont donc importantes pour évaluer la qualité de l'isolation et prendre des mesures préventives pour assurer un fonctionnement fiable des équipements électriques [16].

I.8. Champ électromagnétique :

C'est la partie de l'espace qui contient et entoure les corps dans des conditions électriques ou magnétiques. L'électromagnétisme est une branche de la physique qui étudie les phénomènes liés aux champs électriques et magnétiques. Dans la théorie de l'électromagnétisme, formulée principalement par James Clerk Maxwell, les équations de Maxwell jouent un rôle fondamental. Ces équations décrivent comment les champs électriques et magnétiques se génèrent mutuellement et se propagent dans l'espace. Elles ont permis de comprendre les relations entre l'électricité, le magnétisme et la lumière [17].

Toute utilisation d'électricité génère un champ électrique et un champ magnétique. L'intensité du champ est forte près de sa source et diminue rapidement à mesure qu'on s'en éloigne. Le concept de champ s'applique également à d'autres phénomènes physiques rencontrés dans notre environnement habituel [18].

I.8.1 Champ électrique :

C'est un champ de force qui est lié à la présence des charges électriques. Ce champ est généralement créé par le mouvement de particules chargées, telles que des électrons ou des protons [19]. Le champ électrique est un champ vectoriel qui est généré par l'interaction à distance entre des particules chargées électriquement et une particule de test immobile, de charge unitaire, dans le référentiel d'étude. Il représente la force exercée sur cette particule de test, divisée par sa charge. Le champ électrique attribue une direction, un sens et une amplitude (grandeur) à chaque point de l'espace. Il décroît cependant de manière inversement proportionnelle au carré de la distance r entre la charge créatrice du champ et le lieu où le champ est mesuré. De plus, il est proportionnel à la charge q qui génère ce champ. Le champ électrique est généralement exprimé en volts par mètre (V/m) [1].

I.8.2. Champ magnétique :

Est engendré par le mouvement des charges électriques dans l'atome. Ce mouvement peut être dû à la rotation des électrons sur eux-mêmes (connu sous le nom de spin des électrons) ou le mouvement des électrons dans les bandes de conduction d'un atome [19]. Le champ magnétique exprime la force exercée entre deux charges électriques en mouvement. Le champ magnétique est généré par le courant électrique qui circule à travers un conducteur. Lorsqu'un appareil est en fonctionnement, il crée un champ magnétique qui disparaît lorsque l'appareil est éteint. Contrairement au champ électrique, le champ

magnétique n'est pas significativement affaibli par les obstacles tels que les arbres, les clôtures ou les bâtiments, et il peut traverser la matière relativement facilement.

Le champ magnétique est généralement représenté par la quantité H , bien que l'on utilise souvent la grandeur B , appelée induction magnétique ou densité de flux magnétique, qui diffère du champ H par une constante de proportionnalité notée μ . B est mesurée en teslas (T). Comme pour le champ électrique, le champ magnétique décroît rapidement avec la distance et peut généralement être négligé à de grandes distances [18].

I.9. Conclusion :

Dans cette première partie, nous avons présenté des généralités sur les lignes de transport d'énergie électrique : aériennes et souterrains. Nous sommes concentrés sur les avantages et les inconvénients des câbles électriques souterrains qui isolées par XLPE en raison de leur utilisation fréquente, et aussi beaucoup discuté sur les différents phénomènes liés à ces défauts qui sont met les câbles hors services i.e. panne de réseau.

Dans le chapitre suivant, nous donnerons un modèle pour calculer des contraintes électriques et magnétiques sous l'espace du logiciel COMSOL Multiphysics.

Chapitre II

Modélisation et Simulation des Contraintes Electromagnétique

II.1 Introduction :

Le chapitre présente la création d'un modèle 2D d'un câble avec des cavités, utilisé pour évaluer les contraintes électromagnétiques présentes dans le câble. L'objectif principal était de prédire le potentiel de charges partielles et la fatigue du câble lié à la présence de ces microcavités.

La simulation de l'isolation artificielle utilisée dans les systèmes de transport d'énergie moyenne tension peut contribuer à une meilleure compréhension de l'effet des microcavités sur le phénomène de charge partielle. Il est important de comprendre comment la microcavité affecte la distribution des dispositifs électriques et électromécaniques pour résoudre ce problème. Les méthodes numériques améliorées, telles que la méthode des éléments exacts, sont plus adaptées pour résoudre ce type de problème, mais nécessitent des méthodes permettant de réduire le temps de calcul et d'améliorer la précision des résultats. COMSOL Multiphysics est utilisé comme plate-forme pour résoudre ces problèmes.

II.2 Méthode des éléments finis (MEF) :

C'est une technologie numérique utilisée pour résoudre des problèmes de physique ou d'ingénierie qui impliquent équations différentielles ou équations aux dérivées partielles. Elle consiste à diviser un domaine continu en un ensemble de petits éléments finis, connectés les uns aux autres, et à discrétiser les équations différentielles ou les équations aux dérivées partielles dans chaque élément.

La MEF est utilisée pour résoudre une large gamme de problèmes, tels que les problèmes de mécanique des solides, de dynamique des fluides et d'électromagnétisme, de transfert de chaleur, et bien d'autres encore. Elle est particulièrement Utile Pour les problèmes complexes où il n'est pas possible d'obtenir une solution analytique.

La méthode des élément fines, est couramment utilisée dans les logiciels de simulation numérique et de modélisation pour prédire le comportement des systèmes dans le monde réel. La méthode des éléments finis trouve également son application dans le processus de conception de structures et de composants, dans l'optimisation de la conception, et dans la recherche en sciences et en ingénierie [13].

II.2.1 Principe :

Le concept de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis, également appelés réseau. Cette étape est d'une grande importance car le choix de la forme des éléments

du réseau est essentiel pour obtenir des résultats précis. Il est donc nécessaire de sélectionner la forme et le degré d'approximation les plus appropriés en fonction de la géométrie du domaine d'étude [16].

Il existe une variété de géométries pour les éléments de réseau, telles que :

- Triangles, rectangles et quadrilatères aléatoires pour les problèmes 2D.
- Tétraédrique, hexaédrique, cubes et prismes pour les problèmes 3D.

II.2.2 La méthode des éléments finis comprend les étapes suivantes :

- Pour effectuer une analyse par éléments finis, les étapes requises incluent les éléments suivants :
- Sélection du domaine : Cela implique de choisir la forme des éléments et de les positionner à travers tout le domaine.
- Attribuez des identifiants aux nœuds et aux éléments et générez des coordonnées.
- Choisissez la fonction d'interpolation appropriée pour les variables d'intérêt.
- Établissement de la formulation mathématique de l'équation aux dérivées partielles correspondant au problème considéré
- Calculer la matrice de rigidité des éléments.
- Assemblage de la matrice de rigidité globale en tenant compte des connexions entre les éléments.
- Application des conditions aux limites pour refléter les contraintes ou les valeurs imposées.
- Résolution de l'équation globale résultante.
- Interprétation des résultats obtenus sous forme de tableaux ou de graphiques générer une visualisation des résultats de l'analyse.

II.2.3 Avantages de la FEM :

Les avantages de la méthode de l'élément finis pour la modélisation des champs électrique-magnétique sont les suivants :

- La flexibilité pour s'adapter à des géométries complexes et à des matériaux non linéaires
- La capacité à prendre en compte les propriétés hétérogènes Matières

Les matrices du système d'équations finales ont une symétrie.

La méthode des éléments finis (FEM) s'est avérée efficace dans de nombreux domaines de l'ingénierie.

Il existe de très bons produits logiciels commerciaux disponibles, ce qui facilite l'accès à cette méthode pour de nombreux problèmes sans nécessairement connaître le champ électromagnétique en détail [20].

II.2.4 Inconvénients de la FEM :

- La FEM peut nécessiter des ressources informatiques importantes en termes de puissance de calcul et de mémoire, en particulier pour les modèles complexes en 3D.
- Bien que la FEM puisse être appliquée à un large éventail de problèmes, elle ne convient pas à tous les types de problèmes physiques. Par exemple, les problèmes impliquant des phénomènes de transport de masse peuvent nécessiter d'autres méthodes de simulation, telles que la méthode des différences finies.
- Enfin, l'interprétation des résultats de la FEM peut être difficile pour les non-experts en raison de la complexité des modèles mathématiques et de la nature abstraite des résultats. Cela peut nécessiter des compétences spécifiques en visualisation de données et en interprétation des résultats pour obtenir des informations significatives à partir des résultats de la simulation [20].

II.3 Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL :

COMSOL Multiphysics est un programme de modélisation et de simulation, multi-physique qui permet de résoudre des équations mathématiques complexes pour des applications en électromagnétisme, en mécanique des fluides et en acoustique, entre autres domaines. Il est capable de résoudre des problèmes en deux ou trois dimensions et permet de visualiser les résultats sous forme de graphiques ou d'animations.

Les interactions magnétiques entre les lignes de champ et la terre ainsi que l'effet des défauts électriques sur les propriétés électromagnétiques du milieu peuvent être étudiés à l'aide de simulations numériques. Une analyse approfondie peut être faite des facteurs affectant ce phénomène, tels que la tension, l'intensité du courant électrique, la nature des matériaux des câbles électriques et la distance entre les câbles.

Il est tout à fait possible d'utiliser les logiciels COMSOL Multiphysics pour simuler les caractéristiques électromagnétiques des lignes électriques en utilisant la méthode des éléments finis, il est possible de partitionner un système des éléments finis, sur lesquels sont effectués des calculs pour déterminer les propriétés électromagnétiques du système dans son ensemble.

L'interface graphique de COMSOL Multiphysics intègre diverses simulations, telles que la définition de la géométrie, les propriétés des matériaux, l'intrication, la sélection du domaine matériel à étudier, la précision des résultats et l'exportation [21].



Figure II.1: Logiciel COMSOL Multiphysics

II.3.1 Modèles :

l'application	AC/DC
COMSOL :	ACOUSTICS
	CHEMICAL SPECIES TRANSPORT
	ELECTROCHEMISTRY
	FLUID FLOW
	OPTICS
	HEAT TRANSFER
	PLASMA
	RADIO FREQUENCY
	SEMICONDUCTOR
	STRUCTURAL MECHANICS
	MATHEMATICS

Figure II. 2 Les modèles de COMSOL.

II.3.2 AC/DC Module :

Ce module permet La simulation de composants électriques et de dispositifs repose sur l'analyse des phénomènes électrostatiques, magnétostatiques et électromagnétiques. Il permet également la résolution de problèmes impliquant des champs électriques et magnétiques, des circuits électromagnétiques, la distribution de charges électriques, la réponse en fréquence, les pertes dans les matériaux, l'induction électromagnétique et la génération de champs électromagnétiques.

- **Modèle électrostatique :**

Nous créons une cavité dans l'isolant de l'échantillon de câble afin d'étudier l'effet de la présence de vides sur le système d'isolation XLPE. Un modèle mathématique du champ électrique dans la cavité est développé en tenant compte du modèle de champ électrique du câble XLPE. L'équation liée au champ électrique (E) et à la tension (V) est la suivante [20].

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

L'équation de la relation constitutive entre le champ électrique (E) et le déplacement électrique (D) dans l'isolant est exprimée en fonction de la permittivité relative de l'isolant et de la surface libre, comme indiqué dans l'équation (II.2). La relation entre le champ électrique (E) et le déplacement électrique (D) dans le vide est donnée par l'équation [20] :

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

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

Où :

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

$\boldsymbol{\varepsilon}_i$: Permittivité relative XLPE

ε_0 : Permittivité relative l'espace.

\mathbf{D} : Le déplacement électrique d'un conducteur qui est directement proportionnel à la tension appliquée au conducteur.

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

La loi de Gauss qui implique la charge libre et l'équation du déplacement électrique :

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

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 [20] :

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

Où ρ est la densité de charge.

L'application d'un matériau de câble ayant une permittivité constante $\boldsymbol{\varepsilon}$ appliquée, l'équation (II.5) devient [20] :

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

En supposant que la densité de charge dans le diélectrique est négligeable et peut être considérée comme nulle, l'équation de Poisson (II.6) se simplifie en équation de Laplace, comme suit :

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

Le problème est résolu concernant la solution d'équation de Laplace à deux dimensions [20] :

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

L'équation (II.8) sera utilisée pour déterminer le champ électrique dans l'isolation des câbles et la cavité dans le logiciel COMSOL Multiphysics à l'aide de la méthode des éléments finis, en tenant compte des conditions aux limites.

- **Modèle magnétostatique :**

Le modèle magnétique permet le calcul des champs magnétiques, des inductions parasites et des forces agissant sur les bobines, les conducteurs et les aimants. COMSOL Multiphysics offre une base de données de matériaux complète, comprenant une large gamme de matériaux magnétiques non linéaires. Différentes combinaisons sont disponibles en fonction de la présence de courants, de matériaux magnétiques, ou des deux, permettant une modélisation adaptée à différentes configurations [22].

II.4 Procédure de simulation :

Voici les étapes générales de procédure pour utiliser COMSOL Multiphysics :

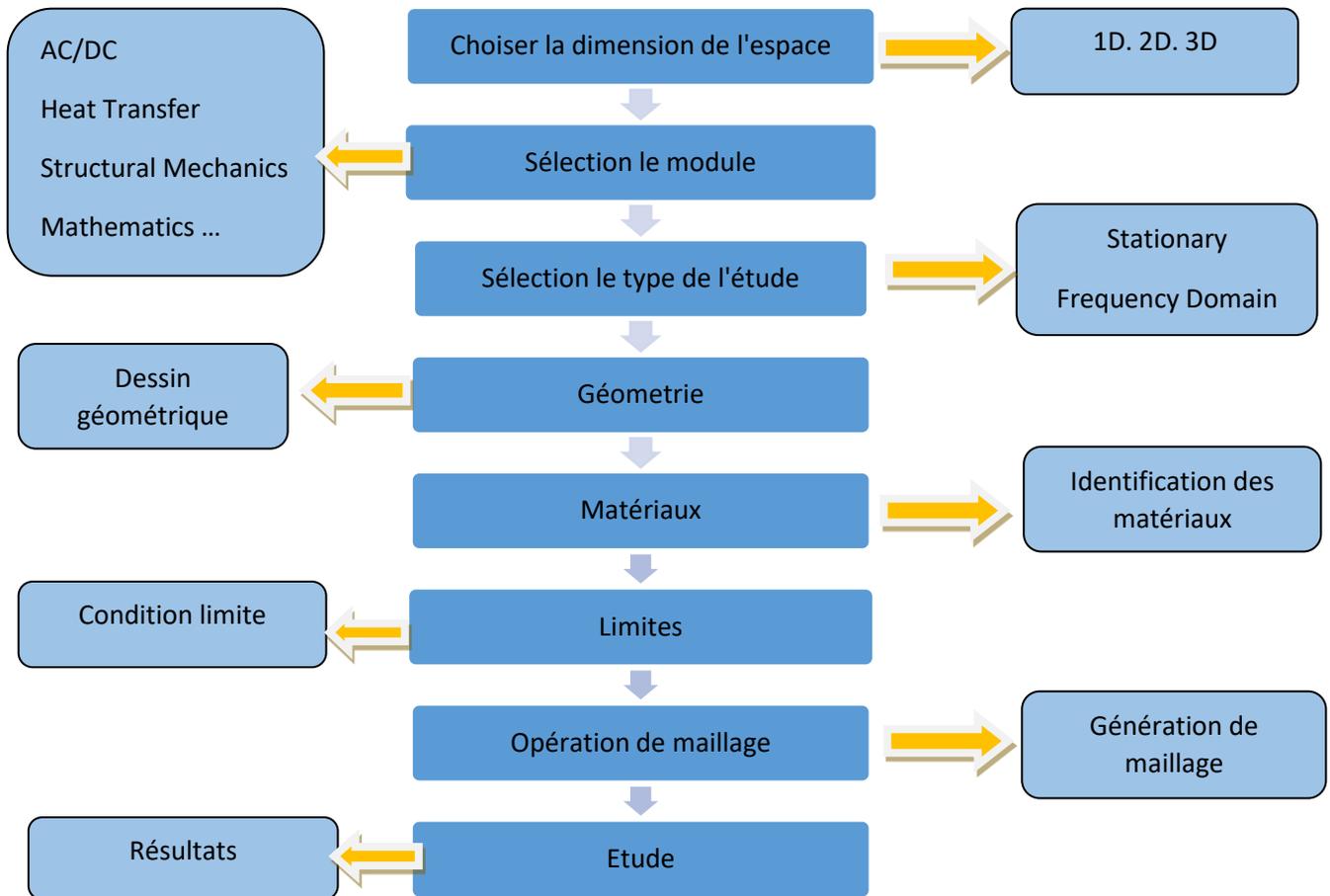


Figure II. 3 Organigramme des étapes de résolution dans COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics contient les différentes étapes du processus de simulation :

