

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Bejaia



Faculté de Science et Technologie

Département de génie électrique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux électrique

Thème

**Influence des défauts dans l'isolation d'un câble
souterrain unipolaire sur la distribution du
champ électrique**

Soutenu le 22/09/2022 devant le jury :

Mr ATROUNE salah

Université de Bejaia

Président

Mr LAIFAOUI Abdelkrim

Université de Bejaia

Examineur

Réalisé par : IDIR Reda & MOUHOUB Walid

Encadré par : Mr OUATAH El Hanafi

Année universitaire : 2021/2022

DÉDICACE

NOUS DÉDIONS CE MODESTE TRAVAIL POUR NOS PÈRES ET

MÈRES EN GÉNÉRAL

POUR NOS FRÈRES ET NOS SŒURS

POUR TOUS LES MEMBRES DE NOS FAMILLES

POUR NOS TRÈS CHERS AMIS

À TOUS LES ENSEIGNANTS DE LA FACULTÉ DES SCIENCES ET

TECHNOLOGIE

À TOUS LES TRAVAILLEURS DE L'UNIVERSITÉ DE BÉJAÏA

IDIR ET MOUHOUB

REMERCIEMENTS

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

En tout premier lieu, nous remercie vivement mes mères et mes pères qui ont nous donné tous les outils et les conditions de succès. Motivation et de confiance et de soins et des dépenses, durant tous c'est années.

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

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

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

Tous les outils et les conditions de succès. Motivation et de confiance et de soins et des dépenses.

Nous remercions tous les collègues de la promotion 2022

Liste des symboles

V_0 : tension appliquée au conducteur central (kV)

f : Fréquence (Hz)

U_c : Tension de claquage thermique (V)

V : Potentiel (V)

R_1 : rayon de lame conductrice (mm)

R_2 : rayon de l'écran métallique (mm)

\vec{E} : Champ électrique (V/m)

E_d : Champ de dépolarisation (C/m²)

\vec{B} : Induction magnétique en (T)

\vec{H} : Champ magnétique en (A/m)

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

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

ρ : Densité de charge volumique en (C/m²)

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m²)

\mathbf{D} : Déplacement électrique (C/m²)

C : Constante

P : Pression du gaz emprisonné (Pa)

K : Constante d'air

r : Position quelconque par rapport au center de la cavité (mm)

d : Diamètre de la cavité (mm)

ϵ_c : Permittivité relative de la cavité

ϵ_i : Permittivité dans l'isolant

ϵ_r : Permittivité relative

σ : Conductivité électrique (S/m)

Liste des abréviations

THT : Réseau de transport très haut tension

HT : Réseau de répartition haut tension

MT : Réseaux moyenne tension

MTA : Réseaux aériens moyenne tension

MTS : Réseaux souterrains moyenne tension

BT : Réseaux de distribution basse tension

BTS : Réseaux basse tension souterrain

ISVL : Gaine isolant

XLPE : Cross linked polyéthylène

PRC : Polyéthylène Réticulé

PVC : Polychlorure de vinyle

AC : Courant alternatif

DC : Courant continu

MDF : Méthode des différences finies

MEF : Méthode des Eléments Finis

MEFF : Méthode des éléments finis de frontière

DCP : Décumule peroxyde

DP : décharge partielle

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1: Méthodes de pose des câbles souterrains 15

Tableau I. 1: Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain 18

Chapitre II

Tableau II. 1 : Caractéristiques générales du câble utilisé 41

Chapitre III

Tableau III. 1 : Permittivités relatives des matériaux utilisés 57

Tableau III. 2 : Conductivités électriques des matériaux utilisés 59

Liste des figures

Chapitre I

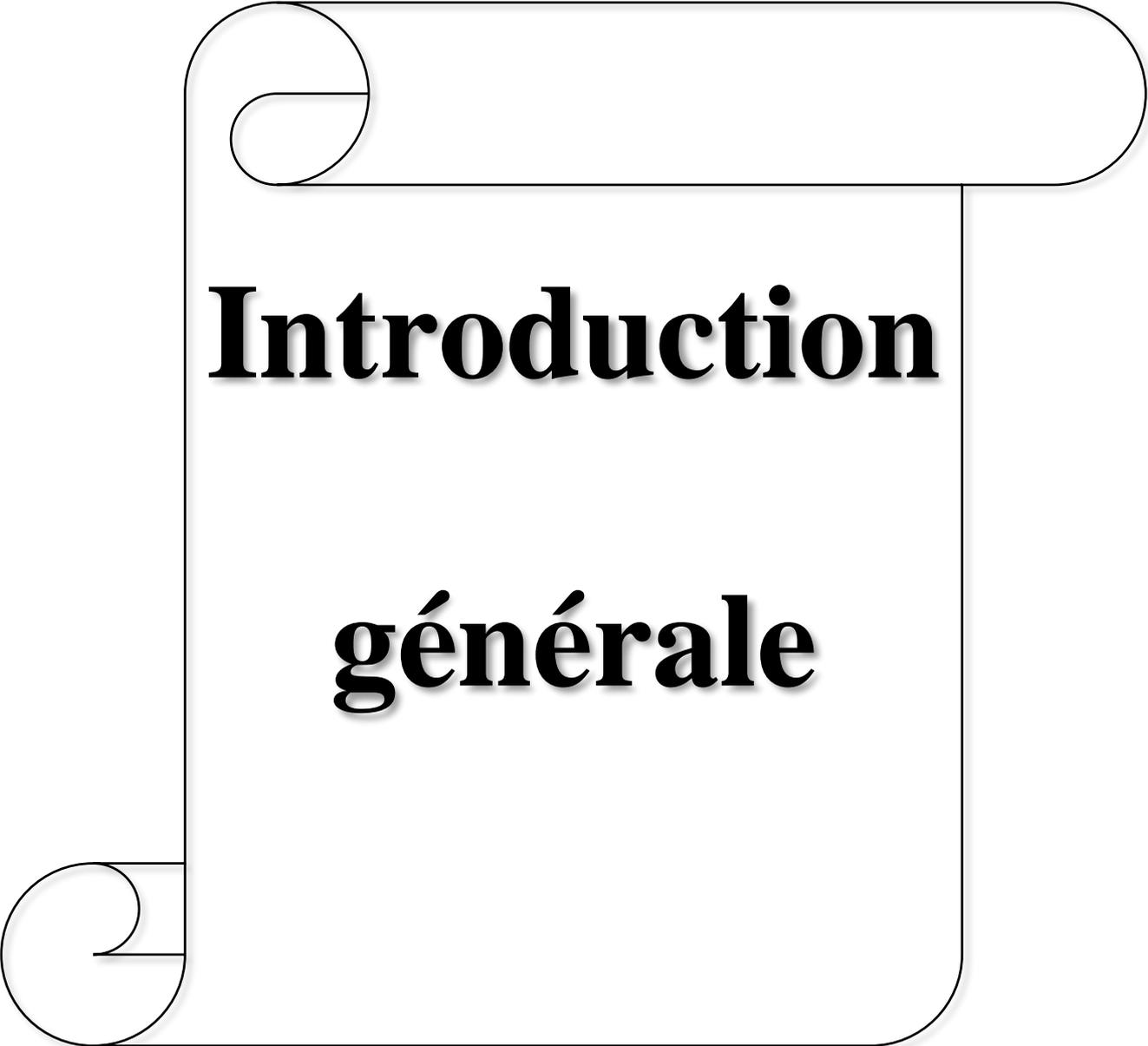
Figure I. 1 : Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticulé	7
Figure I. 2: Réseaux HT souterrains en double dérivation	8
Figure I. 3: Réseaux HT souterrains en simple dérivation.....	8
Figure I. 4: Coupe en 2D des câbles HT pour réseaux souterrain	9
Figure I. 5: câbles à conducteur compacts et segmentaires	9
Figure I. 6: Les lignes de transports souterraines	11
Figure I. 7: Câble unipolaire	12
Figure I. 8: Les câbles Souterraines BT.....	12
Figure I. 9: Technique de pose de câble BT	13
Figure I. 10: Niveaux de tension des réseaux de distribution normalisés.....	14
Figure I. 11: Conducteurs de différentes formes	15
Figure I. 12: différentes configuration géométriques pour le souterrain triphasé.....	16
Figure I. 13: Différence entre le champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain.....	19
Figure I. 14: Imperfections dans un câble monophasé.....	20
Figure I. 15: Câbles localement endommagés (images EDF).....	21
Figure I. 16: Types de Claquage d'isolation des câbles	24
Figure I. 17: Arborescence électrique observée dans un câble électrique	26
Figure I. 18: Différents types de décharges selon Kreuger :.....	27

Chapitre II

Figure II.1: Maillage carré.....	35
Figure II. 2: Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.....	39
Figure II. 3: Diagramme de différentes étapes de simulation dans COMSOL.....	40
Figure II. 4: présentation les étapes de choix de modèle	41
Figure II. 5: Géométrie du modèle	42
Figure II. 6: Choix de matériaux par domaine.....	43
Figure II. 7: Fixation des conditions aux limites	43
Figure II. 8: Maillage de la géométrie étudiée.....	44
Figure II. 9: Distribution du potentiel électrique dans le câble étudié.....	45

Chapitre III

Figure III. 1: Comparaison entre les valeurs analytiques et les résultats numériques du potentiel électrique dans l'isolation sans défauts	47
Figure III. 2: Comparaison entre les valeurs analytiques et les résultats numériques du champ électrique dans l'isolation sans défauts	48
Figure III. 3: Distribution du potentiel électrique dans le cas sans défaut et avec défaut	49
Figure III. 4: Variation du potentiel électrique dans le cas sans défaut et avec défaut	49
Figure III. 5: Distribution radiale du champ électrique dans les cas avec et sans défaut	50
Figure III. 6: Polarisation et lignes de champ électrique en présence d'une cavité	51
Figure III. 7: Distribution radiale et orientation des lignes du champ électrique pour une cavité de différentes positions	52
Figure III. 8: Variation du champ électrique au centre de la cavité en fonction de sa position	52
Figure III. 9: Distribution radiale et orientation des lignes du champ électrique pour une cavité de différentes tailles	53
Figure III. 10 : Nocivité des cavités en fonction de la position par comparaison avec le champ critique de Paschen E_d	54
Figure III. 11: Variation du champ électrique au centre de la cavité en fonction de sa taille	55
Figure III. 12: Distribution radiale et orientation des lignes du champ électrique pour une cavité de différentes formes	56
Figure III. 13: Variation du champ électrique au centre de la cavité en fonction de sa forme	56
Figure III. 14: Distribution radiale et les flèches du champ électrique pour des défauts de différentes permittivités relatives	58
Figure III. 15: Variation du champ électrique au centre de la cavité pour des différentes permittivités relatives	58
Figure III. 16: Distribution radiale et les flèches du champ électrique pour des défauts de de différentes conductivités électriques	59
Figure III. 17: Variation du champ électrique pour des défauts de de différentes conductivités électriques	60



Introduction

générale

Introduction générale

Dans le domaine du transport d'énergie électrique, il existe aujourd'hui deux moyens d'assurer le transport d'énergie entre les centrales de production et les centres de consommation, à savoir les lignes aériennes et les câbles souterrains. La tendance actuelle et des années à venir, est de transporter l'électricité par des câbles isolés. Cette évolution du marché est le résultat de fortes pressions écologiques et environnementales pour réduire l'utilisation des lignes aériennes.

Le polyéthylène réticulé chimiquement (XLPE : Cross-linked polyethylene) est principalement plus utilisé aujourd'hui pour les câbles de distributions souterraines, en raison de ses excellentes caractéristiques : rigidité diélectrique et bon comportement thermomécanique.

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

Le but de ce projet de fin d'études est d'étudier l'influence des microcavités sur les contraintes électriques des câbles moyenne tension en utilisant la méthode des éléments finis (M.E.F) par le logiciel COMSOL Multiphysics. Pour ce faire, un modèle 2D d'un câble souterrain 18/30 kV a été conçu avec des cavités de différentes : positions, tailles, natures et formes.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre a pour objet de décrire la nature et la composition des câbles souterrains et de définir les types de matériaux isolants et leurs propriétés ainsi que les différents défauts d'isolation provoquant des phénomènes de décharges partielles.
- Dans le deuxième chapitre, nous allons faire un aperçu sur la méthode des éléments finis (M.E.F) et son application dans le logiciel de simulation COMSOL Multiphysics. Dans la seconde partie du chapitre, nous allons présenter la méthode de création du modèle 2D du câble étudié.

- Le troisième chapitre est une présentation et une interprétation des résultats de différentes simulations et de différents cas que nous avons simulé sur des câbles contenant des cavités.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur les câbles électriques souterrains

I.1. Introduction

La construction et l'échelle du réseau peuvent être utilisées pour transmettre l'électricité Produit par les centres de production aux consommateurs. réseau électrique Ainsi, des milliers de kilomètres de lignes des milliers de sous-stations ainsi que de nombreux dispositifs d'arrêt et commandes de régulation dans les tailles Assurez le fonctionnement normal de l'alimentation , le cordon d'alimentation est L'une des principales formes d'infrastructures énergétiques et une composante majeure des infrastructures énergétiques réseau de transport principal.

Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines. Au niveau de la recherche de projet, le choix entre lignes électriques aériennes ou le sous-sol du réseau électrique dépend de plusieurs contraintes, telles que Région, exploitation et maintenance et des avantages et inconvénients de chaque type [1].

I.2. Lignes de transport

Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent le transfert de l'énergie à partir des unités de production de ces unités jusqu'au point de consommation via les lignes électriques (aériennes ou souterraines). Un réseau électrique se compose de lignes électriques fonctionnant à différents niveaux de tension, connectées ensemble dans des sous-stations. Les cordons d'alimentation ont une capacité limitée en raison des limitations thermiques des câbles [1].

I.2.1. Réseau de transport THT

Le réseau de transport peut acheminer l'énergie électrique d'une centrale électrique vers les consommateurs via un réseau à très haute tension (THT). Les lignes THT permettent de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales. À très haute tension, qui relie les centrales électriques de grandes puissances (> 300 MW). La plupart de ces réseaux sont situés loin des villes ou à proximité. Ils sont étudiés pour une transmission donnée correspondant à la limite thermique de la ligne [2].

I.2.2. Réseau de répartition HT

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre 30kV à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. Le plus souvent, en ALGERIE, ils utilisent une tension de 60 kV pour son acheminement, et dans quelques cas on utilise du 90kV à l'extrême Est ALGERIE. Ces réseaux sont en grande partie constitués de lignes aériennes ; mais en zone urbaine dense, ils peuvent être souterrains sur des petites longueurs. Leurs

structures sont, soit en boucle fermée, soit le plus souvent en boucle ouverte, mais peut aussi se terminer au niveau de certains postes de transformation.

I.2.3. Réseau de distribution

Les réseaux de distribution moyenne tension servent d'une part les postes MT /BT de distribution publique alimentant eux même les réseaux basse tension, et d'autre part tous les postes d'utilisateurs industriels moyenne tension, la tension est de 10 ou 30 kV. En zone urbaine, les réseaux MT sont généralement souterrains et exploités en boucle ouverte. Pour faciliter les dépannages et l'isolement d'un tronçon en défaut, les postes sont exploités en coupure d'artère.

I.3. Constitution du réseau électrique

Le transport de l'énergie électrique est actuellement assuré par :

- Ligne aérienne.
- Câble souterrain.
- Poste électrique.

I.4. Réseau de transports aériens

I.4.1. Réseaux aériens très haut tension (THT)

Le réseau de transport permet de transférer l'énergie électrique des centres électriques vers les consommateurs à travers un réseau de très haute tension THT, il rattache les centrales de grandes puissances (> 300 MW). Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens approches. Les lignes THT permettent de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales [2].

I.4.2. Réseaux aériens haut tension (HT)

Les lignes aériennes à haute tension sont constituées de câbles conducteurs, généralement en alliages d'aluminium, suspendus à des supports (poteaux électriques). Ces supports peuvent être en bois, en acier, en béton, en aluminium ou parfois en plastique renforcé.

I.4.3. Réseaux aériens moyenne tension (MTA)

Les réseaux MTA (30kV) sont majoritaires en zone rurale, où la structure arborescente prédomine largement. Le raccordement est soit, en coupure d'artère ou en simple dérivation, pour les abonnés sensibles, ou bien en double dérivation. Le réseau MTA est à neutre non distribué, celui-ci est mis à la terre au niveau des postes sources à travers une résistance. Les lignes MT sont protégées par des disjoncteurs placés en tête de départ, au niveau des postes

sources ou certains postes de coupure. Le rôle de ces équipements est le pouvoir de coupure en cas de défaut sur la ligne.

I.4.4 Réseaux de distribution basse tension (BT)

Les réseaux BT résultent de la structure des réseaux MT, ils alimentent l'ensemble des consommateurs (domestique et certains types d'usagers de tension 220/380V) ; ces réseaux peuvent être aériens ou souterrains.

La structure de ces réseaux est arborescente à deux ordres de lignes, la dorsale et la dérivation (en cuivre).

a) Les avantages des lignes aériennes

- Elles peuvent être réparées très rapidement en cas d'accident ou de défaut.
- Elles peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger.
- Sont moins coûteuses que les lignes souterraines du point de vue des frais d'installation et de réparation.
- Elles permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et des défauts.

b) Les inconvénients

- Selon certains, les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé.
- Elles sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication
- L'exposition aux surtensions d'origine atmosphérique.
- Elles sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision [2].

I.5. Les câbles électriques souterrains

Les investissements attachés à l'installation de nouveaux câbles sont parfois prohibitifs. Mais en opposition, leur impact environnemental et esthétique est bien moindre que celui des lignes aériennes. Dans cette vision, les câbles souterrains ont pris et prendront encore une ampleur certaine.

I.5.1. Câbles THT souterrains

Les câbles souterrains de très haute tension THT sont généralement employés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées (grandes villes (figure I.1.) parfois pour résoudre des problèmes des lieux privés, techniques ou d'environnement, pour lesquels la mise en œuvre de lignes aériennes est difficile ou impossible [3].



Figure I. 1: Constitution d'un câble souterrain isolé au polyéthylène réticulé.

- (1) âme conductrice, (2) couche semi-conductrice interne, (3) isolant au polyéthylène réticulé, (4) couche semi-conductrice externe, (5) écran conducteur, (6) protection au PVC [3].

I.5.2. Réseaux haute tension HT souterrains

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.1) ou en coupure d'artère (figure I.2). En double dérivation, les postes HT/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut. La technique en coupure d'artère est moins coûteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long. Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir. Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisées en câble, en raison de la baisse notable du surcôt lié à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages.

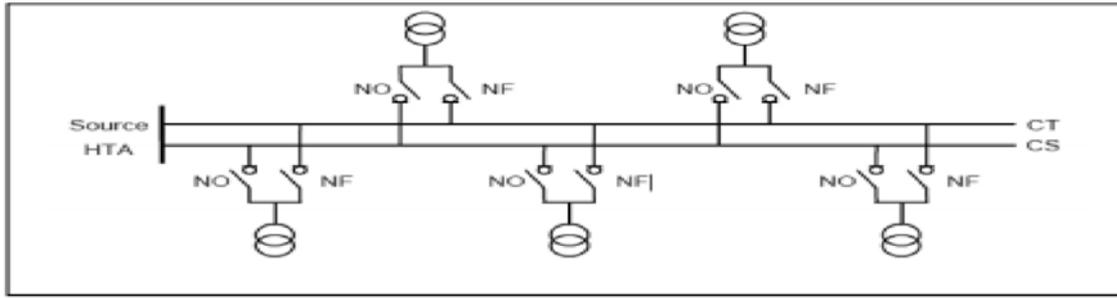


Figure I. 2: Réseaux HT souterrains en double dérivation [2].

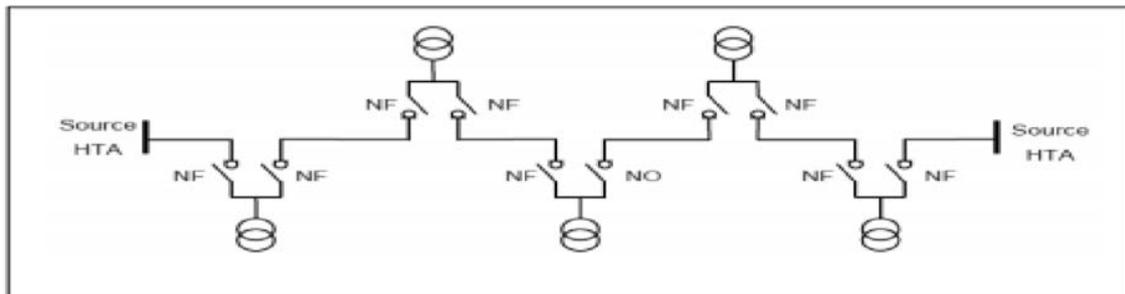


Figure I. 3: Réseaux HT souterrains en simple dérivation [2].

A. Un conducteur circulaire :

Constitué de plusieurs couches de fils concentriques enroulés en hélice. Dans les conducteurs compacts à conducteurs ronds, l'effet de peau et l'effet de proximité sont pratiquement les mêmes que ceux des conducteurs massifs en raison de la faible résistance électrique de contact entre les fils les effets de peau et de proximité sont pratiquement identiques à ceux d'un conducteur plein (figure I.4).



Figure I. 4: Coupe en 2D des câbles HT pour réseaux souterrain [4].

B. Conducteur segmenté :

Aussi appelé conducteur "Milliken" (Fig. I.5), constitué de plusieurs conducteurs segmentés assemblés en une âme cylindrique :

- **Un conducteur :** De grande section est divisé en plusieurs conducteurs segmentés. Ces conducteurs sont au nombre de 4 à 7, appelés segments ou secteurs. Ils sont isolés les uns des autres par des rubans semi-conducteurs ou isolants [5].



Les conducteurs segmentaires



Conducteurs ronds compacts

Figure I. 5: câbles à conducteur compacts et segmentaires [5].

