

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERSCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° : RE-02



DOMAINE :SCIENCES ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROTECHNIQUE
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par:

Hachim SEGHIRI
Abd Rachid AKKA

Intitulé

Diagnostic de la fonction isolation de câbles
HT isolés par la méthode des éléments finis

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. Abderrahim ZEMMIT	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. Hani BENGUESMIA	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Mr. Fayssal OUAGUENI	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Co-Rapporteur
Dr. Khaled BELHOUCHE	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2019/ 2020

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, à la lumière de ma vie Mama qui a été à mes côtés et ma soutenue durant toute ma vie, et mon cher papa qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis. A mes frères et mes sœurs et à toute la famille, Aussi, je n'oublie pas mon ami Khaled Zid Elkhier Que Dieu ait pitié de lui.

S. Hachim & A. Abd Rachid

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous 'a donné, durant toutes ces années, la santé, le courage et la foi pour arriver à ce jour.

Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur de ce mémoire, le **Dr. Hani Benguesmia**, Pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire On dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence. *Nous exprimons notre respect au président du jury ainsi qu'aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'accepter de juger ce travail.*

Et à tout les personne qui, de près ou de loin, ont contribue à la réalisation de ce travail , et qui m'ont encouragée, et soutenue tout au long de ce travail.

En fin, j'adresse mes plus sincères remerciements à mes parents, collègues et amis,

Qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cour de la réalisation de ce modeste travail.

ملخص:

دراسة تشخيص وظيفة العزل لكابلات الجهد العالي المعزولة التي تحدث في عازل صلب يحتوي على أعطال. هذه الأخطاء ، إذا لم تكن موجودة أثناء عملية التثبيت ، يمكن أن تتشكل أثناء خدمة العزل. الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو محاولة إبراز تأثير ظهور تجويف واحد أو أكثر على نشاط التصريف الجزئي. باستخدام برنامج Comsol Multiphysics ، عالجتنا تأثير التجويف ، ثلاثة تجاويف متماثلة وغير متماثلة ، تجاويف مضاعفة ، وموضع هذه الأخيرة. من أجل التحقق من بعض النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة، تم تقديم نموذج رياضي.

الكلمات المفتاحية: عازل ، خطأ ، تجاويف ، جهد كهربائي ، مجال كهربائي.

Résumé

L'étude du diagnostic de la fonction isolation de câbles HT isolés qui se produisent dans un isolant solide contenant des défauts. Ces défauts, s'ils n'existaient pas pendant l'opération de la mise en œuvre, ils peuvent se former lors du service de l'isolant.

L'objectif principale de ce mémoire, de essayé de mettre en évidence l'effet de l'apparition d'une ou plusieurs cavités sur l'activité des décharges partielles. En utilisant un le logiciel Comsol Multiphysics, nous avons traité l'influence de la cavité, trois cavités identique et non-identique, cavités doublé, ainsi la position e ce dernier. Dans le but de valider quelques résultats obtenus par simulation, un modèle mathématique a été présenté.

Mots clés : Isolant, défaut, cavités, potentiel électrique, champ électrique.

Abstract

Study of the diagnosis of the insulation function of insulated HV cables which occur in a solid insulator containing defects. These defects, if they did not exist during the operation of implementation, they can form during the service of the insulation.

The main objective of this work, to try to highlight the effect of the appearance of one or more cavities on the activity of partial discharges. Using Comsol Multiphysics software, we discussed the influence of the cavity, three identical and non-identical cavities, doubled cavities, and the position of the latter. In order to validate some results obtained by simulation, a mathematical model was presented.

Keywords: Insulator, fault, cavities, electric potential, electric field.



"Sommaire"

Sommaire

Sommaire	i
Liste des figures & tableaux	iv
Introduction Générale	1
<u>Chapitre I : "Câbles Électriques"</u>	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique des câbles électriques	3
I.3 L'isolation dans les câbles électriques HT	4
I.4 Structure d'un câble	4
I.4.1 Ame conductrice	5
I.4.2 Isolation	5
I.4.3 Ecran semi-conducteur	6
I.4.4 Blindage métallique	6
I.4.5 Gaine de protection	7
I.5 Process de fabrication des câbles	7
I.5.1 Tréfilage	7
I.5.2 Câblage	8
I.5.3 Isolation	9
I.5.4 Processus extrusion	9
I.5.5 Assemblage des phases	10
I.5.6 Gaine Bourrage	10
I.5.7 Protection supplémentaire	10
I.5.8 Gaine extérieur	11
I.6 Les différents types de câble	11
I.6.1 Câble gainé métallique	12
I.6.2 Câble d'alimentation souterrain	12
I.6.3 Câble multiconducteur	12
I.6.4 Câble à paire torsadée non blindée	13
I.6.5 Câble ruban	13
I.7 Câbles MT (HTA)	14
I.7.1 Câble à champ radial	14
I.7.2 Câble à champ non radial	16
I.8 Défauts des isolations hautes tension	17
I.8.1 Cavités gazeuses	18
I.8.1.1 Microcavités préexistant au sein du matériau	18
I.8.1.2 Cavités créées au cours de la mise en œuvre ou du fonctionnement du système	18
I.8.2 Hétérogénéités	18
I.8.3 Les impuretés	19
I.9 Vieillessement des câbles	19
I.9.1 Vieillessement thermique	19
I.9.2 Vieillessement électrochimique	19

I.9.3 Vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles)	19
I.10 Diagnostic des câbles	20
I.11 Caractéristiques des conducteurs aériens, des câbles isolés (souterrains)	20
I.12 Lignes aériennes et câbles souterrains	20
I.12.1 Réseaux HTA aériens	20
I.12.2 Réseaux HTA souterrains	21
I.12.3 Caractéristique générale	22
I.12.4 Comparaison ligne aérienne et câble souterrain	22
I.13 Conclusion	23

Chapitre II : "Méthodes Numériques et Décharge Partielle"

II.1 Introduction	24
II.2 Equations de Maxwell	24
II.3 Conditions aux limites	25
II.4 Conditions d'interfaces	25
II.5 Modèle mathématique	25
II.6 Méthodes numériques	26
II.6.1 Méthode des Différences Finis (MDF)	26
II.6.1.1 Avantages de la MDF	27
II.6.1.2 Inconvénients de la MDF	27
II.6.2 Méthode des Eléments Finis (MEF)	27
II.6.2.1 Avantages de la MEF	28
II.6.2.2 Inconvénients de la MEF	28
II.6.3 Méthode des éléments finis de frontière (MEFF)	29
II.6.3.1 Avantages de la MEFF	29
II.6.3.2 Inconvénients de la MEFF	29
II.7 Décharge partielle	30
II.7.1 Conséquences des décharges partielles	31
II.7.2 Caractérisation des décharges partielles	31
II.7.3 Origines d'une décharge partielle	32
II.8 Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL	32
II.9 Processus de simulation par le logiciel COMSOL	32
II.10 Description du logiciel et étape de résolution	33
II.10.1 Choix du modèle	34
II.10.2 Géométrie	34
II.10.3 Introduction des propriétés des domaines	34
II.10.4 Maillage des domaines	35
II.10.5 Résolution du problème	35
II.10.6 Analyse des résultats	35
II.11 Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics	35
II.12 Conclusion	36

Chapitre III : "Résultats et Interprétations"

III.1 Introduction	37
--------------------	----

III.2 Modélisation d'un câble électrique souterrain	37
III.3 Simulation	38
III.4 Résultats et discussion	41
III.4.1 Etude potentiel électrique	41
III.4.1.1 Sans default	41
III.4.1.2 Avec defaults	42
III.4.2 Etude du champ électrique	46
III.4.2.1 Sans défaut	46
III.4.2.2 Avec défauts	47
III.5 Conclusion	52
Conclusion générale	53
Références bibliographiques	55



"Liste des Figures & Tableaux"

Liste des Figures & Tableaux

N°	Figures	Page
<u>Chapitre I : "Câbles Électriques"</u>		
Figure I.1	Représentation d'un câble de transport.	5
Figure I.2	Le tréfilage d'un conducteur.	7
Figure I.3	Conducteur tréfilé.	8
Figure I.4	Le câblage d'un conducteur.	8
Figure I.5	Conducteur câblé.	8
Figure I.6	Conducteur isolé.	9
Figure I.7	Test de la couche isolante.	9
Figure I.8	Assemblage et bourrage d'un câble.	10
Figure I.9	Constitution d'un câble.	10
Figure I.10	L'étape finale de la gaine.	11
Figure I.11	Câble à paire torsadée non blindée.	12
Figure I.12	Câble multiconducteur.	12
Figure I.13	Câble à paire torsadée non blindée.	13
Figure I.14	Câble ruban.	13
Figure I.15	Câble radial.	14
Figure I.16	Différents type d'un câble radial.	15
Figure I.17	Câble XLPE.	15
Figure I.18	Câble papier.	16
Figure I.19	Câble ceinture non radial.	17
Figure I.20	Câble non radial.	17
Figure I.21	Réseau HTA aérienne en simple dérivation.	21
Figure I.22	Réseau HTA souterrains en double dérivation.	21
Figure I.23	Réseau HTA souterrains en coupure d'artère.	22
<u>Chapitre II : "Méthodes Numériques et Décharge Partielle"</u>		
Figure II.1	Câble électrique.	26
Figure II.2	Différents types de décharges selon Kreuger.	31
Figure II.3	Imperfections dans un câble monophasé.	32
Figure II.4	Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.	33
Figure II.5	Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol.	34
<u>Chapitre III : "Résultats et Interprétations"</u>		
Figure III.1	Différentes configurations du câble utilisé dans notre travail.	38
Figure III.2	Discrétisation par éléments finis Maillage du câble avant le raffinement.	39
Figure III.3	Discrétisation par éléments finis Maillage du câble après le raffinement.	40
Figure III.4	Distribution du potentiel électrique dans le cas propre.	41
Figure III.5	Distribution radial du potentiel électrique dans le cas propre.	42
Figure III.6	Distribution du potentiel électrique dans les cas avec défauts.	43
Figure III.7	Distribution radial du potentiel électrique avec et sans défauts.	45
Figure III.8	Distribution du champ électrique dans le cas propre.	46

Figure III.9	Distribution radial du champ électrique dans le cas propre.	47
Figure III.10	Distribution du champ électrique dans les cas avec défauts.	48
Figure III.11	Distribution radial du champ électrique avec et sans défauts.	50

N°	Tableaux	Page
	<u>Chapitre III : "Résultats et Interprétations"</u>	
Tableau III.1	Caractéristiques physiques du câble utilisé.	37
Tableau III.2	Caractéristiques du maillage des domaines ainsi le temps de calculs.	40



"Introduction Générale"

Introduction Générale

Les lignes de transmission sont un lien vital dans le réseau électrique pour la transmission de l'énergie, soit en lignes souterrains ou des lignes aériennes. [1]

Le développement des réseaux souterrains de transport et de distribution d'énergie électrique, ainsi que la nécessité d'augmenter la disponibilité incitent à mettre en œuvre des moyens simples et rapides. [2]

Les câbles souterrains sont des équipements électriques dispendieux qui se doivent d'être caractérisés pour les utiliser le plus longtemps possible. Ces câbles possèdent une isolation faite d'un polyéthylène réticulé (PRC) ou en anglais cross-linked polyethylene (XLPE). [3]

Une grande majorité des pannes et des coupures d'électricité sont dues à des défauts des câbles souterrains. Les origines de ces défauts sont variées et peuvent se scinder en quatre classes.

- ✚ Influences externes: dommages mécaniques,....etc, sont tant d'attaques externes contre lesquelles les couches de protection du câble sont censées résister,
- ✚ Défauts de production : on observe fréquemment l'inclusion de cavités, d'impuretés dans l'isolant des câbles lors de leur production. (Objectif de notre mémoire),
- ✚ Application incorrecte ou installation incorrecte,
- ✚ Vieillesse de l'isolation.[4]

Pour la simulation des câbles électriques nous aurons besoin des caractéristiques physiques des différents milieux, les calculs et la représentation du champ produit à l'intérieur d'un câble vont devenir très simple en utilisant la Méthode des éléments finis.

Dans ce mémoire nous allons simuler des défauts "des bulles d'air" dans les câbles électriques sous-terrain à l'aide de logicielle COMSOL de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce qui nous a permis de bien comprendre l'effet des défauts sur les câbles et voir la distribution et la répartition du potentiel et du champ électrique de câble. Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres distincts.

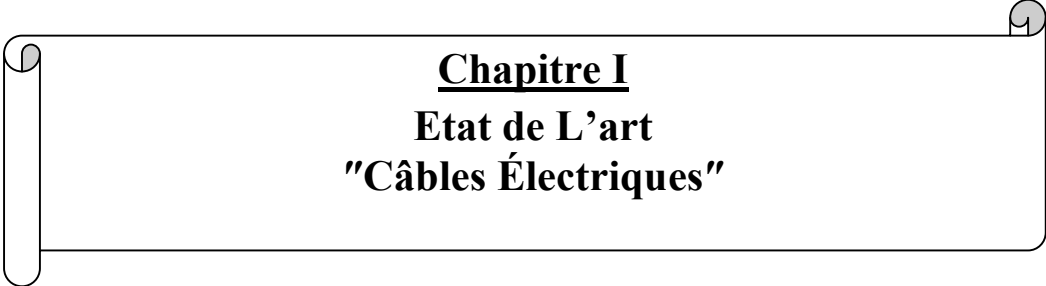
Dans le premier chapitre nous avons présenté une étude générale sur les câbles électriques leurs systèmes de fabrication et on a exposé la structure des câbles électriques et son différent type existant.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les équations de base de Maxwell appliquées aux diélectriques ainsi que les différentes méthodes numériques utilisées pour

l'évaluation de la répartition du potentiel et du champ électrique dans les câbles électriques, en citant leurs avantages et leurs inconvénients, l'élaboration des modèles mathématiques destinés pour la simulation des caractéristiques électriques des câbles électriques, en insistant en particulier sur la méthode des éléments finis employée dans ce travail.

La partie simulation est présentée dans le dernier chapitre, Pour situer l'effet de la présence des défauts (une cavité ou plusieurs) dans les câbles sur la distribution du potentiel et du champ électrique. Une cavité est caractérisée par sa taille, sa forme géométrique et sa position. Le travail va être faite à travers la méthode des éléments finis (MEF), (Comsol multiphysics).

Le travail est clôturé par une conclusion générale.



Chapitre I
Etat de L'art
"Câbles Électriques"

I.1 Introduction

Les matériaux diélectriques ou isolants qu'ils que soient solides, liquides ou gazeux sont souvent le maillon faible des systèmes électriques dont la fiabilité et la disponibilité dépendent assez souvent de la qualité des Systèmes d'Isolation Electriques (SIE).

Un câble électrique est un ensemble de plusieurs fils fonctionnant côte à côte ou groupés, qui est utilisé pour transporter un courant électrique. Ils doivent être capables d'assurer un transfert de l'énergie électrique.

Les câbles à haute tension sont constitués comme ceux basse tension de trois parties principales : conducteur, isolation et gaine de protection. Mais à la différence des câbles basse tension, une couche supplémentaire est ajoutée pour que le champ électrique soit homogène autour du conducteur.

Dans ce chapitre nous présentons une revue bibliographique sur les câbles électriques. Nous montrons aussi le process de fabrication des câbles ainsi les différents types de câble électrique.

I.2 Historique des câbles électriques

La technologie des câbles date de 1830 cependant la mise en service de l'installation à lieu en 1880 à Berlin, en raison de la nécessité d'avoir un matériau diélectrique capable de résister à la chaleur du conducteur et au champ électrique intense. Cela n'a été possible que par l'invention de Ferranti en 1880 d'un diélectrique multicouche en utilisant du papier double bande afin de répondre aux exigences.

Cette technologie a ensuite été améliorée par Emanuel en 1917, par le papier imprégné d'huile à faible viscosité sous pression permanente afin de conserver la stabilité thermique du câble qui a permis pour la première fois d'utiliser des câbles pour des tensions supérieures à 100 kV.

Le prochain grand pas en avant dans la technologie des câbles d'énergie a eu lieu dans les années 1960 avec l'introduction du polyéthylène réticulé (XLPE) comme diélectrique destiné à une température de fonctionnement plus élevée (environ 90 C°). Une autre technologie est de remplir le câble avec un gaz à haute pression (HPFF), on utilise généralement le SF6.

Ces câbles sont de courtes longueurs (< 3000 m) et le conducteur se compose d'un tube rigide en aluminium à l'intérieur d'un tube, l'espace entre le conducteur et le tube est rempli du gaz SF6 sous une pression de 5.3 bar, afin d'augmenter la rigidité diélectrique. [5]

I.3 L'isolation dans les câbles électriques HT

Les matériaux isolants trouvent des applications dans un grand nombre de dispositifs de production, de transport, de distribution et d'utilisation de l'énergie électrique. Un isolant est un matériau qui ne conduit pas l'électricité. Sa destination première est d'empêcher tout contact entre des pièces métalliques portées à des potentiels différents.

Un diélectrique est un matériau plus ou moins isolant (résistivité élevée, bande d'énergie interdite de quelques eV), polarisable, c'est -à-dire dans lequel des dipôles électrostatiques existent (diélectrique polaire) ou se forment sous l'effet d'un champ électrique (dipôles induits).

L'utilisation des matériaux diélectrique est très vaste aujourd'hui dans l'industrie des équipements électriques telle que câble de puissance, générateurs, transformateur, composant électroniques.

I.4 Structure d'un câble

La structure d'un câble d'énergie haute tension influe grandement sur son rendement. Les techniques de structure et de fabrication des câbles XLPE se sont grandement améliorées depuis les premiers câbles de production qui avaient de vastes problèmes avec les arborescences d'eau. Les câbles à haute tension sont constitués comme ceux basse tension de trois parties principales : conducteur, isolation et gaine de protection. Mais à la différence des câbles basse tension, une couche supplémentaire est ajoutée pour que le champ électrique soit homogène autour du conducteur

L'âme centrale conductrice est composée de plusieurs conducteurs habituellement en cuivre ou en aluminium. Autour de cet ensemble de conducteurs se trouve un matériau semi-conducteur (SC) destiné à homogénéiser le champ électrique à l'interface entre le semi-conducteur et l'isolant. Puis, se trouve la partie essentielle qui est le matériau isolant. Dans notre exemple, ce dernier est un polyéthylène haut densité (PEHD). Le tout ainsi formé est recouvert d'une seconde couche de matériau semi-conducteur. L'ensemble est recouvert d'un écran conducteur relié à la terre, dont le rôle est multiple : il sert de blindage afin d'empêcher la propagation du flux électromagnétique, il assure également le retour du courant en cas de court-circuit, et il permet aussi d'éviter l'intrusion d'humidité. La dernière couche est une gaine de protection qui est généralement faite à partir de polyéthylène haute densité. Sa fonction est double : elle isole l'environnement de la partie conductrice extérieure et elle protège le câble des agressions extérieures telles que la corrosion ou bien l'usure mécanique.

Habituellement, la fabrication des câbles haute tension se fait en co-extrudant l'ensemble des trois couches SC/PRC/SC sous forte pression, de façon à obtenir un matériau le plus homogène possible et surtout exempt de cavités. [6]

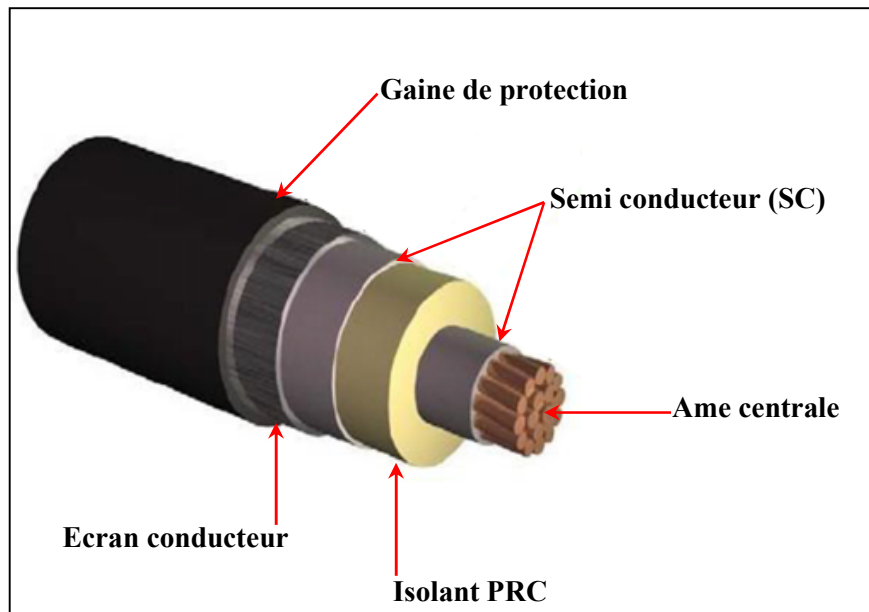


Figure I.1. Représentation d'un câble de transport

I.4.1 Ame conductrice

L'âme conductrice ou tout simplement le conducteur est la partie principale d'un câble. Son objectif est de transmettre le courant nécessaire avec une faible perte d'énergie. Les deux matériaux largement utilisés sont le cuivre et l'aluminium.

