

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 de génie électrique



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

Contribution à l'étude des arborescences électriques dans les isolants solides

Présenté Par :

- 1) Melle Belarbi Fardous
- 2) Melle Benamer Soumia

Devant le jury composé de :

Mr ZELMAT Samir Pr UAT.B.B (Ain Temouchent) Président
Mr AYACHE Zouaoui M A A UAT.B.B (Ain Temouchent) Examineur
Mme TOUHAMI Aicha M A A UAT.B.B (Ain Temouchent) Encadrant

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier dieu le tout puissant qui m'a accordé santé, volonté et aide jusqu'à l'achèvement de mon travail.

Nous remercions vivement notre promotrice, Mme TOUHAMI AICHA, pour sa patience, son encouragement, ses conseils et sa disponibilité tout au long de mon travail.

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail.

Un grand merci à nos familles respectives en particulier à nos parents, pour nous avoir Soutenues et aidées tout au long de nos études.

Nous tenons aussi à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidées de près ou de loin à élaborer ce projet, à savoir les collègues de notre promotion et tous nos amis.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *A toute ma famille.*
- *A mon cher papa et ma chère maman qui n'ont ménagé aucun effort, durant tout mon cursus scolaire pour ma réussite, que dieu les protèges.*

A mon frères et sœur

- *A tous ceux qui me connaissent ; surtout mes amis intimes en particulier*

Rahal Hamida chaimaa

Fardous

Je dédie ce modeste travail à :

- *A toute ma famille*
- *Mes chers parents que j'aime beaucoup*
- *A mes frères et ma sœur*
- *A tous ceux qui me connaissent ; surtout mon fiancé N*

Soumia

Sommaire

Liste des symboles

Introduction Générale.....2

Chapitre I Arborescences électriques

I.1 Introduction 3

I.2. Définition et origine des arborescences 3

I.2.1. Les arborescences ouvertes 3

I.2.2. Les arborescences en noeud papillon 4

I.3. Arborescences électriques.....4

I.3.1. Définition 4

I.3.2. Structures et formes d'arborescences 4

I.4. Les phases d'évolution des arborescences électriques..... 5

I.4.1. Phase d'initiation..... 5

I.4.2. Phase de propagation..... 6

I.4.3. Phase d'avalanche 6

I.5. Mécanismes d'évolution des arborescences électriques 6

I.5.1. Mécanismes d'initiation 6

I.5.1.A. Formation de l'arborescence par décharges partielles 6

I.5.1.B. Action des porteurs chauds sur la structure d'isolant 7

I.5.1.C. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique 7

I.5.2 Mécanismes de propagation des arborescences électriques 7

I.5.2 A. Mécanismes électriques 7

I.5.2.B. Mécanisme thermique 8

I.6. Facteurs influant sur la propagation des arborescences électriques..... 8

I.7. Méthodes permettant d'éviter la formation d'arborescence 9

I.8. Conclusion 9

Chapitre II Modèles mathématiques de la propagation des arborescences électriques

II.1. Introduction 10

II.2. Modèle de propagation fractale de l'arborescence électrique 10

II.2.1. Définition 10

II.2.2. Mécanisme physique de la formation et de l'évolution de l'arborescence électrique submicroscopique	11
II.2.3. Taux de croissance de l'arborescence électrique	12
II.2.4. Durée de vie	12
II.3. Modélisation analytique de la propagation des arborescences électriques.....	12
II.3.1. Pression électrostatique.....	13
II.3. 2. Expression du champ électrique	13
II.3. 2.1. Arborescence en forme de buisson.....	13
II.3. 2.2. Arborescence en forme de branches.....	16
II.4. Bilan énergétique	18
II.4.1. Arborescence en buisson.....	18
II.4.1.1. Arborescence assimilée à une sphère tangente à la pointe (p)	19
II.4.1.2. Arborescence assimilée à une sphère centrée sur la pointe.....	20
II.4.2. Arborescence en branches	22
II.4.2.1. Approximation sphérique	23
II.4.2.2. Approximation hyperboloïdale	23
II.5. Conclusion.....	24

Chapitre III Simulation et Discussion des Résultats

III. 1 Modèle de la sphère tangente à la pointe P.....	26
III. 1.1 Méthode d'Euler explicite.....	26
III. 1.1 Méthode Adams-Bashforth	27
III.1.2 Méthode Analytique	28
III. 2 Modèle de la sphère centrée à la pointe P	30
III. 3 Modèle de la sphère centrée en O	32
III.4 Etude paramétriques du modèle sphère tangente à pointe P :	34
III.4.1 L'effet de la variation de la tension appliquée	34
III.4.1 L'effet de la variation de l'espace inter électrode	35
III.5 Conclusion.....	36
Conclusion Générale.....	37

Liste des symboles

Notation	Signification
L	la longueur de l'arborescence électrique
Lb	l'incrément d'unité
k et h	respectivement les constantes de Boltzmann et Planck.
T	température absolue
C_0	taille de la cavité submicroscopique
U_0	énergie d'activation du processus de rupture en physique
ε	permittivité diélectrique
E	intensité du champ électrique
α	propriété du matériau, qui représente physiquement la région d'activation dans la direction du champ électrique
αC_0	volume activé par le champ électrique
P_e	la pression électrostatique
ε_0	Permittivité de l'air
ε_r	Permittivité relative du polymère
U	Tension appliquée aux électrodes.
d	Distance interélectrode
l	Longueur de l'arborescence
V	Potentiel électrique
r_p	le rayon de l'électrode pointe
r_b	le rayon des branches
R_0	Rayon initial de l'arborescence
R	Rayon de l'arborescence à l'instant t
ρ	masse volumique du polymère
W	Le travail
E_C	énergie cinétique

Introduction Générale

Dans les systèmes haute tension les isolants solides sont les plus employés, à cause de leurs excellentes propriétés diélectriques (résistivité, rigidité, permittivité), thermiques et mécaniques. Les polymères présentent une importance considérable pour l'industrie des câbles de transport d'énergie électrique et plus particulièrement le polyéthylène qui est le plus utilisé comme isolant. [1]

La fonction d'isolation électrique est Primordiale, en ce sens qu'elle est l'une des conditions fondamentales du fonctionnement des matériels de production, de transport et de distribution d'énergie électrique [2] Cependant, malgré les précautions prises et le soin porté lors de leur mise en œuvre, des impuretés et des défauts peuvent toujours se présenter dans leur structure, qui est à l'origine de leur dégradation. Ces impuretés et ces défauts induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique ainsi qu'un renforcement de ce dernier ; ceci peut entraîner la dégradation à court ou à long terme, par un mécanisme appelé "arborescences" dont leur développement conduit à la perforation complète de l'isolation. 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). [2]

Les arborescences électriques sont généralement considérées comme le mécanisme physique le plus important pour la rupture diélectrique dans les isolants solides, c'est pourquoi ce phénomène a donné lieu à de nombreuses recherches qui permettent de mieux comprendre le mécanisme de leur naissance et de leur évolution. Ce qui pourrait aidé à trouver un remède à un tel danger, et parmi les travaux qui ont été effectués est la modélisation de ces arborescences. De nombreux modèles ont été proposés pour la simulation de la propagation temporaire des arborescences électriques [1]

L'objet de notre travail est de simuler la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène utilisé comme isolant dans les câbles de haute tension. Notre mémoire comporte trois chapitre essentiels dont :

Le premier chapitre traite les arborescences électriques : définitions, structures et formes, phases d'évolution, théories expliquant leur initiation, et ainsi les mécanismes de leur propagation. Les facteurs influant sur leur propagation et les méthodes d'éviter leur formation

Le deuxième chapitre expose différents modèles mathématiques de la propagation des arborescences électriques dans les polymères utilisés dans les câbles de haute tension nous nous intéresserons aux modèles issus de l'hypothèse de la pression électrostatique.

Le troisième chapitre est consacré au calcul numérique des modèles choisis concernant le polyéthylène. Ceci a conduit aux courbes de la cinétique de la propagation des arborescences électriques sous champ alternatif ainsi qu'une étude paramétrique de l'effet de la tension appliquée et la distance inter électrode sur la longueur de l'arborescence. Une interprétation et une discussion des résultats obtenus ont été données

Pour finir, une conclusion générale clôturera ce travail

Chapitre I

Arborescences électriques

I.1 Introduction :

L'arborescence électrique est un phénomène de dégradation des isolants solides haute tension qui se manifeste par des formations rappelant une forme d'arbre [3]. Les matériaux isolants contiennent des cavités où se produisent des décharges électriques lorsque ces premiers sont soumis à des tensions excédant une valeur critique : on parle alors de décharges partielles (DP). Ces décharges conduisent à la détérioration du matériau diélectrique par le phénomène d'arborescence qui peut évoluer jusqu'à provoquer la perforation complète de l'isolation [4].

I.2. Définition et origine des arborescences

Les isolants utilisés en haute tension (HT) et moyenne tension (MT) présentent toujours des impuretés et des défauts microscopiques (microcavités, occlusions gazeuses et hétérogénéités à l'interface isolant-conducteur) [5], 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, 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 » [6].

Ces arborescences sont en relation avec :

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

Les claquages par arborescences sont assez peu nombreux, mais le phénomène est toujours Considéré comme dangereux. [7]

Les arborescences sont classées selon l'endroit où elles prennent naissance dans l'isolant, et l'environnement où fonctionne celui-ci. Selon l'endroit où elles prennent naissance, on distingue deux types d'arborescences [8] :

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 [8].

I.2.2. Les arborescences en noeud 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 [9].

Dans les deux cas, le développement des arborescences se fait dans la direction du champ électrique.

I.3.Arborescences électriques

I.3.1. Définition

Les arborescences électriques ont pour origine des défauts au sein du matériau tels qu'il se produit une concentration importante du champ électrique. [10]. Ils se développent dans les milieux qui ne contiennent pas de l'eau ni d'autres solutions chimiques. [3]

Les expérimentateurs simulent des défauts en introduisant une aiguille pointue dans un isolant. La tension est appliquée entre l'aiguille et une électrode généralement plane et en contact avec le matériau. En pratique, il s'agit de reproduire les conditions nécessaires à l'apparition des arborescences. La pointe sert alors de site d'initiation. [11]

Tous les spécialistes en la matière s'accordent à dire que les canaux qui forment les arborescences électrique contiennent des gaz et sont le siège de décharges partielles [3]

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 pendant la propagation [14].

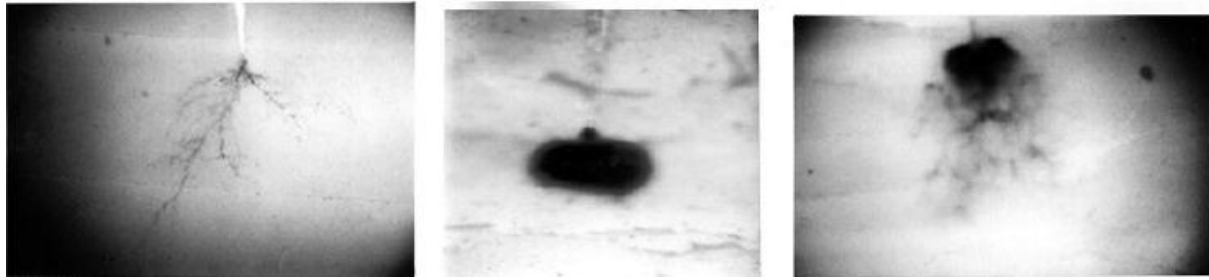
Les formes des arborescences électriques peuvent être en branches, en buissons, ou une combinaison de ces deux formes, soit donc buissons multiples ou buissons branches [8]

D'après les travaux sur le polyéthylène sous tension alternative à 50Hz :

-Si $E < 5,4 \cdot 10^8 \text{ V/m}$, l'arborescence est de type branche

-Si $5,4 \cdot 10^8 \text{ V/m} < E < 6,0 \cdot 10^8 \text{ V/m}$, l'arborescence est de type buisson

-Si $E \sim 6,0.10^8 \text{ V/m}$, l'arborescence est de type buisson ramifié [15]



a) Branche

b) Buisson

c) Buisson –Branche

Fig. I.1: Les formes distinctes d'arborescences. [17]

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

Les études ont montré que le développement du phénomène est toujours caractérisée par trois phases :

- ✓ phase d'initiation ou d'incubation définie comme le temps séparant l'application de la tension au système d'électrodes de l'apparition de la première branche en pointe d'aiguille,
- ✓ phase de propagation durant laquelle on observe le développement des micro canaux dans l'espace inter électrode
- ✓ la phase d'avalanche qui conduit au claquage. [11]

I.4.1. Phase d'initiation

C'est le temps pendant lequel on doit appliquer la tension au système d'électrodes pour qu'apparaisse la première branche [11]. Celle-ci est mise en évidence par l'enregistrement des décharges partielles (DP) provoquant un phénomène d'électroluminescence et la formation de région détériorée [8].