- **Ecran semi-conducteur sur driver :** Pour éviter la concentration du champ électrique, il existe une interface XLPE ultra-lisse entre le conducteur et l'isolation
- **Isolation XLPE :** Comme son nom l'indique, l'isolation isole les conducteurs des blindages qui fonctionnent au potentiel de terre lorsqu'ils fonctionnent à haute tension. L'isolation doit pouvoir résister aux champs électriques dans les conditions de fonctionnement nominales et transitoires.
- **Ecran semi-conducteur sur isolant :** Cette couche a la même fonction qu'un blindage conducteur : Passage progressif d'un milieu isolant où le champ électrique est non nul à un milieu conducteur (ici le blindage d'un câble métallique) où le champ électrique est nul.
- **Ecran métallique :** Lorsque la tension atteint des dizaines voire des centaines de kilovolts, un blindage métallique est nécessaire. Sa fonction principale est d'annuler le champ électrique à l'extérieur du câble. Il agit comme la deuxième électrode du condensateur formé par le câble [5].
- **L'utilisation d'un écran métallique implique :**
 - Il doit être relié à la terre en au moins un point du parcours.

- Drainer le courant capacitif à travers l'isolation.
- Décharge du courant de court-circuit homopolaire ou d'une partie de celui-ci. Cette fonction est utilisée pour déterminer la taille de l'écran métallique.
- Circulation du courant induit par les champs magnétiques d'autres câbles à proximité. Ces courants de circulation provoquent des pertes d'énergie supplémentaires dans le câble, qui doivent être prises en compte lors de l'évaluation de la capacité de transmission du système de câble.
- Le blindage métallique doit être électriquement isolé physiquement de la terre sur la majeure partie de la longueur de l'installation du câble.
- La nécessité de protéger l'écran métallique contre la corrosion chimique ou électrochimique. la seconde fonction de l'écran métallique est de former une barrière radiale pour empêcher l'humidité de pénétrer dans le câble, en particulier son système isolant.
- Le système d'isolation synthétique ne doit pas être exposé à l'humidité. Lorsque l'humidité et un champ électrique puissant sont présents ensemble, l'isolation se détériore selon la procédure d'appel de l'eau, ce qui peut éventuellement entraîner une défaillance de l'isolation.
- **Mise à la terre de l'écran métallique :** Lors du passage d'un courant alternatif dans le conducteur du câble, une tension proportionnelle au courant induit, à la distance entre phases et à la longueur de ligne est générée sur l'écran métallique. Les bornes non mises à la terre sont soumises à des tensions induites qui doivent être contrôlées. Dans des conditions normales de fonctionnement. Il existe des moyens simples pour éviter le risque d'électrocution. Dans le cas d'un courant de court-circuit de plusieurs kA, la tension induite proportionnelle au courant peut atteindre plusieurs kV En pratique, cependant, cette valeur reste inférieure à la tension nécessaire pour perforer la gaine extérieure de protection du câble. Il est donc nécessaire de limiter l'élévation de potentiel du blindage en utilisant un limiteur de tension de gaine (ISVL) entre le blindage métallique et la terre. Ces limiteurs de tension gainés fonctionnent essentiellement comme des résistances non linéaires.
- **La gaine de protection anticorrosion**
La veste (gaine extérieure) a une double fonction :
 - Elle isole l'écran métallique depuis la terre (en particulier pour les lignes avec des connexions d'écran spéciales).

- Elle protège les composants métalliques de l'écran contre l'humidité et la corrosion.

I.5.3. Réseaux souterrains moyenne tension (MTS)

Leurs structures est à un seul ordre de ligne, la dorsale exploitée en boucle ouverte permettant la reprise éventuelle en cas d'incident. Le réseau souterrain est à neutre non distribué, celui-ci étant mis à la terre au niveau des postes sources à travers une bobine de point neutre limitant ainsi le courant de défaut.



Figure I. 6: Les lignes de transports souterraines [4].

a) Constitution d'un Câble unipolaire

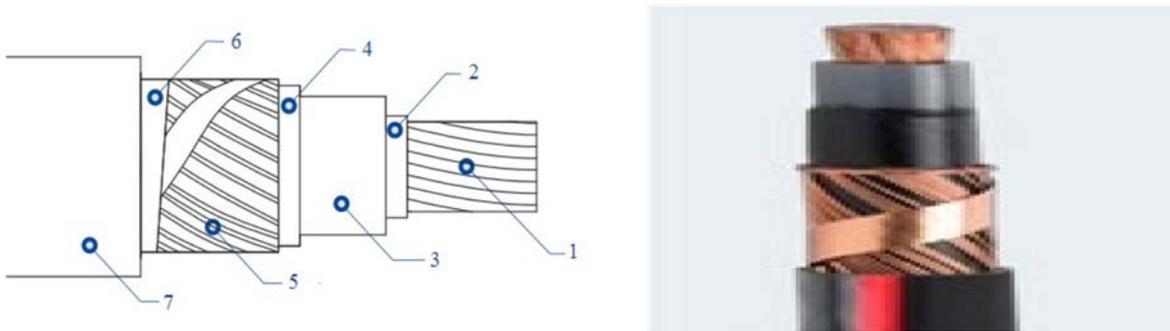


Figure I. 7: Câble unipolaire [6].

1. Âme : Conducteur en cuivre.
2. Semi-conducteur interne: Écran appliqué sur le conducteur en matériau semi-conducteur thermostable.
3. Isolation : Polyéthylène réticulé (XLPE), sous tube en atmosphère sèche.
4. Semi-conducteur externe : Écran en matériau semi-conducteur thermostable et dénouable appliqué sur l'enveloppe isolante.
5. Écran métallique : Écran composé de fils et d'un ruban en cuivre.

6. Obturation longitudinale : Ruban hygrosopique recouvrant intégralement l'écran
7. Gaine : extérieure Polyoléfine sans halogène.

I.5.4. Réseaux basse tension souterrain (BTS)

En zone urbaine, les grands ensembles d'habitations collectifs sont desservis par des réseaux BTS exploités en boucle ouverte. Ces réseaux alimentent les installations intérieures des abonnés domestiques à travers les branchements individuels ou collectifs [7].



Figure I. 8: Les câbles Souterraines BT

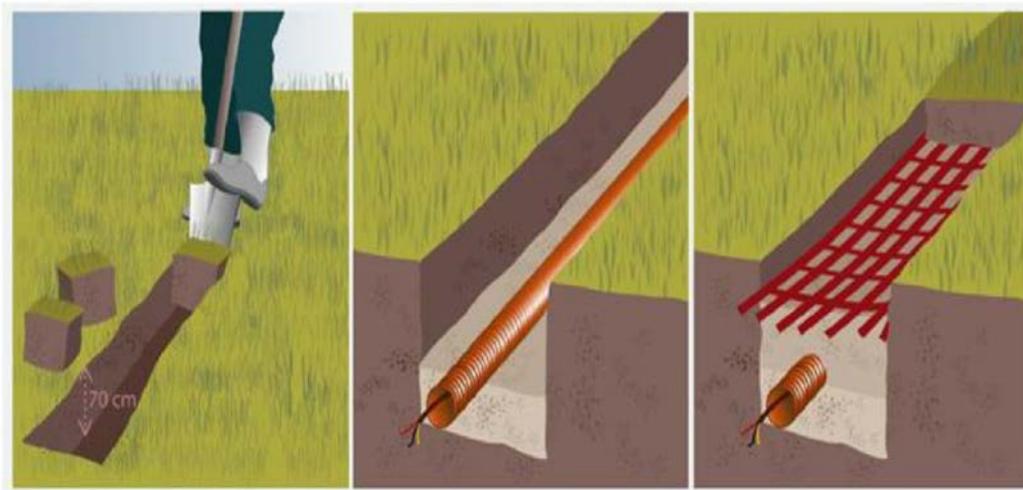


Figure I. 9: Technique de pose de câble BT [6].

a) Les avantages

- Ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications.
- Ne produisent aucune gêne pour les réceptions de radiodiffusion et télévision.
- Sont soustraites aux surtensions atmosphériques (foudre).
- Constituent la seule solution possible dans les agglomérations denses.

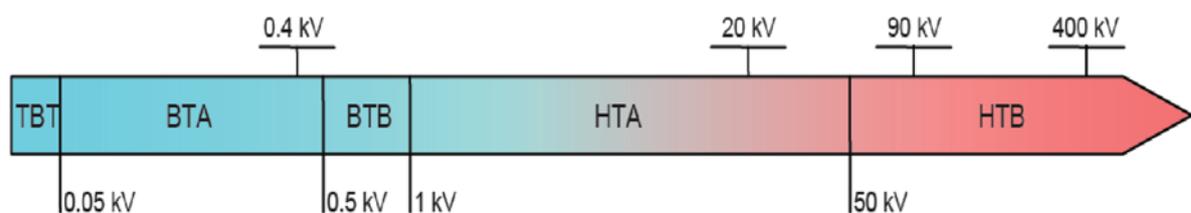
b) Les inconvénients

- Les réparations sont coûteuses et parfois malaisées.
- Leur isolement est susceptible d'être détérioré par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge.
- Leurs armures et gaines doivent être protégées contre les effets de corrosion dus aux courants vagabonds.
- Risquent d'être détériorés en cas de mouvements de terrains.
- Sont d'un coût beaucoup plus élevé que celui des lignes aériennes. La différence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée.
- Le repérage des défauts y est délicat et lent [2].

c) Les niveaux de tensions de réseau de distribution

La nouvelle norme en vigueur NF C18-510 définit les niveaux de tension alternative, (voir la figure I.1.) comme suit :

- HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV et 400 kV (EN ALGERIE 220 kV)
- HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- BTB → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- BTA → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V



TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V

Figure I. 10: Niveaux de tension des réseaux de distribution normalisés [2].

I.6. Classification des câbles souterrains

On peut Classifier les câbles électriques souterrains suivants plusieurs critères :

- Selon la nature des Phases (câble unipolaire ou tripolaire).
- Selon la nature d'isolement (Câble synthétique ou à isolation par XLPE, isolation par papier imprégné).

- Selon la forme ou la structure (Conducteurs de forme circulaire, ou sectoraux) (figure I.13).

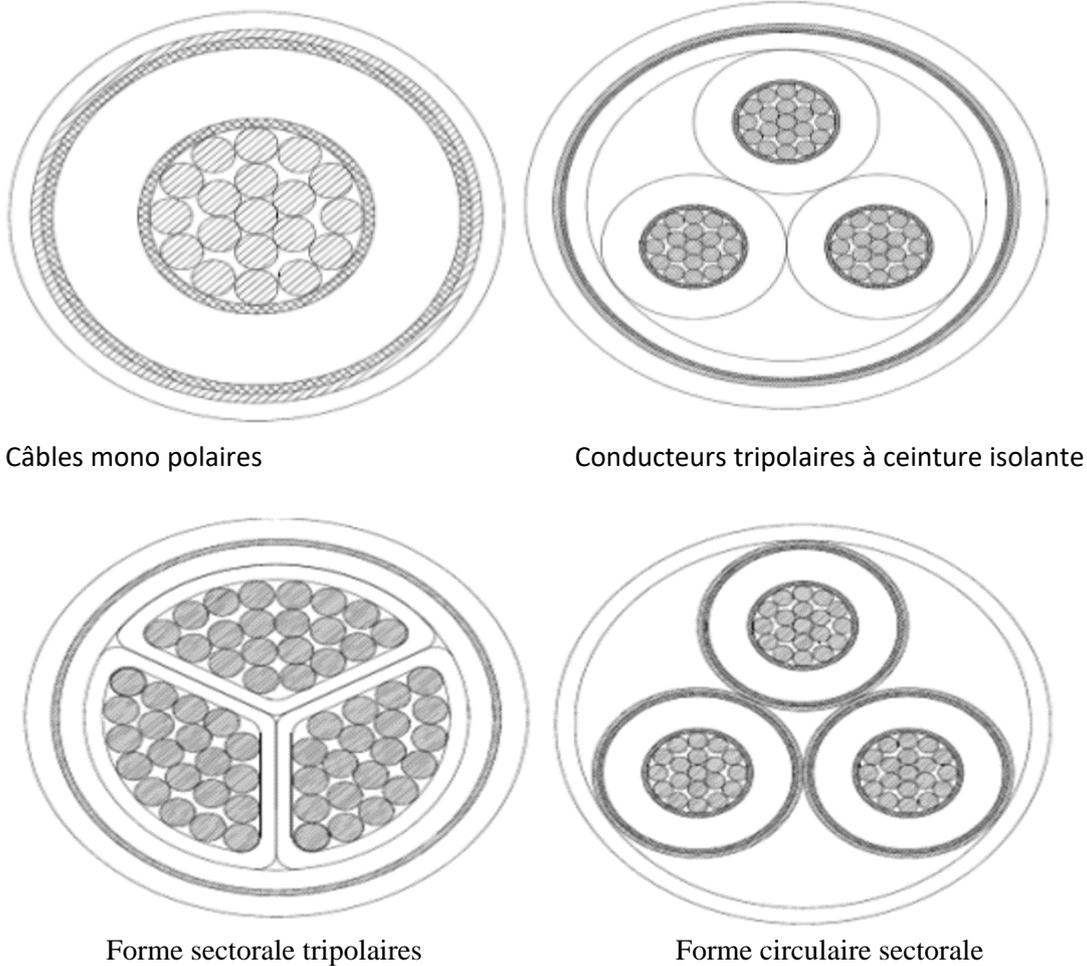
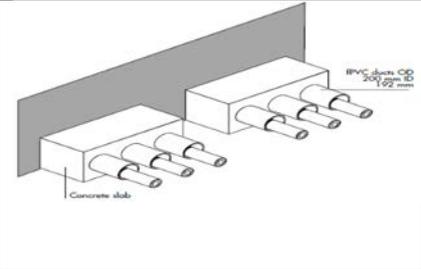
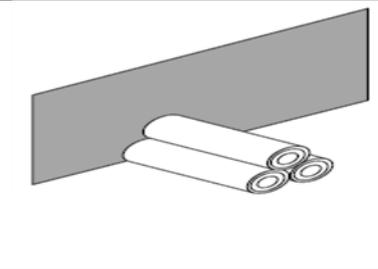
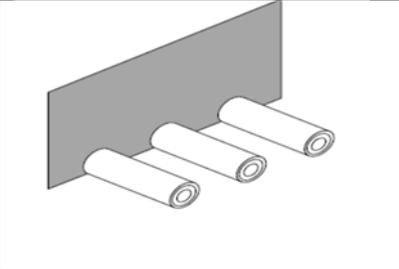
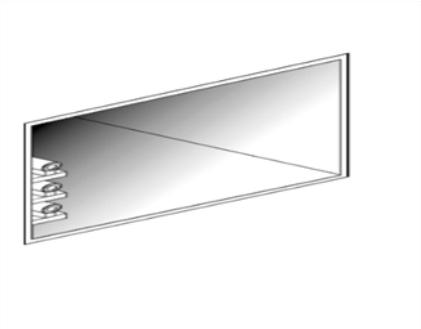
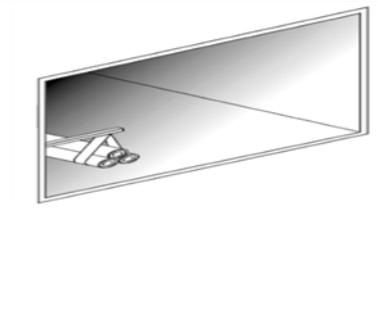
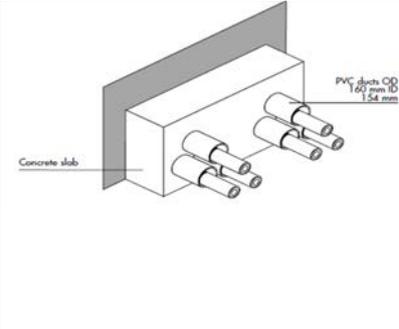


Figure I. 11: Conducteurs de différentes formes [6].

I.7. Méthodes de pose

Outre les aspects électriques et thermiques de la conception du câble, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes mécaniques et thermomécaniques auxquelles le système de câbles sera soumis lors de l'installation et de la mise en service [8]. Le choix d'un conduit s'effectue en fonction des influences externes du local, voir le Tableau I.1 et la figure I.12

Tableau I. 1: Méthodes de pose des câbles souterrains [5].

		
Câbles enterrés à plat dans des conduits	Câbles enfouis directement dans la formation de trèfles	Câbles directement enfouis en formation à plat
		
Des câbles posés à plat dans une galerie	Câbles en l'air à l'intérieur d'une galerie en formation Trilobée	Câbles enfouis dans des conduits en formation de trèfle

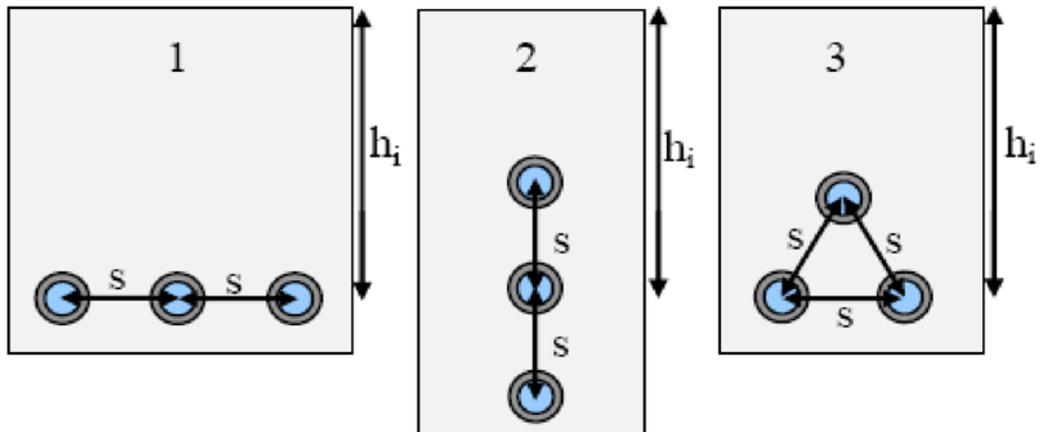


Figure I. 12: différentes configuration géométriques pour le souterrain triphasé.

(1) horizontal, (2) vertical, (3) triangulaire [1].

Un conduit doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une résistance mécanique (chocs, écrasements).
- Une étanchéité (à l'eau, aux poussières).
- Non propagateur de la flamme.

I.8. Les champs électriques

I.8.1. Effets des champs électriques

Le corps humain est un conducteur d'électricité. Quand le corps est soumis au champ L'électricité, la charge électrique s'accumule à la surface du corps. Le cumul de ces charges se traduit par : Poilu vibrant, démangeant à la surface de la peau. Micro-étincelles entre la peau et les objets en contact (vêtements, lunettes, montres, etc.) Les seuils de perception du champ électrique varient d'une personne à l'autre : En dessous de 10 kV/m, quelques personnes ressentent une sensation de « respiration » la peau. A partir de 20 kV/m, la plupart des gens perçoivent les champs électriques sous forme de picotements [9].

I.9. Impact de la pollution harmonique sur les câbles souterrains

I.9.1. Augmentation des pertes Joule

Pour une même puissance, la présence d'harmoniques augmente la valeur efficace Courant circulant dans le câble. En première approximation, la perte Il y a des pertes par effet Joule dans le câble, et La valeur efficace du courant. Il est alors facile de comprendre les harmoniques de courant Créer des pertes supplémentaires dans le câble. Calcul de la perte Joule Un câble peut être défini comme suit :

$$P_j = \sum_{n=1}^{\infty} R I_n^2 = R_1 I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} R I_n^2 = P_1 + P_h \quad (I.1)$$

Le conducteur de neutre des câbles BT va lui aussi être affecté par la présence d'harmoniques de courant sur les réseaux électriques car les composantes homopolaires circulent dans celui-ci. Cette augmentation de pertes, créée par les harmoniques circulant dans les câbles va augmenter la température de fonctionnement du câble [5].

I.9.2. Une perte accrue due à l'effet Joule

L'augmentation des pertes par effet Joule dans les câbles va faire augmenter la température. Dans les installations où les charges non linéaires génèrent beaucoup d'harmoniques 3, le courant au point neutre peut atteindre 1,73 fois le courant de phase, tandis que le point neutre possède souvent la même section ou une section inférieure à la phase

I.9.3. Influence sur la durée de vie

Une augmentation de la température de fonctionnement du câble entraînera L'isolant autour de l'âme du conducteur vieillit prématurément, réduisant ainsi la durée de vie du câble. La principale loi de vieillissement utilisée est la loi Arrhenius.

I.9.4. Cas particulier du conducteur de neutre

La présence croissante de charges non linéaires monophasées dans le réseau avec de fortes composantes de d'harmonique 3 causera des problèmes au niveau conducteur neutre. A l'équilibre, la charge linéaire est reliée à Dans un réseau triphasé, le courant de point neutre est nul. Mais à l'heure actuelle, en raison de nombreux Charges non linéaires (ordinateurs, téléviseurs, lampes basse consommation, etc.), contenu Les harmoniques de courant sont riches. La valeur efficace du courant de point neutre peut être atteinte, Dans le pire des cas, il est de 1,73 fois la valeur efficace du courant de phase. . Ces charges non linéaires peuvent alors créer une surintensité dans le neutre, qui peut être conduite dans le neutre Incendie dans le pire des cas.

I.10. Différence entre le profil de champ électrique d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain

L'image ci-dessous illustre la différence de champ magnétique sous une ligne Conversion aérienne de 150 kV et un câbles souterrains à 150 kV, mesurés A 1,5 m du sol et au niveau du sol, respectivement, voir Figure I.15. Le champ maximum au sol, juste au-dessus de l'axe du câble souterrain, peut être jusqu'à 2 fois au-dessus de la ligne aérienne. Cependant, il est tombé très vite. Ainsi à 10 mètres de l'axe du câble souterrain, le champ est insignifiant [10].