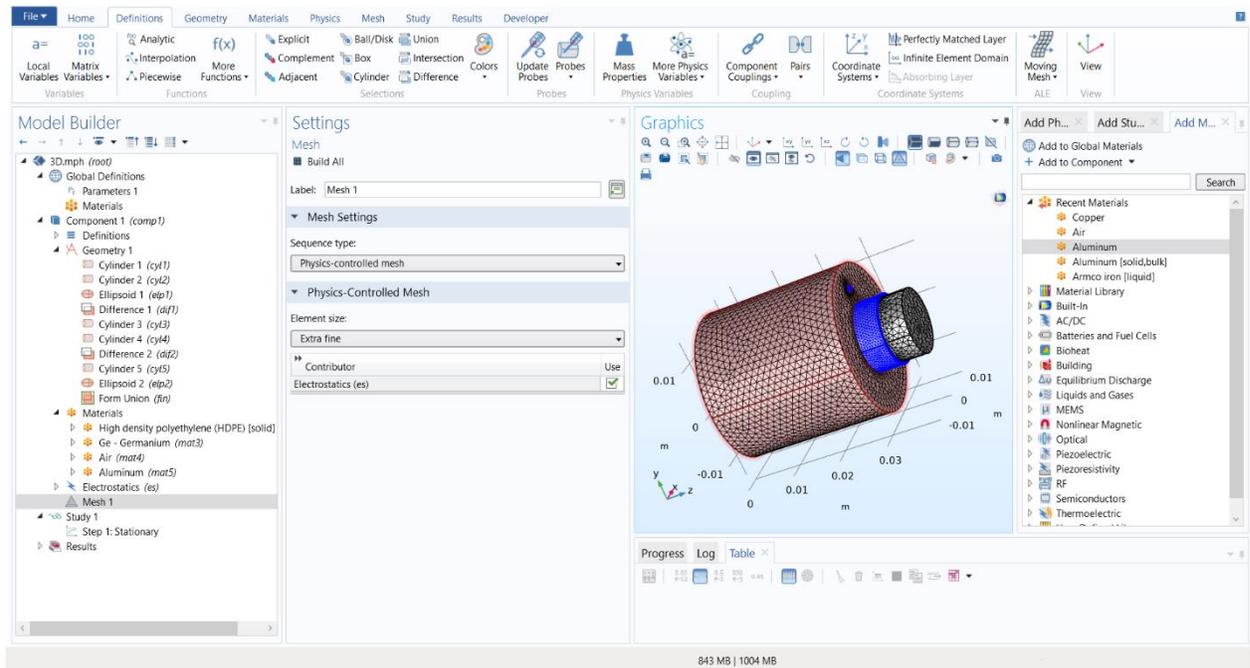


Figure II. 4 Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.

II.4.1 Choix du mode d'application :

Pour traiter la problématique des cavités dans l'isolant, j'ai choisi de travailler en deux dimensions avec des modèles COMSOL Multiphysics. Le choix du module dépend de nature et de la complexité du problème à résoudre. Dans cas de l'étude, la résolution bidimensionnelle était suffisante pour représenter le problème de manière précise et économique en termes de temps de calcul.

II.4.2 Géométrie du câble MT :

La prochaine étape consiste à dessiner et dimensionner la géométrie du système Cette géométrie peut être dessinée directement dans COMSOL Multiphysics en utilisant l'outil de dessin intégré. Il est important de bien dimensionner la géométrie, en prenant en compte les dimensions réelles du système étudié.

Pour le modèle de câble en 2D, le tableau (II.1.2) présente les propriétés des câbles électrique MT en utilisant comme modèle :

❖ Câble unipolaire :

Tableau II. 1 Caractéristiques du câble unipolaire utilisé comme modèle [10].

Type	125mm ² , Al 18/30 KV
D. Conducteur (mm)	12.5
Ecran semi-conducteur (mm)	0.5
Isolation XLPE (mm)	7.6
Couche semi - conductrice extérieur (mm)	0.4
Ecran et ruban en cuivre (mm)	1.2
Diamètre de câble (mm)	32

❖ Câble tripolaire :

Tableau II. 2 Caractéristiques du câble tripolaire utilisé comme modèle [10].

Paramètre	Valeur
Tension	18/30 kV
D. conducteur	20.5 mm
Diamètre d'isolant	8 mm
Couche d'écran intérieur	0.3 mm
Couche d'écran extérieur	0.376mm
Diamètre de câble	92.1mm

Le tableau II.3 Décrit les propriétés électriques des matériaux employés dans la fabrication des câbles électriques.

Tableau II. 3 Caractéristiques des matériaux des câbles.

Matériaux	Conductivité	Perméabilité Relative	Permittivité Relative
Air	10^{-14}	1	1
Terre (sol)	1	1	28
Polypropylène	10^{-18}	1	2.36
Semi conductrice	2	1	2.26
Polyéthylène (XLPE)	10^{-18}	1	2.5
Cuivre	$5.096 \cdot 10^7$	1	1
Aluminium	$3.774 \cdot 10^7$	1	1
Eau	$5.5 \cdot 10^{-6}$	1	80
Fer	10^7	4000	1

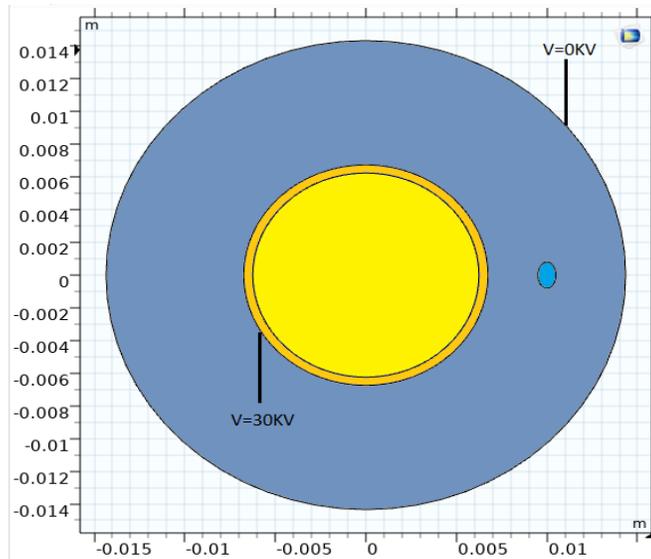


Figure II. 5 Géométrie du câble électrique.

II.4.3 Maillage de câble MT :

Le maillage est important dans la simulation numérique car il permet de discrétiser la géométrie en éléments finis pour résoudre les équations séparément pour chaque élément. Le maillage est effectué dans la fenêtre "Geometry" de COMSOL Multiphysics en cliquant sur le bouton "Mesh" situé en haut à droite de la fenêtre. Une fois la géométrie définie, le maillage est généré automatiquement par le logiciel en Utilise un ensemble défini de nœuds, de triangles et d'éléments. Qui pour les surfaces planes et des éléments tétraédriques pour les volumes.

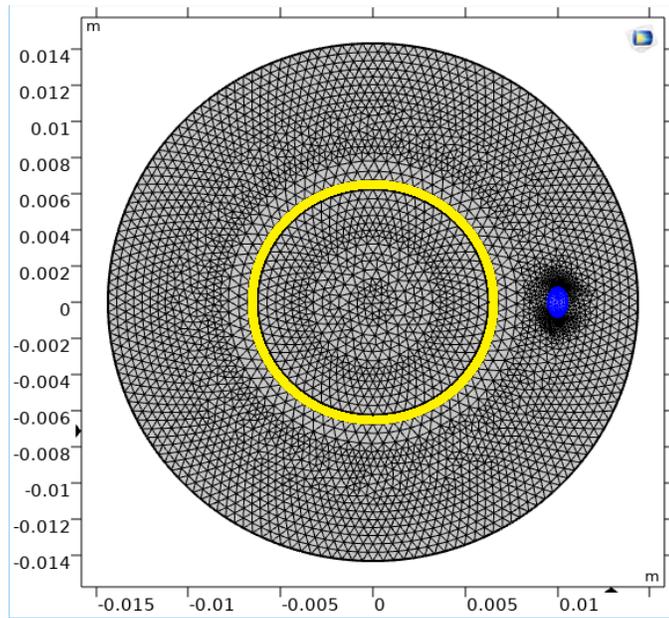


Figure II. 6 Maillage de câble électrique souterrain.

II.5 Calculs des contraintes :

II.5.1 Calcul champ électrique :

Perturbation potentielle est utilisée pour évaluer l'effet de la cavité, qui a une permittivité diélectrique ϵ_c différente de celle d'un diélectrique environnant. Le champ dans la cavité et dans l'isolant est [20] :

$$E = \frac{V}{r} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{R_T}{R_c}\right)} \quad (\text{II.9})$$

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.

Le champ électrique dans la cavité et l'isolant environnant dépend de leur emplacement et de leur permittivité respective. Puisque la permittivité de l'isolant est supérieure à la permittivité de la cavité ($\epsilon_i > \epsilon_c$), le champ électrique à l'intérieur de la cavité est plus fort que celui dans l'isolant.

L'expression suivante est utilisée pour déterminer le taux de contrainte d'isolation ou le taux d'allongement de la cavité dans cette équation. [20] :

$$\frac{d_0}{d} = e^{\left(\frac{P}{V}\right)} \quad (\text{II.10})$$

II.5.2 Calcul champ magnétique :

Pour l'analyse magnétique de chaque appareil électrique, il est nécessaire de comprendre les champs électromagnétiques B et B présents dans chaque pièce, car cela permet le calcul de grandeurs telles que le flux, les effets inductifs ou capacitifs, et bien d'autres. Ces valeurs dépendent à la fois du champ et de l'induction magnétique. Le calcul du champ magnétique est fondamentalement basé sur l'application des principes de base de l'électromagnétisme, qui forment le cadre conceptuel du système décrit par les équations aux dérivées partielles de Maxwell [23].

II.5.2.1 Equations de Maxwell :

Les équations aux dérivées partielles de Maxwell doivent être adaptées en fonction du milieu et des différents domaines du dispositif à étudier, jouent un rôle central dans la description des phénomènes électromagnétiques. Elles fournissent un cadre mathématique précis pour modéliser et comprendre les interactions entre les champs électriques et magnétiques. En ajustant ces équations en fonction des propriétés spécifiques du milieu et des domaines d'intérêt, Il est possible de fournir une description précise et complète du comportement électromagnétique du dispositif étudié. [24].

$$\text{Loi de Maxwell-Gauss} \quad \text{div } \vec{D} = \rho \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Loi de Maxwell-Faraday} \quad \text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II.12})$$

$$\text{Loi de Maxwell-Ampère} \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Loi de conservation du flux magnétique} \quad \text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{II.14})$$

Avec :

\vec{E} : Champ électrique en (V/m).

\vec{D} : Induction électrique en (C/m²).

\vec{H} : Champ magnétique en (A/m).

\vec{B} : Induction magnétique en (T).

\vec{J} : Densité de courant en (A/m²).

ρ : Densité de charge volumique en (C/m³).

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m²) [24].

Pour enrichir les équations de Maxwell et les adapter aux propriétés spécifiques des milieux, il est nécessaire d'ajouter des relations constitutives supplémentaires, qui sont formulées par les expressions suivantes. [23] :

a. Propriétés magnétiques :

Un milieu magnétique est défini par les relations magnétiques qui décrivent la relation entre l'induction magnétique et le champ d'excitation. Pour les milieux isotropes, cette relation s'exprime comme suit :

Relation magnétique $\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{B}_r$ (II.15)

Champ d'induction magnétique $B = \mu H$ (II.16)

Où

Induction du champ magnétique $\mu = \mu_0 \mu_r$ (II.17)

μ_r Perméabilité relative du milieu considéré.

$\mu_r = 1$ Pour un milieu magnétique.

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Perméabilité du vide [H.m⁻¹].

\vec{B}_r : Induction magnétique rémanente en [T].

b. Caractéristiques diélectriques :

Induction du champ électrique est donnée par :

Relation diélectrique $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ (II.2)

Où

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ avec ε_0 : permittivité de l'air et ε_r : permittivité relative du milieu considéré en (F/m).

Dans un milieu conducteur, la densité de courant est déterminée en appliquant la loi d'Ohm :

(Loi d'ohm) $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ (II.18)

Les densités de courant sont liées entre elles par les caractéristiques du milieu dans lequel elles se propagent, telles que la conductivité électrique, la perméabilité magnétique, etc. Ces relations sont exprimées par les équations qui décrivent les lois du comportement du milieu. L'expression détaillée des densités de courant est donnée par :

$$\vec{J} = \vec{J}_s + \vec{J}_{ind} \quad (\text{II.19})$$

\vec{J}_s : Densité de courant imposée dans l'inducteur et \vec{J}_{ind} : Densité du courant induit.

$$\vec{J}_{ind} = \sigma[\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B}] \quad (\text{II.20})$$

Où σ la conductivité électrique en (S/m), \vec{v} le vecteur de vitesse en (m/s).

Le terme $\sigma \vec{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique \vec{E} et le terme $\sigma(\vec{v} \wedge \vec{B})$ exprime le courant résultant du mouvement [23].

c. Conditions de passage :

Les conditions de transmission à la frontière entre deux milieux aux propriétés physiques différentes permettent d'établir des relations entre deux grandeurs à ces frontières. Dans le contexte électromagnétique, ces conditions peuvent conduire à des discontinuités dans les quantités électromagnétiques à la frontière. Ces termes sont exprimés par des équations de type. [25] :

- La continuité de la composante tangentielle du champ électrique.

$$\vec{n} \wedge (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (\text{II.21})$$

- La discontinuité de la composante normale du vecteur d'induction électrique D en présence de charges de surface s'exprime par ρ_s .

$$\vec{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \rho_s \quad (\text{II.22})$$

- La continuité de la composante normale de l'induction magnétique est maintenue à travers la frontière entre deux milieux.

