

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Électrotechnique.
Spécialité : Commandes Electriques.
Thème

Modélisation des arborescences électriques

Présenté Par :

- 1) Melle Khettal fatima zahra
- 2) Melle Kacem wassila

Devant le jury composé de :

Mr S. Zelmat	Pr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	examinateur
Mr D.Berrached	Dr	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mme A.TOUHAMI	M.A.A	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

Année universitaire 2021/2022

Remerciement

*En préambule à ce mémoire je remerçant **ALLAH** qui m'aide et me donne la patience et*

Le courage durant ces longues années d'étude.

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à

Qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

*Ces remerciements vont tout d'abord à **mes parents** pour leur contribution, leur soutien et*

Leur patience.

*Nos vifs remerciement sont adressés à : **Mme TOUHAMI AICHA** notre encadreur, pour ses encouragements et pour toutes les connaissances que nous avons acquise à ses côtés.*

*Je remercie les membres du **jury** pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

Enfin, Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les amis et collègues qui m'ont

Apporté leur soutien moral et intellectuel tout au long de ma démarche.

Dédicace

A ma Chère Mère KHADIDJA RETRI

A mon Père Abdelkader

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté,

Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour.

A mon Frère et ma sœur ABDEHADI et AMINA

Qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite.

A ma tante Rachida

Qu'elle me pousse d'être plus forte dans la vie et de faire face à mes problèmes et les

Obstacles que je rencontre, elle était toujours devant moi, c'est ma deuxième mère

A ma grande mère

A tous mes amis KHADRA, AMEL, KHADIDJA, CHAIMA, FATIMA, IKRAM, OUNISSA

...

A mon binôme « KACEM WASSILA » et sa famille

KHETTAL FATIMA ZAHRA

Dédicace

✓ *A ma Chère Mère **DERBELE .KH***

✓ *A mon Père **MOUHAMMED***

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté,

Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines m'ont permis de vivre ce jour.

✓ *A mes frères **AMINE, OMER, ILYASE** et mes cousines*

Qui je souhaite un avenir radieux plein de réussite.

✓ *A mes tentes*

Qu'elle me pousse d'être plus forte dans la vie et de faire face à mes problèmes et les

Obstacles que je rencontre, elle était toujours devant moi, c'est ma deuxième mère

A ma grande mère

✓ *A tous mes amis, **KHADIDJA, CHAIMA, FATIMA, IKRAM, OUNISSA...***

✓ *A mon binôme « **KHETTAL FATIMA ZAHRA** » et sa famille*

KACEM WASSILA

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I Généralité sur les arborescences électriques

I.1.Introduction 2

I.2.Définition et origine des arborescences 2

I.2.1.Les arborescences ouvertes 2

I.2.2.Les arborescences en nœud papillon 2

I.3. Arborescences électriques 3

I.3.1.Définition 3

I.3.2 Structures et formes d'arborescences 4

I.4. Les phases d'évolution des arborescences électriques 4

I.4.1. La phase d'initiation 4

I.4.2. La phase de propagation..... 5

I.4.3. La phase de claquage 5

I.5. Mécanismes d'évolution des arborescences électriques 5

I.5.1.Mécanismes d'initiation 5

I.5.1.1. Formation de l'arborescence par décharges partielles 5

I.5.1.2. Action des porteurs chauds sur la structure d'isolant..... 5

I.5.1.3. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique 6

I.6. Mécanismes de propagation des arborescences électriques 6

I.6.1.Mécanismes électriques..... 6

I.6.2.Mécanismes thermiques 7

I.7.Facteurs influant sur la propagation des arborescences électriques 10

I.8. Méthodes permettant d'éviter la formation d'arborescences 9

I.9. Conclusion..... 10

Chapitre II Modélisation analytique des arborescences

II.1 Introduction..... 12

II.2 Pression électrostatique..... 12

II.3.2.Expression du champ électrique 12

II.3.2.1.Arborescence en forme de buisson	13
II.3.2.1.1 Sphère tangente à la pointe	14
II.3.2.1.2Sphère centrée sur la pointe P	15
II.3.2.1.3Sphère centrée en O	15
II.3.2.2 Arborescence en forme de branches	16
II.3.2.2 .1 Approximation sphérique	17
II.3.2.2.2.Approximation hyperboloïdale	17
II.4.Bilan énergétique	17
II.4.1.Arborescence en buisson	17
II.4.1.1Arborescence assimilée à une sphère tangente à la pointe (p).....	18
II.4.1.2.Arborescence assimilée à une sphère centrée sur la pointe(p).....	19
II.4.2.1.Approximation sphérique	22
II.4.2.2.Approximation hyperboloïdale	23
II.5 Conclusion	23

Chapitre III Résultats de Simulation et discussion

III.1. INTRODUCTION	26
III.2. Type Buisson	27
III.2.1. Modèle de la sphère tangente à la pointe.....	27
III.2.1. 1. Variation de la tension.....	27
III.2.1.2. Variation de la distance inter électrode	28
III.2.1.3.Variation de permittivité relative.....	29
III.2.1.4 Commentaire	30
III.2.2. Modèle de la Sphère centrée en p.....	31
III.2.2.1. Variation de la tension.....	31
III.2.2.2.Variation de la distance inter électrode	31
III.2.2.3.Variation de la permittivité relative.....	32
III.2.2.4 Commentaire	33

III.2.3.Modèle de la Sphère centrée en o	34
III.2.3.1 Variation de la tension	34
III.2.3.2.Variation de distance inter électrode	34
III.2.3.3. Variation de la permittivité relative	35
III.2.3.4 Commentaire	36
III.3.Type branche	37
III.3.1.Approximation sphérique	37
III.3.1.1.variation de la tension.....	37
III.3.1.2.Variation de la distance	37
III.3.1.3.Variation de la permittivité relative.....	38
III.3.1.4.Commentaire	39
III.3.2.Approximation hyperboloïdale.....	40
III.3.2.1.Variation de la tension.....	40
III.3.2.2. Variation de la distance	40
III.3.2.3 variation de permittivité relative	41
III.3.2.4 Commentaire	42
III.4. Récapitulation des résultats	43
III.5.Conclusion	43
Conclusion générale	44

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralité sur les arborescences électriques

fig. I.1: :(A) arborescences ouvertes et (B) arborescences en nœud-papillon [4].	3
fig.I.2: (a) arborescences de type branche, (b), type buisson, (c), type buisson ramifié [14].	4
fig.I.3: Processus de la rupture par arborescence [12].	9

Chapitre II: modélisation analytique des arborescences

fig.II.1: Représentation schématique des différents modèles sphériques. [4].	14
fig.II.2: Représentation schématique du modèle filamentaire (a): approximation sphérique, (b) : approximation hyperboloïdale [4].	17

Chapitre III: résultats de simulation et discussion

fig.III.1:système d'électrode pour simuler la propagation d'arborescences [30].	26
fig.III.2: variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 10KV et 15KV et 20 KV (modèle de la sphère tangente).	28
fig.III.3: variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4 mm et 6 mm et 8 mm (modèle de la sphère tangente)	29
fig.III.4: variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps du vieillissement, sous une permittivité relative de $\epsilon_r(\text{PE})=2.3$ et $\epsilon_r(\text{PVC})=3.4$ (modèle de la sphère tangente)	30
fig.III.5: variation de la longueur de l'arborescence en fonction de temps de vieillissement, sous une tension de 10 KV et 15KV et 20 KV (modèle de la sphère centrée en p)	31
fig.III.6: variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distances de 4mm et 6 mm 8mm (modèle de la sphère centrée en P).	32
fig.III.7: variation de la longueur de l'arborescence en fonction de temps de vieillissement, sous une permittivité relative de $\epsilon_r(\text{PE})=2.3$ $\epsilon_r(\text{PVC})=3.4$ (modèle de la sphère centré en p)	33
fig.III.8: variation de la longueur de l'arborescence en fonction de temps de vieillissement, sous une tension de 10KV et 15kV 20kV (Modèle de la Sphère centrée en o)	34
fig. III. 9: Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4mm et 6mm et 8mm (Modèle de la Sphère centrée en o)	35
fig.III.10 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une permittivité relative de $\epsilon_r(\text{PE})=2.3$ $\epsilon_r(\text{PVC})=3.4$ (modèle de la sphère centré en o)	36
fig. III. 11 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 10 KV et 15KV et 20KV (modèle Approximation sphérique)	37
fig.III.12 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4mm et 6mm et 8mm (Modèle Approximation sphérique)	38
fig.III.13 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une permittivité relative de $\epsilon_r(\text{PE})=2.3$ $\epsilon_r(\text{pvc})=3.4$ modèle Approximation sphérique)	39

fig. III. 14 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 10 KV et 15KV et 20KV (modèle Approximation hyperboloïdale)	40
fig.III.15 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4mm et 6mm et 8mm (Modèle Approximation hyperboloïdale) ..	41
fig.III.16 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une permittivité relative de $\epsilon_r(\text{PE})=2.3$, $\epsilon_r(\text{PE})=3.4$ (modèle Approximation hyperboloïdale)	42

Liste des tableaux

Chapitre III: résultats de simulation et discussion

tab.III.1 : types de polymeres utilises et leurs caracteristiques	27
tab.III.2 : longueur maximale d'arborescence (type buisson), pour temps de vieillissement 100 min	43
tab.III.3 : longueur maximale d'arborescence (type branche), pour temps de vieillissement 100 min	43

Liste des symboles

Notation	Signification
r_p	Le rayon de courbure de l'électrode pointe
c_0	Taille de la cavité sub microscopique
E	Champ électrique
p_e	pression électrostatique
ϵ_0	permittivité du vide
L	longueur de l'arborescence
D	distance inter-électrodes
U	tension appliquée entre électrode
E_c	énergie cinétique de l'arborescence
ϵ_r	Permittivité relative du polymère
W	Travail
t_c	temps de claquage
P	masse volumique du polymère
r_b	Le rayon de branche
R_0	Rayon initiale de l'arborescence
R	Rayon de l'arborescence a la instante t
T	Temps d'évolution de l'arborescence
t_c	Temps de retard au claquage
Ode	Ordinary differential equtions

Introduction générale

Les diélectriques solides utilisés dans les isolations en haute tension, présentent toujours des impuretés et des défauts microscopiques malgré les précautions prises lors de leur mise en œuvre. Ces impuretés provoquent une distorsion et une concentration locale du champ électrique, ceci peut entraîner la dégradation de l'isolant à court ou à long terme, par le mécanisme d'arborescence, pouvant aller jusqu'à la perforation complète de l'isolation [1].

Ces arborescences sont considérés comme un phénomène de pré claquage électrique dans les isolantes solides hautes tensions, C'est un processus dommageable dû aux décharges partielles et progresse à travers l'isolation diélectrique sollicitée, dans un chemin ressemblant aux branches d'un arbre. L'arborescence de l'isolation solide des câbles haute tension est un mécanisme de panne courant et une source de défauts électriques dans les câbles électriques souterrains.

Les polymères isolants tels que le polyéthylène disposent d'atouts importants par rapport aux isolants classiques tels que le verre, la porcelaine, le papier imprégné. Ils ont l'avantage d'avoir des propriétés mécaniques meilleures, une mouillabilité plus faible, d'être plus légers et mis en œuvre plus facilement [2].

Ce mémoire est composé de trois chapitres, dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les Arborescence Electrique (A.E), leur définition et origine, structures et formes, phases d'évolution, théories expliquant leur initiation, et mécanismes de leur propagation. Les facteurs influant sur leur propagation et les méthodes d'éviter leur formation).

Le deuxième chapitre se focalise sur la modélisation analytique à base de la pression électrostatique d'où sont issus deux modèles géométriques de forme simple, l'un est sphérique pour l'arborescence buisson et l'autre cylindrique pour l'arborescence branche. Nous avons négligé la présence de charge d'espace.

Dans le troisième chapitre nous avons résolu les différentes équations différentiels correspondant à la propagation de l'arborescence (buissons, branche) à l'aide d'un code de calcul sur MATLAB puis interpréter le résultat obtenus.

Nous terminons notre projet par une conclusion générale.

Chapitre I
Généralité sur les
arborescences
électriques

I.1.Introduction

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 [3]. Dans ce chapitre nous étudierons l'origine et les formes des arborescences électriques.

I.2.Définition et origine des arborescences

Les diélectriques solides, utilisés dans l'isolation en haute et moyenne tension, présentent des défauts tels que des microcavités et impuretés macroscopiques [4]. Cette présence est à l'origine de la distorsion et la concentration locale du champ électrique. L'intensité du champ peut atteindre des valeurs élevées (plusieurs fois E_{moy}), parfois voisines de la rigidité diélectrique du matériau. Ce qui peut entraîner la dégradation des isolants de haute tension par un phénomène qui se manifeste par l'apparition de canaux ou cavités microscopiques, dont l'ensemble rappelle une forme d'arbre appelée « arborescence » [5].

On distingue deux types d'arborescences [6].

I.2.1.Les arborescences ouvertes

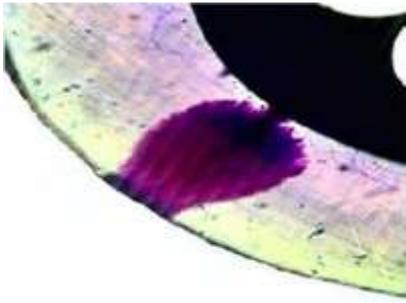
Ces arborescences prennent naissance à partir des défauts ou d'inhomogénéités de contact écran/isolant dans un câble de transport d'énergie haute tension. Aux premiers stades de vieillissement, elles sont de tailles réduites et peuvent continuer à Accroître dans la même direction du champ électrique, jusqu'à mettre en court-circuit L'isolant. C'est pour cette raison qu'elles sont classées comme les plus dangereuses [6].

I.2.2.Les arborescences en nœud papillon

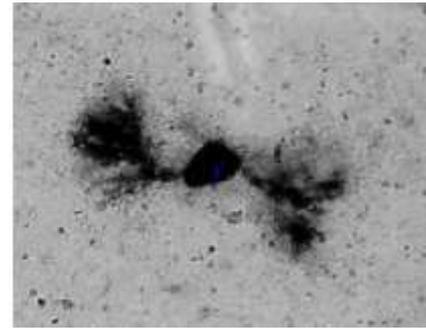
Ces arborescences ne se développent pas largement et semblent cesser de grandir assez Rapidement, leur surface ne semble pas être conductrice. Elles ne sont donc pas dangereuses [7]. Dans les deux cas, le développement des arborescences se fait dans la direction du champ électrique.

L'environnement où fonctionne l'isolant génère deux familles d'arborescences [8].

- Les arborescences électriques.
- Les arborescences électrochimiques.