I.4.2 Isolation

L'isolation électrique (diélectrique) est la partie la plus cruciale d'un câble puisqu'elle permet une séparation suffisante entre le conducteur et la masse électrique la plus proche afin d'empêcher la rupture d'électrique.

Les matériaux d'isolation les plus couramment utilisés dans les câbles extrudés sont le polyéthylène réticulé (XLPE), le caoutchouc éthylène-propylène (EPR) et polyéthylène réticulé avec retardateur d'arborescence (TR-XLPE). La température, le champ électrique et l'humidité sont les principaux facteurs qui influent sur le vieillissement de l'isolation. L'humidité avec le champ électrique renforcent l'apparition des arborescences électriques à l'intérieur de l'isolation. Les arborescences électriques sont très nocives pour l'isolation solide et peuvent même entraîner l'effondrement partiel du diélectrique solide, qui mènera à la défaillance du câble.[7]

I.4.3 Ecran semi-conducteur

Des couches semi-conductrices sont utilisées des deux côtés de l'isolation. La Couche Interne est appelée l'écran du conducteur et son but est de créer une surface en forme de cylindre lisse sur le dessus du conducteur. Ceci permet de fluidifier le champ électrique radial et d'éviter la formation de cavités entre le conducteur et l'isolant, ce qui conduirait à des décharges partielles qui pourraient endommager l'isolation. Le matériau semi-conducteur est habituellement basé sur le même matériau que l'isolant.

La couche externe est appelée écran d'isolation. Sa fonction est d'homogénéiser le champ électrique radial et de fournir un chemin sûr au courant de fuite. L'écran d'isolation empêche également les décharges partielles au-dessus de l'isolant. Il est généralement fabriqué à partir du même matériau que l'écran conducteur.

Les écrans semi-conducteurs sont l'un des aspects les plus complexes dans la technologie du câble. L'atténuation des impulsions de décharges partielles hautes fréquences dans des câbles est due à la couche semi-conductrice. Ceci impose une limitation majeure de la longueur du câble qui peut être surveillée par un système de mesure de décharges partielles.[8]

I.4.4 Blindage métallique

Le blindage métallique est un facteur de sécurité important dans les câbles haute tension. En cas de dommage mécanique causé au câble, un commutateur rapide offre un accès à faible impédance au courant de défaut. Le courant de charge est produit par le condensateur formé entre le conducteur et le blindage métallique. Le cuivre et l'aluminium sont des matériaux typiques pour le blindage métallique du fait de leur bonne conductibilité électrique et de la résistance contre la corrosion, ils résistent ainsi mieux aux décharges partielles qui se propagent à travers le blindage métallique ce qui rend cette partie de câble particulièrement intéressante. Cet écran métallique relié à la terre a une fonction comme un blindage électrique afin de produire un champ électrique libre autour du câble. De plus, cette composante a d'autres fonctions telles que :

- ✚ Fournir un trajet de retour pour le courant de charge capacitive dans des conditions d'exploitation,
- ✚ Réalisation de mise à la terre qui permet d'écouler les courants de défaut jusqu'à ce que le système soit hors tension,
- ✚ Protection contre les contacts accidentels.
- ✚ Protection mécanique de l'isolant, ils servent comme armure,

✚ Rôle d'étanchéité : grâce à leur technologie (écran massif, écran rubané, contrecollé ou soudé...), les écrans métalliques peuvent assurer l'étanchéité radiale du câble.[7]

I.4.5 Gaine de protection

Ce composant a pour fonction de protéger le câble d'éventuelles possibilités de dommages mécaniques et de la corrosion provoquée par l'eau. Le polyéthylène haute densité (HDPE) est couramment utilisé comme matériau pour cette gaine de protection car il offre une bonne protection mécanique et une excellente résistance à l'abrasion avec une faible pénétration de l'humidité.

I.5 Process de fabrication des câbles

La technologie dont on a besoin pour qu'un câble électrique puisse être en service durant de nombreuses années exige des procédés de fabrication complexes qui demandent du personnel hautement qualifié.[9]

Pour cela le contrôle qualité est établi en trois étapes :

- ✚ Contrôle des matières premières utilisées dans la fabrication des cables,
- ✚ Contrôles en cours de production,
- ✚ Essais électriques finaux.

I.5.1 Tréfilage

La première étape de fabrication d'un conducteur est le tréfilage. Elle consiste à réduire le diamètre du fil de cuivre de manière progressive jusqu'au diamètre final.

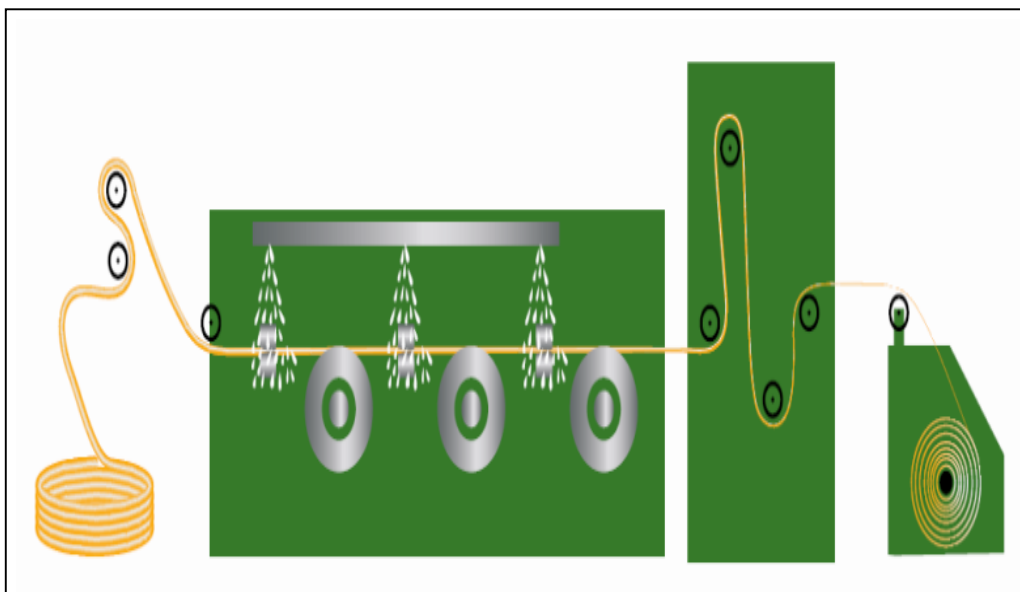


Figure I.2. Le tréfilage d'un conducteur.

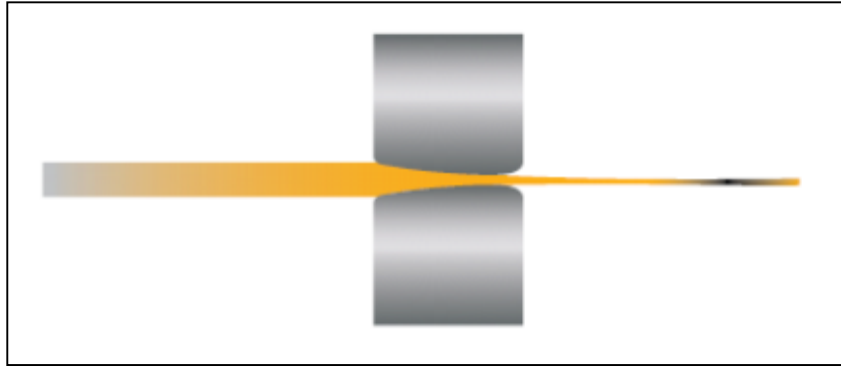


Figure I.3. Conducteur tréfilé.

I.5.2 Câblage

Après le tréfilage, les fils de cuivre recuit obtenus sont regroupés afin de former les conducteurs. Ce processus s'appelle câblage.

- ✚ Mesure de la résistance linéique,
- ✚ Mesure de la masse linéique des conducteurs,
- ✚ Pas et rapport de câblage,
- ✚ Diamètre des conducteurs.

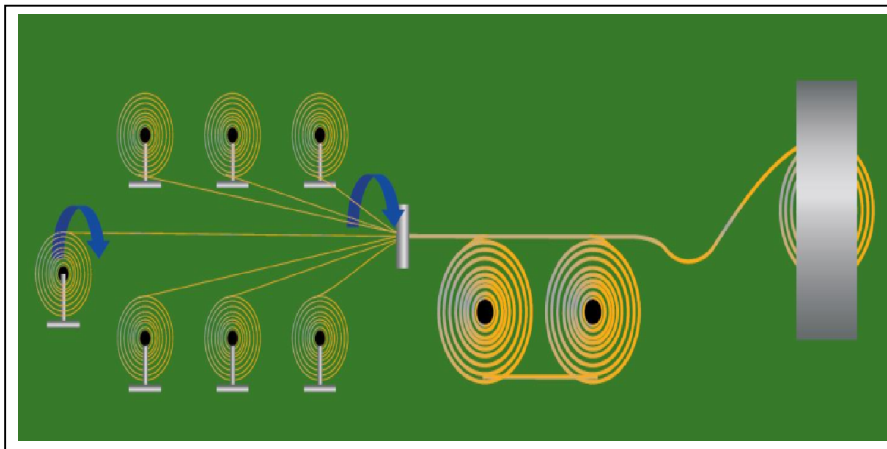


Figure I.4. Le câblage d'un conducteur.

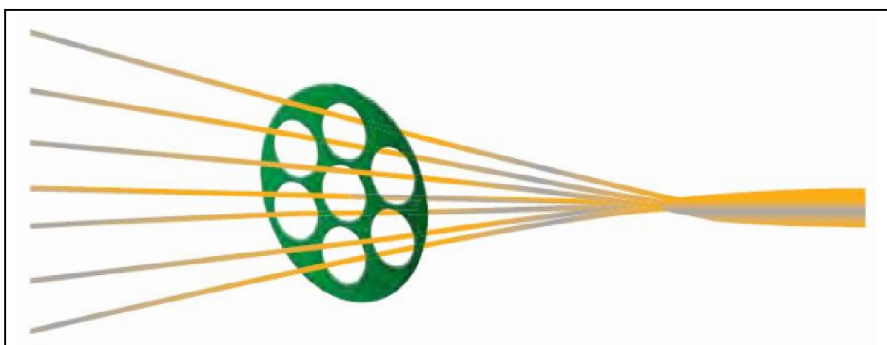


Figure I.5. Conducteur câblé.

I.5.3 Isolation

L'isolation est le recouvrement du conducteur par une enveloppe isolante. En fonction des caractéristiques du câble, les matériaux d'isolation sont prédéfinis selon le type et la construction des câbles.

La capacité d'isolation du matériau (PVC- PRC - PRS) et son épaisseur détermineront la tension maximale de service du câble selon les normes international. [10]

L'enveloppe isolante est appliquée sur le conducteur par extrusion pour les câbles BT. [9]

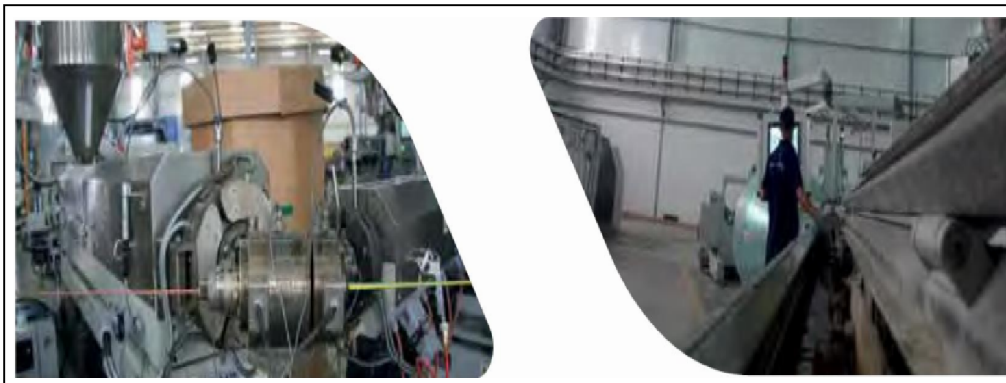


Figure I.6. Conducteur isolé.

I.5.4 Processus extrusion

- ✚ Epaisseur de l'isolant,
- ✚ Prévention des défauts /Spark Test,
- ✚ Couleur de l'isolant /marquage en câs de produit fini,,
- ✚ Essais d'allongement à chaud pour isolant,
- ✚ Diamètre extérieur.

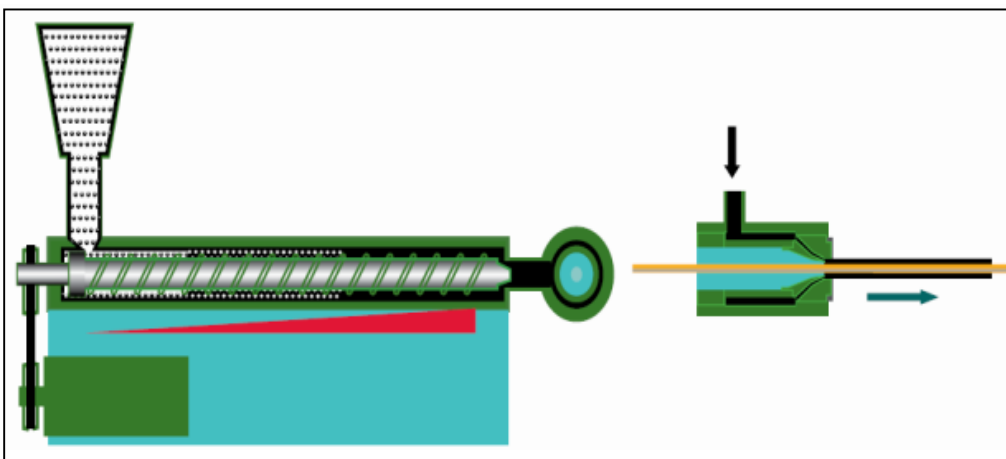


Figure I.7. Test de la couche isolante.

Le câble est soumis à un contrôle de voltage durant le process afin de garantir que la couche d'isolation ne présente aucun défaut.

I.5.5 Assemblage des phases

L'assemblage des phases consiste à regrouper différents conducteurs isolés afin de former un câble multi- polaire.

- ✚ Diamètre,
- ✚ Pas d'assemblage.

I.5.6 Gaine Bourrage

Le contrôle est de s'assurer que les espaces entre les câbles sont scellés recueilli par un matériau blanc PRC. Pour une forme circulaire lisse. [10]

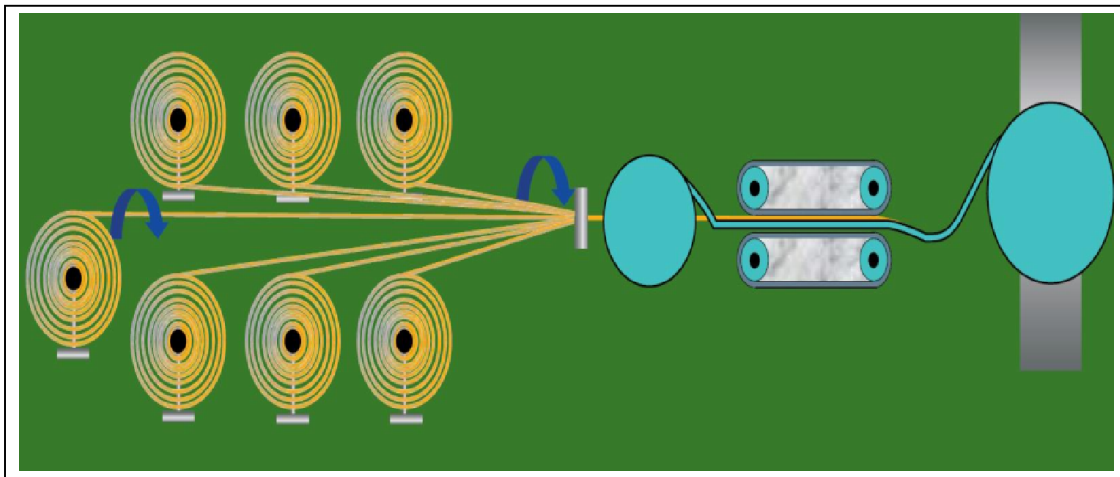


Figure I.8. Assemblage et bourrage d'un câble.

I.5.7 Protection supplémentaire

A ce stade, le câble est isolé par un blindage mécanique dont la fonction est de protéger le câble des influences extérieur (chocs, des attaques de rongeurs, ...) en observant l'épaisseur et la qualité du préservatif ainsi que la qualité de l'emballage lui-même. [10]

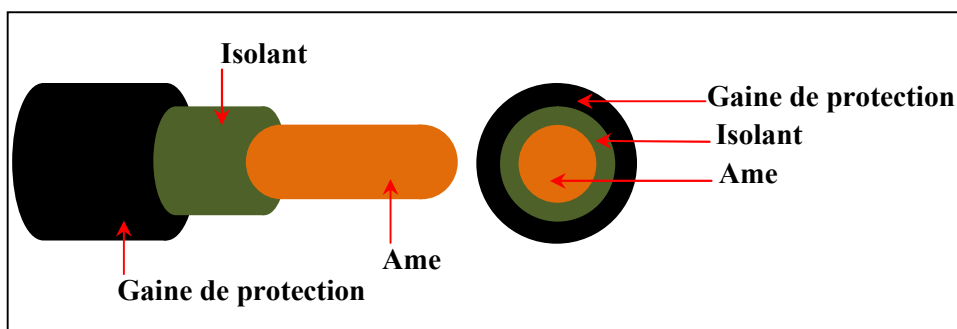


Figure I.9. Constitution d'un câble.

I.5.8 Gaine extérieur

Les câbles portent un recouvrement polymérique extérieur pour leur protection; appelée gaine extérieure. Cette gaine protège les phases isolées du câble



Figure I.10. L'étape finale de la gaine.

Notre câble est marqué comme suit :

- ✚ L'entreprise de fabrication,
- ✚ Section,
- ✚ Désignation,
- ✚ Norme,
- ✚ Année de fabrication.

I.6 Les différents types de câble

On peut classer selon différents critères.

- ✚ Par niveau de tension: hormis les cas particuliers des câbles à huile ou à gaz en HTB, on note que tous les câbles à isolement papier ou synthétique, quels que soient leurs niveaux de tension, bénéficieront des mêmes méthodes de pré-localisation et de localisation de défauts.
- ✚ Par type de réseau: arborescents en basse tension, à coupure d'artère avec ou sans dérivation ou en double dérivation en HTA ou encore strictement sans dérivation en HTA, la structure des réseaux va seulement conditionner le choix de certaines méthodes de pré-localisation en raison du rapport efficacité/sécurité.
- ✚ Par structure de câble : avant d'en arriver aux câbles unipolaires à isolation synthétique posés aujourd'hui, nous avons connu diverses isolations en passant par les câbles tripolaires métallisés, les câbles « tri plomb », ceux à ceinture, etc. La structure des câbles influence directement le nombre des mesures à réaliser pour caractériser le du défaut. [11]

Il existe aujourd'hui plus de 20 types de câbles électriques différents, conçus pour des applications allant de la transmission à l'utilisation industrielle lourde. Certains sont plus couramment utilisés, comme les cinq suivants. [12]

I.6.1 Câble gainé métallique

Egalement connu sous le nom de câbles électriques blindés, ils sont souvent utilisés pour alimenter en électricité de grands appareils électriques. Ils comportent 3 fils de cuivre simple (un fil pour le courant, un fil de mise à la terre et un fil neutre) isolés avec du polyéthylène réticulé, du lin en PVC et un revêtement en PVC noir. Les câbles gainés métalliques avec revêtement en fil d'acier sont souvent utilisés pour des applications extérieures et des installations à haute contrainte. [12]

I.6.2 Câble d'alimentation souterrain

Ces câbles ont leurs fils regroupés et intégrés directement dans le matériau flexible. Disponibles dans une variété de calibres, ils sont souvent utilisés pour l'éclairage extérieur et les applications en rapport au sol. Leur forte résistance à l'eau les rend idéals pour les zones humides, comme les jardins, les lampes ouvertes, les pompes. [12]

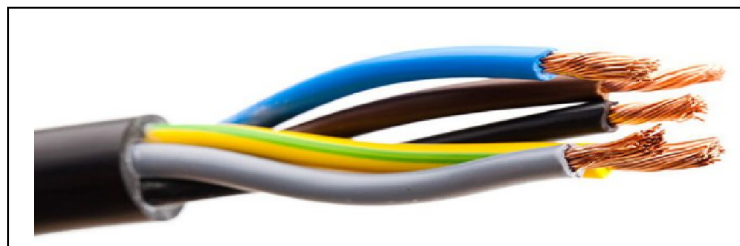


Figure I.11. Câble à paire torsadée non blindée.