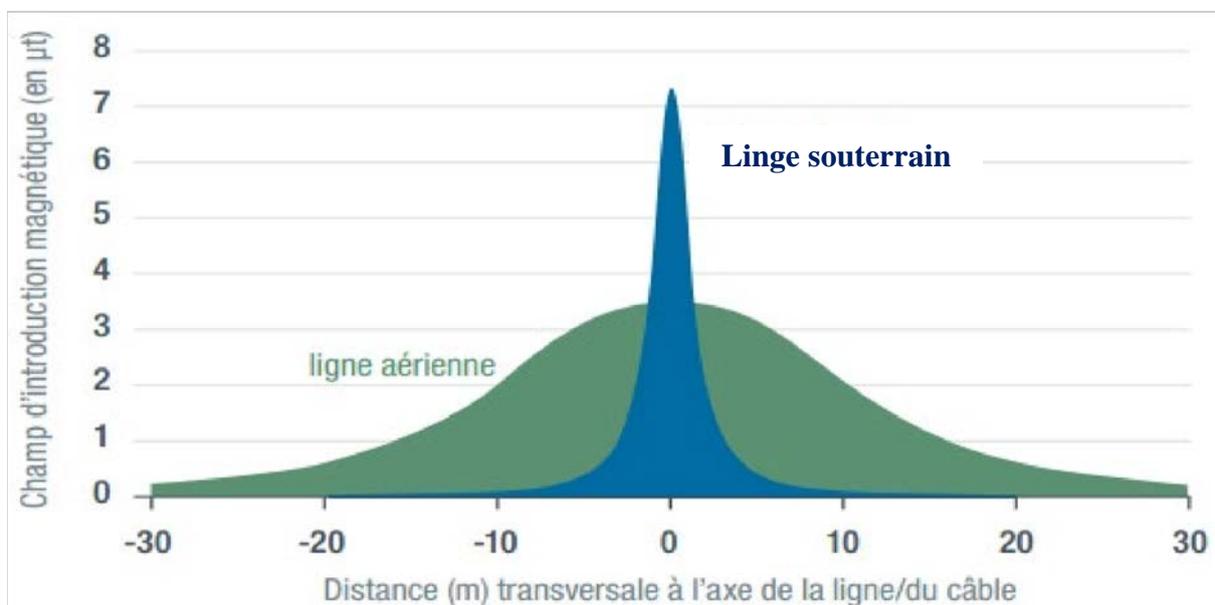


Figure I. 13: Différence entre le champ d'une ligne aérienne et d'un câble souterrain [10].

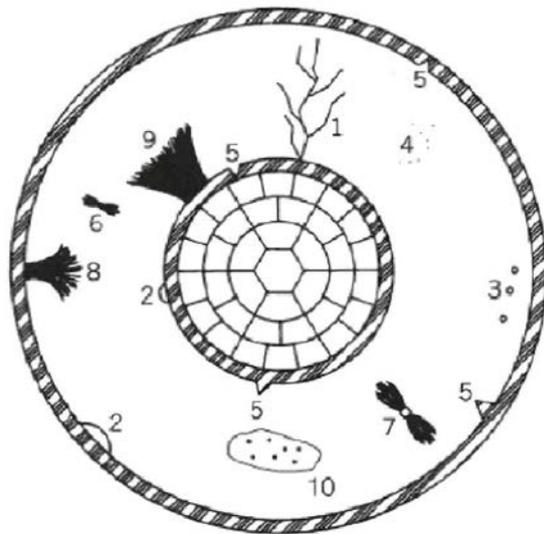
I.11. Facteurs affectant au cours du temps sur l'isolation d'un câble souterrain

L'isolation des câbles souterrains n'est jamais parfaite. Non seulement trouvons-nous Défauts provenant directement de la fabrication du câble mais en outre isolation vieillit inévitablement. Lorsque le câble est utilisé, son isolation sera soumise à des contraintes thermiques, Restrictions électriques, mécaniques et environnementales. . Au cours du temps, Ces différentes charges (tableau I.2) engendrent des modifications irréversibles de l'isolant. On parle généralement d'un vieillissement intrinsèque du câble concerne, au cours duquel l'isolation se dégrade de façon homogène [11].

Tableau I. 1: Facteurs affectant, au cours du temps, l'isolation d'un câble souterrain.

Electrique	Mécanique	Thermique	Environnement
Tension (AC, DC)	Flexion	Température maximale	Gaz (air. O2)
Courant	Traction	Température ambiant	Humidité
Fréquence	Compression	Gradient thermique	Eau
Impulsion	Torsion	Cycle thermique	Corrosion
	Vibration		

De plus, le vieillissement prématuré du câble peut provenir de contaminants (particules étrangères), défauts, de protubérances ou vides dans l'isolation pendant la production, le transport ou l'installation des câbles. Au départ, ces Les défauts sont des défauts ponctuels ou locaux de l'isolation .d'autre part ils s'aggravent avec le temps et se propagent progressivement à travers l'isolant lors de la mise en service du câble. Ils peuvent même impliquer une destruction complète de l'isolation [3].



1. Arborescence électrique
2. Vide à l'interface
3. Vide dans l'isolant
4. Contaminant
5. Protubérance dans le semi-conducteur
6. Décharge à partir d'un contaminant
7. Décharge à partir d'un vide
8. Décharge à partir de l'isolant
9. Décharge à partir du conducteur
10. Humidité

Figure I. 14: Imperfections dans un câble monophasé [1].

I.12. Défauts dans les câbles

La fonction principale du câble est de transporter le courant lorsqu'un câble ne remplit plus cette fonction de base est dit gravement défaillant (court-circuit, circuit ouvert). Mais il peut aussi être affecté par des défauts ininterrompus l'acheminement du courant à travers elle.

Les Défauts non-franc : état initial, et donc les caractéristiques physiques d'origine du câble sont altérées. Ces altérations peuvent affecter la géométrie ou les propriétés électriques et/ou mécaniques des composants et matériaux.

Les défauts non-francs ne sont généralement pas une menace immédiate, mais ils peuvent indiquer le vieillissement avancé ou une zone de contrainte intense, et donc être annonciateurs d'un défaut plus grave (défaut franc).

Ce vieillissement peut être accéléré par un environnement agressif, et l'occurrence de déradiations dues à des sollicitations locales. En effet, plusieurs contraintes sont susceptibles de s'appliquer localement aux câbles :

- Exposition à des points chauds, par exemple dus au passage du câble proche d'une canalisation chaude.
- Taux d'humidité importants, voire immersion.
- Irradiation due à l'exposition à des rayonnements ionisants.
- Contraintes mécaniques telles que des rayons de courbure très petits, des pincements du câble, ou des vibrations.

- Agressions chimiques résultant d'une contamination par des réactifs (eau borée, fluides réfrigérants) [3].



Figure I. 15: Câbles localement endommagés (images EDF) [3].

Ces contraintes sont la cause de défauts inhérents aux environnements dans lesquels les câbles opèrent. Au fil du temps elles peuvent engendrer des modifications de la géométrie du câble (espacement entre conducteurs, arrachement écran, usure de l'isolant) ou les propriétés des matériaux (constante diélectrique, conductivité, etc.). Notons que des défauts de montage ou de fabrication peuvent s'ajouter aux phénomènes évoqués plus haut. La figure I.15 montre les câbles endommagés au-dessus de la buse Centrale électrique [3].

I.13. Défauts des isolations

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

- Les cavités gazeuses qui peuvent donner lieu à des phénomènes de décharges.
- Les hétérogénéités aux interfaces ou dans la masse de l'isolant autour desquelles le champ électrique peut prendre des valeurs importantes.
- Les impuretés [14].

I.13.1. Cavités gazeuses

Elles peuvent avoir deux origines :

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

I.13.2. Microcavités préexistant au sein du matériau

Deux cas sont à envisager en fonction de la nature réticulée ou non réticulée de la structure du matériau. La réticulation s'accompagne d'un dégagement de gaz qui a tendance à former des bulles si la technologie de fabrication n'est pas bien adaptée : pression ou longueur de refroidissement insuffisante. Dans le cas d'un matériau réticulé, c'est le procédé de réticulation qui est responsable de la formation de cavités. Dans le cas d'un matériau semi cristallin non réticulé c'est la cristallisation qui pourrait donner naissance à des cavités de dimensions beaucoup plus petites [12].

Elles se forment dans le matériau lorsque la réticulation est réalisée par voie humide. Dans le polyéthylène, à la température de fusion, l'eau est plus soluble dans le matériau qu'à température normale et se mélange au polymère. Au refroidissement, les phases se séparent et donnent naissance à la formation de gouttelettes d'eau qui diffusent au bout d'un certain temps, laissant des cavités [13].

I.13.4. Cavités de gaz

L'agent de réticulation le plus couramment utilisé est le décumule peroxyde (DCP). Certains produits de décomposition de cet agent sont gazeux (méthane). Ils restent piégés dans le matériau au cours de la cristallisation, puis diffusent laissant ainsi des microcavités localisées. La densité et les dimensions des microcavités dépendent du mode de réticulation [14].

I.13.5. Cavités créées au cours de la mise en œuvre ou du fonctionnement du système

Des décollements peuvent être créés entre les parties isolante et conductrice, par suite de défauts de fabrication ou à l'existence de contraintes mécaniques consécutives au fonctionnement du système [12].

I.13.6. Cavités Hétérogénéités

Elles peuvent conduire à des concentrations locales du champ électrique. Dans le cas des inhomogénéités de forme sphérique de constante diélectrique ϵ , noyées dans l'isolant sous champ uniforme, le facteur multiplicatif du champ n'excède pas 3. Si l'inhomogénéité est de forme ellipsoïdale, le facteur multiplicatif peut être beaucoup plus important [13].

I.13.7. Impuretés

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

- L'origine des impuretés est généralement la forte contamination des écrans semi-conducteurs.
- Le processus de fabrication des câbles (à la vapeur d'eau ou en gaz inerte) joue un rôle Prépondérant dans la contamination de l'isolant.
- Les propriétés électriques telles que la rigidité diélectrique, le facteur de pertes diélectriques et la résistivité sont fortement influencées par la présence des impuretés au sein de l'isolant.
- Le vieillissement électrique n'a pratiquement aucune influence sur le processus de diffusion des impuretés dans l'isolant [14].

I.14. Claquage des isolants

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

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

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

Le claquage est la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique, manifesté souvent comme une modification irréversible du diélectrique. Il est le fruit d'une série de processus complexes et interactifs. On peut différencier le claquage intrinsèque

du matériau qui est lié à des phénomènes électroniques, thermiques ou mécaniques. Ce sont différents types de claquage [15].

Dans cette Figure (I.16) organigramme qui résumé différents types de claquage des isolants

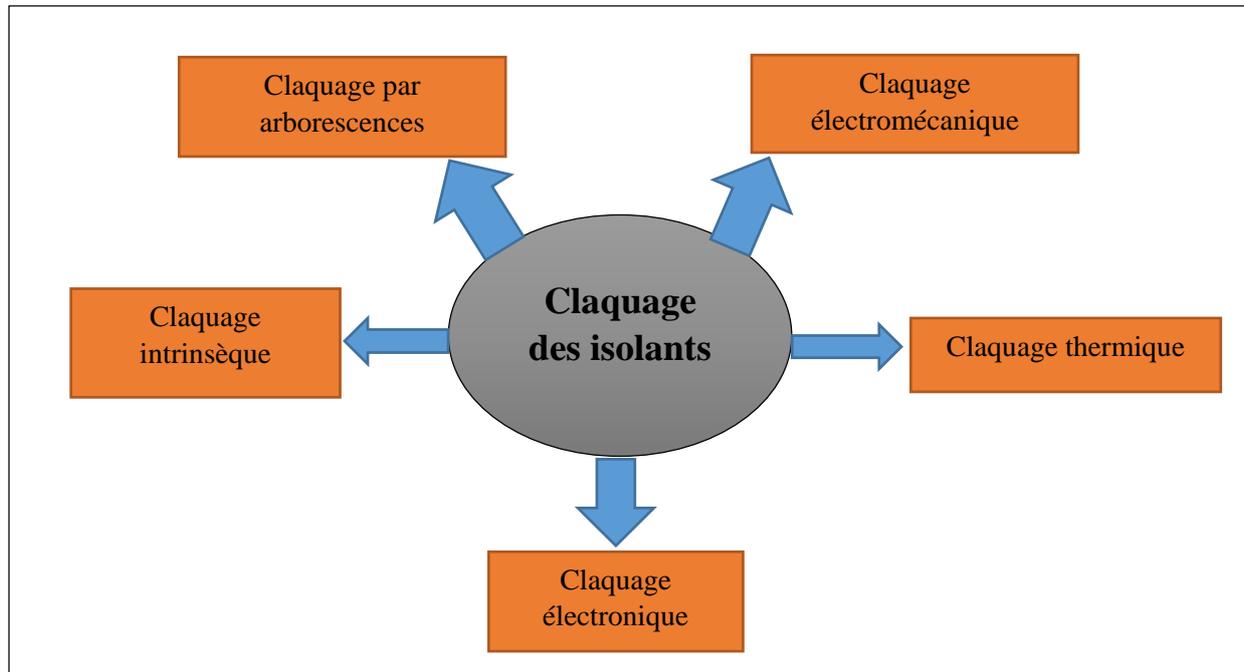


Figure I. 16: Types de Claquage d'isolation des câbles

I.14.1. Claquage intrinsèque

Pour ce type de claquage, on admet que le processus de rupture diélectrique est produit, sous l'effet du champ électrique, il se déroule comme aux gaz produisant des électrons de conduction. Le déplacement des cavités vers la cathode génère des charges qui consolident le champ électrique au voisinage de la cathode. Puis, on obtient une augmentation d'émission des électrons qui conduit à la destruction de l'isolation [15].

I.14.2. Claquage électronique

La présence d'un électron dans le matériau induit une ionisation par collision (sous l'effet du champ électrique) qui entraînera la rupture diélectrique du matériau [16]. Pour produire une avalanche il faut qu'un nombre suffisant d'électrons soit produit. Chaque ionisation produit deux électrons,

I.14.3. Claquage thermique

Les pertes diélectriques provoquent une libération de chaleur dans l'isolant. Lorsque la quantité de chaleur produite est supérieure à celle évacuée, la température augmente, provoquant l'augmentation de la conduction et de la chaleur par l'effet Joule dans une évolution d'instabilité

thermique. Il provoque une augmentation de la température de la matière isolante par rapport au milieu ambiant qui produit la dégradation de l'isolant. Le mécanisme se déroule de l'ordre de la seconde. La tension de claquage thermique est reliée à la fréquence f par l'expression suivante :

$$U_c = \frac{c}{\sqrt{f}} \quad (I.2)$$

U_c : Tension de claquage thermique

c : Etant une constante

f : Fréquence [16].

I.14.4. Claquage électromécanique

Claquage électromécanique prend en compte l'effort électrostatique qui permet de rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cet effort presse l'isolant solide placé entre les électrodes. Claquage survient si cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module de Young [15].

I.14.5. Claquage par arborescences électriques

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

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

Les arborescences sont des compositions filamenteuses ramifiées constituées de micro-canaux creux sous forme d'arbre susceptibles de se disperser sur des distances de plusieurs millimètres en volume et en surface d'isolants figure (I.17). Ce phénomène destructeur peut apparaître sans qu'on le sache dans l'isolation et évoluer pendant plusieurs années jusqu'à la destruction [15].

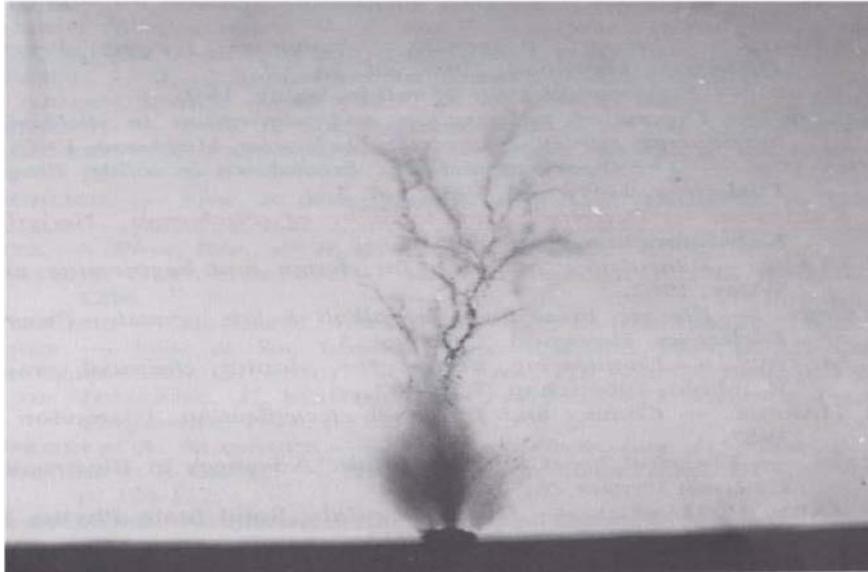


Figure I. 17: Arborescence électrique observée dans un câble électrique

I.15. Décharge partielle

Si le dispositif est alimenté en courant alternatif, la décharge continue va progressivement dégrader l'isolant solide ou liquide, d'abord en surface de la cavité puis en profondeur, provoquant à terme un claquage terminal du diélectrique et la destruction de l'installation. Que ce soit au cours du processus de fabrication, ou dans certaines conditions, la présence de décharges partielles peut être vérifiée par des méthodes d'inspection pendant la durée de vie de dispositif [17].

Plusieurs classifications des décharges partielles (DP) ont été proposées, qui varient suivant le critère de sélection utilisés. On peut donc classer les décharges en fonction de leur localisation en quatre catégories :

- a. Décharge de surface :** c'est une décharge provenant d'un ce point "triple" métal/isolation/air en présence de défauts (gouttelettes d'eau, contamination, poussières...), et pousse à la surface des matériaux isolants. Elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique.
- b. Décharge corona :** elle se manifeste lorsque le champ électrique est fortement augmenté dans un endroit donné du matériau (par exemple par des effets de pointe). La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe.
- c. Décharges internes :** elles se produisent là où la rigidité diélectrique est faible comme des cavités dans les solides ou des bulles dans les liquides.

d. Arborescence dans les solides : un « arbre électrique » est issu de défauts d'isolation. Ensuite, il y a la croissance d'une structure ramifiée, y compris les différentes branches sont celles où se trouve la décharge. Les arbres constituent le phénomène de claquage à long terme. On peut les classer en deux catégories :

- Les arborescences électriques
- Les arborescences électrochimiques

On distingue trois phases dans l'évolution du phénomène d'arborescences :

- La phase d'initiation qui est la période qui sépare le début de l'application de la tension à l'apparition des premières arborescences.
- La phase de propagation qui est toujours accompagnée de décharges partielles.
- La phase de claquage qui se produit très rapidement lorsque les branches de l'arbre traversent complètement le mur isolant [18].

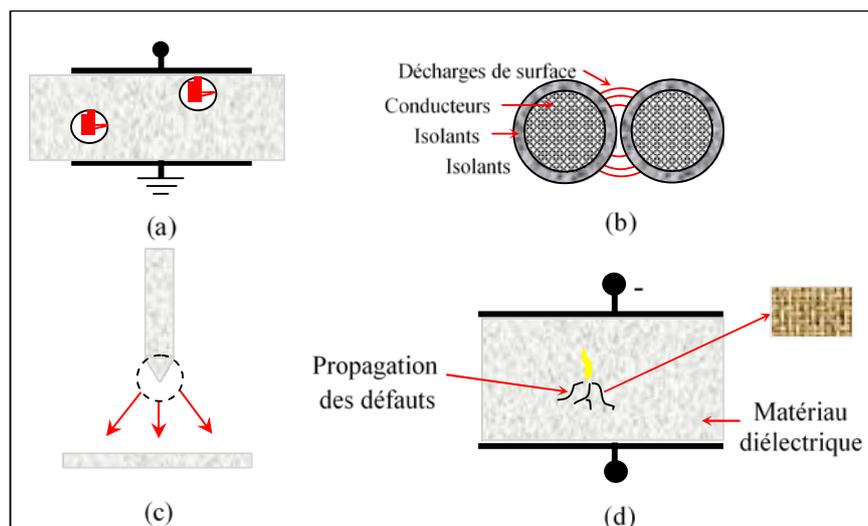


Figure I. 18: Différents types de décharges selon Kreuger :

a) interne, **b)** surface, **c)** couronne, **d)** en arborescence

I.15.1. Origines d'une décharge partielle

Comme le montre la figure I.14 en haut, montre un ensemble d'imperfections susceptibles de se manifester dans un câble souterrain. Il a été remarqué, en particulier, que les jonctions ou joints entre câbles sont souvent le siège d'un nombre important de défauts. En effet, ces joints thermo-rétractables sont réalisés manuellement sur site. On ne peut donc y éviter la présence de multiples imperfections. Il en résulte notamment que l'activité des décharges partielles est

souvent prépondérante au niveau de ces jonctions. Nous devons par conséquent examiner ces accessoires lors de l'analyse des décharges partielles.

I.15.2. Conséquences des décharges partielles

Les décharges partielles conduisent à une dégradation des matériels sous l'action de diverses contraintes :

- Contraintes thermiques générées localement par la décharge, pouvant conduire à la carbonisation de l'isolant.
- Stress chimique causé par les produits de dégradation des rejets (en particulier l'ozone, les oxydes d'azote et l'acide nitrique).
- Erosion mécanique due au bombardement par des espèces chargées et aux attaques acides.

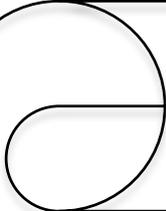
Ces contraintes conduisent à la dégradation du matériau isolant en entraînant la destruction de l'équipement à long terme.

I.16. Conclusion

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

L'objet de ce chapitre est de donner une vue d'ensemble de la classification, Propriétés, composition et géométrie des câbles souterrains du réseau électrique. Les avantages et les inconvénients ont déjà été évoqués sous forme de comparatif deux types de transmission d'énergie : les lignes aériennes et les câbles sous la terre. Nous avons mentionné quelques défauts et problèmes des câbles Souterrain tel que: les courts circuits les harmoniques les défauts de construction et d'isolement. Nous avons mis en évidence que durant sa phase d'exploitation, le câble ainsi que son isolation sont soumis à des contraintes d'ordre physique (électrique et mécanique) pouvant découler soit de l'exploitation en elle-même (échauffement dû à l'effet Joule, champ électrique).