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 [11].

I.4.2. Phase de propagation

Le développement des arborescences électriques est toujours accompagné de décharges partielles mesurables qui apparaissent au moment où les premières branches sont visibles au microscope [16] leur présence se signale par des dégagements gazeux et des phénomènes lumineux [8]. Elle est caractérisée par l'amorçage des décharges électriques qui font progresser ces micro-canaux dans la direction du champ électrique [11]. La vitesse de propagation varie en fonction de la fréquence de la tension appliquée et de la pression des gaz dans les canaux formant l'arborescence [3].

Les temps de propagation sont courts et moins dispersés que les temps d'initiations [15].

I.4.3. Phase d'avalanche

Le claquage est obtenu lorsque le filament court-circuite l'épaisseur isolante inter électrodes (perforation complète de l'isolation). Il est établi que la perforation pourrait ne pas avoir lieu même après pénétration complète de l'arborescence à travers l'isolation [8].

I.5. Mécanismes d'évolution des arborescences électriques

Des mécanismes sont présentés pour expliquer l'évolution des arborescences électriques [17]

I.5.1. Mécanismes d'initiation

La période d'incubation est considérée comme le phénomène prédisruptif dans le domaine du vieillissement électrique des isolants solides. On distingue 3 groupes de théories :[11]

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. [17]

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. [4]

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 [1]. 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 [15] 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 auteurs 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.[11]

I.5.2 Mécanismes de propagation des arborescences électriques

Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer leur propagation. Nous citons :

I.5.2.1. Mécanismes électriques

La présence des décharges partielles se trouvant dans les canaux formant l'arborescence rend le gaz qui les remplit conducteur, et le champ est reporté à leurs pointes et provoque des claquages locaux qui les font progresser [18].

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 microcanaux prenant naissance à l'extrémité des branches [12].

Le concept des électrons chauds accélérés dans les microcavités est évoqué pour expliquer la propagation des canaux [19]. On peut aussi considérer l'action directe des ions concentrés dans une microcavité de l'arborescence, soit par effet électrostatique ou par bombardement [20]

I.5.2.2. Mécanisme thermique

Sous l'action des décharges partielles, la dégradation de l'isolant peut avoir lieu par évaporation locale du matériau [12]. Suit une élévation locale de température par bombardement de particules provoque l'évaporation du matériau sous l'action des décharges partielles, ce qui contribue à la dégradation de l'isolant. Ce mécanisme de dégradation prépondérant dans l'EPDM, peut être favorisé par l'état amorphe du matériau [8]. Ce mécanisme est aussi évoqué par F.Noto et al pour expliquer la propagation de ce type d'arborescences dans le PVC. [12]

I.6. 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 [21].
- les charges d'espace ainsi l'effet de la polarité.
- la fréquence [6], température [22], propriétés mécaniques, nature de gaz piégé [6], morphologie du polymère dans le volume et l'interface 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 [10].
- l'augmentation de la pression interne des gaz qui peut 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 [25].

I.7. Méthodes permettant d'éviter la formation d'arborescence

Il semble que rien ne peut empêcher les arborescences électriques, une fois formées, de se développer jusqu'au claquage. C'est pourquoi, il est nécessaire avant tout d'empêcher leur formation. Les premières précautions à prendre concernant les méthodes d'extrusion et préparations des isolants.

Il s'agit de limiter le nombre de sites susceptibles de devenir des lieux privilégiés d'initiation en :

- limitant des défauts au niveau des interfaces isolant-protections.
- limitant la taille des impuretés présentes (poussières), des sphérolites ainsi que celle des microcavités.
- ajoutant des additifs permettant d'influencer fortement le champ d'apparition des arborescences : imprégnation de l'isolation par des liquides ou des gaz. [25]

I.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux comprendre le phénomène d'arborescence, en abordant les définitions et les mécanismes de leur évolution, les paramètres qui influent sur ces dernières, ainsi que les remèdes possibles apportés pour éviter ce sérieux problème. Afin de mieux comprendre le phénomène d'arborescence électriques utilisés dans les câbles de haute tension, on a opté pour sa modélisation, ce qui est l'objet de notre prochain chapitre

Chapitre II

Modèles mathématiques de la propagation des arborescences électriques

II.1.Introduction

Beaucoup de chercheurs ont développées plusieurs théories pour expliquer le phénomène de la propagation des arborescences électriques dans les isolants solides, dans ce chapitre deux modèles sont décrits dont chacun a son propre particularité, par la suite nous nous sommes intéressés au dernier modèle qui est basé sur l'effet de la pression électrostatique.

II.2. Modèle de propagation fractale de l'arborescence électrique

II.2.1. Définition

L'arborescence électrique peut être modélisée comme étant un groupe fractal qui est formé comme étant un résultat d'une jonction successive de branches submicroscopiques (Fig.II.1). En assimilant le nombre de branches qui forme l'arborescence électrique à X , on a généralement [25] :

$$X = (L/Lb)^{df} \quad (\text{II.1})$$

L : est la longueur de l'arborescence électrique.

Lb : est l'incrément d'unité dans la longueur de l'arborescence électrique dû à la jonction de l'arborescence secondaire, il est approximativement égal à la longueur moyenne de l'arborescence secondaire.

df : est la dimension fractale de l'arborescence électrique. Selon le modèle mathématique de l'évolution du groupe fractal [25], en dérive X :

$$\frac{dX}{dt} = k \quad (\text{II.2})$$

K : est la fréquence des incréments de l'arborescence électrique suivant le micro mécanisme décrit auparavant.

$1/k$: égal au temps moyen entre deux incréments consécutifs de la propagation de l'arborescence électrique. Cette valeur ne dépend pas seulement du mécanisme physique spécifique de la formation des branches submicroscopiques, mais aussi des caractéristiques du matériau et ainsi des conditions du chargement.

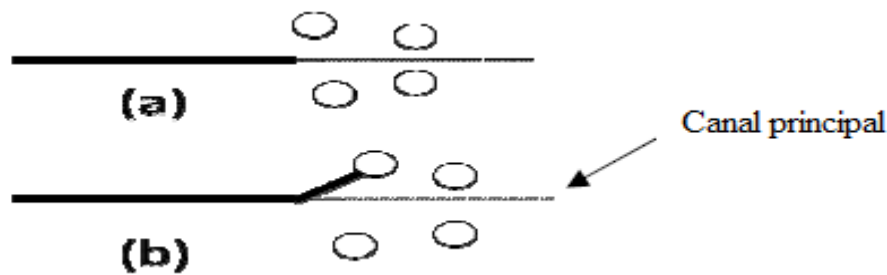


Figure II.1 : Branche et cavités environnantes [25]

(a) : Formation d'une branche submicroscopique dans le canal principal

(b) : Jonction d'une branche submicroscopique à la branche principale

II.2.2. Mécanisme physique de la formation et de l'évolution de l'arborescence électrique submicroscopique

L'évolution des arborescences électriques, au niveau submicroscopique signifie la rupture successive des liaisons moléculaires du polymère dans les zones de travail autour de la branche principale [25]. Selon le modèle cinétique de la rupture diélectrique dépendante de temps pour les polymères [26] qui, l'évolution de l'arborescence submicroscopique peut être expliquée en termes de la température qui augmente au niveau des liaisons du polymère due à l'excitation électrique. La formation de l'arborescence submicroscopique peut être décrite quantitativement.

La fréquence K des incréments de l'arborescence électrique en (II.1) peut être déterminée en calculant le taux de rupture de liaisons du polymère comme suit [26] :

$$k = \left(\frac{kT}{h}\right) \exp\left(\frac{\alpha\pi\varepsilon E^2 C_0 - U_0}{kT}\right) \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

- k et h : sont respectivement les constantes de Boltzmann et Planck.
- T : température absolue.
- C_0 : taille de la cavité submicroscopique.
- U_0 : énergie d'activation du processus de rupture en physique.
- ε : permittivité diélectrique.
- E : intensité du champ électrique.
- α : propriété du matériau, qui représente physiquement la région d'activation dans la direction du champ électrique.
- αC_0 : volume activé par le champ électrique.

II.2.3. Taux de croissance de l'arborescence électrique

Avec les formules (II.1),(II.2) et (II.3), on peut développer une formule de la vitesse de propagation de l'arborescence électrique suivante [25] :

$$\frac{dL}{dt} = kT L_b^{df} \cdot L^{(1-df)} \cdot \exp\left(\frac{\alpha\pi\varepsilon E^2 C_0 - U_0}{kT}\right) \quad (\text{II. 4})$$

Par l'intégration de (II.4) on obtient la loi de propagation de l'arborescence comme suit [25] :

$$L = L_b \cdot \left\{ \left(\frac{kT}{h} \right) \exp\left(\frac{\alpha\pi\varepsilon E^2 C_0 - U_0}{kT}\right) \right\}^{1/df} \cdot t^{1/df} \quad (\text{II. 5})$$

II.2.4. Durée de vie

Le temps de l'évolution de l'arborescence électrique jusqu'au claquage t_g peut être calculé en intégrant (II.4) à partir d'une longueur initiale de l'arborescence L_0 jusqu'à une longueur critique L_C , i.e. [25]:

$$t_g = - \left(\frac{L_C}{L_b} \right)^{df} \frac{h}{kT} \exp\left(\frac{\alpha\pi\varepsilon E^2 C_0 - U_0}{kT}\right) \quad (\text{II. 6})$$

C'est une nouvelle formule de la durée de vie de l'isolant et aussi la relation fondamentale qui relie directement en une seule équation le temps de vie avec le champ appliqué, la température environnementale et la dimension fractale [25]. Il est très clair que le temps de la durée de vie décroît exponentiellement quand E augmente et diminue quand T augmente [25].

II.3. Modélisation analytique de la propagation des arborescences électriques

Dans cette partie, la modélisation des structures d'arborescences qui s'étendent dans un isolant polymère est basée sur la notion de la pression électrostatique, et cela en assimilant les arborescences à des formes géométriques simples et en considérant l'interface arborescence/polymère dépourvue de charge électrique, et ce d'après l'approche utilisée par BEROUAL [27] dans le cas de suspensions dans les diélectriques liquides.

