

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTER DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUES

Présenté par

Fathi MERZOUGUI

Abderrazak KHELIF

THEME

***Modélisation d'une décharge électrique dans un polymère isolant
avec et sans défaut***

Soutenu publiquement le 11 Juin devant la commission de jury composée de :

Dr Hani BENGUESMIA
Dr. El Hadi BELHITECHE
Dr Khaled BELHOUCHE

Président
Encadreur
Examineur

2023/2024

Remerciements

Ce travail a été réalisé sous la direction et l'encadrement de Monsieur El Hadi BELHITECHE Maitre de conférences à l'université de M'sila qu'il trouve ici l'expression de notre très sincère reconnaissance pour ses précieuses directives, sa disponibilité, ses fructueux conseils, son suivi constant et ses qualités humaines.

Nos sincères remerciements s'adressent à Monsieur Hani GUESMIA Maitre de conférences à l'université de M'sila d'avoir accepté de présider le jury, nous le remercions aussi pour ses conseil avisés et son aide précieuse qu'il nous a fourni pour l'aboutissement de ce travail .

Nous tenons également à remercier Monsieur Khaled BELHOUCHE Maitre de conférences à l'université de M'sila qui a accepté de juger ce travail ainsi que pour son honorable présence.

Que l'ensemble des enseignants du département de génie électrique ainsi que ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire trouvent ici notre profonde gratitude.

**Je dédie le fruit de ce travail à mon père qui m'a toujours
donné de l'élan et de la motivation dans mes études.**

J'espère qu'il apprécie cette humble

**Un geste comme preuve de reconnaissance de la part du
garçon qui A**

**Et à ma chère mère, pour son soutien et ses
encouragements, sa présence continue à mes côtés, son
éducation et sa tendresse, que Dieu la protège**

A

Mes frères Farhat, Ashraf, Ali et mon défunt frère Ahmed.

A

Mes sœurs et toute ma famille.

A

Tous mes amis.

A

Tous ceux que j'aime

KHELIF Abderrazak

DÉDICACE

**MERCI À DIEU DE M'AVOIR DONNÉ LA CAPACITÉ
D'ÉCRIRE ET DE RÉFLÉCHIR, LA FORCE D'Y CROIRE, LA
PATIENCE D'ALLER JUSQU'AU BOUT.**

Je dédie ce travail A:

**Tout d'abord à ma chère mère pour son soutien et ses
encouragements et sa présence constante à mes côtés et son
éducation et la tendresse de Dieu la protègent et à mon
cher père pour son soutien, ses sacrifices et sa présence,
que Dieu nous protège et à tous mes chers frères Farouk et
Yassin pour leur soutien et leurs encouragements, ainsi
qu'à ma chère sœur Asia (merci Seigneur pour ta
présence) ;**

À mes nièces et neveux, de l'aîné au plus jeune

À tous mes amis avec qui j'ai passé des bons moments

2023/2024 ;

Sommaire

Sommaire

Introduction générale -----	1
CHAPITRE I : -----	2
I.1. Introduction -----	2
I.2. Polymères-----	2
I.2.1. Classification des polymères -----	2
I.2.1.1. Origine des matériaux -----	2
I.2.1.2. Différents types de polymères-----	3
I.2.1.3. La géométrie de la macromolécule-----	6
I.2.1.4. Propriétés thermiques -----	6
I.3. Polymérisation -----	7
I.3.1. Divers procédés de polymérisation -----	8
I.4. Les caractéristiques des polymères -----	8
I.5. Vieillissement des polymères -----	9
I.5.1. Vieillissement physique -----	9
I.5.1.1. Vieillissement physique avec transfert de masse -----	10
I.5.1.2. Vieillissement physique sans transfert de masse -----	10
I.5.1.3. Influence du vieillissement physique sur les propriétés du polymère -----	11
I.5.2. Vieillissements chimiques -----	11
I.5.2.1. Oxydation -----	11
I.5.2.2. Hydrolyse -----	11
I.5.2.3. Coupure de chaînes statiques-----	12
I.5.2.4. Réticulation -----	12
I.5.2.5. Dépolymérisation -----	12
I.5.2.6. Vieillissement électrique -----	12
I.5.2.7. Vieillissement climatique -----	12
I.6. La rupture diélectrique des polymères -----	13
I.6.1. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique -----	13
I.6.2. Différents mécanismes de claquage -----	13
I.6.2.1. Claquage d'origine électronique -----	13
I.6.2.2. Claquage thermique -----	14
I.6.2.3. Claquage électromécanique -----	14

I.6.3. Rupture diélectrique	14
I.6.3.1. Rupture dans les polymères	15
I.6.3.2. Rupture à court terme	15
I.6.3.3. Rupture à long terme	15
I.7. Conclusion	15
CHAPITRE II :	16
II. Introduction	16
II.1. Définition d'une décharge électrique	16
II.1.1. Décharge électrique dans la nature	16
II.2. Les différentes décharges électriques	17
II.2.1. Les décharges partielles	17
II.2.2. Les décharges de surface	23
II.2.3. Les décharges arborescentes	25
II.2.3.1. Les arborescences électrochimiques	25
II.2.3.2. Les arborescences électriques	25
II.4. Conclusion	25
CHAPITRE III :	26
III.1. Introduction	26
III.2. Méthode des éléments finis (FEM)	26
III.2.1. Principe	26
III.2.2. Étapes de la méthode des éléments finis	27
III.2.3. Avantages de la FEM	27
III.2.4. Inconvénients de la FEM	28
III.3. Exemple d'un câble avec défauts	30
III.3.2. Modèle Mathématique	30
III.3.2.1. Potentiel Electrique	30
III.3.2.2. Champ Electrique	30
III.3.2.2. Model géométrique d'un câble souterrain avec cavité	31
III.4. Résultats	32
III.4. 1. Model sans cavité	32
III.4.1.1. Le maillage du domaine d'étude	32
III.4.1.2. Distribution du Potentiel électrique	32
III.4.1.3. Distribution du champ électrique	33
III.4.2. Model avec cavité	34

III.4.2.1. Le maillage du domaine d'étude-----	34
III.4.2.2. Distribution du Potentiel électrique -----	34
III.4.2.3. Distribution du champ électrique -----	35
III.4.3. Variation du potentiel et du champ électriques en fonction de la position de la cavité-----	36
III.4.3. 1.Variation du potentiel électrique-----	36
III.4.3. 2.Variation du champ électrique -----	37
III.4.4. Application 2 -----	37
III.4.4.1. Caractéristiques physiques et géométriques-----	37
III.4.4.2. Etude de quelques phénomènes dans l'isolant -----	39
III.4.4.2.1. Répartition du potentiel à l'intérieur du câble souterrain-----	39
III.4.4.2.1.1. Absence d'une cavité à l'intérieur du câble-----	39
III.4.4.2.1.2. Présence d'une cavité à l'intérieur du câble -----	39
III.4.4.2.2. Variation du champ en fonction de la tension appliquée -----	40
III. Conclusion-----	41
Conclusion générale-----	42
Résumé-----	43
Références bibliographiques -----	44

Introduction générale

Introduction Générale

Les chaînes d'isolateur et câbles électriques de moyenne et haute tension étaient isolés traditionnellement à l'aide de papier. Ces dernières années et vu les différents inconvénients que présente cette isolation, le champ a été laissé aux isolants synthétiques.

Les câbles à isolation synthétique présentent des avantages non négligeables sur les plans technique et économique. Parmi ces avantages nous pouvons citer : la grande facilité de mise en œuvre des câbles, leur exploitation aisée et la non nécessité de leur entretien. Outre ces qualités, ils ont de bonnes propriétés électriques et mécaniques ainsi qu'une durée de vie largement supérieure à celle des autres isolants. Ce changement de technologie a permis de passer d'un gradient de service de 15 kV/mm à un gradient de 40 kV/mm [1].

Au cours des différentes phases de fabrication d'un câble, des impuretés de tailles microscopiques et de formes diverses peuvent être piégées dans l'isolant ou créées à l'interface des zones conductrices ou semi-conductrices malgré les précautions prises aussi bien par les fabricants de matières premières que par les constructeurs. Des inhomogénéités dans la structure de l'isolant peuvent être créées au cours de l'extrusion ou du refroidissement de la couche isolante. Ces hétérogénéités induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique ainsi qu'un renforcement de ce dernier pouvant conduire à la génération, à plus ou moins long terme, d'arborescences. Ces défauts ou facteurs de vieillissement peuvent conjointement contribuer, en présence des contraintes électriques et thermiques, à la dégradation des propriétés principales du matériau en fonction du temps qui peut, dans certains cas, devenir forte et conduire à la détérioration de l'isolant par rupture diélectrique ou thermique [2].

Une isolation électrique doit supporter, sans défaillance, des contraintes électriques, thermiques et chimiques pendant une durée de vie pouvant aller jusqu'à 40 ans [3]. Pour cela, les essais d'endurance électrique pour avoir une prévision de la durée de vie des matériaux sont recommandés. Ces essais sont destinés à déterminer les changements irréversibles d'importantes propriétés des matériaux isolants en fonction de la contrainte électrique et du temps de vieillissement.

L'objectif de notre travail est l'étude des effets des défauts (présences de cavités) sur le comportement d'un polymère isolant. Notre présent travail s'articule autour de quatre chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une présentation des généralités sur les polymères.

Dans le deuxième chapitre, nous décrirons les différents types de décharges électriques.

Le dernier chapitre est réservé à simulation et interprétation des résultats. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I

Généralités sur les polymères

I.1. Introduction

Les bio-polymères existent depuis la nuit des temps, mais le terme polymère n'a été introduit dans l'industrie qu'en 1832 [3]. Bien que leur utilisation industrielle soit relativement récents, les polymères ont très vite trouvé leur place et ont envahi notre vie quotidienne.

Il est maintenant difficile de trouver un aspect de notre vie qui ne soit pas affecté par les polymères. Au cours des cinquante dernières années, les outils de synthèse des polymères se sont développés et l'industrie des plastiques est devenue l'une des industries à plus forte croissance dans le monde. De nos jours, la production totale de polymère s'élève à quelques centaines de millions de tonnes par an.

L'utilisation des matériaux polymères nous offre de grands avantages. Par exemple dans le cas d'un câble haut tension, ils sont moins polluants et plus économiques par rapport aux papiers imprégnés et surtout leur principal avantage est leur facilité de production.

I.2. Polymères

Le polymère, du mot grec polymères (poly : préfixe qui marque plusieurs éléments du type de suffixe qui suit + mère : suffixe qui définit un composé chimique), est un matériau composé de longue chaîne moléculaire appelées macromolécule. Une macromolécule obtenue par la répétition d'une unité constitutive comportant un groupe d'atomes liés par des liaisons covalentes. L'unité constitutive d'un polymère est appelée monomère. Cette réactivité chimique des monomères résulte de la présence sur ceux-ci de groupes fonctionnels capable de former des liaisons chimiques avec les groupes fonctionnels d'autres molécules de monomères. Et les macromolécules sont connectées les unes aux autres par des liaisons faible de type Van der Waals [3].

I.2.1. Classification des polymères

Cette classification peut se faire selon :

I.2.1.1. Origine des matériaux

a. Polymères naturels

Leur importance économique dans les mécanismes vitaux leur a assuré une place de première choix, tels que le caoutchouc naturel, le bois et le cuir.

b. Polymères synthétiques

Ils sont classés selon le procédé (ou réaction de synthèse) :

-Polycondensation :

Elle met en œuvre des réactions de condensation répétées entre monomères avec ou sans élimination de molécules légères.

-Polymérisation et copolymérisation :

Ce sont des réactions en chaînes s'effectuant à partir d'un centre actif pouvant être des radicaux libres ou des ions positifs ou négatifs.

c. Polymère de transformation

Ils sont obtenus par modification des chaînes macromoléculaires synthétiques déjà existantes dans différentes réactions (topo chimiques, dégradation par voie thermique, rayonnement ionisant) [4].

I.2.1.2. Différents types de polymères

Il existe deux types de polymères :

-les homopolymères.

-les copolymères.

a. Homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité (monomères). Si seulement un type de monomère est utilisé, le polymère résultant est appelé un homopolymère [5]. Ce dernier peut présenter trois structures différentes qui sont les suivantes :

a.1. polymères linéaires

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliées les une après autres par des liaisons chimiques comme le montre la figure I.1 :



Figure I.1 : Structure moléculaire d'un polymère linéaire.

a.2. Polymère ramifié

Dans les polymères ramifiés, les chaînes linéaires de la macromolécule sont liées aux autres molécules semblables branchées latéralement comme le montre la figure I.2 :

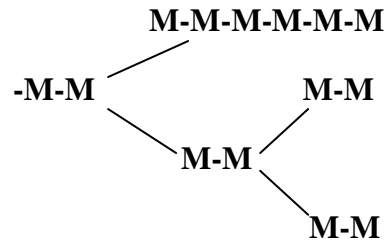


Figure I.2 : Structure moléculaire d'un polymère ramifié [4].

a.3. Polymère réticulé

Dans les polymères réticulés, plusieurs chaînes sont reliées à des chaînes latérales au niveau des nœuds (figure I.3) [6] :

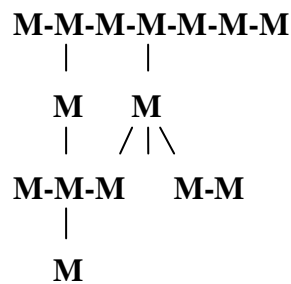


Figure I.3 : Structure moléculaire d'un polymère réticulé.

b. Copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se présenter en plusieurs structures différentes qui sont les suivantes [5] :

b.1. Copolymères statistiques

Ils sont caractérisés par l'alternance aléatoire des monomères A et B (figure I.4)

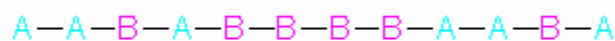


Figure I.4 : Structure moléculaire d'un copolymère statistique.

b.2. Copolymères alternés

C'est un cas limite du copolymère statistique est le copolymère alterné qui est également un matériau homogène à une phase (figure I.5) :

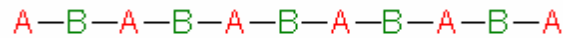


Figure. I.5 : Structure moléculaire d'un copolymère alterné.

b.3. Copolymères séquencés

Ce sont des molécules linéaires ou radiales, constituées d'une alternance de longues séquences homogènes (figure I.6).