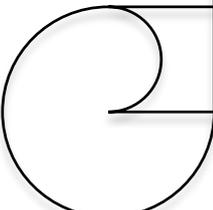
Dans le chapitre suivant, il présentera un modèle pour déterminer les contraintes électriques dans l'environnement du logiciel COMSOL Multiphysics.



Chapitre II :

Modèle

Electrostatique



II.1. Introduction

Avec le développement des moyens de calcul, la méthode des éléments finis a fait de grands progrès. Depuis les années 1960, elle est devenue une méthode numérique fondamentale pour résoudre les problèmes aux dérivées partielles en raison de sa souplesse d'utilisation et de sa très large généralité [6].

Nous allons dans ce chapitre présenter les méthodes d'éléments finis les plus simples, qui restent aussi les plus utilisées, pour la résolution des problèmes aux limites. Cela nous permettra d'exposer le modèle de Maxwell, les différentes formules et les équations qui en découlent, d'où leurs avantages et leurs inconvénients et nous terminerons ce chapitre par le processus de simulation du logiciel Comsol.

II.2. Equations de Maxwell

III.2.1. Équations en potentiel scalaire : Poisson et Laplace

Les équations régissant la distribution du potentiel électrique et du champ électrique dans un milieu donné sont dérivées des équations de Maxwell. Elles consistent en quatre équations aux dérivées partielles qui relient les phénomènes magnétiques, caractérisés par le champ magnétique \vec{H} et l'induction magnétique \vec{B} aux phénomènes électriques caractérisés par le champ électrique \vec{E} et l'induction électrique \vec{D} . Ces quatre équations sont [19] :

Loi de Maxwell-Gauss :

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho_v \quad (\text{Eq.II.1})$$

Loi de Maxwell-Faraday :

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (\text{Eq.II.2})$$

Loi de Maxwell-Ampère :

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (\text{Eq.II.3})$$

Loi de conservation du flux magnétique :

$$\operatorname{div}\vec{B} = 0 \quad (\text{Eq.II.4})$$

Avec :

\vec{E} : Champ électrique en (V/m)	\vec{D} : Induction électrique en (C/m ²)
\vec{B} : Induction magnétique en (T)	ρ_v : Densité de charge volumique en (C/m ³)
\vec{H} : Champ magnétique en (A/m)	$\frac{\partial D}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m ²)
\vec{J} : Densité de courant en (A/m ²)	

Outre ces quatre équations, il y a des relations particulières qui lient \vec{D} à \vec{E} , \vec{J} à \vec{E} et \vec{B} à \vec{H} :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{Eq.II.5})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{Eq.II.6})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Eq.II.7})$$

Où ϵ , σ et μ représentent respectivement la permittivité électrique, la susceptibilité magnétique, et la conductivité électrique du milieu.

Lorsque l'on applique une différence de potentiel alternative, la dérivation des grandeurs électriques par rapport au temps revient à les multiplier par la quantité $j\omega$ où ω est la pulsation de la source et j est l'unité imaginaire. En tenant compte des relations constitutives, les équations (Eq.II.1), (Eq.II.2) et (Eq.II.3) deviennent :

$$\text{div } \epsilon \vec{E} = \rho_v \quad (\text{Eq.II.8})$$

$$\text{rot } \vec{E} = -j\omega \mu \vec{H} \quad (\text{Eq.II.9})$$

$$\text{rot } \vec{H} = j\vec{J} + j\omega \vec{D} \quad (\text{Eq.II.10})$$

Comme le champ magnétique est faible, dans les équipements MT considérés, le second membre de l'équation (III.9) peut être négligé, ce qui donne :

$$\text{rot } \vec{E} = 0 \quad (\text{Eq.II.11})$$

On peut donc découpler les équations (Eq.II.8) et (Eq.II.11) qui règlent les grandeurs électriques de celles qui règlent les grandeurs magnétiques. L'équation (Eq.II.8) n'est alors rien d'autre que la forme locale du théorème de Gauss qui explique la conservation de la charge. L'équation (Eq.II.11) permet de dire que le champ E dérive d'un potentiel ϕ avec :

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi \quad (\text{Eq.II.12})$$

L'introduction de la relation (III. 12) dans l'équation (III.8) donne :

$$\text{div}(-\epsilon \text{ grad } \phi) = \rho_v \quad (\text{Eq.II.13})$$

On obtient ainsi l'équation de la répartition du potentiel dans un milieu de permittivité absolue ε avec une densité de charge volumique de charge ρ_v .

Pour des matériaux isolants, souvent utilisés dans les appareillages MT, la densité volumique de charge ρ_v est nulle. Avec ces hypothèses, on obtient l'équation de Laplace (Eq.II.14) de la répartition du potentiel dans les matériaux isolants.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{Eq.II.14})$$

On peut noter que cette équation gouverne aussi la répartition du potentiel dans les matériaux conducteurs tels que les électrodes car ceux-ci sont des volumes équipotentiels.

II.2.2. Conditions aux limites

L'équation différentielle définie précédemment a plusieurs solutions. Les conditions aux limites sont en fait utilisées pour déterminer la solution unique de ces équations. Il existe deux types principaux de ces conditions : les conditions de Dirichlet et les conditions de Neumann.

Les conditions de Dirichlet imposent des valeurs potentielles comme des bornes infinies sur les surfaces conductrices, les surfaces équipotentiels ou les domaines d'étude.

La condition de Neumann impose la valeur de la dérivée normale du potentiel, tel qu'un plan de symétrie ou une surface à flux imposé. Les conditions de Dirichlet et Neumann sont dites homogènes si la valeur imposée est vide. Sinon, ils sont dits non uniformes.

II.2.3. Conditions d'interfaces

L'équation (Eq.II.14) est obtenue en supposant que la permittivité absolue ε est constante sur tout le domaine d'étude. Par conséquent, cette équation ne s'applique qu'aux milieux homogènes et isotropes. Dans le cas de la coïncidence de plusieurs milieux, ce qui est souvent le cas dans les problèmes de MT, l'équation (Eq.II.14) ne tient plus dans tout le domaine d'étude.

Il faut alors trouver des solutions dans chaque milieu et relier les différentes solutions par des conditions d'interfaces.

A la frontière de deux milieux aux propriétés différentes, en l'absence de charge et de courant de surface, l'équation dite d'interface peut s'écrire :

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (\text{Eq.II.14})$$

Cela signifie l'égalité des valeurs potentielles vues des deux régions,

$$\vec{D}_1 \cdot \vec{n}_1 = \vec{D}_2 \cdot \vec{n}_2 \quad (\text{Eq.II.15})$$

Elle transforme la conservation de la composante normale du déplacement électrique D , où n_1 et n_2 représentent les normales à la frontière, orientées vers l'extérieur à partir des points médians 1 et 2 respectivement.

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{n}_1 = \vec{E}_2 \cdot \vec{n}_2 \quad (\text{Eq.II.16})$$

Il convertit la conservation de la composante tangentielle du champ électrique en interface.

II.3. Modèle mathématique

II.3.1. Hypothèses simplificatrices

Pour faciliter le calcul du champ et l'application des lois théoriques, nous considérons les hypothèses suivantes :

- ✓ La forme du contaminant ne change pas lors de l'application de la tension.
- ✓ La température est constante.
- ✓ Le câble est de longueur infinie.
- ✓ La pression est égale à la pression atmosphérique normale 760 mm Hg .

II.3.2. Calcul du champ électrique

L'effet de la cavité de permittivité ε_c dans l'isolant de permittivité ε_i est évalué en termes de perturbation du potentiel électrique. Le potentiel dans la cavité et dans l'isolant est régi par l'équation de Poisson [20] :

$$\nabla^2 V + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad (\text{Eq.II.17})$$

Si on suppose que la densité des charges libres dans l'isolant est assez faible pour être négligée alors l'équation (II.1) se réduit à l'équation de Laplace :

$$\Delta V = 0 \quad (\text{Eq.II.18})$$

En coordonnées cylindriques l'équation (II.2) devient :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Eq.II.19})$$

Dans une symétrie cylindrique sans cavité le potentiel V est indépendant des coordonnées θ et z , alors :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V}{\partial r} \right) = 0 \quad (\text{Eq.II.20})$$

Le potentiel en fonction de la coordonnée radiale après intégration est donné sous la forme :

$$V(r) = C_1 \cdot \ln(r) + C_2 \quad (\text{Eq.II.21})$$

Avec les conditions aux limites : $V(R_1) = V_0$ et $V(R_2) = 0$, où R_1 et R_2 sont respectivement les rayons des électrodes active (âme) et terre (écran métallique), les constantes d'intégration C_1 et C_2 sont respectivement :

$$C_1 = \frac{V_0}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \text{ et } C_2 = -\frac{V_0}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \cdot \ln(R_2)$$

Enfin, le potentiel électrique entre les électrodes en fonction de la coordonnée radiale r s'écrit :

$$V(r) = \frac{V_0}{\ln \frac{R_1}{R_2}} \cdot \ln \frac{r}{R_2} \quad (\text{Eq.II.22})$$

Le champ électrique entre les électrodes est : $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}$, alors $E = -\frac{dV}{dr}$:

$$E(r) = \frac{V_0}{r \cdot \ln \frac{R_1}{R_2}} \quad (\text{Eq.II.22})$$

Avec :

V_0 : tension appliquée au conducteur central (kV).

R_1 : rayon de l'âme conductrice (mm).

R_2 : rayon de l'écran métallique (mm).

II.4. Méthodes numériques

Les principales méthodes numériques de calcul du champ sont :

II.4.1. Méthode des différences finies (MDF)

L'idée principale de la M.D.F est de fournir une approximation des dérivées partielles qui régissent les problèmes par des « différences » entre les valeurs nodales qui sont séparées par une distance finie. Elle est, historiquement, la première méthode connue pour calculer, sur ordinateur, la solution d'une équation différentielle [21].

Elle consiste à décomposer le domaine d'étude en une grille rectangulaire uniforme dont chaque nœud est à équidistance de son voisin suivant les axes x et y et en chaque nœud, le système différentiel est satisfait. L'utilisation d'un maillage régulier permet d'avoir, en tout point, la même forme pour les équations. Le plus simple de ces maillages réguliers est le maillage carré, figure II. 1. L'équation aux dérivées partielles est alors remplacée par un système d'équations algébriques pour les valeurs nodales. Dans le calcul du potentiel et du champ électrique, ces

équations sont linéaires et la solution de chaque valeur nodale est obtenue par itération ou inversion de matrice [20].

Une illustration de cette présentation est donnée en prenant l'équation de Laplace (III. 14) en 2 dimensions définie dans le domaine donné sur la figure II.1.

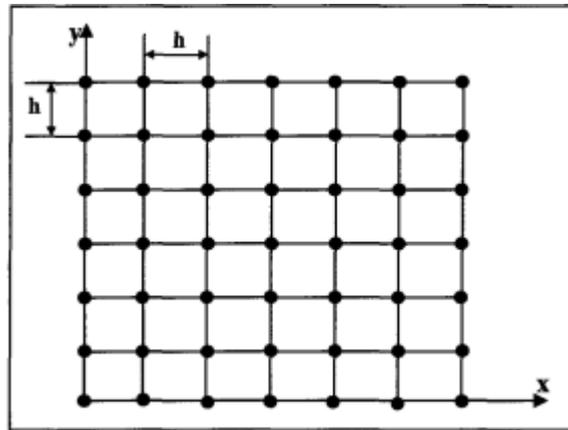


Figure II.1: Maillage carré

II.4.1.1. Avantages de la MDF

- La méthode des différences finies est une méthode simple à appliquer lorsque la géométrie le permet et c'est une méthode raisonnablement exacte.
- De plus, elle se programme facilement et nécessite peu de mémoire pour le stockage des données.

II.4.1.2. Inconvénients de la MDF

- Lorsque la géométrie est de frontière courbe, le schéma ne peut s'appliquer près des frontières irrégulières et donc cette méthode devient difficilement applicable. On doit alors rechercher à la place une méthode qui est valide indépendamment de la géométrie.
- Elle n'est pas applicable pour des problèmes en trois dimensions.
- Enfin, cette méthode nécessite la connaissance de la grandeur étudiée, sur toute la frontière entourant le domaine étudié. Ce qui n'est pas toujours le cas.

II.4.2. Méthode des Eléments Finis (MEF)

La M.E.F, outil numérique très puissant, est beaucoup utilisée dans la résolution des problèmes à domaine spatial fini, surtout en mécanique où elle a connu son plus fort développement. Cette méthode a été appliquée avec succès dans les problèmes de calcul de potentiel et de champs électriques.

Le principe de cette méthode consiste à diviser le domaine d'étude en plusieurs éléments finis (appelé maillage). C'est une étape très importante puisque le choix de la forme de l'élément de

maillage est primordial dans la précision des résultats obtenus. Il est donc nécessaire de trouver la forme et le degré d'approximation de celui-ci qui soient les plus adaptés à la géométrie du domaine d'étude. Il existe un grand nombre de formes géométriques pour les éléments de maillage tels que :

- Des triangles, des rectangles, des quadrilatères arbitraires pour les problèmes à deux dimensions
- Des tétraèdres, des hexaèdres, des cubes, des prismes pour des problèmes à trois dimensions.

II.4.2.1. Avantages de la MEF

- La flexibilité est l'une des forces les plus importantes de la M.E.F. Les éléments peuvent avoir plusieurs formes variées et peuvent donc s'adapter facilement à n'importe quelles formes géométriques complexes et aussi tenir compte des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux.
- Les matrices formant le système d'équations final sont symétriques, ce qui simplifie la résolution.
- La programmation de cette méthode est simple, surtout si l'on considère introduire les conditions aux limites.
- La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie. De plus, avec son développement important, il existe de très bons logiciels commerciaux qui sont basés sur cette méthode et qui la rendent très accessible. Par conséquent, elle est applicable à beaucoup de problèmes sans que nous connaissions nécessairement la M.E.F en détail [15].

II.4.2.2. Inconvénients de la MEF

- Le traitement d'une problématique par la MEF implique une connaissance parfaite du domaine géométrique et des conditions aux limites. Ce qui complique la mise en œuvre de ce traitement lorsque ce n'est pas le cas.
- Une fois le potentiel connu en chaque nœud, il faut procéder à un autre calcul numérique pour déterminer le champ électrique en tout point ce qui peut engendrer d'autres erreurs.
- La modification d'une partie de la géométrie entraîne un nouveau maillage et, donc, une remise à zéro dans les calculs.

- Un mauvais choix du maillage proposé automatiquement par les logiciels, limite la précision des résultats. L'utilisateur doit donc porter une attention particulière lors de cette étape.
- Il a été dit que la M.E.F était une méthode flexible car elle s'adapte facilement aux différentes géométries, mais ce n'est pas le cas du maillage car celui-ci doit être entièrement refait si une modification sur une partie de la géométrie du problème considéré intervient.

II.4.3. Méthode des éléments finis de frontière (MEFF)

L'utilisation des équations intégrales de frontière dans la résolution des problèmes de calcul de distribution de champ électrique est assez récente. Cette méthode s'est avérée très efficace dans la résolution des problèmes de champ magnétique, et dans le calcul de la distribution du champ électrique autour des isolateurs pollués.

Le principe de cette méthode est la reformulation des équations aux dérivées partielles qui décrivent le problème sous forme d'équations intégrales qui ne font intervenir que des inconnues sur la frontière du domaine. La solution de ces équations est obtenue par la méthode des éléments de frontière qui est basée sur l'application de la technique des éléments finis sur le contour du domaine étudié.

En général, dans les problèmes de calcul de potentiel et de champ électrique, nous trouvons deux formulations différentes pour la M.E.F.F : la formulation indirecte et la formulation directe. Pour la formulation directe, on évalue directement le potentiel et le champ électrique normal alors que pour la formulation indirecte, la distribution de charges est évaluée dans un premier temps et on en déduit ensuite le potentiel et le champ électrique [22].

II.4.3.1. Avantages de la MEFF

- La discrétisation du milieu infini ne cause plus de problème puisque tout est ramené sur la frontière du milieu étudié.
- Transformation d'une équation aux dérivées partielles en une équation intégrale, réduit d'un la dimension du problème, voire deux dimensions si le problème présente une symétrie de révolution.
- Il n'est pas nécessaire de reconsidérer tous les maillages comme le fait MEF lorsque des modifications au niveau de la géométrie interviennent. Il suffit de modifier les paramètres de la seule partie de la frontière considérée, puisque la forme de base de l'équation intégrale n'est soumise à aucune référence à une géométrie spécifique.

- Par rapport aux autres méthodes numériques, le nombre d'inconnues à déterminer est moindre pour un problème équivalent, d'où un gain en temps de calcul non négligeable.

II.4.3.2. Inconvénients de la MEFF

- Les méthodes indirectes ne peuvent pas calculer directement le potentiel électrique et le champ électrique. Cela nécessite donc des calculs supplémentaires qui peuvent s'avérer coûteux pour des problèmes de grandes tailles.
- L'extension de la MEFF aux problèmes non linéaires est difficile. Dans ces conditions, on doit discrétiser la totalité du domaine où se produit la non linéarité matérielle ou géométrique, perdant ainsi l'avantage de la MEFF d'une discrétisation de la frontière uniquement.

II.5. Logiciel COMSOL Multiphysics

Notre étude concerne l'influence des contaminants physique sur la distribution du champ électrique dans un câble de transport d'énergie électrique moyenne tension 18/30 kV.

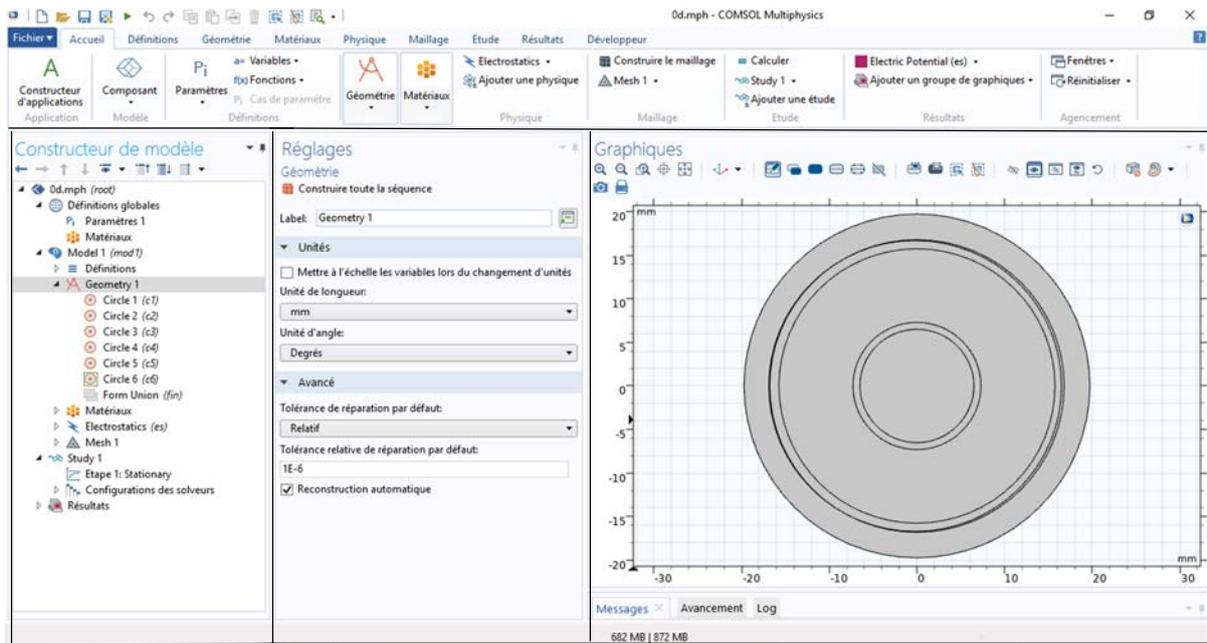
- Le logiciel Comsol est utilisé pour simuler le modèle numérique du problème.
- Les calculs analytiques ont été effectués avec le logiciel Matlab.

II.5.1 Description de logiciel COMSOL Multiphysics

COMSOL Multi-physique est un logiciel de simulation numérique est une méthode qui offre aux chercheurs la possibilité d'analyser le comportement de plusieurs phénomènes qui s'échappent aux calculs analytiques en raison de leur difficulté, est basé sur la méthode des éléments finis. Le logiciel peut simuler de nombreux problèmes physiques et applications en ingénierie, en particulier phénomènes couplés ou simulation multi-physique [23].

De plus, le logiciel ne nécessite pas de connaissances approfondies d'analyse numériques ou mathématique. En fait, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies. Il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique, électrostatique) et dans quel régime (stationnaire, temporel, ...), le modèle doit être construit [24].

COMSOL Multiphysics contient les différentes étapes du processus de simulation « définition de la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir le domaine physique d'étude, résolution et l'exportation des résultats » de modèles tout en assurant des résultats précis et fiables sont intégrées dans une interface graphique, représentée dans la figure II.2 [25].



**Construction
physique**

**Déclaration des
paramètres**

Géométrie étudié

Figure II. 2: Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.