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (\text{II.23})$$

- La discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent.

$$\vec{n} \wedge (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{J}_s \quad (\text{II.24})$$

Ici \vec{n} est le vecteur normal à l'interface dirigée du milieu vers un autre, \vec{J}_s est la densité surfacique de courant à l'interface et ρ_s densité de charge électrique surfacique à l'interface.

Effectivement, d'après les équations précédentes, on observe une continuité des composantes respectivement normales de l'induction magnétique \vec{B} et tangentielle du champ électrique \vec{E} à la traversée de la surface de séparation des deux milieux 1 et 2. Cependant, il y a une discontinuité des composantes respectivement tangentielle du champ magnétique \vec{H} et normale de l'induction électrique \vec{D} en raison de la présence de courants et de charges surfaciques [25].

L'interface « Electric Curent » utilise cette loi de conservation pour déterminer la valeur de V dans les domaines. L'alimentation des trois phases est comme suite :

$$V_a = V_0 \quad V_b = V_0 e^{-j\frac{2\pi}{3}} \quad V_c = V_0 e^{+j\frac{2\pi}{3}} \quad (\text{II.25})$$

II.6 Validation du modèle :

II.6.1 Contraintes électriques :

Nous avons testé le programme COMSOL Multiphysics pour évaluer la procédure de calcul du champ électrique dans le cas d'une présence de cavité. Pour nos essais, nous avons pris en compte une cavité possédant les mêmes propriétés d'isolation que son environnement, pour les câbles (unipolaire et tripolaire). En utilisant la méthode de résolution numérique de COMSOL, nous avons pu calculer avec précision le champ électrique à l'intérieur de la cavité, en tenant compte de la présence de matériaux isolants. Ces tests ont confirmé l'efficacité de la procédure de calcul et la capacité du logiciel à traiter de manière précise les problèmes de champ électrique avec des cavités.

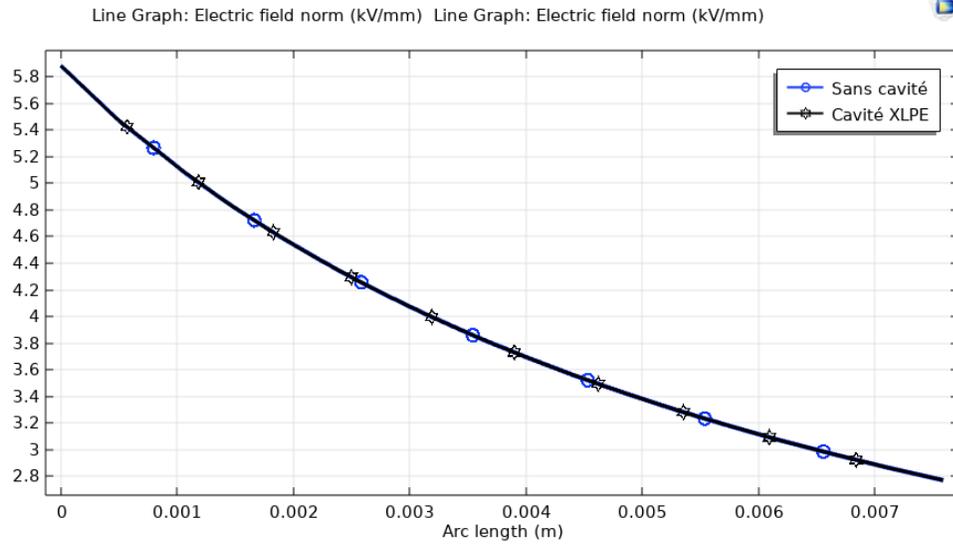


Figure II. 7 Distribution du champ électrique dans l'isolation (unipolaire).

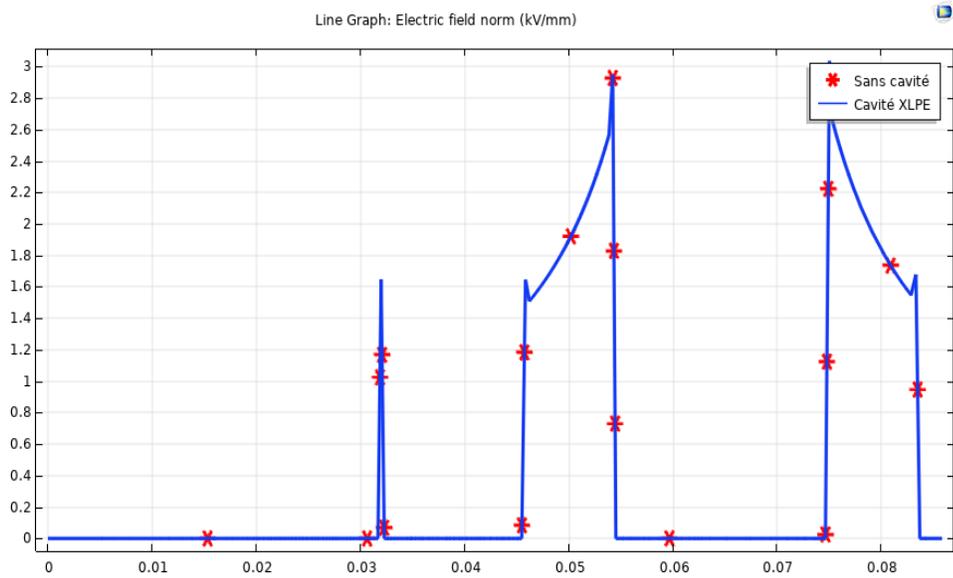


Figure II. 8 Distribution du champ électrique dans l'isolation (tripolaire).

La comparaison entre les résultats du champ électrique dans présence de cavité et son inexistence démontre une concordance satisfaisante. Figure (II.6.7).

II.6.2 Contraintes magnétiques :

Dans la deuxième étape, nous appliquons la même procédure que dans la première étape, mais cette fois-ci avec le champ magnétique.

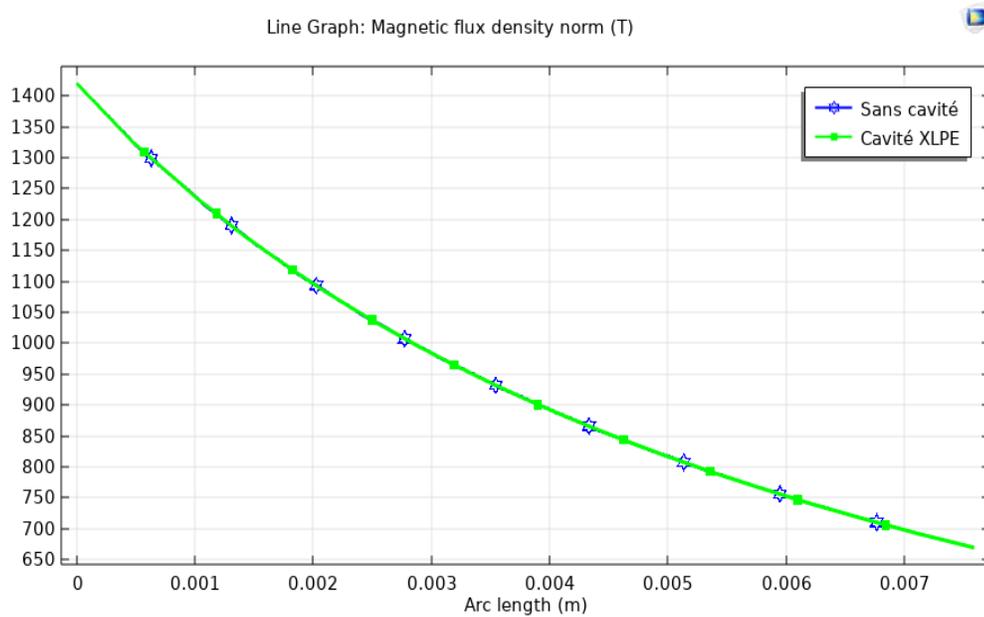


Figure II. 9. Distribution du champ magnétique dans l'isolation (unipolaire).

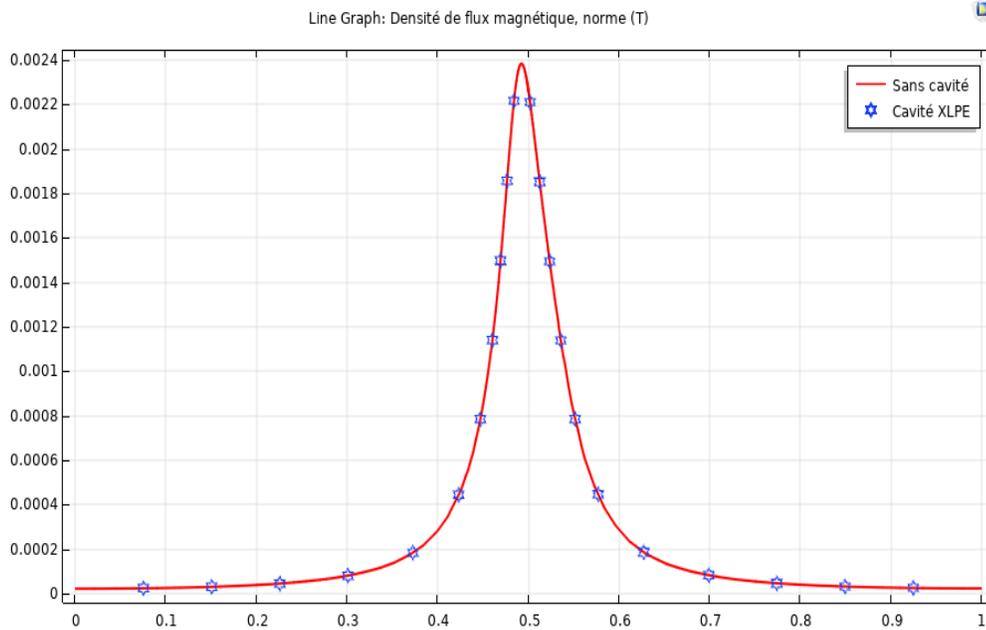


Figure II. 10 Distribution du champ magnétique dans l'isolation (tripolaire).

Notre modèle a été validé, nous pouvons affirmer qu'il est intact et qu'aucun défaut technique n'a été identifié.

II.7 Conclusion :

La résolution du problème complexe de détermination de la distribution du champ électrique dans un système haute tension peut être réalisée efficacement grâce à l'utilisation de la méthode des éléments

finis (MEF). Le logiciel COMSOL Multiphysics offre une puissante et interactive approche basée sur la MEF pour résoudre ce type de problème. Nous avons développé un modèle dans COMSOL Multiphysics et l'avons validé afin de démontrer qu'il est exempt de tout défaut technique.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons et interpréterons les résultats de simulation relatifs à la distribution du champ électrique et du champ magnétique pour les microcavités présentes dans l'isolant (XLPE). Ces résultats permettront de mieux comprendre le comportement électromagnétique de ces microcavités dans l'isolant, ce qui est essentiel pour évaluer la performance et la fiabilité du système haute tension.

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1 Introduction :

Au cours des années récentes de nombreux enquêteurs à travers la planète se sont penchés sur l'analyse et l'étude des propriétés du champ électrique et magnétique des câbles électriques souterrains. Pour prédire les paramètres physiques dans un système stationnaire, un modèle 2D basé sur la géométrie du câble a été élaboré à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics.

Ce chapitre se concentre sur l'analyse en trois parties dans les câbles (unipolaires et tripolaires). Dans un premier temps, nous étudions l'effet des cavités, leur taille et leur permittivité relative liées aux champs électriques ou magnétiques présents dans l'isolant XLPE du câble. Ensuite, nous étudions l'influence de la répartition des lignes de champ électromagnétique dans le voisinage et à proximité des câbles de transmission souterrains. Enfin, nous évaluons la contamination électromagnétique des câbles en termes de bon fonctionnement et de détection des défauts. Cette étude approfondie vise à améliorer notre compréhension des câbles électriques souterrains et à assurer leur fonctionnement fiable en évitant les problèmes de champs électriques et magnétiques indésirables.

III.2 Résultats et discussion Câble électrique :

III.2.1 Anisotropie du champ électrique dans les câbles unipolaires :

a) Cas d'une cavité :

➤ Cavité d'air :

Dans notre étude de cas spécifique hétérogène, nous effectuons une simulation d'isolation de câble comprenant une seule cavité. La partie isolante est censée contenir un entrefer de dimensions (10,5) μm , situé à une distance de 10 mm du centre du conducteur central, nous effectuons une simulation de l'isolation d'un câble unipolaire de moyenne tension (MT) avec une tension de 30 kV.

Cependant, la figure (III.1) montre clairement que la présence de cette cavité a un effet sur la distribution du champ électrique dans la région où elle se trouve. Une distorsion des lignes de champ est observée au niveau du plan de la cavité.

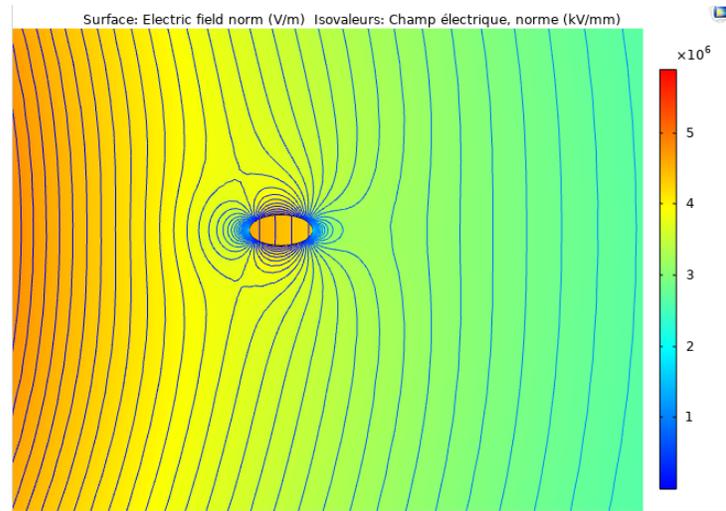


Figure III. 1 L'impact de la cavité d'air sur le champ électrique

On note que l'existence d'une Cavité a un effet sur distribution champ électrique dans la région correspondante, appelée champ d'impact. Il y a une augmentation de la valeur du champ électrique dans cette région par rapport à sa valeur initiale dans le cas homogène, comme le montre la figure (III.2). Cette augmentation de la valeur du champ s'explique par la faible permittivité de l'air ($\epsilon_r = 1$).

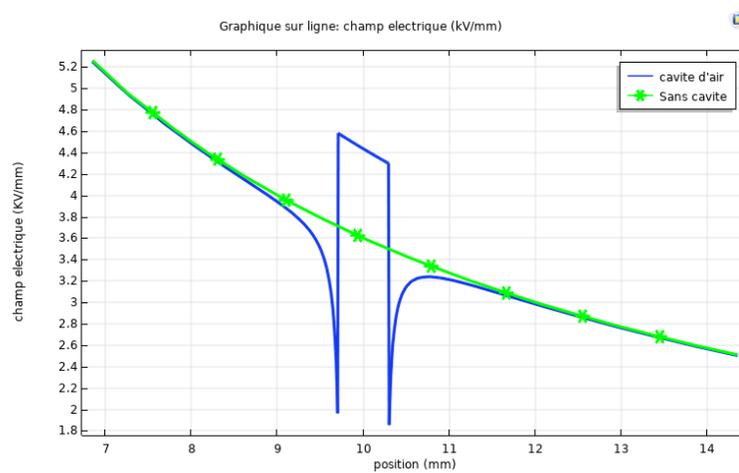


Figure III. 2 Répartition du champ électrique à l'intérieur et autour de la cavité

➤ Cavité d'azote :

Nous changeons le matériau de la cavité dans la simulation et plaçons le matériau azoté et étudions le champ électrique dans la cavité.