(A)



(B)

Fig. I.1:(A) arborescences ouvertes et (B) arborescences en nœud-papillon [4].

I.3. Arborescences électriques

I.3.1. Définition

Les arborescences électriques se développent dans les milieux qui ne contiennent pas de l'eau ni d'autres solutions chimiques. Elles évoluent plus rapidement que les arborescences électrochimiques, en présence de défauts : hétérogénéités au niveau des interfaces écran isolant, impuretés ou occlusions gazeuses au sein de l'isolant. Elles apparaissent après un certain temps d'application de la tension, dit temps d'initiation ou d'incubation [9].

Les arborescences sont difficiles à observer sur des câbles pour les raisons suivantes :

- Les informations sur les câbles détériorés sont souvent incomplètes et on ne peut suivre l'évolution des arborescences ainsi que les conditions particulières ayant pu entraîner leur formation [10].
- Une observation régulière des câbles en service n'est pratiquement pas possible [6]. Des études sur des longueurs de câble importantes en simulation d'activation nécessitent des installations énormes [11].
- L'apparition des arborescences peut se produire au bout de temps très long, d'où la nécessité d'employer des méthodes permettant l'accélération des phénomènes [10].
- Le claquage peut se faire très rapidement et il y a très peu de chance d'isoler une portion du câble dans laquelle on pourrait observer ces phénomènes transitoires [10].
- Les arborescences doivent être cherchées au hasard sur des lamelles de câble découpées, ce qui nécessite un travail long et fastidieux. C'est pour cela, qu'on est souvent amené à simuler l'arborescence au laboratoire sur des échantillons de polymères sous une géométrie d'électrode pointe plan de sorte à localiser le défaut sur l'électrode pointe, siège de développement de l'arborescence [6].

I.3.2 Structures et formes d'arborescences

Les arborescences électriques sont constituées de canaux creux renfermant essentiellement de l'hydrogène [12] et dont le diamètre varie de quelques nanomètres à l'initiation [13] à quelques micromètres (2 à 50 μm) pendant la propagation [4].

On distingue plusieurs formes d'arborescences : de type branche, de type buisson et de type buisson ramifié [4]. D'après les travaux de Noto et Yoshimura [14], sur le polyéthylène sous tension alternative à 50Hz :

- ✚ Si $E < 5,4 \cdot 10^8$ v/m, l'arborescence est de type branche (Fig.I.1.a).
- ✚ Si $5,4 \cdot 10^8$ v/m $< E < 6,0 \cdot 10^8$ v/m, l'arborescence est de type buisson (Fig.I.1.b).
- ✚ Si $E \sim 6,0 \cdot 10^8$ v/m, l'arborescence est de type buisson ramifié (Fig .I.1.c).

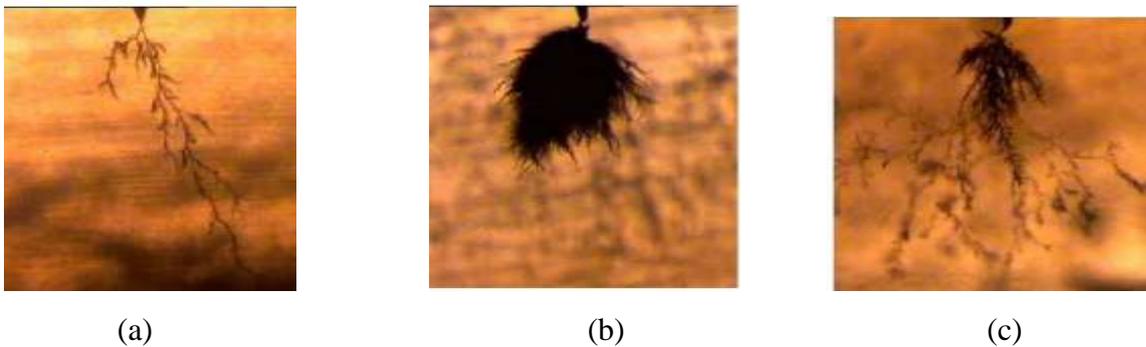


Fig.I.2: (a) arborescences de type branche, (b) type buisson, (c) type buisson ramifié [14].

I.4. Les phases d'évolution des arborescences électriques

On distingue trois phases dans l'évolution du phénomène d'arborescences [3].

- 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 [16].

I.4.1. La phase d'initiation

C'est le temps pendant lequel on doit appliquer la tension au système d'électrodes pour qu'apparaisse la première branche [15]. Celle-ci est mise en évidence par l'enregistrement des décharges partielles (DP) provoquant un phénomène d'électroluminescence et la formation de région détériorée [6].

Une cavité pleine de gaz est supposée formée à cet instant, par fatigue électromécanique au point de concentration du champ électrique. Pour les mêmes conditions expérimentales, le temps d'initiation varie beaucoup et il est d'autant plus court que la fréquence est élevée et que le champ électrique est intense. Le temps d'incubation est d'autant plus court que la fréquence est élevée et le champ est intense [15].

I.4.2. La phase de propagation

C'est la période pendant laquelle se développent les micro-canaux dans l'espace inter-électrode [15]. Elle est caractérisée par l'amorçage des décharges électriques qui font progresser ces micro-canaux dans la direction du champ électrique [10]. La propagation de l'arborescence se fait à la vitesse de 10-7cm/s, sa présence est signalée par des dégagements gazeux et des phénomènes lumineux [10]. Le temps de propagation est court et moins dispersé que le temps d'initiation [6].

I.4.3. La phase de claquage

Après que le réseau d'arborescence ait atteint une dimension suffisante, La montée d'un train de décharge de grande amplitude, commençant à partir de l'électrode reliée à la terre et se dirigeant vers l'électrode haute tension, a pour effet d'élargir le canal et lui donner une dimension convenable en diamètre et en longueur et le faire progresser jusqu'à interagir avec les canaux proches de l'électrode haute tension, ce qui provoquerait la perforation de l'isolation[9].

I.5. Mécanismes d'évolution des arborescences électriques

Des mécanismes sont présentés pour expliquer l'évolution des arborescences électriques [10].

I.5.1.Mécanismes d'initiation

La période d'incubation est considérée comme le phénomène pré disruptif dans le domaine du vieillissement électrique des isolants solides. On distingue 3 groupes de théories [16] :

I.5.1.1. Formation de l'arborescence par décharges partielles

Il y a de fortes raisons de croire qu'il existe de petites cavités aux extrémités ou aux bords desquelles des décharges partielles peuvent débiter. Ces cavités seraient dues aux dilatations différentielles de la résine et du métal ou à l'air absorbé ou occlus.

Des décharges partielles non mesurables se développeraient dans ces microcavités à la pointe desquelles le champ électrique serait transféré. [10].

I.5.1.2. Action des porteurs chauds sur la structure d'isolant

Eichhorn a émis l'hypothèse selon laquelle l'apparition de l'arborescence serait principalement due à l'action des électrons chauds sur le diélectrique. Le processus est le suivant:

Des électrons sont émis dans la région du champ intense (pointe d'aiguille ou d'impuretés), sous tension alternative, durant l'alternance négative. Quand on s'éloigne de la pointe, le gradient du champ diminue ce qui limite la distance d'émission. Ces électrons reviennent pendant l'alternance positive, s'ils ne sont pas piégés pour être réémis par la suite.

Ils entrent en collision avec les molécules du matériau isolant au cours de leur déplacement entraînant ainsi l'ionisation de ces molécules et leur décomposition en gaz et en produits de plus faible poids moléculaire. La pression du gaz formé devient, avec le temps, suffisante pour provoquer les fissures et par là des arborescences [9].

I.5.1.3. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique

NOTO et YOSHIMURA ont développé l'idée selon laquelle l'apparition de l'arborescence à des champs inférieurs au champ de rupture du polymère est due à l'action de la force de compression de Maxwell. L'existence d'un champ électrique dans un isolant peut effectivement engendrer des contraintes mécaniques [4]. Les auteurs rapportent que, pour un champ électrique de 4,8 MV/cm, le temps d'incubation est de 5 secondes et on obtient une force de 23,8 kg/cm². Cette valeur est inférieure à la limite de rupture en traction, pour le polyéthylène, donnée par NOTO et YOSHIMURA [14].

qui est de l'ordre de 90 kg/cm² à 20°C. La force de Maxwell ne peut pas expliquer l'origine de la première fracture de l'isolant.

Les évoquent alors l'action répétée de cette force qui produirait un phénomène de fatigue, proportionnel à la fréquence de la contrainte électrique conduisant à la fissure du matériau [16].

I.6. Mécanismes de propagation des arborescences électriques

Des mécanismes sont invoqués pour expliquer la propagation des arborescences électriques, et que nous divisons en deux mécanismes fondamentaux : électriques et thermiques [4].

I.6.1. Mécanismes électriques

On admet généralement que des décharges se produisent dans les canaux rendant conducteurs le gaz qui les remplit. Le champ est reporté à leur pointe et provoque des claquages locaux qui les font progresser [4]. La diminution de la résistivité des parois des filaments pourrait également expliquer le report du champ électrique en pointe des branches, d'où l'apparition de

nouveaux micro canaux prenant naissance à l'extrémité des branches [12]. Le concept des électrons chauds est aussi évoqué pour expliquer la propagation des canaux d'arborescences [17]. L'action des électrons chauds accélérés dans les microcavités serait à l'origine de leur extension [12]. Les charges d'espace semblent jouer un rôle dans la phase de propagation, elles seraient créées par l'impact des décharges partielles sur les parois des vacuoles, réparties au voisinage du bout d'arborescence, une charge d'espace permanente aura tendance à baisser le champ au bout de l'arborescence et à ralentir sa propagation. Les déplacements de charges d'espace augmenteront, en tension alternative, le gradient au bout de l'arborescence et par conséquent accéléreront sa propagation [18].

I.6.2.Mécanismes thermiques

Sous l'action des décharges partielles, la dégradation de l'isolant peut avoir lieu par évaporation locale du matériau, suite à une élévation locale de température par le bombardement des particules [4] ; ce mécanisme de dégradation prépondérant dans l'EPDM, peut-être, favorisé par l'état amorphe du matériau [19]. Ce mécanisme est aussi évoqué par F. NOTO et al pour expliquer la propagation de ce type d'arborescences dans le PVC. Les auteurs ont établi, à cet effet, une équation qui décrit le claquage électrothermique telle que [22].

$\ln E = A + \frac{\Delta V}{kT_0}$ où E est le champ électrique, k la constante de Boltzmann ; T_0 , la température du réseau ; ΔV , l'énergie des électrons sous la bande de conduction(0.1ev à 0.2ev) et A une Constant La dégradation peut aussi avoir lieu sous l'effet combiné des mécanismes de décharges partielles et thermique. Du fait de l'importance du coefficient de dilatation des polymères par rapport à celui des matériaux non organiques tels que les métaux et les minéraux, des contraintes peuvent exister dans le polymère lui-même à l'interface polymère/métal ou polymère/charge ; ce qui peut provoquer des fissurations ou la formation de cavités en particulier après des cycles thermiques pouvant conduire à la destruction sous l'action des décharges partielles. L'existence dans le volume du matériau de chemins à forte conductivité par rapport au volume vierge de l'isolant, à laisser supposer [12]. Que la rupture par arborescence est une rupture thermique, hypothèse d'ailleurs confirmée par M. NAGAO [20] grâce à son analyse thermographique.

Le diagramme ci-dessous résume la conception de la rupture par arborescence d'après C. Laurent [12].

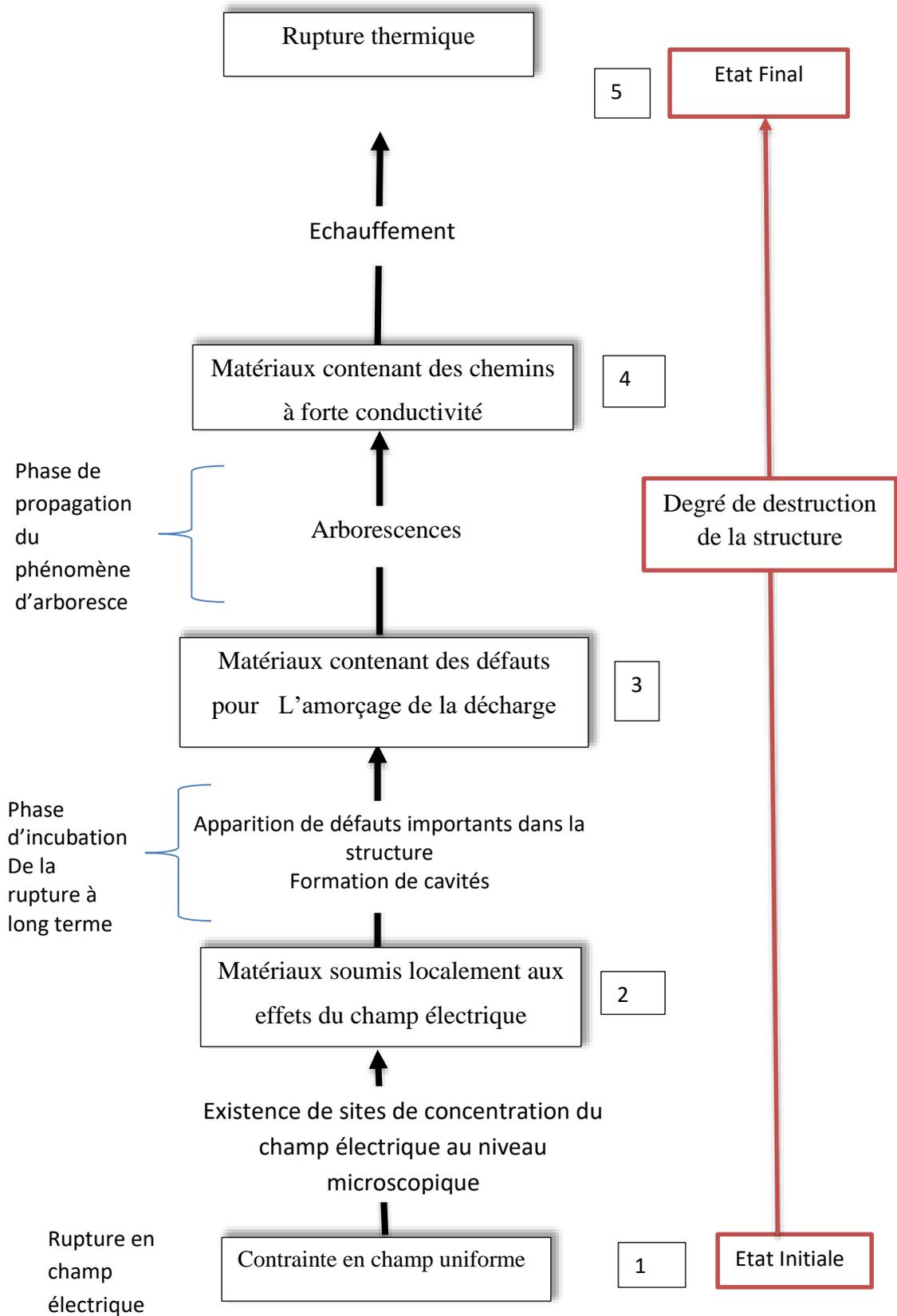


Fig.I.3: Processus de la rupture par arborescence [12].