La modélisation avec COMSOL Multiphysics est résumée dans le diagramme ci-après :

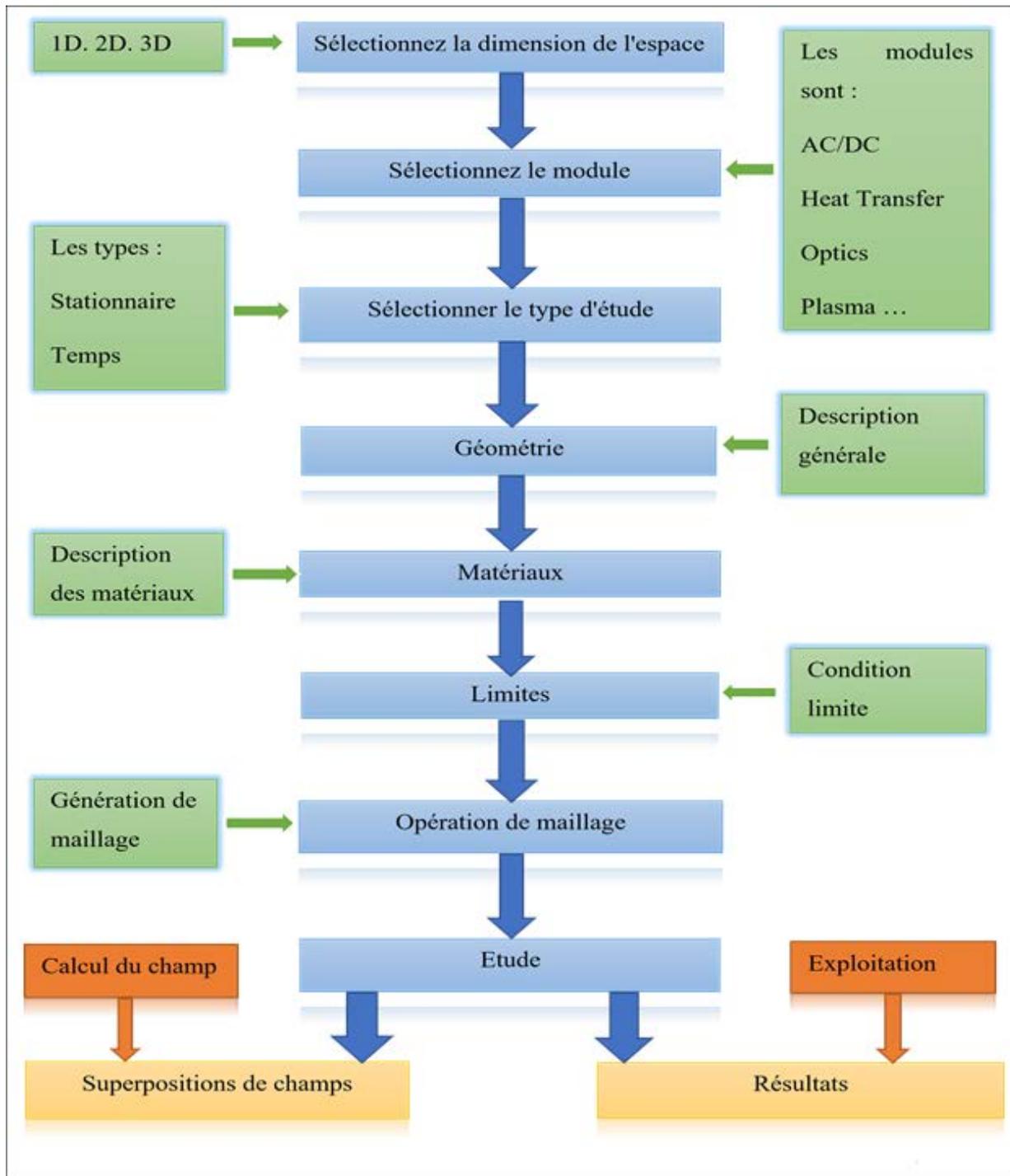


Figure II. 3: Diagramme de différentes étapes de simulation dans COMSOL

II.5.2. Etape de simulation par le logiciel COMSOL Multiphysics

a) Choix du modèle

Une fois le COMSOL est lancé, nous devons commencer par le choix du modèle.

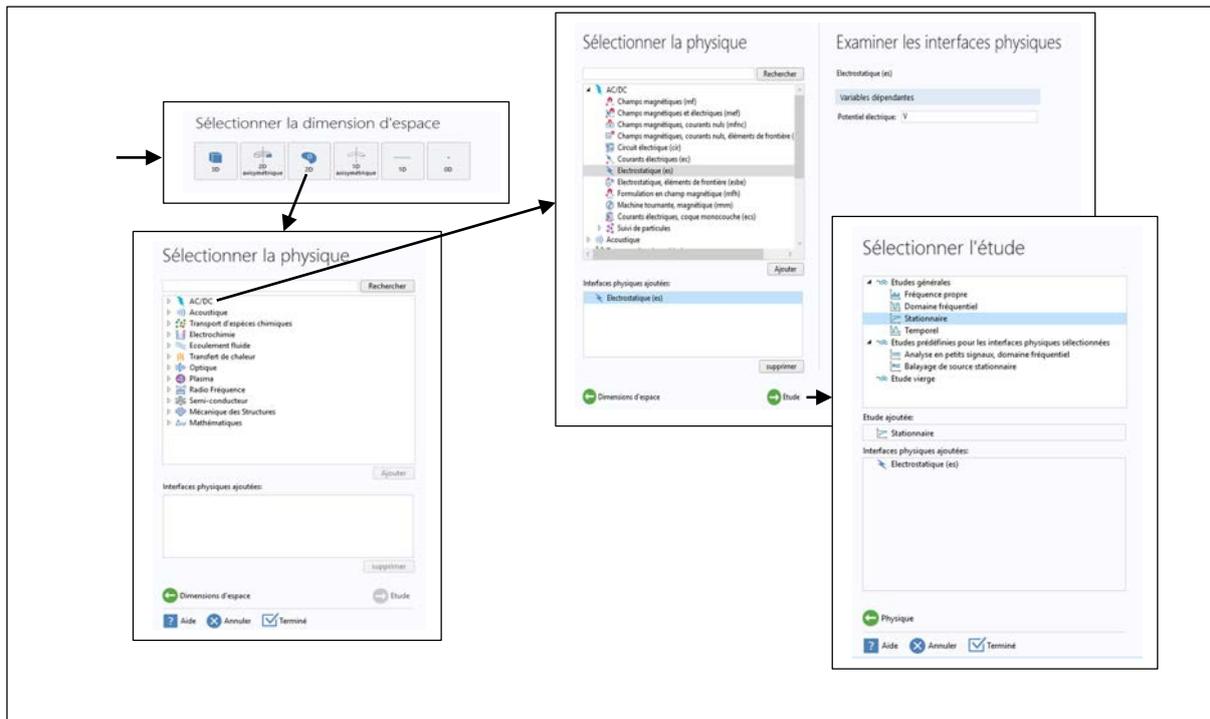


Figure II. 4: présentation les étapes de choix de modèle

- Assistant de modélisation.
- Sélectionner la dimension d'escape 2D.
- Sélectionner le module physique AC/DC
- Ajouter le modèle électrostatique (es).
- Sélectionner le type d'étude le régime stationnaire.

b) Géométrie

Après avoir choisi le module, l'étape qui suit consiste à dessiner la géométrie de l'étude. Dans notre cas c'est une géométrie concentrique (câble électrique de transport moyenne tension 18/30 kV et 120 mm²).

Tableau II. 1 : Caractéristiques générales du câble utilisé [25].

	Désignation		Valeur	Unité
<u>Ame</u>	Nature du métal	Aluminium	120	mm ²
	Section Classe 2 (CEI 60-228) Diamètre approximatif		13.0	mm
<u>Semi-conducteur Sur Ame</u>	Constitution Epaisseur approximative	PRC extrudé	0.8	mm
<u>Isolation</u>	Constitution	PRC extrudé	8.0	mm
	Epaisseur nominale Diamètre approximatif		31.5	mm

<u>Semi-conducteur sur isolant</u>	Constitution Epaisseur approximative	PRC extrudé	0.4	mm
<u>Bande semi conductrice Hygroscopique</u>	Bande semi conductrice gonflable Epaisseur approximative		0.55	mm
<u>Ecran métallique</u>	Constitution Epaisseur approximative	Deux rubans imbriqués	0.1	mm
<u>Bande Hygroscopique</u>	Bande gonflable Epaisseur approximative		0.23	mm
<u>Gaine extérieure</u>	Constitution Epaisseur nominale	PVC	2.7	mm
N.B : Valeurs nominales : Valeurs garanties et contrôlables Valeurs approximatives : Valeurs données à titre indicatif et non contrôlables.		Diamètre approximatif : $\cong 39.9 \text{ mm}$ Poids total approximatif : $\cong 1597 \text{ kg/km}$ <u>Rayon de courbure minimum</u> Câble après pose : 399 mm Câble en cours de pose : 798 mm		

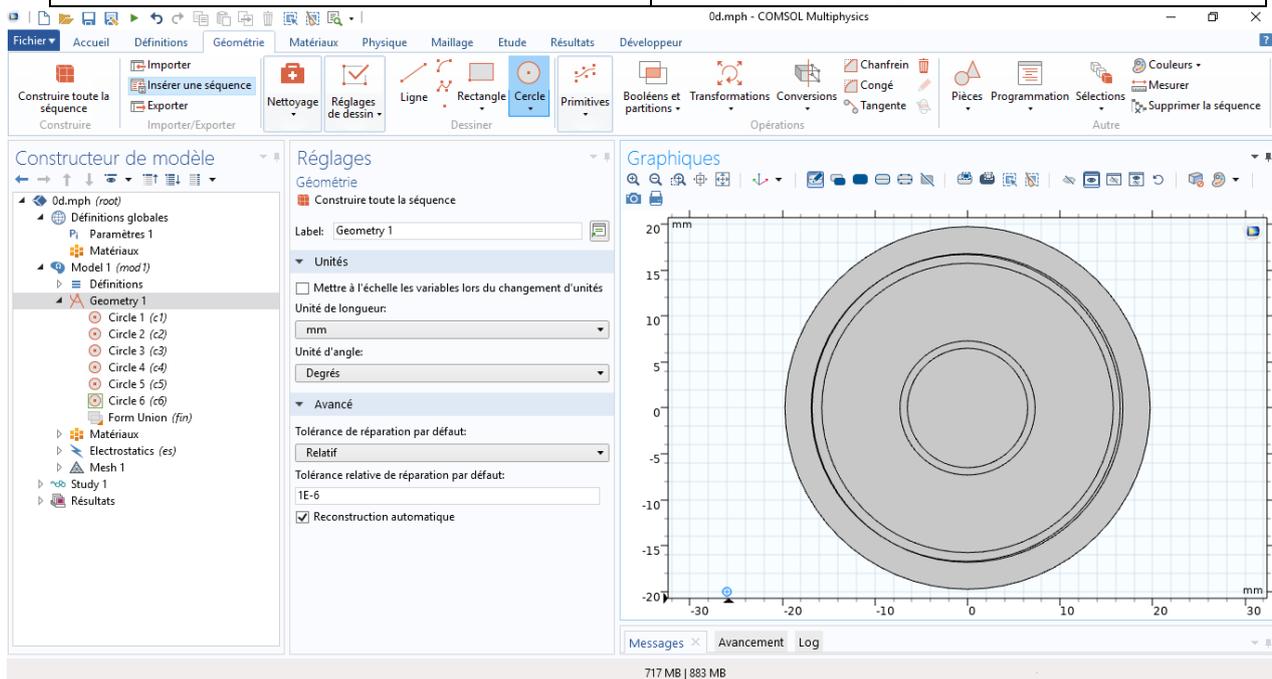


Figure II. 5: Géométrie du modèle

b) introduction des matériaux

Le but ici est de définir les matériaux utilisés de notre câble qui définissent le domaine : permittivité relative, la conductivité électrique, ...etc. Les paramètres sont évidemment liés à

notre modèle physique étudié, les paramètres de notre modèle sont ceux donnés dans le tableau II.1.

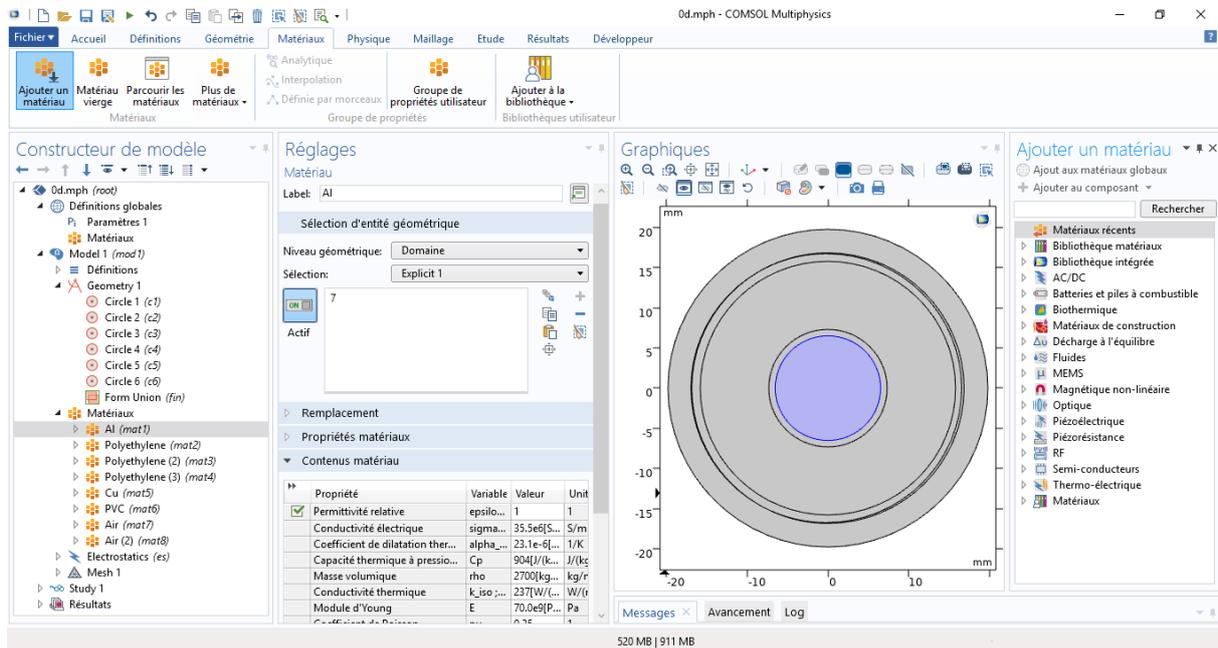


Figure II. 6: Choix de matériaux par domaine

c) Introduction des propriétés des domaines

Pour résoudre les équations aux dérivées partielles (EDP), il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes. A chaque frontière de domaine est associé un segment orienté. Il est possible de donner des valeurs de conditions aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système [26].

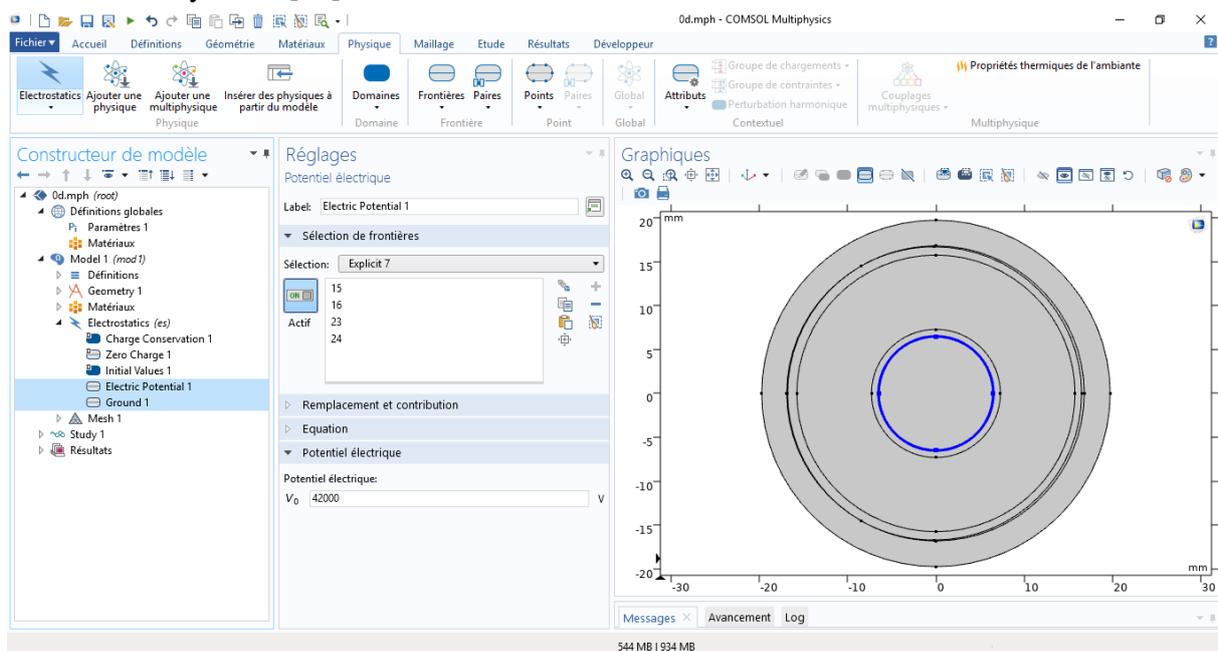


Figure II. 7: Fixation des conditions aux limites

d) Maillage des domaines

Un maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules élémentaires. Le maillage des domaines est automatique, Il est possible de le raffiner globalement ou de manière localisée [27].

Le logiciel COMSOL Multiphysics utilise le maillage triangulaire.

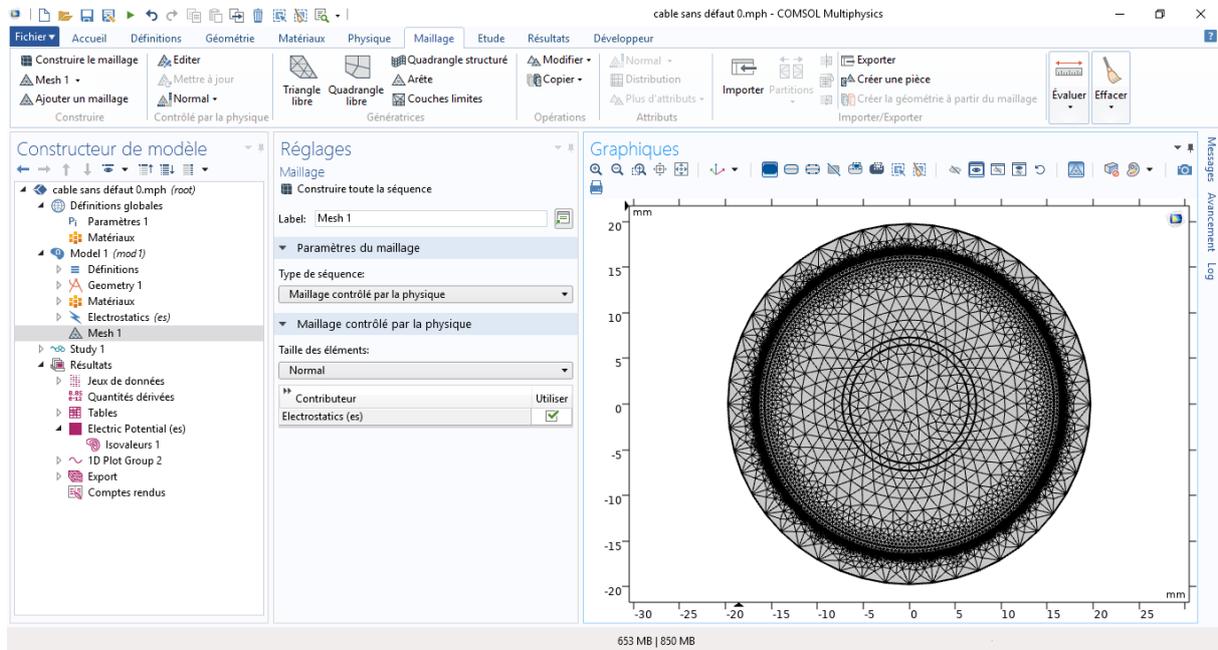


Figure II. 8: Maillage de la géométrie étudiée

e) Résolution du problème

Lorsque le problème est complètement défini, il ne reste plus qu'à le résoudre. Il est possible d'accéder à des menus pour modifier la résolution. De même, lors de la résolution d'un problème multi-physique, il est possible de ne résoudre que pour une certaine partie des variables [27].

f) Analyse des résultats

Lorsque le programme a convergé vers une solution, il bascule automatiquement vers la fenêtre de post traitement, qui permet d'analyser les résultats. Il est possible de les visualiser sous forme de remplissage de couleur, de lignes équipotentiels, de champ de flèches, ...etc [20].

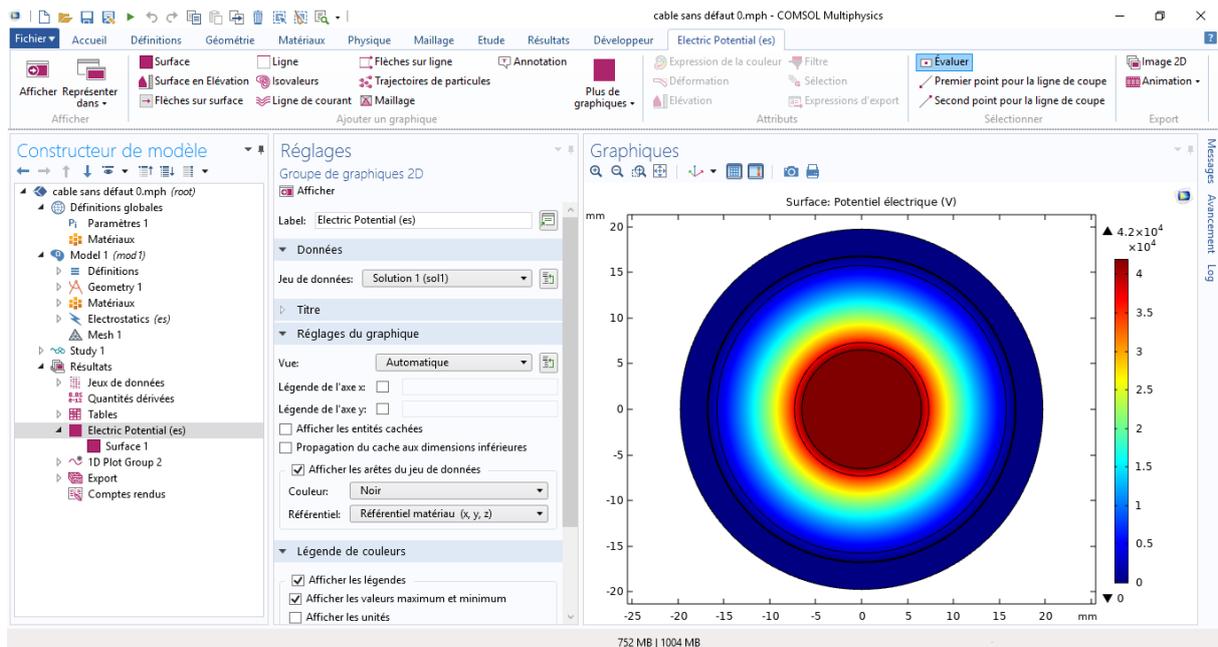


Figure II. 9: Distribution du potentiel électrique dans le câble étudié

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes numériques utilisées dans la résolution des problèmes aux dérivées partielles. Par rapport aux autres méthodes, la méthode des éléments finis semble plus efficace. Elle est facilement adaptable à différentes géométries et prend également en compte les propriétés non uniformes et non linéaires du matériau, bien sûr, après avoir précisé certaines données telles que le domaine, les conditions aux limites et le maillage de la géométrie.