Figure I.6 : Structure moléculaire d'un copolymère séquencé [7].

b.4. Copolymères greffés

Les copolymères greffés sont des copolymères dans lesquels les branches ont une structure chimique différente de celle de la chaîne principale (figure I.7) :

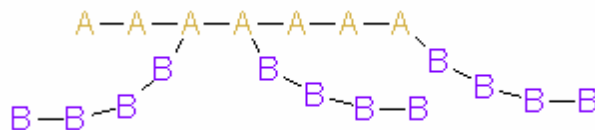


Figure I.7 : Structure moléculaire d'un copolymère greffé.

Parmi ces différents types de polymères, on peut trouver des polymères polaires et d'autres non polaires.

-Les polymères polaires

Les polymères polaires sont généralement des matériaux isolants possèdent dans leur molécules en plus du carbone et de l'hydrogène, des atomes généralement électronégatifs tels que : le fluor, le chlore, l'oxygène, l'azote, qui fournissent des dipôles. Ils ont à un degré plus ou moins grand, une permittivité élevée (3,5 à 10) et un indice de pertes élevé de 10^{-2} à 10. Parmi ces polymères on peut citer :

- le poly (chlorure de vinyle) PVC ;
- le poly (fluorure de vinylidène) PVDF ;
- le poly (méthacrylate de méthyle) PMMA ;
- les polycondensats tels que : les polyamides, les polystères.

-les polymères apolaires

Contrairement aux polymères polaires, ces polymères présentent un indice de pertes diélectriques faibles, de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} et une permittivité quasi constante (2,5 à 3) dans un large domaine de température et de fréquence. Leur formule chimique ne contient que du carbone et de l'hydrogène et s'ils contiennent des atomes électronégatifs tels que le fluor, ces atomes sont placés symétriquement le long de la chaîne carbonée.

Parmi ces polymères on peut citer :

- le polyéthylène PE ;
- le polypropylène PP ;
- le poly (tétrafluoréthylène) PTFE [5].

I.2.1.3. La géométrie de la macromolécule

La géométrie de la macromolécule est caractérisée par l'ordre atomique :

➤ L'ordre atomique

On distingue selon cette caractérisation plusieurs types :

-polymère amorphe

Où polymères les atomes sont désordonnés le long de la chaîne du polymère.

-polymère cristallin

Suite à certaines conditions tel le refroidissement lent après fusion, les polymères peuvent posséder une structure semi ordonnée et donner lieu à une cristallisation partielle.

I.2.1.4. Propriétés thermiques

Les polymères peuvent être divisés en polymères thermoplastiques, polymères thermodurcissables ou polymères élastomères [7].

a. Thermoplastiques

Une matière thermoplastique est une matière qui ne possède pas de liaisons covalentes entre les chaînes, c'est la raison pour laquelle les thermoplastiques se ramollissent au chauffage :

Les liaisons secondaires qui relient les molécules les unes aux autres fondent, et le matériau s'écoule comme un liquide visqueux, ce qui permet sa mise en forme.

La dispersion des masses moléculaires et de l'organisation de la matière fait que les thermoplastiques n'ont pas de point de fusion bien défini.

b. Thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables sont fabriqués en mélangeant deux constituants (résine et un durcissant), qui réagissent et durcissent, tantôt à chaud, tantôt à température ambiante. Le polymère qui résulte comporte de nombreuses liaisons covalentes de chaîne à chaîne.

c. Elastomères

Les élastomères sont des polymères à caractère amorphe ou cristallin présentant des propriétés remarquables en élasticité. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation, du soufre, du carbone et différentes agents chimiques [4].

I.3. Polymérisation

La polymérisation est l'association des monomères sous l'action de la chaleur, de la pression, ou de rayons UV ou de amorceur (catalyseur) qui sont les plus souvent des peroxydes. Cette association peut aussi se produire sans intervention extérieure, mais il faut un temps beaucoup plus long (cela explique que la conservation prolongée de certains monomères est difficile) [8].

I.3.1. Divers procédés de polymérisation

Les différents procédés de polymérisation sont :

a. Polymérisation en masse

La polymérisation en masse met en jeu le monomère et un amorceur soluble dans le monomère. Généralement la réaction ne peut avoir lieu que sous des pressions et températures élevées et le polymère obtenu présente une pureté élevée.

b. Polymérisation en solution

Dans une polymérisation en solution, le système réactif est constitué du monomère, d'un amorceur soluble dans le monomère et d'un solvant également miscible au monomère. Ce procédé permet d'opérer à des températures plus basses et d'extraire plus efficacement la chaleur de réaction. Comparée à la polymérisation en masse, la polymérisation en solution nécessite une opération supplémentaire : la séparation du polymère et du solvant. Par ailleurs, les impuretés du solvant sont susceptibles de polluer le polymère.

c. Polymérisation en émulsion

Elle est caractérisée par le fait que les substances en présence pour la réaction forment deux phases non miscibles. Le polymère se forme soit dans l'une des phases, soit à la surface de séparation des phases.

d. Polymérisation par addition

On appelle polymérisation par addition (ou polyaddition) l'assemblage de monomères sans formation d'un produit de réaction.

e. Polymérisation par condensation

On parle de polymérisation par condensation ou polycondensation dans le cas où le produit de réaction est formé [4].

I.4. Les caractéristiques des polymères

➤ Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique c'est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à un isolant sans produire un claquage. On trouve généralement pour les

polymères des valeurs de rigidité diélectrique compris entre : 150 kV/cm et 500 kV/cm. Cette rigidité est influencée par plusieurs paramètres dont les plus importants sont :

- la structure de polymère ;
- le temps d'exposition à la haute tension ;
- la présence de bulles d'air.

➤ **Propriétés électriques superficielles**

La résistance à la décharge électrique superficielle est importante dans les applications où une décharge électrique peut endommager le matériau, et en le carbonisant, le rendre conducteur. La résistance superficielle est fortement influencée par l'humidité.

➤ **Résistivité transversale**

Elle caractérise le pouvoir isolant du matériau. Pour la majorité des polymères la valeur de la résistivité transversale est supérieure à 10^{12} Ω .cm à la température ambiante.

➤ **Propriétés de protection physique et chimique**

Ces propriétés englobent les caractéristiques diverses : imperméabilité aux liquides et aux gaz, résistance chimique aux solvants et résistance aux rayons ultraviolets [7].

I.5. Vieillissement des polymères

Le vieillissement pose des problèmes de plus en plus importants dans l'utilisation grandissante des polymères. Il se traduit au niveau des matériaux par des modifications de structure et par des coupures de chaînes macromoléculaires. On distingue deux types de vieillissement : le vieillissement physique qui est réversible et le vieillissement chimique irréversible.

I.5.1. Vieillissement physique

Le vieillissement physique (ou relaxation structurale) est un phénomène réversible qui concerne la phase amorphe des polymères. La composition chimique du matériau n'est pas modifiée, le vieillissement physique peut se produire avec ou sans transfert de masse.

I.5.1.1. Vieillissement physique avec transfert de masse

Un solvant peut pénétrer dans le matériau où il peut y avoir plastification accompagnée d'un gonflement ou également, pertes d'adjuvant par extraction ou évaporation. Lorsque le matériau est soumis à des contraintes (mécanique, électrique, etc.).

Le solvant peut provoquer une craquelure : la déformation du polymère se poursuit. Il se développe un phénomène de fissuration.

Avec l'eau il peut exister des gradients de concentration dû à la diffusion, à un gonflement différentiel fibre-polymère pour les matériaux composites ou à un gonflement dû aux hétérogénéités du matériau. Cette pénétration de l'eau dans le matériau contribue à la diminution de la résistance d'isolement.

I.5.1.2. Vieillissement physique sans transfert de masse

Un matériau peut se fissurer sous contraintes en présence d'un composé tensio-actif. Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement physique interne.

➤ Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif

En milieu tensio-actif, sous l'action de contraintes mécaniques, des fissurations peuvent se produire dans certains cas comme dans le polyéthylène. Le phénomène de fissuration est lié au développement de forces de tension superficielle à l'interface polymère-liquide, et également à la masse moléculaire du polymère. En effet, une masse moléculaire élevée rend le polymère moins sensible à ce type de fissuration.

➤ Vieillissement par relaxation de volume et d'enthalpie

Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la capacité du réseau macromoléculaire, autrement dit par une réduction du volume spécifique. Dans les polymères semi-cristallins, certains segments stéréo réguliers (donc capable de cristalliser), qui se trouvaient piégés dans la phase amorphe, vont progressivement diffuser et s'incorporer à des zones-cristallines. Le vieillissement physique se traduit alors par une augmentation du taux de cristallinité (PE, PP).

➤ Vieillissement par les chocs thermiques

Lors de brusques variations de températures dans un isolant organique, un gradient de température s'instaure dans l'épaisseur du matériau, d'où une dilatation différentielle apparaît. Les chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques.

I.5.1.3. Influence du vieillissement physique sur les propriétés du polymère

Le vieillissement physique affecte toutes les propriétés dépendant du volume libre et de la mobilité moléculaire. La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue, le facteur de pertes diélectrique diminue, la diffusion des gaz et des liquides diminue. Dans certains cas comme pour le PE les propriétés optiques peuvent également être modifiées.

I.5.2. Vieillissements chimiques

On appelle vieillissement chimique tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau sous l'influence de l'environnement. Dans la pratique, le vieillissement chimique se superpose souvent à un vieillissement physique et les deux phénomènes s'interfèrent. Les isolants peuvent être soumis à différents types de vieillissement chimique.

I.5.2.1. Oxydation

L'oxydation est une réaction en chaîne amorcée par la rupture d'une liaison en radicaux libres. Elle se traduit par l'accumulation des groupes tels que OH et CO. L'oxydabilité des matériaux dépend de la solubilité et de la vitesse de diffusion de l'oxygène dans le matériau, mais surtout de la quantité, de la qualité et de la répartition de l'antioxydant incorporé.

L'utilisation d'anti oxygènes ou de noir de carbone peut empêcher ou ralentir le phénomène d'oxydation.

I.5.2.2. Hydrolyse

Sous l'influence de l'humidité ($\geq 95\%$) et de la température (au moins 100°C), certains polymères (polyesters, polyuréthanes, etc.) peuvent se dégrader. Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques à la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminements. La réaction d'hydrolyse s'effectue en présence de l'eau.

I.5.2.3. Coupure de chaînes statiques

Les coupures de chaînes statiques se produisent sur des sites distribués de manière aléatoire dans le réseau macromoléculaire. Une grande variété de mécanismes chimiques peut être la cause de coupure statique des chaînes.

Sur le plan de la structure, ces coupures de chaînes provoquent une diminution de la masse moléculaire moyenne dans le cas des polymères linéaires et une diminution du taux de réticulation dans le cas des polymères tridimensionnels. Les coupures de chaînes affectent considérablement les propriétés mécaniques du matériau.

I.5.2.4. Réticulation

Le processus de réticulation est caractérisé par la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines, qui réduit la souplesse de l'isolant et son aptitude à l'allongement, ce qui a pour effet de le rendre cassant [8].

I.5.2.5. Dépolymérisation

C'est la réaction inverse de la polymérisation, un cas particulier de la réaction de coupure de chaînes. Elle crée un site actif qui déstabilise la liaison monomère-monomère voisine et entraîne l'élimination séquentielle de molécules de monomère [9].

I.5.2.6. Vieillessement électrique

Si le matériau est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation de radicaux libres, ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il en suit une dégradation généralisée ou localisée (arborescences électriques) des isolants en présence d'humidité, d'impuretés ioniques sous l'influence de la température. Des réactions électrochimiques peuvent également conduire à une dégradation des propriétés du matériau. Dans certaines circonstances il peut apparaître des arborescences électrochimiques.

I.5.2.7. Vieillessement climatique

Le vieillissement climatique résulte de l'exposition directe des matériaux au rayonnement solaire, aux intempéries et à diverses pollutions (marine, industrielle...etc.) : la température joue également un rôle important, tel que l'oxyde de zinc et l'oxyde de titane, absorbeur UV. Ce vieillissement climatique peut dégrader les caractéristiques électriques et la surface d'un isolant et provoquer la formation de cheminements [8].