La figure (III.3) présente les résultats obtenus dans la cavité à azote, où une déformation similaire des lignes de champ électrique est observée au niveau de la cavité à air. Cela s'explique par le fait que la permittivité de l'azote est égale à celle de l'air ($\epsilon_r = \epsilon_N$).

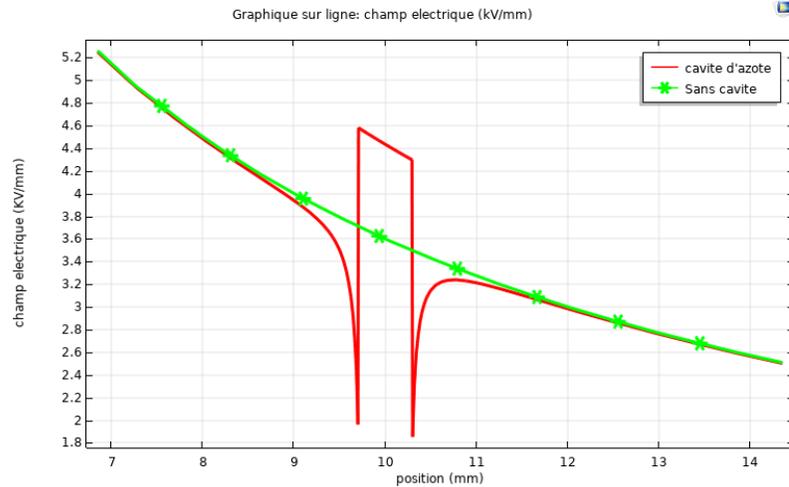


Figure III. 3 Répartition du champ électrique à l'intérieur et autour de la cavité

La figure (III.4) montre une comparaison entre plusieurs cavités (eau, air, azote et fer). On observe une augmentation considérable du champ électrique dans la cavité d'eau par rapport aux autres matériaux de cavités, ce qui peut s'expliquer par leurs valeurs de permittivité différentes ($\epsilon_{(f,n,a)} < \epsilon_{eau} = 80$).

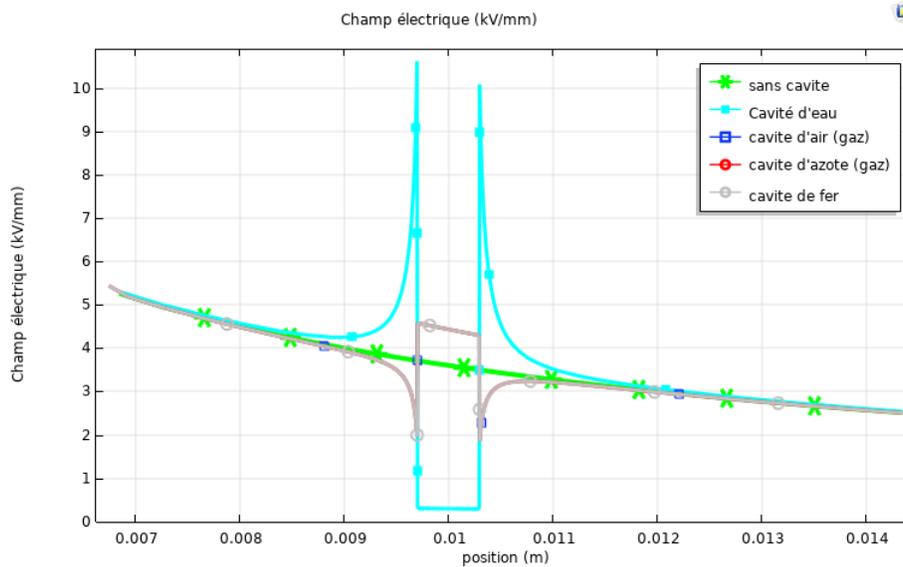
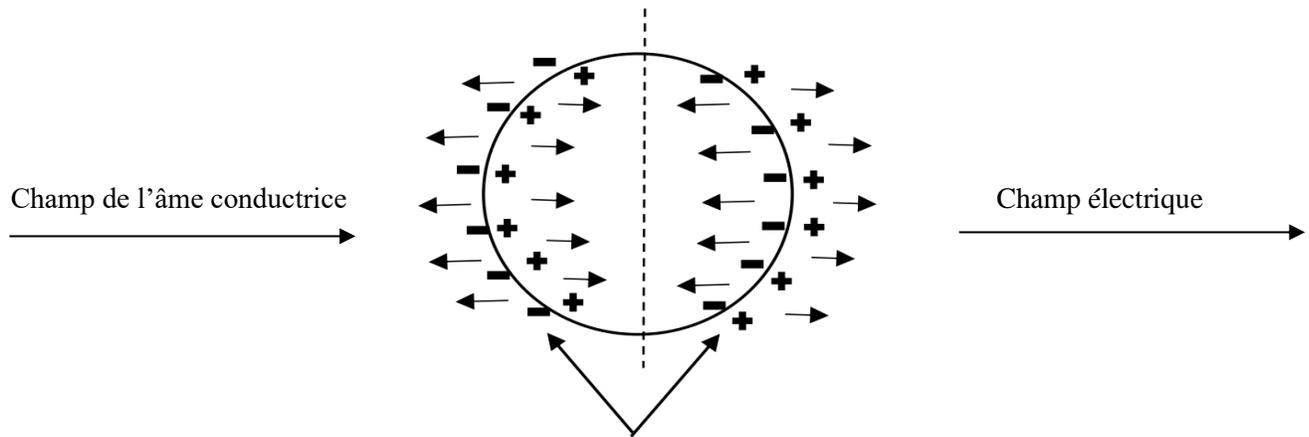


Figure III. 4 comparaisons entre plusieurs cavités

Les résultats montrent que la valeur du champ électrique à travers les parois de la cavité est inférieure à celle à l'intérieur de la cavité. Ceci indique que la polarisation se produit aux bords de la cavité, comme le montre la figure (III.5). Cette polarisation s'oppose au champ électrique externe, réduisant le rapport entre les domaines à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité.



La rétention des charges polarisées

Figure III. 5 Effet de polarisation dans la zone de la cavité

b) Cas de deux cavités :

➤ **Le cas de deux cavités de même taille et permittivité relative :**

Nous étudions l'effet des contraintes de champ électrique généré par l'interaction de deux cavités de même taille ($d = 10 \mu\text{m}$) et de même permittivité relative ($\epsilon_r = 1$).

La figure (III.6) montre la distribution radiale du champ électrique généré par l'interaction entre deux cavités, à une distance inférieure à trois fois la taille de la cavité. On observe que les valeurs de champ électrique sont plus faibles par rapport au cas où une seule cavité est présente dans la même position. De plus, on voit que le champ électrique dans la cavité adjacente à la gaine est plus élevé que dans la cavité adjacente au noyau. Cet écart s'explique par l'influence mutuelle entre les cavités.

Cette observation peut être expliquée de la manière suivante : la cavité située du côté de la gaine joue le rôle de source. En plus de la polarisation de la cavité adjacente.

Nous pouvons conclure que lorsque les cavités sont suffisamment proches pour que leur effet mutuel se produise, les deux cavités sont moins susceptibles de présenter des charges partielles par rapport au cas où l'isolant ne contient qu'une seule cavité.

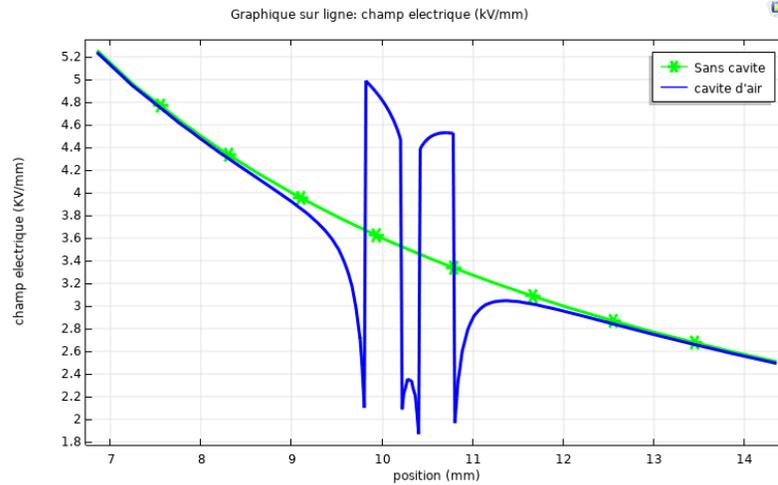


Figure III. 6 Répartition du champ électrique dans deux cavités en interaction.

➤ **Etat de deux cavités de tailles différentes mais ayant la même constante de permittivité relative :**

Nous étudions l'effet de deux cavités de tailles différentes et elles ont la même valeur de permittivité électrique.

L'effet entre les deux cavités de tailles $d_1=20\mu\text{m}$ différentes apparaît en figures (III.7.8) et Sur la figure (III.7) la cavité trouvée dans le groupe de gaine d conduit à une augmentation du champ plus que la cavité à côté du noyau $d_2 =10\mu\text{m}$ et les résultats varient en fonction de la forme la figure (III.8).

Une explication à ce phénomène est la suivante : lorsque plusieurs cavités sont présentes, la valeur du champ électrique correspondant à une taille de cavité spécifique peut varier. Lorsque la taille de la cavité augmente, la valeur du champ électrique associée à cette cavité augmente également, indépendamment de sa position par rapport aux autres cavités.

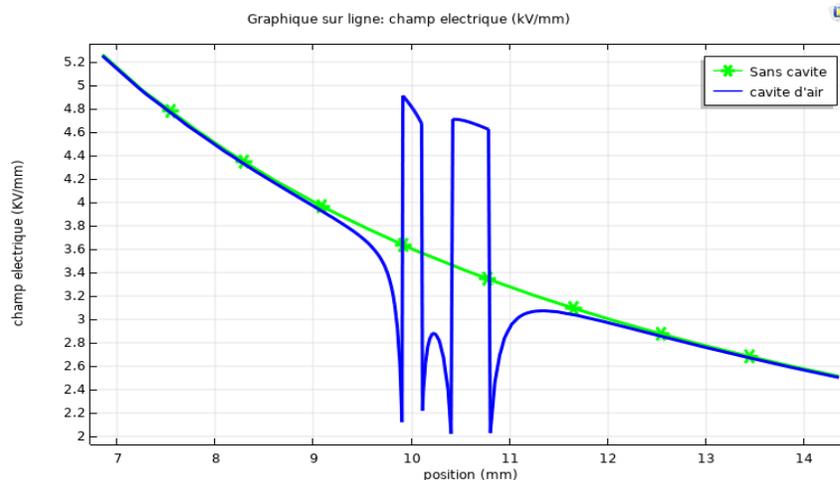


Figure III. 7 Répartition du champ électrique dans deux cavités en interaction.

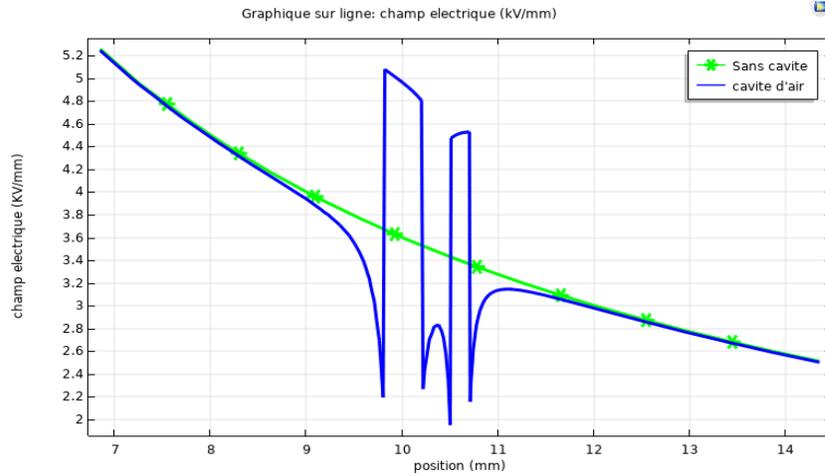


Figure III. 8 Répartition du champ électrique dans deux cavités.

➤ **Cas de deux cavités de même volume mais de permittivité relative différente :**

Nous étudions l'effet de deux cavités de même taille mais avec des permittivités différentes sur les contraintes de champ électrique. La figure (III.9) montre l'interaction entre ces deux cavités. La cavité adjacente à la gaine contient de l'eau ($\epsilon_{\text{eau}} = 80$), La présence d'eau dans cette cavité entraîne une augmentation notable de la pression dans la première cavité située près du cœur, est d'environ 6 kV/mm au milieu et de 3,6 kV/mm sur les parois de la cavité.

La détérioration de l'isolation est directement liée à la concentration des cavités en plus de leur effet néfaste. Les résultats obtenus ont montré que la présence d'eau dans le câble a un effet plus néfaste que la présence d'air.

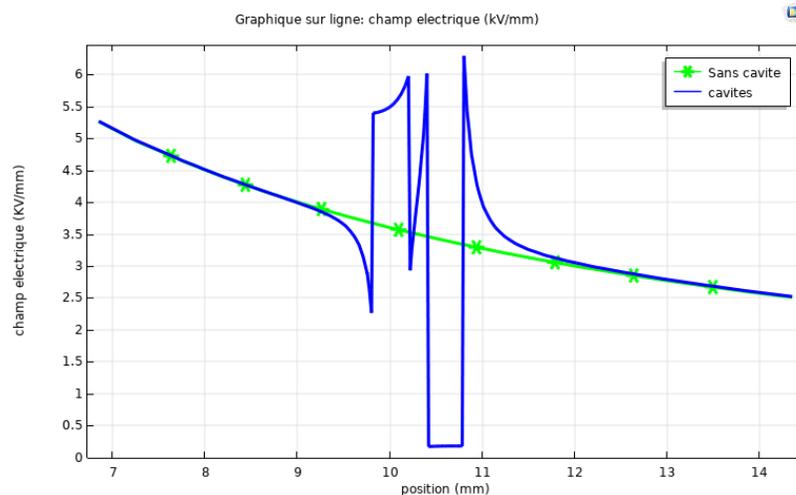


Figure III. 9 Répartition du champ électrique dans deux cavités différentes permittivités

III.2.2 Variation du champ électrique dans un câble tripolaire :

➤ Cas sans cavité :

Dans cette étude, nous effectuons une simulation de l'isolation d'un câble tripolaire de moyenne tension (MT) avec une tension de 30 kV figure (III.10).

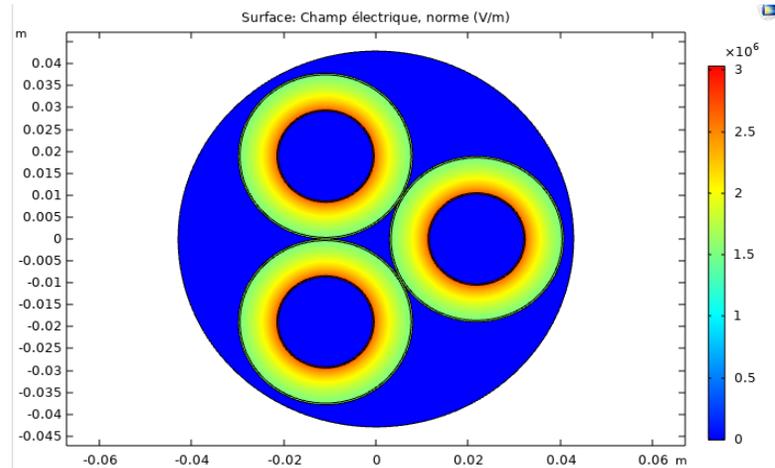


Figure III. 10 Module de simulation champ électrique

La figure (III.10) met en évidence la répartition de la densité de courant électrique dans les trois phases du câble MT à trois conducteurs.