Le logiciel COMSOL Multiphysics fournit des solutions puissantes et interactives basées sur la MEF. Nous avons exploité ce logiciel pour réaliser notre projet qui consiste à étudier l'influence des contaminants sur la distribution du champ électrique dans un câble souterrain moyenne tension 18/30 kV.

Dans le dernier chapitre qui suit, nous présenterons et interpréterons nos résultats de simulation obtenus.

Chapitre III :

Résultats et interprétations

III.1. Introduction

Afin de mieux comprendre l'influence des défauts sur le phénomène de décharges partielles dans l'isolation des câbles souterrains, nous allons étudier la distribution du champ électrique, notamment la valeur maximale, dans le cas d'un câble sain et des câbles avec défauts. Un certain nombre de paramètres influençant la distribution du champ électrique va être aussi étudiée numériquement. Un défaut est caractérisé par sa taille, sa position, sa forme géométrique, son orientation par rapport aux lignes de champ ainsi que le matériau qui le constitue.

III.2. Validation du modèle numérique

Avant d'entamer notre étude numérique, nous avons vérifié la validité de notre modèle par les équations analytiques du potentiel et du champ électrique entre les électrodes dans une géométrie coaxiale en absence de défauts afin d'estimer l'écart maximal entre les deux méthodes de calcul. Le logiciel Matlab est utilisé pour calculer le potentiel et le champ électrique entre les électrodes avec la méthode analytique et nous avons utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour le calcul numérique. Les deux figure (III.1) (III.2) illustrent les allures du potentiel et du champ électrique entre les électrodes.

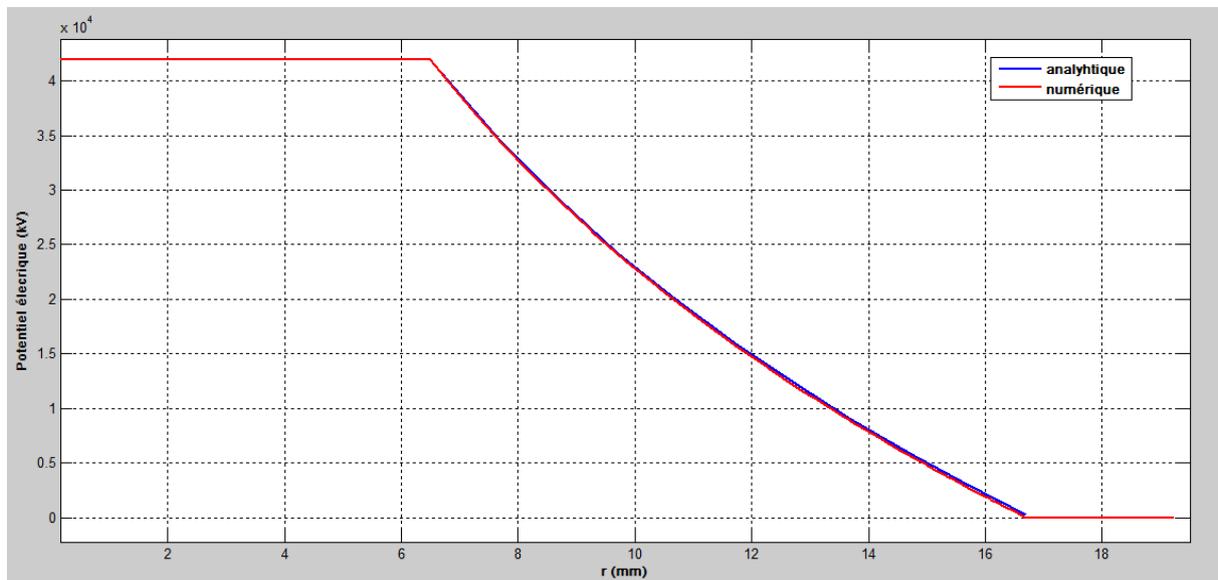


Figure III. 1: Comparaison entre les valeurs analytiques et les résultats numériques du potentiel électrique dans l'isolation sans défauts

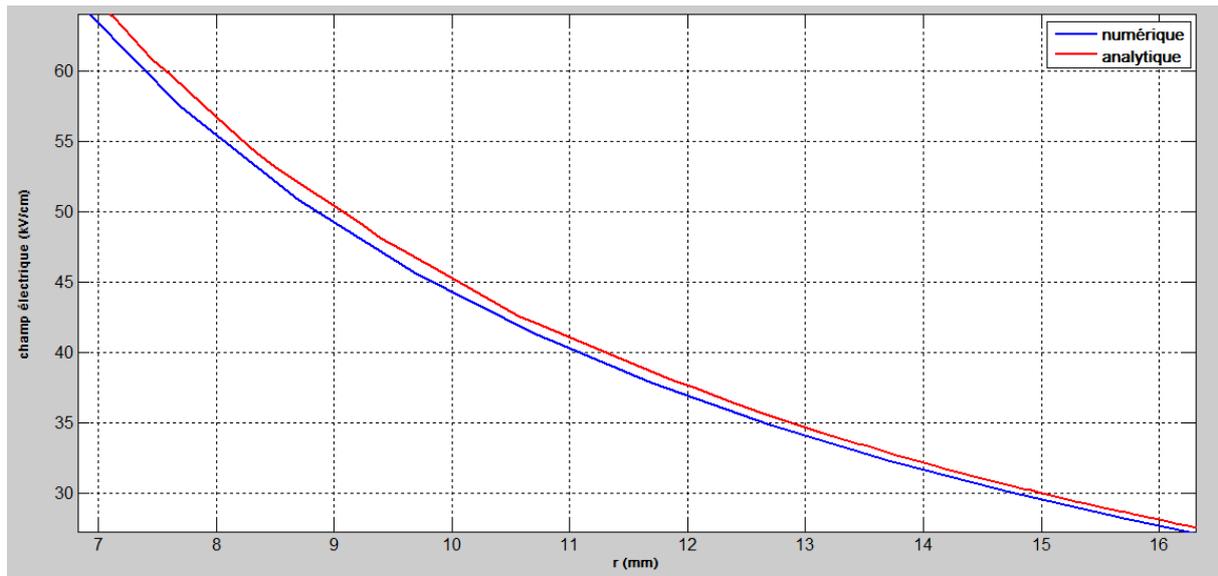


Figure III. 2: Comparaison entre les valeurs analytiques et les résultats numériques du champ électrique dans l'isolation sans défauts

D'après la figure (III.1), nous remarquons bien que les deux courbes sont pratiquement l'une sur l'autre et l'écart maximal est estimé à 3.04 %. Cet écart devient un peu plus important dans le cas de la distribution du champ électrique (Figure III.2) et il est de 2.79 %.

Dans les deux cas, les valeurs de l'écart maximal restent très acceptables pour pouvoir dire que le modèle numérique élaboré avec le logiciel Comsol est bon pour estimer le potentiel et le champ électriques entre les électrodes de la géométrie étudiée.

III.3. Effet de la présence des défauts dans l'isolation

III.3.1. Cas d'une cavité d'air

Dans ce cas (cas hétérogène), on considère que le câble contient une seule cavité d'air de diamètre 40 μm placée sur l'axe des abscisses à 13mm du centre de l'âme conductrice.

a. Variation du potentiel électrique

La figure (III.3) représente la distribution du potentiel électrique ainsi les lignes équipotentielles dans le cas sans défaut (sain) et avec la présence de défaut.

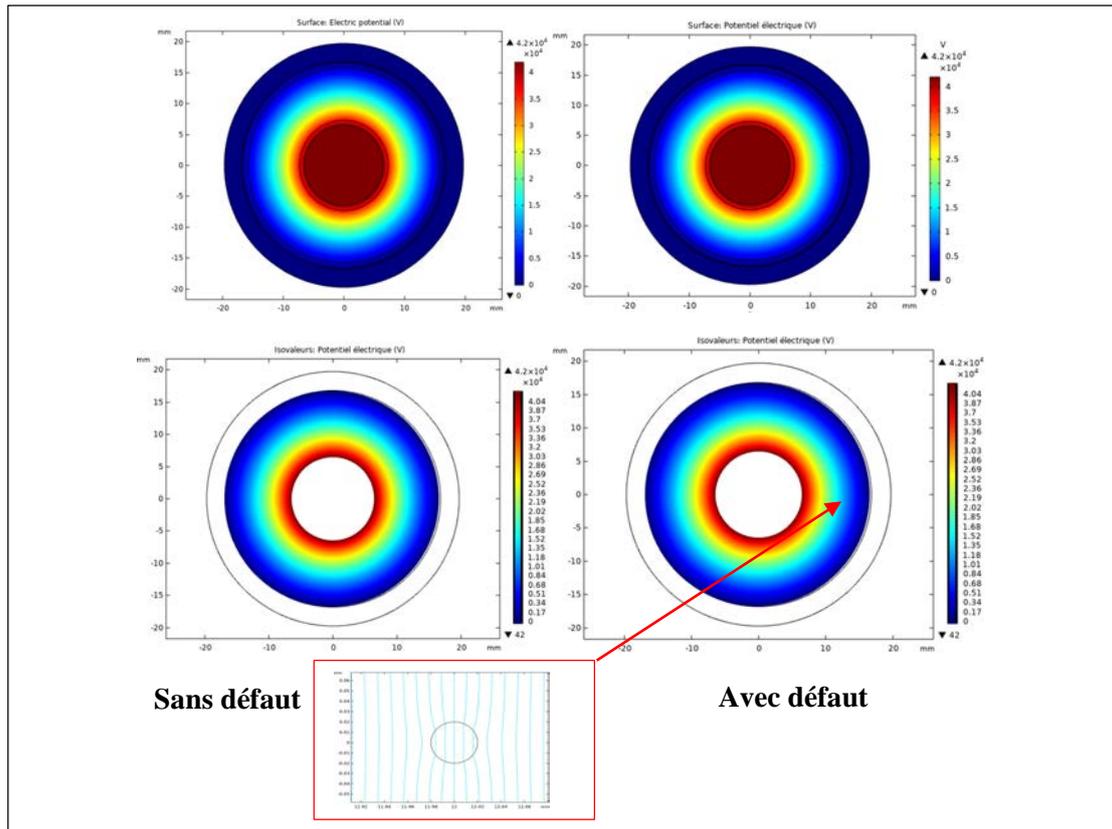


Figure III. 3: Distribution du potentiel électrique dans le cas sans défaut et avec défaut

La figure (III.3) montre bien que les lignes équipotentielles sont des cercles concentriques dans le cas d'un câble sain. L'existence d'une cavité d'air dans l'isolation cause une légère déviation des lignes équipotentielles aux alentours du défaut.

La figure ci-après illustre la variation du potentiel en fonction de la coordonnée radiale r .

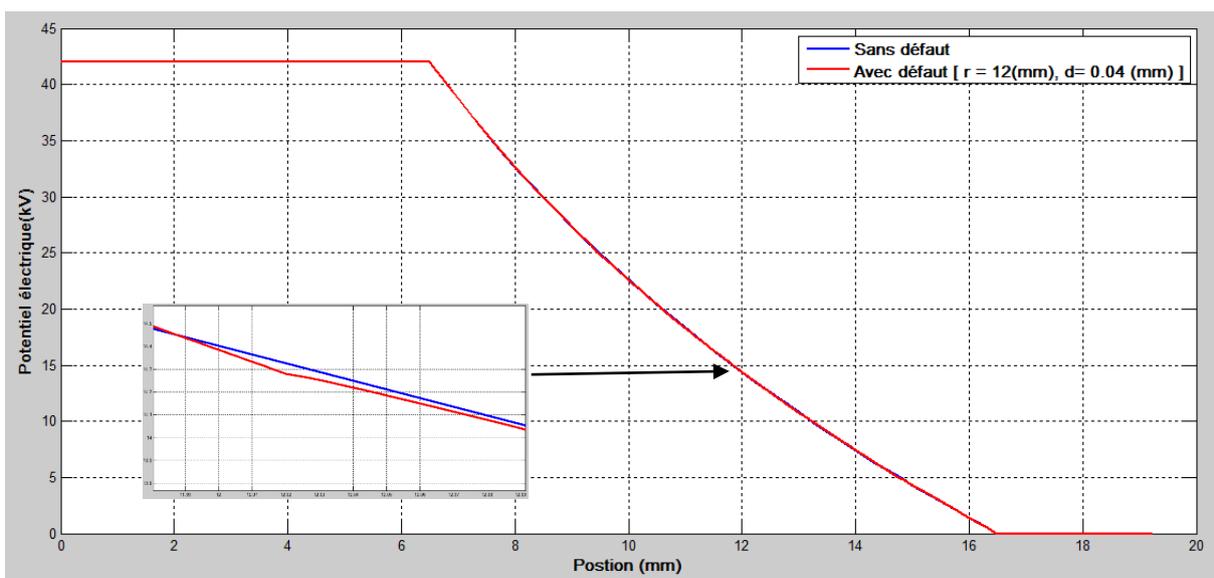


Figure III. 4: Variation du potentiel électrique dans le cas sans défaut et avec défaut

D'après cette figure, le potentiel électrique est maximum à la surface de l'âme (42 kV) et décroît d'une manière logarithmique pour atteindre zéro à la surface de l'écran métallique. La présence d'une cavité d'air dans l'isolation engendre une faible diminution du potentiel électrique dans la zone du défaut.

En comparant les résultats relatifs au potentiel dans l'isolation avec et sans cavité, nous constatons que la modification de ce dernier est insignifiante. C'est pour cette raison que nous allons nous concentrer dans la suite du travail sur la distribution du champ électrique seulement.

b. Allure du champ électrique

La figure (II.5) représente la variation du champ électrique dans le câble en présence d'une cavité remplie d'air ($d = 40 \mu\text{m}$) au point M de coordonnées polaires ($r = 12 \text{ mm}, \theta = 0 \text{ mm}$).

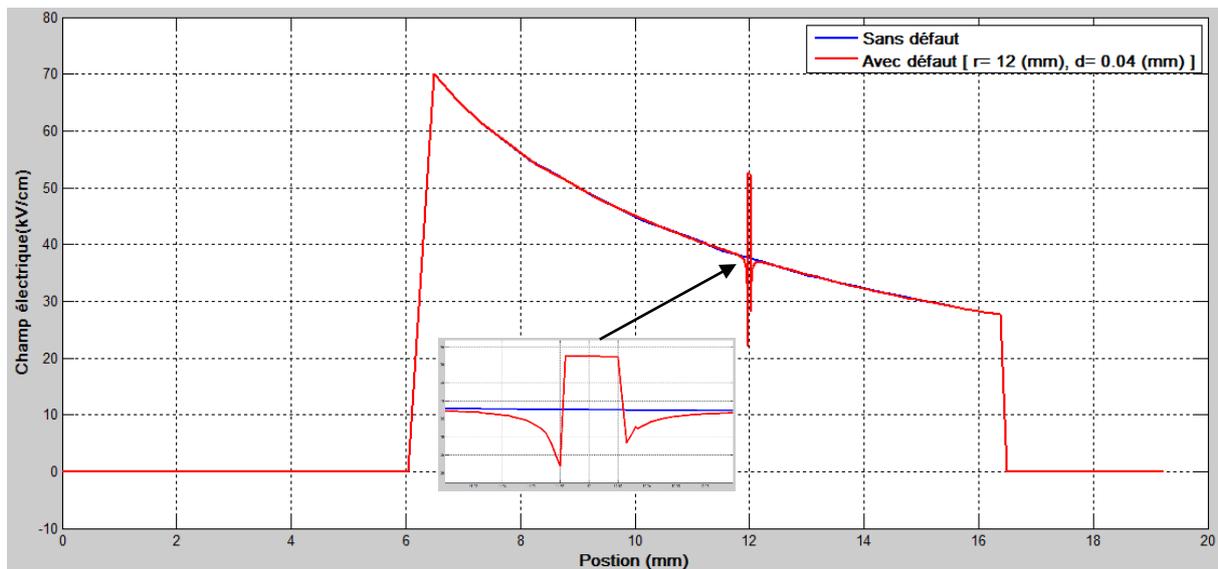


Figure III. 5: Distribution radiale du champ électrique dans les cas avec et sans défaut

En absence de défauts, le champ électrique dans l'isolation décroît en fonction de la coordonnée radiale conformément à l'équation (II-7). En effet, le champ décroît à partir de sa valeur maximale de 52.54 kV/cm à la surface de l'électrode active pour atteindre sa valeur minimale de 22.02 kV/cm à la surface de l'électrode mise à la terre.

La présence de la cavité remplie d'air dont la permittivité relative $\epsilon_r = 1$ modifie la répartition du champ électrique entre les électrodes. Le champ électrique E_c à l'intérieur de la cavité est plus important que celui du PRC dont la permittivité relative $\epsilon_r = 2,3$, noté E_p . Le rapport des deux champs devrait être égal à 2,3. Or les résultats des calculs montrent que ce rapport est égal

à 28.31 %. En effet à la surface de la cavité apparaissent des charges de polarisation qui créent à l'intérieur de la cavité gazeuse un champ de dépolérisation E_d diminuant ainsi la valeur du champ E_c .

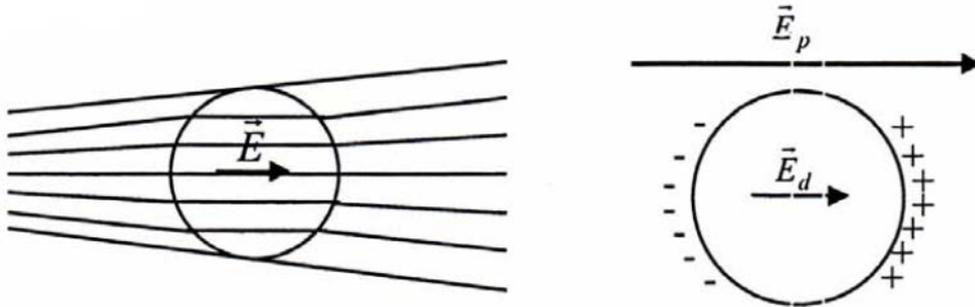


Figure III. 6: Polarisation et lignes de champ électrique en présence d'une cavité

La valeur de $\vec{E}_d = \vec{E}_p - \vec{E}_c$ est de 14.75 kV/cm. Les charges de polarisation influent au-delà de la cavité, diminuant ainsi le champ électrique \vec{E}_p dans la zone du PRC adjacente à la cavité d'une valeur $\vec{E}_p^* = \vec{E}_p - \vec{E}_c^\pm$, où \vec{E}_c^\pm est le champ créé dans le PRC par les charges positives ou négative au-delà de la cavité. Le champ \vec{E}_p^* augmente chaque fois que l'on s'éloigne de la cavité en raison de la diminution de \vec{E}_c^\pm , jusqu'à atteindre la valeur de \vec{E}_p . Les résultats de calcul montrent que l'influence de \vec{E}_c^\pm est limitée à une zone, appelée : zone d'influence. La portée totale de cette zone est égale approximativement à une distance totale de trois fois la dimension de la cavité.

III.3.1.1. Effet de la position de la cavité d'air

Afin de mettre en évidence l'effet de la position de la cavité d'air sur l'allure du champ, nous avons exécuté notre programme avec diverses positions ($r=10, 12, 14 \text{ mm}$, $\theta=0$) de la cavité de 40 μm de diamètre. Les résultats obtenus sont rassemblés dans la figure (III.7)

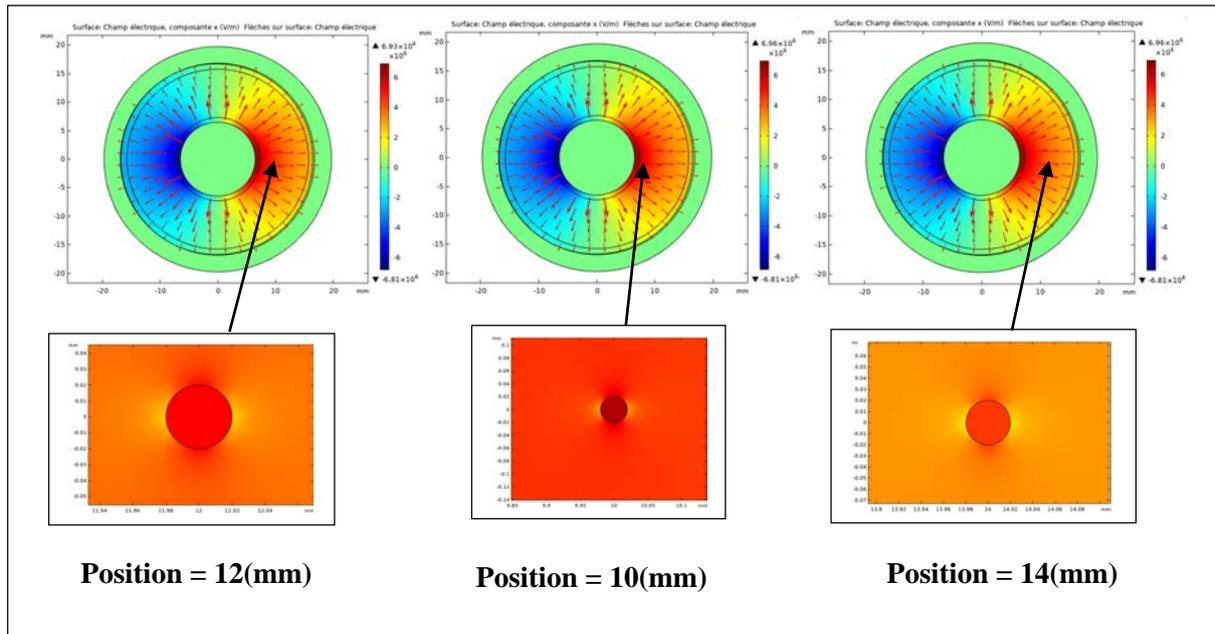


Figure III. 7: Distribution radiale et orientation des lignes du champ électrique pour une cavité de différentes positions

D’après cette figure, le champ dans la cavité dépend de sa position par rapport à l’âme conductrice. Plus la cavité est proche de l’âme, plus le champ à son centre est élevé.