I.6. La rupture diélectrique des polymères

I.6.1. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique

De nombreux phénomènes sont susceptibles d'altérer un diélectrique au cours du vieillissement provoquant en particulier la diminution de la rigidité diélectrique. La tension appliquée influe en premier suivant sa fréquence et sa forme d'onde. La rigidité diélectrique diminue quand la fréquence augmente, par ailleurs, elle est plus élevée pour les ondes de chocs [10].

I.6.2. Différents mécanismes de claquage

La rupture de l'isolant, ou claquage, peut être due à différents mécanismes tels que claquage d'origine électronique, claquage thermique, claquage électromécanique.

I.6.2.1. Claquage d'origine électronique

Pour qu'un claquage purement électronique puisse survenir, une condition nécessaire mais non suffisante, c'est qu'il existe des électrons pouvant être accélérés et acquérir ainsi dans le champ une énergie comparable à l'énergie d'ionisation des atomes constitutifs (5 à 10 eV). On distingue le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche et celui associé au volume libre [6].

a. Claquage intrinsèque

Lorsque le champ électrique appliqué à un matériau de telle manière que sa température reste pratiquement inchangée en maintenant ce champ pendant une courte durée et en utilisant des électrodes permettant l'évacuation de la chaleur. On peut assister à un claquage brutal qui n'est pas précédé par une augmentation progressive de la température c'est ce qu'on appelle le claquage intrinsèque [11].

b. Claquage associé au volume libre

Artbauer est le premier à utiliser la notion de volume libre dans le claquage et ceci en considérant que les électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie avec le champ électrique en traversant le volume libre pour causer la rupture diélectrique [6].

c. Claquage par avalanche

Lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder, à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un nouvel électron, de sorte qu'on a alors 2 électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc 2 électrons et ainsi de suite. Chaque électron libre accéléré produirait une avalanche exponentielle d'ions positifs fixes et un nuage d'électrons libres balayé par le champ. Le claquage par avalanche est caractérisé par seuil de 10^8 V/m nécessaire pour que des collisions puissent se produire et le processus qui en découle est rapide [6].

I.6.2.2. Claquage thermique

Lorsqu'un courant traverse un matériau isolant, la conductivité augmente avec la température. Par suite la température s'élève, le courant augmente à son tour et ainsi de suite.

Si la chaleur accumulée ne s'évacue pas suffisamment vite, le processus peut conduire à un emballement thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique [10].

I.6.2.3. Claquage électromécanique

Le claquage électromécanique est provoqué par la pression électrostatique exercée par les électrodes sur l'isolant. Une pression trop importante entraîne une diminution de l'épaisseur de l'isolant et ainsi une augmentation du champ électrique, ce qui amplifie encore l'effet. Si la pression exercée devient supérieure à la résistance à la compression, la rupture intervient. La pression électrostatique étant en $\epsilon E^2/2$, des champs de l'ordre du MV/mm seraient nécessaires pour vaincre une résistance à la compression de 100 MPa comme celle de l'époxy à l'état vitreux. De tels niveaux de champs ne seraient envisageables que sur des couches très minces [12].

I.6.3. Rupture diélectrique

Dire qu'une rupture diélectrique s'est produite dans un échantillon isolant, c'est dire qu'au moins un chemin conducteur s'est établi entre les électrodes. On peut donc considérer le claquage diélectrique comme une percolation induite par le champ appliqué, or le claquage n'est qu'un exemple particulier du phénomène de percolation.

I.6.3.1. Rupture dans les polymères

Contrairement à des isolants gazeux ou liquides la rupture des polymères a bien un caractère irréversible et conduit donc à la mise hors service définitive du système isolé [10].

I.6.3.2. Rupture à court terme

Dès qu'un chemin conducteur est établi entre les électrodes, le courant qui le traverse crée un échauffement menant éventuellement à la formation d'un plasma. C'est la densité du diélectrique qui détermine si les chemins de rupture sont temporaires ou permanents. Sous des champs de 1 à 10 MV/cm, les temps de rupture restent inférieurs à la seconde : c'est la rupture diélectrique à court terme [5].

I.6.3.3. Rupture à long terme

Il est difficile de faire une distinction entre le claquage à court terme et le claquage à long terme. Dans le cas de la rupture à long terme, on parle plutôt de vieillissement électrique du matériau, cette rupture peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années [6].

La rupture se résumant à un transfert d'énergie entre le champ électrique et les porteurs de charge, une théorie de rupture à long terme doit pouvoir expliquer comment sous un champ relativement faible, les porteurs peuvent gagner l'énergie de quelques électronvolts nécessaires à la rupture des liaisons dans isolant. Un modèle a été développé par Jonscher et Locoste qui s'applique aussi bien à la rupture aux temps courts qu'aux temps longs. Le modèle repose sur deux hypothèses qui résultent d'une analyse détaillée des caractéristiques générales de la rupture dans une large gamme de matériaux de structures différentes [5].

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné quelques généralités sur les polymères qui sont des isolants solides présentant de bonnes propriétés physico-chimiques qui les rendent plus utilisés dans les domaines de l'industrie. En pratique aucun isolant n'est parfait, c'est pourquoi il est nécessaire de définir certaines propriétés comme la rigidité diélectrique, ainsi que les différents types de vieillissement et les mécanismes de claquage.

Chapitre II

Décharges électriques

I. Introduction

Lorsqu'un milieu isolant est soumis à une tension électrique suffisante, un courant de particules chargées électriquement devient possible par l'ionisation partielle du milieu. On parle de décharge électrique. Ce phénomène est particulièrement intéressant, car bien que rencontré dans l'expérience commune et utilisé dans de nombreuses applications technologiques [13]. La compréhension de ce phénomène dans les grands intervalles d'air présente un grand intérêt du point de vue industriel et de l'environnement. On peut citer parmi les principales raisons, les problématiques relatives à l'isolation et à la protection des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique ainsi les composants associés [14]. Dans ce chapitre nous étudions les différents types de décharge électrique.

II.1. Définition d'une décharge électrique

On désigne par l'expression décharge électrique, ou simplement décharge, le passage de courant dans un isolant.

II.1.1. Décharge électrique dans la nature

Deux phénomènes naturels connus mettent en jeu les éléments que nous étudions.

- **La foudre** : lorsque de l'air froid recouvre de l'air chaud, les conditions sont favorables au déclenchement des orages. De violents courants d'air verticaux entraînent l'humidité, les fragments de glace, les grêlons et les gouttelettes d'eau à l'intérieur des nuages. On ne connaît pas encore exactement les mécanismes à l'origine de la tension qui se forme dans les nuages d'orage, mais cette tension est influente sur des dizaines, voire des centaines de kilomètres. Lorsque la tension est suffisante, on peut observer des éclairs entre les nuages et le sol (25% d'entre eux) ou entre les nuages eux-mêmes. Ces arcs ont des vitesses de propagation de l'ordre de 200 km/s. Leur tension est de l'ordre de 100 millions de volts et ils sont parcourus un courant de 30000 Ampères [15]. Ce sont donc des phénomènes développant beaucoup de puissance et très visibles pour l'homme.

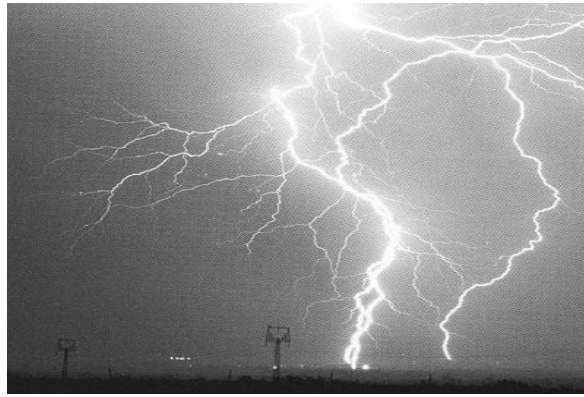


Figure II.1 : Foudre (Photo Fédération Française de Montagne et d'Escalade).

- **Aurore polaire** : les aurores polaires apparaissent, vues depuis la Terre, comme des taches ou des bandes de lumière, souvent striées, un peu comme des rideaux lumineux se balançant dans un courant d'air. Elles sont surtout de couleur verte ou rouge. On peut les observer pendant plusieurs dizaines de minutes. On les observe à des latitudes voisines de 70 degrés, c'est à dire en Scandinavie, au Nord de la Sibérie, au Canada, en Alaska, ou - au Sud - aux abords du continent Antarctique. Ces lumières aurorales sont émises à des altitudes comprises entre 80 et 150 kilomètres, dans l'ionosphère. La lumière des aurores provient des collisions entre des particules rapides provenant de la magnétosphère et les atomes et ions de l'ionosphère. Les aurores boréales sont les aurores polaires que l'on observe dans l'hémisphère Nord ; les aurores australes sont observées dans l'hémisphère Sud.



Figure II.2: Aurore boréale (Photo Vincent Génot) [15].

II.2. Les différentes décharges électriques

II.2.1. Les décharges partielles

Les décharges partielles (DP) apparaissent, en général, sous l'application d'une tension élevée. Elles provoquent la dégradation du matériau et peuvent conduire au claquage de l'isolant ou du diélectrique.

Les décharges partielles (DP) sont des décharges électriques qui apparaissent dans les

diélectriques solides, liquides ou gazeux présentant des défauts (cavité, décollement,...) dès qu'une tension suffisante est appliquée. Ces décharges correspondent à une rupture des gaz occlus dans les défauts, et elles sont appelées 'partielles' car elles ne court-circuitent pas l'ensemble de l'isolation [16].

On peut distinguer plusieurs types de décharges partielles auxquelles sont soumis effectivement les matériaux isolants dans les isolations en service.

a. Les décharges internes

Les décharges partielles internes se produisent dans les inclusions gazeuses emprisonnées dans la masse d'un isolant solide. Lorsque les isolants sont soumis à une certaine tension alternative à fréquence industrielle, on constate que le champ électrique est plus élevé dans les vacuoles gazeuses que dans l'isolant, alors il peut y avoir des décharges internes dans les vacuoles de gaz qui peuvent provoquer le claquage du matériau. Parmi les facteurs contribuant à l'apparition des décharges internes on a :

- La permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée que celle des gaz. Par conséquent le champ électrique dans les vacuoles est plus grand que le champ dans les isolants solides.

- La rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse que celle des isolants solides. Les décharges internes apparaissent dans les vacuoles des isolants solides pour des tensions faibles entraînant alors la perforation du diélectrique solide [15].

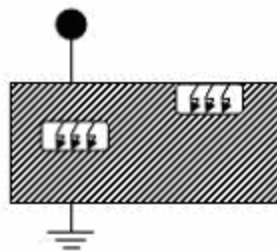


Figure II.3 : Décharge interne

b. La décharge couronne

Toutes les décharges pré-disruptives apparaissant sous la forme de lueurs diverses qui prennent naissance au voisinage d'une électrode à faible rayon de courbure ou dans un champ non uniforme se qualifient de décharges couronne. La décharge couronne est liée à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique hétérogène à des pressions de quelques torrs à quelques atmosphères. La décharge couronne se manifeste dans les

conditions naturelles. Elle apparait lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation du gaz «air» et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension. La décharge couronne se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique.

b.1. Seuil d'apparition de la décharge couronne

Lorsqu'un conducteur est soumis à une tension croissante, le champ critique d'effet de couronne est défini par l'apparition brusque d'une importante conductivité de l'air dans son voisinage immédiat.

Selon F.W. Peek, pour une configuration cylindrique, l'apparition de l'effet de couronne est fonction du champ superficiel, du rayon du conducteur, et de la densité de l'air.

$$E_c = E_0 \delta m_1 m_2 \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$E_0 = 30\text{kV/cm}$: Valeur de crête du champ électrique en conditions normales.

r : Rayon du conducteur en cm.

m_1 : Coefficient qui tient compte de l'état de surface du conducteur (l'irrégularité géométrique du conducteur).

m_2 : Coefficient qui prend en considération l'influence de la pollution des conducteurs souvent le produit ($m_1 m_2$) est remplacé par un seul coefficient : « m ».

δ : Densité de l'air.

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{273+t_0}{273+t} \quad (\text{II.2})$$

p : Pression au tour du conducteur.

p_0 : Pression normale qui est égale à 760 mmHg.

$t_0 = 25^0\text{c}$: Température normale.

t : La température atmosphérique en degrés Celsius.

Le terme « $1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta r}}$ » : est appelé correction de Peek, il tient compte du fait que plus le rayon du conducteur est petit plus il est difficile d'ioniser loin de ce conducteur. Cette difficulté d'ioniser est due au fait que le champ électrique décroît très rapidement en s'éloignant du conducteur.

Pour une configuration pointe-plan, Labergue a établi une expression du champ électrique $E(x)$ en fonction du potentiel appliqué à la pointe.

$$E(x) = \frac{V}{\left(x + \frac{r}{2}\right) \ln\left(\frac{2d+r}{r}\right)} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$E(x)$: Champ électrique ($V \cdot m^{-1}$).