I.7. Facteurs influant sur la propagation des arborescences électriques

Plusieurs facteurs influent sur le processus de propagation :

- ❖ la pression des gaz dans les canaux est important ; il conditionne la fréquence des décharges et par la suite la vitesse de propagation et la densité des arborescences [4]
- ❖ les charges d'espace ainsi l'effet de la polarité.
- ❖ la fréquence [5], température [21], propriétés mécaniques [5], nature de gaz piégé [5], morphologie du polymère dans le volume [22] et l'interface [37] influent sur la propagation.
- ❖ l'interaction des champs électriques dans les ramifications lorsqu'une arborescence se développe en plusieurs branches ; le gradient peut être réduit par les effets mutuels des branches les unes sur les autres. Il a pour effet de ralentir la propagation [4].
- ❖ l'augmentation de la pression interne des gaz qui peuvent interrompre les décharges par intermittence si l'arborescence est mal formée. Ce facteur est plus important pour les faibles gradients pour lesquels il a été montré de longues périodes d'interruption suivies par de fortes décharges [24].

I.8. Méthodes permettant d'éviter la formation d'arborescences

Malgré le nombre important des recherches effectuées sur le phénomène d'arborescence jusqu'à ce jour, ce fléau restent non maîtrisé [9].

Cependant certains remèdes peuvent limiter ce phénomène d'arborescence, à savoir :

- Agir sur les procédés d'usinage des polymères afin de diminuer les défauts de différentes natures qui sont à l'origine des débuts d'arborescences. Cela notamment par:
- Utilisation des écrans semi-conducteurs extrudés offrant des interfaces plus lisses pour diminuer la protubérance des écrans ;
- Utilisation des étanchéités longitudinales et radiales à l'eau dans la zone des écrans pour éviter la diffusion de l'eau et autres solutions aqueuses [9] ;
- Réduire les tailles des microcavités dans l'isolation ; ainsi que celles des impuretés organiques et minérales [19].
- Amélioration des conditions de stockage, de transport et de pose pour réduire la teneur en eau et des entrées d'humidité en ce qui concerne des arborescences d'eau dans le conducteur [6].
- Utilisation des additifs et des substances contre la dégradation comme : des plastifiants, des colorants, des Charges, des ignifugeants, des antioxydants, et des agents de réticulation ..., lors de la fabrication du polymère, afin de renforcer ces propriétés [25].

- Amélioration des gaines de protection mécanique et les conditions d'enfouissement des câbles pour éviter la pénétration de l'eau et les entrées d'humidité [26].
- Utilisation de l'additif acétophénone, qui empêche la formation d'arborescences et qui présente une meilleure résistance au claquage [9].
- Utilisation des additifs organiques pouvant influencer fortement la valeur du champ électrique; ce qui va retarder considérablement le temps d'apparition des arborescences.
- Incorporation de barrière solide en mica dans les polymères empêche la pénétration des arborescences électriques dans le matériau, celles-ci se retrouvent concentrées sur un côté de la barrière limitant ainsi leur propagation; d'où un temps de rupture de l'isolation prolongé [27].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini et classifié les arborescences électriques selon leur forme en types buisson, branches et buisson ramifié. Egalement nous avons présenté le mécanisme de leur évolution et enfin nous terminons ce chapitre par les méthodes permettant d'éviter leur formation. Dans le prochain chapitre nous nous intéressons à la modélisation des arborescences électriques.

Chapitre II

Modélisation

analytique des

arborescences

II.1 Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons à la modélisation des arborescences électriques dans un isolant polymère en se basant sur la notion de la pression électrostatiques et cela en assimilant les arborescences à des formes géométriques simples tout en considérant l'interface arborescence/polymère dépourvue de charge électrique.

II.2 Pression électrostatique

L'expression de la pression électrostatique P_e qui a servi jusqu'à ce jour, pour interpréter les résultats relatifs à la propagation des arborescences électriques, c'est celle qui consiste à admettre que l'interface arborescence/polymère est dépourvue de toute charge électrique, la densité de charge surfacique est prise égale à zéro ($\sigma = 0$) [28].

$$P_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r (\varepsilon_r - 1) \cdot E^2 \quad (\text{II.1})$$

avec:

ε_0 : Permittivité de l'air

ε_r : Permittivité relative de polymère

E : champs électrique

On pose $k = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (\varepsilon_r - 1)$ d'où on aura

$$P_e = k \cdot E^2 \quad (\text{II.2})$$

II.3.2.Expression du champ électrique

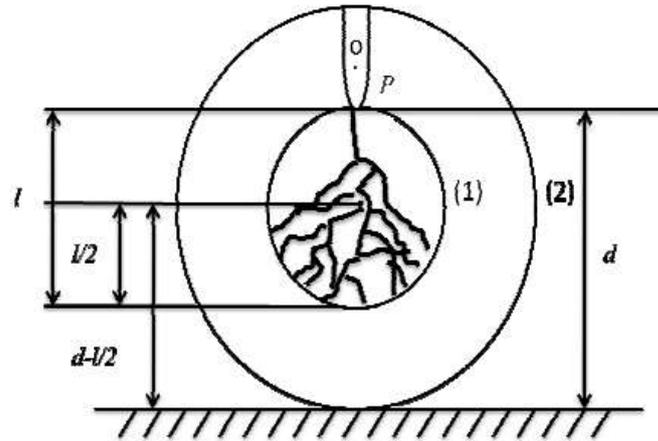
En général, pour générer des arborescences à des niveaux de tension modérés (quelques kV) tout en essayant d'atteindre les champs seuils d'apparition de ces arborescences, qui eux peuvent être de quelques MV/cm, on utilise un système d'électrode de structure pointe/plan, en introduisant une aiguille pointue de très faible rayon de courbure (quelques $\mu.m$) dans un isolant, une fois l'arborescence est générée, c'est le champ en son front qui va lui permettre de se développer.

Selon que l'arborescence est en forme de buisson ou de branche, le champ électrique est

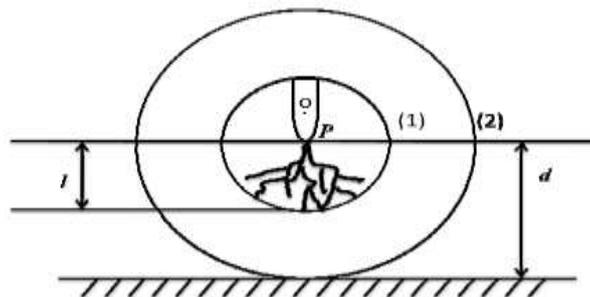
Déterminé en utilisant une approximation sphérique ou une approximation hyperboloïdale [4].

II.3.2.1.Arborescence en forme de buisson

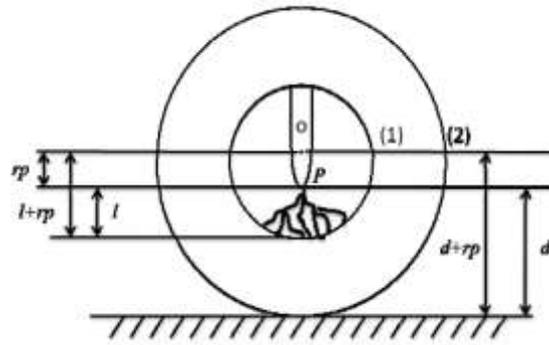
Dans ce cas l'arborescence est assimilée à une sphère portée au même potentiel électrique que l'électrode pointe .trois formes peuvent être considérés (fig.II.1) [6].



(a)



(b)



(c)

Fig.II.1:Représentation schématique des différents modèles sphériques [4].

(a) : Sphère tangente à la pointe.

(b) : Sphère centrée sur la pointe P.

(c) : Sphère centrée en O.

II.3.2.1.1 Sphère tangente à la pointe

La longueur de l'arborescence est égale au diamètre de la sphère qui reste tangente à la tête de la pointe (aiguille).

L'électrode opposée est assimilée à une sphère concentrique à la première (Fig.II.1.a)

L'application de conditions aux limites :

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) : r = \frac{l}{2} \rightarrow V(r) = U \\ (2) : r = d - \frac{l}{2} \rightarrow V(r) = 0 \end{array} \right.$$

à l'équation de Laplace $\nabla \cdot V^2 = 0$ en coordonnées sphériques, nous permet de déterminer le champ électrique sur le front de la sphère interne et qui aura pour expression [28] :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \cdot \frac{(2 - (\frac{l}{d}))}{(1 - (\frac{l}{d}))(\frac{l}{d})} \tag{II.3}$$

U :tension appliquée aux électrodes .

d : Distance interélectrode.

l: Longueur de l'arborescence.

V: Potentiel électrique.

II.3.2.1.2 Sphère centrée sur la pointe P

La longueur de l'arborescence est égale au rayon de la sphère qui reste centrée sur le point P de la pointe. L'électrode opposée est assimilée à une sphère centrée sur le même point (Fig.II.1.b). Le champ électrique sur le front de la sphère interne obtenu pour les conditions aux limites suivantes :

$$\left[\begin{array}{l} (1): r = l \rightarrow V(r) = U \\ (2): r = d \rightarrow V(r) = 0 \end{array} \right.$$

a pour expression :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{1}{\left(\frac{l}{d}\right)\left(1-\left(\frac{l}{d}\right)\right)} \tag{II.4}$$

II.3.2.1.3 Sphère centrée en O

La sphère de rayon($l + r_p$)est centrée en O (O : origine de rayon de courbure de la pointe). L'électrode opposée est assimilée à une sphère concentrique à la première (Fig.II.1.c). Le champ électrique sur le front de la sphère interne déterminé pour les conditions aux

limites :

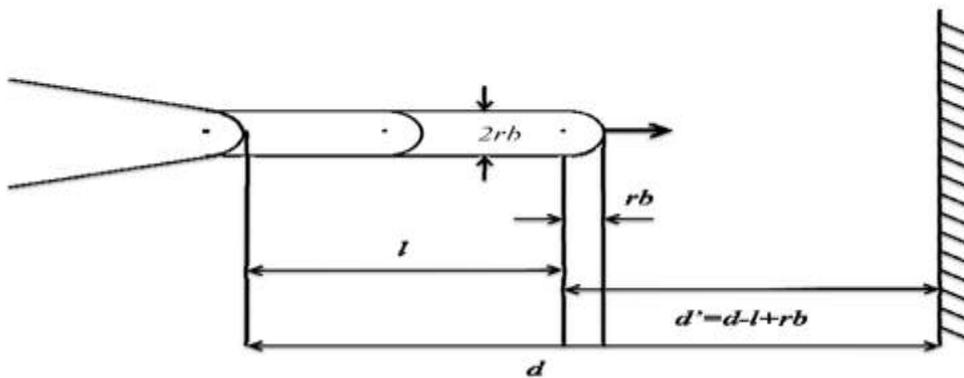
$$\left[\begin{array}{l} (1) : r = l + r_p \rightarrow V(r) = U \\ (2) : r = d + r_p \rightarrow V(r) = 0 \end{array} \right.$$

A pour expression :

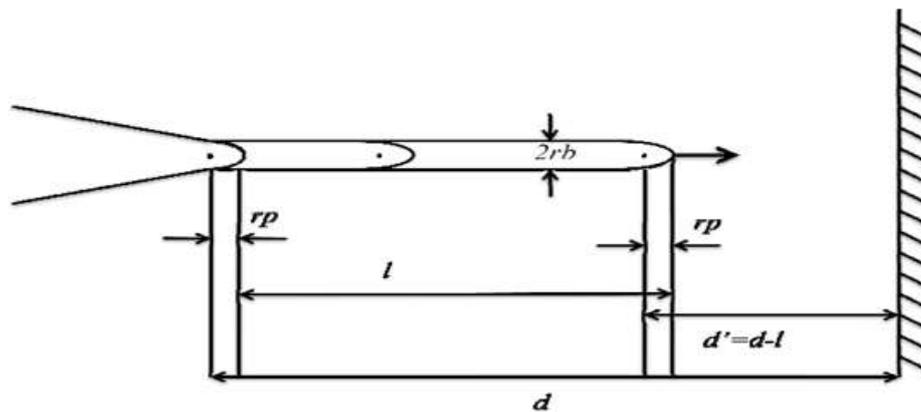
$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{(1+(r_p+d))}{\left(1+\left(\frac{l}{d}\right)\right)\left(\left(\frac{l}{d}\right)+\left(\frac{r_p}{d}\right)\right)} \tag{II.5}$$

II.3.2.2 Arborescence en forme de branches

Chaque branche peut être assimilée à un cylindre dont le diamètre ($2r_b$) est égal à celui des branches. Le champ à la tête active des branches permet d'entretenir la propagation. il peut être calculé soit en assimilant cette tête vive à une demi-sphère de rayon r_b , (fig.II.3.a), soit à une pointe dont le rayon est égal à r_p (fig II.2.b) [6]. avec : r_b : le rayon des branches $\approx r_p$, et r_p :le rayon de courbure de l'électrode pointe.



(a)



(b)

Fig. II.2 : Représentation schématique du modèle filamentaire(a):approximations sphérique, (b) approximation hyperboloïdale [4].