I.6.3 Câble multiconducteur

Il s'agit d'un type de câble habituellement utilisé dans les habitations, du fait de la simplicité d'utilisation. Par ailleurs il est bien isolé. Les câbles électriques multiconducteurs (ou multi-cœur) comportent plus d'un conducteur, chacun étant isolé individuellement.

De plus, une couche d'isolation extérieure est ajoutée pour une sécurité supplémentaire. Différents modèles sont utilisés dans l'industrie. [13]

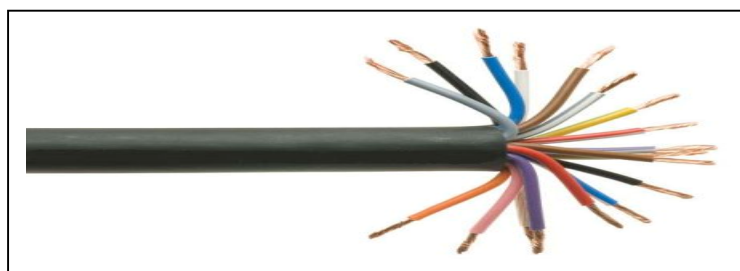


Figure I.12. Câble multiconducteur.

I.6.4 Câble à paire torsadée non blindée

Ce type de câble comprend 2 fils qui sont tordus ensemble. Les fils individuels ne sont pas isolés, ce qui le rend parfait pour la transmission d'un signal et pour les applications vidéo. Pour une utilisation à l'intérieur, il est très populaire d'opter pour du cuivre puisqu'ils sont flexibles et peuvent être facilement pliés pour une installation dans le mur. [13]

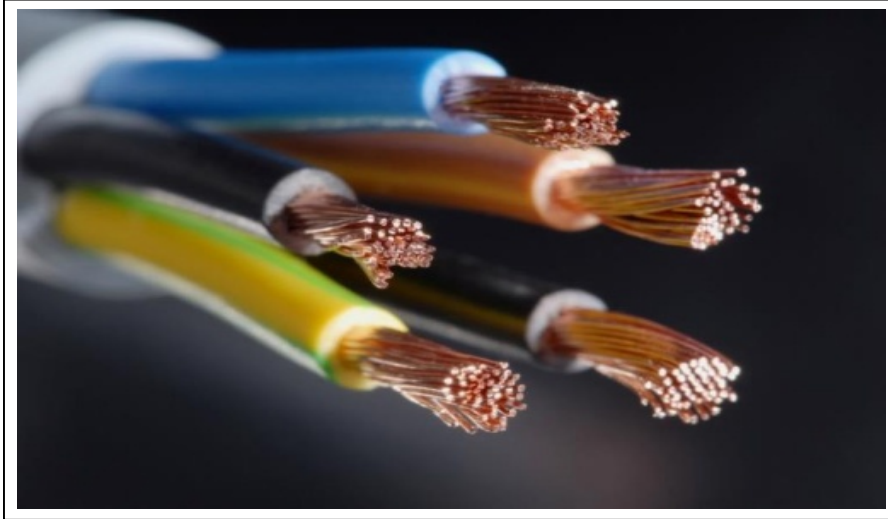


Figure I.13. Câble à paire torsadée non blindée.

I.6.5 Câble ruban

Les câbles ruban sont souvent utilisés dans les ordinateurs et les périphériques, avec différents fils conducteurs parallèles l'un à côté de l'autre sur un plan plat, ce qui leur donne cette apparence visuelle plate. Ces câbles électriques sont assez flexibles et ne peuvent traiter que des applications à basse tension. [12]

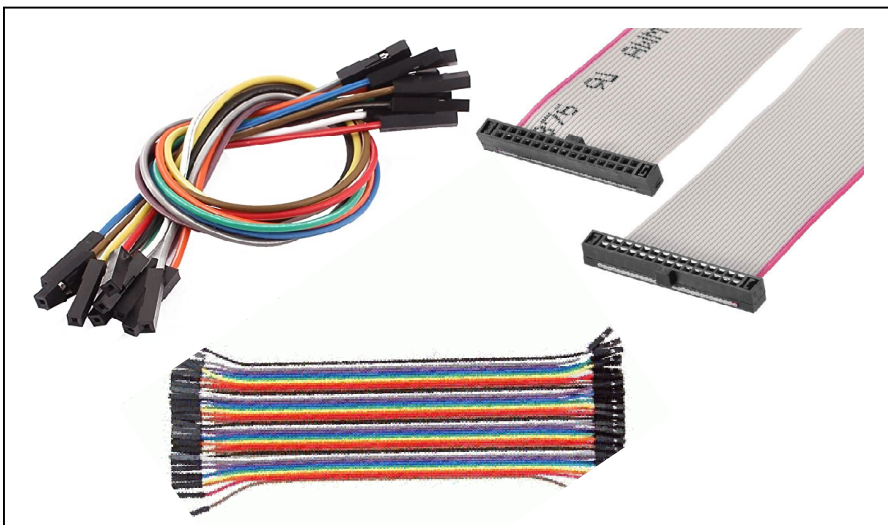


Figure I.14. Câble ruban.

I.7. Câbles MT (HTA)

Pour les câbles HTA il y a deux types, les câbles à champ radial et les câbles à champ non radial (à ceinture).

I.7.1 Câble à champ radial

D'une manière générale, un câble unipolaire se présente sous la forme d'un condensateur cylindrique (figure I.15) constitué essentiellement de :

- ✚ Câblée ou segmentée, en cuivre ou en aluminium (les sections variant entre 0.35 et 1600 mm²),
- ✚ Un écran semi-conducteur interne (pour les câbles dont la tension d'utilisation est supérieure à 3 kV), extrudé ou rubané, dont le rôle est d'homogénéiser le champ électrique,
- ✚ Une enveloppe isolante en matériau polymérique (polyéthylène, polyéthylène réticulé, caoutchouc, polychlorure de vinyle, les enveloppes isolantes en papier imprégné n'étant plus utilisées que pour les câbles haute tension courant continu) dont l'épaisseur varie entre 0.5 et 30 mm selon la tension d'utilisation et la nature du matériau, [14]
- ✚ Un écran semi-conducteur externe (cas des tensions supérieurs à 3 kV), dont le rôle est d'homogénéiser le champ électrique au niveau des électrodes,
- ✚ Un écran métallique (en plomb, en aluminium ou en cuivre), dont le rôle est :
 - ✚ De constituer une électrode de référence,
 - ✚ De permettre l'évacuation des courants de court-circuit homopolaires,
 - ✚ D'assurer l'étanchéité radiale,
 - ✚ D'orienter et de canaliser les lignes de champ électrique.

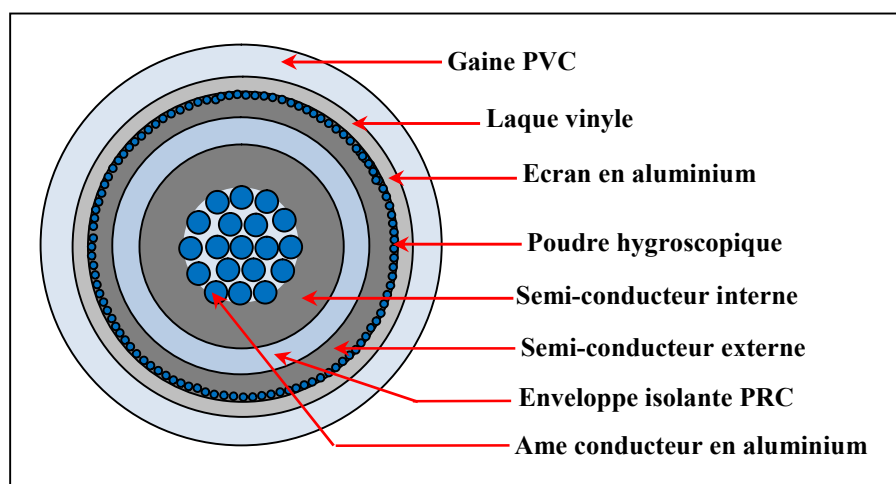


Figure I.15. Câble radial.

✚ Enfin, une gaine de protection externe en matériau polymérique, jouant un rôle de protection contre les corrosions, favorisant l'étanchéité, la protection mécanique à la pose et, lorsque cela est nécessaire, assurant une isolation électrique de l'écran par rapport au sol.(figure I.16).

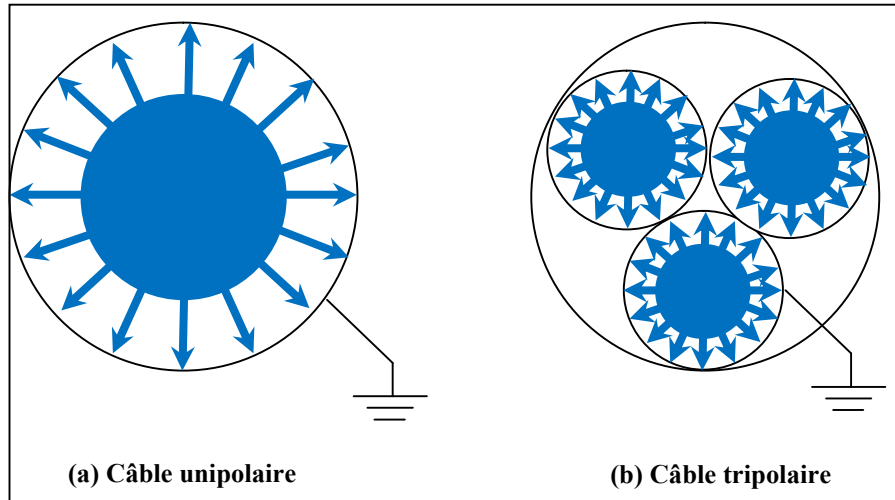


Figure I.16. Différents type d'un câble radial.

Dans cette structure de câble, les écrans sont tous au même potentiel et reliés à la terre. Les lignes de forces sont toujours perpendiculaires aux couches de l'isolant (figure I.16a). Chaque conducteur dispose d'un écran individuel (figure I.16b). Ce câble ne peut donc avoir que des défauts phase/écran. Le défaut phase/phase direct est impossible par construction, en théorie. Les utilisateurs disent que cela peut être une réalité. On ne pose, aujourd'hui, que des câbles torsadés (figure I.17) .[14]

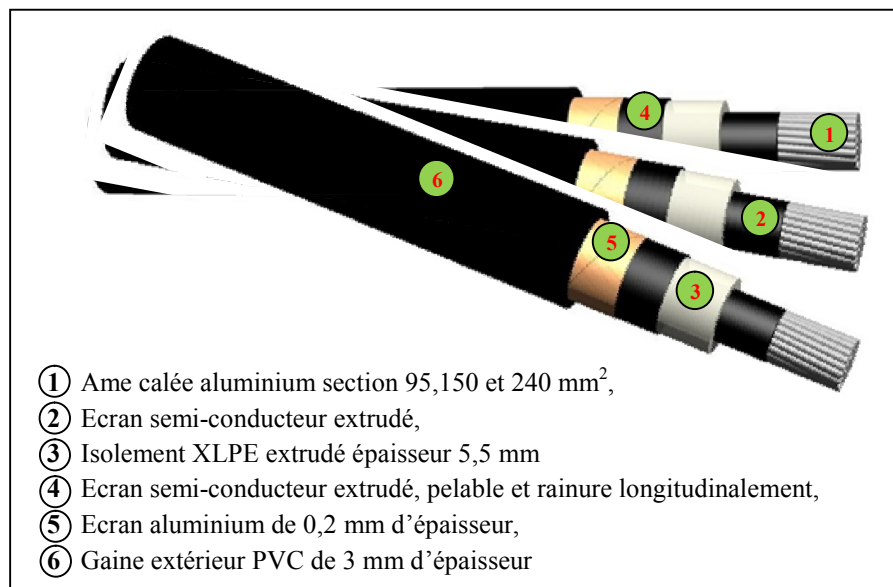


Figure I.17. Câble XLPE.

I.7.2 Câble à champ non radial

Cette structure concerne essentiellement les câbles bas tension. Cependant, il y a quelques dizaines d'années, on a posé en réseau des câbles à champ non radial jusqu'à des tensions de service de 15 kV. L'isolant est principalement du papier imprégné d'huile, migrante ou non (figure I.18).

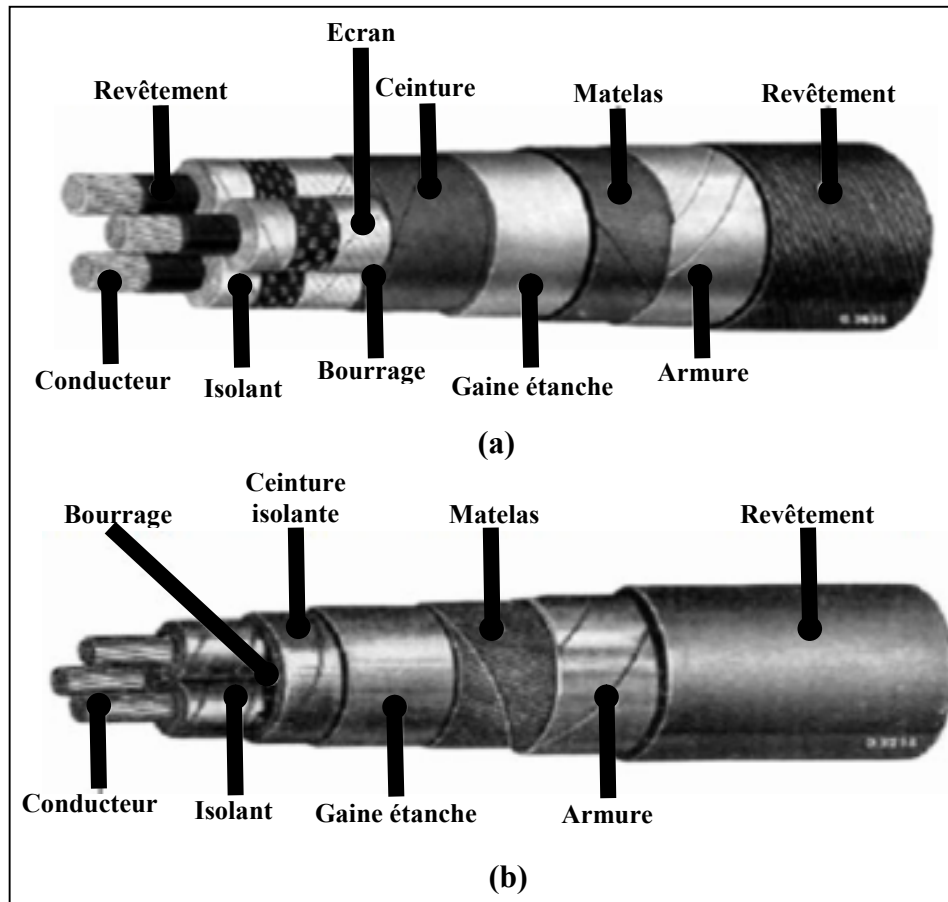


Figure I.18. Câble papier.

Faute d'écran individuel, on constate que les isolants sont le siège de contraintes importantes.

En effet, le champ électrique en un point quelconque de l'isolant est constamment variable en grandeur et en dimension.

Les lignes de force peuvent être tangentielles. Si des bulles de gaz (vacuoles) sont emprisonnées entre les couches de papier, on risque la destruction de l'isolant. (figure I.19 et I.20).

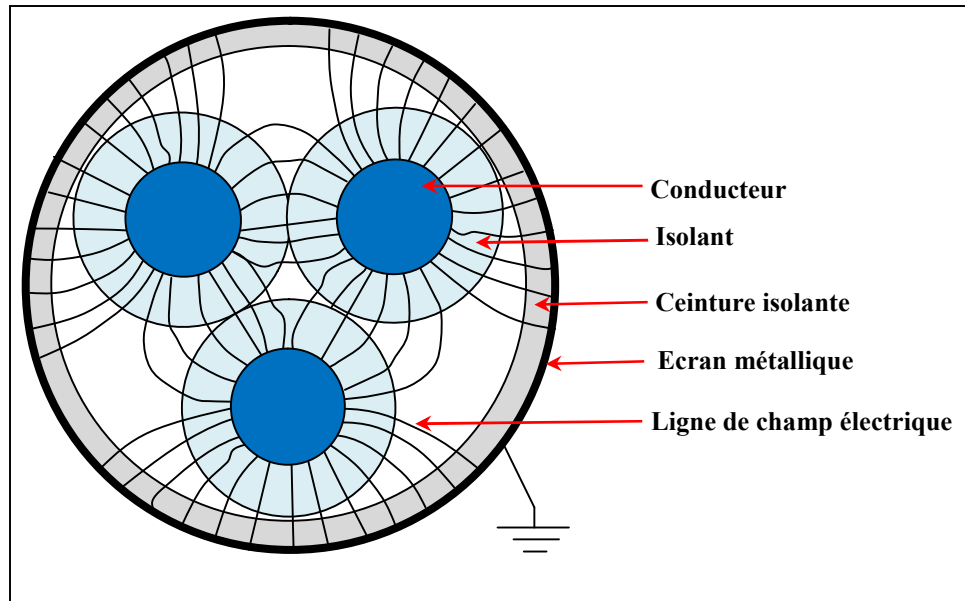


Figure I.19. Câble ceinture non radial.

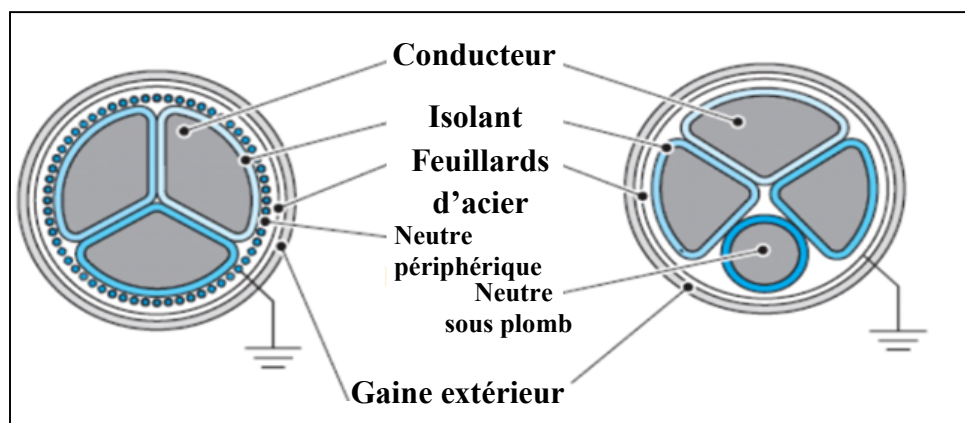


Figure I.20. Câble non radial.

Ce câble ne dispose que d'un seul écran, collectif. Les défauts phase/écran, mais aussi ceux entre phases sont possibles.[14]

I.8 Défauts des isolations hautes tension

Les isolations hautes tension contiennent souvent des défauts qui 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.

I.8.1 Cavités gazeuses

Elles peuvent avoir deux origines:

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

I.8.1.1 Microcavités préexistant au sein du matériau

Deux cas sont à envisager en fonction de la nature réticulée ou non réticulée de la structure du matériau. La réticulation s'accompagne d'un dégagement de gaz qui a tendance à former des bulles si la technologie de fabrication n'est pas bien adaptée : pression ou 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. [15]

a) Cavités d'eau

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

b) Cavités de gaz

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).

I.8.1.2 Cavités créées au cours de la mise en œuvre ou du fonctionnement du système

Des décollements peuvent être créés entre les parties isolante et conductrice, suite à des défauts de fabrication ou à l'existence de contraintes mécaniques consécutives au fonctionnement du système.[15]

I.8.2 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.[15]

I.8.3 Les 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 isolé au PRC 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 présence des impuretés dans les câbles isolés au PRC. 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.[15]

I.9 Vieillissement des câbles

Le vieillissement des câbles de transport de l'énergie électriques a isolation synthétique est subordonne a la présence d'arborescences. Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, la dégradation des câbles est caractérisée par une modification des propriétés électriques et mécaniques (par exemple : augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité). [5]

I.9.1 Vieillissement thermique

Il est provoqué par l'action de longue durée de la température sur un diélectrique.[5]

I.9.2 Vieillissement électrochimique

Il est engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique. [5]

I.9.3 Vieillissement électrique (ionisation - décharges partielles)

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée.

Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau. [5]

I.10 Diagnostic des câbles

Les techniques de diagnostic des câbles visent à apprécier l'état d'un réseau et par extension se prononcer sur sa pérennité. Ces techniques sont l'objet de développements permanents mais on peut ici donner les potentialités de certaines d'entre elles à la recherche et développement.