U : Tension appliquée à la pointe (V).

x : Distance à la pointe sur l'axe pointe-plan (m).

r : Rayon de courbure de la pointe (m).

d : Distance inter-électrode (m).

Il est à noter que l'état de surface du conducteur est très important dans la détermination du champ électrique. La relation précédente ne se vérifie que pour des surfaces parfaitement polies. La rugosité superficielle diminue le champ critique, et on tient compte de cet effet en attribuant au conducteur un coefficient expérimental $m < 1$, appelé coefficient de surface.

Le champ critique E_0 d'un conducteur imparfaitement poli s'exprime alors sous la forme [17] :

$$E_0 = m E_c \quad (II.4)$$

b.2. Les facteurs influençant sur la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne, on distingue trois facteurs essentiels :

- Facteurs géométriques.
- Facteurs physico-chimiques.
- Facteurs électriques.

b.2.1. Facteurs géométriques

1. Rayon de la courbure

L'augmentation du rayon de courbure augmente la tension seuil d'apparition de l'effet couronne.

2. Distance inter-électrodes

L'influence de la distance inter-électrodes sur les paramètres de la décharge est montrée sur la figure II.5.

Il apparait clairement que le courant est plus important et croit plus rapidement avec la tension appliquée pour de faibles distances inter-électrodes. De plus, les seuils de décharge couronne apparaissent pour de faibles valeurs de tension dans le cas des distances inter-électrodes petites.

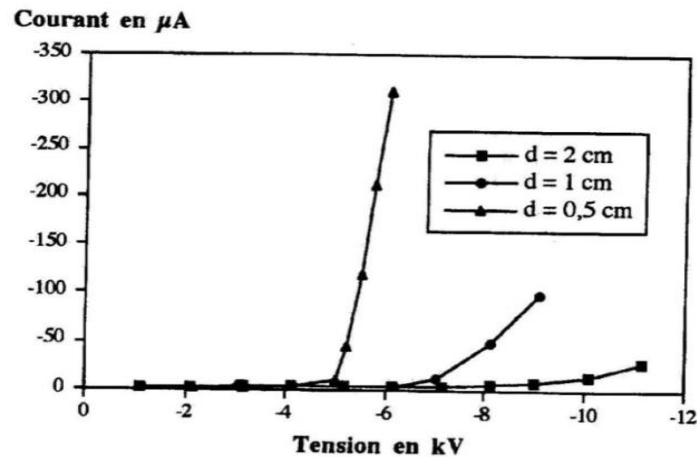


Figure II.5 : Influence de la distance inter-électrodes sur le courant de la décharge couronne [1].

b.2.2. Les facteurs physico-chimiques

1. La température

Avec l'augmentation de la température, à la pression normale, la rigidité diélectrique de l'air diminue, ce qui favorise la décharge couronne. Cela est dû au fait que dans ce cas le libre parcours moyen augmente [1].

2. L'humidité et la densité de l'air

Pour les systèmes d'électrodes à champ non uniforme, l'humidité a une grande influence sur la tension de décharge [14].

Quand le taux d'humidité H augmente, la tension de décharge augmente. En effet, les molécules de vapeur d'eau s'attachent aux électrons libres et freinent ainsi le développement de la décharge.

La tension de décharge est proportionnelle à la densité de l'air.

Des facteurs de correction doivent être appliqués :

- Soit pour convertir une tension mesurée dans des conditions atmosphériques quelconques à la valeur qui aurait été obtenue sous les conditions atmosphériques de référence.
- Soit pour convertir une tension d'essai spécifiée pour les conditions de référence en sa valeur équivalente dans des conditions régnant au cours de l'essai.
- Le facteur de correction k_d tenant compte de la densité de l'air :

$$K_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \left(\frac{t_0+273}{t+273}\right)^n \quad (\text{II.5})$$

$t_0 = 25^{\circ}\text{C}$: Température normale.

$p_0 = 1013 \text{ mbar}$: Pression normale.

p : La pression atmosphérique en mbar.

t : La température atmosphérique en degrés Celsius.

- Le facteur de correction k_h tenant compte du taux de l'humidité :

$$k_h = k^w \quad (\text{II.6})$$

h_0 : humidité absolue normale. ($h_0 = 11 \text{ g d'eau / m}^3 \text{ de gaz}$).

La constante k dépend de l'humidité absolue et les exposants m , n et w dépendent de la nature et de la polarité de la tension ainsi que de la distance d'amorçage d .

Pour ramener la tension de décharge mesurée à sa valeur dans des conditions atmosphériques normales on utilise la relation suivante :

$$Ud_n = Ud \frac{k_h}{k_d} \quad (\text{II.7})$$

3. La pression

L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant.

b.2.3. Facteurs électriques

L'effet couronne diffère selon qu'on applique à un système d'électrodes une tension continue ou alternative.

Les différents modes d'émission de charges qui ont été décrits en tension alternative sont observés également en tension continue, la seule différence est que l'effet couronne en tension alternative implique que la concentration des émissions de charges correspond à la crête de la sinusoïde du courant, tandis qu'en continu l'émission de charges est permanente [1].

b.3. Conséquences de l'effet de couronne dans l'air à la pression atmosphérique

1. Pertes

Dans une décharge couronne, une grande partie de l'énergie électrique est perdue dans les collisions entre les molécules neutres du gaz. Ainsi les pertes dépendent principalement de la quantité de charge produite. De plus elles sont fortement influencées par l'état de surface du conducteur et par les conditions climatiques. En effet, la valeur moyenne annuelle des pertes par effet de couronne est relativement faible soit de l'ordre de quelques kW/cm.

Mais par mauvais temps on peut atteindre une valeur maximum de pertes par effet de couronne plus de vingt fois plus grande que la valeur moyenne. Ces augmentations ont une influence sur la livraison d'énergie surtout pendant les périodes de pointe. Pour ces raisons les concepteurs de ligne déterminent le diamètre et le nombre de conducteurs par phase en considérant le champ critique d'apparition de l'effet de couronne et de l'intensité de précipitation.

2. Interférences radio télévision

La décharge couronne est à l'origine des parasites ou interférences radio télévision qui peuvent être captées par les antennes des récepteurs qui se trouvent proches des lignes de transport d'énergie (moins de 100 m). Outre l'effet de couronne, les étincelles ou les petits arcs électriques sont également responsables de perturbations.

3. Bruit audible

L'effet de couronne est à l'origine d'une onde sonore produite par une variation locale de la pression qui se propage dans l'air environnant. La principale source de bruit audible provient des gouttes suspendues ou des gouttes passant à proximité des conducteurs. Il a été observé aussi que le givre est un générateur de bruit audible. De plus, en présence de la vibration induite par effet de couronne sous pluie, les bruits irréguliers sont parfois modulés à la fréquence de vibration mécanique des conducteurs.

4. Vibrations mécaniques

Lors de la pluie et en présence d'un champ électrique, les conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique se mettent à vibrer à la fréquence naturelle de la portée. Ce type de vibration est associé à la décharge par effet de couronne des gouttes d'eau suspendues en-dessous des conducteurs [18].

b.4. Les moyens utilisés pour limiter l'effet couronne

Pour limiter l'effet couronne on utilise des conducteurs creux ou en faisceaux comme on utilise des câbles avec un noyau en acier [14].

II.2.2. Les décharges de surface

La décharge électrique de surface, désigne une décharge qui se produit en contact avec la surface d'un diélectrique solide placée dans un gaz ou un liquide isolant [16]. On peut distinguer deux catégories de décharges se produisant à la surface d'un solide isolant :

- Les décharges à barrière diélectrique (DBD) (figure II.1) où les isolants gazeux et solide sont généralement en série entre les deux électrodes, la décharge se développe d'abord dans le volume du gaz avant qu'elle se propage sur la surface du solide [17].

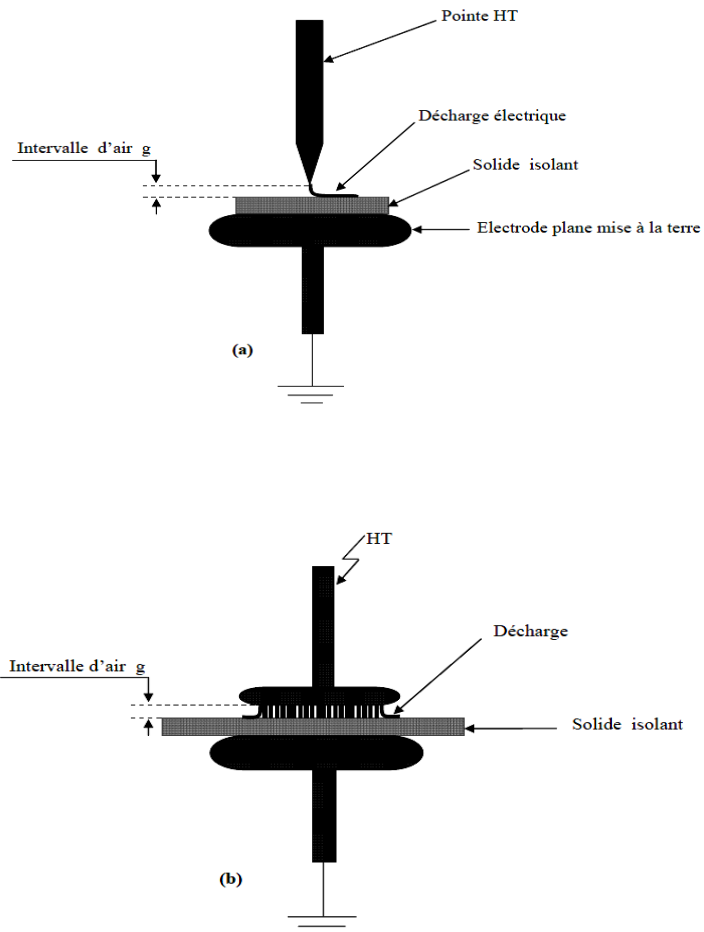


Figure II.1 : Décharges à barrière diélectriques [17]

a) Système pointe-plan

b) Système plan-plan

- les décharges glissantes (figure II.2) où les deux électrodes sont en contact avec la surface du diélectrique solide. La décharge électrique prend naissance et se développe dans le gaz en restant en contact avec la surface du solide isolant sur laquelle elle se propage [17].

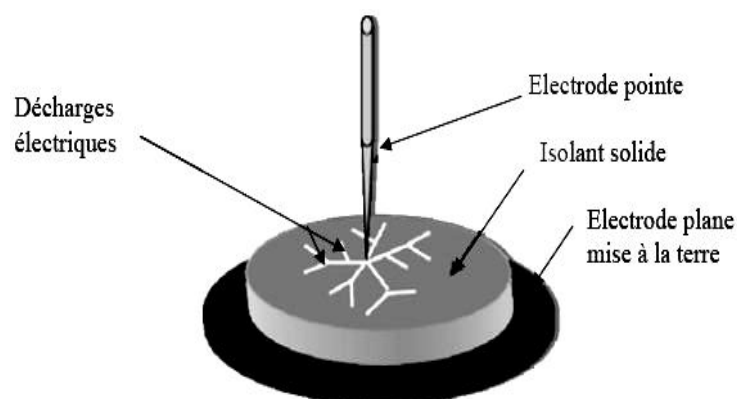


Figure II.2 : Système à décharges glissantes [17]

II.2.3. Les décharges arborescentes

Les isolants solides utilisés en haute tension, ne sont pas parfaits, ils contiennent toujours des impuretés et des défauts microscopiques, ces défauts sont à l'origine de la distorsion et la concentration locale du champ électrique qui conduit à la formation des canaux appelées « arborescences ».

L'arborescence est un phénomène de dégradation d'un isolant, il se manifeste par des formations rappelant une forme d'arbre.

Ces arborescences sont en relation avec :

- les caractéristiques du matériau isolant ;
- la mise en oeuvre de l'isolation et des protections.

On distingue deux types d'arborescences :

- les arborescences électrochimiques ;
- les arborescences électriques.

II.2.3.1. Les arborescences électrochimiques

Les arborescences croissent au cours du temps provoquant un claquage dès que leur taille est suffisante. La présence d'humidité dans certains polymères semble favoriser l'apparition de ce type d'arborescences. La présence simultanée de l'eau et d'un champ électrique intense provoque l'apparition d'arborescences d'eau qui a tendance à suivre les lignes du champ électrique.

II.2.3.2. Les arborescences électriques

Les arborescences électriques sont des structures filamenteuses constituées de micro canaux creux susceptibles de se propager sur des distances de plusieurs millimètres en volume de l'isolant. Elles constituent une dégradation permanente des matériaux et sont étroitement associées au claquage. Elles ont pour origine des défauts dans l'isolation, (vacuoles, particules organiques ou minérales) [19].

II.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une brève revue sur les différents types de décharges électriques, et nous sommes intéressés particulièrement aux décharges couronne générées entre deux électrodes par l'application d'un champ électrique. Nous avons décrit l'origine et les différents facteurs qui influent sur la décharge couronne.