II.3.2.2 .1 Approximation sphérique

Le champ électrique sur le front de la sphère de rayon r_b (fig. II.2.a) est déterminé pour

Les conditions aux limites :

$$\text{Et} \left\{ \begin{array}{l} (1) : r = r_b \rightarrow V(r) = U \\ (2) : r = d - l + r_b \rightarrow V(r) = 0 \end{array} \right.$$

Et pour expression :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \cdot \left(\frac{d}{r_b} + \frac{1}{1 - \left(\frac{l}{d}\right)}\right) \quad (\text{II.6})$$

II.3.2.2.2. Approximation hyperboloïdale

La branche progresse tel une extension de la pointe, se déplaçant vers l'électrode pointe opposée (fig.II.3.b). Le champ électrique à l'extrémité de la branche peut être estimé, en assimilant le système d'électrodes à des hyperboloïdes [29]. Son expression approchée est donnée par :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{\frac{2 \cdot d}{r_p}}{\ln\left(1 + 4\left(\frac{d-l}{r_p}\right)\right)} \quad (\text{II.7})$$

II.4. Bilan énergétique

II.4.1. Arborescence en buisson

Si on assimile l'arborescence à une cavité conductrice qui se développe de la pointe vers l'électrode plane tout en gardant une forme sphérique durant son expansion, le travail fourni par la force de pression électrostatique à l'interface arborescence/polymère sera [28] :

$$w = \int_{R_0}^R 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot P_e \cdot dR \quad (\text{II.8})$$

P_e : Pression électrostatique

R_0 : Rayon initial de l'arborescence

R : Rayon de l'arborescence à l'instant t

Le travail se transforme en énergie cinétique du polymère

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \right) \cdot \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (\text{II.9})$$

Avec : ρ masse volumique du polymère

L'équation (II.8) et (II.9) donnent :

$$W = \int_{R_0}^R 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot P_e \cdot dR = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R^3 \right) \cdot \left(\frac{dR}{dt} \right)^2$$

Par différentiation et après réarrangement on obtient

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{2}{3} \cdot R \cdot \frac{dR^2}{dt^2} \right)$$

En supposant le mouvement de l'arborescence uniforme ($\frac{dR}{dt} = cste$), donc $\frac{dR^2}{dt^2} = 0$,
L'expression de devient :

$$P_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (\text{II.10})$$

En utilisant les expressions de P_e décrites auparavant et celles du champ électrique, on obtiendra les équations de propagation correspondantes qui sont des équations différentielles que nous allons résoudre avec des méthodes numériques pour ressortir la longueur de l'arborescence en fonction du temps $l(t)$

II.4.1.1 Arborescence assimilée à une sphère tangente à la pointe (p)

Les expressions (II.3), (II.2), (II.10) et nous donnent

$$k \cdot \left(\frac{U}{d} \cdot \frac{\left(2 - \frac{l}{d} \right)}{\left(1 - \left(\frac{l}{d} \right) \left(\frac{l}{d} \right) \right)} \right)^2 = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dl}{dt} \right)^2$$

Avec : $l = 2 \cdot R$

Avec :

$$g = \sqrt{\frac{8 \cdot k}{\rho}}$$

D'où :

$$\frac{dl}{dt} = g \cdot \frac{U}{d} \cdot \frac{\left(2 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)}{\left(1 - \left(\frac{l}{d}\right)\right) \cdot \left(\frac{l}{d}\right)} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

A partir de l'équation (II.11) qui donne la vitesse de croissance des arborescences en fonction des différents paramètres, on peut étudier la cinétique de l'arborescence (variation de l en fonction de t) pour différentes formes de tension dont les plus intéressantes sont la tension continue et la tension sinusoïdale.

On peut également déterminer le temps de retard au claquage t_c Pour une tension constante $U = \text{constant}$: après séparation de variables et intégration de l'équation (II.11), on aura :

❖ Temps d'évolution de l'arborescence

$$t = \frac{1}{g \cdot U} \left(\frac{l^2}{2} + d \cdot l + 2 \cdot d^2 + \ln\left(1 - \frac{l}{2 \cdot d}\right) \right) \quad (\text{II.12})$$

❖ Temps de retard au claquage

Pour $l = d$ on aura :

$$t_c \approx 0.1137 \cdot \frac{d^2}{g \cdot U} \quad (\text{II.13})$$

L'étude de la fonction (II.13) montre que t_c décroît lorsque l'amplitude de la tension augmente et croît avec l'augmentation de la distance inter électrode

II.4.1.2. Arborescence assimilée à une sphère centrée sur la pointe

❖ Sphère centrée en P

Les expressions (II.2), (II.4) et (II.10) nous donnent :

$$k \cdot \left(\frac{U}{d} \cdot \frac{1}{\left(\frac{l}{d}\right) \left(1 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dl}{dt} \right)^2$$

Avec : $l = R$

$$g_p = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{\rho}}$$

D'où :

$$\frac{dl}{dt} = g_p \cdot U \cdot \frac{1}{l(1 - (\frac{l}{d}))} \tag{II.14}$$

- Cas d'une tension continue : **$U = \text{constante}$**

Après séparation de variables et intégration de l'équation (II.14) on aura :

❖ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{1}{6 \cdot g_p \cdot d \cdot U} l^2 (3d - 2l) \tag{II.15}$$

❖ Temps de retard au claquage

Pour $l = d$ on aura :

$$t_c = \frac{d^2}{6 \cdot g_p \cdot U} \tag{II.16}$$

- Cas d'une tension sinusoïdale : **$U = U_m \cdot \sin wt$**

Pour la même raison que pour le modèle précédent, l'équation de propagation de

L'arborescence s'écrit :

$$\int_{(i-1) \cdot T}^t g_p \cdot U_m \cdot \sin w \cdot t \cdot dt = \int_{l_i}^l l(1 - \frac{l}{d}) \cdot dl$$

Pour $i=1, \dots, n$

Les mêmes remarques que pour le modèle précédent, peuvent être faites à propos des temps.

❖ **Sphère centrée en O**

Les expressions (II.5), (II.2) et (II.10) nous donnent :

$$k \left(\frac{U}{d} \cdot \frac{(1+(r_p+d))}{(1+(\frac{l}{d}))(\frac{l}{d}+(\frac{r_p}{d}))} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dl}{dt} \right)^2$$

Avec : $l + r_p = R$

D'où :

$$g_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{\rho}}$$

$$\frac{dl}{dt} = g_0 \cdot U \cdot \frac{(d+r_p)}{(d-l)(l+r_p)} \quad (\text{II.17})$$

- **Cas d'une tension continue : $U = \text{constante}$**

Après séparation de variables et intégration de l'équation (II.17) on aura

➤ Temps d'évolution d'arborescence

$$t = \frac{1}{g_0 \cdot U (d+r_p)} \left(r_p \cdot d \cdot l + \frac{l^2}{2} (d - r_p) - \frac{1}{3} l^3 \right) \quad (\text{II.18})$$

➤ Temps de retard au claquage

Pour $l = R$ on aura :

$$t_c = \frac{d^2}{6 \cdot g_0 \cdot u} \left(\frac{d+3r_p}{d+r_p} \right) \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Si } r_p \ll d, \quad t_c \approx \frac{d^2}{6 \cdot g_0 \cdot u}$$

II.4.2. Arborescence en branches

Si on considère une branche comme une extension de la pointe se déplaçant vers l'électrode opposée et on l'assimile à un cylindre de rayon r_b , l'expression du travail de la force agissant sur les parois de la branche (interface arborescence/polymère) sera donné par [28] :

$$w = \int_{l_0}^l \pi \cdot r_b^2 \cdot p_e \cdot dl \quad (\text{II.20})$$

Ce travail doit être équilibré par l'énergie cinétique du polymère

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (\pi r_b^2 \cdot l) \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 \quad (\text{II.21})$$

Les équations (II.19) et (II.20) nous donnent

$$\int_{l_0}^1 \pi \cdot r_b^2 \cdot p_e \cdot dl = \frac{1}{2} \rho \cdot (\pi \cdot r_b^2 \cdot l) \left(\frac{dl}{dt}\right)^2$$

Par différentiation, on obtient :

$$p_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\left(\frac{dl}{dt}\right)^2 + 2l \cdot \frac{dl^2}{dt^2}\right)$$

Pour $\frac{dl^2}{dt^2} \approx 0$, on aura :

$$p_e = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dl}{dt}\right)^2 \tag{II.22}$$

Remarquons que nous retrouvons la même expression que dans le cas d'une arborescence en buisson, en utilisant les approximations hyperboloïdales et sphériques, on aura :

II.4.2.1.Approximation sphérique

Des expressions (II.2), ((II.6)) et (II.22), il vient :

$$k \cdot \left(\frac{U}{d} \left(\left(\frac{d}{r_b}\right) + \frac{1}{1-\left(\frac{l}{d}\right)}\right)\right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dl}{dt}\right)^2$$

$$g_p = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{\rho}}$$

$$\frac{dl}{dt} = g_b \frac{U}{d} \left(\frac{U}{r_b} + \frac{1}{1-\left(\frac{l}{d}\right)}\right) \tag{II.23}$$

Avec :

- Cas d'une tension continue : $U = \text{constante}$

Après séparation de variables et intégration de (II.23)) on aura :

➤ **Temps d'évolution d'arborescence :**

$$t = \frac{r_b \cdot l + r_b^2 \ln(d+r_b-l)}{g_b \cdot U} \tag{II.24}$$

➤ Temps de retard au claquage :

Pour $l = d$ on aura :

$$t_c = \frac{1}{g_b \cdot u} r_b \cdot (d + r_b - \ln(r_b))$$

II.4.2.2.Approximation hyperboloïdale

Des équations (II.2), (II.7) et (II.22), on obtient :

$$k \cdot \left(\frac{U}{d} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot d}{r_p} \right)}{\ln\left(1 + 4 \cdot \frac{(d-l)}{r_p}\right)} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left(\frac{dl}{dt} \right)^2$$

$$\text{D'ou: } \frac{dl}{dt} = g_b \cdot \frac{U}{d} \cdot \frac{\frac{2 \cdot d}{r_p}}{\ln\left(1 + 4 \cdot \frac{(d-l)}{r_p}\right)} \quad (\text{II.25})$$

- Cas d'une tension continue : $U = \text{constante}$

Après intégration de (II.25) et séparation de variables on aura :

➤ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{r_p}{2g_b \cdot u} \left(l \left(\ln\left(\frac{r_p + 4(d-l)}{r_p}\right) - 1 \right) - \frac{r_p + 4 \cdot d}{4} \ln\left(1 - \frac{d \cdot l}{r_p + 4d}\right) \right) \quad (\text{II.26})$$

Temps de retard au claquage :

$$t_c = \frac{r_p}{2 \cdot g_b \cdot U} \left((d - p_r)(\ln(5) - 1) - \frac{r_p + 4d}{4} \ln\left(\frac{5 \cdot r_p}{r_p + 4d}\right) \right) \quad (\text{II.27})$$

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation analytique des arborescences (type buisson et branche) en se basant sur la pression électrostatique pour évaluer leur propagation temporelle. Le chapitre prochain nous ferons la simulation de l'évolution de l'arborescence électrique sur MATLAB.

Chapitre III
Résultats de
Simulation et
discussion

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous simulerons la propagation de l'arborescence électrique dans l'isolant solide sous une tension constante, par le calcul de la longueur de l'arborescence ' l ' en fonction du temps en considérant la densité de charge nulle ($\sigma = 0$).

Les expérimentateurs simulent les défauts en introduisant une aiguille pointue dans un isolant. La tension appliquée entre l'aiguille et l'électrode plane généralement en contact avec le matériau. La pointe sert de site d'initiation.

on étudiera les courbes temporelle de propagation $l(t)$

avec $\begin{cases} l : \text{longueur d'arborescence} \\ t : \text{durée d'application de la tension} \end{cases}$

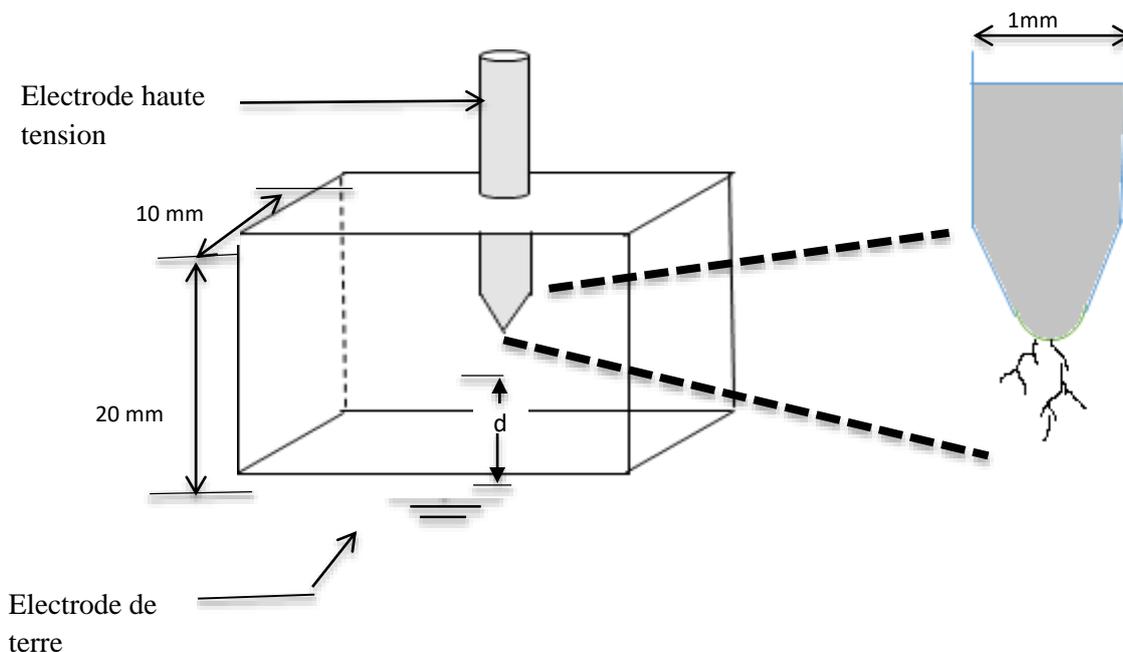


Fig.III.1: système d'électrode pour simuler la propagation d'arborescences [30].

Nous avons un système d'électrode asymétrique formé d'une électrode pointue de rayon r_p enfoncée dans un isolant solide (Polyéthylène ou Polychlorure de vinyle) et une électrode plane relié à la terre. La distance inter électrode est ' d '.

Tab.III.1 : Types de polymères utilisés et leurs caractéristiques

Matériaux	Permittivité relatif ϵ_r	Masse volumique ρ [kg/m^3]
Polyéthylène (PE)	2.3	920
Polychlorure de vinyle (PVC)	3.4	1400

Nous nous intéressons dans la suite à l'étude paramétrique de la longueur d'arborescence électrique en fonction du temps de vieillissement en utilisant la méthode analytique ODE 45 dont le programme est écrit sous MATLAB 2013.

Nous varions la valeur de la tension appliquée, la distance inter électrode, type de matériau et ceci pour les différents modèles de la propagation d'arborescence décrits précédemment (chapitre II).