La figure ci-après représente le champ électrique au centre de la cavité de 40 μm de diamètre en fonction de sa position dans l’isolation du câble.

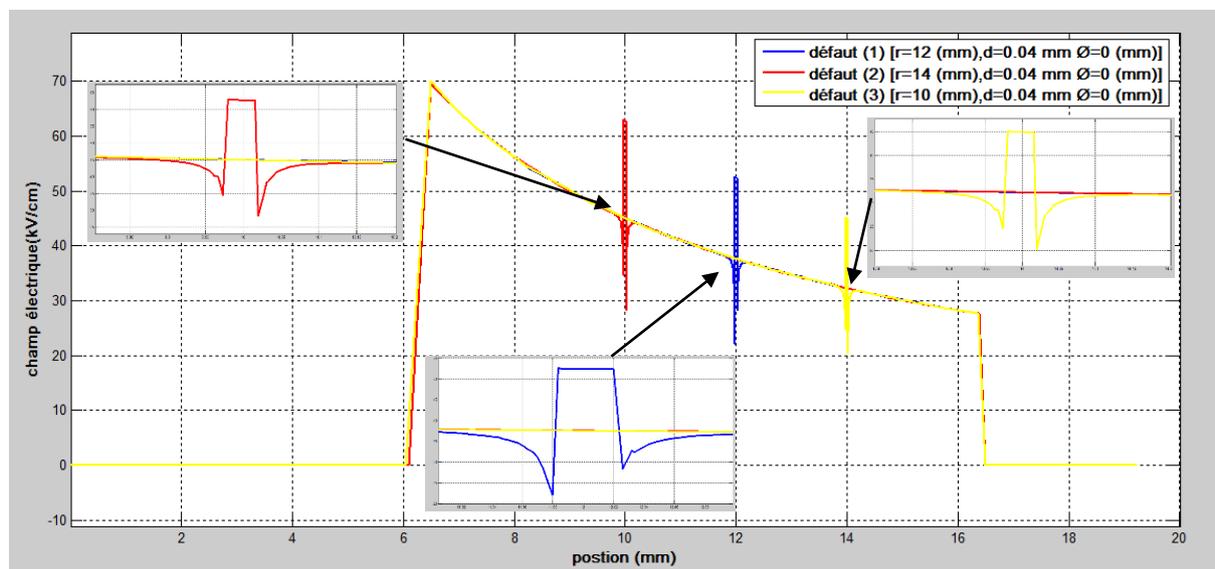


Figure III. 8: Variation du champ électrique au centre de la cavité en fonction de sa position

La figure (III.8) montre bien que le champ électrique au centre de la cavité diminue hyperboliquement en fonction de la position de la cavité d’air.

III.3.1.2. Effet de la taille de la cavité d'air

Dans cette partie nous s'intéressons à l'influence de la taille de la cavité sur la valeur maximale du champ électrique dans la cavité. La distribution de champ électrique dans des cavités de différentes tailles (40, 80 et 120 μm) est calculée pour une seule position de (12 mm).

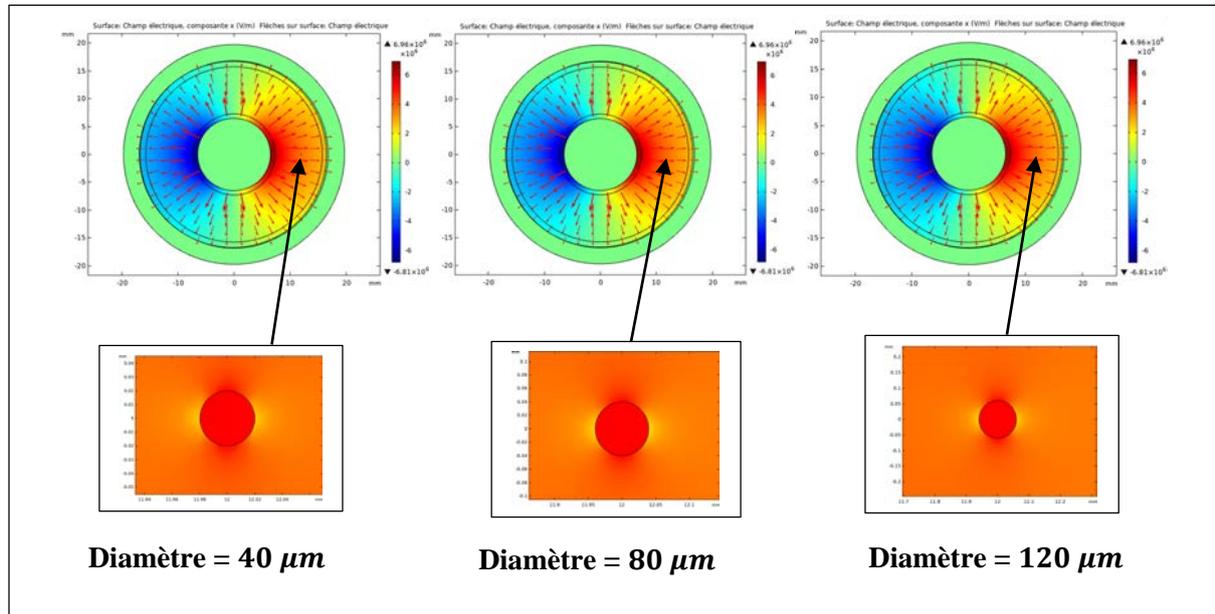


Figure III. 9: Distribution radiale et orientation des lignes du champ électrique pour une cavité de différentes tailles

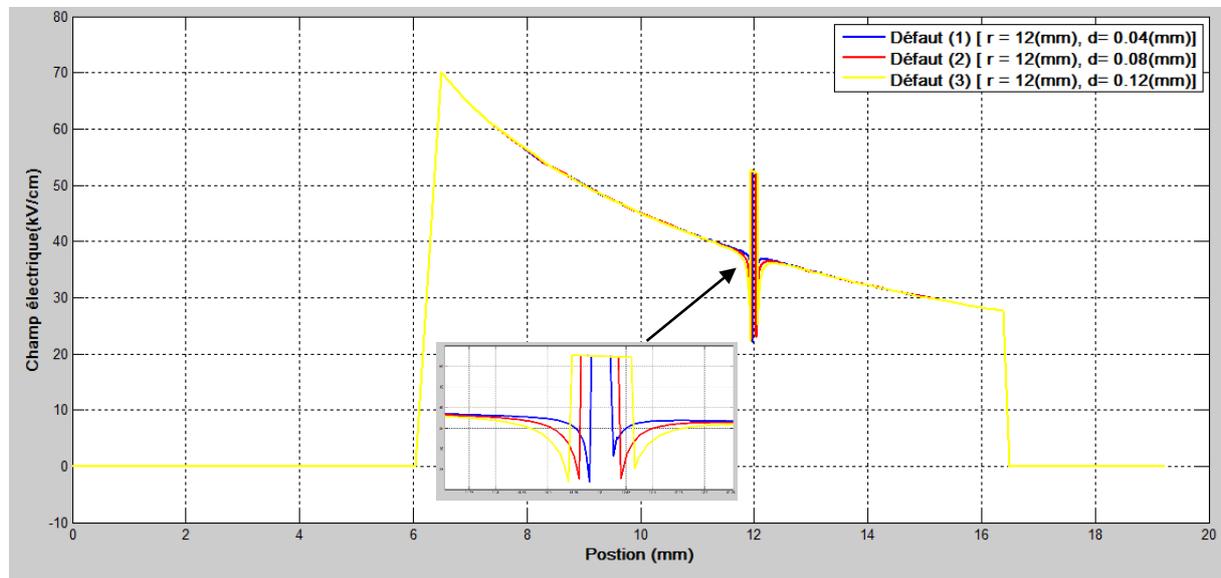


Figure III. 10: Variation du champ électrique au centre de la cavité en fonction de sa taille

Les résultats, présentés dans la figure III.10, montrent que la taille des défauts n'a aucune influence sur la valeur du champ électrique. Toutefois, la région où le champ est renforcé, augmente en fonction de la taille ; cette région a comme dimension environ la taille du défaut.

Malgré que la valeur maximale du champ électrique dans un défaut soit indépendante de la taille du défaut, on dit que les décharges partielles apparaissent plus dans les défauts de grandes tailles. Cependant, on peut conclure que plus la taille du défaut est grande plus sa dangerosité est importante, et par conséquent les décharges partielles apparaissent à des niveaux de tension plus bas. Dans le cas de défauts de grandes tailles, les électrons acquièrent plus d'énergie car leurs libres parcours moyens sont relativement grands.

Afin de définir la nocivité de la cavité gazeuse dans l'isolation en fonction de sa taille qui se traduit par l'apparition des décharges partielles, l'approche empirique de Paschen peut être utilisée pour déterminer le champ disruptif du gaz occlus dans la cavité [28]. :

$$E_d = k \cdot P^{0.7} \cdot d^{-0.3} \dots\dots\dots(III.1)$$

Où P est la pression exprimée en torr du gaz emprisonné dans la cavité de diamètre d , k est une constante. Pour l'air $k=8 \cdot 10^{-3}$.

Bien que ; dans le cas d'une vacuole gazeuse ; les décharges se produisent entre deux surfaces isolantes, la loi de Paschen est vérifiée [29]. On dit qu'il y a apparition de décharges partielles quand le champ électrique dans la cavité est supérieur à celui déterminé par la loi de Paschen.

Sur la figure III.11, on trace les valeurs du champ électrique au centre de la cavité en fonction de sa position dans l'isolation et les champs disruptifs en fonction de la taille du défaut en supposant que le gaz emprisonné dans la cavité lors du processus de fabrication du câble est de l'air à la pression atmosphérique.

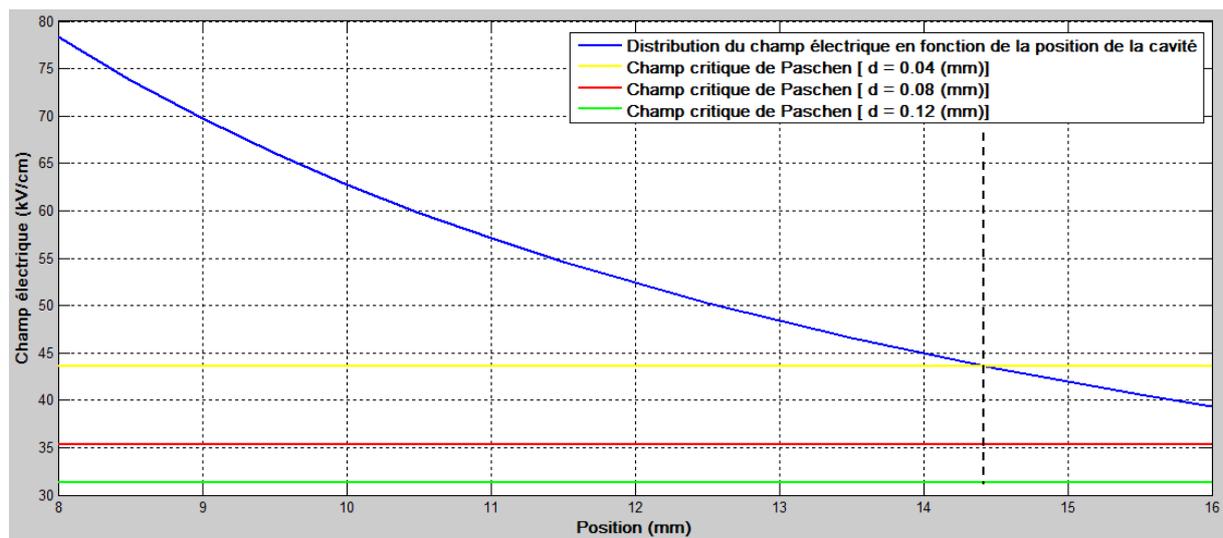


Figure III. 11: Nocivité des cavités en fonction de la position par comparaison avec le champ critique de Paschen E_d

Les résultats, présentés dans la figure III.11, montrent que la cavité ($d = 0.04 \text{ (mm)}$) est nocive d'une position inférieure à 14.45 (mm) par rapport à l'âme centrale. L'extrapolation de nos résultats montre que pour les deux cavités d'un diamètre (0.08 (mm) et 0.12 (mm)), il y a toujours apparition de décharge partielles quelle que soit la position de ces deux cavités.

III.3.1.3. Effet de la forme de la cavité d'air

Pour étudier l'influence de la forme de la cavité sur la répartition du champ électrique entre les électrodes ; nous avons limité notre étude à l'introduction des formes qui peuvent exister réellement dans le volume de l'isolant. Pour cette raison, nous avons optés pour la forme sphérique et les formes elliptiques verticale et horizontale pour la même position par rapport à l'âme (12 mm). Les résultats obtenus sont donnés sur la figure (III.12).

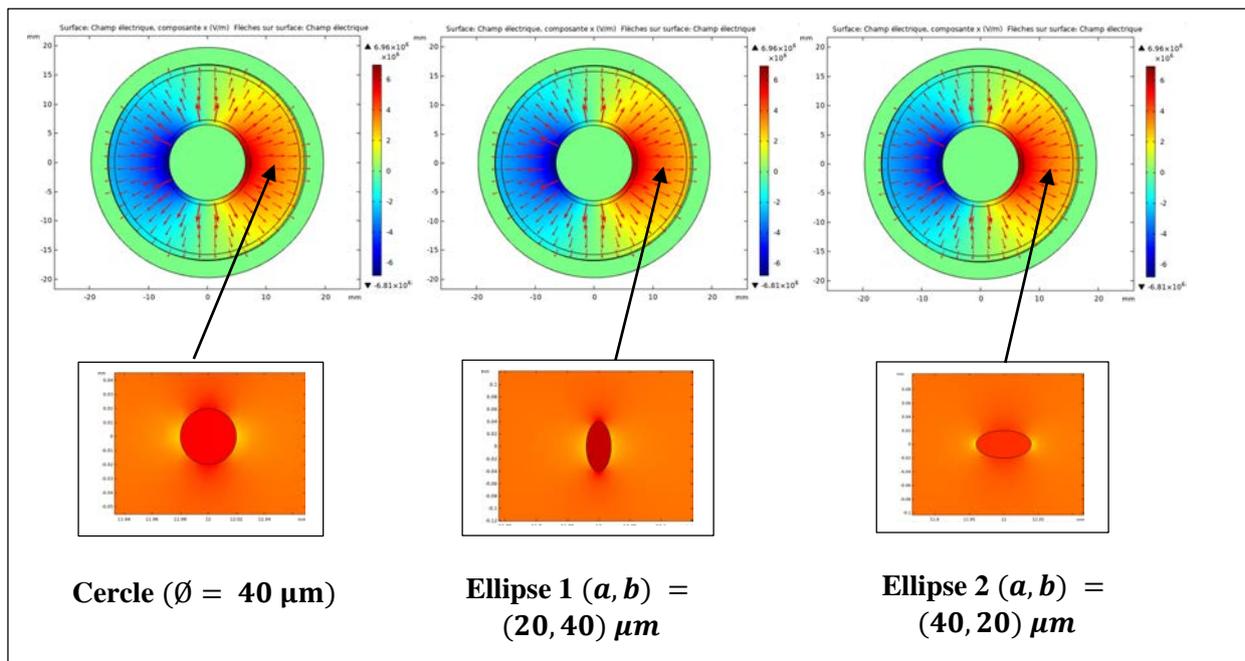


Figure III. 12: Distribution radiale et orientation des lignes du champ électrique pour une cavité de différentes formes

Les résultats de la figure III.12 montrent bien que pour les formes choisies, la présence d'une cavité elliptique dans le sens transversal du champ électrique (ellipse verticale) représente le cas le plus nocif.

a : Demi- axe horizontal

b : Demi- axe vertical

La figure III.13 représente le champ électrique au centre de la cavité de $40 \mu\text{m}$ de diamètre en fonction de sa forme dans l'isolation du câble.

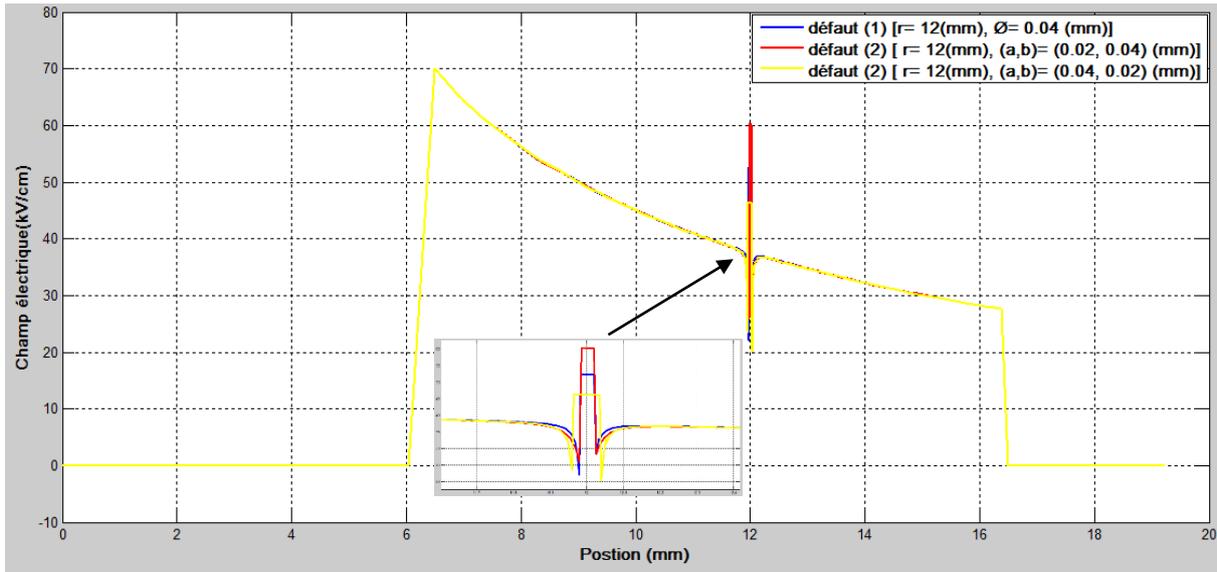


Figure III. 10: Variation du champ électrique au centre de la cavité en fonction de sa forme.

Les résultats de simulation de la figure III.13 montrent que le champ électrique augmente de 13.18% par rapport au cas de câble qui contient une cavité sphérique. Il est à signaler aussi que le défaut elliptique dans le sens du champ électrique (ellipse horizontale) est le moins dangereux des trois cas étudiés.

III.3.2. Cas d’un contaminant diélectrique solide

Dans cette partie, nous allons étudier l’influence d’un contaminant diélectrique solide sur la répartition du champ électrique entre les électrodes du câble. Pour ce faire, nous avons choisi deux matériaux à savoir le nylon et la silicone. Les résultats obtenus sont comparés avec le câble contenant une vacuole d’air de même diamètre et de même position.

Les simulations sont effectuées pour des défauts de diamètre ($\varnothing = 40 \mu m$) et une position ($\theta = 0, r = 12 mm$). Les permittivités relatives des matériaux choisis sont données dans le tableau ci-après.

Tableau III. 1 : Permittivités relatives des matériaux utilisés

Matériaux utilisé	Permittivité relative
Air	1
Nylon	4
Silicone	11.7

D’après les figures III.14 et III.15 ci-après, nous remarquons que contrairement au défaut d’air, pour les diélectriques solides on enregistre une diminution du champ électrique au niveau du défaut. Ce résultat nous permet de conclure que les défauts diélectriques solides de permittivité

relative supérieure à celle du PRC ($\epsilon_r = 2,3$) constituent un renforcement de l'isolation du câble.