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1.Introduction

Afin de mieux comprendre l'effet des microcavités sur le phénomène de décharges partielles, Nous simulerons l'isolation artificielle utilisée dans les câbles de transport d'énergie haute tension. Pour déterminer le problème de l'impact des propriétés des cavités sur le phénomène de décharges partielles, il est important de déterminer l'effet de la microcavité elle-même sur la répartition des contraintes électriques. Les méthodes numériques se sont avérées plus adaptées pour résoudre de tels problèmes. Cependant, cela nécessite des méthodes pour réduire le temps de calcul et améliorer la précision des résultats. Le temps présent, un programme de haute performance a été créé en tant que plate-forme pour résoudre les problèmes matériels avec des termes et des limitations d'une manière d'éléments finis comme FEMM [20].

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

III.2.Méthode des éléments finis (FEM)

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

III.2.1.Principe

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

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

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

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

III.2.2.Étapes de la méthode des éléments finis

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

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

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

III.2.3.Avantages de la FEM

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

III.2.4. Inconvénients de la FEM

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

➤ **Modèle électrostatique**

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

De plus, la cavité est introduite dans l'isolation du modèle câble pour étudier l'effet de la présence de vide sur le système d'isolation de champ électrique PVC. Le modèle mathématique pour la distribution de champ électrique dans la cavité est créé en respectant le modèle de champ du câble isolé au PVC monophasé. L'intensité du champ électrique est obtenue à partir du potentiel scalaire à gradient négatif. L'équation de relation de E et V est la suivante [23].

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

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

l'espace libre, est donnée dans l'équation (III.2). La relation entre le champ électrique E et le déplacement électrique D dans l'espace vide ou libre est donnée dans l'équation (II.3) [24] :

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

Avec : $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_i$

Où :

ε : Permittivité relative.

ε_i : Permittivité relative de l'isolation PVC.

ε_0 : Permittivité de l'espace libre.

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

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

Les formes de la loi de Gauss qui implique la charge libre et l'équation du déplacement électrique seront représentées comme [1]6 :

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

Où ρ est la densité de charge libre.

En remplaçant l'équation (III.2) et (III.4) dans (III.1) et en introduisant la charge libre comme densité sans charge, l'équation scalaire de Poisson est obtenue comme [1]6 :

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = -\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_i \nabla V) = \rho \quad (\text{III.5})$$

Où ρ est la densité de charge.

En raison de l'application d'un matériau de câble ayant une permittivité constante ε appliquée, l'équation (II.5) devient [6] :

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

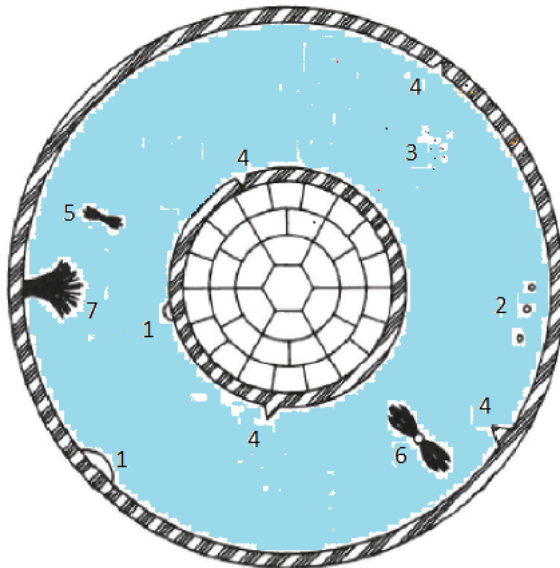
Si nous admettons que la densité de charges dans l'isolateur est trop faible et peut être

négligée, alors l'équation de Poisson (III.6) se transforme en équation de Laplace comme :

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

III.3.Exemple d'un câble avec défauts

La figure suivante montre une coupe d'un câble électrique isolé avec défauts.



1. Vide à l'interface :
2. Vide dans l'isolant
3. Contaminant
4. Protubérance dans le semi-conducteur
5. Décharge à partir d'un contaminant
6. Décharge à partir d'un vide
7. Décharge à partir de l'isolant

Fig.III. Câble isolé avec défauts

III.3.2.Modèle Mathématique

III.3.2.1.Potentiel Electrique

$$U_c = \left(\frac{U}{1 + \frac{1}{\epsilon_r} \left(\frac{d-d_1}{d_1} \right)} \right)$$

III.3.2.2.Champ Electrique

$$E_c = \left(\frac{U_c}{d_1} \right)$$

III.3.2.2. Model géométrique d'un câble souterrain avec cavité

La figure (III.1) montre un model géométrique d'un câble souterrain avec cavité.

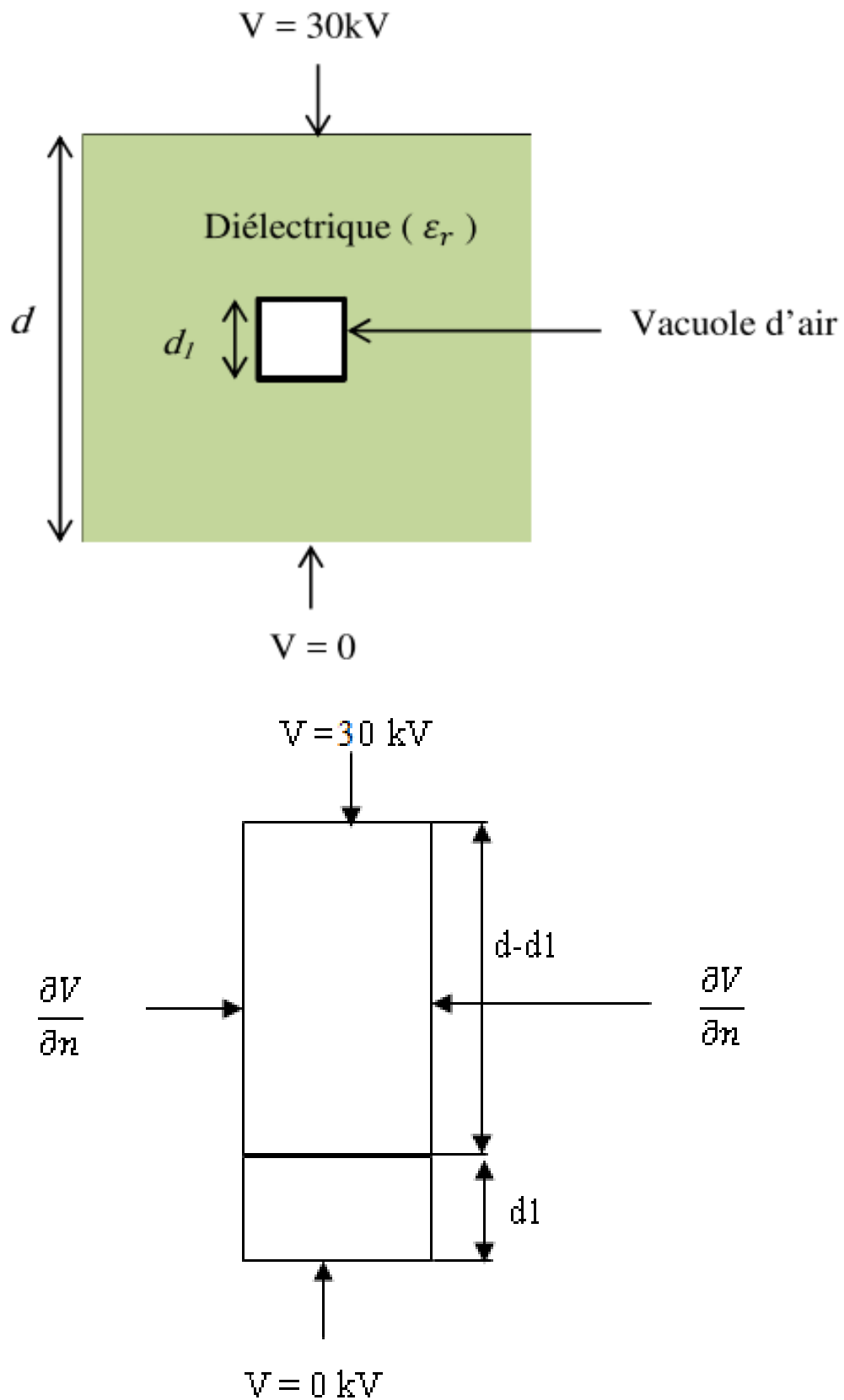


Fig III.1. Model géométrique d'un câble souterrain avec cavité

III.4. Résultats

III.4.1. Model sans cavité

III.4.1.1. Le maillage du domaine d'étude

La figure (III.2) montre le maillage du câble sans défaut (7933 nœuds, 15504 éléments).

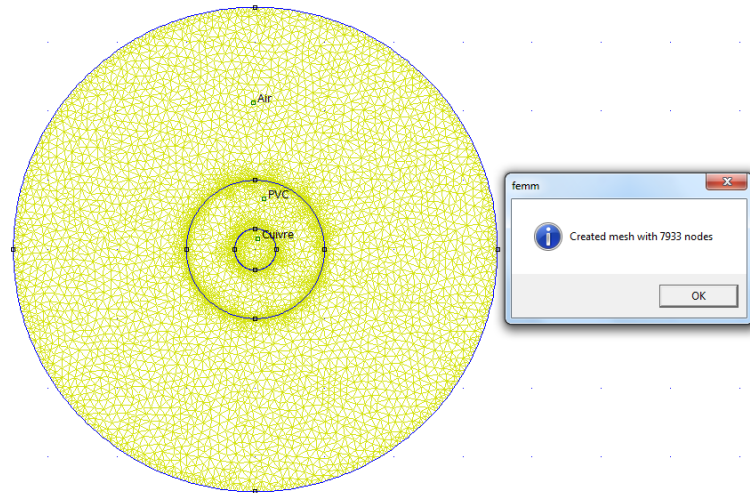


Fig. III.2 : Maillage du câble sans cavité

III.4.1.2. Distribution du Potentiel électrique

La figure (III.3) montre la distribution du potentiel électrique dans le câble sans défaut (sans cavité).

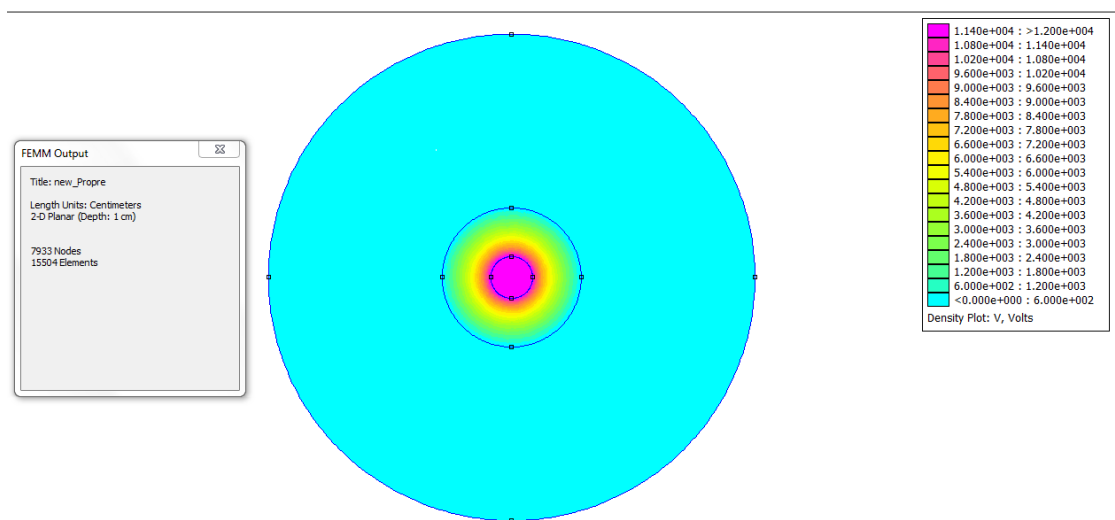


Fig. III.3 : Distribution du potentiel électrique dans le câble sans défaut

Nous pouvons remarquer que le potentiel électrique est beaucoup plus important au centre (au voisinage du câble) avec une valeur de $1,2 \times 10^4$ V.

III.4.1.3. Distribution du champ électrique

Les figures (III.4A et III.4B) montrent la distribution du champ électrique (et avec des lignes du champ) respectivement dans le câble sans défaut (sans cavité).