II.3.1. 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 ($\sigma = 0$) [5]:

$$P_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (\varepsilon_r - 1) E^2 \quad (\text{II. 7})$$

Avec :

ε_0 : Permittivité de l'air

ε_r : Permittivité relative du polymère

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

$$P_e = k. E^2 \quad (\text{II. 8})$$

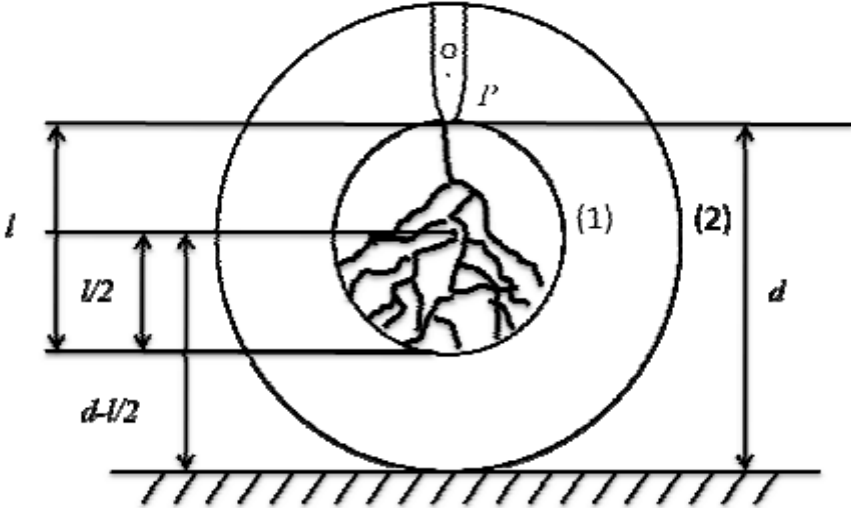
II.3. 2. Expression du champ électrique

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 μm) dans un isolant, une fois l'arborescence est générée, c'est le champ en son front qui va lui permettre de se développer.

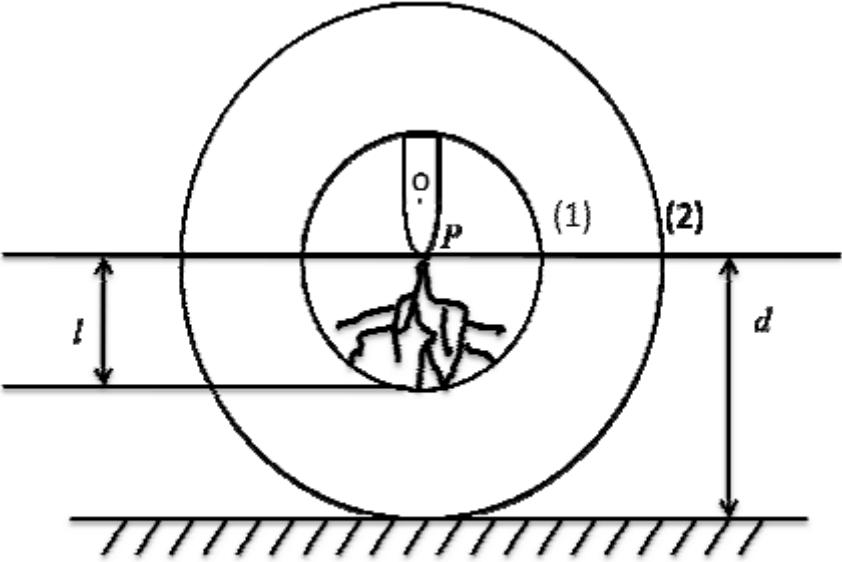
Selon que l'arborescence est en forme de buisson ou de branche, le champ électrique est déterminé en utilisant une approximation sphérique ou une approximation hyperboloïdale.[1]

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 considérées (Fig.II. 2) [11].



(a)



(b)

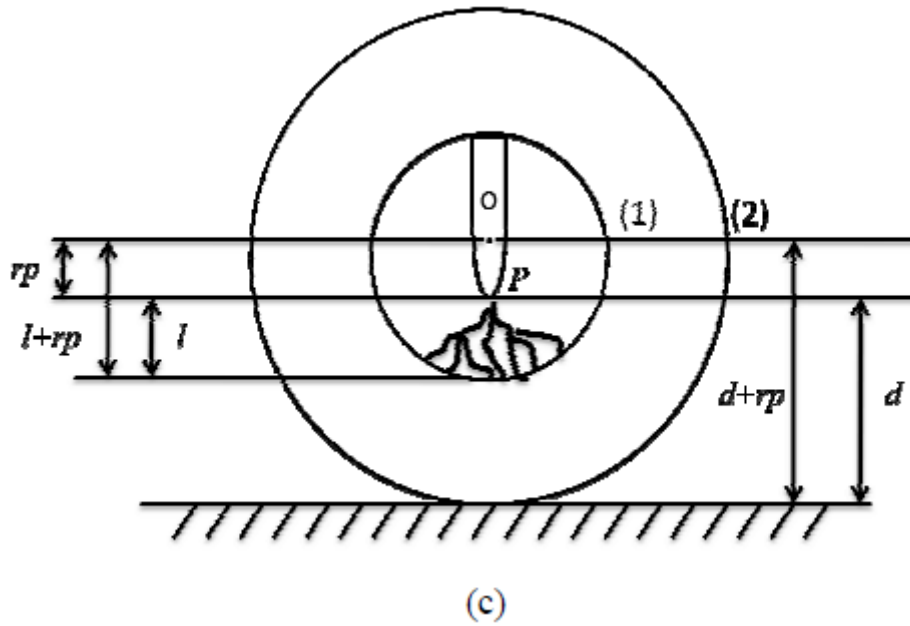


Figure II.2 : Représentation schématique des différents modèles sphériques.[1]

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

L'électrode opposée est assimilée à une sphère concentrique à la première (Fig.II.2.a)

L'application de conditions aux limites :

$$(1): r = \frac{l}{2} \rightarrow V(r) = U$$

Et

$$(2): r = d - \frac{l}{2} \rightarrow V(r) = 0$$

À l'équation de Laplace $\nabla^2 V = 0$ en coordonnées sphériques, nous permet de déterminer le champ électrique sur le front de la sphère interne et qui aura pour expression [5] :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{\left(2 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)}{\left(1 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)\left(\frac{l}{d}\right)} \quad (\text{II. 9})$$

U : Tension appliquée aux électrodes.

d : Distance inter électrode.

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.2.b). Le champ électrique sur le front de la sphère interne obtenu pour les conditions aux limites suivantes :

$$(1): r = l \rightarrow V(r) = U$$

Et

$$(2): r = d \rightarrow V(r) = 0$$

A pour expression :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{1}{\left(\frac{l}{d}\right)\left(1-\left(\frac{l}{d}\right)\right)} \quad (\text{II. 10})$$

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.2.c). Le champ électrique sur le front de la sphère interne déterminé pour les conditions aux limites :

$$(1): r = l + r_p \rightarrow V(r) = U$$

Et

$$(2) : r = d + r_p \rightarrow V(r) = 0$$

A pour expression :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{(1+(r_p+d))}{\left(1+\left(\frac{l}{d}\right)\right)\left(\left(\frac{l}{d}\right)+\left(\frac{r_p}{d}\right)\right)} \quad (\text{II. 11})$$

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.3. b) [11].

Avec : r_b le rayon des branches $\approx r_p$, et r_p le rayon de l'électrode pointe.

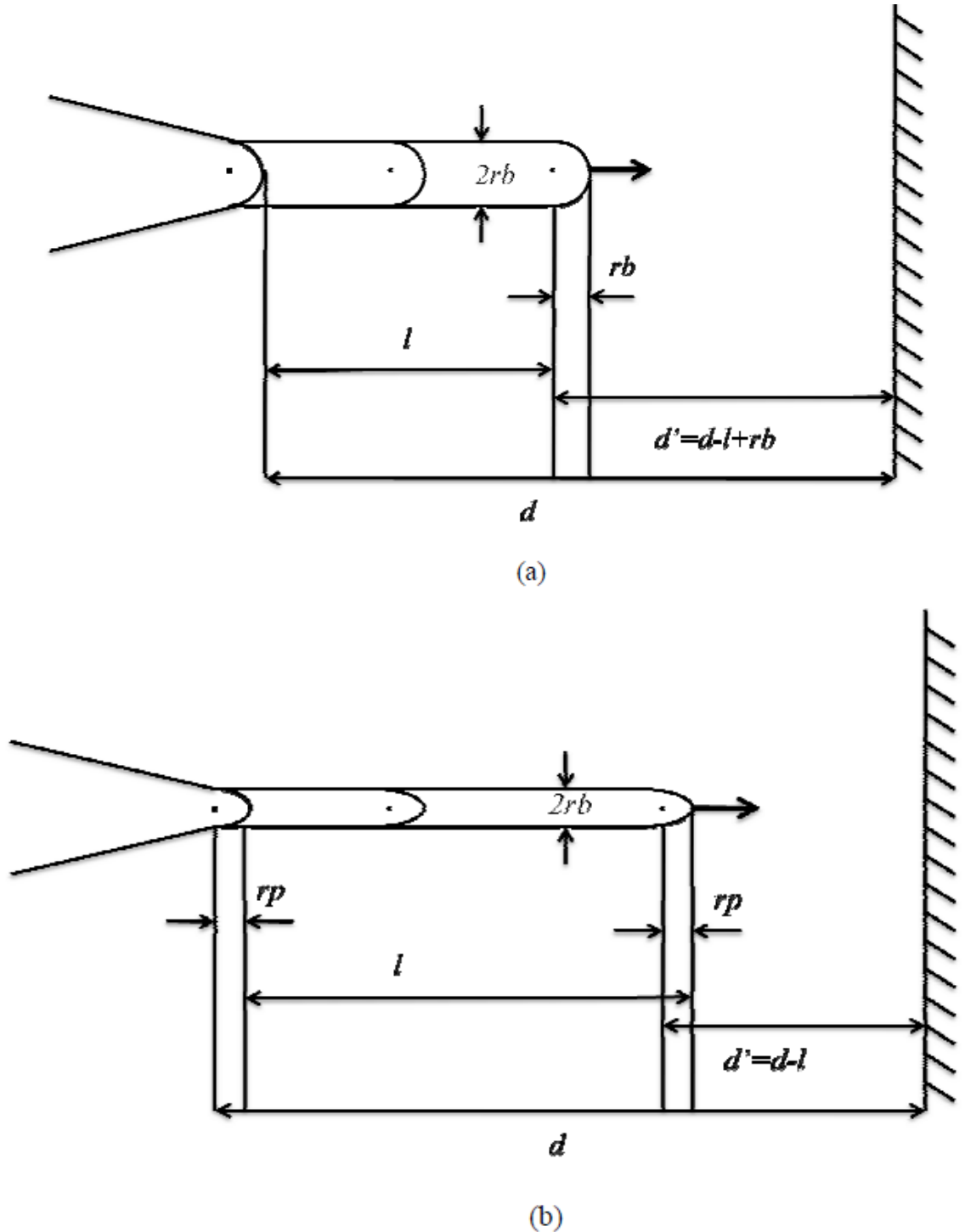


Figure II.3: Représentation schématique du modèle filamentaire.[1]

(a): approximation sphérique,

(b) : approximation hyperboloïdale

II.3.2.2.1. Approximation sphérique

Le champ électrique sur le front de la sphère de rayon r_b (fig.II.3.a) est déterminé pour les conditions aux limites :

$$(1) : r = r_b \rightarrow V(r) = U$$

Et

$$(2) : r = d - l + r_b \rightarrow V(r) = 0$$

Et a pour expression

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \left(\frac{d}{r_b} + \frac{1}{1 - \left(\frac{l}{d}\right)}\right) \quad (\text{II. 12})$$

II.3.2.2.2. Approximation hyperboloïdale

La branche progresse telle 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 [28].

Son expression approchée est donnée par :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{\frac{2d}{r_p}}{\ln\left(1 + 4\left(\frac{d-l}{r_p}\right)\right)} \quad (\text{II. 13})$$

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 [5] :

$$W = \int_{R_0}^R 4\pi R^2 \cdot P_e \cdot dR \quad (\text{II. 14})$$

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

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (\text{II. 15})$$

Avec ρ : masse volumique du polymère

L'équation (II.14) et (II.15) donnent :

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

Par différentiation et après réarrangement on obtient

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

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

L'expression de P_e devient :

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (\text{II. 16})$$

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.9), (II.8) et (II.16) nous donnent :

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

Avec : $l = 2R$

D'où :

$$\frac{dl}{dt} = g \frac{U}{d} \frac{\left(2 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)}{\left(1 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)\left(\frac{l}{d}\right)} \quad (\text{II. 17})$$

$$\text{Avec } g = \sqrt{\frac{8k}{\rho}}$$

A partir de l'équation (II.17) 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 .