I.11 Caractéristiques des conducteurs aériens, des câbles isolés (souterrains)

Les éléments de base constitutifs de toute installation électrique sont les conducteurs et les câbles. Ils doivent être capables d'assurer un transfert de l'énergie électrique c.à.d. alimentation des récepteurs sous une tension et une intensité nominale définie, sans chute de tension exagérée et sans échauffement excessif. Ils doivent être capables de supporter un courant de court circuit pendant un temps déterminé.

Les conducteurs a pour but de réaliser les liaisons électriques, leur rôle est de conduire le courant électrique, transporter l'énergie électrique jusqu'aux récepteurs. Il existe divers variétés pour toutes les utilisations du domaine électrotechnique (courant fort, courant faible, isolé, unipolaire, multipolaire...).[13]

I.12 Lignes aériennes et câbles souterrains

La technologie des câbles date de 1830 cependant la mise en service de l'installation à lieu en 1880 à Berlin, en raison de la nécessité d'avoir un matériau diélectrique capable de résister à la chaleur du conducteur et au champ électrique intense.

Cela n'a été possible que par l'invention de Ferranti en 1880 d'un diélectrique multicouche en utilisant du papier double bande afin de répondre aux exigences. Cette technologie a ensuite été améliorée par Emanuel en 1917, par le papier imprégné d'huile à faible viscosité sous pression permanente afin de conserver la stabilité thermique du câble qui a permis pour la première fois d'utiliser des câbles pour des tensions supérieures à 100 kV.

Depuis 1994 la plupart des compagnies d'électricité ont pris la décision de ne plus établir de nouvelles liaisons aériennes en deçà de 150 kV.

Les lignes aériennes sont constituées de conducteurs nus en aluminium (souvent un alliage pour renforcer les propriétés mécaniques), parfois avec une âme en acier.

I.12.1 Réseaux HTA aériens

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (figure I.21), traditionnellement moins coûteuses que les câbles

souterraines. Le dimensionnement de ces ouvrages est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir.

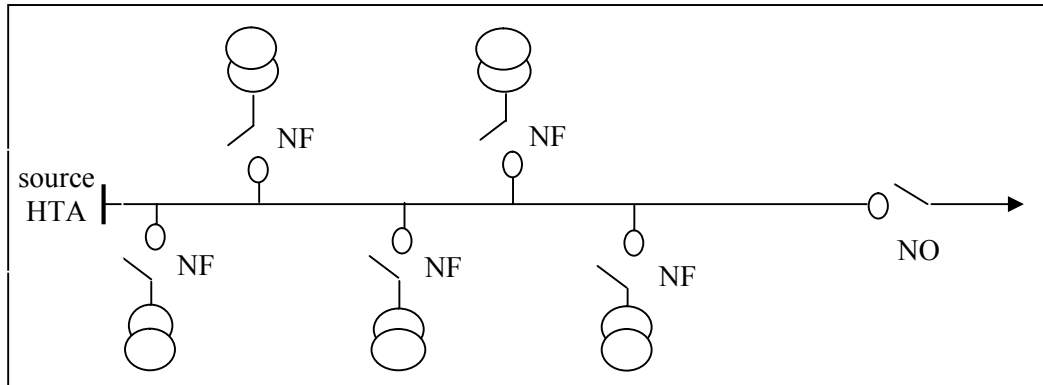


Figure I.21 Réseau HTA aérien en simple dérivation.

NF : désigne un interrupteur normalement ferme,

NO : un interrupteur normalement ouvert.

I.12.2 Réseaux HTA souterrains

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.22) ou en coupure d'artère (figure I.23).

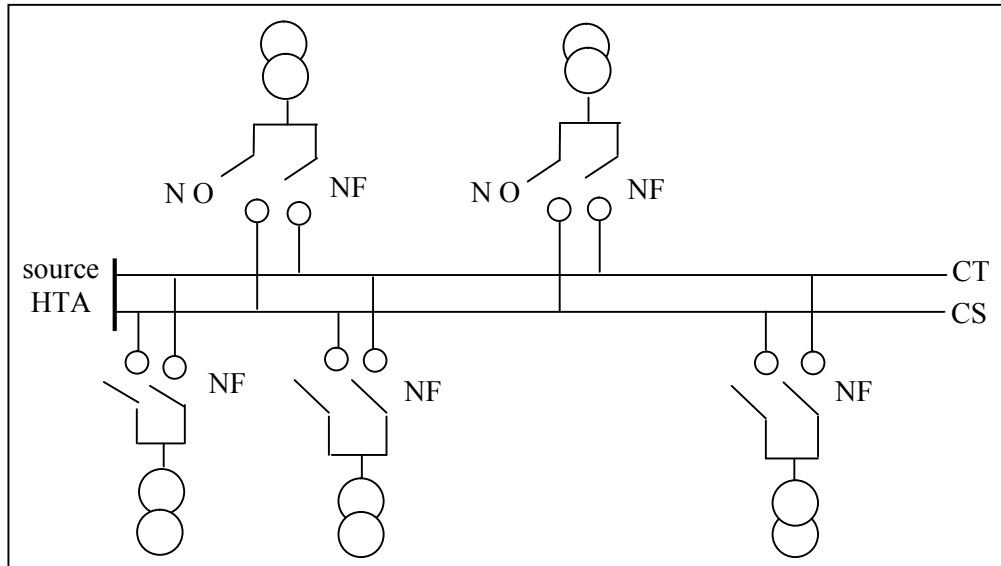


Figure I.22. Réseau HTA souterrains en double dérivation

En double dérivation, les postes HTA/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 enterré depuis les années 1990, en raison de la baisse notable du surcoût liée à cette technique.[13]

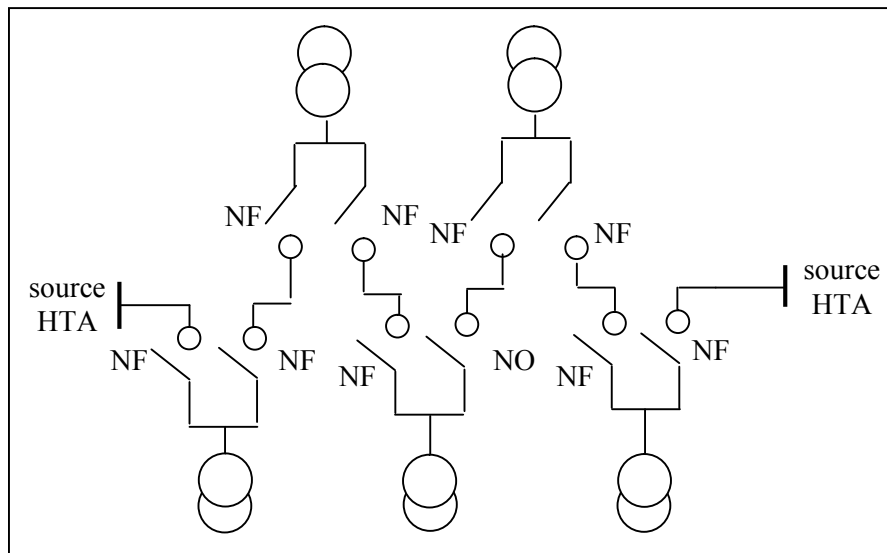


Figure I.23. Réseau HTA souterrains en coupure d'artère.

I.12.3 Caractéristique générale

Elle sert à satisfaire aux conditions suivantes:

- ✚ Bonne conductibilité pour réduire les pertes lors du transport de l'énergie électrique d'où le choix du cuivre et de l'aluminium,
- ✚ Résistance mécanique suffisante pour éviter la rupture du conducteur sous les efforts au moment de la pose des fixations, du serrage des connexions,
- ✚ Bonne souplesse pour faciliter le passage des conducteurs dans les conduits mobiles,
- ✚ Bonne fiabilité des raccordements par une bonne résistance physico-chimique des contacts.[13]

I.12.4 Comparaison ligne aérienne et câble souterrain

- ✚ Les lignes aériennes sont soumises plus fréquemment que les câbles à des interruptions de courte durée (orage, brouillard, givre, branches d'arbres, oiseaux, grues, engins de terrassement, matériels de construction de la ligne...),
- ✚ Les câbles nécessitent une durée de réparation plus longue que les lignes aériennes,
- ✚ Des surcharges de longue durée sont plus critiques en souterrain qu'en aérien,

- ✚ Le vieillissement des câbles risque d'être fortement affecté. Par contre les surcharges de courtes durée sont plus facilement supportées par les câbles,
- ✚ Les câbles souterrains ont une impédance plus faible que leur équivalent aérien, ce qui donne des courants de défaut plus élevés et une rétrogradation de la sélectivité des protections. La répartition de charge est également fortement modifiée,
- ✚ Les contraintes environnementales et de coûts, ainsi que la sécurité et la fiabilité de l'alimentation doivent être parallèlement envisagées lors d'une comparaison souterrain-aérien,
- ✚ L'impact visuel des lignes peut nécessiter un acheminement approprié,
- ✚ Champ électromagnétique : les câbles souterrains génèrent moins de champs électromagnétiques (sauf aux bornes terminales et au droit de la liaison dans les dispositions en nappe où il peut être jusqu'à trois fois plus élevé), pas de bruit couronne et peu d'interférence,
- ✚ Une liaison souterraine occupe moins de passage au niveau du sol,
- ✚ Le courant capacitif d'un câble souterrain haute tension est plus élevé que celui d'une ligne aérienne. De longs tronçons nécessitent l'installation de compensateurs réactifs,
- ✚ La plupart des défauts en aérien sont fugitifs, tandis qu'ils sont permanents en souterrain,
- ✚ Du fait de sa section de conducteur plus importante, la liaison souterraine permet une diminution des pertes électriques d'environ $\frac{1}{4}$ par rapport à l'aérien,
- ✚ Le coût de la réalisation d'une ligne aérienne est largement plus faible qu'une ligne électrique avec des câbles.[13]

I.1 3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés une brève vision sur la procédure de fabrication des câbles électriques. On a mentionné les types des défauts existant dans un câble électrique souterrain parmi celle-ci la présence d'une cavité. Enfin nous avons cités les avantages et inconvénients sous forme de comparaison entre les deux types de transport de l'énergie électrique, les lignes aériennes et les câbles souterrains.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter, les différentes méthodes numériques utilisées pour l'évaluation de la répartition du potentiel et du champ électrique dans les câbles électriques.



Chapitre II
"Méthodes Numériques et Décharge Partielle"

II.1 Introduction

Les chercheurs ont développé des méthodes de calcul qui peuvent être classées en deux catégories: les méthodes analogiques et les méthodes numériques. Les méthodes analogiques ne sont plus employées, car elles sont peu commodes et inadéquates pour les problèmes à trois dimensions.[16]

Les méthodes numériques sont essentiellement de type différences finies, éléments finis, charges équivalentes et éléments frontières. Nous exposerons d'abord le modèle de Maxwell, les différentes formulations et les équations qui en résultent ainsi leurs avantages et leurs inconvénients pour chaque méthode numérique à part. et nous terminerons ce chapitre par le processus de simulation par le logiciel comsol.

II.2 Equations de Maxwell

Les équations de Maxwell, sont des lois fondamentales de la physique. Elles constituent .les postulats de base de l'électromagnétisme.[17]

Les équations qui gouvernent la répartition du potentiel et du champ électriques, dans un milieu donné, dérivent des équations de Maxwell. Celles-ci sont formées par quatre équations aux dérivées partielles qui lient 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:

✚ Loi de Maxwell-Gauss:

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (\text{II.1})$$

✚ Loi de Maxwell-Faraday

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

✚ Loi de Maxwell-Ampère:

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

✚ Loi de conservation du flux magnétique :

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

Avec :

\vec{E} : Champ électrique en (v/m)

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

\vec{H} : Champ magnétique en (A/m).

\vec{j} : Densité de courant en (A/m^2).

\vec{D} : Induction électrique en (C/m^2).

ρ : Densité de charge volumique en (C/m^3).

$\frac{\partial D}{\partial t}$: Densité de courant de déplacement en (A/m^2).

A ces relations il faut rajouter les relations constitutives supplémentaires afin d'améliorer les équations de Maxwell en fonction des propriétés caractéristiques des milieux.

II.3 Conditions aux limites

Les équations de Maxwell permettent de déterminer la manière dont les composantes du Champ électromagnétique se conservent (ou non) à l'interface de deux milieux présentant des propriétés diélectriques différentes. Il est alors d'usage de décomposer le champ Électromagnétique en deux composantes particulières : l'une tangente, et l'autre normale à la surface de séparation. Ce procédé a permis de dégager des résultats importants à propos des conditions aux Limites à la surface de séparation des deux milieux. Ces résultats concernent les composantes Tangentielles et normales, à la surface de séparation du champ électromagnétique. [18]

II.4 Conditions d'interfaces

Les équations de Maxwell permettent de déterminer la manière dont les champs se conservent (ou non) à l'interface de deux milieux présentant des propriétés diélectriques ou magnétiques différentes.

Ce procédé a permis de dégager des résultats importants à propos des conditions aux limites à la surface de séparation des deux milieux présentant des propriétés diélectriques ou magnétiques différentes.

Il est alors d'usage de décomposer le champ électrique (ou magnétique) en deux composantes particulières : l'une tangente à la surface de séparation et l'autre normale à cette même surface.[19]

II.5 Modèle mathématique

La distribution du champ électrique peut être obtenue par approximations des équations de Maxwell. Ces approximations prennent différentes formes selon les propriétés matérielles de L'équipement.

Le potentiel en un point joue un rôle important dans l'obtention de toute information concernant le champ électrique en ce point.

Le logiciel de calcul détermine le potentiel électrique pour obtenir la distribution de champ en résolvant l'équation aux dérivées partielles suivante :[20]

$$-div \varepsilon \overrightarrow{grad} V - div \sigma \overrightarrow{grad} V = 0 \quad (II.5)$$

Dans le cas où l'isolant ne contient aucun défaut. Ce cas nous permet, dans une première étape, de valider le résultat de calcul analytique. Les calculs analytiques sont effectués selon les équations suivantes :[21]

✚ Potentiel électrique:

$$V(r_i) = \frac{V_n}{\ln\left(\frac{R_t}{r_c}\right)} \ln\left(\frac{R_t}{r_i}\right) \quad (II.6)$$

✚ Champ électrique :

$$E(r_i) = \frac{V_n}{r_i \ln\left(\frac{R_t}{r_c}\right)} \quad (II.7)$$

Tel que :

V_n : la tension nominale de câble (kV),

R_t : Rayon de la couche isolant (mm),

r_c : Rayon de la partie conductrice (mm),

r_i : le pas (mm).

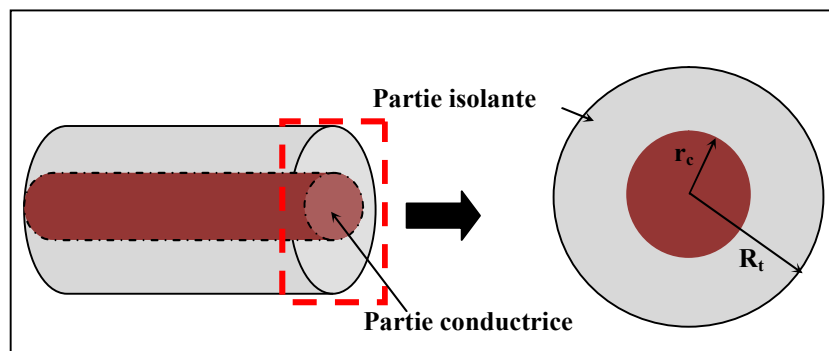


Figure II.1. Câble électrique.

Les deux équations (II.6 et II.7) sont utilisées dans le dernier chapitre pour valider notre travail.

II.6 Méthodes numériques

Les principales méthodes numériques de calcul du champ sont :

II.6.1 Méthode des Différences Finis (MDF)

la méthode des différences finies est une technique courante de recherche de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres.[22]

Leur principe c'est de découper au moyen d'une grille carrée dans le cas bidimensionnel et une grille cubique dans le cas tridimensionnel, l'équation à résoudre est écrite pour chaque point ou nœud de maillage, on obtiendra un système d'équations possédant un nombre d'équations égal au nombre de nœuds de la grille. Cette méthode est basée sur la transformation de l'opérateur différentiel en un opérateur aux différences où chaque dérivée est approchée par une différence de valeurs de l'inconnue aux nœuds du domaine de résolution. [23]

II.6.1.1 Avantages de la MDF

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

II.6.1.2 Inconvénients de la MDF

- ✚ Elle n'est pas applicable pour des problèmes en trois dimensions,
- ✚ Enfin, cette méthode nécessite la connaissance du potentiel, sur toute la frontière entourant le domaine étudié. Ce qui n'est pas toujours le cas.

II.6.2 Méthode des Éléments Finis (MEF)

La méthode des éléments finis (MEF) permet de résoudre de manière discrète et approchée ce problème ; on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable.

La méthode des éléments finis est consacrée pour les géométries complexes et aux matériaux non linéaires Elle subdivise le domaine d'étude en domaines élémentaires appelés éléments finis, les propriétés interpolées des éléments finis : ceux-ci permettent d'approcher des fonctions définies sur un domaine en maillant ce domaine puis en choisissant sur chaque maille des combinaisons linéaires de fonctions de forme. 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. L'inconnue de chaque élément est exprimée par des fonctions d'interpolation simples en fonction des valeurs de l'inconnue en chacun des sommets de cet élément. En tenant compte des conditions de continuité à l'interface et au passage entre les milieux.

Le principe de la méthode des éléments finis est la transformation de l'équation aux dérivées partielles (EDP) qui régit le problème traité à un système d'équation algébrique dont la résolution permet de définir l'inconnu à un ensemble de points (nœuds) de la discrétisation. Consiste à découper la géométrie en un nombre fini du domaine (sous domaine).

Il existe différents types d'éléments :

- ✚ Élément linéique (1D),
- ✚ Élément surfacique (2D),
- ✚ Élément volumique (3D).

II.6.2.1 Avantages de la MEF

- ✚ La flexibilité est l'un des plus importants avantages 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 final d'équations sont symétriques ce qui simplifie grandement la résolution de celui-ci.
- ✚ La programmation de la méthode est assez simple surtout lorsqu'il s'agit de tenir compte de l'introduction des conditions aux limites.
- ✚ La M.E.F a fait ses preuves dans beaucoup de domaines en ingénierie.
- ✚ 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.[24]

II.6.2.2 Inconvénients de la MEF

- ✚ 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.
- ✚ 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.

II.6.3 Méthode des éléments finis de frontière (MEFF)

L'utilisation des équations intégrales de frontière dans la résolution des problèmes afin de déterminer la distribution de champ électrique, est assez ancienne.[25]

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. [26]

En général, dans les problèmes de calcul de potentiel et de champ électriques, nous trouvons deux formulations différentes pour la MEFF : 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. Nous présenterons la formulation indirecte qui est utilisée jusqu'à maintenant pour le calcul de champ et du potentiel en tenant compte de la pollution.[27]

II.6.3.1 Avantages de la MEFF

- ✚ La discrétisation du milieu infini ne cause plus de problème, puisque tout est ramené sur la frontière du milieu étudié.
- ✚ La transformation des équations aux dérivées partielles en équations intégrales, réduit d'un la dimension du problème, et même de deux si le problème présente une symétrie de révolution.
- ✚ Lorsqu'une modification au niveau de la géométrie intervient, il n'est pas nécessaire de reconsidérer tout le maillage comme pour la MEF.

Il suffit seulement de modifier les paramètres de la portion de la frontière considérée, puisque la formation de base des équations intégrales est exempte de toute référence à des géométries particulières.

- ✚ 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.

II.6.3.2 Inconvénients de la MEFF

- ✚ La méthode indirecte ne permet pas de calculer directement le potentiel 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.7 Décharge partielle

Si le dispositif est alimenté en alternatif, les décharges successives vont progressivement détériorer l'isolant solide ou liquide, d'abord à la surface de la cavité, puis plus en profondeur, pouvant conduire finalement à un claquage aux bornes du diélectrique et à la destruction de l'installation. L'absence, ou la présence, de décharges partielles peut être contrôlée par des méthodes de détection, aussi bien pendant la fabrication que, sous certaines conditions, pendant la durée de vie de l'installation. [28]

Plusieurs classifications des Décharges Partielles (DP) ont été proposées, qui varient suivant le critère de sélection utilisé. Ainsi par exemple, Kreuger [29], classe les décharges en fonction de leur localisation et définit ainsi quatre catégories :

- ✚ Les décharges « internes » qui apparaissent aux endroits où la rigidité diélectrique est faible, par exemple une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide.
- ✚ Les décharges « de surface » qui sont des décharges prenant naissance au point « triple » métal /isolant/air lorsqu'y a un défaut (goutte d'eau, pollution, poussière..) et se développant en surface de l'isolant. Elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique.
- ✚ Les décharges « couronne » qui prennent naissance dans le matériau aux endroits où le champ électrique est très renforcé (par exemple par un effet de pointe). La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe.
- ✚ Les arborescences dans les solides : un "arbre électrique" prend naissance sur un défaut de l'isolation. Il y a ensuite croissance d'une structure ramifiée comprenant différentes branches qui sont le siège de décharges.