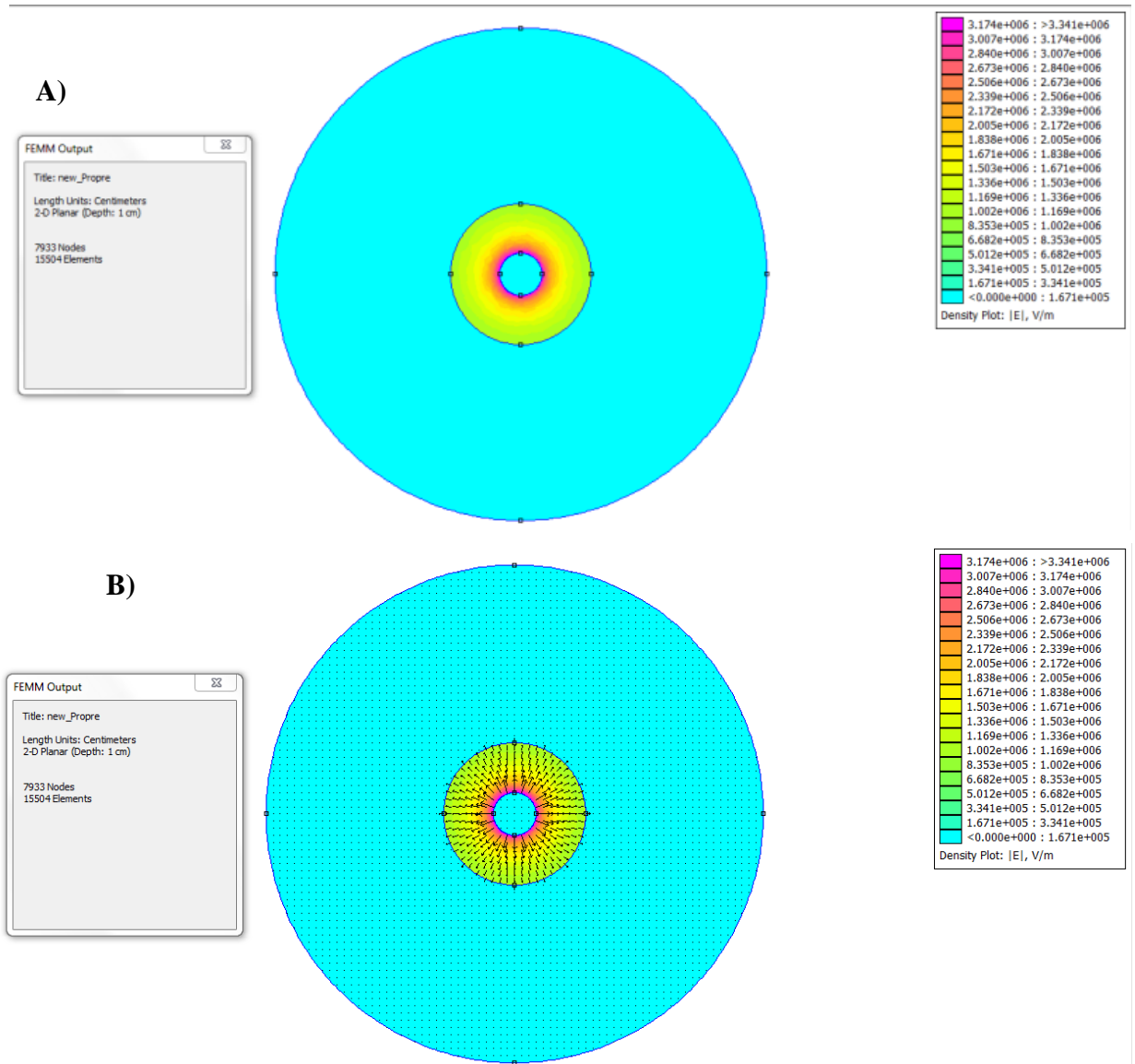


Fig. III.4 : Distribution du champ électrique (sans cavité).

Nous remarquons que le champ électrique est beaucoup plus important au centre (au voisinage du câble) avec une valeur de $3,341 \times 10^6$ V/m.

III.4.2. Model avec cavité

III.4.2.1. Le maillage du domaine d'étude

La figure (III.5) montre le maillage du câble avec défaut (10931 nœuds).

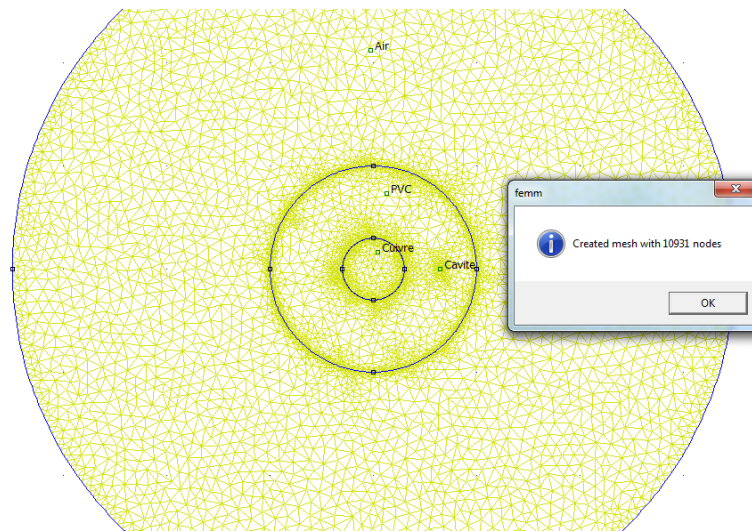


Fig. III.5 : Maillage du câble avec cavité

III.4.2.2. Distribution du Potentiel électrique

La figure (III.6) montre la distribution du potentiel électrique dans le câble avec défaut (cavité). Le diamètre de la cavité est de 20 micromètre.

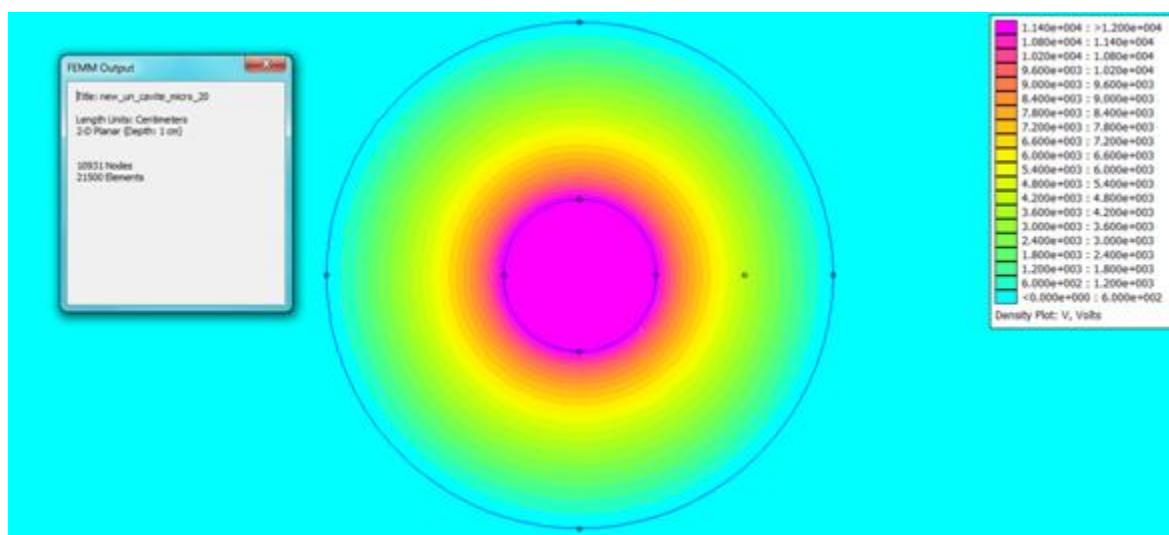
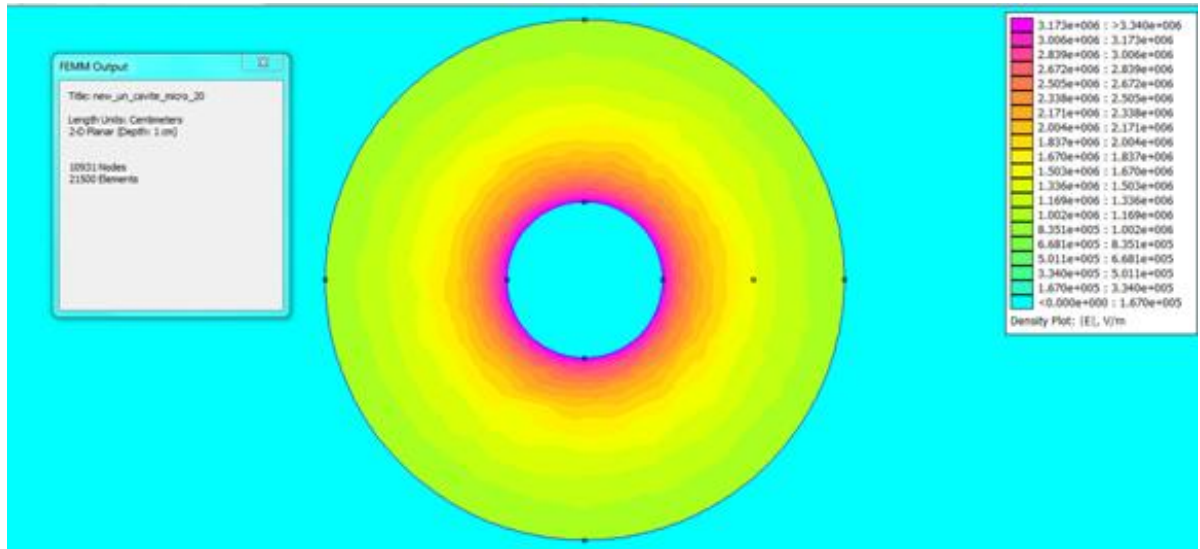


Fig. III.6 : Distribution du potentiel électrique dans le câble avec défaut

III.4.2.3. Distribution du champ électrique

Les figures (III.7A et III.7B) montrent la distribution du champ électrique dans le polymère et à l'intérieur de la cavité respectivement.

A)



B)

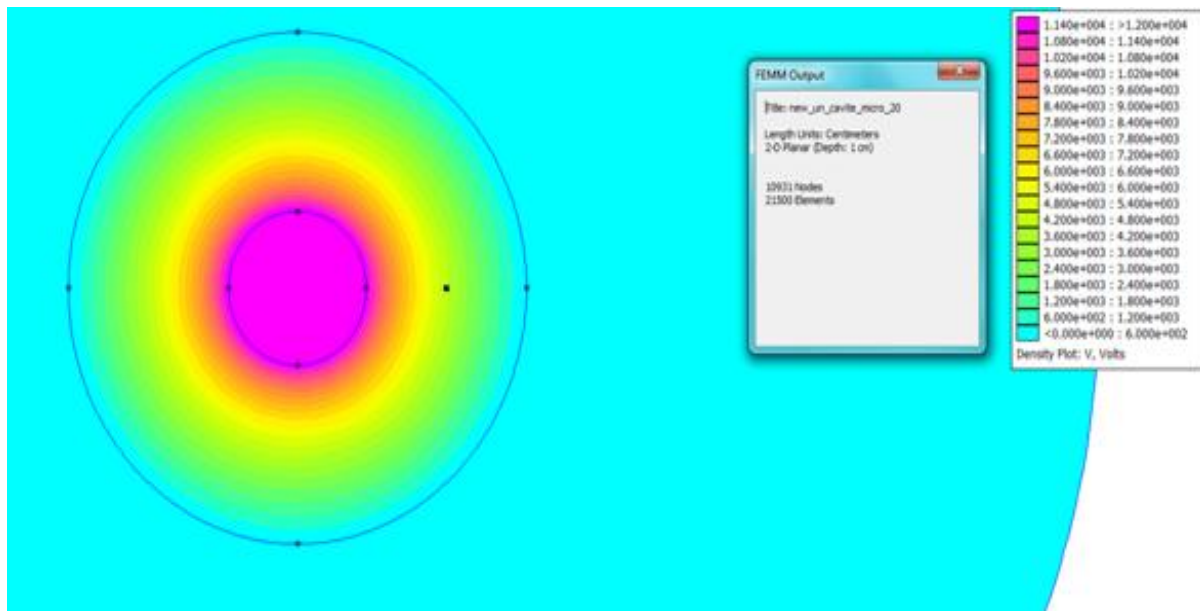


Fig. III.7 : Distribution du champ électrique (sans cavité).

Nous remarquons que le champ électrique est beaucoup plus important à l'intérieur de la cavité avec une valeur de $3,34 \times 10^6$ V/m qui est supérieur a la valeur du champ disruptif de l'air, dans ce cas il y aura un claquage de l'isolant.

La figure (III.8) montre la distribution du champ électrique (avec lignes de champ) dans le polymère, la valeur maximale se trouve au centre (voisinage du câble) d'une valeur de $3,34 \times 10^6$ V/m.

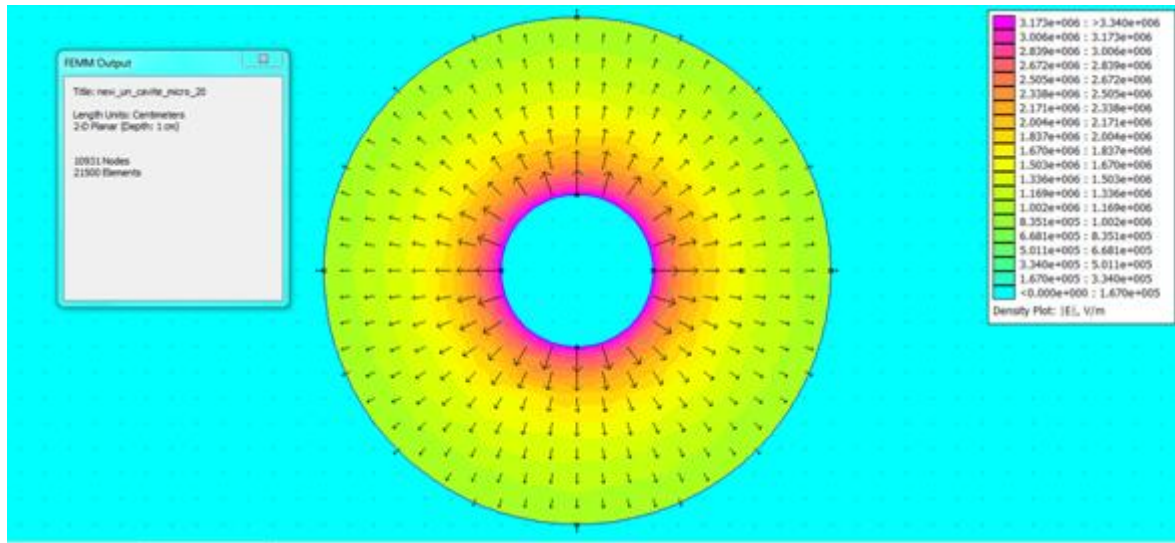


Fig.III.8 : Lignes du champ électrique

III.4.3. Variation du potentiel et du champ électriques en fonction de la position de la cavité

III.4.3. 1.Variation du potentiel électrique

La figure (III.9) montre la variation du potentiel électrique en fonction de la distance (d) entre la HT et le ground.