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

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

➤ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{1}{gU} \left(\frac{l^2}{2} + d.l + 2d^2 + \ln \left(1 - \left(\frac{l}{2d} \right) \right) \right) \quad (\text{II. 18})$$

➤ Temps de retard au claquage :

Pour $l = d$ on aura :

$$t_c \approx 0,1137. \frac{d^2}{g.U} \quad (\text{II. 19})$$

L'étude de la fonction (II.19) 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.10), (II.8) et (II.16) nous donnent :

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

Avec : $l = R$

D'où :

$$\frac{dl}{dt} = g_p U \frac{1}{l \left(1 - \left(\frac{l}{d} \right) \right)} \quad (\text{II. 20})$$

$$\text{Avec : } g_p = \sqrt{\frac{2k}{\rho}}$$

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

Après séparation de variables et intégration de l'équation (II.21) on aura :

➤ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{1}{6 \cdot g_p \cdot d \cdot U} l^2 (3d - 2l) \quad (\text{II. 21})$$

➤ Temps de retard au claquage :

Pour $l = d$ on aura :

$$t_c = \frac{d^2}{6 \cdot g_p \cdot U} \quad (\text{II. 22})$$

❖ **Sphère centrée en O**

Les expressions (II.11), (II.8) et (II.16) nous donnent :

$$\text{Avec : } l + r_p = R$$

D'où :

$$\frac{dl}{dt} = g_0 U \frac{(d + r_p)}{(d - l)(l + r_p)} \quad (\text{II. 23})$$

$$\text{Avec : } g_0 = \sqrt{\frac{2k}{\rho}}$$

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

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

➤ Temps d'évolution d'arborescence :

$$t = \frac{1}{g_0 U (d + r_p)} \left(r_p d \cdot l + \frac{l^2}{2} (d - r_p) - \frac{1}{3} l^3 \right) \quad (\text{II. 24})$$

➤ Temps de retard au claquage :

Pour $d = l$ on aura :

$$t_c = \frac{d^2}{6g_0U} \left(\frac{d + 3r_p}{dr_p} \right) \quad (\text{II. 25})$$

$$\text{Si } r_p \ll d, t_c \approx \frac{d^2}{6g_0U}$$

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 [5]:

$$W = \int_{l_0}^l \pi r_b^2 P_e dl \quad (\text{II. 26})$$

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

$$E_c = \frac{1}{2} \rho (\pi r_b^2 l) \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 \quad (\text{II. 27})$$

Les équations (II.29) et (II.30) nous donnent :

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

Par différentiation, on obtient :

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

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

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 \quad (\text{II. 28})$$

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.8), (II.12) et (II.31), il vient :

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

D'où :

$$\frac{dl}{dt} = g_b \frac{U}{d} \left(\frac{U}{r_b} + \frac{1}{1 - \left(\frac{l}{d}\right)} \right) \quad (\text{II. 29})$$

$$\text{Avec : } g_b = \sqrt{\frac{2k}{\rho}}$$

• **Cas d'une tension continue : $U = \text{constant}$**

Après séparation de variables et intégration de (II.32) on aura :

➤ Temps d'évolution d'arborescence :

$$t = \frac{r_b l + r_b^2 \ln(d + r_b - l)}{g_b U} \quad (\text{II. 30})$$

➤ Temps de retard au claquage : pour $l = d$ on aura :

II.4.2.2. Approximation hyperboloïdale

Des équations (II.8), (II.13) et (II.31), on obtient :

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

D'où :

$$\frac{dl}{dt} = g_b \frac{U}{d} \frac{\frac{2d}{r_p}}{\ln\left(1 + 4 \frac{(d-l)}{r_p}\right)} \quad (\text{II. 31})$$

• **Cas d'une tension continue : $U = \text{constant}$**

Après intégration de (II.35) et séparation de variables on aura :

➤ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{r_p}{2g_p U} \left(l \left(\ln \left(\frac{r_p + 4(d-l)}{r_p} \right) - 1 \right) - \frac{r_p + 4d}{4} \ln \left(1 - \frac{dl}{r_p + 4d} \right) \right) \quad (\text{II.32})$$

➤ Temps de retard au claquage :

$$t_c = \frac{r_p}{2g_b U} \left((d - r_p)(\ln(5) - 1) - \frac{r_p + 4d}{4} \ln \left(\frac{5r_p}{r_p + 4d} \right) \right) \quad (\text{II.33})$$

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les modèles mathématiques de la cinétique d'évolution de l'arborescences, modèle de la pression électrostatique qui fait ressortir les différents paramètres qui sera étudié analytiquement et numériquement dans le prochaine chapitre

Chapitre III

Simulation et Discussion des Résultats

Dans ce chapitre nous simulons la propagation de l'arborescence dans le polyéthylène sous une tension alternative, 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 : l : longueur d'arborescence

t : durée d'application de la tension

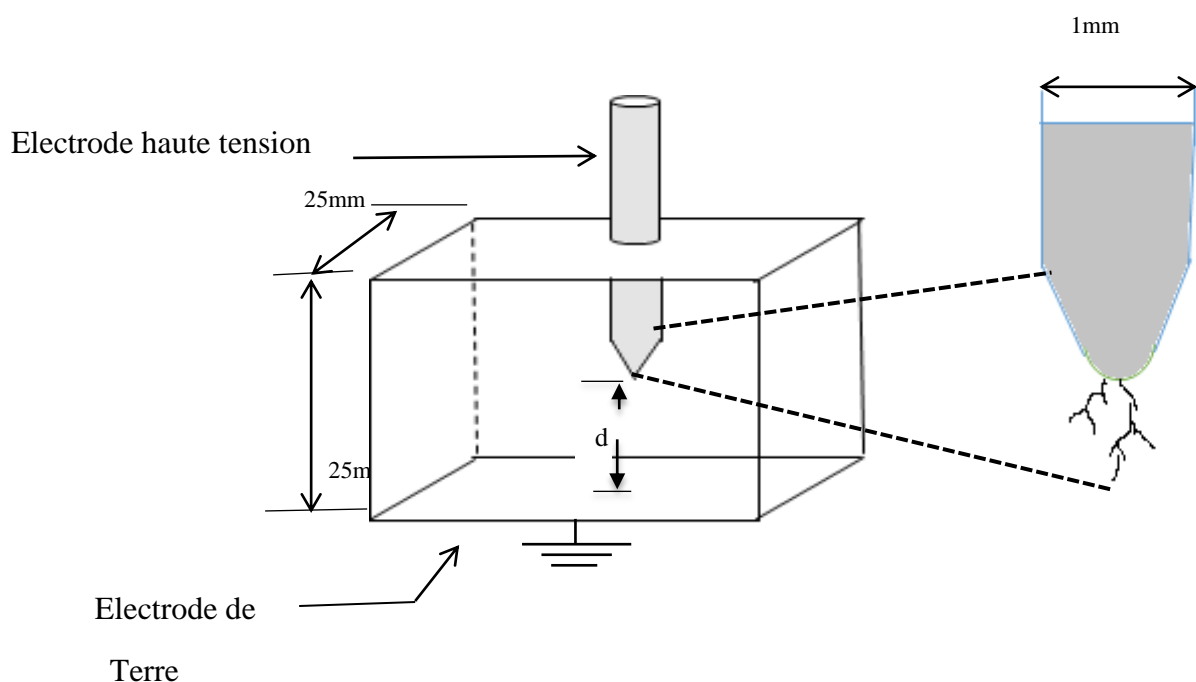


Fig. III. 1 : système d'électrode pour simuler la propagation d'arborescence [29]

Nous avons un système d'électrode asymétrique formé d'une électrode pointue de rayon $3 \mu\text{m}$ enfoncé dans un isolant solide (polyéthylène) et une électrode plane relié à la terre. La distance inter électrode est $d=4\text{mm}$. Le polyéthylène utilisé est de permittivité ϵ_r de valeur 2.3 et de masse volumique $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$

Pour l'étude de la propagation de l'arborescence (L'arborescence considérée est de type Buisson avec les trois cas indiqué dans le chapitre II) ; nous nous focalisons sur le calcul numérique de l'évolution de l'arborescence en utilisant les méthodes numériques (Euler

explicite à un pas, Adams-Bashforth à multi pas) sous Matlab-Simulink puis nous estimons la solution analytique pour intégrer les équations différentielles ordinaires.

Pour chaque modèle de la propagation d'arborescence décrits précédemment (chapitre II), est associé un code de calcul de la longueur d'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour différentes tensions appliquées sur l'électrode haute tension (5kv, 10kv, 15kv).

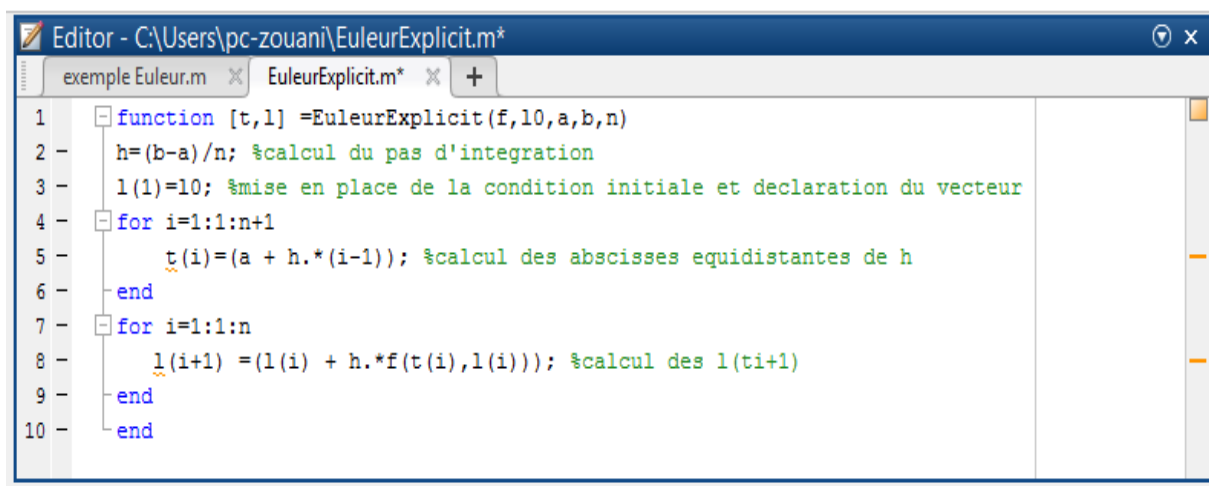
III. 1 Modèle de la sphère tangente à la pointe P

Ce modèle ne tient pas compte de la totalité des paramètres qui peuvent influencer sur la cinétique de l'arborescence tels que les contraintes thermiques, type d'électrode haute tension.... Parmi les méthodes de calcul utilisées pour la résolution des équations différentielles ordinaires nous citons :