Les arborescences constituent le phénomène de claquage à long terme. On peut les classer suivant 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. [30]

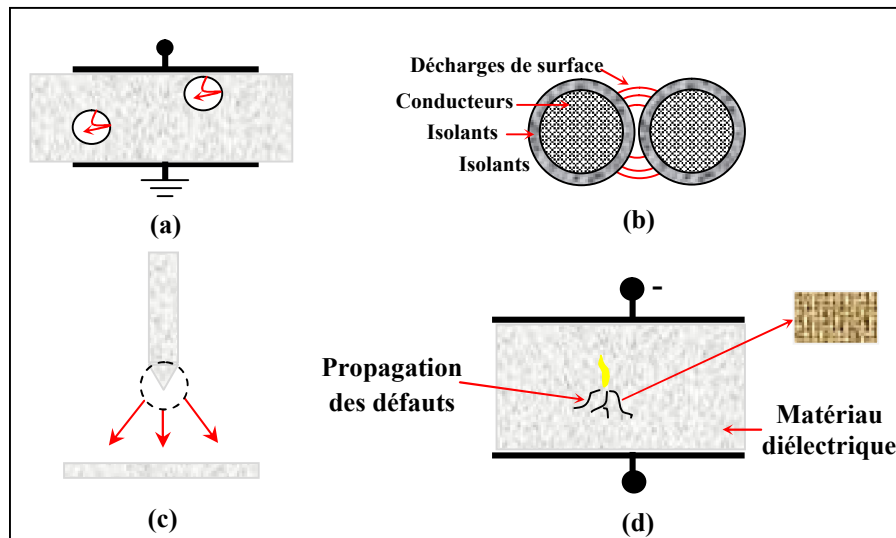


Figure II.2. Différents types de décharges selon Kreuger :
a) interne, b) surface, c) couronne et d) en arborescence.

II .7.1 Conséquences des décharges partielles

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

- ✚ Contrainte thermique générée localement par la décharge qui peut entraîner une carbonisation de l'isolant.
- ✚ Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (ozone, oxydes d'azote et acide nitrique notamment).
- ✚ Erosion mécanique due au bombardement par des espèces chargées et aux attaques acides.

Ces contraintes provoquent une dégradation du matériau isolant. Lorsque l'isolant est trop abîmé, un arc électrique complet se produit entre deux phases ou entre une phase et le neutre, on dit alors qu'il y a amorçage. En général, cet amorçage conduit à la destruction de l'équipement.

II .7.2 Caractérisation des décharges partielles

Les caractéristiques des deux principaux types de décharge partielle (DP): les décharges dans une cavité et les décharges de type « couronne ».

II.7.3 Origines d'une décharge partielle

L'isolation d'un câble souterrain n'est jamais parfaite. Non seulement, on y trouve des défauts qui découlent directement de la production du câble mais en outre, l'isolation vieillit inéluctablement. Lorsqu'un câble est en service, son isolation est le siège de contraintes thermiques, électriques, mécaniques et enfin de contraintes liées à l'environnement. Au cours du temps. [31]

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. [4]

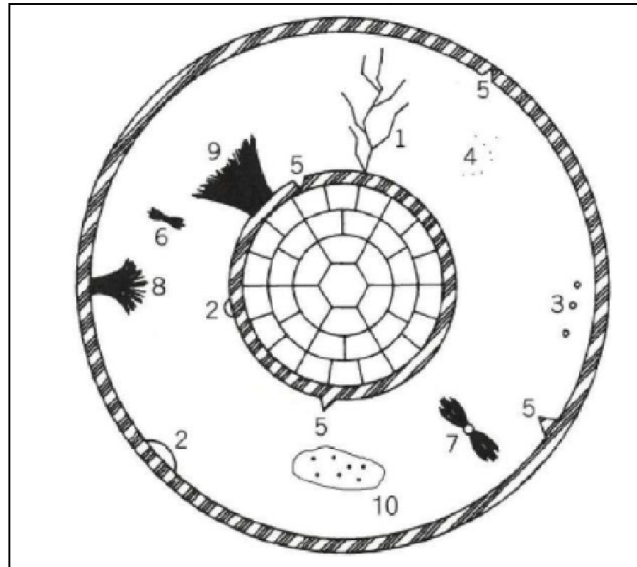


Figure II.3. Imperfections dans un câble monophasé.

II.8 Implémentation du modèle dans le logiciel COMSOL

Pour la simulation des caractéristiques électromagnétiques des lignes électriques, il existe plusieurs facteurs qui influent sur ce phénomène tels que : la tension et l'intensité du courant électrique la nature des matériaux des câbles électriques, la distance entre les câbles...etc. Dans le but d'expliquer le phénomène d'interaction magnétique entre les lignes de champ et le sol et la présence des défauts électriques sur les caractéristiques électromagnétiques du milieu, nous allons faire une simulation numérique avec la méthode des éléments finis.[32.33]

Cette étude nécessite l'utilisation deux logiciels suivants :

✚ COMSOL Multiphysics,

✚ MATLAB

II.9 Processus de simulation par le logiciel COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics, fondé sur la méthode des éléments finis permis d'effectuer le calcul du champ électrique dans le domaine électrostatique ainsi le champ magnétique dans le domaine magnétostatique. La possibilité de savoir la valeur du champ

magnétique à n'importe quel point du domaine, permettra une étude de manière exacte dans cette géométrie, et une bonne distribution du champ de n'importe qu'un système complexe avec la résolution des méthodes numériques qui peuvent apporter des solutions acceptables et simplifiées.

Comsol Multiphysics contient les différentes étapes du processus de simulation « définition de la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir le domaine physique d'étude, résolution et l'exportation des résultats » sont intégrées dans une interface graphique, représentée dans la figure II.4. [1]

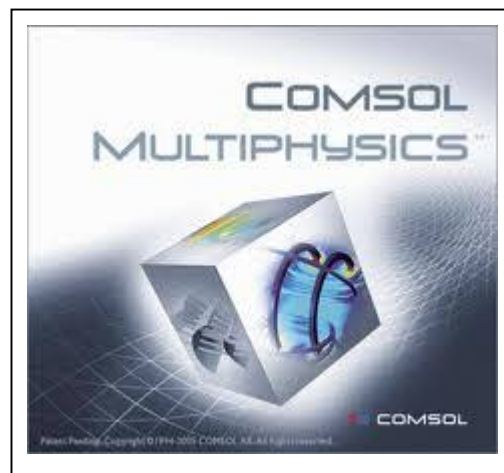


Figure II.4. Présentation du logiciel COMSOL Multiphysics.

II.10 Description du logiciel et étape de résolution

La simulation numérique est une approche donnant la possibilité aux chercheurs d'analyser le comportement de plusieurs phénomènes qui, par leur complexité, échappent au calcul classique.

La modélisation, quant à elle, est la mise en équations de ces phénomènes, pour la large gamme de problèmes scientifiques basés sur des équations aux dérivées partielles, COMSOL Multiphysics® peut servir d'une manière puissante et interactive à les résoudre en se fondant sur la méthode des éléments finis ou encore interagir avec des logiciels de programmation tels que Matlab®.

Comsol Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multiphysiques.[34]

Par ailleurs, le logiciel ne demande pas de connaissances approfondies dans les mathématiques ou les analyses numériques. En effet, toutes les équations nécessaires à la résolution sont déjà prédéfinies. Il suffit alors de préciser dans quel domaine (électromagnétisme, transfert de chaleur, acoustique,) et dans quel régime (stationnaire, temporel, ...), le modèle doit être construit.[35]

Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis. La modélisation avec COMSOL Multiphasiques se résume en six étapes : [36]

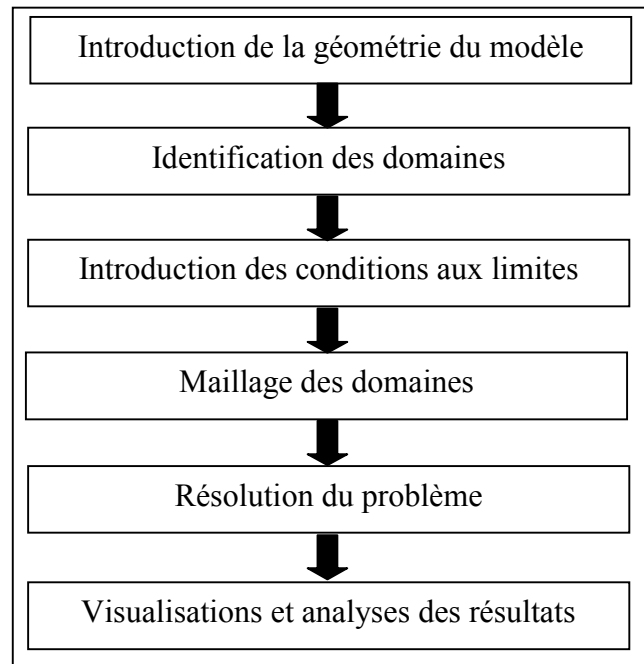


Figure II.5. Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol.

II.10.1 Choix du modèle

Nous allons commencer par le choix du modèle. Lancez donc le module électrostatique (es) dans le navigateur de modèle. Nous allons ici nous limiter à une étude à 2D.

II.10.2 Géométrie

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (câble électriques).

II.10.3 Introduction des propriétés des domaines

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : la constante diélectrique, la conductivité, etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié.

Pour résoudre les Équation 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 condition aux limites pour chacun de ces segments. Les options seront différentes suivant qu'il s'agisse ou non d'une frontière intérieure au système.[37]

II.10.4 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. [38]

II.10.5 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.[38]

II.10.6 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 de courant, de champ de flèches, etc...[37]

II.11 Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics

Le principal but de la création de COMSOL Multiphysiques est d'avoir un logiciel où les scientifiques et les ingénieurs peuvent formuler, à l'aide de l'interface utilisateur, n'importe quel système d'équations aux dérivées partielles (EDP) sur la base des lois de la physique et surtout de se baser sur les zones les plus communes dans la physique et en génie.

Cette interface est basée sur un interpréteur d'équation qui formule une discrétisation par éléments finis, "à la volée", par le système entièrement couplé.

Des interfaces de modélisation prédéfinis pour les différents domaines de la physique appliquée, y compris des couplages multi physiques.

Grâce à la technologie sous-jacente, les propriétés, les sources, les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et leurs dérivées partielles.

Les équations complètes sont également disponibles dans l'interface utilisateur pour une manipulation.[36]

Il a été retenu pour les raisons suivantes :

- ✚ Il est spécialisé dans la résolution de problèmes électromagnétiques,
- ✚ Il permet de prendre en compte la présence de plusieurs diélectriques,
- ✚ Il permet de modéliser une surface conductrice de faible épaisseur (couche de pollution),
- ✚ Il permet de travailler en régime statique ou quasi-statique (50 Hz),
- ✚ Enfin, il permet une modélisation rapide du problème.[39]

II.12 Conclusion

La méthode des éléments finis semble présenter des avantages importants par rapport aux autres méthodes. Elle s'adapte facilement aux différentes géométries et tient compte aussi des propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux. C'est pourquoi cette méthode a été retenue pour réaliser les différentes simulations dans le chapitre suivant, par l'exploitation du logiciel COMSOL pour la résolution. Après simulation les résultats peuvent être exportés même vers l'éditeur MATLAB.



Chapitre III

"Résultats et Interprétations"

III.1 Introduction

Pendant les dernières décennies, beaucoup de chercheurs dans le monde entier ont essayé d'analyser et d'étudier les caractéristiques magnétiques lignes électriques des câbles électriques souterrains ainsi que les interactions produites avec la matière organique qui indiquent les effets nocifs, et leurs risques sanitaires potentiels qui peuvent résulter de l'exposition humaine au champ électromagnétique.

La modélisation est une étape importante dans toute simulation numérique. En particulier, elle permet, en définissant et en étudiant les caractéristiques géométriques et physiques du problème étudié.

L'objectif principal de cette simulation des lignes électriques souterraines avec la méthode des éléments finis est de calculer la distribution du potentiel et du champ électrique pour autour et près les cavités ainsi qu'une évaluation de la pollution électromagnétique des câbles électriques dans deux cas et en présence des défauts.

III.2 Modélisation d'un câble électrique souterrain

Une très bonne modélisation des caractéristiques des lignes électriques dépend de plusieurs paramètres comme: les caractéristiques des câbles électriques (conductivité, forme du fil, section transversale,...etc), voir figure I.1 (chapitre I). L'isolation du câble est en polyéthylène haute densité utilisé de notre travail. Les caractéristiques physiques du câble choisi selon la référence bibliographique [21], sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.1. Caractéristiques physiques du câble utilisé.

Valeur efficace de la tension nominale	12kV
Rayon de l'âme	3mm
Epaisseur de la couche S/C sur l'âme	1mm
Epaisseur de l'enveloppe isolante	7mm
Epaisseur de la couche S/C sur l'isolant	1mm
Ecran métallique	20x0.1 mm
Epaisseur de la gaine de protection en PVC	2.5 mm
Facteur de pertes diélectriques	$4 \cdot 10^{-3}$
Conductivité électrique	$10^{-12} \Omega \text{ cm}^{-1}$
Conductivité thermique	0.286 W/(m.°K)
Chaleur spécifique	2.08 J/(cm ³ .°K)

III.3 Simulation

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (câble). Se compose ce câble de plusieurs couches par exemple couche e isolant et protection PVC etc... Avec des hypothèses simplificatrices.

Comsol multiphysics utilise la méthode des éléments finis dont le principe est décrit au chapitre II (figure II.5). La modélisation et la simulation du câble peuvent se résumer dans les six étapes successives suivantes :

La première étape consiste à définir la géométrie de notre système (câble) en deux dimensions, suivant le tableau III.1, avec la présence d'une cavité de diamètre de $20\mu\text{m}$ dans le volume du domaine d'étude et dans la position désirée, voir figure III.1.

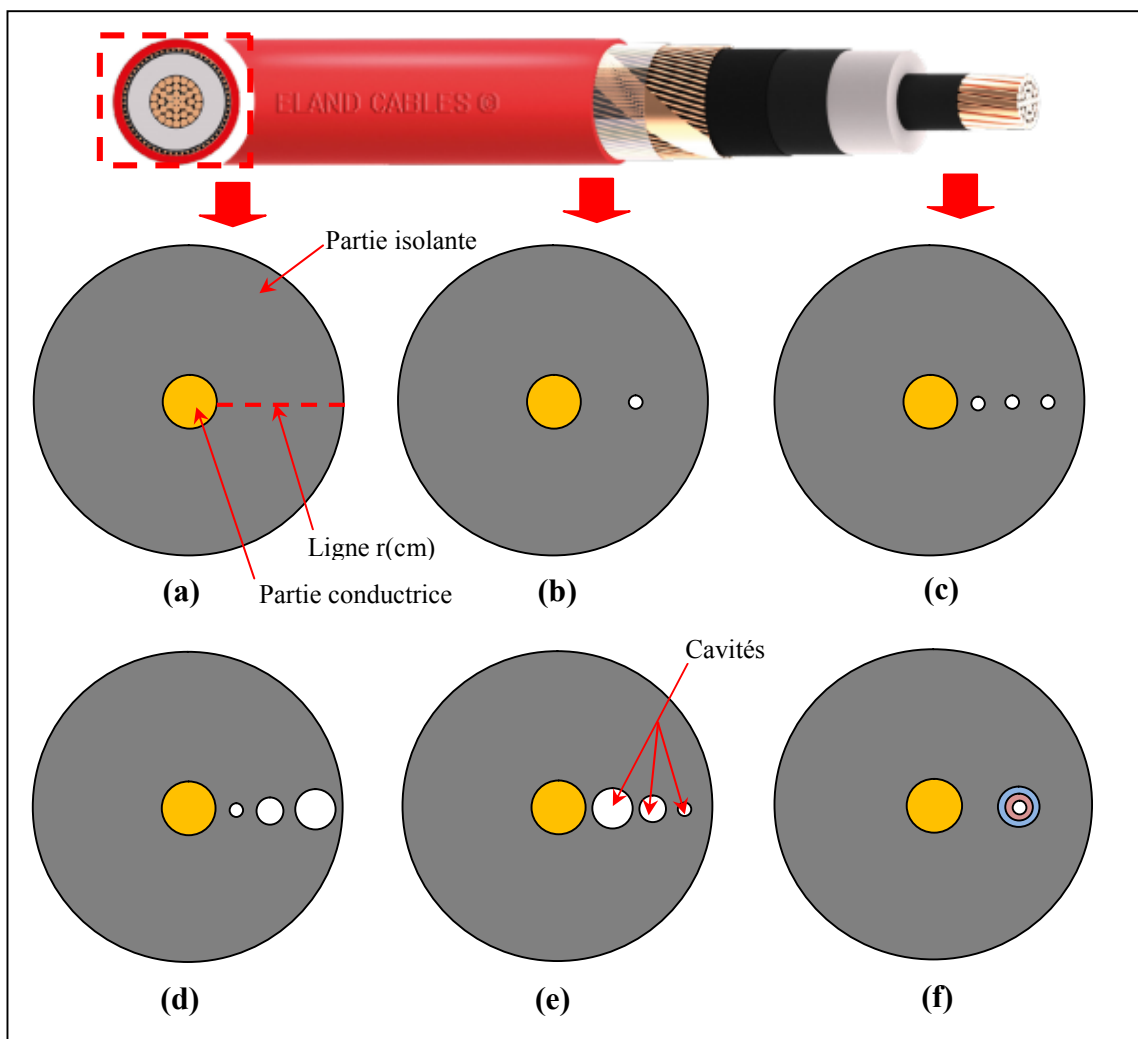


Figure III.1. Différentes configurations du câble utilisé dans notre travail.

(a) **Sans défaut**, (cas propre), **Avec défauts** ((b) Présence d'une cavité, (c) Avec trois cavités identiques (d) Trois cavités non-identiques ascendante (e) Trois cavités non-identiques descendante, (f) une cavité doublée).

✚ La deuxième étape porte sur la définition des propriétés électriques des matériaux présents. Cela consiste à définir les permittivités relatives et les conductivités volumiques pour chaque partie (la partie conductrice à la partie isolante), (Figure III.1),

✚ La troisième étape définir les conditions aux limites qui se traduisent par le potentiel imposé sur chaque électrode, pour l'électrode active un potentiel constant de valeur 12 kV et l'électrode de terre 0V, (conditions de Dirichlet),

✚ La quatrième étape, porte sur la densité des éléments finis (maillage) est important pour les régions critiques (par exemple proches de les cavités) où une plus grande précision est exigée, car les propriétés électriques des matériaux sont très changeantes. En effet, nous avons considéré 1122 éléments dans le cas propre (sans défaut), et 4488 éléments après le raffinement, avec un temps de calcul 0.421s.

Pour les autres cas étudiés sont mentionnées dans la figure (III.2 & III.3) et le tableau III.2.