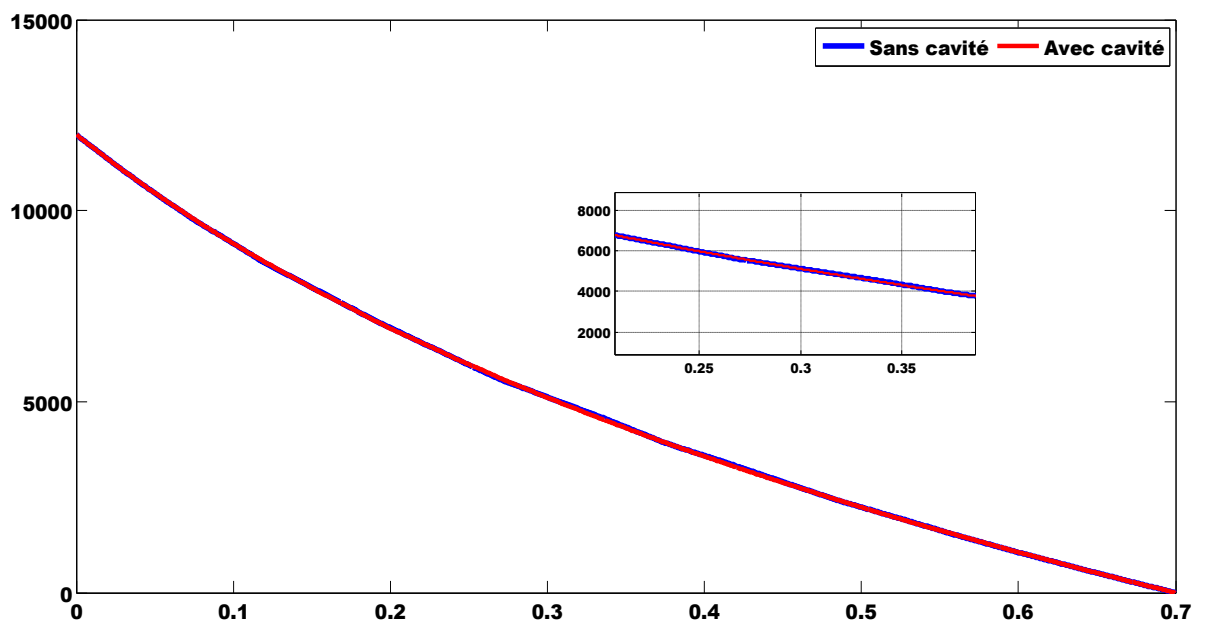


Fig.III.9.Variation du potentiel électrique en fonction de la distance (d)

III.4.3. 2. Variation du champ électrique

La figure (III.10) montre la variation du champ électrique en fonction de la distance (d) entre la HT et le ground.

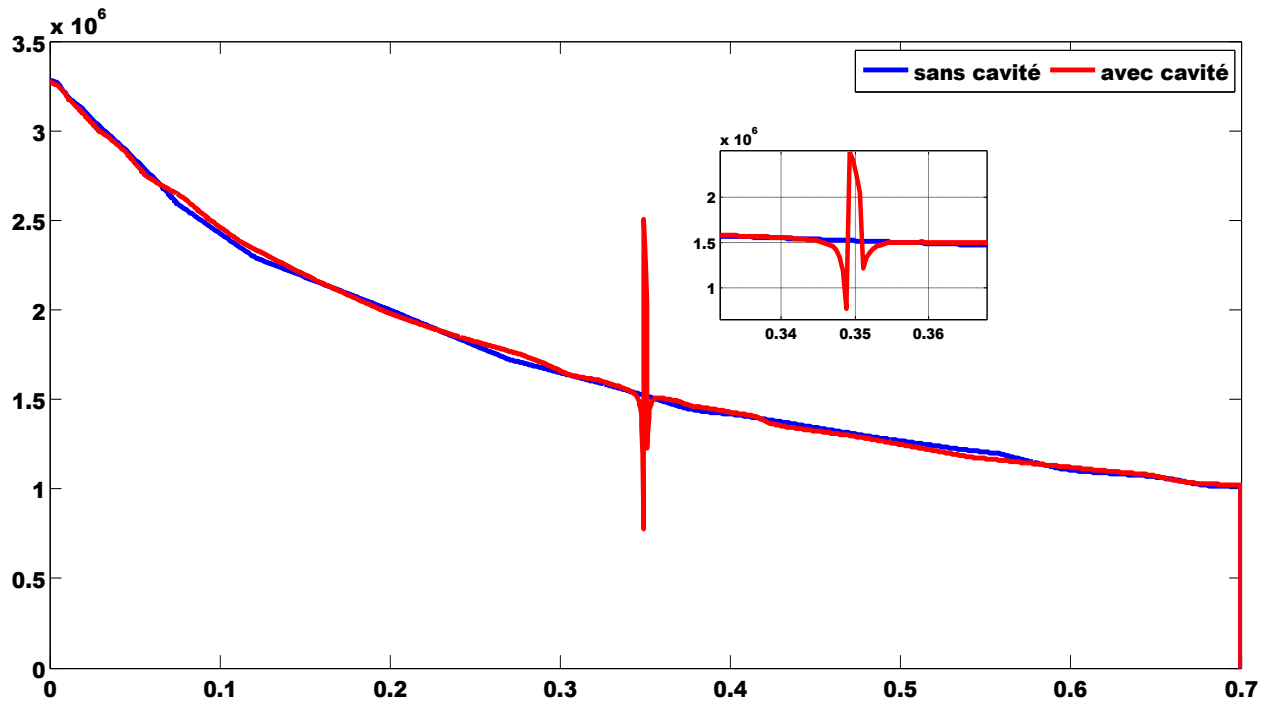


Fig.III.10. Variation du champ électrique en fonction de la distance (d)

On note que pour la variation du potentiel électrique, les courbes ont la même allure (avec et sans cavité). Par contre, pour la variation du champ électrique, le polymère avec cavité présente un pic d'une valeur de $2,5 \times 10^6$ V/m à une distance $d=0,35$ mm.

III.4.4. Application 2

Dans la présente application, on considère l'isolation d'un câble souterrain d'énergie avec cavité d'air à l'intérieur.

III.4.4.1. Caractéristiques physiques et géométriques

On considère un diélectrique (PRC, $\epsilon_r = 2.3$) qui a une largeur de 10 mm et une hauteur de 5 mm, contenant une vacuole d'air ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m) de largeur et épaisseur de

1 mm chacune. Le modèle géométrique ainsi que les conditions aux limites associées sont représentés sur la figure (III.11).

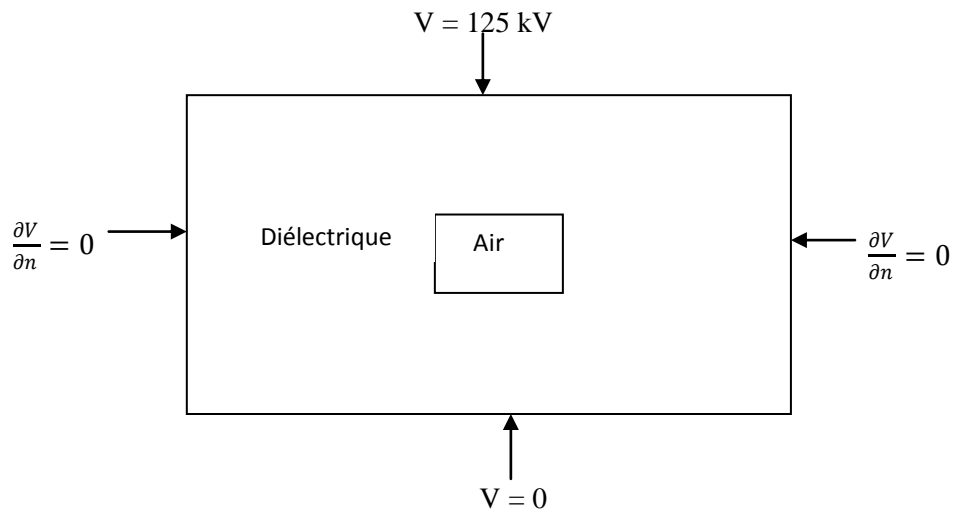


Fig.III.11. Modèle géométrique et conditions aux limites associées d'un câble souterrain avec cavité.

➤ **Maillage du domaine d'étude**

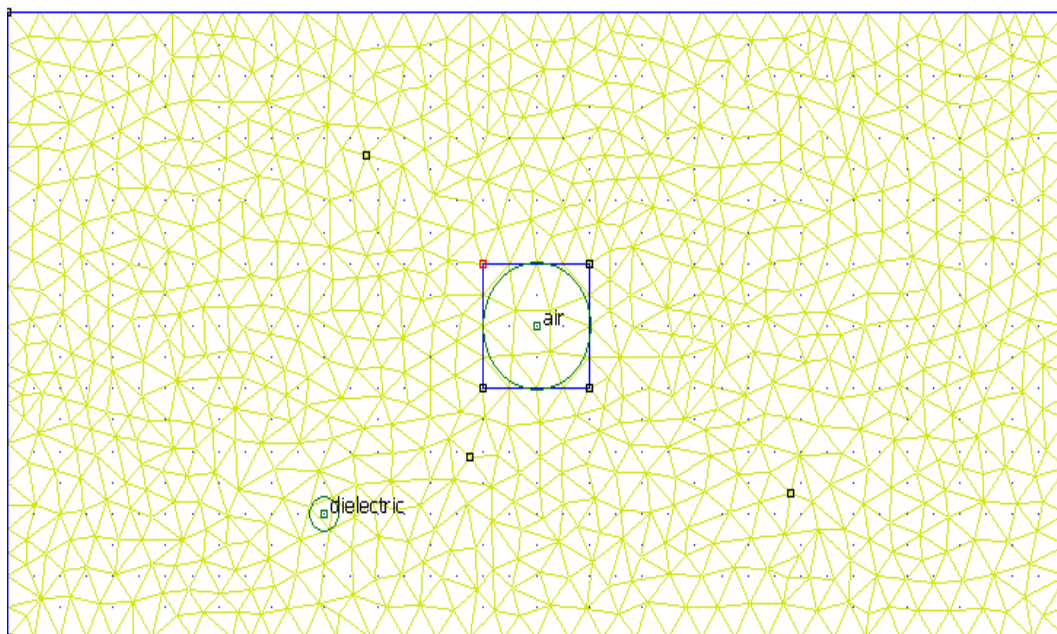


Fig. III.12. Maillage du domaine d'étude avec 1606 éléments triangulaires et 859 nœuds.

III.4.4.2. Etude de quelques phénomènes dans l'isolant

III.4.4.2.1. Répartition du potentiel à l'intérieur du câble souterrain

III.4.4.2.1.1. Absence d'une cavité à l'intérieur du câble

La figure (III.13).représente la répartition du potentiel électrique dans le diélectrique solide, en l'absence de la cavité.

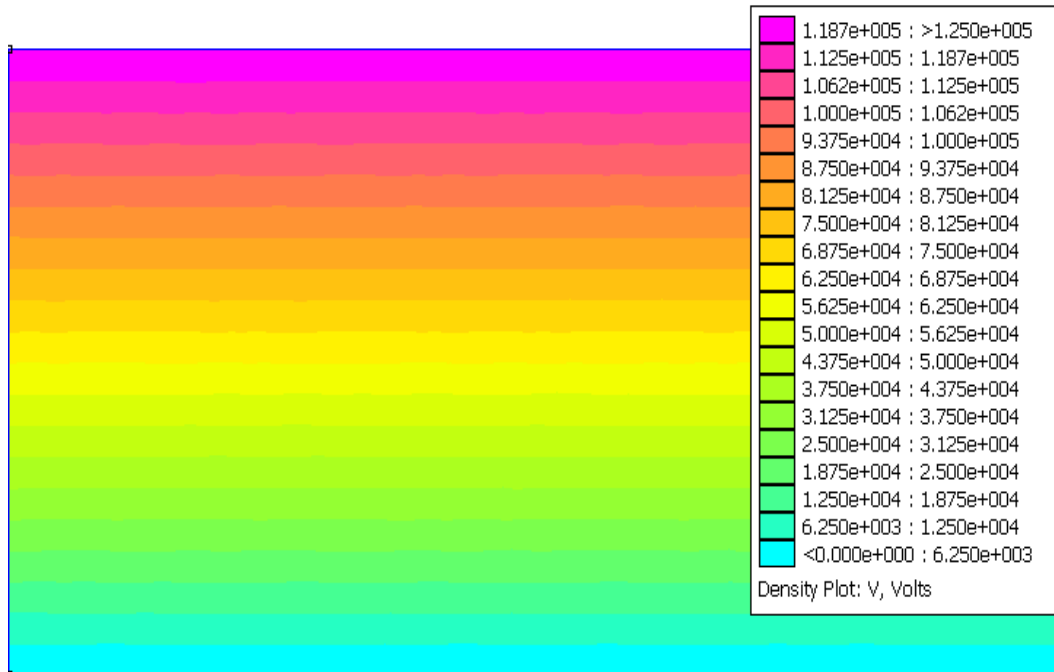


Fig. III.13. Répartition du potentiel à l'intérieur de l'isolant en l'absence de la vacuole

III.4.4.2.1.2. Présence d'une cavité à l'intérieur du câble

En présence de la vacuole, la répartition du potentiel à l'intérieur de l'isolant est comme représentée sur la figure (III.14) suivante. On remarque une nette altération des équipotentielles au voisinage de la cavité.

