

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMARI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique

Mémoire de Magister en Electrotechnique

Option : Entraînements Electriques

Présenté par :

BEN SAIDJ Idir

Thème

**Simulation de la propagation des arborescences électriques
dans le polyéthylène**

Devant le jury composé de :

Mr. CHAIBI Rachid, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Président.
Mr. NEDJAR Mohammed, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Rapporteur.
Mr. MEGHERBI Mohammed, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Examineur.
Mr. MOUDOUD Mustapha, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examineur.
Mr. BOUTORA Yousef, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examineur.

Soutenu le : 30 Octobre 2017

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique

Mémoire de Magister en Electrotechnique

Option : Entraînements Electriques

Présenté par :

BEN SAIDJ Idir

Thème

**Simulation de la propagation des arborescences électriques
dans le polyéthylène**

Devant le jury composé de :

Mr. CHAIBI Rachid, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Président.
Mr. NEDJAR Mohammed, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Rapporteur.
Mr. MEGHERBI Mohammed, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Examineur.
Mr. MOUDOUD Mustapha, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examineur.
Mr. BOUTORA Yousef, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examineur.

Soutenu le : 30 Octobre 2017

Remerciements

Mes remerciements s'adresse en premier lieu à Mr. NEDJAR Mohammed, Professeur à l'UMMTO, pour avoir encadré ce travail, son investissement et sa disponibilité m'ont permis d'évoluer dans les meilleures conditions.

Il m'est agréable que Mr. CHAIBI Rachid, Professeur à l'UMMTO, soit le président de jury de mon travail.

J'exprime mes plus vifs remerciements à Mr. MEGHERBI Mohammed, Professeur à l'UMMTO, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner mon travail.

Je désire aussi remercier Mr. BOUTORA Yousef, Maître de Conférences A à l'UMMTO pour avoir accepté de juger ce travail.

Toute ma reconnaissance va à Mr. MOUDOUD Mustapha, Maître de Conférences A à l'UMMTO, je lui exprime mes sincères remerciements pour avoir accepté de juger ce travail en tant que membre de jury d'examen.

J'exprime également mes sincères remerciements au personnel de la bibliothèque de la faculté de génie électrique et de l'informatique de l'UMMTO pour leur serviabilité.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille : Mes parents, mes frères, mes sœurs et tous mes amis, qui m'ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre I- présentation du polyéthylène	
I. Généralités.....	3
1. Formulation chimique.....	3
2. Elaboration du polyéthylène	3
2.1. Polymérisation.....	3
II. Types de polyéthylène	4
1. Polyéthylène à basse densité (PEBD).....	4
2. Polyéthylène à haute densité (PEHD).....	4
3. Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC).....	4
3.1. Principe de réticulation.....	4
3.2. Réticulation chimique du polyéthylène.....	5
III. Propriétés du polyéthylène	6
1. Propriétés du PEBD	6
a. Propriétés chimiques	6
b. Propriétés mécaniques.....	6
c. Propriétés électriques.....	6
2. Propriétés du PEHD	6
a. Propriétés chimiques	6
b. Propriétés mécaniques.....	7
c. Propriétés électriques.....	7
3. Propriétés du PRC.....	7
IV. Applications	7
V. Conclusion	8
Chapitre II- Arborescences électriques	
I. Définition et origines des arborescences.....	9
II. Arborescences électriques.....	11
1. Définition	11
2. Structures et formes d'arborescences	11
3. Les phases d'évolution des arborescences électriques.....	13
1. Phase d'initiation.....	13
2. Phase de propagation.....	13
3. Phase d'avalanche	14
III. Théories expliquant la phase d'incubation	14
1. Formation de l'arborescence par décharges partielles	14
2. Action des porteurs chauds sur la structure du polymère	15
IV. Mécanismes de propagation des arborescences électriques	16
a. Mécanismes électriques	16