III.2. Type Buisson

III.2.1. Modèle de la sphère tangente à la pointe

III.2.1. 1. Variation de la tension

Nous avons varié la tension appliquée au niveau de pointe en donnant les valeurs 10KV, 15KV, 20KV en maintenant constants la distance $d=4mm$ et $\epsilon_r = 2.3$. Les courbes obtenues sont données dans la fig.III.2

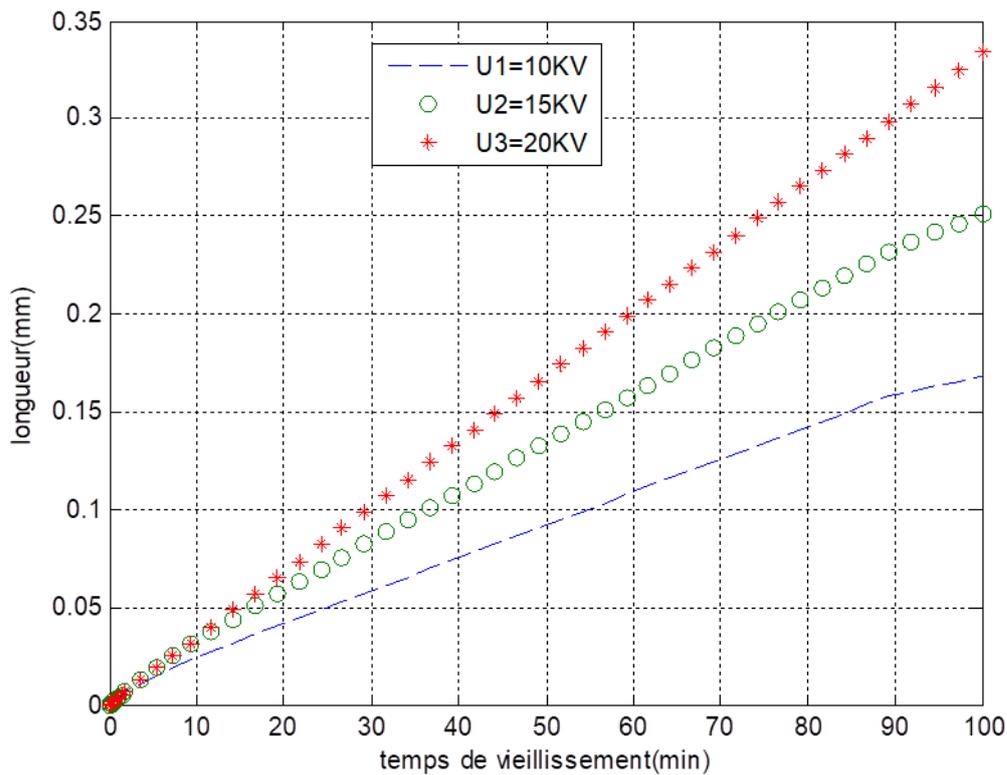


Fig.III.2: variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 10KV et 15KV et 20 KV (modèle de la sphère tangente).

III.2.1.2. Variation de la distance inter électrode

On varié la distance entre l'électrode haute tension et l'électrode de terre 4mm, 6mm, 8mm en gardant constant les autres paramètres tels que tension (10KV), permittivité $\epsilon_r = 2.3$ et. Nous obtenons après simulation les courbes représentés dans la fig.III.3.

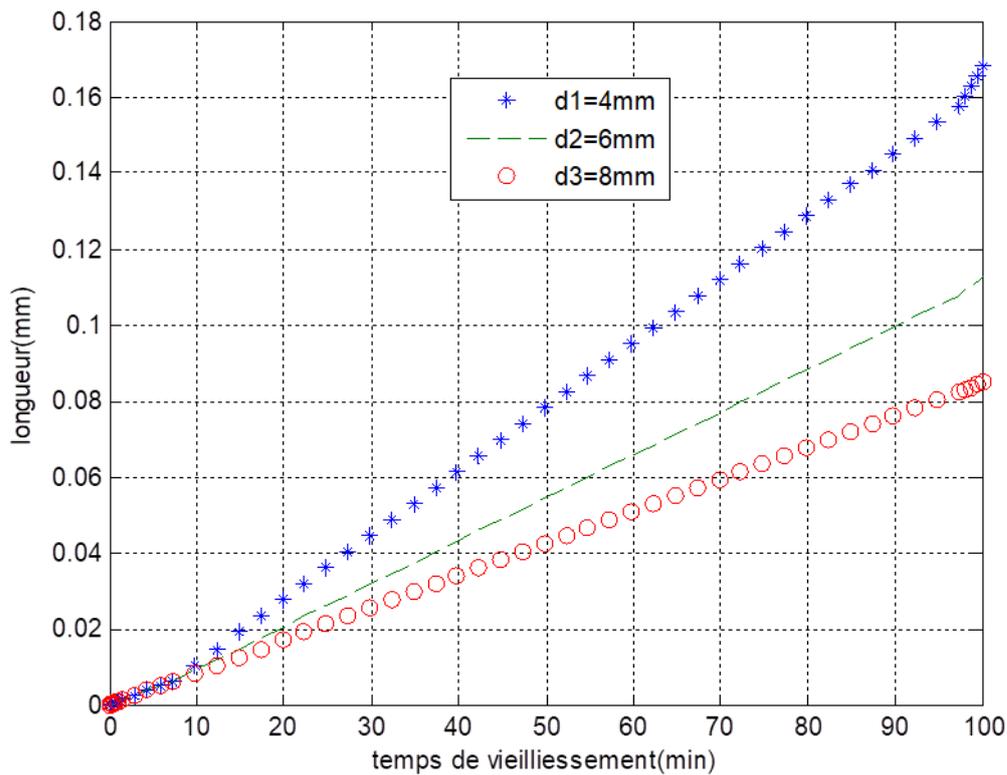


Fig.III.3 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4 mm et 6 mm et 8 mm (modèle de la sphère tangente à la pointe)

III.2.1.3. Variation de permittivité relative

Nous avons varié la permittivité relative en gardant constant les autres paramètres tels que la tension appliquée (10KV) et la distance $d=4\text{mm}$. Nous obtenons après simulation les courbes représentés dans la fig.III.4

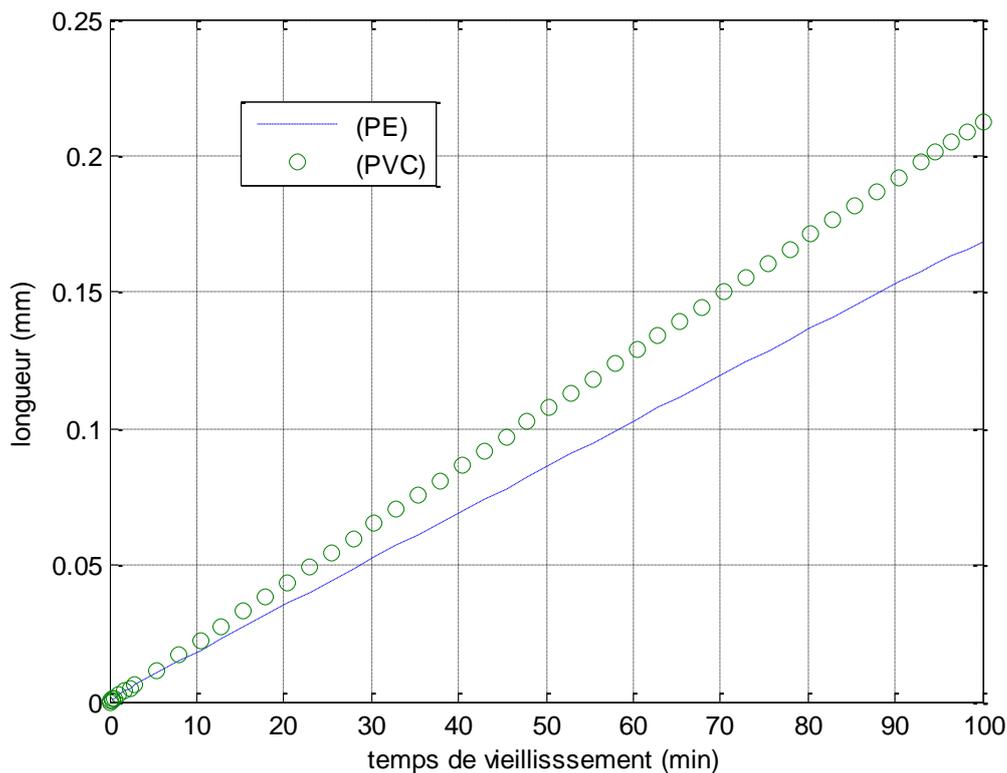


Fig. III.4: variation de la longueur de l'arborescence en fonction de temps de vieillissement, sous une permittivité relative de ϵ_r (PE)=2.3, ϵ_r (PVC)=3.4 (modèle de la sphère tangente à la pointe)

III.2.1.4 Commentaire

- Dans la fig.III.2 on voit l'effet de la tension qui est important. Pour un temps de vieillissement égal à 100 min, la propagation sous la tension 20 KV atteint la longueur maximale $l=0.34\text{mm}$; on peut évaluer la vitesse de propagation à 0.0034 mm/min . la relation est linéaire entre la tension applique et la longueur de l'arborescence.
- La fig.III.3 montre l'impact considérable de la distance inter électrode sur l'évolution de l'Arborescence Electrique (A.E). On constate pour les faibles distances un avancement rapide de l'arborescence. Sur l'intervalle $[0,100\text{min}]$ l'arborescence a atteint 0.17 mm pour l'espace inter électrode égal à 4mm . Si nous augmentons l'espace d'alors la vitesse de propagation diminue
- Dans la fig.III.4 nous constatons que le milieu isolant joue un rôle dans la propagation de l'arborescence. Pour l'isolant de grande permittivité $\epsilon_r = 3.4$, la propagation est rapide car elle atteint la distance $\ell = 0.23 \text{ mm}$ en 100 min par contre pour $\epsilon_r = 2.3$ la distance parcourue vaut 0.16mm . En augmentant la permittivité, la distance parcourue augmente.

III.2.2. Modèle de la Sphère centrée en p

III.2.2.1. Variation de la tension

La fig.III.5 représenté l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour différentes tension appliquée à l'électrode pointue.

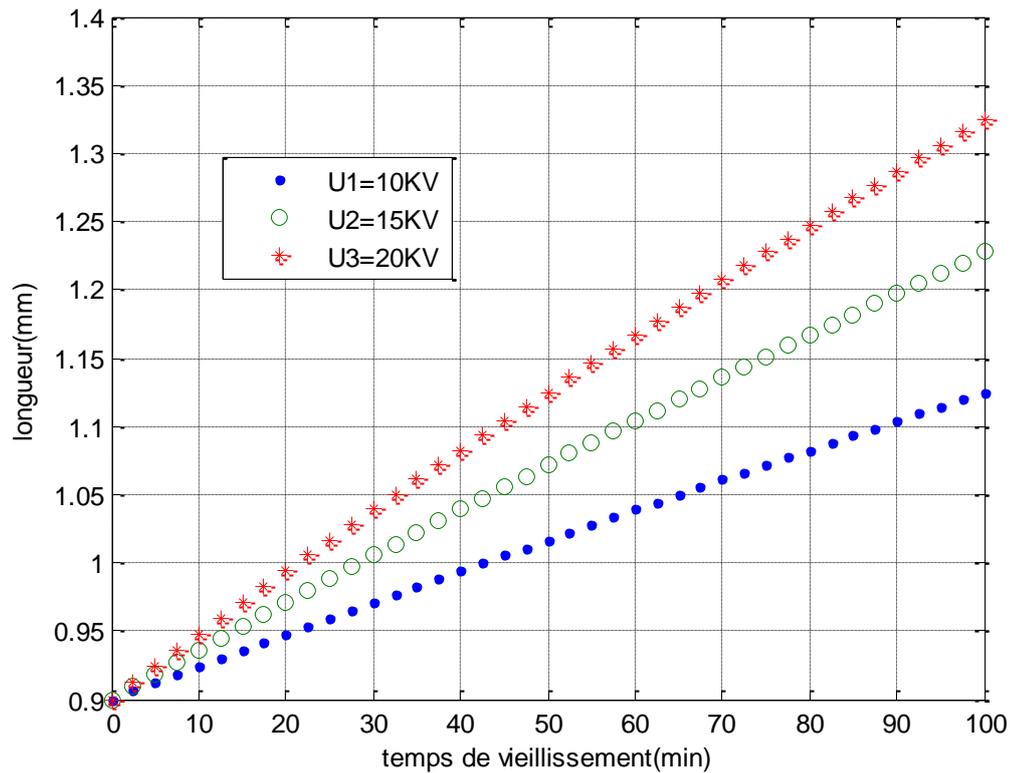


Fig.III.5: variation de la longueur de l'arborescence en fonction de temps de vieillissement, sous une tension de 10 KV et 15KV et 20 KV (modèle de la sphère centrée en p)

III.2.2.2. Variation de la distance inter électrode

La fig.III.6 expose la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, en maintenant constant la tension appliquée égale à 10 KV et $\epsilon_r(\text{PE}) = 2.3$, tout en variant l'espace interélectrode 'd'

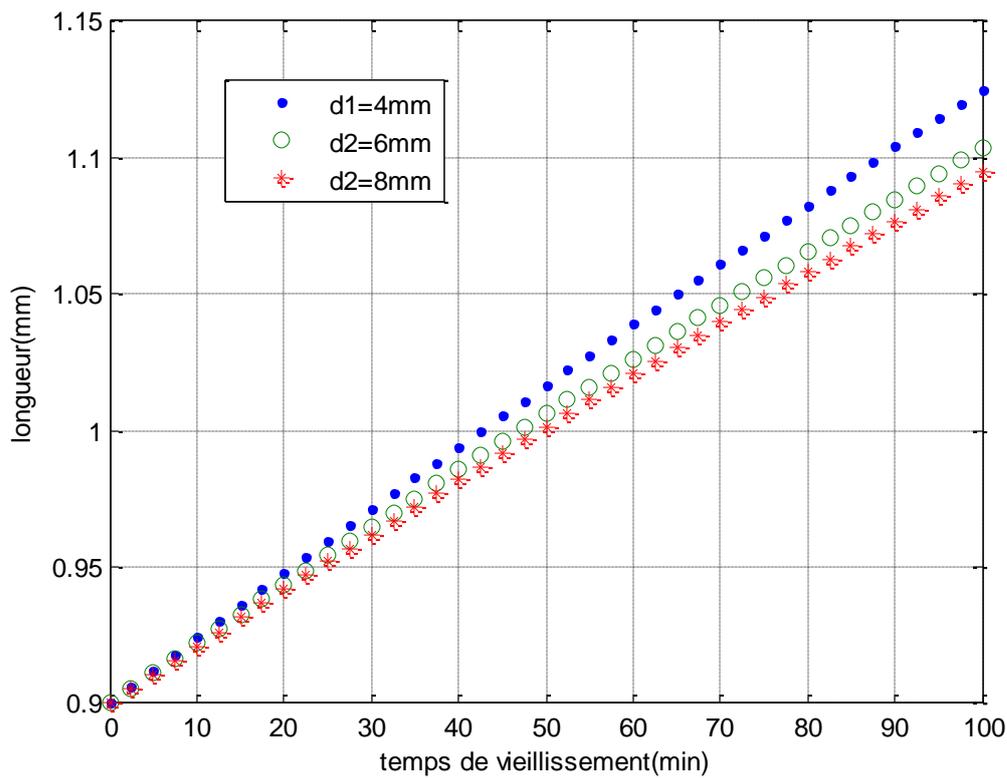


Fig.III.6: variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distances de 4mm et 6 mm 8mm (modèle de la sphère centrée en P).