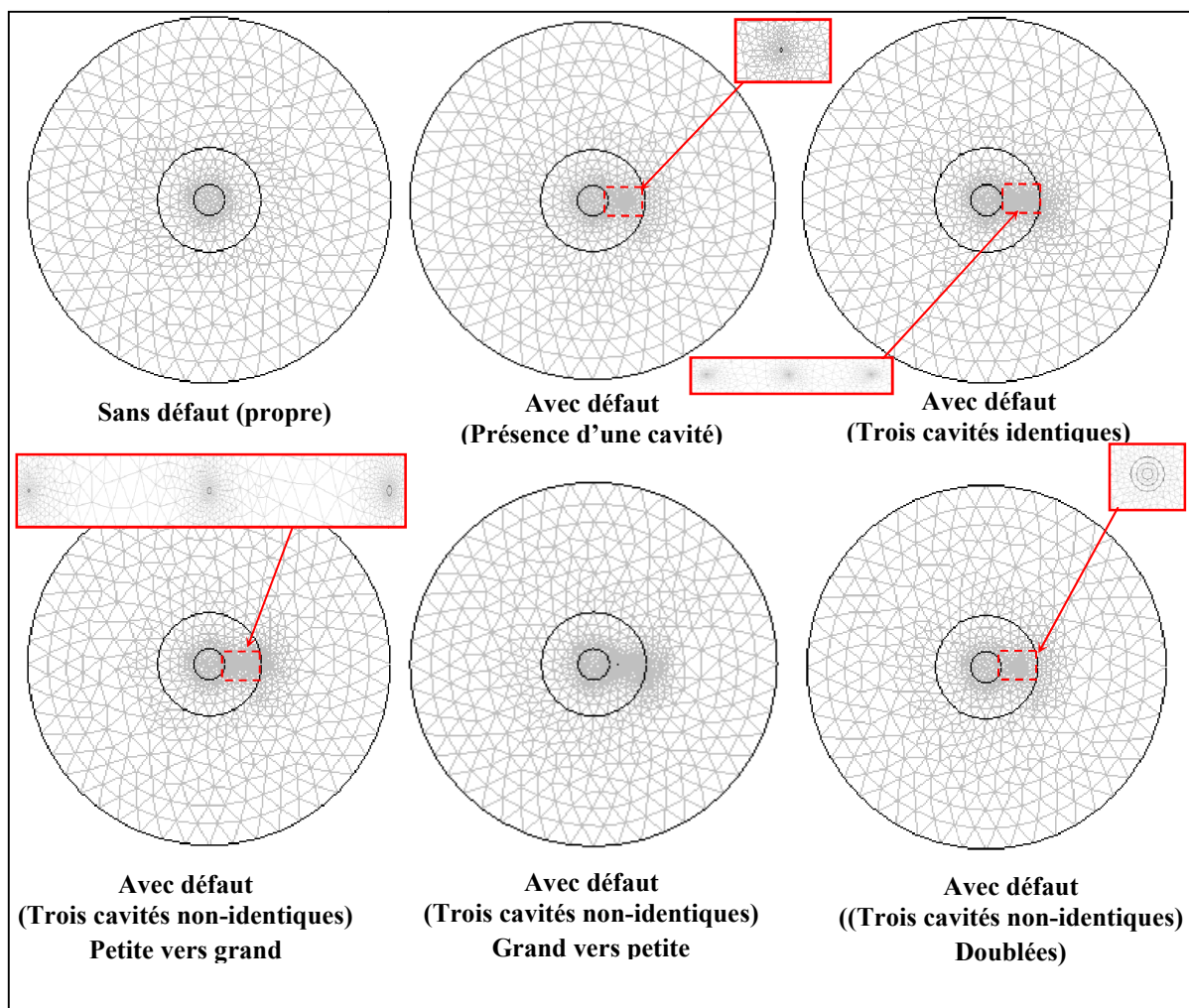


Figure III.2. Discretisation par éléments finis Maillage du câble avant le raffinement.

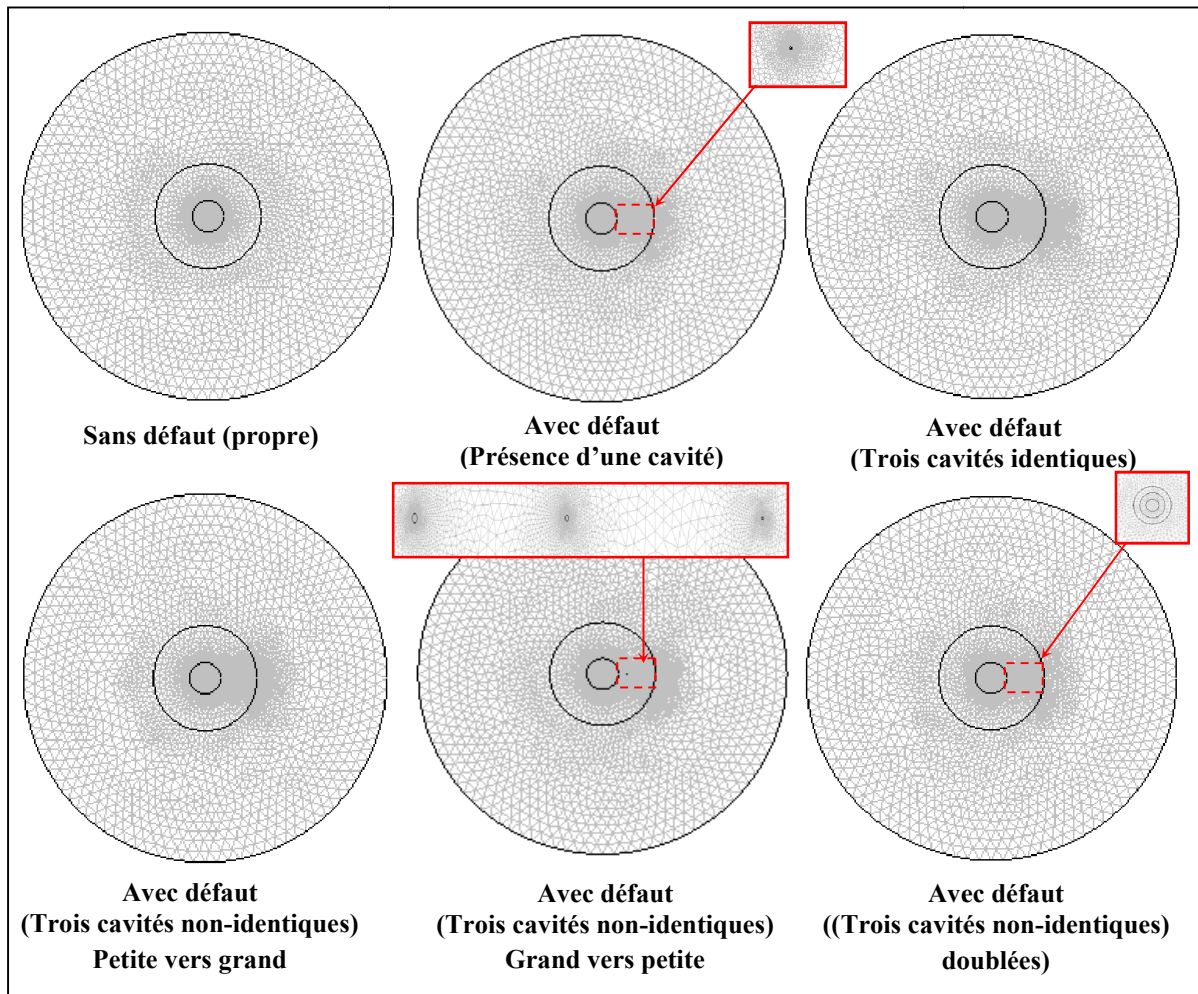


Figure III.3. Discretisation par éléments finis Maillage du câble après le raffinement.

Tableau III.2. Caractéristiques du maillage des domaines ainsi le temps de calculs.

	Sans défaut	Avec défauts				
		Cavités identiques		Cavités non-identiques		
	Propre	Une cavité	Trois cavités	Trois cavités (ascendances)	Trois cavités (descendants)	Cavite doublées
Maillage	1122	1902	3134	3424	3510	2250
Après le raffinement	4488	7602	12536	13696	14040	9000
Temps de calcul (s)	0.421	0.718	1.186	1.265	1.341	0.842

✚ La cinquième étape est consacrée à la résolution du problème par l'application de la méthode numérique et par la construction du système d'équations (équation II.5), et cela en introduisant les facteurs de chaque partie de l'équation.

✚ La sixième et la dernière étape consiste en l'affichage des resultants, comme la distribution de potentiel et de champ électriques, qui sera ensuite emporté vers Matlab pour tracer les courbes nécessaires.

Notre travail sera validé à travers un modèle mathématique qui a été présenté dans le chapitre II.(eq. II.6 &II.7).

III.4 Résultats et discussion

Cette partie est consacrée à l'étude des distributions du potentiel et du champ électriques pour un câble électrique (HTA) souterrain. Nous traçons le potentiel et le champ en fonction de la ligne r_i (mm) illustré dans la figure III.1, pour voir l'impact d'une ou plusieurs cavités cavité (présence d'un défaut de fabrication dans le câble électrique).

Cette dernière étape nous permet de lancer la résolution du problème après avoir bien choisi le type du solveur ainsi que ses paramètres du solveur.

III.4.1 Etude potentiel électrique

Nous presentons dans ce qui suit, la distribution et la répartition du potentiel électrique dans deux cas:

- ✚ Sans défaut,
- ✚ Avec defaults, (une cavité, trois cavités identiques et non-identiques et cavités doubles).

III.4.1.1 Sans default

La figure III.4 représente la distribution du potentiel électrique ainsi les lignes équipotentielle dans le cas propre (aucun défaut),(sans défaut).

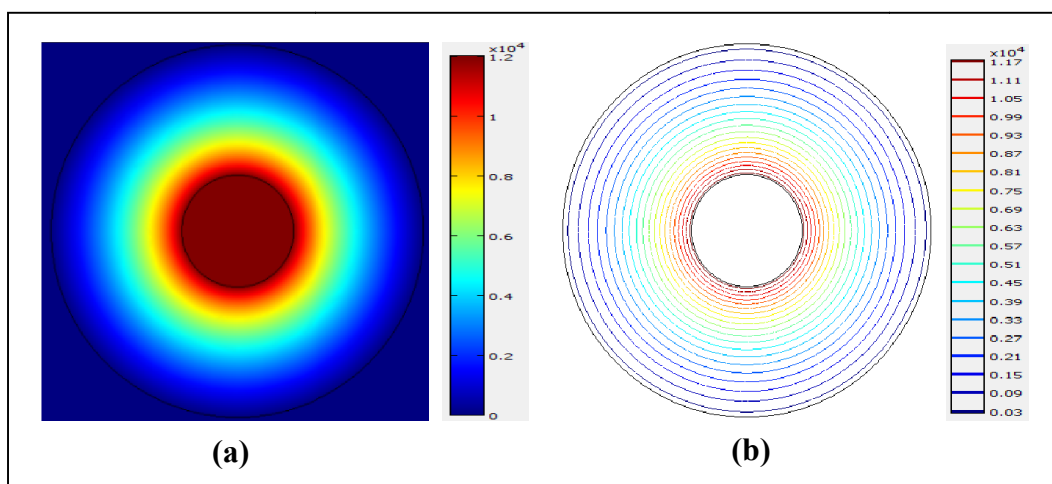


Figure III.4. Distribution du potentiel électrique dans le cas propre (sans défaut), (a) Echogramme, (b) ligne équipotentielle.

La figure III.5 illustre la répartition du potentiel électrique dans le cas propre analytique et numérique.

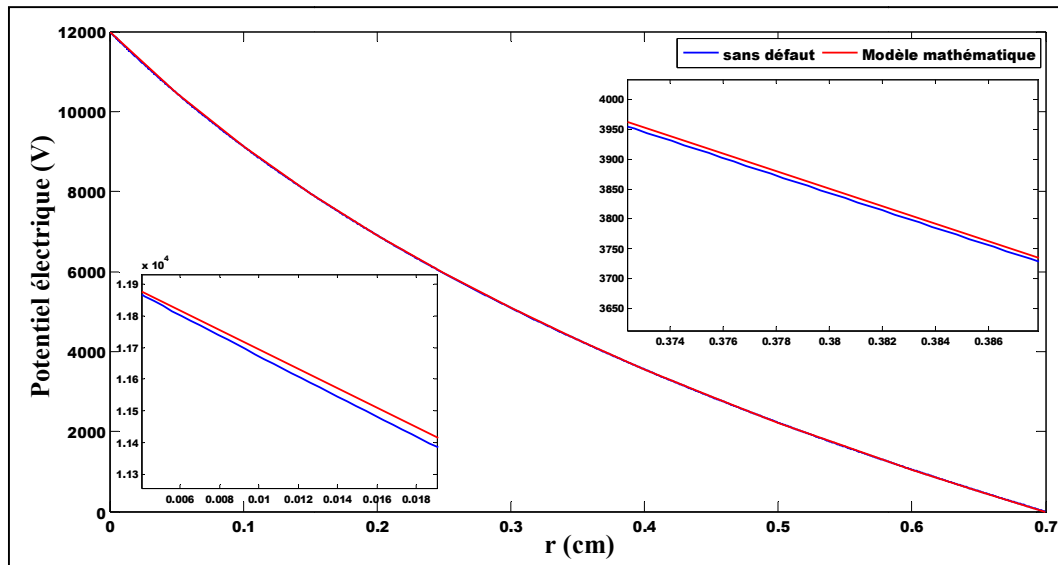
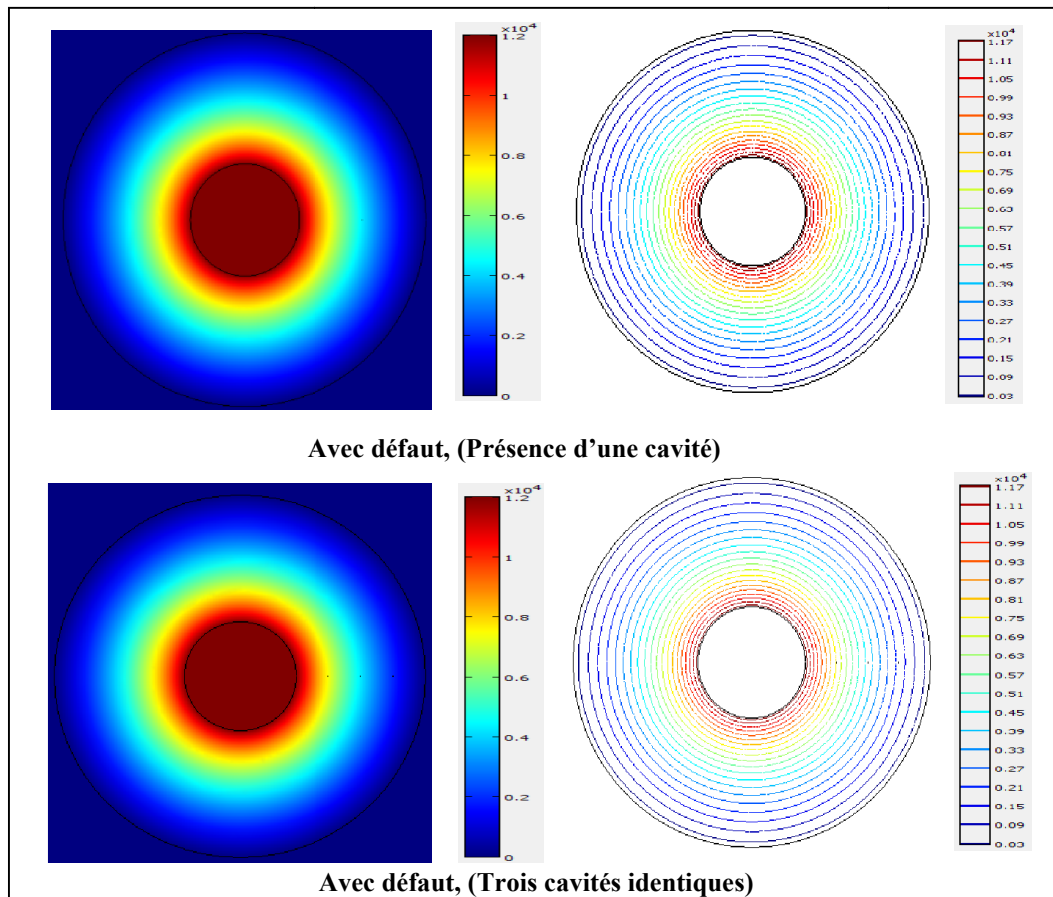


Figure III.5. Distribution radiale du potentiel électrique dans le cas propre, (sans défaut). (Analytique & numérique).

III.4.1.2 Avec défauts

On présente la distribution de potentiel avec et sans défauts dans la figure III.6.



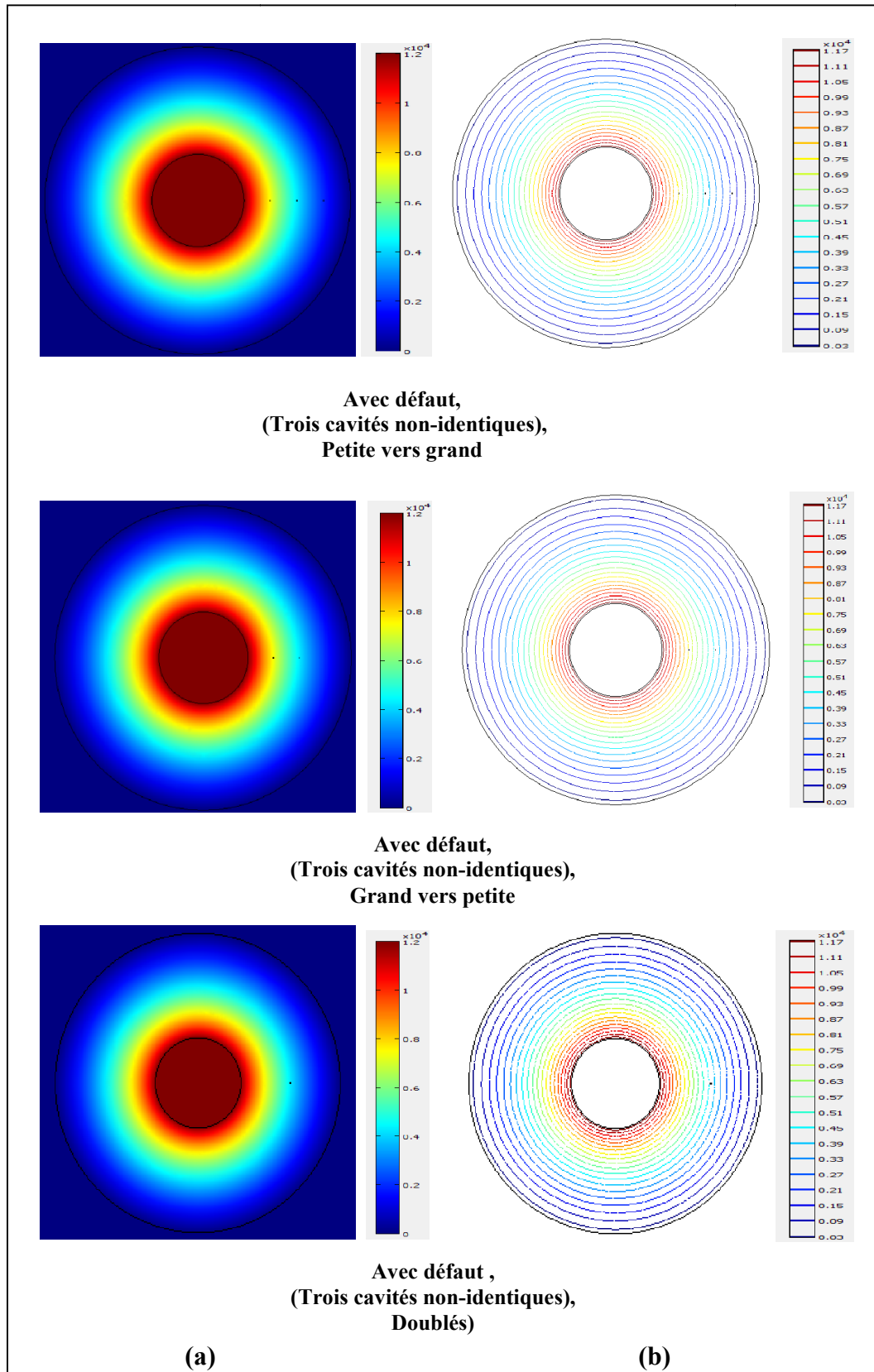
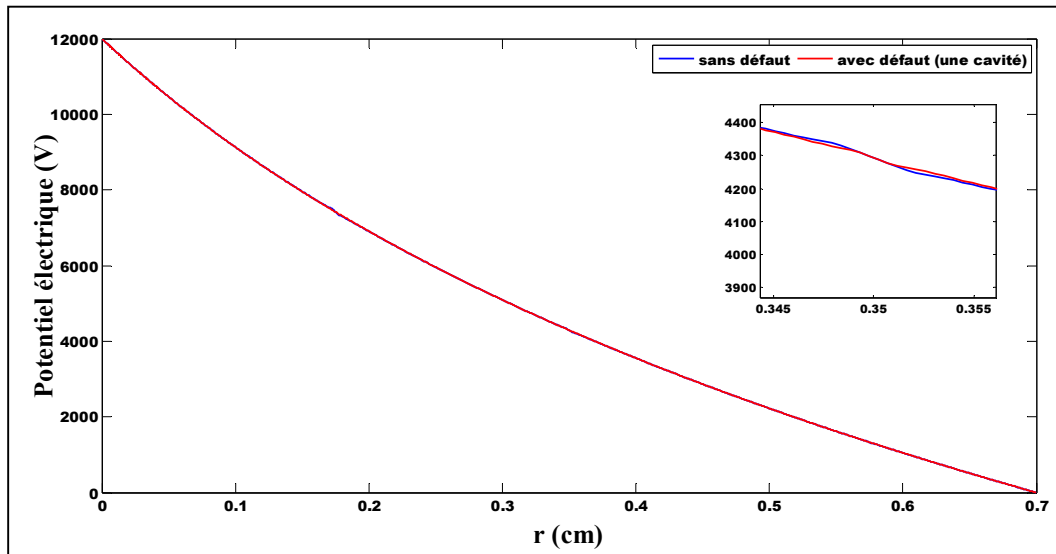
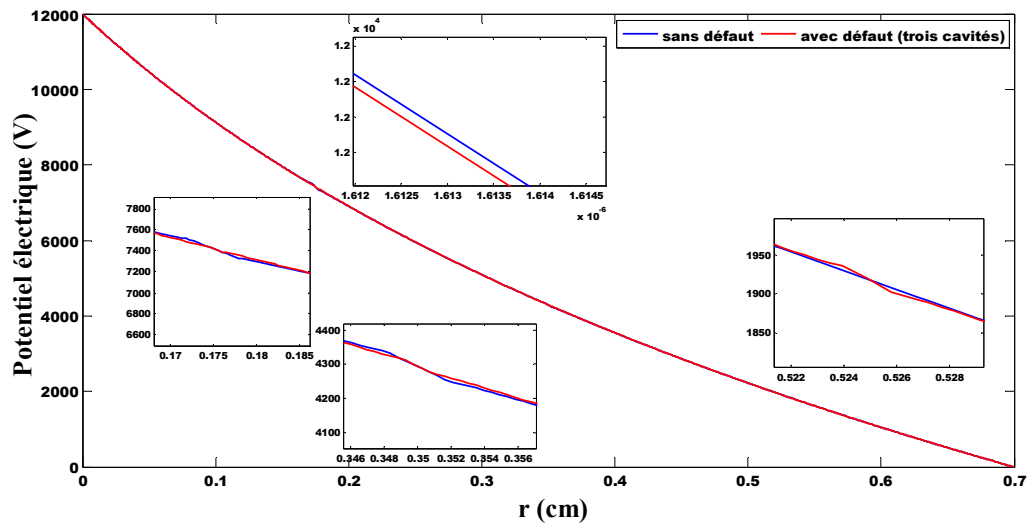