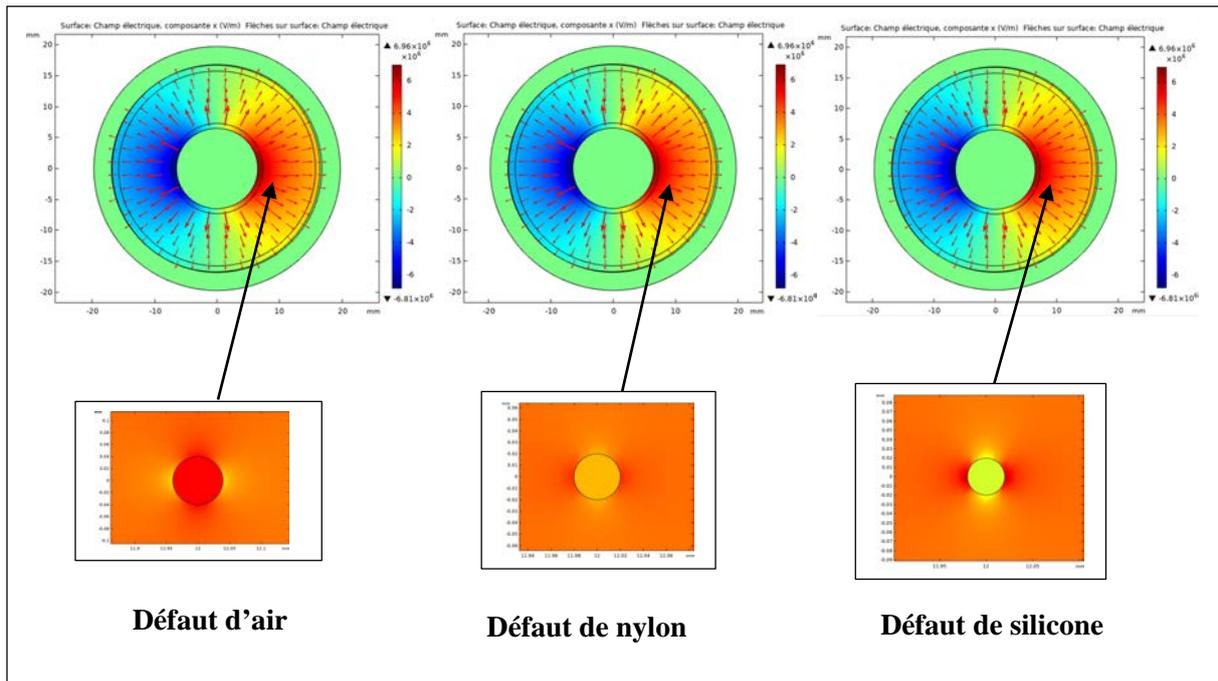


Figure III. 14: Distribution radiale et les flèches du champ électrique pour des défauts de différentes permittivités relatives

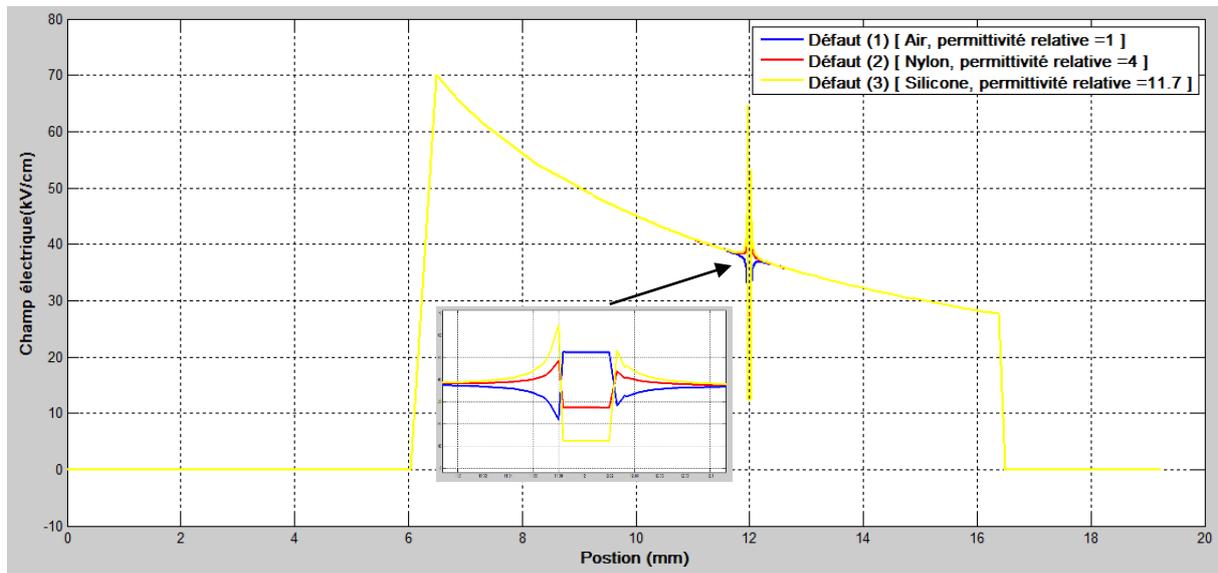


Figure III. 11: Variation du champ électrique au centre de la cavité pour des différentes permittivités relatives

III.3.3. Cas d'un contaminant conducteur solide

Dans partie du travail, nous nous intéressons à l'étude de l'influence d'un contaminant conducteur sphérique sur la répartition du champ dans l'isolation du câble. Nous avons choisi dans cette partie aussi deux matériaux conducteurs (le cuivre et le plomb) et les résultats obtenus sont comparés au cas d'une vacuole d'air de même diamètre et de même position. Les

caractéristiques géométriques utilisées dans la simulation sont : diamètre ($\varnothing = 40 \mu\text{m}$) et position ($\theta = 0, r = 12 \text{ mm}$). Les conductivités électriques des matériaux utilisés sont données dans le tableau III.2.

Tableau III. 2 : Conductivités électriques des matériaux utilisés

Matériaux utilise	Valeur [S/m]
Air	0
Plomb [Pb]	4.84×10^6
Cuivre [Cu]	58.1×10^6

Les résultats obtenus sont résumés dans la figure III.16.

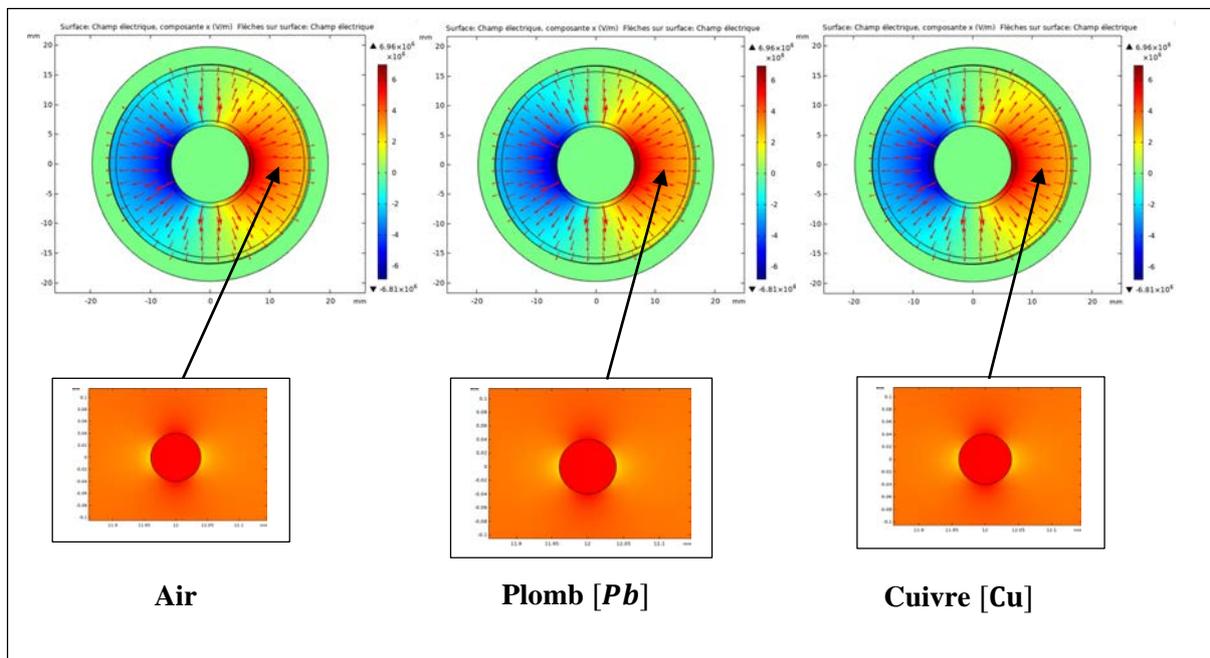


Figure III. 16: Distribution radiale et les flèches du champ électrique pour des défauts de de différentes conductivités électriques

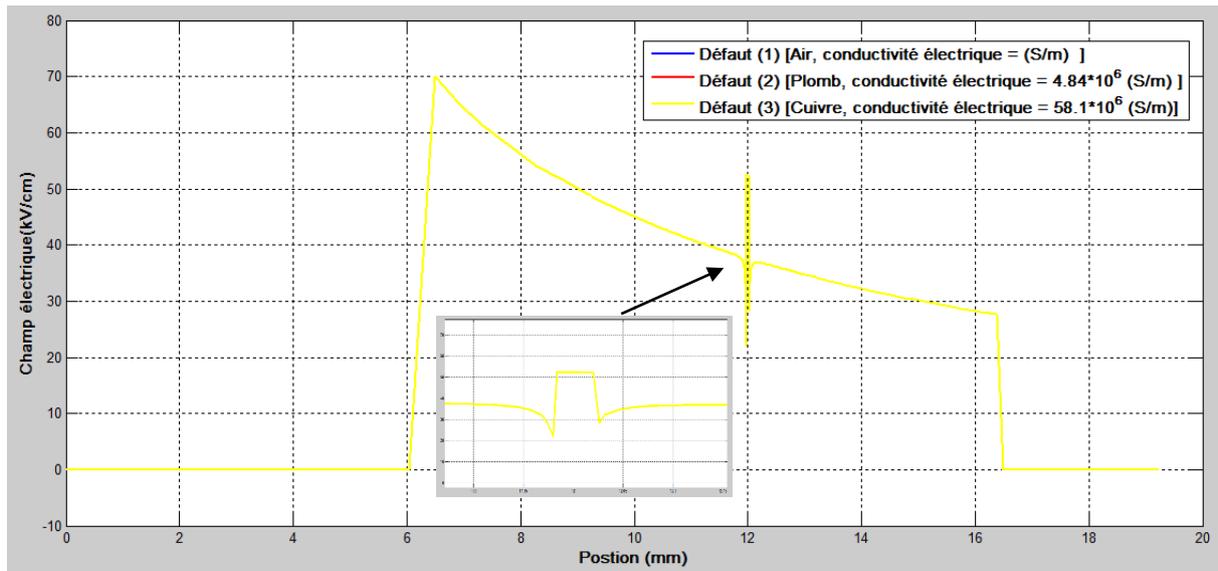
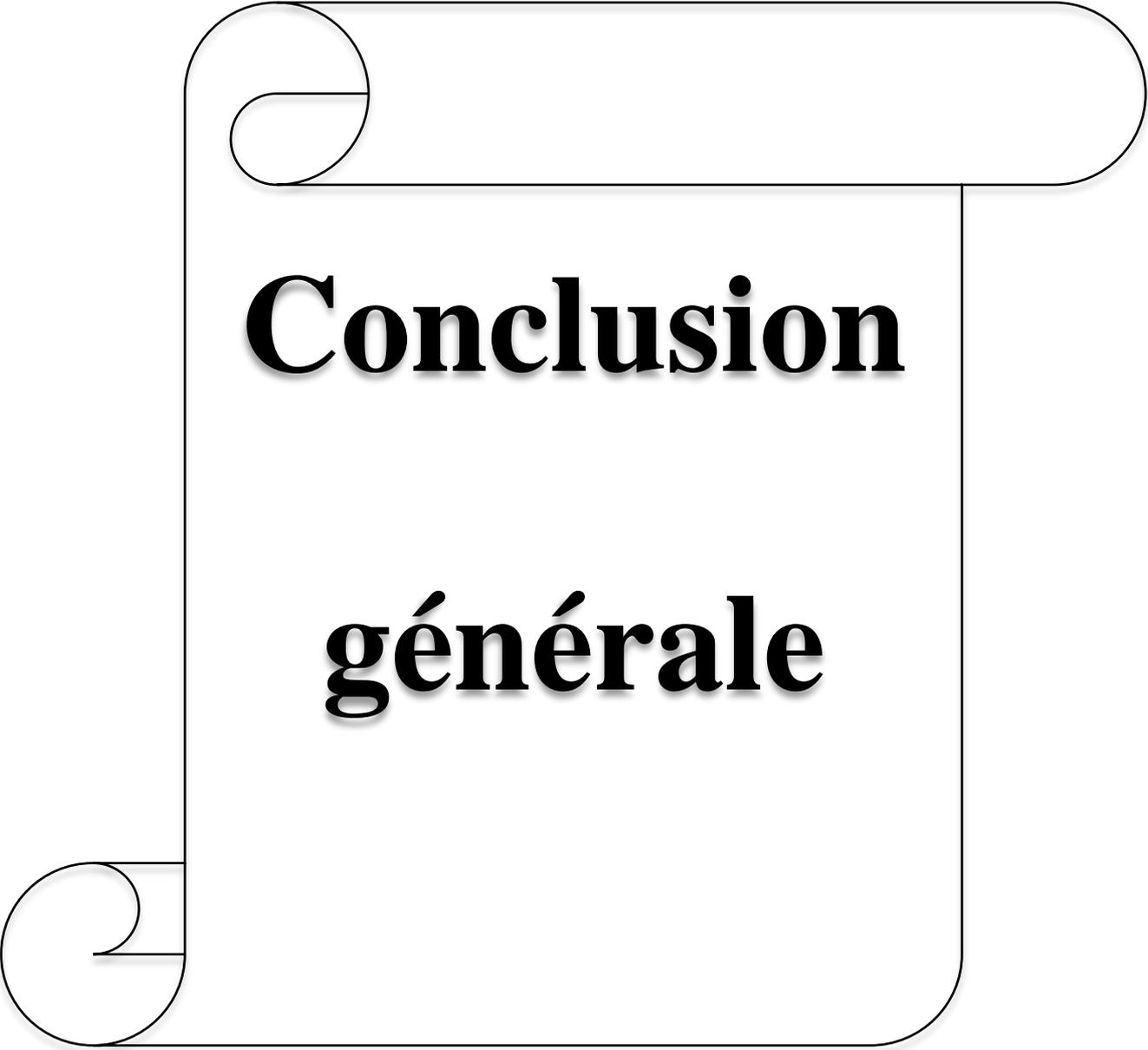


Figure III. 17: Variation du champ électrique pour des défauts de de différentes conductivités électriques

D'après la figure (III.16 et III.17) nous remarquons que les trois courbes sont superposées donc la conductivité électrique n'as pas d'influence sur la distribution de champ électrique.

III.4. Conclusion

Les décharges partielles qui peuvent se produire dans les défauts contenus dans les isolations des câbles de transport d'énergie électrique dépendent de plusieurs facteurs. Dans ce chapitre, l'influence de la position, de la taille, de la forme et de la nature du matériau constituant le défaut sur la distribution du champ électrique est étudié.

A decorative scroll border with a black outline and a light gray drop shadow. The scroll is unrolled at the top and bottom, with the ends curling inward. The text is centered within the scroll's frame.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce manuscrit consiste à étudier l'effet des microcavités sur la distribution du champ électrique entre les électrodes d'un câble souterrain monophasé 18/30 kV isolé avec XLPE.

Nous nous sommes intéressés dans le présent travail aux calculs des contraintes électriques sur les microcavités par la résolution numérique de l'équation de Laplace en utilisant la méthode des élément finis sous l'environnement de COMSOL Multiphysics.

Après création du modèle bidimensionnel du câble électrique sans et avec défaut, nous avons étudié l'effet de : la position du défaut, sa taille, sa forme et de sa nature sur la distribution du champ électrique dans l'isolation du câble.

A partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure :

1. Les résultats numériques obtenus sont très proches de ceux du calcul avec des équations analytiques du potentiel et du champ électrique entre les électrodes.
2. Les lignes équipotentiels sont des cercles concentriques dans le cas d'un câble sain. La présence d'un défaut dans l'isolation cause une légère déviation des lignes équipotentiels aux alentours du défaut.
3. En absence de défauts, le champ électrique dans l'isolation décroît en fonction de la coordonnée radiale et il est indépendant de la coordonnée angulaire.
4. La présence de la cavité remplie d'air modifie la répartition du champ électrique entre les électrodes sur zone appelée zone d'influence. Cette dernière s'étale sur une distance égale approximativement à trois fois le diamètre de la cavité.
5. Le champ électrique au centre de la cavité diminue hyperboliquement en fonction de sa position par rapport à l'âme.
6. La taille du défaut n'a aucune influence sur la valeur du champ électrique au centre de la cavité.
7. D'après l'approche de Paschen, le champ disruptif du gaz emprisonné dans une cavité diminue avec la taille du défaut. Ce qui nous permet de dire les décharges partielles apparaissent plus dans les défauts de grandes tailles.

8. La forme du défaut influe significativement sur la valeur du champ à son centre. Le défaut le plus dangereux est le défaut elliptique vertical, puis le défaut sphérique et enfin défaut elliptique horizontal.
9. Dans le cas d'un défaut diélectrique solide, quand la permittivité relative du défaut est supérieure à celle du PRC (2.3), on enregistre une diminution du champ dans la zone du défaut. Dans ce cas on parle d'un renforcement de l'isolation.
10. Dans le cas d'un défaut conducteur solide, la conductivité du défaut n'a aucune influence sur la distribution du champ électrique. Pour n'importe quelle conductivité, le défaut est semblable à une cavité d'air.

Biographique

- [1] Pierre Lebas, « diagnostic des câbles souterrains. », thèse de magister, Faculté des Sciences Appliquées Université de Liège, Pays Belgique, 2008.
- [2] Haddad Lyazid et Hami Khodir, « Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées. », mémoire de Master en Electrotechnique, Université de Bejaia, 2015.
- [3] Zellagui Mouhemed, « Etude des protections des Réseaux électrique MT (30 et 10 KV). », mémoire de magister en électrotechnique, Université Constantine 2010.
- [4] Meziant Rachida et Sahli Siham « Calcul du champ électromagnétique généré par les électriques en vue de la compatibilité électromagnétique. », Mémoire de master en électrotechnique, Université de Bejaia, 2017.
- [5] Nassif Berrabah « Problèmes inverses pour le diagnostic de câbles électriques à partir de mesures de réflectométrie. », thèse de doctorat, Faculté Traitement du Signal et Télécommunications, Université Rennes 1, Pays France, 2017.
- [6] Kherfi Amor et Mimouni Imad « Les défauts dans les câbles électriques souterrains. », Mémoire de master en électrotechnique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [7] Merbet Haroune et Beriala Bilal « Simulation électromagnétiques des câbles électriques souterrains. », Mémoire de master en électrotechnique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019.
- [8] Ferdinand de Lichtervelde, « Les champs électromagnétiques dans les réseaux de distribution », Article gestionnaire du réseau de transport, Bruxelles pays Belgique, 2008.
- [9] Elia Group company « Les champs électromagnétiques et le réseau à haute tension. », Groupe Elia, États Financiers Consolidés, Paris, pays France, 2015
- [10] LEONI Studer AG, « Câbles d'énergie et Accessoires. », cahier technique Décembre 2008.
- [11] Bouguerioune Noredine, « Etude d'une décharge électrique a l'intérieure d'une vacuole dans un câble de haut tension. », Mémoire de magister électrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2005.
- [12] M.D.R. Beasley, « Etude comparative de trois méthodes de calcul automatique du champ électrostatique. », RGE, Tome 88, Vol. 1, pp.7-18, Janvier 1979.
- [13] Site web <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>.
- [14] Hocini Farid, « Association de la commande pour l'étude par éléments finis des phénomènes magnéto-élastiques et vibratoires dans les systèmes électrotechniques. », Thèse de doctorat en électrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2013.

- [15] Hachim seghiri et Abd Rachid akka, « Diagnostic de la fonction isolation de câbles HT isolés par la méthode des éléments finis », mémoire de Master Académique en électrotechnique, Université de M'sila, 2020.
- [16] A. Skopec, J.G. Wankowicz, B. Sikorski, « Electric Field Calculation for an Axially symmetric insulator with Surface Contamination », IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp. 332-339, 1994.
- [17] Sili Elyse, « Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique. », Thèse de doctorat en génie électrique, Université de Toulouse III, Pays France, 2012.
- [18] Aguet Michel et Lanoz Michel, « Haute tension. », Livre Vol. XXII, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Pays Suisse, 1990.
- [19] Site web <https://www.bookdepository.com/Electrical-Cables-for-Power-Signal-TransmissionOswald-I-Gilbertson/9780471359968>.
- [20] Kara Adel, « Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué. », Mémoire Magister en électrotechnique, Université de Sétif, 2013.
- [21] Khelfaoui Abdallah et Bouberma Omar, « Modélisation par méthode des éléments finis des phénomènes de conduction surfacique sur l'isolateur pollues. », Mémoire de master en électrotechnique, Université d'Ouargla, 2014.
- [22] Christophe Volat, « modélisation physique et numérique par la méthode des éléments finis de frontière de la distribution du potentiel et du champ électrique le long d'un isolateur standard de poste 735 kV recouvert de glace. », Mémoire présenté à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ingénierie, Université du Québec, Pays Canada, 2002.
- [23] Mandana Taleb, « Phénomène aux interfaces des isolations mesure et simulation. », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France 2003.
- [24] Ceresoli Davide, Tosatti Erio, Giuseppe Santoro et S. Serra, « Trapping of excitons at chemical defects in polyethylene. », Journal of Chemical Physics, Volume 121, Number 13, 2004.
- [25] Entreprise des industries du câble de Biskra, « Type câble : câble moyenne tension type : NA2XS(F)Y1x120 mm² (18/30 KV), Norme : CEI 60502. », Fiche technique câble, ENICAB Biskra.
- [26] Delfin Braga, « Etude des phénomènes de charge des matériaux isolants sous faisceau d'électrons de basse énergie (200 eV - 30 keV). », Thèse de doctorat en sciences des matériaux., Université paris XI Orsay, Pays France, 2003.
- [27] Kesbi Oussama et Daddiouameur Youcef, « Simulation Numérique des Contraintes Electrique et Electromécanique dans les Cavités des Câbles HT », Mémoire master en électromécanique, Université de Ghardaïa, 2020.

- [28] Fournié Robert, « les isolants en électrotechnique: Concepts et theories. », Eyrolles, Paris, Pays France, 1986.
- [29] H.C. Hall, R.M. Russek, « Discharge inception in dielectric voids. », IEE, Vol. 101, pp.47-55, 1954.

Résumé :

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

Nous avons créé, un modèle de simulation 2D d'un câble 42 kV isolé par XLPE conçu en utilisant logiciel COMSOL Multiphysics. Dans ce modèle, des cavités sont créées dans l'isolation (XLPE) du câble à différentes expériences. Le modèle a été utilisé pour étudier l'effet de la taille, la forme, la position et la densité des cavités dans l'isolant d'un câble HT en effectuant une analyse électrique.

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

Abstract:

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

We have been created, a 2D simulation model of a 42 kV XLPE insulated cable designed using COMSOL Multiphysics software. In this model, cavities are created in the insulation (XLPE) of the cable at different experience. The model was used to study the effect of the: size, form, position and density of the cavities in the insulation of an HT cable by performing electrical analysis.

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