III.2.2.3. Variation de la permittivité relative

La fig. III.7 montre la variation de la longueur d'arborescence en fonction de la permittivité du milieu isolant d'où nous utilisé deux types d'isolants PE ($\epsilon_r = 2.3$), PVC $\epsilon_r = 3.4$ en maintenant constant la tension appliquée égale à 10 KV et, l'espace interélectrode $d=4$ mm.

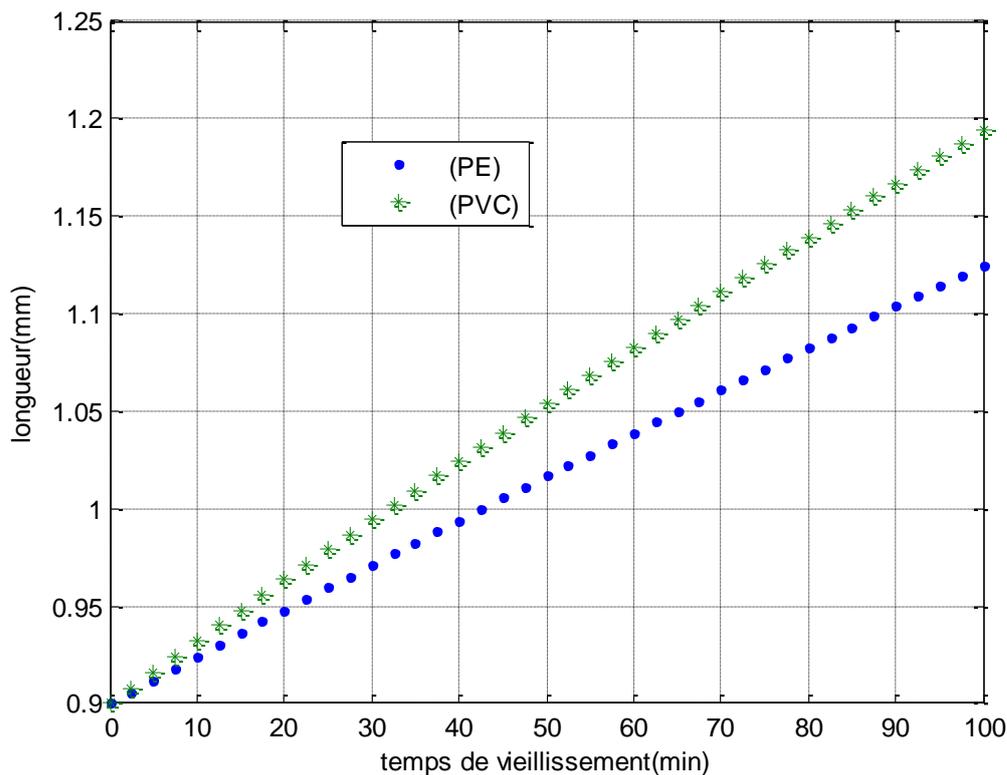


Fig. III.7: variation de la longueur de l'arborescence en fonction de temps de vieillissement, sous une permittivité relative de $\epsilon_r(PE) = 2.3$ $\epsilon_r(PVC) = 3.4$ (modèle de la sphère centré en p)

III.2.2.4 Commentaire

- Dans la fig.III.5 l'effet de la tension appliquée sur la propagation de l'arborescence électrique est dominant car la distance atteint la longueur maximale $l=1.34\text{mm}$ Pour un temps de vieillissement égal à 100 min sous la tension de 20 KV. la relation est linéaire entre la tension applique et la longueur de l'arborescence.
- La fig.III.6 l'évolution de l'Arborescence Electrique (A.E) est inversement proportionnelle à l'espace inter électrode. On relève la distance maximale parcourue égale à 1.13 mm pour l'espace inter électrode de 4mm durant la période de 100 min. Si nous augmentons l'espace 'd', alors la vitesse de propagation diminue.
- Dans la fig.III.7 la distance parcourue par l'arborescence est fonction de la permittivité du milieu isolant. Pour l'isolant de grande permittivité $\epsilon_r = 3.4$, la propagation est rapide car elle atteint la distance $l=1.19\text{ mm}$ en 100 min par contre pour $\epsilon_r = 2.3$ la distance parcourue vaut 0.23mm. En augmentant la permittivité, la distance parcourue augmente.

III.2.3. Modèle de la Sphère centrée en o

III.2.3.1 Variation de la tension

La fig. .III.8 représente l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour différentes tension appliquée à l'électrode pointue.

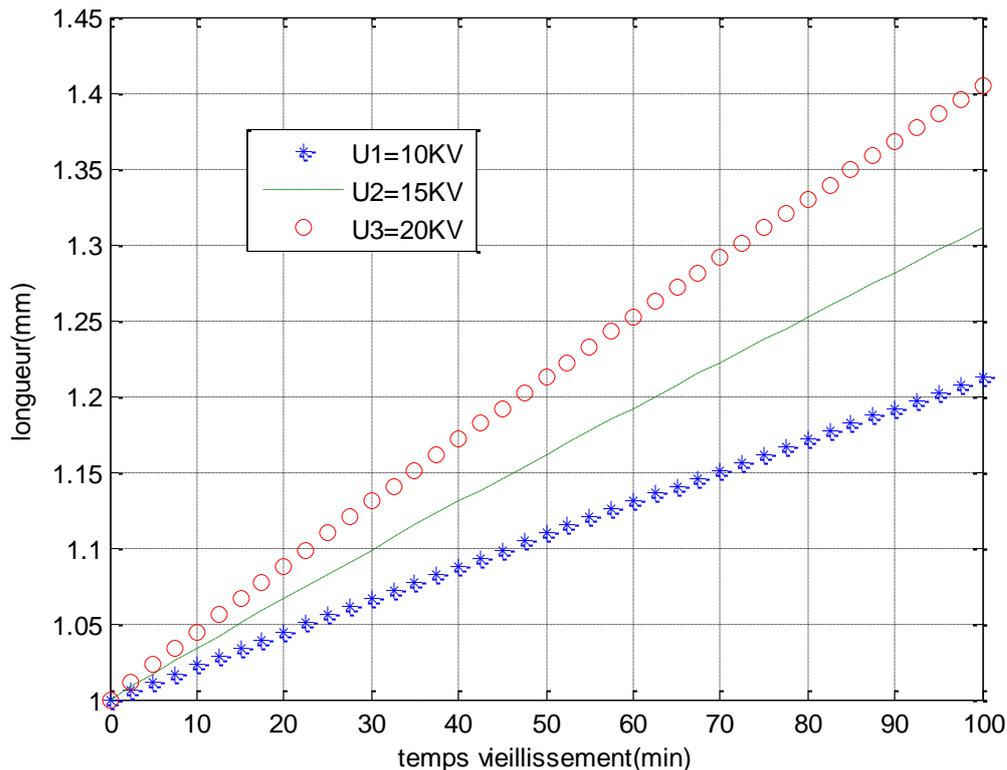


Fig. III.8: variation de la longueur de l'arborescence en fonction de temps de vieillissement, sous une tension de 10kv et 15kv 20kv (modèle de la sphère centrée en o)

III.2.3.2. Variation de distance inter électrode

La fig.III.9 expose la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, en maintenant constant la tension appliquée égale à 10 KV et $\epsilon_r(\text{PE}) = 2.3$, tout en variant l'espace interélectrode 'd'

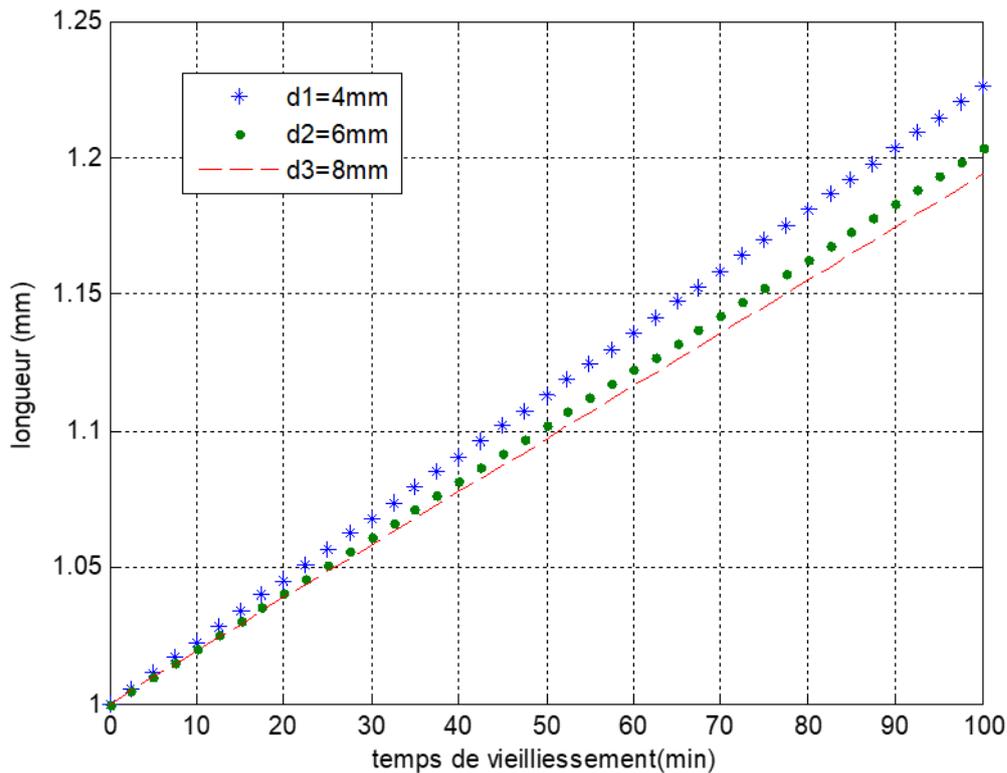


Fig. III. 9: Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4mm et 6mm et 8mm (Modèle de la Sphère centrée en o)

III.2.3.3. Variation de la permittivité relative

La fig.III.10 montre la variation de la longueur d'arborescence en fonction de la permittivité du milieu isolant d'où nous avons utilisé deux types d'isolants PE ($\epsilon_r = 2.3$), PVC $\epsilon_r = 3.4$ tout en maintenant constant la tension appliquée à 10 KV et, l'espace interélectrode à $d=4\text{mm}$.

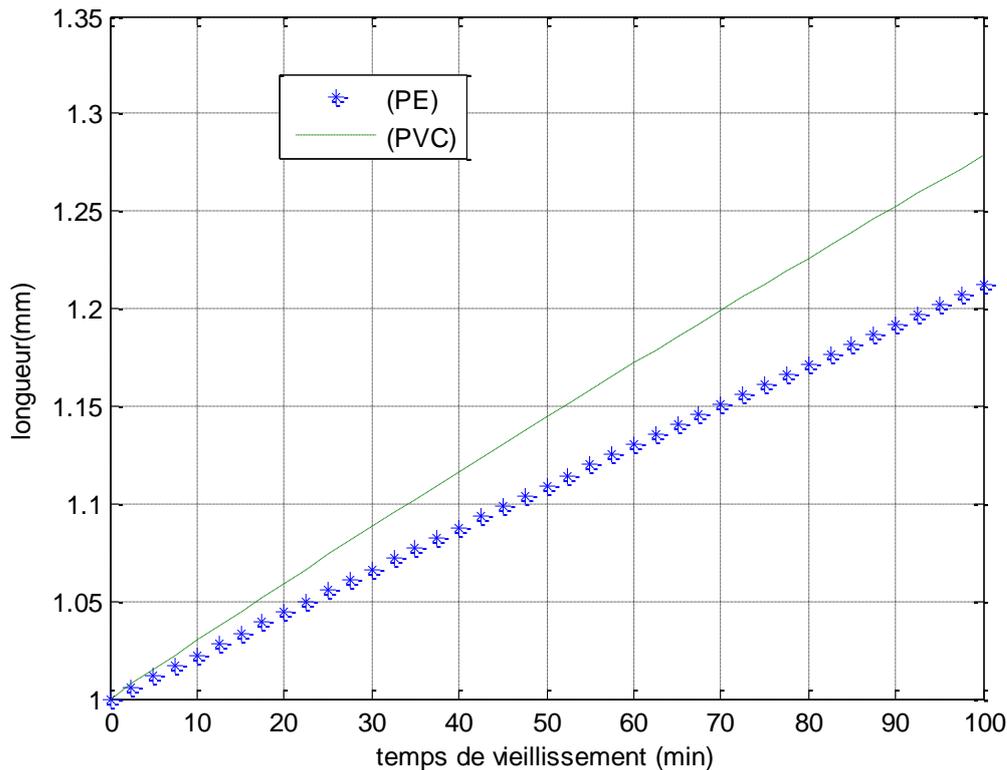


Fig.III.10 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une permittivité relative de $\epsilon_r(\text{PE})=2.3$ $\epsilon_r(\text{PVC})=3.4$ (modèle de la sphère centré en o)

III.2.3.4 Commentaire

- Dans la fig.III.8 la distance parcourue est proportionnelle au de temps vieillissement, la longueur maximale obtenue atteint la valeur de $l=1.41$ mm durant 100 min sous la tension appliquée de 20KV. La vitesse d'avancement de l'arborescence égale à 0.0141 mm/min.
- La fig.III.9 montre l'impact considérable de la distance inter électrode sur l'évolution de l'Arborescence Electrique (A.E). On constate que pour les faibles distances l'avancement est rapide. Sur l'intervalle [0,100min] l'arborescence a atteint 1.32 mm pour l'espace inter électrode égal à 4mm. Si nous augmentons l'espace d'alors la vitesse de propagation diminue
- Dans la fig. .III.10 nous constatons que le milieu isolant joue un rôle dans la propagation de l'arborescence. Pour l'isolant de grande permittivité $\epsilon_r = 3.4$, la propagation est rapide car elle atteint la distance $l=1.28$ mm en 100 min par contre pour $\epsilon_r = 2.3$ la distance parcourue vaut 1.23mm. En augmentant la permittivité, la distance parcourue augmente.