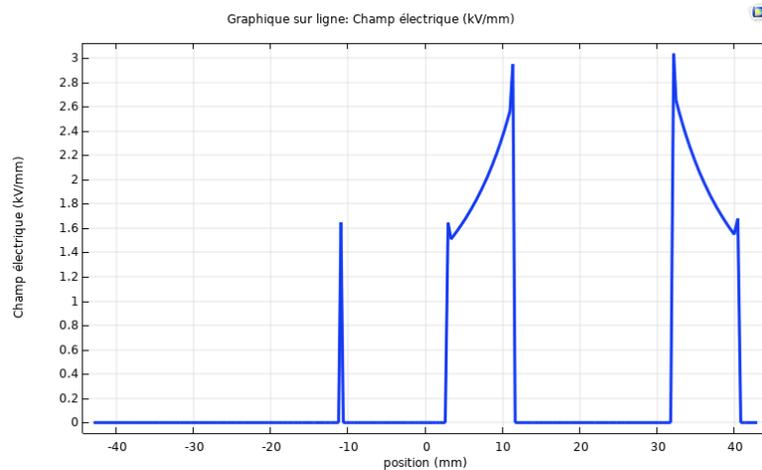


Figure III. 11 Distribution du champ électrique dans le câble tripolaire

La figure (III.11) présente la distribution du champ électrique dans le câble tripolaire MT au niveau des trois phases.

➤ Cas d'une cavité :

➤ Cas d'une cavité à l'intérieur d'une phase :

Dans cette étude spécifique (le cas hétérogène), nous effectuons une simulation de l'isolation d'un câble tripolaire (voir figure III.12) qui comporte cavité unique. Nous supposons que la section isolante du câble comprend une cavité d'air d'une taille de 20 μm , située à une distance de 8 mm du centre de câble, figure (III.18) La distorsion des lignes de champ lumen peut être facilement distinguée.

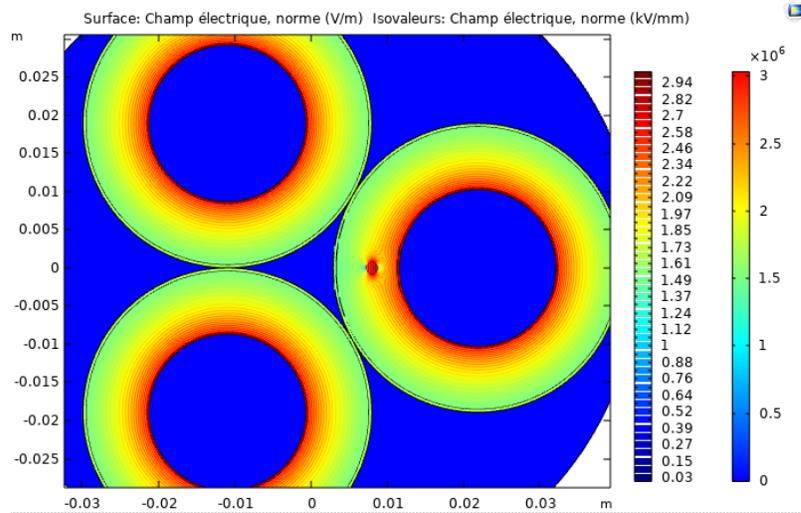


Figure III. 12 Module de simulation champ électrique dans la présence de cavité d'air

Il est important de souligner que la présence d'une cavité a un impact sur la distribution du champ électrique dans la région respective figure (III.13). Comme nous l'avons déduit précédemment dans le cas d'un câble mono cœur, cette augmentation du champ électrique s'explique par la différence de permittivité entre l'air et les isolants qui constituent le câble tripolaire ($\epsilon_r = 1$).

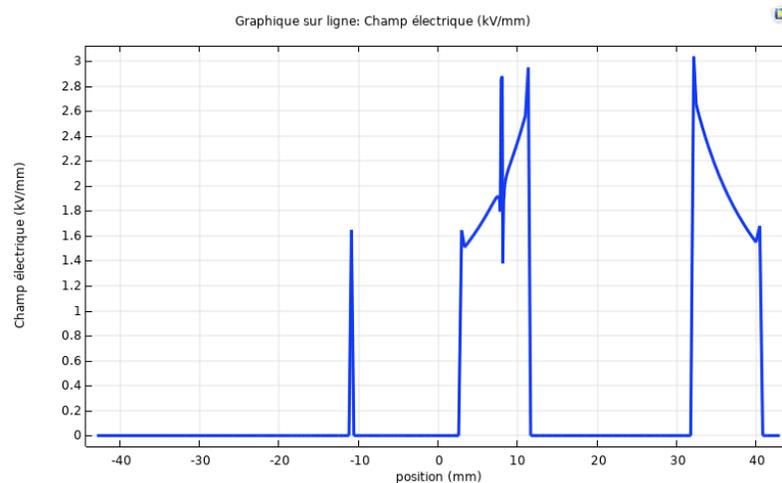


Figure III. 13 Impact d'une cavité sur la distribution de champ électrique.

➤ Cas d'une cavité à l'extérieur des trois pôles :

Dans cette étude spécifique (le cas hétérogène), nous effectuons une simulation de l'isolation d'un câble tripolaire figure (III.14) avec une seule cavité C'est à l'extérieur des trois pôles. D'une taille de $20 \mu\text{m}$, située à une distance de 20 mm du centre de câble.

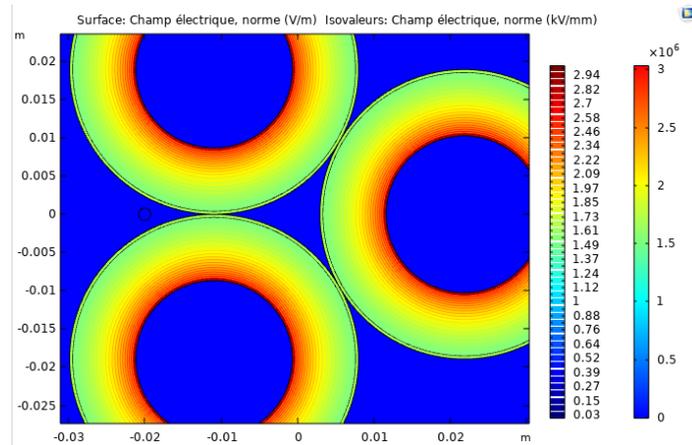


Figure III. 14 Module de simulation champ électrique dans la présence de cavité d'air

Il est important de souligner qu'il n'y a pas de variation de la valeur du champ électrique à l'intérieur de l'espace de la cavité de l'isolant par rapport au premier cas où la cavité était présente à l'intérieur des trois pôles. Cette observation est illustrée dans la figure (III.15) qui démontre que cette valeur reste inchangée, Ceci peut être expliqué par l'absence d'activité électrique à l'intérieur du remplissage du câble, qui est limitée aux isolateurs des électrodes internes.

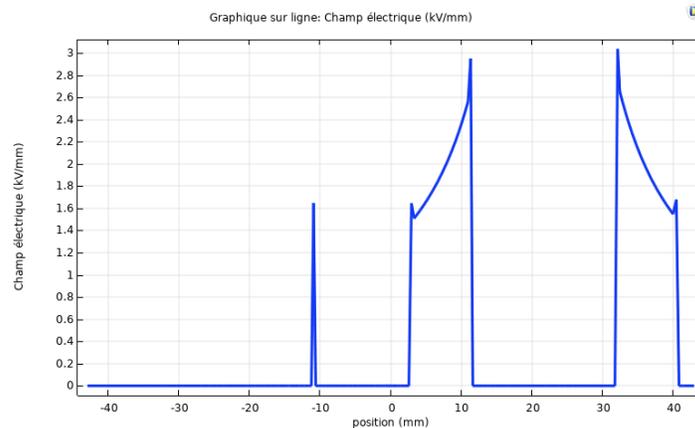


Figure III. 15 Impact d'une cavité sur distribution de champ électrique

III.2.3 Variation du champ magnétique dans câble unipolaire :

➤ **Premier cas :**

Dans ce cas particulier de notre étude (le cas hétérogène), nous simulons l'isolation d'un câble unipolaire. La partie isolante est censée contenir une cavité d'air de taille $(10,5) \mu\text{m}$ qui est placée à une distance de 10 mm du centre de l'âme conductrice, nous effectuons une simulation de l'isolation d'un câble unipolaire de moyenne tension (MT) avec une tension de 30 kV.

La figure (III.16) montre que la présence de la cavité n'a pas d'effet sur la répartition du champ magnétique, même si la cavité est présente au niveau diélectrique.

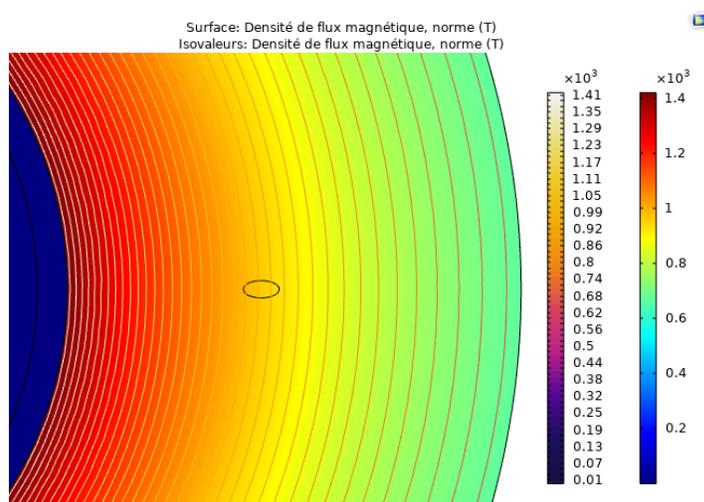


Figure III. 16 Effet d'une cavité d'air sur champ magnétique

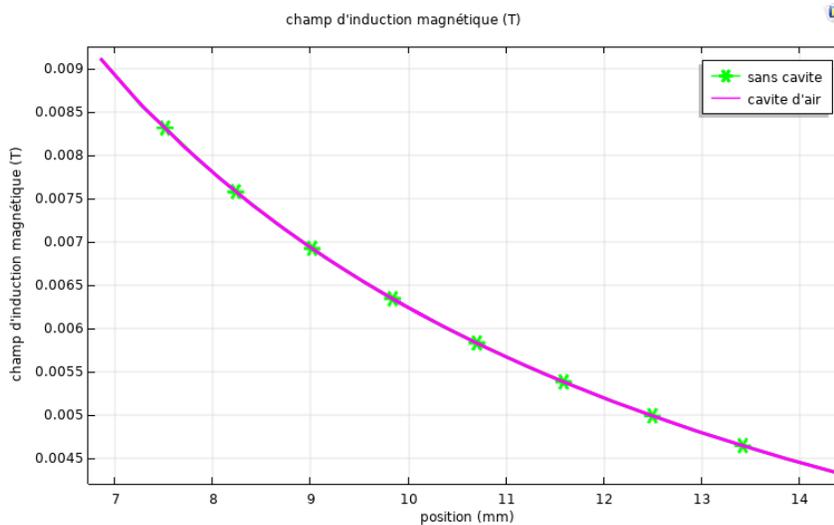


Figure III. 17 Répartition du champ magnétique dans la région contenant une cavité.

Il est important de souligner qu'il n'y a pas de variation de valeur du champ magnétique à l'intérieur de l'espace de cavité de l'isolant par rapport à sa valeur initiale dans l'état homogène. Cela est illustré dans la figure (Fig. III.17) qui démontre que cette valeur reste inchangée en raison de la perméabilité de l'air, qui a la même valeur que celle de l'isolant ($\mu_i = \mu_c = 1$).

➤ **Deuxième cas :**

Nous faisons la même simulation que dans le premier cas, mais nous échangeons de l'air du fer et étudions le résultat.

Il convient de noter que la présence d'une cavité a un effet sur la répartition du champ magnétique dans figure (III.18) la région dans laquelle elle se trouve. Une augmentation de la valeur du champ magnétique est observée dans cette région par rapport au premier cas, comme le montre la figure (III.19). Cette augmentation de la valeur du champ s'explique par la forte perméabilité de cavité ($\mu_f = 4000$).

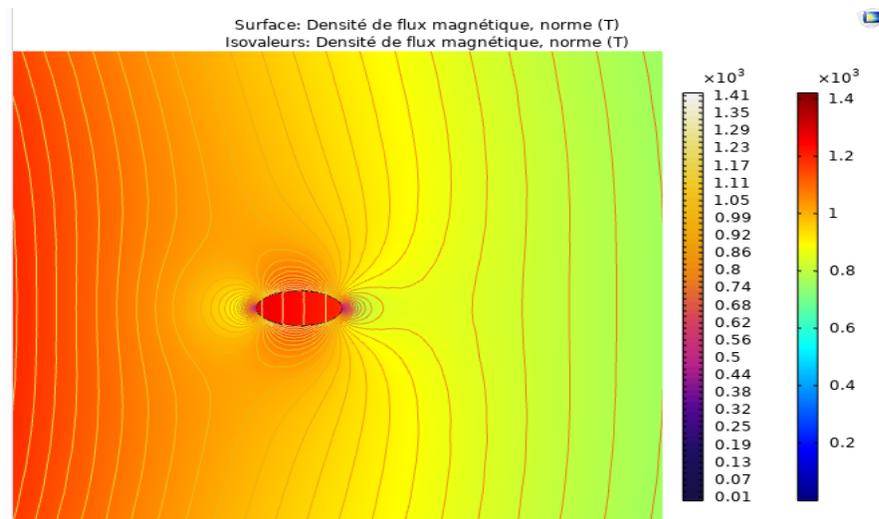


Figure III. 18 L'effet d'une cavité en fer sur le champ magnétique

La figure (III.20) montre une comparaison entre plusieurs cavités (eau, air, azote et fer). On observe une augmentation considérable du champ électrique dans la cavité de fer par rapport aux autres matériaux de cavités, ce qui peut s'expliquer par leurs valeurs de perméabilité différentes ($\mu_{(e,N,a)} < \mu_f = 4000$).