III. 1.1 Méthode d'Euler explicite

C'est une méthode à un pas, dont le calcul de la valeur discrète y_{n+1} au noeud x_{n+1} fait intervenir la valeur y_n obtenue à l'abscisse précédente. Son algorithme est décrit par :

$$\begin{cases} y_0 \text{ donné} \\ y_{n+1} = y_n + hf(x_n, y_n) \end{cases}$$

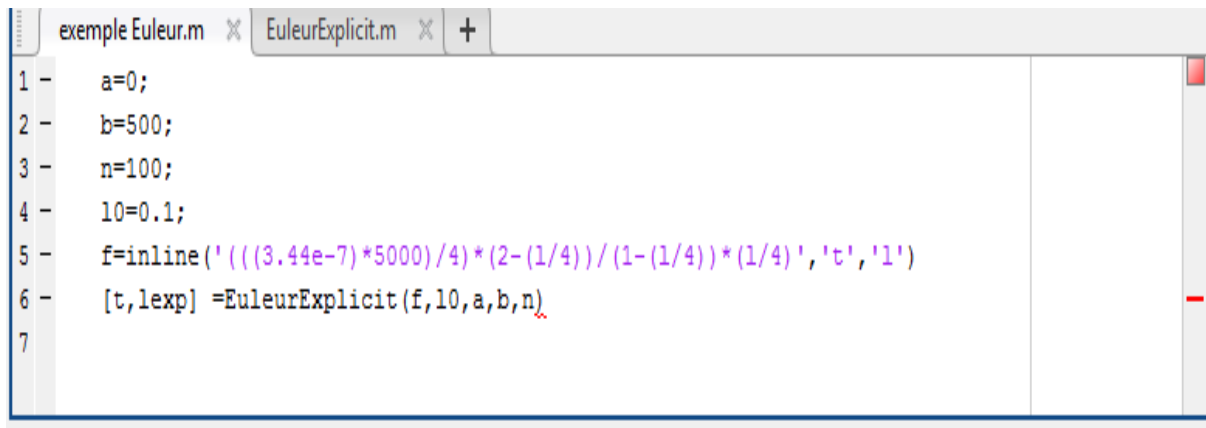


```

Editor - C:\Users\pc-zouani\EuleurExplicit.m*
exemple Euleur.m  x  EuleurExplicit.m*  x  +
1  function [t,l] =EuleurExplicit(f,lo,a,b,n)
2  h=(b-a)/n; %calcul du pas d'integration
3  l(1)=lo; %mise en place de la condition initiale et declaration du vecteur
4  for i=1:1:n+1
5      t(i)=(a + h.*(i-1)); %calcul des abscisses equidistantes de h
6  end
7  for i=1:1:n
8      l(i+1) =(l(i) + h.*f(t(i),l(i))); %calcul des l(ti+1)
9  end
10 end

```

Fig.III.2 :programme d'euler explicite



```

exemple Euleur.m x EuleurExplicit.m x +
1 - a=0;
2 - b=500;
3 - n=100;
4 - l0=0.1;
5 - f=inline('(((3.44e-7)*5000)/4)*(2-(1/4))/(1-(1/4))*(1/4)', 't', 'l')
6 - [t,lexp] =EuleurExplicit(f,l0,a,b,n)
7

```

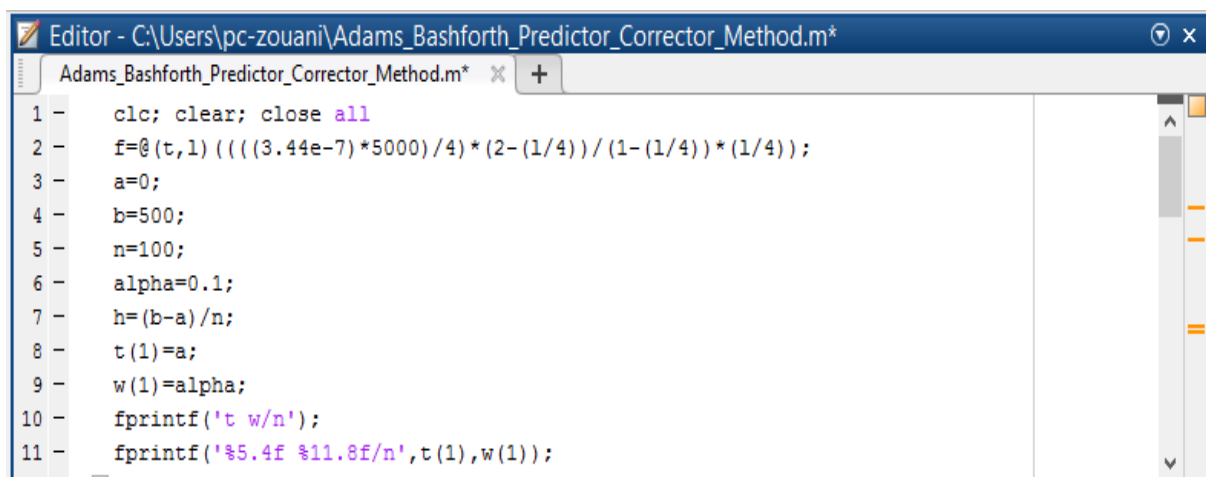
FigIII.3 :programme d'exemple d'euleur

III. 1.1 Méthode Adams-Bashforth

C'est une méthode à pas multiple dont le calcul de la valeur discrète y_{n+1} au noeud x_{n+1} fait intervenir plusieurs valeurs $y_n, y_{n-1}, y_{n-2}, \dots$ obtenues aux abscisses précédentes.

Méthode d'Adams-Bashforth à 4 pas, explicite, d'ordre 4 :

$$\begin{cases} y_0 \text{ donné} \\ y_1, y_2, y_3, \text{ calculé avec une méthode à un pas} \\ y_{n+1} = y_n + \frac{h}{24} (55f(x_n, y_n) - 59f(x_{n-1}, y_{n-1}) + 37f(x_{n-2}, y_{n-2}) - 9f(x_{n-3}, y_{n-3})) \end{cases}$$



```

Editor - C:\Users\pc-zouani\Adams_Bashforth_Predictor_Corrector_Method.m*
Adams_Bashforth_Predictor_Corrector_Method.m* x +
1 - clc; clear; close all
2 - f=@(t,l) (((3.44e-7)*5000)/4)*(2-(1/4))/(1-(1/4))*(1/4);
3 - a=0;
4 - b=500;
5 - n=100;
6 - alpha=0.1;
7 - h=(b-a)/n;
8 - t(1)=a;
9 - w(1)=alpha;
10 - fprintf('t w/n');
11 - fprintf('%5.4f %11.8f/n', t(1), w(1));

```

Fig.III.4 :programme d'adams-bashforth

III.1.2 Méthode Analytique

La résolution analytique de l'équation différentielle exprimant la longueur d'arborescence en fonction du temps

```

demo_ode45.m x +
1 - clear
2 - clc
3 - close all
4 - %analytique solution
5 - tspan=[0 500];
6 - y0=0.1;
7 - u=10e+3;
8 - d=4;
9 - [t,y]=ode45(@(t,y)0.169e-6*u*(1/(y*(1-(y/4)))),tspan,y0);
10 - plot(t,y)
11

```

Fig.III.5 :programme de la méthode Analitique

Nous nous intéressons dans la suite de l'étude à la variation de la tension appliquée de l'électrode haute tension de 5KV à 15KV d'un pas de 5KV et nous évaluons la longueur de l'arborescence en fonction du temps exprimé en minutes. Nous obtenons les différentes courbes de la longueur pour les trois méthodes :