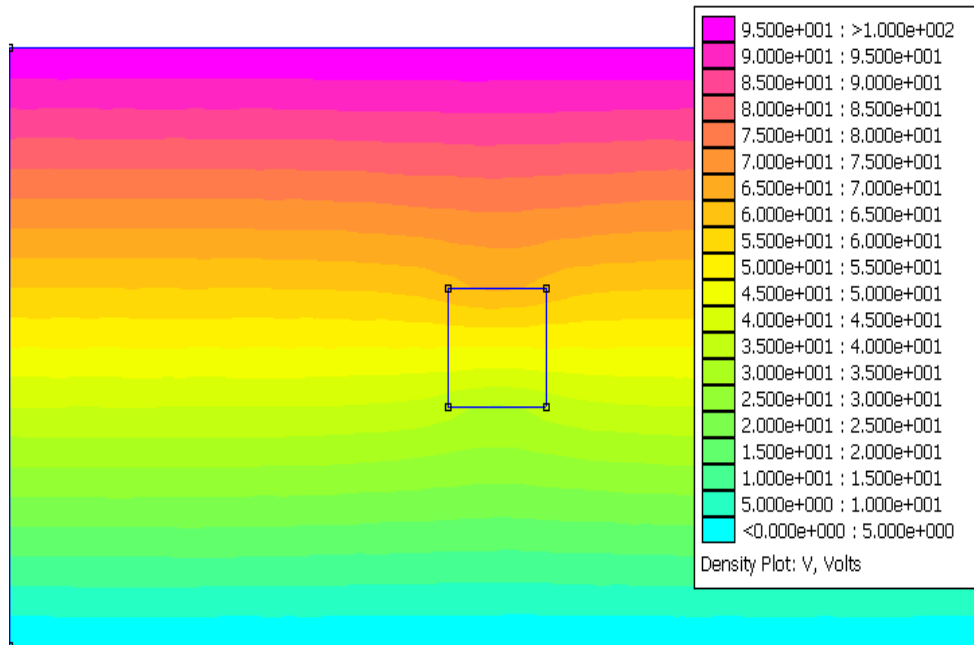


Fig. III.14. Répartition du potentiel dans l'isolant en présence de la cavité.

III.4.4.2.2. Variation du champ en fonction de la tension appliquée

Nous étudions l'effet de la tension appliquée au câble électrique sur la variation du champ moyen à l'intérieur de la cavité pour une position fixe de cette dernière. Le résultat est représenté sur la figure (III.15).

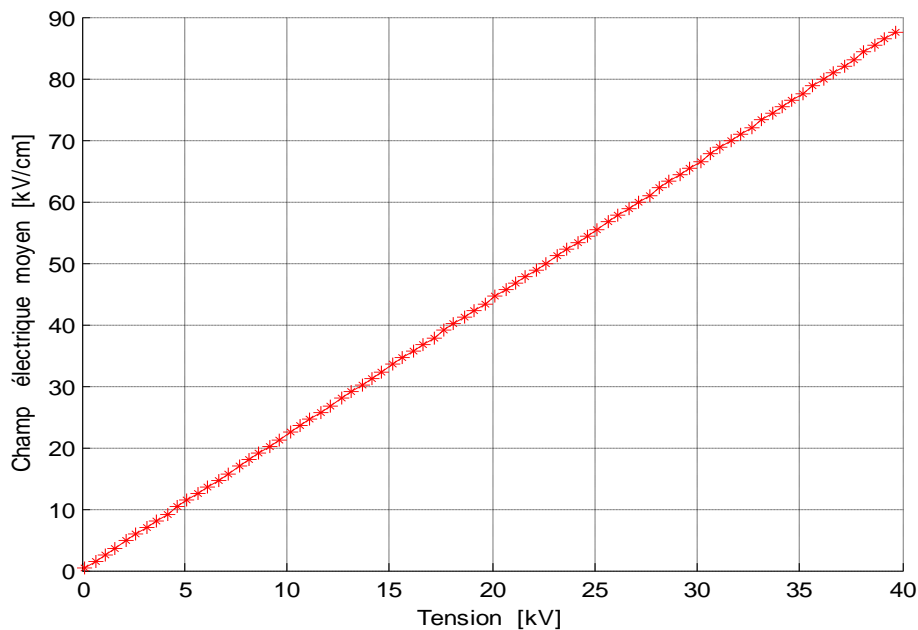


Fig.III.15. Variation du champ moyen en fonction de la tension appliquée pour une position fixe de la cavité.

A partir de la figure (III.15), on remarque une linéarité entre la tension appliquée au câble et le champ moyen recueilli à l'intérieur de la cavité d'air, donc il y a une relation de proportionnalité entre ces deux grandeurs. Le champ moyen atteint la valeur du champ disruptif à partir d'une valeur de tension appliquée proche de 14 kV. Donc, à partir de cette valeur, on est sûr d'avoir une initiation de décharges partielles à l'intérieur de la cavité et donc par suite, une détérioration du câble.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé un câble électrique avec et sans défaut (cavité d'air). Les résultats de simulation ont montré que les distributions du potentiel et du champ électriques varient dans les deux cas : sans défaut et avec défaut. En effet, la présence de cavité dans l'isolant induit à un champ plus grand, qui favorise l'apparition des décharges partielles qui conduisent, à long terme, à la détérioration de l'isolant.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié l'influence de la présence d'un défaut (cavité) sur la distribution du potentiel et du champ électrique. Dans la première partie, nous avons donné quelques généralités sur les polymères isolants. Ensuite, nous avons fait une brève recherche bibliographique sur les différents types de décharges électriques et les paramètres qui les influent.

En deuxième partie, nous avons donné un aperçu sur l'utilisation du logiciel FEMM, ainsi que les équations du modèle électrostatique. En fin, nous avons modélisé un câble électrique avec et sans défaut (cavité d'air). Les résultats de simulation ont montré que les distributions du potentiel et du champ électriques varient dans les deux cas : sans défaut et avec défaut. En effet, la présence de cavité dans l'isolant induit à un champ plus grand, qui avantage l'apparition des décharges partielles qui conduisent, à long terme, à la détérioration de l'isolant. Nous avons étudié l'effet de la tension appliquée au câble électrique sur la variation du champ moyen à l'intérieur de la cavité pour une position fixe de cette dernière. Les résultats obtenus montrent que le champ électrique est proportionnel à la tension appliquée.

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

Comme perspectives à cette étude, nous souhaitons faire l'étude avec plusieurs défauts, avec la variation des dimensions de la cavité d'air. Aussi changer cette dernière par une cavité d'eau. (gouttelettes d'eau).

Résumé

Résumé :

Les polymères sont aujourd'hui largement utilisés dans le monde industriel. On les retrouve dans l'isolation des machines électriques, dans l'isolation de câbles électrique, etc. Cependant, quand ils (polymères) sont mis en service, ils sont vulnérables à l'action des décharges électriques qui peuvent apparaître dans un défaut (cavité). Dans cette étude, nous avons modélisé un câble électrique avec et sans défaut (cavité d'air). Les résultats de simulation ont montré que les distributions du potentiel et du champ électriques varient dans les deux cas : sans défaut et avec défaut. En effet, la présence de cavité dans l'isolant induit à un champ plus grand, qui avantage l'apparition des décharges partielles qui conduisent, à long terme, à la détérioration de l'isolant.

Mots clés : Cavité, champ électrique, modélisation, dégradation, isolant.

Abstract :

Polymers are widely used in the industrial world today. They are found in the insulation of electrical machines, in the insulation of electrical cables, etc. However, when they (polymers) are put into service, they are vulnerable to the action of electrical discharges which can appear in a defect (cavity). In this study, we modeled an electrical cable with and without a defect (air cavity). The simulation results showed that the electric potential and field distributions vary in both cases: without defect and with defect. Indeed, the presence of a cavity in the insulation induces a larger field, which favors the appearance of partial discharges which lead, in the long term, to the deterioration of the insulation.

Key words: Cavity, electric field, modeling, degradation, insulator.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] T. Toledo, « Calcul des contraintes électriques dans les isolations mettant en œuvre des matériaux semi-conducteurs non linéaires », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2004.
- [2] LARBA Mohamed « Effets des décharges partielles sur les propriétés diélectriques des isolants dans la fabrication des câbles électriques » thèse doctorat, Année 2017, Université Badji Mokhtar d'Annaba
- [3] Mohammed Adnane DOUAR « Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques Haute Tension – Influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage » thèse doctorat, L'école centrale de Lyon ; 2014.
- [4] A-f. Gourgues-Lorenzo et J-M.Haudin. Matériaux pour l'ingénieur ; 2006
- [5] J.C. Chaumel, D. Brossard, A. le Hir « pharmacie galénique bonne pratique de fabrication des médicaments » 9^e édition. Elsevier Masson SAS ; 2009.
- [6] O. Gallot-lavallee, « Etude de la charge d'espace et des phénomènes luminescents comme précurseurs du vieillissement électrique d'une résine époxy utilisée dans l'isolation haute tension », Thèse de Doctorat ès sciences, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2004.
- [7] L'indispensable en polymères. Cycle universitaire scientifique. Geneviève M.L. Dumas et Roger I; 2008
- [8] Jean Claud Martin, « Incendies et explosions d'atmosphère » ; traité de sécurité intérieure. Presses polytechniques et universitaires romandes ; 2008.
- [9] Mohammed Adnane DOUAR « Recherche de matériaux isolants pour la conception d'une nouvelle génération de connecteurs électriques Haute Tension – Influence de la pollution sur les phénomènes de décharges partielles du contournement et de claquage » thèse doctorat, L'école centrale de Lyon ; 2014.
- [10] Michel Foutanille et Yves Gnanou « Chimie et physico-chimie des polymères » C311, Paris ; 2010.
- [11] Tanaka, T. (2005). Aging of polymeric and composite insulating materials. Aspects of interfacial performance in aging. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 12(5), 914-928
- [12] A.K. Jonscher, R. Lacoste, « On a cumulative model of dielectric breakdown in solids », IEEE, Transaction, on Electrical Insulation, Vol. EI-19, N°6, pp. 567-577, Décembre 1984.

- [13] Zhang, S., Harano, Y., Yoshida, K., & Uchiike, H. (1997, February). Discharge characteristics of surface-discharge ac plasma displays by observation using an ultra-high speed electronic camera. In ITE Technical Report 21.10 (pp. 65-69). The Institute of Image Information and Television Engineers.
- [14] Ikeda, T., Wake, H., Takada, T., & Murooka, Y. (1998, September). Observation of AC surface discharge dynamic behavior under various atmosphere pressure. In Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials. 1998 Asian International Conference on Dielectrics and Electrical Insulation. 30th Symposium on Electrical Insulating Ma (pp. 263-266). IEEE.
- [15] Zegnini, B., & Mahi, D. (2002, April). The relationship between the estimated intensity of electrical current flowing in the electrolyte and the propagation of the local discharge on an electrolytic surface under AC voltage. In Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No. 02CH37316) (pp. 241-244). IEEE.
- [16] Koliatene, F. Les Décharges Partielles (DP) dans le diagnostic du Système d'Isolation de l'Avionique.
- [17]. Belhiteche El Hadi, « Etude de la dégradation d'un solide isolant soumis aux décharges électriques de surface », Mémoire de MAGISTER, Université de Tizi-Ouzou 2012
- [18] Niemeyer, L., Pietronero, L., & Wiesmann, H. J. (1984). Fractal dimension of dielectric breakdown. *Physical Review Letters*, 52(12), 1033.
- [19] Reid, AJ, Judd, MD, Fouracre, RA, Stewart, BG et Hepburn, DM (2011). Mesure simultanée des décharges partielles à l'aide des techniques IEC60270 et radiofréquence. *Transactions IEEE sur les diélectriques et l'isolation électrique* , 18 (2), 444-455.
- [20] Le Roy, S. (2004). Modélisation numérique des phénomènes de transport électrique dans un isolant polyéthylène sous contrainte électrique (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).