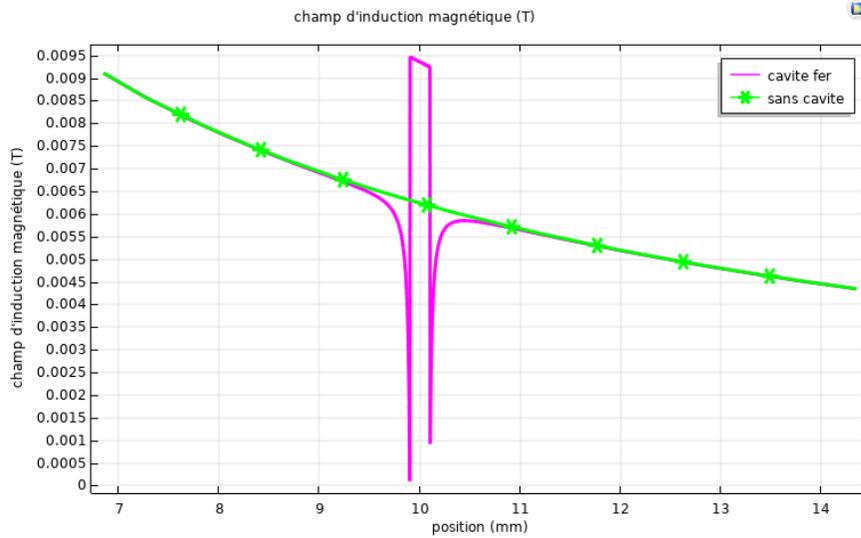


Figure III. 19 Répartition du champ magnétique dans la région contenant la cavité

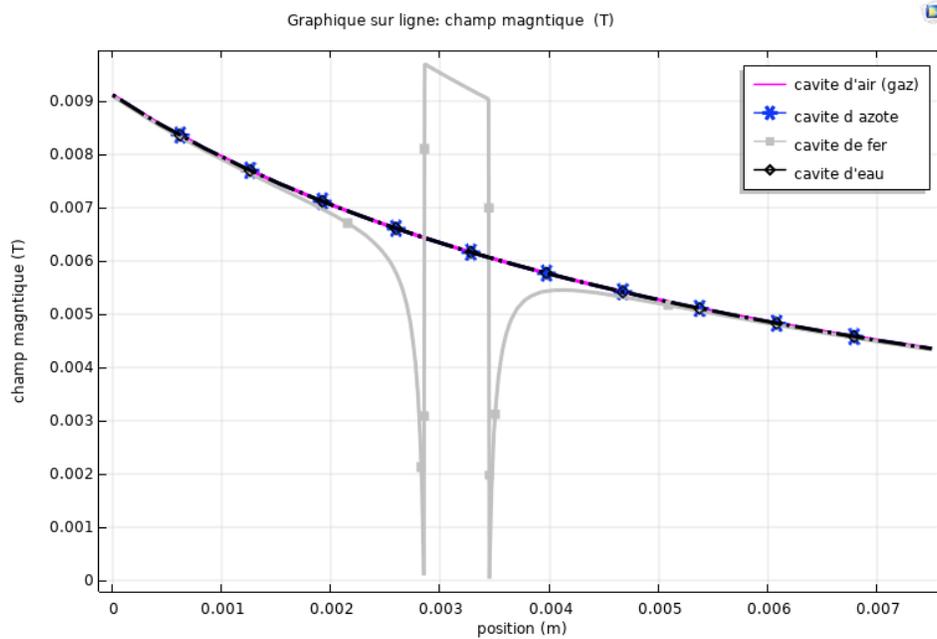


Figure III. 20 Comparaison entre plusieurs cavités

III.3 Analyse des résultats et discussion des câbles électriques :

III.3.1 Paramètres géométriques des câbles électriques souterrains

Tableau III. 1 La distance entre les câbles de terre et de terre [5].

Câble tension	H (mm)	D (mm)
THT	1600	234
HT	1000	158
MT	700	64
BT	600	

Les câbles électriques souterrains se distinguent par les distances entre chaque pôle, conformément aux standards internationaux. Le tableau (III. 21) présente les différentes structures géométriques des lignes électriques.

Les schémas présentent les aspects géométriques des lignes électriques, "D" fait référence à l'écart entre les câbles, tandis que "H" représente la profondeur à laquelle les câbles sont enfouis dans le sol.

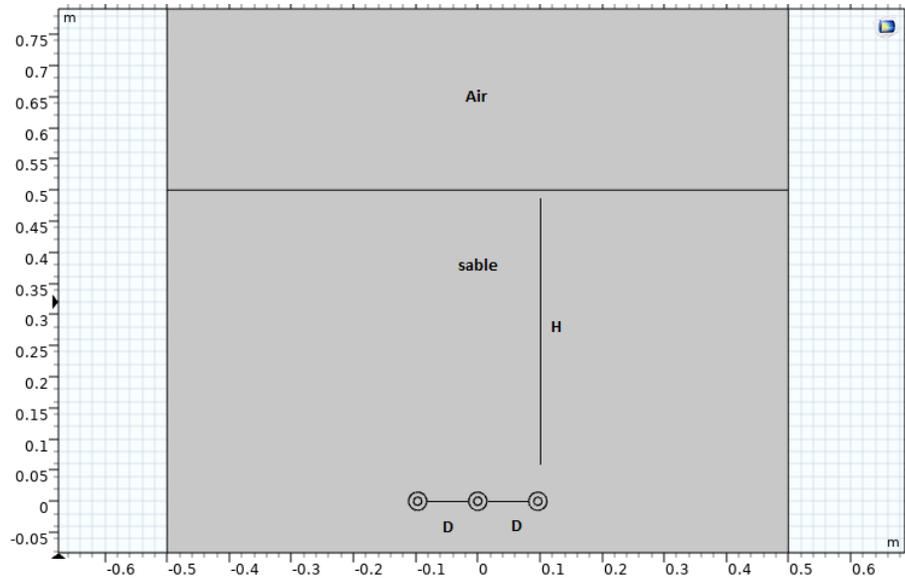


Figure III. 21 Propriétés géométriques du modèle bidimensionnel

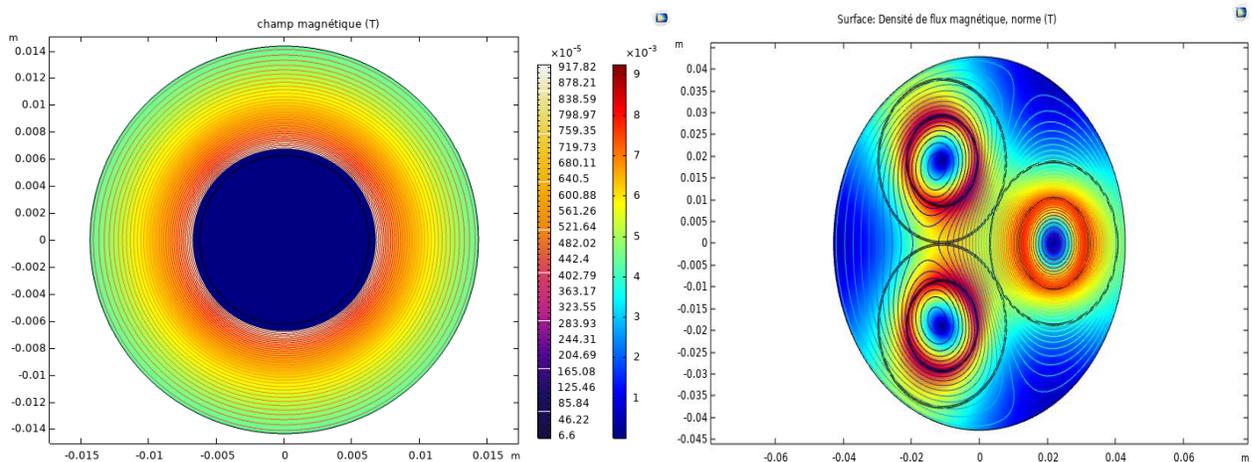


Figure III. 22 le champ d'induction magnétique

La figure (III.22) montre la distribution du champ magnétique dans chaque câble électrique. Ces résultats mettent en évidence un champ magnétique élevé dans et autour des conducteurs, dû à la forte intensité du courant circulant dans les câbles.

III.3.2 Champ magnétique :

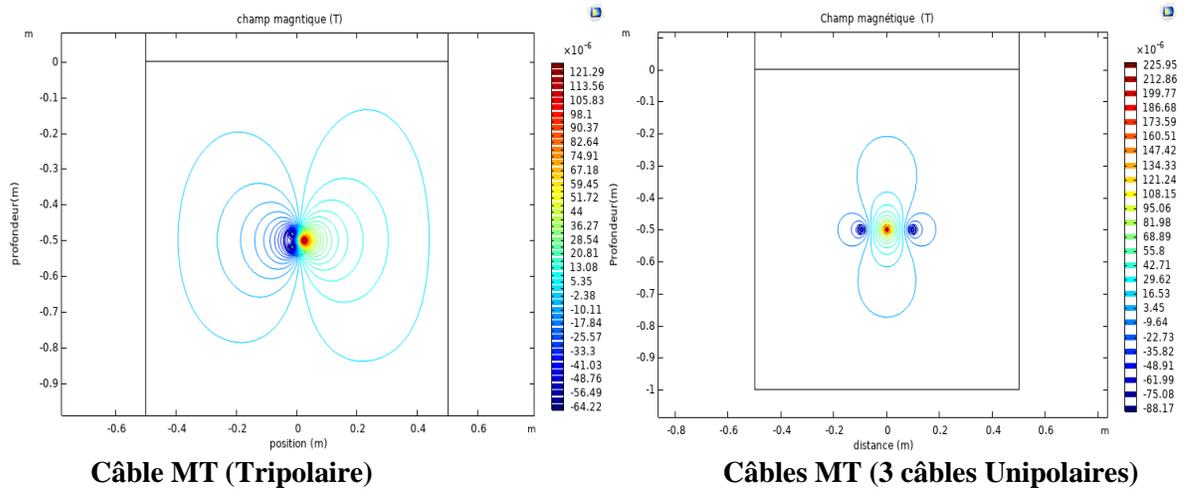


Figure III. 23 Distribution du champ magnétique

Les résultats présentés sur la figure (III.23) indiquent clairement que la distribution du champ est fortement affectée par la forte intensité du courant circulant dans les trois câbles. Des lignes de champ magnétique apparaissent du sol vers l'air. Il existe des interactions électromagnétiques constantes entre les lignes électriques, y compris des effets inductifs et capacitifs, qui sont représentés par les lignes de champ entre les phases.

➤ Distribution champ d'induction magnétique :

Les résultats de la simulation révèlent la distribution horizontale et verticale (sur les axes x et y) du champ d'induction magnétique à différentes distances au-dessus des lignes électriques souterraines, comme le montrent les figures (III.24-25). Les mesures en abscisse sont effectuées par rapport à la position zéro au-dessus des câbles.

Les figures (III.24-25) présentent les résultats montrant la variation du champ magnétique avec la distance. Il y a une augmentation du champ magnétique qui atteint son maximum près des trois câbles électriques, en dessous et au-dessus de la ligne. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne des câbles électriques, le champ magnétique diminue et devient moins important dans les deux sens.

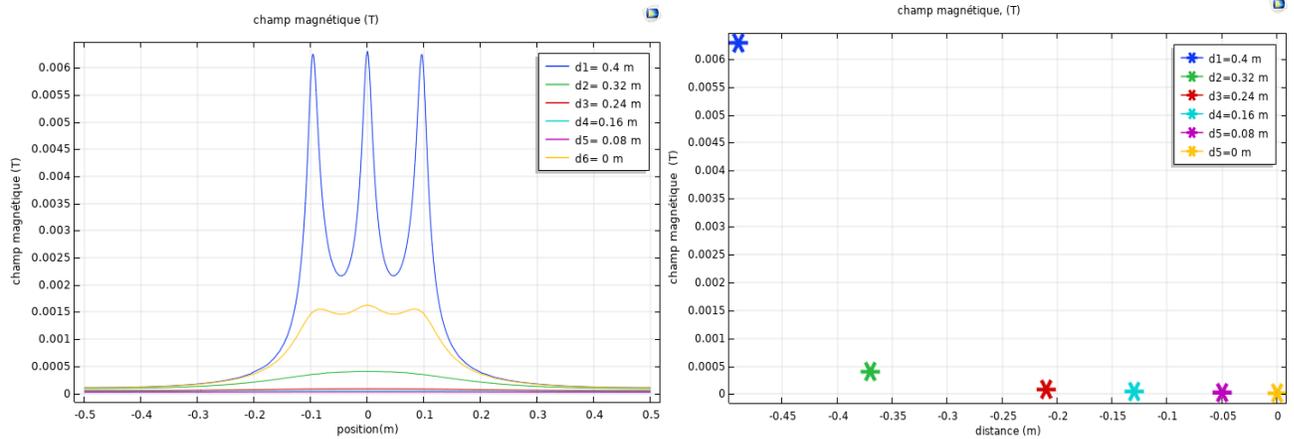


Figure III. 24 le champ d'induction près et autour du 3 câbles unipolaires

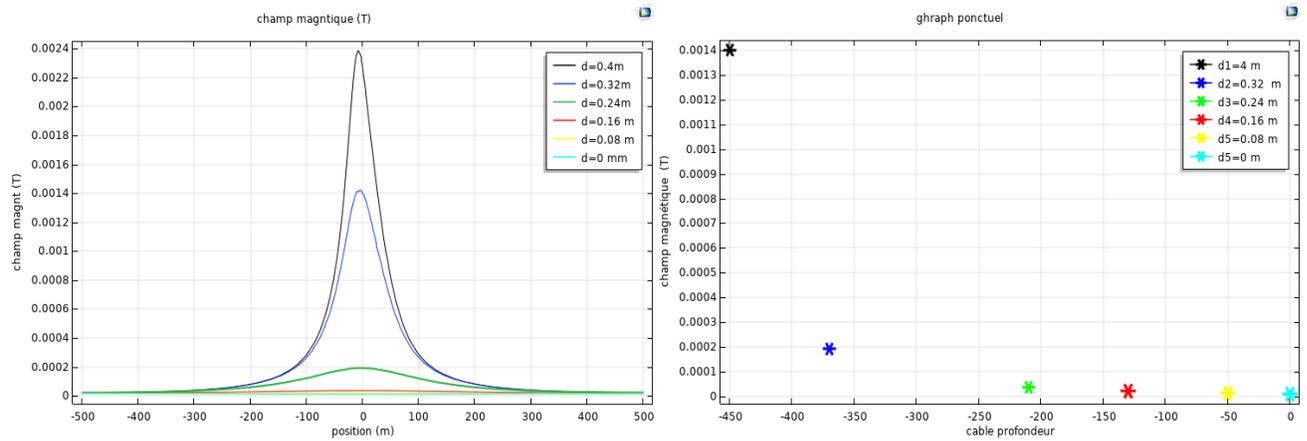


Figure III. 25 le champ d'induction près et autour du câble tripolaire

Note :

Selon les directives de l'ICNIRP, la limite admissible d'exposition à un champ magnétique pour le grand public est de 2 milli teslas (mT) pour les fréquences inférieures à 100 kilohertz (kHz), et de 200 micro teslas (μT) pour les fréquences supérieures à 100 kHz. Pour les travailleurs exposés de manière professionnelle, les limites peuvent être plus élevées, généralement jusqu'à 10 mT pour les fréquences inférieures à 100 kHz [26].

➤ **Présence de cavité :**

Dans cette simulation, nous étudierons L'effet du champ magnétique en présence d'une cavité de matériau de fer d'une taille de 10 μm , figure (III.26) La figure montre qu'il n'y a pas d'effet notable sur la distribution du champ magnétique dans le sol malgré la présence d'une cavité dans les deux simulations.