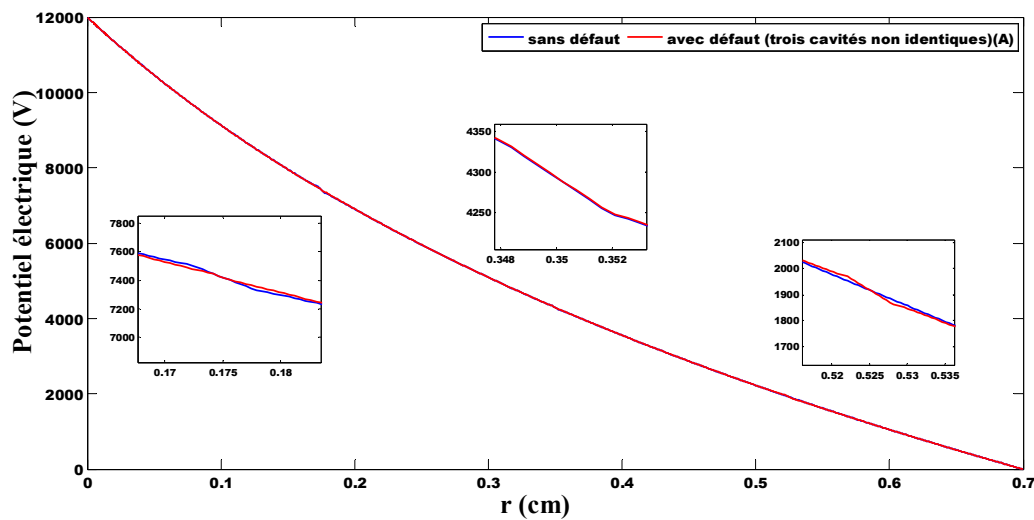
Figure III.6. Distribution du potentiel électrique dans les cas avec défauts, (a) Echo-gramme, (b) ligne équipotentielle.



(a)



(b)



(c)

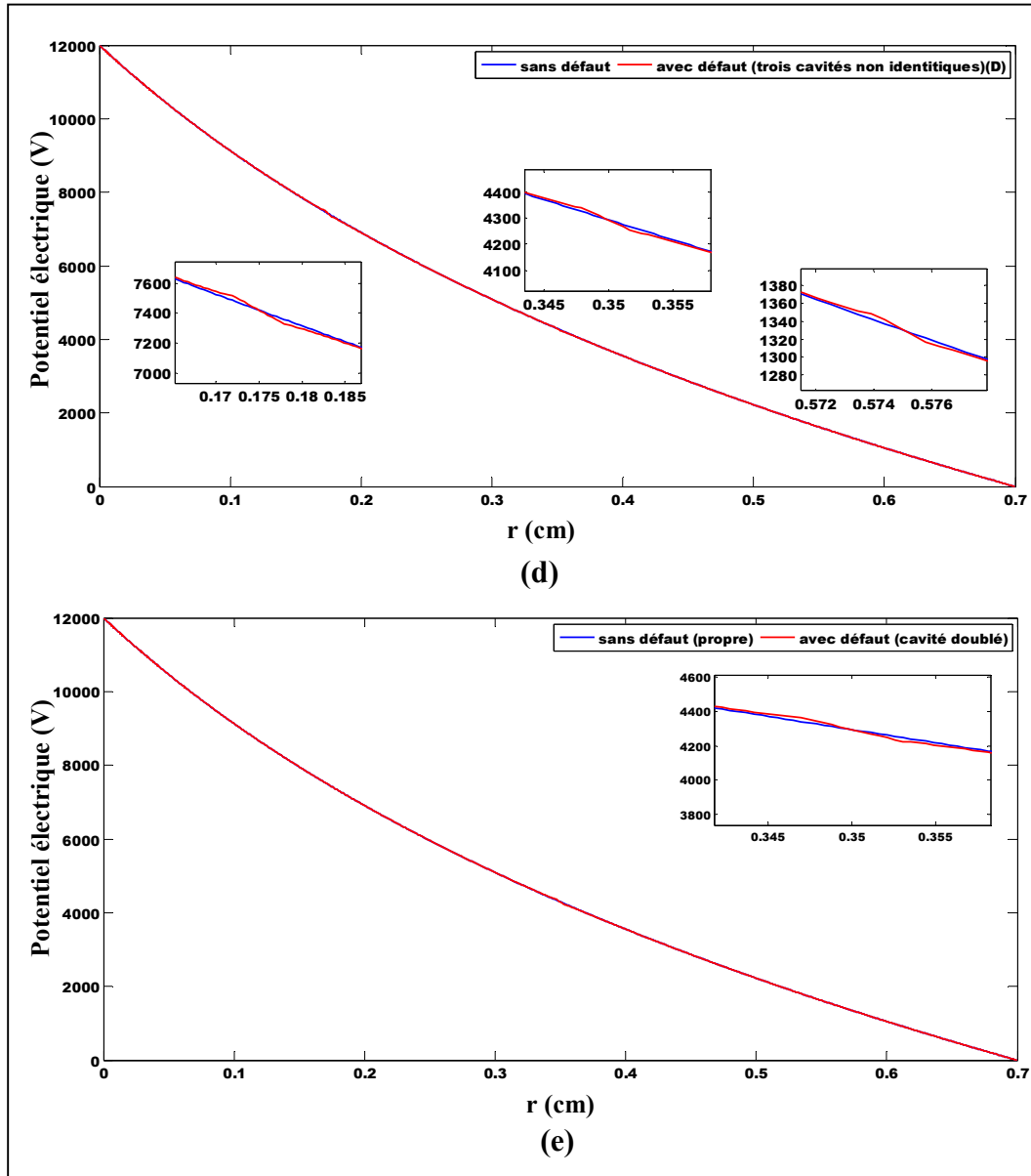


Figure III.7. Distribution radiale du potentiel électrique avec et sans défauts, (a):La présence d’une cavité, (b):Trois cavités identiques, (c):Trois cavités non-identiques, (ascendant), (d):Trois cavités non-identiques, (descendant), (e):Cavités doublés.

Les figures III.7 précédentes montrent la distribution radiale du potentiel électrique avec et sans défauts.

Commentaire

Figure III.4 et figure III.5, c’est le cas où l’isolant ne contient aucun défaut.

Le résultat de calcul par le logiciel comsol montre que, dans la partie isolante, en partant de l’extrémité de l’âme conductrice, et conformément aux lois analytiques, le potentiel électrique

diminue selon une fonction logarithmique. Les résultats de calcul coïncident avec ceux du modèle analytique.

Figure III.6 et figure III.7, c'est le cas où l'isolant contient un défaut. Nous constatons que la tension au niveau de partie conductrice est fixe (âme de câble) 12kV.

Figure III.4 et figure III.6, ces résultats nous pouvons conclure que la distribution de la tension est uniforme et que la zone proche de l'électrode HT est la plus contraignante alors que celle près de l'électrode terre la tension est presque nulle. Aucune différence remarquable n'est observée.

En comparant les résultats relatifs aux potentiels obtenus lorsque le câble est propre (sans défaut) et lorsqu'elle est avec défauts présenté sur la figure III.7, nous observons une légère modification de la distribution du potentiel, dû principalement à la présence d'une ou plusieurs cavités à l'intérieur de l'isolant.

III.4.2 Etude du champ électrique

Dans ce qui suit, nous présentons dans ce qui suit, la distribution et la repartition du champ électrique dans deux cas:

- ✚ Sans défaut,
- ✚ Avec defaults, (une cavité, trois cavités identiques et non-identiques et cavités doubles).

III.4.2.1 Sans défaut

La figure II.8 montre bien la distribution de potentiel dans le cas sans défaut. ((a) Echo-gramme, (b) ligne équipotentielle).

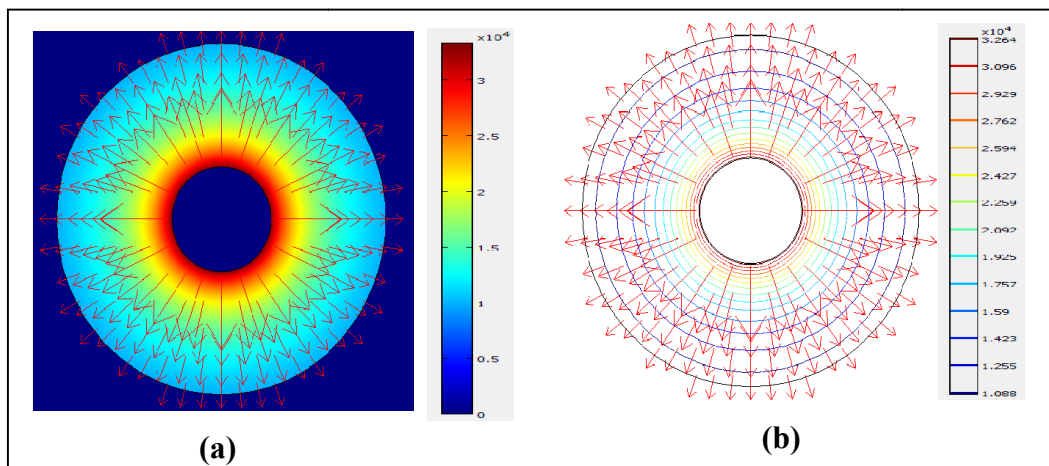


Figure III.8. Distribution du champ électrique dans le cas propre (sans défaut), (a) Echo-gramme, (b) ligne équipotentielle.

La figure III.9 montre la distribution radiale du champ électrique dans le cas sans défaut. (analytique et numérique).

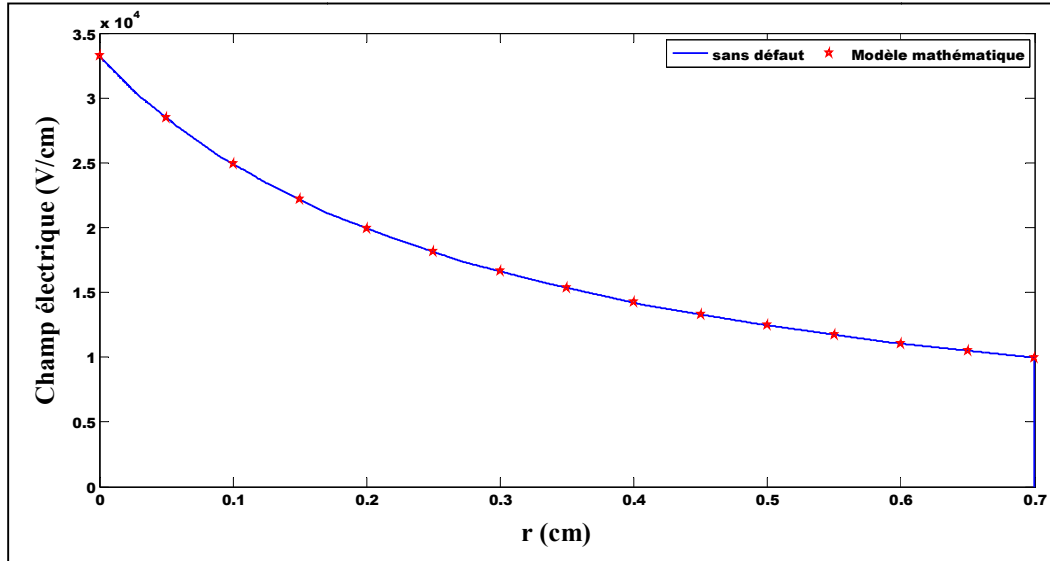
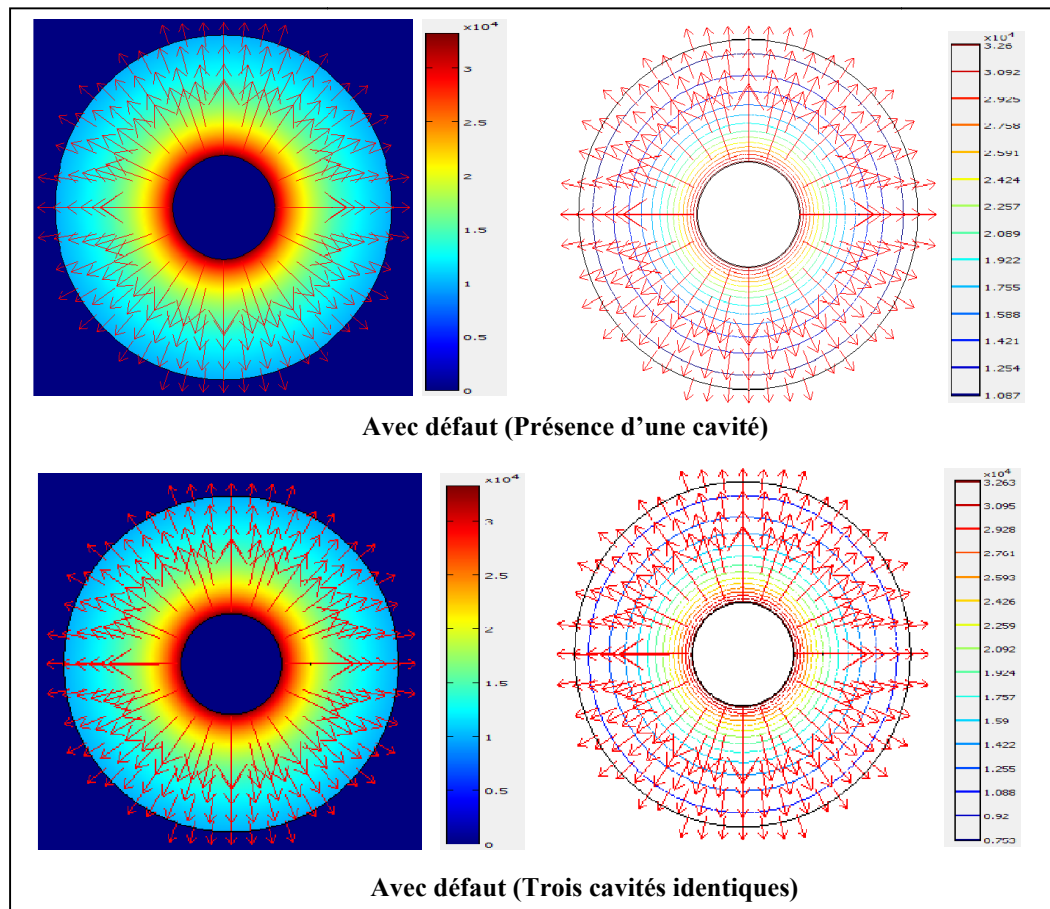


Figure III.9. Distribution radiale du champ électrique dans le cas propre, (sans défaut). (Analytique & numérique).

III.4.2.2 Avec défauts

Pour la même tension (12 kV), Sur la figure III.10, nous présentons la distribution du champ électrique ainsi leur vecteurs dans le cas avec défaut, cinq cas sont étudiés.



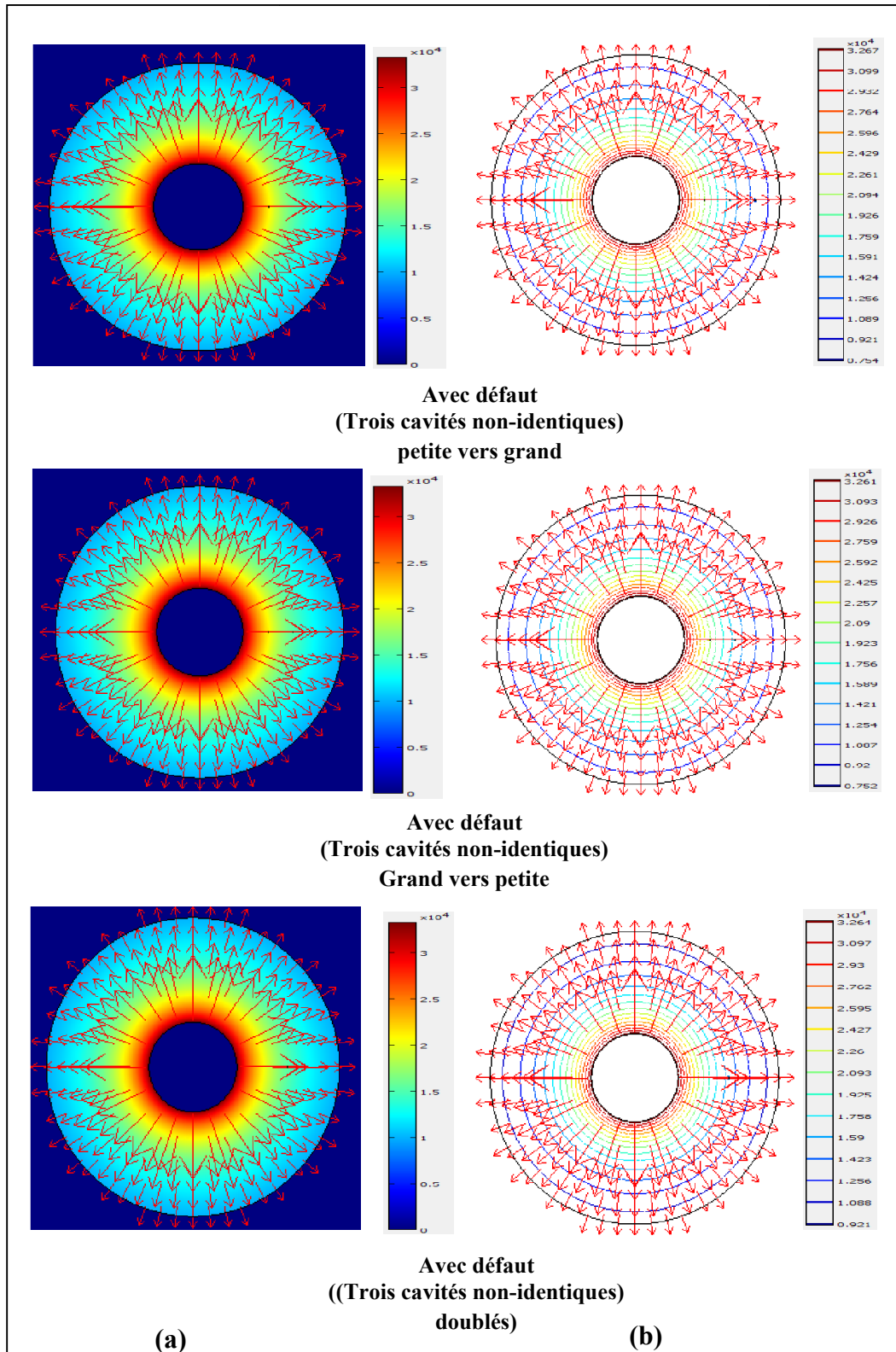
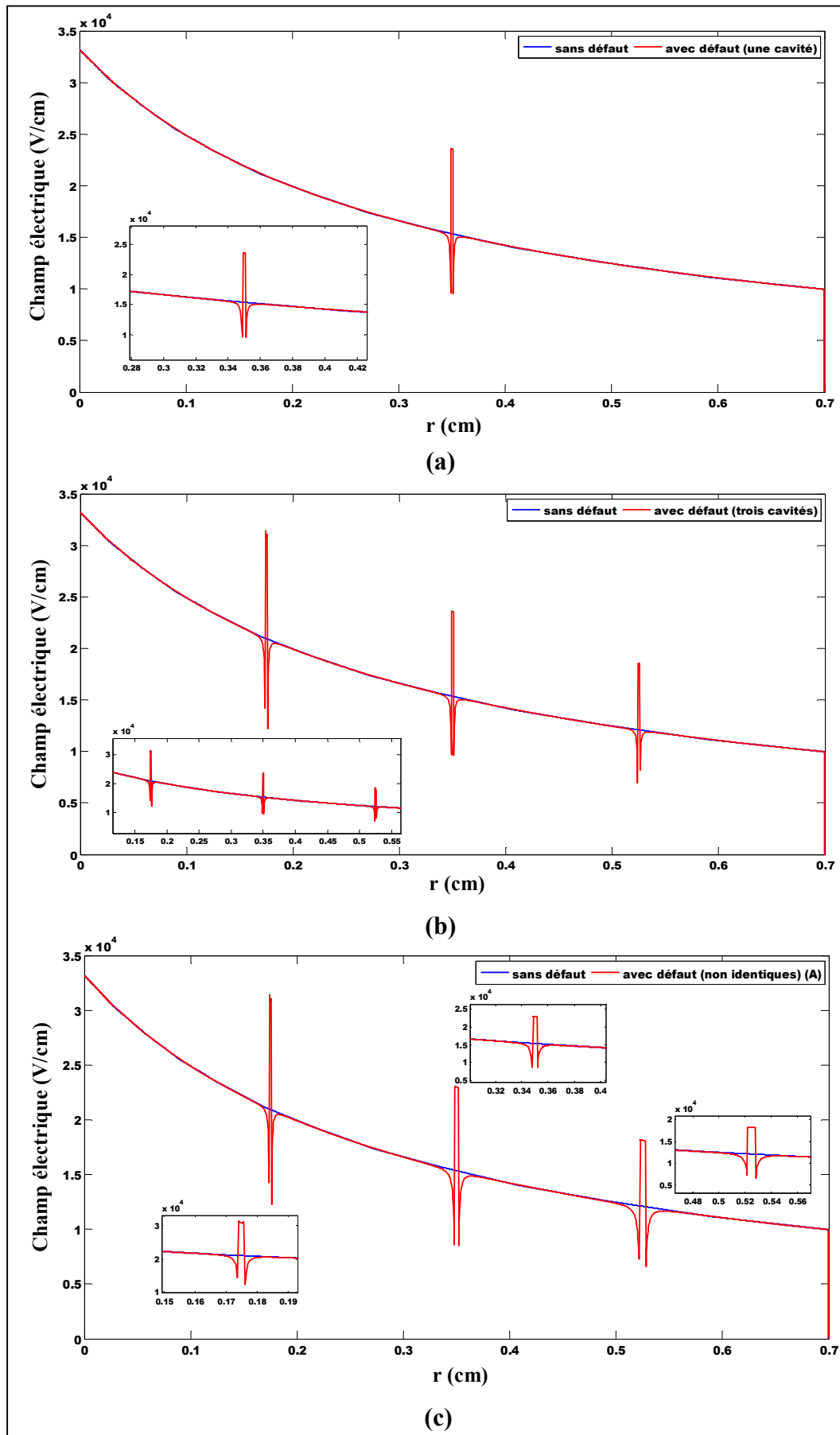