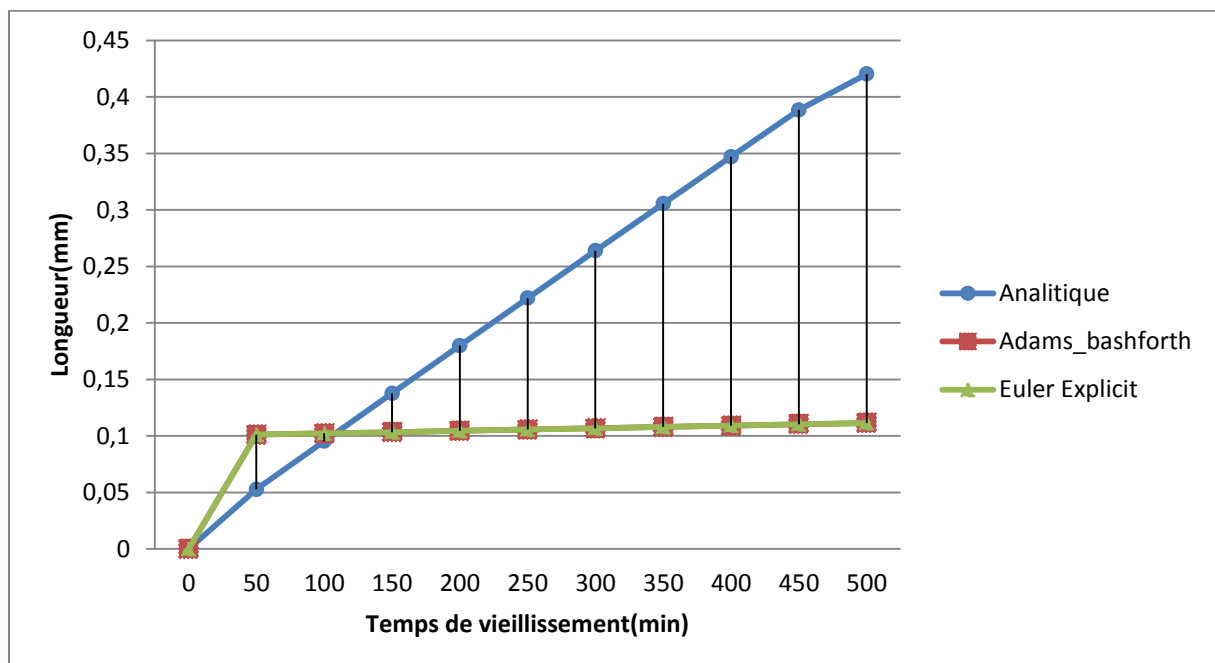


Fig. III.6 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 5 KV

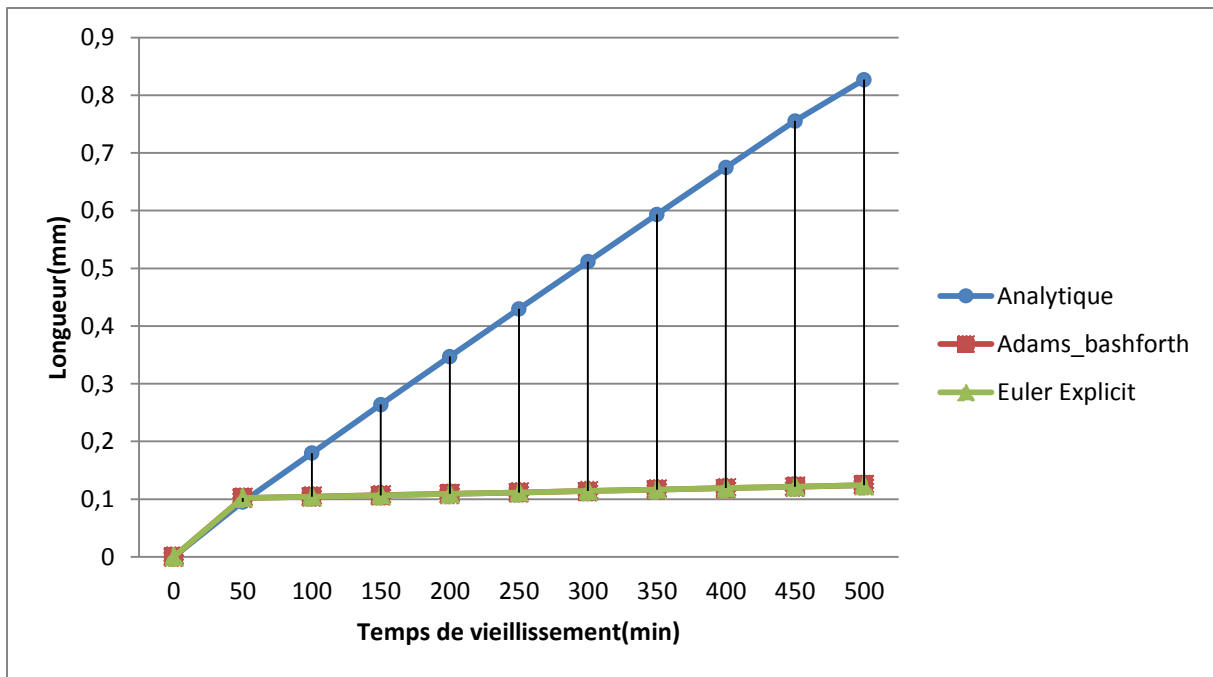


Fig. III.7 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 10 KV

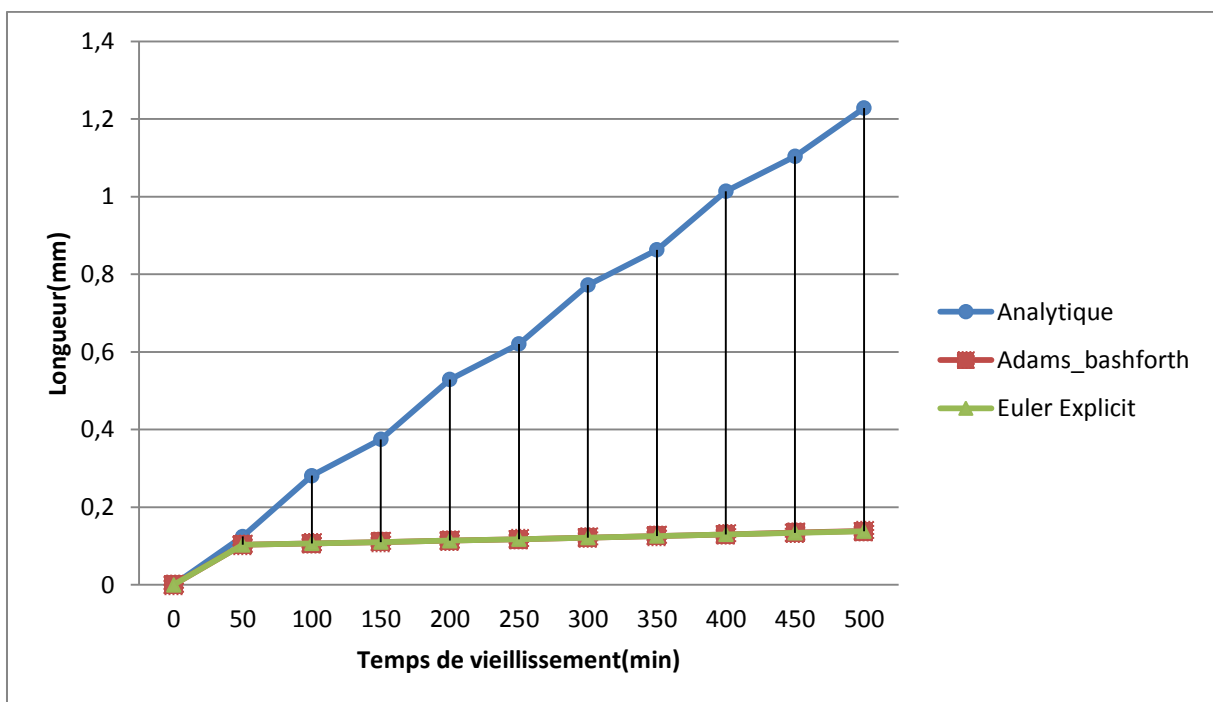


Fig. III.8 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 15 KV

Commentaire :

1. Le relevé de la longueur donnée par la solution analytique montre l'évolution progressive de l'arborescence en fonction du temps par rapport à celle donné par Euler explicite ou Adam-Bashforth.
2. On constate qu'au fur et à mesure d'augmenter la haute tension appliquée, la longueur simulé par la méthode analytique passe de 0.42 mm pour la tension de 5KV à 1.22 mm pour 15 KV (ce qui est en accord avec la théorie); par contre les deux autre méthodes (Euler & Adams-Bashforth) l'avancement est presque négligeable.
3. L'écart entre la solution analytique et celle numérique est grand.

III. 2 Modèle de la sphère centrée à la pointe P

Egalement pour ce modèle nous procédons de la même façon que le modèle de la sphère tangente à la pointe et les relevés des courbes exprimant l'évolution temporelles de l'arborescence sont les suivants :

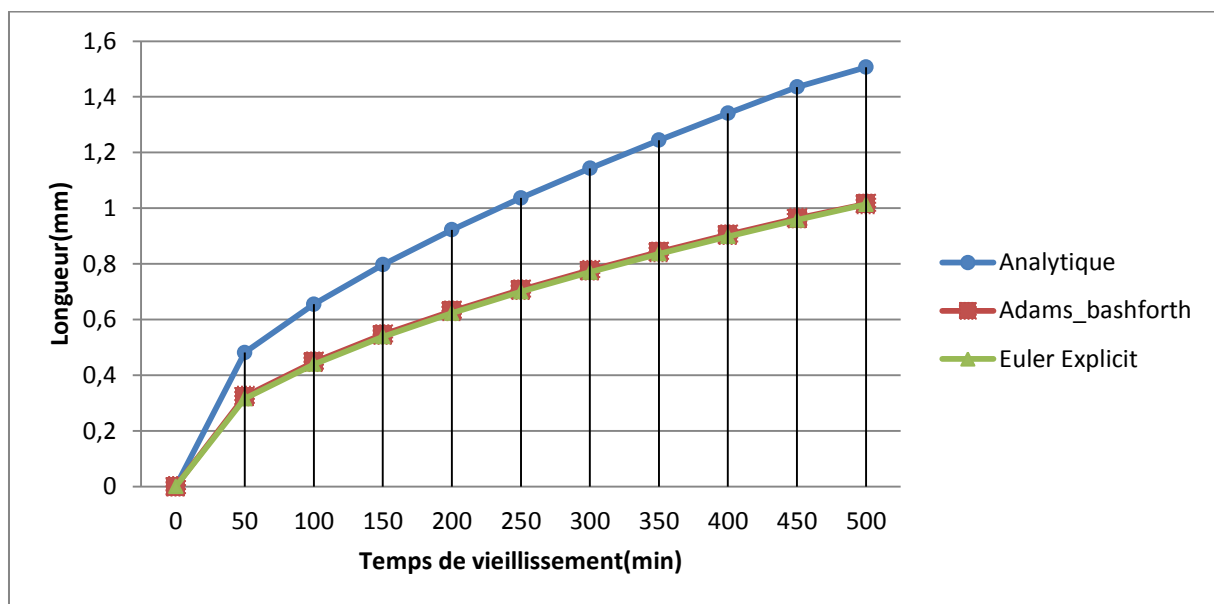


Fig. III.9 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 5 KV

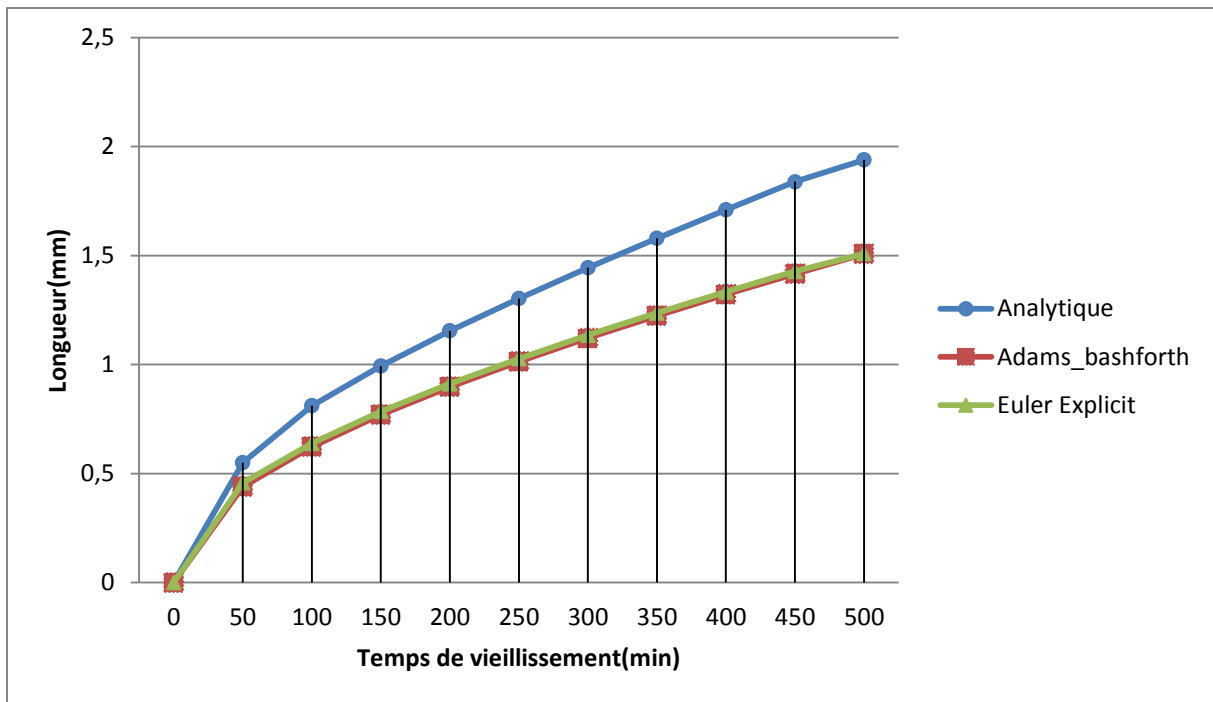


Fig. III.10 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 10 KV

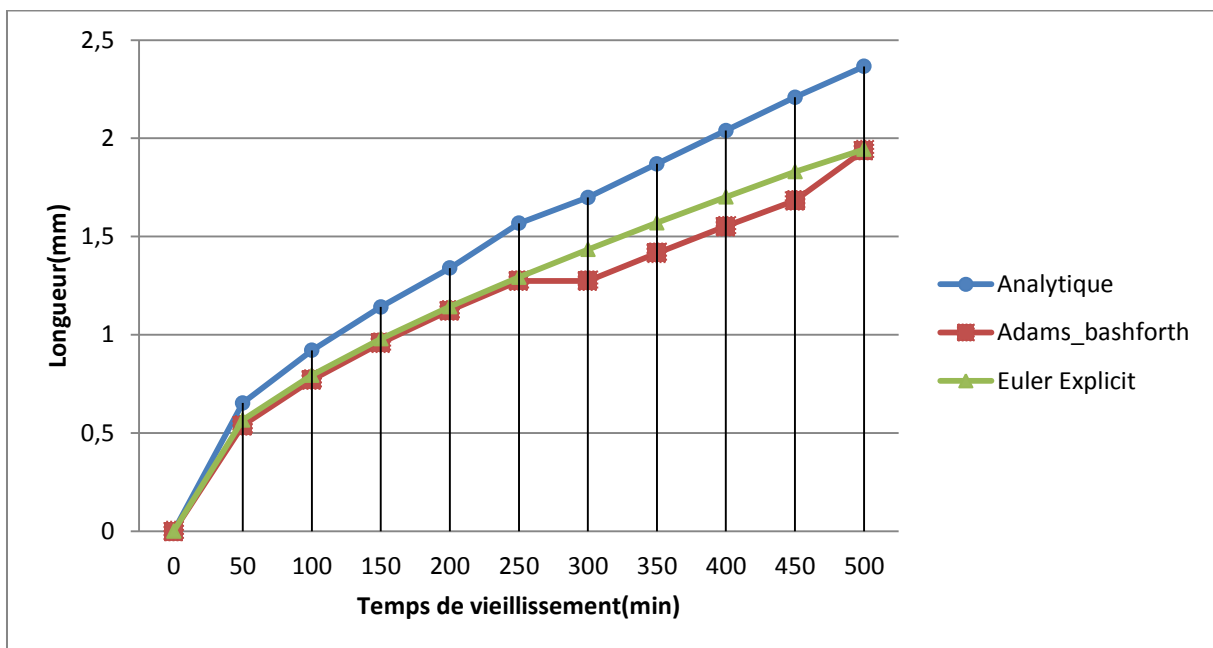


Fig. III.11 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 15 KV

Commentaire :

1. Les courbes de la longueur donnée par la solution analytique montrent l'évolution progressive de l'arborescence en fonction du temps par rapport à celle donnée par Euler explicite ou Adams-Bashforth.
2. Avec l'augmentation de la haute tension appliquée, la longueur simulée par la méthode analytique atteint 2.4 mm au bout de 500 min pour 15KV ; et les deux autres méthodes (Euler & Adams-Bashforth) l'avancement est amélioré par rapport au cas précédent.
3. L'écart entre la solution analytique et celle numérique est important.