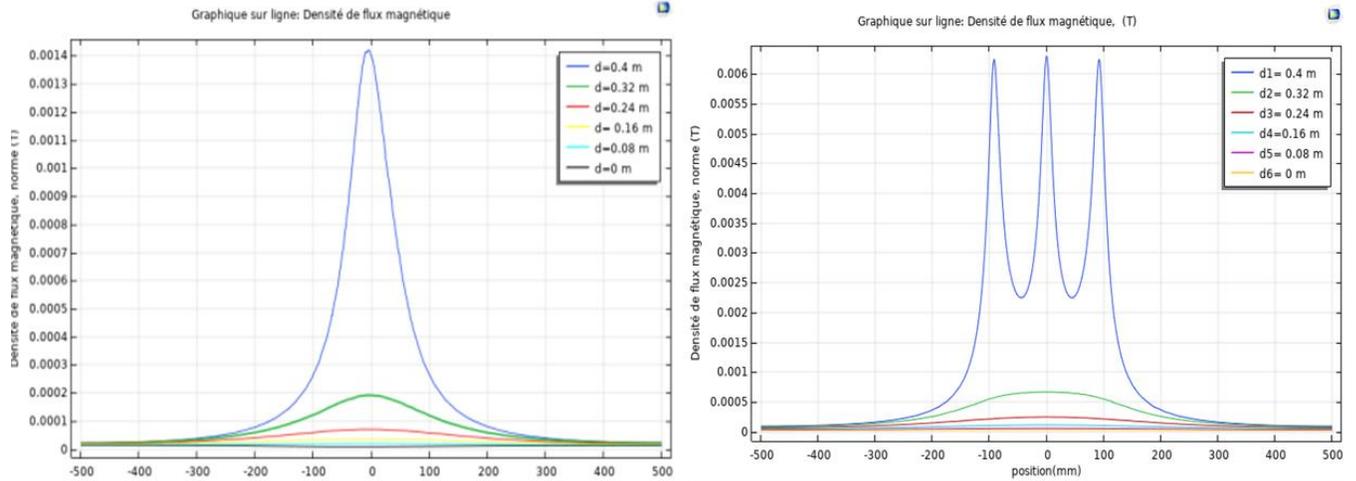


Figure III. 26 Le champ d'induction magnétique à proximité et autour des câbles électriques en présence des cavités.

➤ **L'effet de la distance entre les câbles :**

Nous étudierons l'effet de distance entre les câbles sur champ magnétique. Nous mesurons tous des champs magnétiques à quatre distances différentes, à savoir (10 mm, 68 mm, 100 mm et 200 mm). L'objectif est de comprendre comment la distance entre les câbles affecte la force et la distribution du champ magnétique.

Lorsque nous augmentons la distance entre les câbles à 100 mm et 200 mm, nous observons qu'il n'y a pas d'augmentation significative du champ magnétique. En revanche, lorsque nous rapprochons les câbles à une distance de 10 mm, nous constatons une légère augmentation du champ magnétique, bien que cette augmentation soit négligeable. La distance de sécurité de 68 mm a été spécifiée pour garantir la sécurité des câbles en cas de dysfonctionnement de l'un des pôles, mais elle n'a pas d'effet visible sur le champ magnétique.

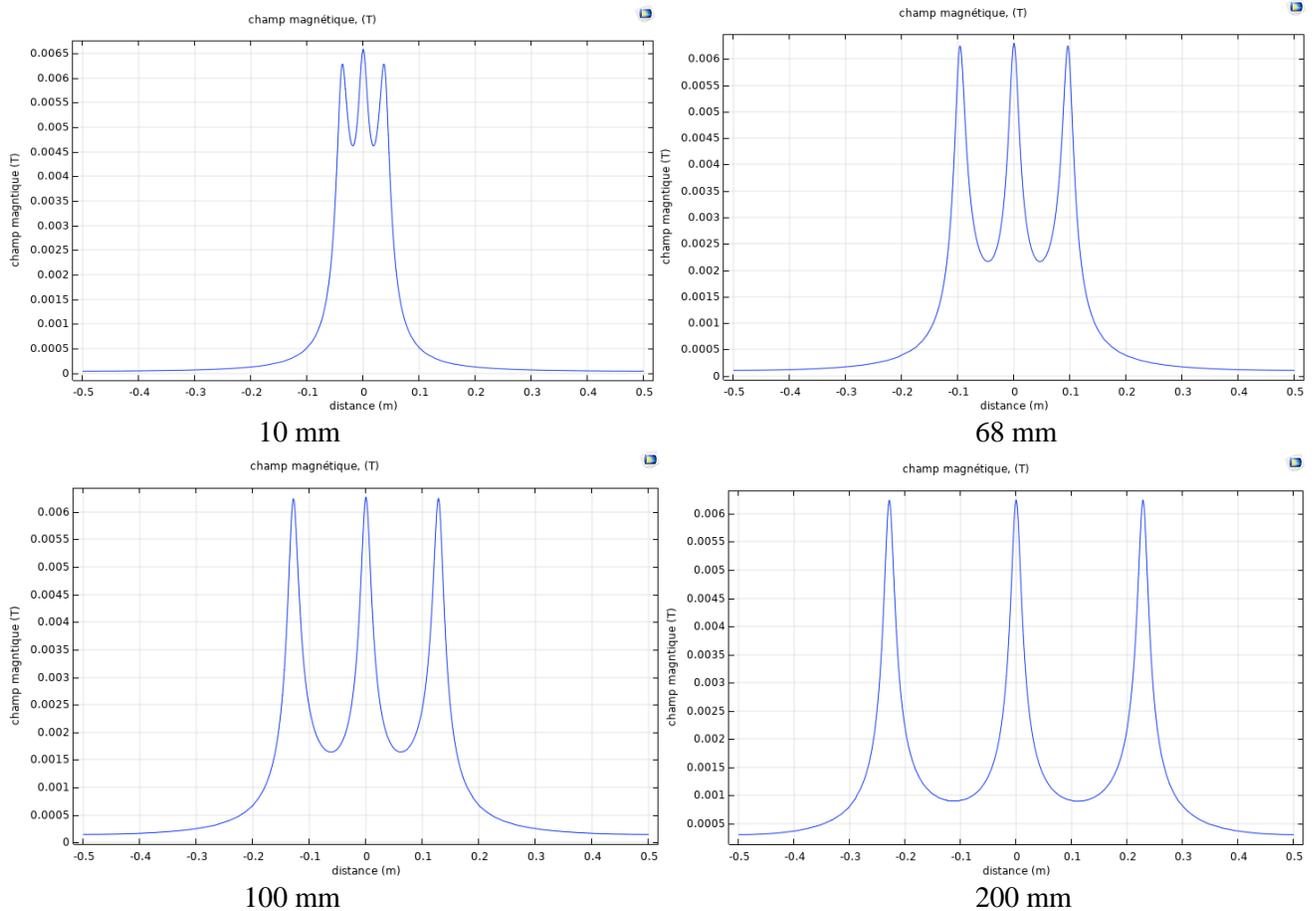


Figure III. 27 L'influence de la distance entre les câbles sur le champ magnétique

➤ **Présence d'une pointe métallique au sein de XLPE :**

Dans cette simulation de perforation d'un câble à travers un clou en fer, nous considérons trois positions différentes pour le clou à des distances variées :

- **Dans la première position**, nous plaçons la pièce métallique (clou) près du câble.
- **Dans la deuxième position**, la pièce métallique traverse l'isolation externe, l'écran du câble et le premier semi-conducteur, s'arrêtant au milieu de l'isolateur spécial (XLPE).
- **Dans la troisième position**, la pièce métallique pénètre le câble et atteint le conducteur en aluminium.

1) Résultats de champ magnétique :

Nous effectuons une observation et une évaluation de la distribution et de la variation du champ magnétique et électrique à l'intérieur du câble et dans le sol. Lorsque le clou s'approche du câble électrique souterrain, la distribution du champ magnétique subit des changements et prend différentes formes.

Dans le premier cas figure (III.28), le champ magnétique est élevé à cause de la pièce métallique.

Dans le deuxième cas figure (III.29), le clou endommage l'écran métallique, entraînant une fuite du champ magnétique.

Dans le dernier cas figure (III.30), une décharge électrique importante se produit vers la terre, générant un arc électrique et entraînant un défaut dans le réseau électrique.

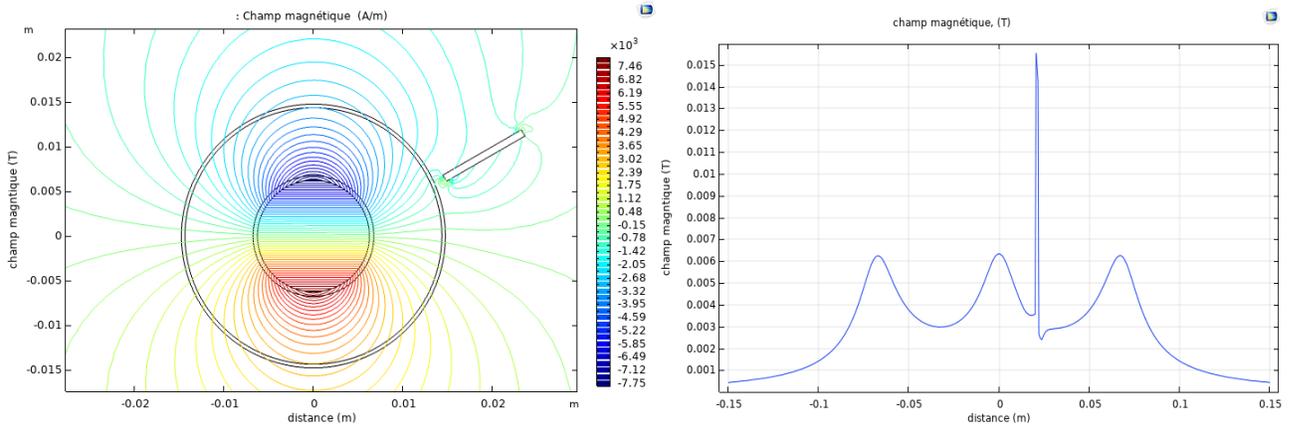


Figure III. 28 Distribution et calcul du champ magnétique près du câble (position 1)

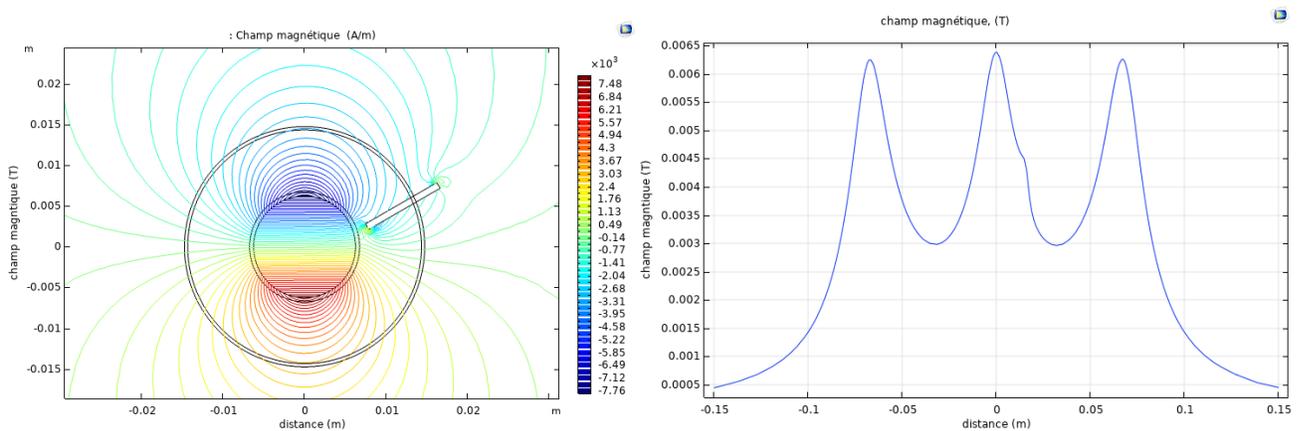


Figure III. 29 Distribution et calcul du champ magnétique près du câble (position 2)

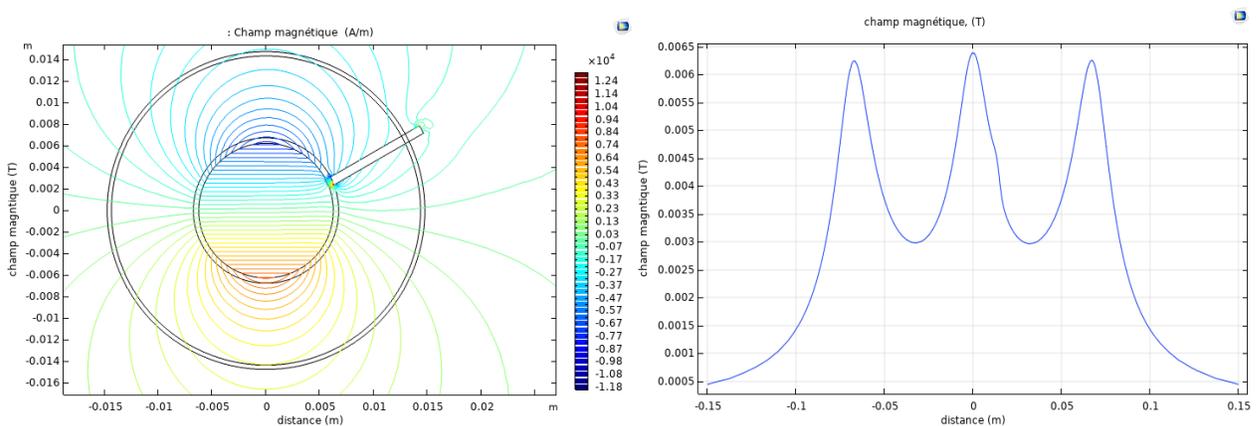


Figure III. 30 Distribution et calcul du champ magnétique près du câble (position 3)

2) Résultats du champ électrique :

Les Figures (III.31.32.33) présente la distribution du champ électrique pour les trois positions.

Le champ est négligeable pour les deux premières positions en raison du blindage effectué par le semi-conducteur.

Ce dernier cas se caractérise par une forte répartition du champ électrique autour du câble, due au contact direct entre le clou, le conducteur et la terre.