III.3.Type branche

III.3.1.Approximation sphérique

III.3.1.1.variation de la tension

On varié la tension entre l'électrode haute tension et l'électrode de terre 10KV, 15KV, 20KV en gardant constant les autres paramètres tels que distance (4mm), permittivité $\epsilon_r = 2.3$ et. Nous obtenons après simulation les courbes représentés dans la fig. III.11

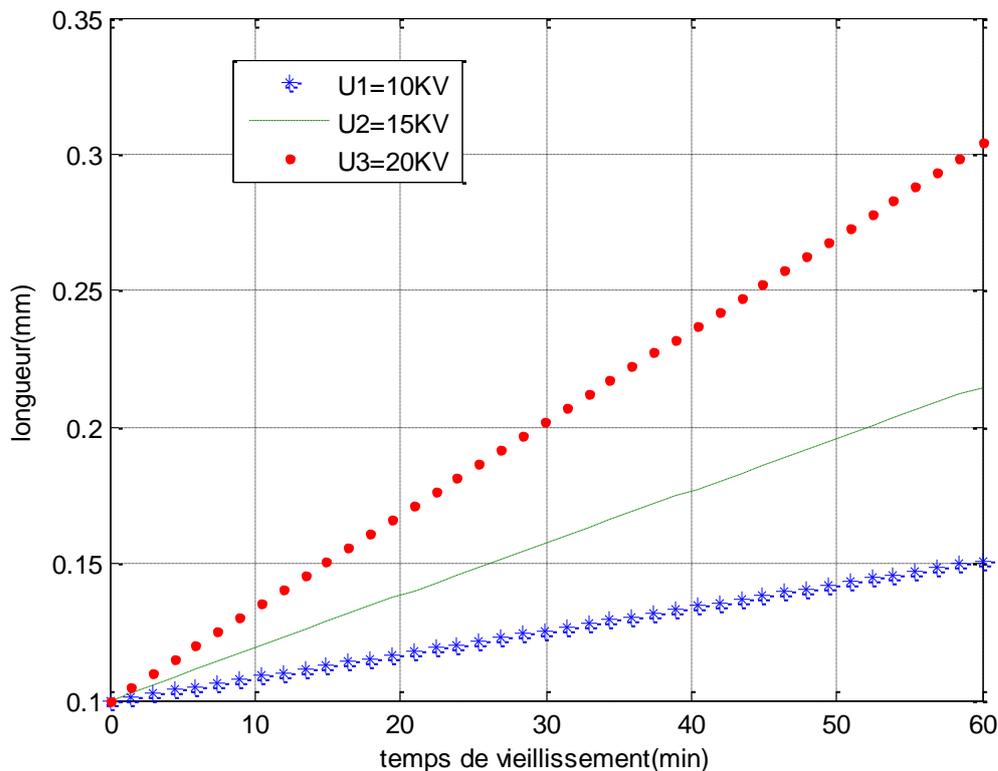


Fig.III.11: Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 10 KV et 15KV et 20KV (modèle Approximation sphérique)

III.3.1.2.Variation de la distance

La fig.III.12 expose la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, tout en variant l'espace inter électrode 'd' 4mm, 6mm, 8mm

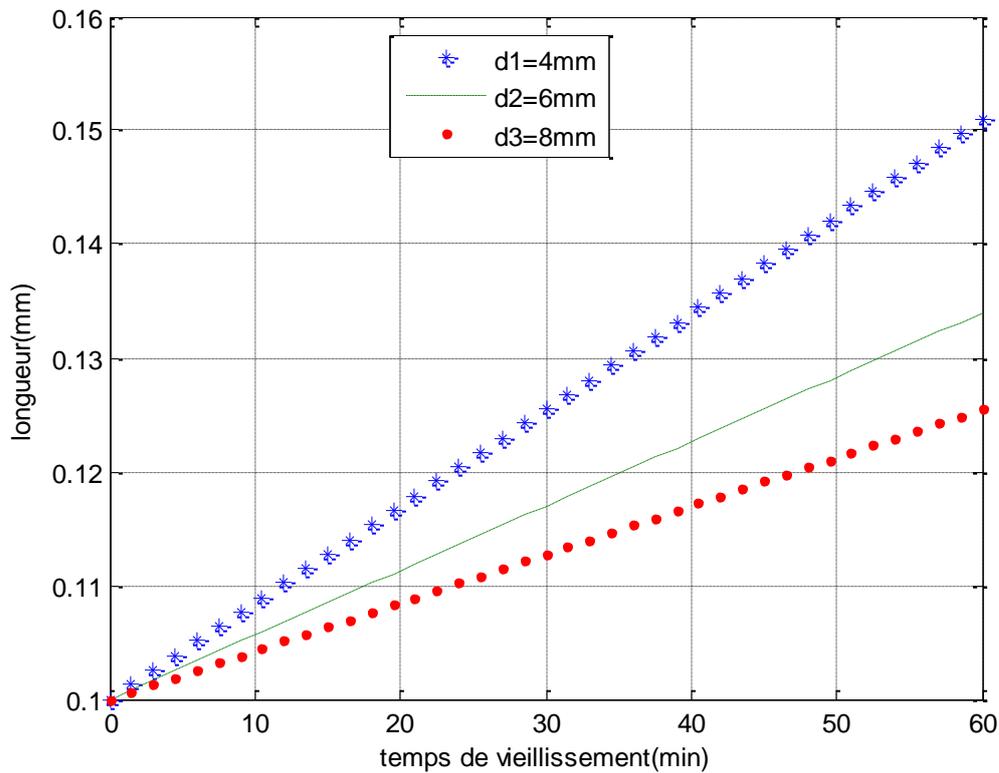


Fig. III.12 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4mm et 6mm et 8mm (Modèle Approximation sphérique)

III.3.1.3. Variation de la permittivité relative

La fig.III.13 montre la variation de la longueur d'arborescence en fonction de temps de vieillissement, nous avons utilisé deux types d'isolants PE ($\epsilon_r = 2.3$), PVC ($\epsilon_r = 3.4$) en maintenant constant la tension appliquée égale à 10 KV et, l'espace interélectrode $d=4$ mm.

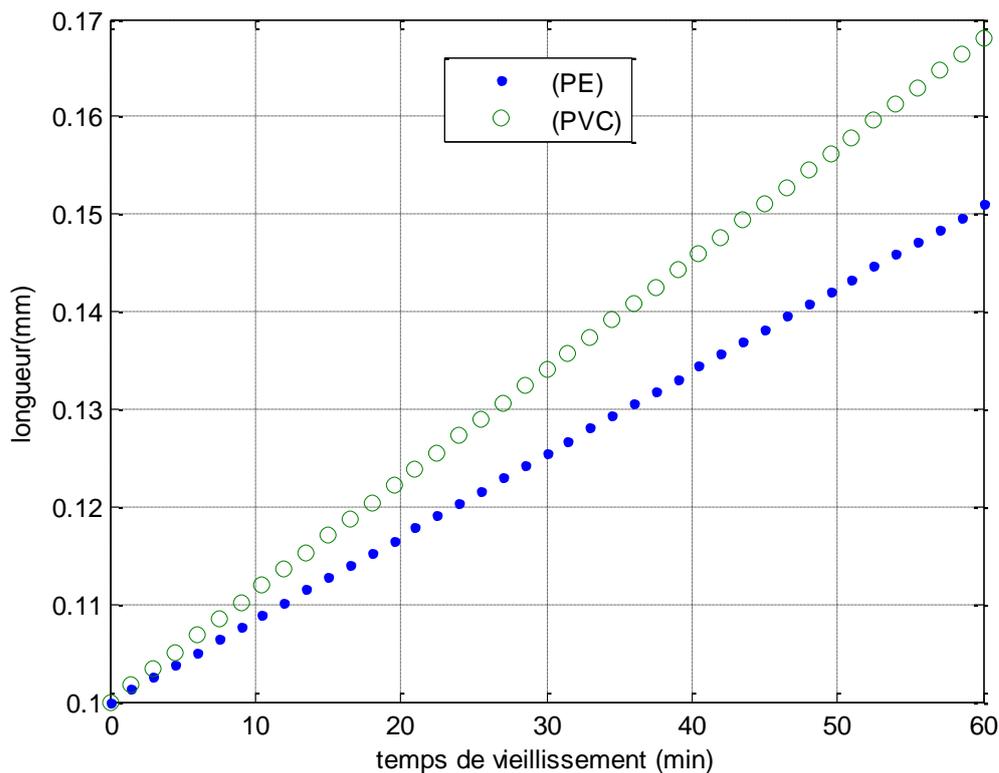


Fig.III.13 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une permittivité relative de ϵ_r (PE)=2.3 ϵ_r (pvc)=3.4 modèle Approximation sphérique)

III.3.1.4. Commentaire

- Dans la fig. III.11 on observe l'augmentation de la longueur d'arborescences jusqu'à 0.31mm durant une période de 60 mn d'où la vitesse de propagation correspondante est égale $3.5 \cdot 10^{-3}$ mm/min. La tension qui est paramètre électrique important dans l'évolution et la propagation des arborescences.
- D'après la fig. III.12 on constate qu'au fur et à mesure la valeur de l'espace inter électrode diminue, la longueur final obtenue $l=0.151$ mm pendant un temps de vieillissement égale à 60min.
- Sur la fig.III.13, nous relevons une distance de propagation maximale égale à 0.169mm durant 60 mn et ceci pour l'isolant de grande permittivité qui est le PVC.

III.3.2.Approximation hyperboloïdale

III.3.2.1.Variation de la tension

La fig.III.14 représente l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour différentes tension appliquée (10KV 15KV 20KV), en gardant constants la distance inter électrode de 4mm et la permittivité $\epsilon_r = 2.3$,

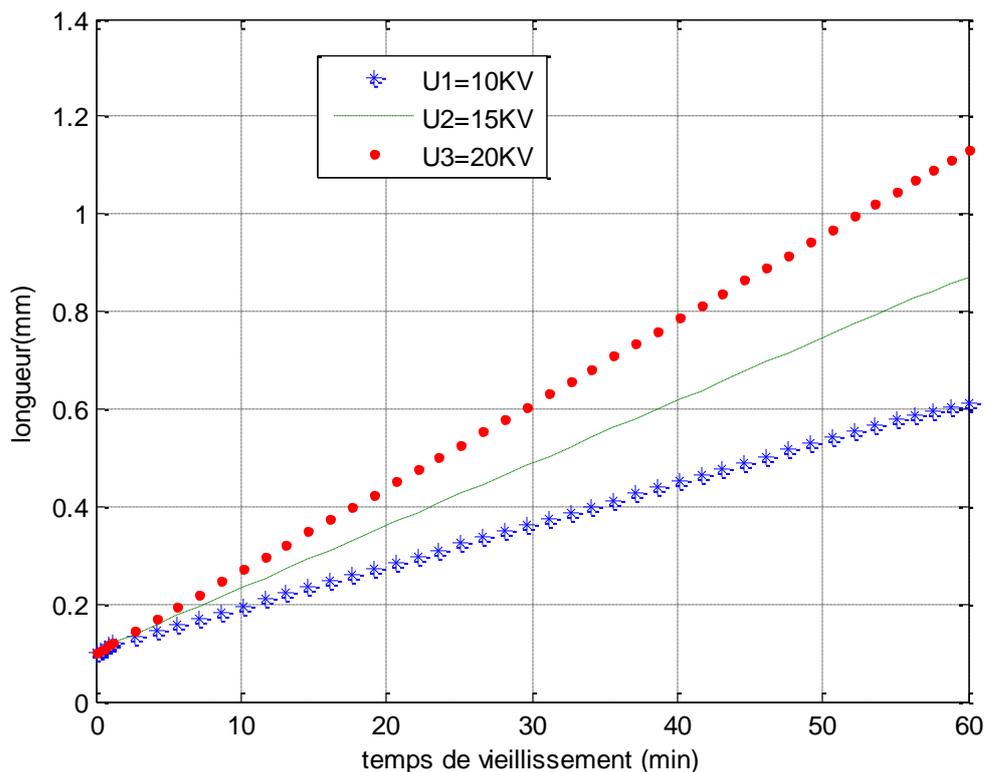


Fig. III.14 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 10 KV et 15KV et 20KV (modèle Approximation hyperboloïdale)

III.3.2.2. Variation de la distance

La fig.III.15 exprime la variation de la longueur en fonction de temps de vieillissement, en variant la distance inter électrode (4mm, 6mm, 8mm) et en maintenant constants la tension appliquée à 10 KV et $\epsilon_r = 2.3$.

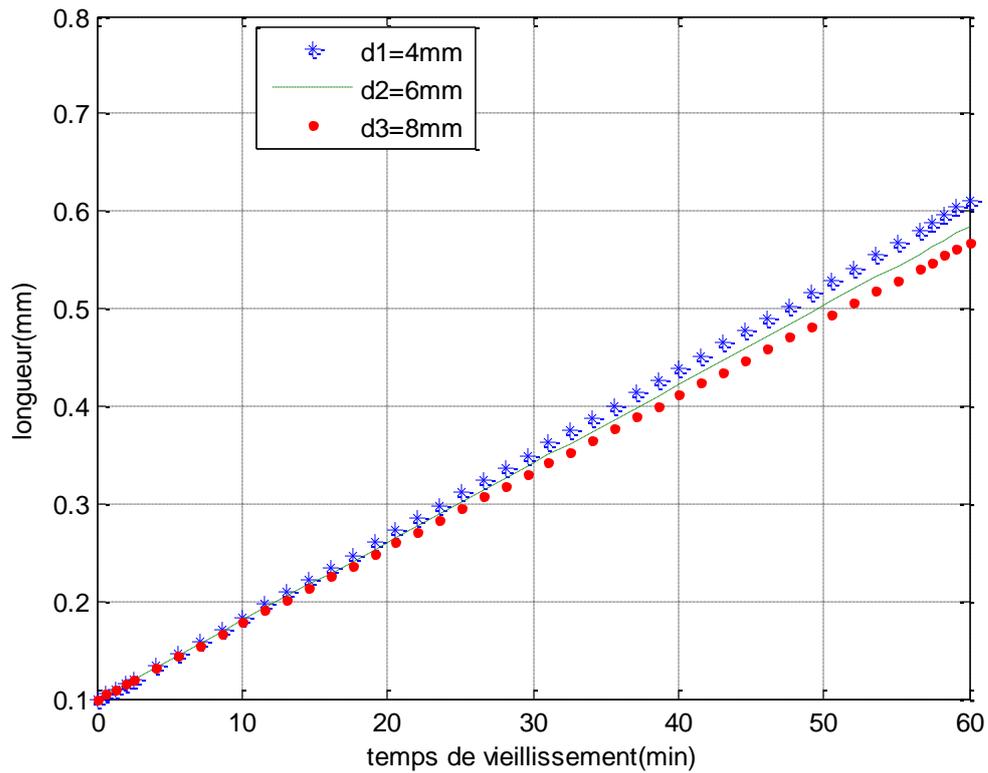


Fig.III.15 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une distance de 4mm et 6mm et 8mm (Modèle Approximation hyperboloïdale)