III. 3 Modèle de la sphère centrée en O

Suite à la variation de la tension appliquée à l'électrode haute tension pour le modèle de la sphère centrée en O ; nous relevons les différentes courbes exprimant la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement :

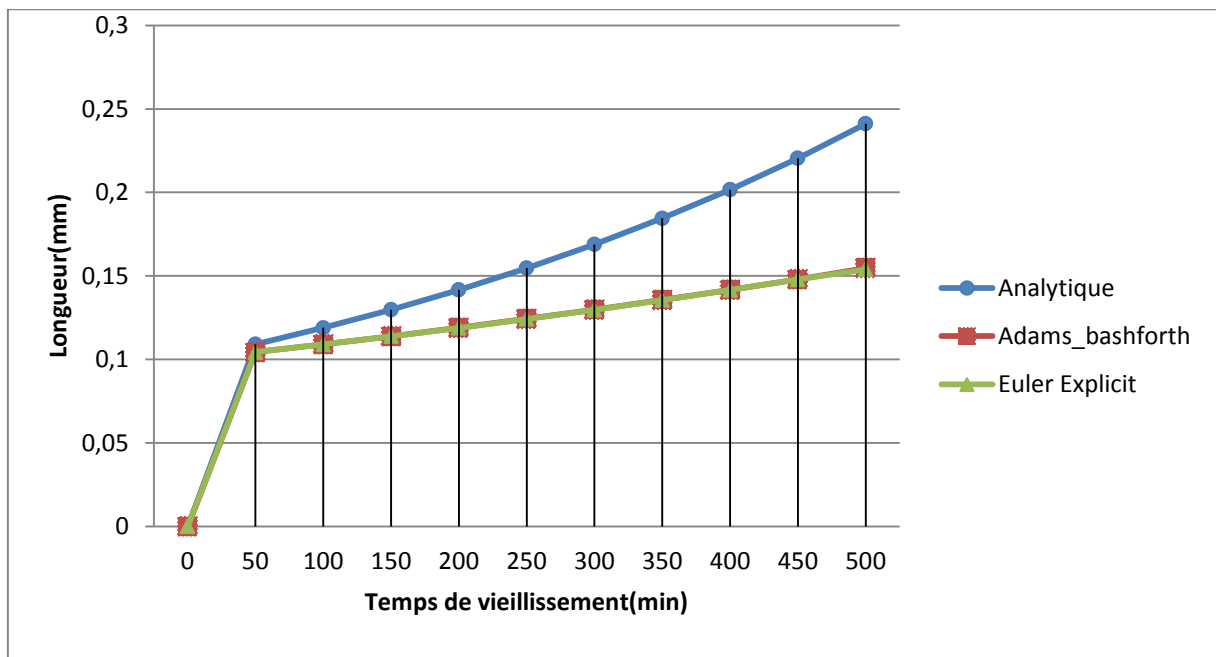


Fig. III.12 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 5 KV

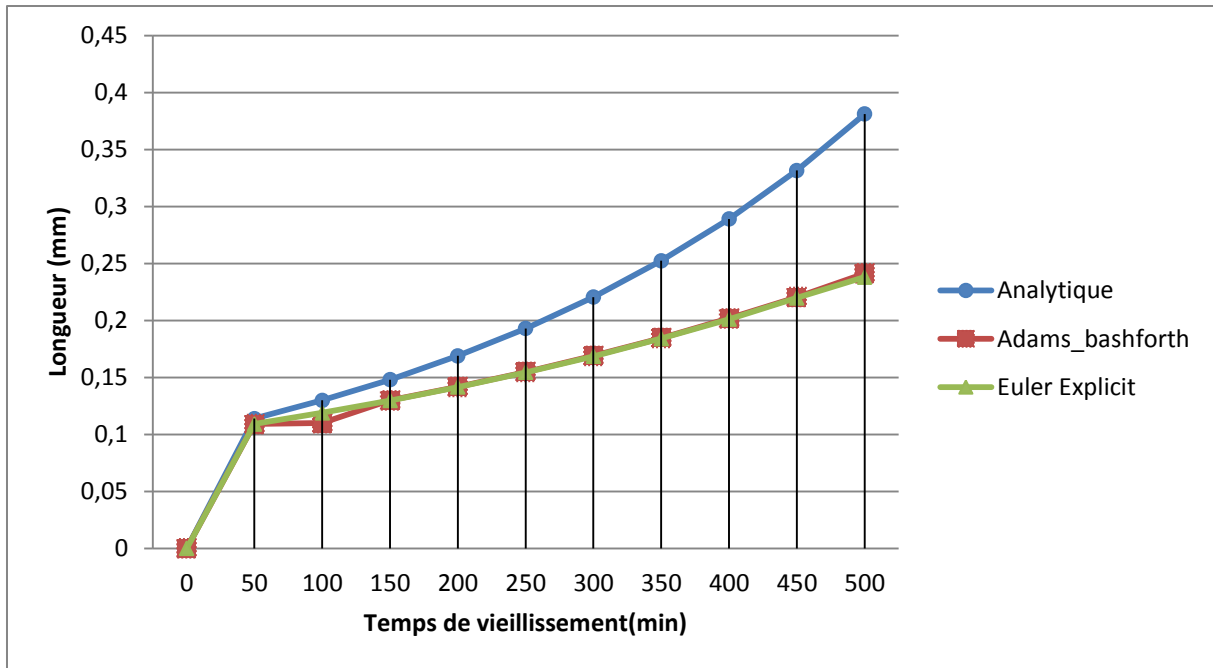


Fig. III.13 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 10 KV

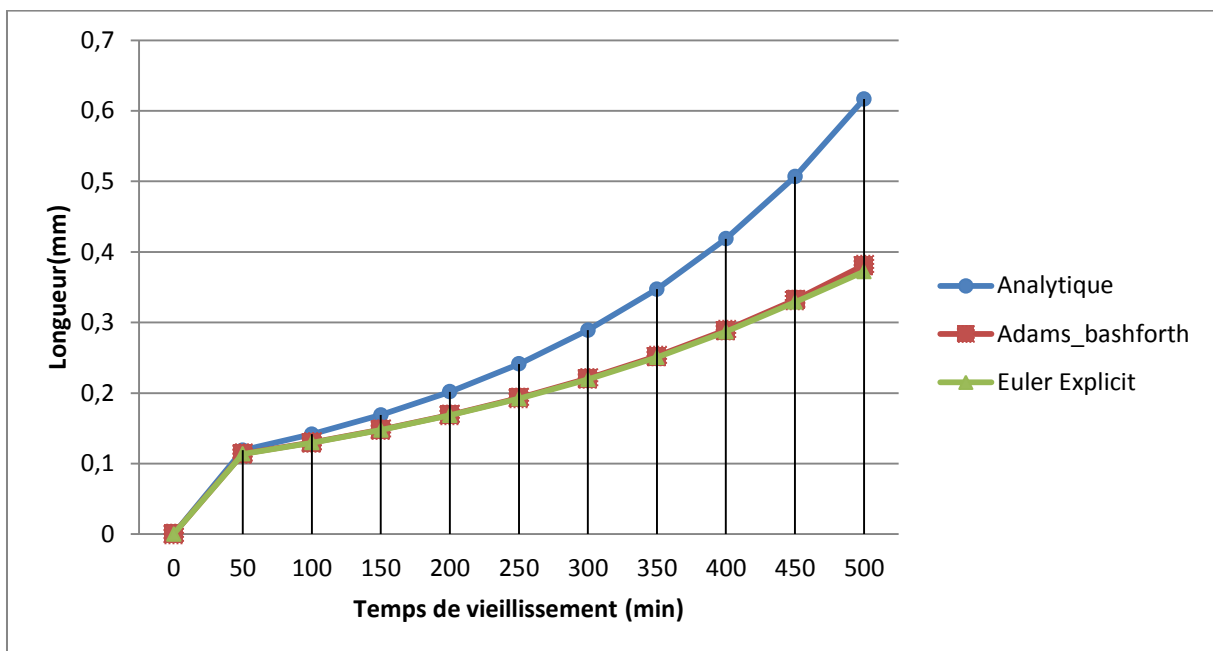


Fig. III.14 : variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour tension 15 KV

Commentaire :

1. Les courbes exprimant l'évolution de la longueur d'arborescence pour ce modèle sont en régression par rapport au cas précédent. La longueur donnée par la solution analytique montre l'évolution progressive de l'arborescence en fonction du temps par rapport à celle donnée par Euler explicite ou Adam-Bashforth.
2. L'écart entre la solution analytique et celle numérique est remarquable.

III.4 Etude paramétriques du modèle sphère tangente à pointe P :

Dans cette partie de notre étude, nous nous intéressons à l'influence de la haute tension appliquée et l'espace inter électrode sur la longueur de l'arborescence donnée par la solution analytique, tout en fixant le temps à 100 min.

III.4.1 L'effet de la variation de la tension appliquée

Dans cet essai, nous variions la tension appliquée de 5KV à 35KV et nous maintenons l'espace inter électrode égale à $d=4\text{mm}$

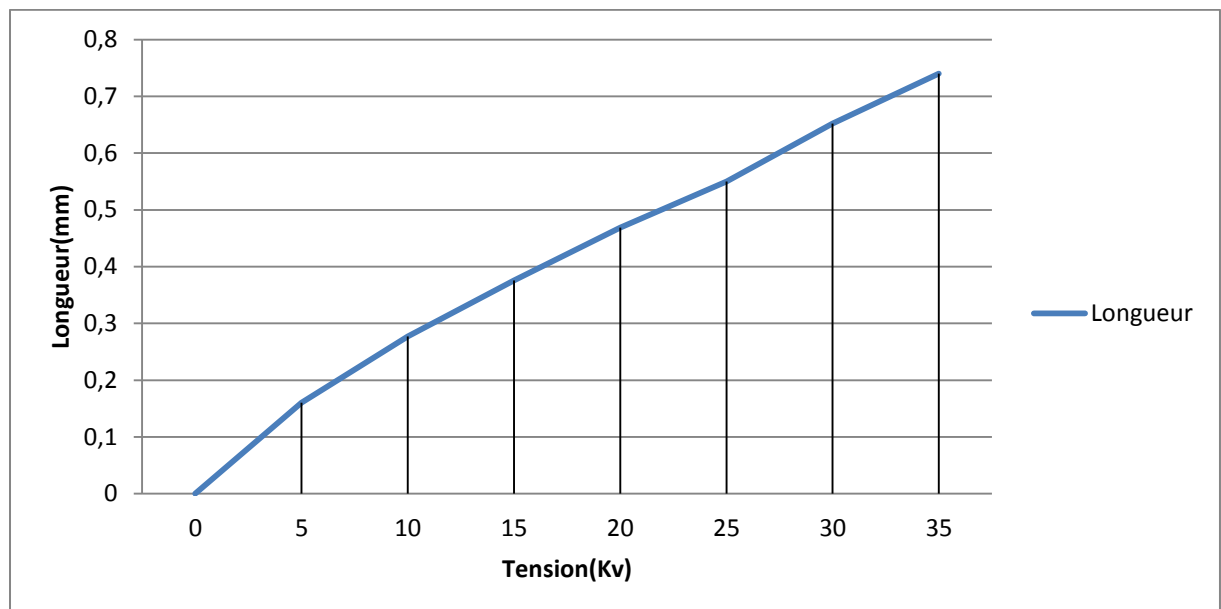


Fig. III.15 : Evolution de la longueur de l'arborescence en fonction de la tension appliquée