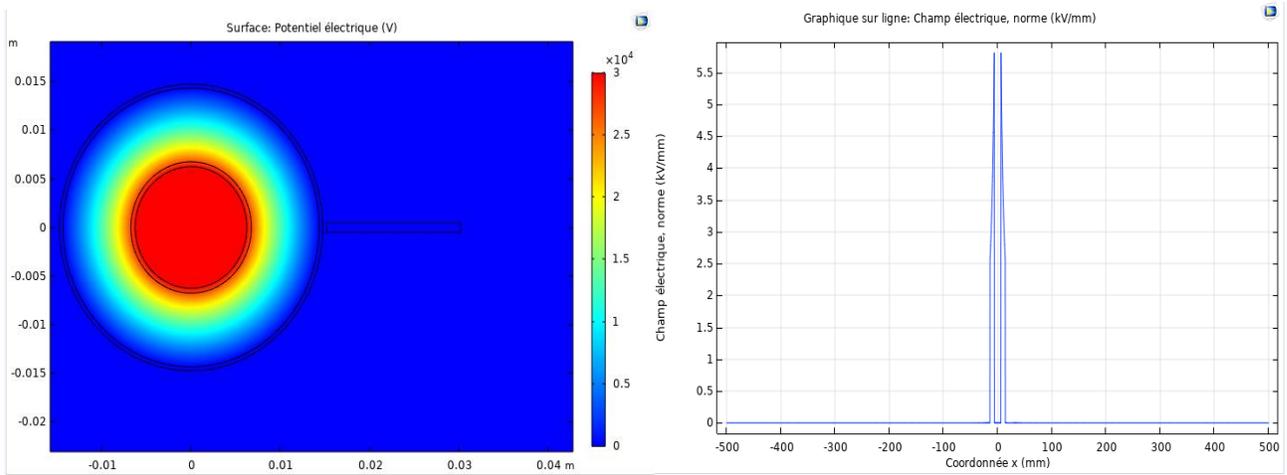


Figure III. 31 La distribution et calcul du champ électrique près du câble (position 1)

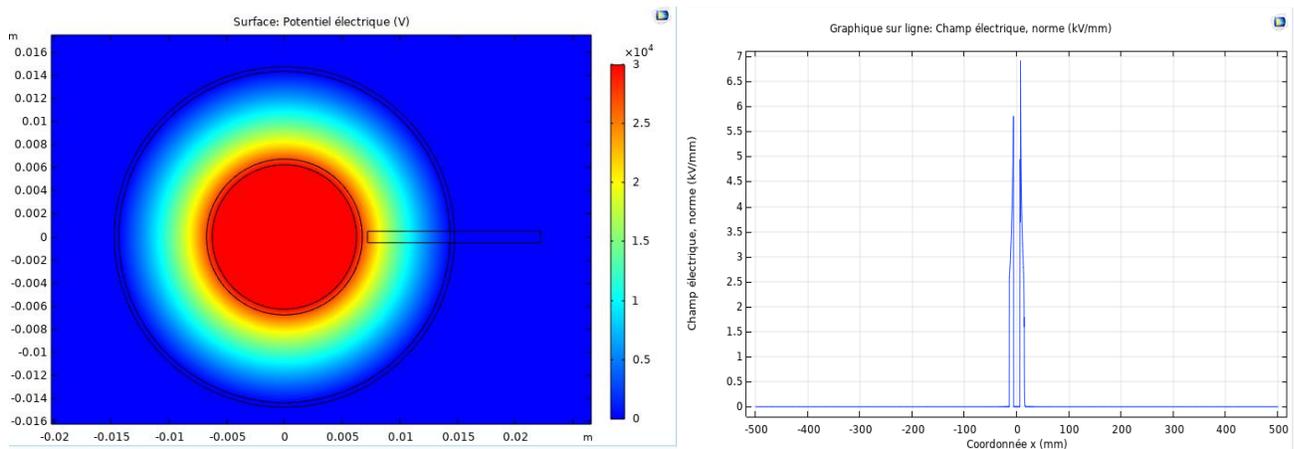


Figure III. 32 La distribution et calcul du champ électrique près du câble (position 2)

Les courbes des Figures (III.31.32.33) représentent les mesures du champ électrique. Celui-ci est absent dans la première position. Cependant, lorsque la pièce pénètre dans le semi-conducteur et entre en contact avec le conducteur du câble, sa valeur augmente au niveau du sol, en particulier dans la zone de pénétration.

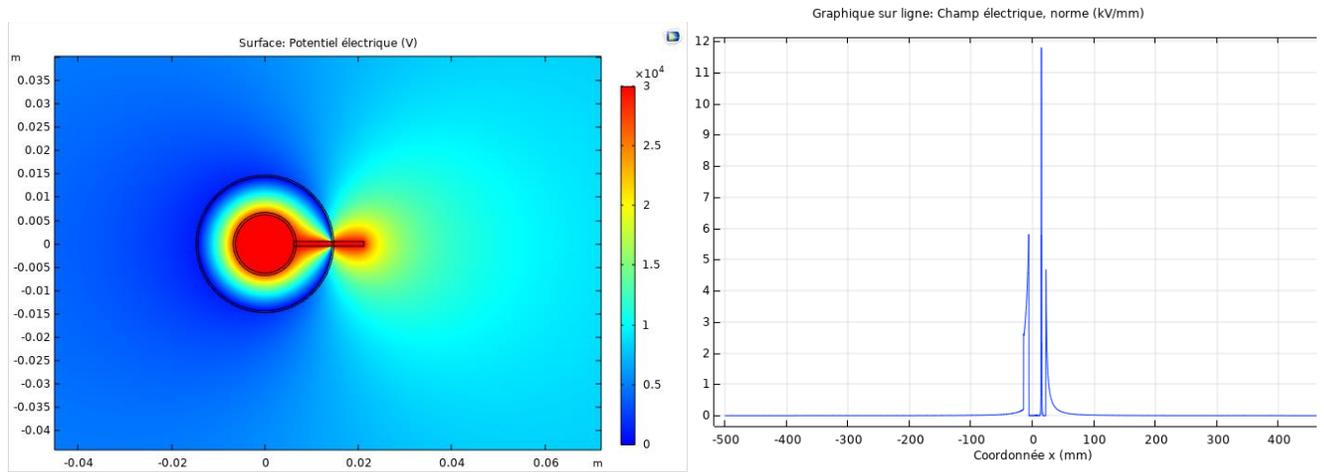


Figure III. 33 La distribution et calcul du champ électrique près du câble (position 3)

➤ **Présence d'une pièce de fer sur le dessus des câbles :**

Nous simulons une pièce de fer avec des dimensions (10 cm, 1 cm) à différents niveaux au-dessus des câbles et étudions l'effet e champ magnétique observé à la surface de la Terre, Nous notons à partir de Figures (III.34) qu'il n'y a pas d'effet notable du champ magnétique au niveau du sol.

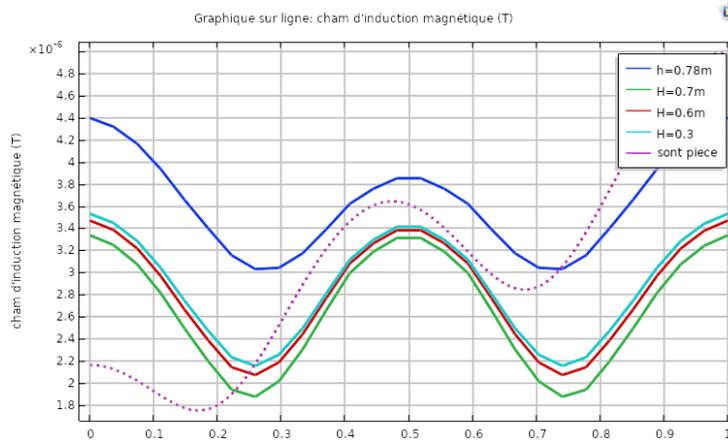


Figure III. 34 Distribution et calcul du champ magnétique au niveau du sol

III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons effectué une simulation numérique à l'aide du logiciel COMSOL pour étudier la distribution du champ électromagnétique des câbles de transport d'énergie souterrains. Les résultats de cette étude ont passé en revue plusieurs résultats importants :

- Les dépressions dans la cavité dépendent de cette condition posant un danger à l'intérieur. La position est de 53% en avance sur le noyau isolant, quelle que soit la taille de l'alésage.
- En ce qui concerne l'effet de la permittivité relative, nous avons observé que la présence d'eau dans le câble a un impact plus préjudiciable que la présence d'air.

- L'interaction de plus de deux cavités à un effet mutuel, ce qui accélère et limite la durée de service du câble électrique. L'intensité de la cavitation affecte à la fois le champ électrique et le vide, avec les implications potentielles des risques d'électricité statique.
- Les résultats obtenus sur l'intensité du champ électromagnétique à proximité des lignes de transmission. Des défauts tels qu'un clou dans un câble souterrain modifie les propriétés électromagnétiques dans et autour des câbles. Ces défauts entraînent de graves conséquences telles que des problèmes de comportement des câbles, des charges internes et un échauffement excessif, pouvant entraîner une détérioration des matériaux et un vieillissement prématuré.

Conclusion Générale :

En conclusion, cette mémoire de master représente une contribution importante à l'étude du diagnostic de la fonction d'isolation des câbles MT grâce à l'analyse des distributions du champ électrique et champ magnétiques sur des câbles souterrains de moyen tension de 18/30 kV.

Par conséquent, simulation numérique à l'aide du logiciel d'éléments finis COMSOL Multiphysics nous a fourni la possibilité d'évaluer les paramètres physiques et magnétiques (intensités des champs magnétiques et électriques des câbles électriques dans différentes conditions). Selon les résultats de la simulation, il a été constaté que la présence de cavités affecte la distribution des champs électriques et que la modification des propriétés du matériau de la cavité a un impact significatif sur le champ électrique et magnétique.

Il est essentiel de tenir compte des cavités et des défauts de grande dimension lors de l'évaluation de l'isolation des câbles électriques, comme le mettent en évidence ces observations. La présence de cavités à proximité de l'électrode haute tension peut avoir un impact considérable sur la distribution du champ électrique et magnétique, augmentant ainsi les risques de décharges partielles.

Il est donc crucial de détecter et de réparer rapidement les cavités et les défauts de grande dimension dans les câbles électriques pour maintenir l'intégrité de l'isolation et assurer un fonctionnement sûr et fiable du système électrique.

Références

- [1] KRAI Abdallah, BEDJAOUI Merouane « Analyse électromagnétique et thermique de câble souterrain haute tension à l'aide MFE » Mémoire de MASTER, Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, 2022.
- [2] Meziant Rachida et Sahli Siham, « Calcul du champ électromagnétique généré par les réseaux électriques en vue de la compatibilité électromagnétique » Mémoire fin d'étude université Bejaia. 2017.
- [3] <https://systep.cl/en/transmission-lines-and-citizen-opposition/>
- [4] MERABET Haroune, BERIALA Bilal « Simulation électromagnétiques des câbles électriques souterrains », Mémoire de MASTER, Université KASDI MERBAH, 2019.
- [5] <https://elydan.eu/enfouissement-de-cables-electriques-aeriens/>
- [6] MESSAD Oussama, AGGUINI Nouh « Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées » Mémoire de MASTER, Université MOULOUD MAMMARI, 2021.
- [7] KARIMA HEROUINI et OMAR BENALIA « Thermal effects in underground power cable » Mémoire fin d'étude Université Kasdi Merbah, Ouargla 2021.
- [8] KHERFI Amor, MIMOUNI Imad « Les défauts dans les câbles électriques souterrains» Mémoire de MASTER, Université KASDI MERBAH, 2019.
- [9] Mohamed Zellagui « câbles souterraines MT et BT » Mémoire fin d'étude Université Batna, 2018.
- [10] Alfanar « Catalogue des câbles » www.alfanar.com.
- [11] Typical Underground Cable Arrangements Document Number: , Technical Catalogue, 1- 03-FR-10, VERSION 1.0 June 2018.
- [12] <https://kvcable.com/cable-specifications-and-standards/iec-60502-cable/>
- [13] SEGHIRI Hachim, AKKA Abd Rachid « Diagnostic de la fonction isolation de câbles HT isolés par la méthode des éléments finis » Mémoire de MASTER, Université MOHAMED BOUDIAF, 2020.
- [14] Nathalie Morette « Mesure et analyse par apprentissage artificiel des décharges partielles sous haute tension continue pour la reconnaissance de l'état de dégradation des isolants électriques » THÈSE DE DOCTORAT DE SORBONNE UNIVERSITÉ, 2020.
- [15] L. Mokadem, F. Kahouadji, « Etude d'une Décharge Partielle dans Un Câble HT Sous L'environnement Maxwell », Mémoire de Master en Electrotechnique, Dépt. Ingénierie des Systèmes, Université de Boumerdes, juin 2018.
- [16] Lebey T (2005), « Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques », J3ea., 01, 2005. Vol. 4.
- [17] J.C. Maxwell, « A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field » Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1865.

- [18] J.P. Perez, R. Charles and R. Flecking, “ Electromagnétisme, Fondements et Applications,” 3ème édition, Paris, 1997.
- [19] BAKHTI Haddi « Caractérisation diélectrique d'un mélange de Titanate et d'oxyde (Résine époxyde, BaTiO₃, Cu₂O) fritté en fonction de la fréquence » Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas, 2018.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] www.comsol.fr
- [23] Ayad A.N.E.I « Etude et Réalisation d'un séparateur à induction électromagnétique » Doctorat en Sciences, Université DJILLALI LIABES, 2017.
- [24] Nedjoua BENNECIB « contribution a l'étude d'une machine MHD a conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique » Thèse de doctorat en électrotechnique université de Batna Algérie 2010.
- [25] Ryma DELIMI « méthodes comparées pour le calcul des forces d'origine électromagnétique application aux paliers magnétiques » magister Université MENTOURI – Constantine 2008.
- [26] www.icnirp.org/en/applications/power-lines/index.html

الخلاصة :

يستخدم كابل المعزول الذي يعتمد على البولي إيثيلين المتشابك كيميائياً لنقل الطاقة الكهربائية. ومن بين الظواهر هو نشاط التفريغ الجزئي في الفجوات الصغيرة التي توجد في طبقة العزل للكابل. يهدف هذا البحث إلى تحديد التشوهات التي تحدث في توزيع المجال الكهربائي والمغناطيسي داخل طبقة العزل للكابل عن طريق المحاكاة. يتم استخدام طريقة العناصر المحدودة لحساب المجال الكهربائي والمغناطيسي عن طريق حل معادلة لابلاس. باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics.

تم إنشاء نماذج ثنائية الأبعاد لكابل يتم إنشاء تجاويف في عازل الكابل وإجراء تجارب مختلفة. بالإضافة إلى عيب تواجد قطعة حديدية يتم تعديل الخصائص الكهرومغناطيسية. تسبب هذه العيوب أضراراً لكابل، مما يؤدي إلى تدهور المواد وشيخوخة مبكرة. الكلمات المفتاحية: الفجوات، البولي إيثيلين المتشابك كيميائياً، طريقة العناصر المحدودة، التفريغ الجزئي، الكابلات تحت الأرض.

Résumé :

Un câble isolé à base de polyéthylène chimiquement réticulé est utilisé pour transmettre la puissance électrique. Parmi les phénomènes les plus dommageables figure l'activité de décharge partielle dans les petits espaces qui peuvent exister dans la couche d'isolation du câble. Cette recherche vise à déterminer les distorsions qui se produisent dans la distribution des champs électriques et magnétiques au sein de la couche d'isolation du câble au moyen de la simulation. La méthode des éléments finis est utilisée pour calculer le champ électrique et magnétique en résolvant l'équation de Laplace. Des modèles de câbles 2D ont été générés à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Des cavités sont créées dans l'isolation des câbles et diverses expériences sont réalisées. En plus du défaut de pincement de l'ongle les propriétés électromagnétiques sont modifiées. Ces défauts entraînent des effets néfastes sur la santé du câble, entraînant une détérioration du matériau et un vieillissement prématuré.

Mots-clés : interstices, polyéthylène chimiquement réticulé, méthode des éléments finis, décharge partielle, câbles souterrains.

Abstract:

An insulated cable based on chemically cross-linked polyethylene is used to transmit electrical power. Among the most damaging phenomena is partial discharge activity in the small gaps that may exist in the insulation layer of the cable. This research aims to determine the distortions that occur in the electric and magnetic field distribution within the insulation layer of the cable by means of simulation. The finite element method is used to calculate the electric and magnetic field by solving the Laplace equation. 2D cable models were generated using COMSOL Multiphysics software. Cavities are created in the cable insulation and various experiments are performed. In addition to the pinch defect of the nail the electromagnetic properties are modified. These defects cause adverse health effects for the cable, resulting in material deterioration and premature aging.

Keywords: gaps, chemically cross-linked polyethylene, finite element method, partial discharge, underground cables.