Figure III.10. Distribution du champ électrique dans les cas avec défauts, (a) Echo-gramme, (b) ligne équipotentielle.

La figure III.11 donne la distribution radiale du champ électrique le long de la partie isolante, dans le cas avec défaut, cinq cas sont étudiés.



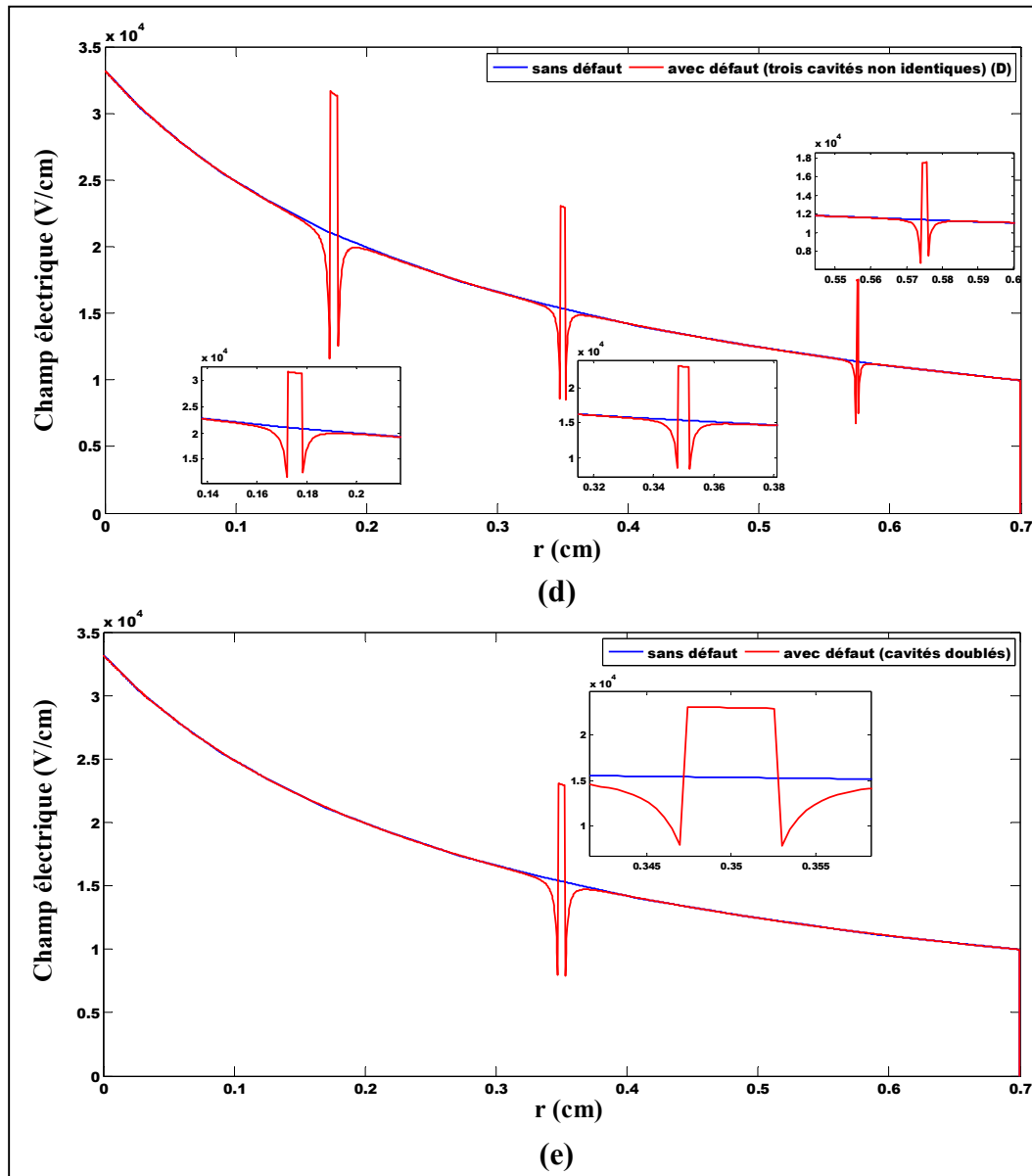


Figure III.11. Distribution radiale du champ électrique avec et sans défauts, (a): La présence d'une cavité, (b): Trois cavités identiques, (c): Trois cavités non-identiques, (ascendant), (d): Trois cavités non-identiques, (descendant), (e): Cavités doublés.

🔧 Commentaire

Pour la figure II.8 et la figure II.10, Le champ électrique est pratiquement nul à l'intérieur de l'électrode active (âme de câble), parce que l'électrode est conducteur. Nous voyons clairement que le champ électrique se concentre uniquement sur l'élément soumis à une tension (électrode HT).

Les lignes de champ électrique divergent de l'électrode active (orientées de l'électrode HT vers les extrémités de câble et convergent vers l'électrode de masse). La distribution des lignes du champ est non uniforme, donc le système devient une configuration pointe-plan.

La figure II.9 montre bien la distribution radial du champ le long de la partie isolante. Elle montre une décroissance uniforme. La solution numérique coïncide avec la solution analytique.

Cependant la figure III.11 Effet de la présence d'un défaut (cavité) de 20 micron de diamètre sur le champ électrique, dans la région où elle est localisée. On voit clairement la distorsion de champ à l'intérieur du défaut.

Une comparaison quantitative du champ électrique, dans le cas avec et sans défaut est montrée dans la figure III.11 (a) elle montre bien une augmentation de la valeur du champ électrique dans un défaut de 20 microns mètre qui se situe juste au milieu de l'isolant. Cette augmentation de la valeur du champ évidemment expliqué par la faible valeur de permittivité de l'air.

Pour un défaut de diamètre de 20 micromètre dans différentes (figure III.11 (b,c,d et e)) positions le long de la partie isolante. Comparé au cas où il n'y a aucun défaut et pour la même position, montre que l'augmentation du champ électrique dans la cavité dépend de sa position dans la partie isolante.

En effet la figure III.11 (b,c,d) montre bien que cette augmentation est plus importante lorsqu'elle est située près du conducteur. Elle laisse conclure que les cavités constituent une situation critique si elles sont situées près du noyau. Le champ électrique est plus renforcé, et peut atteindre le champ du claquage de l'air.

La distribution de champ électrique dans des défauts de différentes tailles (10 μm , 20 μm , 30 μm) est calculée pour une seule position. Les résultats, présentés dans la figure III.11(e), montre que la taille des défauts n'a aucune influence sur la valeur du champ électrique. La différence si au niveau de la largeur du champ électrique en fonction de la taille de défaut (voir figure III.11 (a et e), donc la valeur maximale du champ électrique dans un défaut soit indépendante de la taille du défaut, on peut conclure que les décharges partielles sont plus favorisées dans le cas des grandes dimensions.

Cependant, un défaut de grande dimension est plus dangereux et le système devient moins rigide. (Une décharge partielle se produit à des niveaux de tension plus basse).

III.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis étude la distribution du potentiel et du champ électrique par logiciels comsol basé sur la méthode d'élément fini.

Dans ce dernier nous présentons les résultats de la différente simulation effectuée sur un câble (un, deux et trois cavités), l'impact de la position et l'effet de la taille, de la cavité au potentiel et champ électrique avec une validation mathématique ont été étudié.

La présence des défauts dans un câble souterrain influe sur la distribution du champ et du potentiel électriques dans la région où il est localisé.

La position de la cavité influe considérablement sur le champ électrique et le potentiel électrique. Autant que la cavité s'approche de l'âme conductrice autant que le champ électrique augmente. Ces défauts résultent des conséquences néfastes sur l'état de santé du câble et des problèmes de décharge interne, donc un échauffement excessif, cela causera une dégradation des matériaux et un vieillissement prématuré.



"Conclusion Générale"

Conclusion Générale

Cette mémoire de master représente une contribution à l'étude de diagnostic de la fonction isolation de câbles HT isolés par l'analyse des distributions du champ et du potentiel électriques sur un câble souterrain de haute tension de 12 kV. L'étude a été menée à l'aide du logiciel comsol Multiphysique basé sur la méthode des éléments finis avec une validation mathématique. Les simulations numériques ont été réalisées en configuration 2D.

Ce travail, nous avons jugé nécessaire de le développer suivant deux parties distinctes:

- ✚ Une partie théorique porte sur les câbles électriques, méthodes numériques et décharge partielle,
- ✚ Une partie de simulation permettant la détermination des distributions du potentiel et du champ électriques en fonction de l'emplacement de défauts et sa dimension le long de la partie isolante du câble en 2D en utilisant le comsol multiphysics mené avec validation mathématique a été également étudiée, sont représentés dans le dernier chapitre.

Comme principaux résultats, nous pouvons dire que:

- ✚ Les résultats de calcul numérique coïncident avec ceux du modèle analytique, (champ et potentiel). Les résultats de calcul par le logiciel Comsol montrent que, dans la partie isolante, en partant de l'extrémité de l'âme conductrice, le potentiel et le champ électrique diminue selon une fonction logarithmique et le champ diminue selon une fonction uniforme.
- ✚ La présence d'une cavité influe sur la distribution radial du champ électrique,
- ✚ Les resultants montre que la position de la cavité influe considérablement sur le champ électrique. Autant que lacavité s'approche de l'âme conductrice autant que le champ électrique augmente. Par contre cette grandeur est indépendante de la taille.
- ✚ La présence d'un défaut externe peut aussi provoquer des activités de décharges partielles cela est traduit par l'augmentation du champ électrique où le défaut est localisé.
- ✚ Les cavités constituent une situation critique si elles sont situées près de l'électrode haute tension.
- ✚ En présence d'une deuxième et troisième cavité le champ électrique augmente dans chaque cavité.
- ✚ Un défaut de grande dimension est plus dangereux, une décharge partielle se produit à des niveaux de tension plus basse, le système devient moins rigide.

En termes de perspective, les résultats présentés dans ce travail ouvrent de multiples perspectives tant d'un point de vue expérimental par exemple la détection des défauts dans les

câbles électriques par le principe de la décharge partielle, que d'un point de vue de la modélisation et de la simulation numérique des phénomènes physiques intervenant sur les câbles électriques, dans le but de voir par exemple une étude comparative par d'autres outils numérique.



" Références Bibliographiques "

Références Bibliographiques

- [1] **A. Kherfi, I. Mimouni**, "Les défauts dans les câbles électriques souterrains", Mémoire de master, Dept. Génie électrique, Universitaire d'ouargla, juin 2019.
- [2] **F. Houaidj, C. Keddar**, "Localisation de défaut dans un câble par la méthode des ondes mobiles", Mémoire de master, Dept. Génie électrique, Centre Universitaire d'Ain-Temouchent, juin 2015.
- [3] **S. Bernier**, " Etude paramétrique des propriétés diélectriques de l'isolation polyéthylène de câbles miniatures en fonction du vieillissement", Maîtrise en génie électrique (M.Ing), Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, janvier 2011.
- [4] **P. Lebas**, "Diagnostic des câbles souterrains par détection de décharges partielles", mémoire de fin d'étude, d'ingénieur civil 'electro-mécanicien, Université de Liège, 2008.
- [5] **L. Mokadem, F. Kahouadji**, "Etude d'une Décharge Partielle dans Un Câble HT Sous L'environnement Maxwell", Mémoire de Master en Electrotechnique, Dépt. Ingénierie des Systèmes, universite de Boumerdes, juin 2018.
- [6] <https://www.worldcat.org/title/long-life-xlpe-insulated-power-cables/oclc/855410085>
- [7] **A. William Thue**. "Electrical power cable engineering". CRC Press, 2011.
- [8] **E. Peschke, R.V. Olshausen**. "Cable systems for high and extra-high voltage". Publicis MCD Werbeagentur GmbH, 1999.
- [9] <http://www.med-cable.com/docs/catalogue%20med-cable%20algerie.pdf>
- [10] **A. manaoui**, "بِسْكَرَة-ENICAB-دراسة ميدانية بمؤسسة صناعة الكوابل", Mémoire de DEUA, Dept, d'électrotechnique, Université de Biskra, juin 2006.
- [11] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/problematiques-communes-des-reseaux-electriques-du-fonctionnement-au-comptage-42266210/cables-d-energie-recherche-et-identification-de-defauts-d4541/>
- [12] [https://blog.materielelectrique.com/cables-electriques/matériel électrique](https://blog.materielelectrique.com/cables-electriques/matériel%20électrique)
- [13] <http://blog.formatis.pro/liaisons-souterraines-aeriennes-ht#:~:text=Comparaison%20ligne%20a%20A9rienne%20et%20c%20A2ble%20souterrain%20%3A&text=%E2%80%93%20Les%20c%20A2bles%20n%20%20A9cessitent%20une%20dur%20A9e,risque%20d%20A2tre%20fortement%20affect%20A9>
- [14] **R. Merabet**, "Etude des câbles électriques à isolation PRC et l'isolateur en verre", mémoire de Master, Dépt. Génie électrique, Université de Biskra, juillet 2019.
- [15] **L. Boukezzi**, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du Polyéthylène Réticulé Chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension", Thèse de doctorat, Dept. Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Alger, juin 2007.

- [16] **M.D.R. Beasley, et al.**, " Etude comparative de trois méthodes de calcul automatique du champ électrostatique ", RGE, Tome 88, Vol. 1, pp.7-18, Janvier 1979.
- [17] <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [18] **C. Volât**, "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", Thèse de Doctorat en Ingénierie, Dépt. Génie électrique, Université du Québec à Chicoutimi, Juin 2002.
- [19] **R. OUBAID**, "Contribution a la modélisation du champ électromagnétique dans les dispositifs basses fréquences par la méthode des moments", Thèse de doctorat, Spécialité : Micro-ondes, électromagnétisme et optoélectronique, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Décembre 2014.
- [20] **B. M'hamdi**, "Amélioration des performances des chaînes d'isolateurs de haute tension ", Thèse de Doctorat en Sciences, Dept. Génie électrique, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), Decembre 2016.
- [21] **T. Seghier**, "Étude des décharges partielles et leurs influences sur l'apparition des arborescences dans la couche isolante des câbles haute tension ", Thèse de Doctorat en Sciences, Dept. Génie électrique, Université de Biskra, Février 2011.
- [22] https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_diff%C3%A9rences_finies#:~:text=E%20analyse%20num%C3%A9rique%2C%20la%20m%C3%A9thode,suffisamment%20proches%20les%20uns%20des
- [23] **H. Farid**, "Association de la commande pour l'étude par éléments finis des phénomènes magnéto élastiques et vibratoires dans les systèmes électrotechniques", Thèse de doctorat, université de Tizi-Ouzou, 2013.
- [24] **M.O. Meftah, M. Rahal**, "Performances d'Isolateurs HT pollués sous tension alternative 50 Hz et distributions du champ et du potentiel électriques utilisant COMSOL", Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, dépt. D'électrotechnique, Ecole nationale polytechnique (ENP) , juin 2011.
- [25] **T .Misaki, H. Tsuboi**, "Computation of 3 - Dimensional Eddy Current Problems by Using Boundary Element Method", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. MAG-21, No. 6, pp. 2227-2230, Novembre 1985.
- [26] **A. Skopec, J.G. Wankowicz, B. Sikorski**, "Electric Field Calculation for an Axiallysymmetric Insulator with Surface Contamination", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.2, pp. 332-339, Avril 1994.

- [27] **T. H. Fawzi, Y. A. Safar**, "Boundary Methods for the Analysis and Design of High-Voltage Insulators", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol 60, issue 3, pp. 134-369, February 1987.
- [28] **E. Sili**, "Etude et caractérisation des décharges partielles et du vieillissement du polyimide en environnement aéronautique", These de doctorat, Spécialité : génie électrique, Université de toulouse, Décembre 2012.
- [29] **F.H. Keuger**, "Partial discharge detection in high voltage equipment", Butterworth-Heinemann, pp. 78 - 85, 1990.
- [30] **M. Aguet, M. Lanoz**, "Haute tension", Vol. XXII, PPUR presses polytechniques, 1990.
- [31] <https://www.bookdepository.com/Electrical-Cables-for-Power-Signal-Transmission-Oswald-I-Gilbertson/9780471359968>
- [32] **T. Bécherrawy**, "Électromagnétisme : équations de Maxwell propagation et émission ", Broché – 15 mars 2012.
- [33] www.comsol.com
- [34] https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics
- [35] **A. Khelfaoui, O. Bouberma**, " Modélisation par méthode des éléments finis des phénomènes de conduction surfacique sur l'isolateur pollues ", Mémoire de master académique, Dépt. Génie électrique, Université de ouargla, juin 2014.
- [36] **M. Ben Hamouda**, "Etude, conception et modélisation de la diffusion de la chaleur dans les tissus biologiques ", Mémoire présenté à l'université du québec Comme exigence partielle de la maîtrise en ma thématiques et informatique appliquées, Mars 2015.
- [37] **A. Kara**, "Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué", Mémoire Magister , Dépt. D'Electrotechnique, Université de setif, Décembre 2013.
- [38] **H.S. Amina**, "Contribution à l'étude du modèle développé d'un isolateur Pollué", Mémoire de Magister en électrotechnique, Dépt. Génie électrique, Université d'Oran, Janvier 2013.
- [39] **H. Benguesmia, N. M'ziou, A. Boubakeur**, "Simulation of the potential and electric field distribution on high voltage insulator using the finite element method", diagnostyka, vol. 19, no. 2, 2018.