III.4.1 L'effet de la variation de l'espace inter électrode

Dans cet essai, nous varions la distance entre les électrodes de 2mm à 14mm et nous maintenons la tension appliquée $U=10KV$

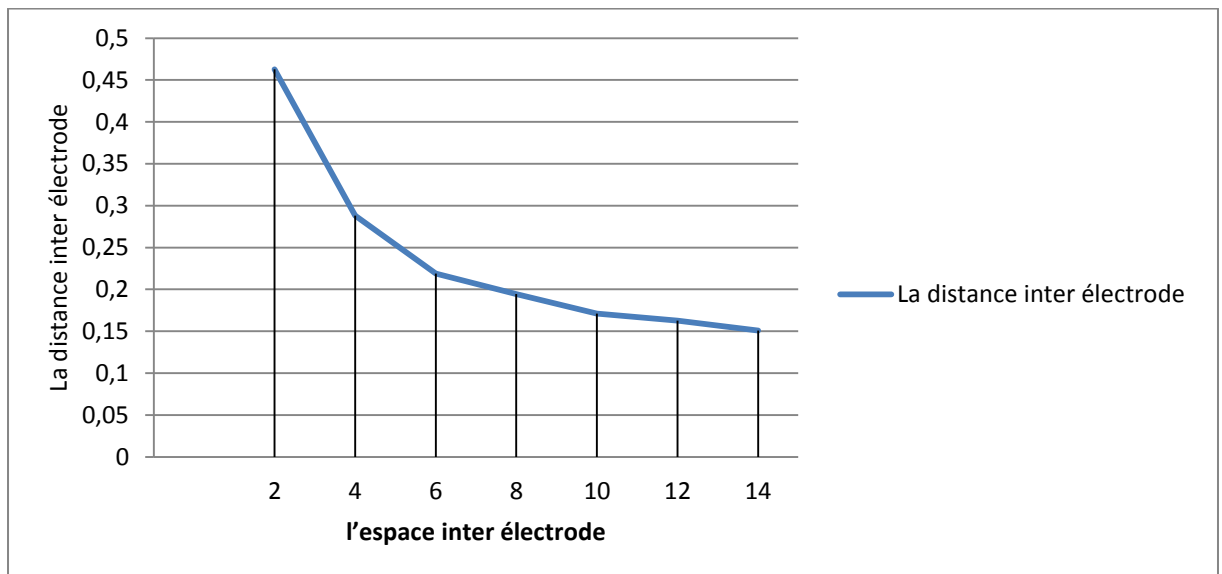


Fig. III.16 : Evolution de la longueur de l'arborescence en fonction l'espace inter électrode

Commentaire :

Les résultats de la simulation de l'étude paramétrique montrent la concordance entre la théorie et la solution analytique :

1. La courbe Fig. III.11 montre qu'au fur et à mesure d'augmenter la tension appliquée, la progression de l'arborescence est significative jusqu'au effondrement de la fonction d'isolation, ce qui est confirmé par l'expression théorique (voir chapitre précédent) exprimant la proportionnalité entre la longueur et la tension appliquée.
2. La courbe Fig. III.12 traduit la proportionnalité inversée entre la longueur de l'arborescence et l'espace inter électrode

III.5 Conclusion

Dans ce présent chapitre nous avons simulé l'arborescence de forme buisson en calculant numériquement et analytiquement la longueur en fonction du temps de vieillissement. Nous remarquons que la solution analytique traduit le mieux l'aspect théorique de la longueur par la progression significative jusqu'à la rupture de l'isolant. Nous concluons ce chapitre par une étude paramétrique (modèle de la sphère tangente à la pointe) ; ou on a vérifié l'effet de la tension appliquée et l'espace inter électrode sur l'évolution de l'arborescence et les résultats trouvés sont en parfait accord avec les expressions théoriques développées dans le chapitre II.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons étudié la dégradation des isolants utilisés dans les câbles de haute tension par le phénomène d'arborescences électriques. L'étude théorique a permis de conquérir et d'apporter des connaissances sur le phénomène d'arborescence, ces caractéristiques, ces mécanismes, les paramètres influents ce défaut, ainsi les remèdes d'y remédier. Après avoir fait le point sur les connaissances actuelles liées à la dégradation des polymères par le phénomène d'arborescence, nous avons présenté des modèles mathématiques décrivant la cinétique de propagation de l'arborescence, qu'elle soit de forme buisson, buisson-branche ou branche en l'assimilant à des formes géométriques simples (sphérique et filamentaire)

La complexité du problème, liée au grand nombre de paramètres mis en jeu, nous a conduits à cerner différentes méthodes existantes dans la littérature qui servent à modéliser ce phénomène, et 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. Par le biais de ces modèles, nous sommes arrivés à mettre en évidence la corrélation entre la cinétique de la propagation de l'arborescence et le temps de vieillissement. Pour faire ressortir l'intérêt de ces modèles, nous avons effectué une analyse numérique d'Euler et Adams Bashforth sous Matlab dans le cas des arborescences de type buisson, développées sous un champ électrique alternatif. Nous avons déterminé, à cet effet, les courbes représentant l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le polyéthylène à basse densité. Les résultats obtenus montrent que les méthodes numériques proposées ne traduisent pas l'évolution temporelle de l'arborescence par contre la solution analytique exprime une évolution significative de la longueur de l'arborescence dans l'intervalle du temps choisi.

Egalement on a pu établir une autre étude paramétrique de la solution analytique en relevant les caractéristiques d'évolution en variant la distance inter électrode et la tension appliquée. Les résultats de simulation obtenus montre la dépendance de ces de facteurs sur l'évolution de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement.

Enfin nous espérons que notre travail aura une continuité par nos successeurs ; en complétant le travail par la prise en considération de la densité de charge, les contraintes thermiques, types d'électrodes haute tension, la nature d'isolant,....

Bibliographie

- [1] Ben saidj Idir, «Simulation de la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène». Mémoire de Magister en Electrotechnique, 30 Octobre 2017, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [2] Kerroui Zahia, «Contribution à l'étude de l'effet des décharges électriques sur la surface d'un solide isolant sous tension alternative 50Hz». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2008 Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
- [3] M.A. Handala, «Contribution à l'étude de la propagation des arborescences Electriques dans l'EPDM», mémoire de Magister, ENP d'Alger, 1982.
- [4] 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
- [5] N.ROUHA, A.BEROUAL, C.BROSSEAU, «Modeling the treeing growth in solid electrical insulation.». IEE.conf.elec.insul.dielec.phen, October 20-23, 1996, 750-753.
- [6] R. J. Densley, « An investigation into the growth of electrical trees in XPLE cable insulation », IEEE, Transactions on Electrical Insulations, Vol.EI-14, pp.148-158, 1979.
- [7] F. Lounes ; « Contribution à l'étude du vieillissement électrique d'interfaces isolantes air – solides »; mémoire de fin d'études UMMTO, 2007.
- [8] N.Rouha, « Etude et modélisation de la dégradation des polymères par le Phénomène d'arborescence », thèse de magistère, juillet 94 E.N.P. Alger.
- [9] O. K. Spurr, R. M. Eichhorn, «Treeing in PE insulation power cables », Bound Brook, N.J, Technical Center, 1975
- [10] G. Bahder, C. Katz, J. Lawson, W. Wahlstrom « Electrical and electrochemical treeing effect in polyethylene and cross-linked polyethylene cables », IEEE Trans.PAS-93, pp. 977-987, 1974.

- [11] Abella Salem, «Vieillissement électrique du polyester – imide sous tension continue », Mémoire Ingénieur d'état en Electrotechnique ,Université MMTO
- [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] C. Laurent, « Etude de la propagation des arborescences dans le polyéthylène par voies optique et électrique », Thèse de docteur Ingénieur, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1979.
- [15] F. Noto, N. Yoshimura, « Voltage and frequency dependence of tree growth in Polyethylene », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.207-217, 1997.
- [16] M. Stoica, F. Tanasesco, G. Giurgiu, A. Ifrim « Le phénomène d'arborescence dans les matériaux diélectriques synthétiques destinés à l'isolation des câbles de force», Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15-11, 30 Août-7 Septembre 1978.
- [17] M. Djerroud Yacine, «Modélisation de l'arborescence et des grandeurs électriques associés à la dégradation de matériaux diélectrique solide», mémoire de fin d'études, 2013/2014
- [18] S; Bamji, A.Bulenski, J.Denesly, A.Garton, « etching and the morphology of cross linked polyethylene cable insulation » IEEE. Trans on elect. insul. vol EI 19 No 1. Feb 1983.

- [19] R.Patcsch, «Breakdown of polymer: tree initiation and growth», CEIDP, 1975.
- [20] C.J.Mayou, «partial discharge phenomena and the effect of their constituents on polyethylene », IEEE.conf.elect.insul.dielct.phen, December 1976.
- [21] J. Perret, Y. Legall, P. Recoupé, « Contribution à l'étude des mécanismes de formation et de propagation des arborescences dans le polyéthylène pour câbles à haute tension », RGE,Tome 85, N°9, pp.737-747, 1976.
- [22] B.Yoda, M. Sakaba, «Treeing degradation of high voltage polyethylene insulated cable », Hitachi Review, Vol.18, pp. 406-412, 1969.
- [23] J.P. Crine, S. Haridoss, P. Hinrichsen, H. Houdayer, G. Kajrys « Impurities in electrical trees grown in field aged cables », IEEE, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 94-100, 1998.
- [24] G. Baher, T. W. Dakin, J. H. Lawson, « Analyse du claquage par arborescence », Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.05.1974.
- [25] H .Z. Ding, B. R. Varlow, « A new model for propagation of electrical tree structures in polymeric insulation », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.934-937, 2002.
- [26] H. Z. Ding, X. S. Xing, H. S. Zhu « A kinetic model of time-dependent dielectric breakdown for polymers », J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 27, pp. 591-595, 1994.
- [27] A. Beroual, « Champ électrique dans un diélectrique liquide en présence de suspensions pour différentes formes de tension », ENP, Alger, Algérie, 1984.
- [28] J. C. Dubois, «Diélectriques plastiques», Technique de l'Ingénieur, publication E1850, 1980.
- [29] Ibrahim Idrissu and All , « DC Electrical tree growth in Epoxy Resin and the influence of the size of inception AC trees »,IEEE ;Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 18,No. 3; june 2017

Résumé

Notre travail a porté sur la simulation de la propagation des arborescences électriques trouvé dans l'isolant solide des câbles électriques à haute tension, sous champ électrique alternatif 50 Hz.

Notre intérêt s'est porté sur les modèles issus de l'hypothèse de la pression électrostatique et pour une densité de charge nulle.

Ces modèles décrivent la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement et différents facteurs intervenants dans ce processus de dégradation, et cela en assimilant l'arborescence à des formes géométriques simples : sphère pour les arborescences de type buisson

Abstract:

Our work focused on the simulation of the propagation of electrical trees found in the solid insulation of high voltage electrical cables, under a 50 Hz alternating electric field.

Our interest focused on models based on the assumption of electrostatic pressure and for zero charge density.

These models describe the variation in the length of the tree as a function of aging time and various factors involved in this degradation process and this by assimilating the tree to simple geometric shapes: sphere for bush type trees