III.3.2.3 variation de permittivité relative

Nous avons varié la permittivité relative en gardant constant les autres paramètres tels que la tension appliquée (10KV) et la distance $d=4\text{mm}$. Nous obtenons après simulation les courbes représentés dans la fig.III.16

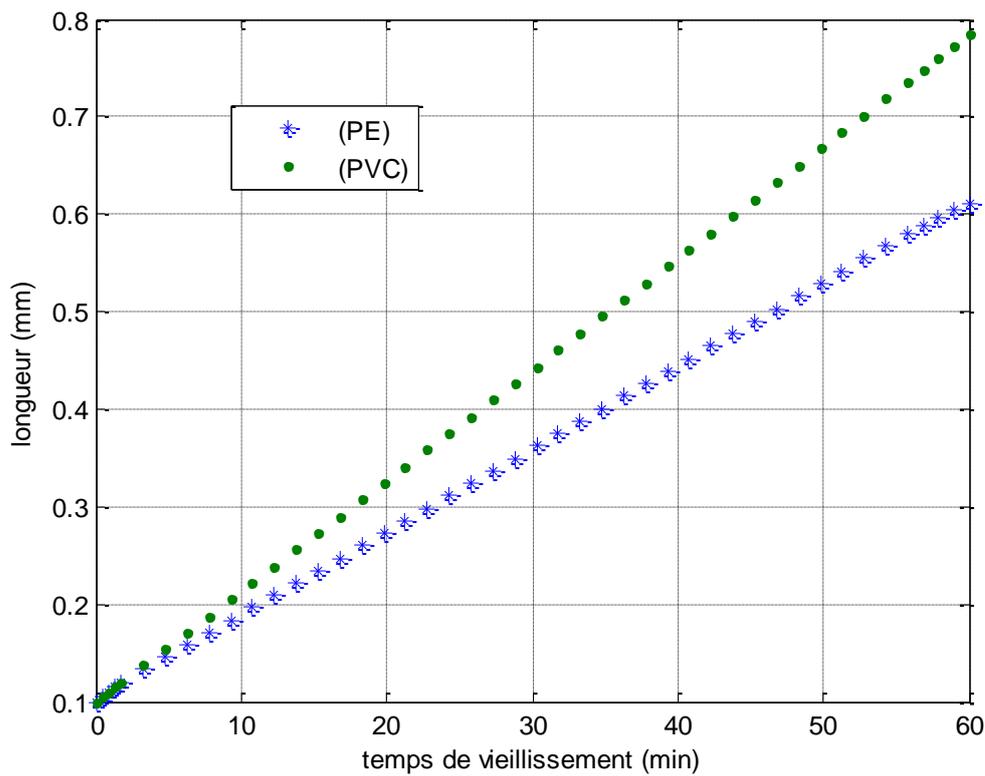


Fig.III.16 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une permittivité relative de ϵ_r (PE)=2.3, ϵ_r (PVC)=3.4 (modèle Approximation hyperboloïdale)

III.3.2.4 Commentaire

- Dans la fig.III.14, l'effet de la tension est marquant car elle contribue à l'avancement de l'arborescence et par la suite à la dégradation du milieu isolant.
- La fig.III.15 montre la distance parcourue en fonction de temps de vieillissement, on relève la distance la propagation de 0.61 mm sous un de temps de vieillissement égale à 60 min pour la distance inter électrode 4mm.
- Dans la fig.III.16 la permittivité relative du milieu isolant a un rôle essentiel dans l'évolution l'arborescence. Durant un temps d'application de la haute tension égale à 60 min, l'avancement maximale atteint 0.79mm pour $\epsilon_r = 3.4$.

III.4. Récapitulation des résultats

Nous regroupons l'ensemble des résultats obtenus précédemment pour les différents modèles des arborescences électrique dans les Tableaux Tab. III.2, Tab. III.3 :

Avec : l_{max} : longueur maximale en mm ; v_{max} : vitesse maximale en mm/min

Tab.III.2 : Longueur maximale d'arborescence (Type buisson), pour temps de vieillissement 100 min

Paramètre électrique Modèles	Tension 20 KV	Distance d=4mm	$\epsilon_r = 3.4$
Tangente en P	$l_{max} = 0.34$ $v_{max} = 3.4 * 10^{-3}$	$l_{max} = 0.17$ $v_{max} = 1.7 * 10^{-3}$	$l_{max} = 0.23$ $v_{max} = 2.3 * 10^{-3}$
Sphère Centrée en 'P'	$l_{max} = 1.3$ $v_{max} = 4.4 * 10^{-3}$	$l_{max} = 1.13$ $v_{max} = 2.3 * 10^{-3}$	$l_{max} = 1.2$ $v_{max} = 2.9 * 10^{-3}$
Sphère Centrée en 'O'	$l_{max} = 1.41$ $v_{max} = 4.1 * 10^{-3}$	$l_{max} = 1.23$ $v_{max} = 2.3 * 10^{-3}$	$l_{max} = 1.28$ $v_{max} = 2.8 * 10^{-3}$

Tab.III.3 : Longueur maximale d'arborescence (Type branche), pour temps de vieillissement 100 min

Paramètre électrique Modèle	Tension 20 KV	Distance d=4mm	$\epsilon_r = 3.4$
Approximation sphérique	$l_{max} = 0.31$ $v_{max} = 3.5 * 10^{-3}$	$l_{max} = 0.151$ $v_{max} = 8.5 * 10^{-4}$	$l_{max} = 0.169$ $v_{max} = 1.15 * 10^{-3}$
Approximation hyperboloïdale	$l_{max} = 1.14$ $v_{max} = 0.017$	$l_{max} = 0.6$ $v_{max} = 8.33 * 10^{-3}$	$l_{max} = 0.79$ $v_{max} = 0.0115$

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué une étude paramétrique de la longueur maximale pour les deux types d'arborescences. La valeur maximale d'avancement a été relevé pour le modèle buisson centré en O avec une vitesse de propagation de $v_{max} = 4.1 * 10^{-3}$ mm/min. pour le type branche la longueur maximale correspond au modèle hyperboloïdale, $l_{max} = 1.14$ $v_{max} = 0.017$

Conclusion générale

Ce mémoire est une étude de la dégradation des polymères par le phénomène d'arborescence. L'étude bibliographique a permis de conquérir et d'apporter des connaissances sur le phénomène d'arborescence, ces caractéristiques, les paramètres influents ce défaut, ainsi les remèdes évoquer pour masquer ce problème. L'arborescence est une dégradation issue de la pression électrostatique et le champ électrique. La modélisation analytique, que nous avons établie par des équations mathématiques décrivant le modèle, on l'assimilant a des formes géométriques simples : sphère pour les arborescences buisson et cylindrique pour les arborescences branche.

Le phénomène d'arborescence électrique liée au grand nombre de paramètres mis en jeu, nous nous sommes limités à modéliser ce phénomène en tenant compte de la seule hypothèse d'une dégradation liée au mécanisme de pression électrostatique. Nous avons établi plusieurs modèles mathématiques de la propagation des arborescences électriques. Ces modèles décrivent l'évolution des arborescences électriques en les assimilant à des formes géométriques simples: sphère pour les arborescences en forme de buisson, et canaux cylindriques pour les arborescences en forme de branches.

Une étude paramétrique a été établie pour les modèles d'arborescences retenu tels que temps du vieillissement, le niveau de la tension appliquée, la distance inter-électrodes, le rayon de courbure de l'aiguille HT et la nature du matériau dégradé. Pour faire ressortir les caractéristiques d'évolution des arborescences, on a utilisé une simulation numérique par le biais d'un programme sous MATLAB et les méthodes ode 45 pour les équations différentielles d'ordre 1. La série de résultats obtenus de ses modèles sont on parfait accord avec ceux de la littérature. De plus, pour les différents modèles qu'on utiliser (buisson, branche), on a donné un choix qui permet la meilleure description du phénomène d'arborescence.

Bibliographies :

- [1] Amar BOUZRARA Mohamed DERRAS, « Influence des paramètres physiques sur l'évolution du phénomène d'arborescence électrique a la surface de poly méthacrylate de méthyle », Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, 28 Septembre 2015.
- [2] Melle : DJ. TILIKATE, S. ISMIGAOUA, S. MECHERAK « Etude de la dégradation de PMMA sous décharge électrique », mémoire de magister, UMMTO, 2010.
- [3] HACHMI SEGHIRI, ABD RACHID AKKA Master Académique UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA « diagnostic de la fonction isolée par la méthode des éléments finis » 2019/2020
- [4] BEN SAIDJ Idir, «Simulation de la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène». Mémoire de Magister en Electrotechnique, 30 Octobre2017, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [5] R. J. DENSLEY, « An investigation into the growth of electrical trees in XPLE cable Insolation », IEEE, Transactions on ELECTRICAL INSULATIONS, Vol.EI-14, pp.148-158, 1979.
- [6] N.ROUHA, « Etude et modélisation de la dégradation des polymères par le Phénomène d'arborescence », thèse de magistère, juillet 94 E.N.P. Alger.
- [7] O. K. SPURR, R. M. EICHHORNN, «Treeing in PE insulation power cables », Bound BROOK, N.J, TECHNICAL Center, 1975.
- [8] R.M. EICHHRON, «treeing in solid extuded electrical insulation» IEEE février 1976.
- [9] KESSI OURDIA, «Evaluation de la quantité de décharge partielle dans une vacuole piégée dans un matériau diélectrique solide sous haute tension », Mémoire de fin cycle, 2011/2012, Université ABEDERRAHMANE Mira-BEJAIA.
- [10] M.DJERROUD YACINE « modélisation de l'arborescence et des grandeurs électriques associés à la dégradation de matériaux diélectrique solides ».2013/2014.
- [11] BARKAT TOUFIK, « Intelligence en essaim, état de l'art et applications dans les matériaux diélectrique », Magister en électrotechnique, option matériaux électrotechniques, 2008. UNIVERSITE DE BATNA.

- [12] C. Laurent, « Contribution à l'étude des mécanismes de la rupture diélectrique à long terme des polymères », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1984.
- [13] N. HOZUMI, M. ISHIDI, T. Okamoto, H. FUKAGAWA, « The influence of morphology on electrical tree initiation in PE under AC and impulse voltage », IEEE, Second International Conference on Properties and APPLICATIONS of Dielectric Materials, Vol.2, pp.481-485, 1988.
- [14] F. NOTO, N. Yoshimura, « Voltage and frequency dependence of tree growth in polyethylene », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.207- 217, 1997.
- [15] MOHAND.AMOKRANE.HANDALA «contribution à l'étude de la propagation des Arborecences dans l'Ethylène-Dienne-Monomère ». Thèse de magister 1982, E.N.P. Alger.
- [16]Abella Salem, «Vieillissement électrique du polyester – imide sous tension continue »,Mémoire Ingénieur d'état en Electrotechnique, Université MMTO
- [17] D. M. Tu, W. B. Lin, G. P. Zhuang, Z. Y. Liu, K. C. Kao, «Electric breakdown under quasi-uniform field conditions and effect of emission shields in PE », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.24, pp.581-590, 1989.
- [18] S. Noel, C. Laurent, C. Mayoux, « An investigation of AC electrical aging phenomena in PE by thermally stimulated discharge current measurement », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.EI-22, pp.63-68, 1987.
- [19] M.A. Handala, «Contribution à l'étude de la propagation des arborescences Electriques dans l'EPDM», mémoire de Magister, ENP d'Alger, 1982
- [20] M. Nagao, T. Kimura, Y. Misuno, M. Kasaki, « Detection of Joule heating before dielectric breakdown in PE films », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.25, pp.715-722, 1990.
- [21] B. Yoda, M. Sakaba, « Treeing degradation of high voltage polyethylene insulated cable »,Hitachi Review, Vol.18, pp. 406-412, 1969.
- [21] J. H. Mason, « The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal Discharges », Proceedings of IEE-Part I: General, Vol.98, pp. 44-59, 1951.

- [22] R. M.Eichhorn, «Treeing in solid extruded electrical insulation », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-12, pp.2-18, 1977.
- [23] T. Okamoto, M. Ishida, N. Hozumi, « Dielectric breakdown strength affected by the lamellar configuration in XPLE insulation at semiconducting interface », IEEE, Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, N°4, pp. 599-607, 1989.
- [24] G. Baher, T. W. Dakin, J. H. Lawson, « Analyse du claquage par arborescence », Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.05.1974.
- [25] NADINE LAHOUD, «modélisation du vieillissement des isolants organiques sous Contrainte électrique application à la fiabilité des matériaux» thèse de doctorant à l'université de Toulouse III mars 2009.
- [26] C.LAURENT, « Etude de la propagation des arborescences électriques dans le Polythène par voie optique et électrique », thèse de docteur-ingénieur, 30mars 1979 U.P.S. Toulouse.
- [27] T. FARR, R. VOGELSANG, K. FROHLICH, «A new deterministic model for tree growth in polymers with barriers» Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 673- 676 CEIDP 2001, Kitchener, Ontario, Canada.
- [28] N. Rouha, A. Beroual, C. Brosseau, « Modeling the treeing growth in solid electrical Insulations», IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phénomène, pp.750-753, 1996.
- [29] J. C. Dubois, «Diélectriques plastiques», Technique de l'Ingénieur, publication E1850, 1980.
- [30] Ibrahim Iddrissu and All , « DC Electrical tree growth in Epoxy Resin and the influence of the size of inceptive AC trees »,IEEE ;Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol.18,No. 3; june 2011

Résumé:

Notre projet a porté sur la simulation de l'évolution de la propagation des arborescences électrique crée dans l'isolant solide des systèmes électriques à haute tension.

Nous nous sommes focalisé sur les modèles analytiques à base de la pression électrostatique pour déterminer les équations de propagation des formes géométries simples : sphère pour les arborescences de type buisson et canaux cylindriques pour les arborescences de type branches et pour une densité de charge nulle.

Nous avons pu constater que la tension appliquée, la distance inter-électrode, type de matériau et le temps de vieillissement influent sur le phénomène d'arborescence et les décharges électrique modifient considérablement la structure de polymère.

Mots clés : Arborescences électrique-pression électrostatique-isolant solide-haute tension

Abstract:

Our project focused on the simulation of the evolution of the propagation of electrical trees created in the solid insulation of high voltage electrical systems.

We focused on analytical models based on electrostatic pressure to determine the propagation equations of simple geometric shapes: sphere for bush-type trees and cylindrical channels for branch-type trees and for zero charge density.

We were able to observe that the applied voltage, the inter-electrode distance, type of material and the aging time influence the phenomenon of tree structure and the electrical discharges considerably modify the polymer structure.

Keywords: electrical trees-electrostatic pressure- solid insulation-high voltage