b. Mécanismes thermiques.....	17
V. Facteurs influant sur la propagation des arborescences électriques	19
VI. Méthodes permettant d'éviter la formation d'arborescence.....	19
VII. Conclusion	20
Chapitre III- Modèles mathématiques de la propagation des arborescences électriques	
I. Modèle de propagation fractale de l'arborescence électrique.....	21
1. Définition	21
2. Mécanisme physique de la formation et de l'évolution de l'arborescence électrique submicroscopique	22
3. Taux de croissance de l'arborescence électrique.....	22
4. Durée de vie.....	23
II. Méthode de simulation de la propagation des arborescences électrique en utilisant les automates cellulaires.....	23
2. Automates cellulaires.....	23
3. Algorithme de simulation de la propagation de l'arborescence électrique en utilisant les automates cellulaires.....	24
III. Modèle numérique de la propagation des arborescences électriques	27
1. Définition	27
2. Approche physique pour la propagation de l'arborescence électrique	27
3. Modes de la propagation des arborescences électriques.....	28
IV. Modélisation analytique de la propagation des arborescences électriques	30
1. Pression électrostatique.....	30
2. Expression du champ électrique	30
2.1. Arborescence en forme de buisson.....	31
2.1.1. Sphère tangente à la pointe.....	32
2.1.2. Sphère centrée sur la pointe P	33
2.1.3. Sphère centrée en O.....	33
2.2. Arborescence en forme de branches.....	33
2.2.1. Approximation sphérique	35
2.2.2. Approximation hyperboloïdale.....	35
3. Bilan énergétique	35
3.1. Arborescence en buisson.....	35
3.1.1. Arborescence assimilée à une sphère tangente à la pointe (p)	36
3.1.2. Arborescence assimilée à une sphère centrée sur la pointe.....	38
3.2. Arborescence en branches.....	40

3.2.1. Approximation sphérique	41
3.2.2. Approximation hyperboloïdale.....	42
V. Conclusion	42
Chapitre IV- Résultats de simulation et discussion	
I. Système d'électrodes.....	43
II. Présentation de la méthode de simulation.....	43
1. Modèle de la sphère tangente à la pointe P.....	44
2. Modèle de la sphère centrée sur la pointe P.....	46
3. Modèle de la sphère centrée en O	47
III. Résultats de simulation.....	48
1. Niveau de tension de 12 kV	48
1.1. Modèle de la sphère tangente	48
1.2. Modèle de la sphère centrée en P	48
1.3. Modèle de la sphère centrée en O	49
2. Niveau de tension de 14 kV	50
2.1. Modèle de la sphère tangente	50
2.2. Modèle de la sphère centrée en P	50
2.3. Modèle de la sphère centrée en O	51
3. Niveau de tension de 16 kV	52
3.1. Modèle de la sphère tangente	52
3.2. Modèle de la sphère centrée en P	52
3.3. Modèle de la sphère centrée en O	53
IV. Erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et la longueur mesurée	54
1. Niveau de tension de 12 kV	54
2. Niveau de tension de 14 kV	54
3. Niveau de tension de 16 kV	55
V. Essais d'interprétation et discussion.....	56
VI. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58
Bibliographie.....	60

Introduction

Vu leurs excellentes propriétés diélectriques, 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.

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.

Afin de mieux comprendre le phénomène d'arborescences, leurs évolutions et leurs origines, de nombreuses études leur ont été réalisées. Selon l'endroit où elles prennent naissance dans l'isolant, on distingue deux types : les arborescences ouvertes et les arborescences en nœud-papillon. Et selon l'environnement d'exploitation, les arborescences peuvent être électrochimiques ou électriques, ces dernières sont l'objet de notre travail.

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.

Le but de notre travail est de simuler la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène utilisé comme isolant dans les câbles de haute tension. Ce mémoire est divisé en deux parties : une première partie concernant une recherche bibliographique composée de trois chapitres et une deuxième comprenant un seul chapitre.

Le premier chapitre est consacré à la présentation du polyéthylène : formulation chimique, polymérisation, types de polyéthylène, propriétés chimiques, électriques et mécaniques ainsi que les domaines de son application.

Le deuxième 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 sont aussi décrits.

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

Dans le quatrième chapitre sont rassemblés les résultats de la simulation des modèles choisis concernant le polyéthylène qui seront confrontés à ceux de la littérature. Ceci a conduit aux courbes de la cinétique de la propagation des arborescences électriques sous champ alternatif. Une interprétation et une discussion des résultats obtenus ont été données.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I

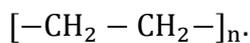
Présentation du polyéthylène

Le polyéthylène est devenu l'un des matériaux de choix dans l'isolation de câbles de haute tension (HT) à cause de ses performances diélectriques, thermiques, physico-chimiques et mécaniques. Dans ce chapitre, nous présentons sa formulation chimique, son élaboration, ses différents types ainsi que ses propriétés chimiques, électriques, et mécaniques et les domaines de son application.

I. Généralités

1. Formulation chimique

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique de la famille polyoléfines contenant uniquement des carbones hybridés de types sp^3 . Sa molécule se présente sous forme de chaînes contenant 1000 à 2000 monomères. La formule chimique du polyéthylène est :



Partiellement cristallin, le polyéthylène contient deux phases [1] :

- une zone amorphe dans laquelle les chaînes sont disposées de manière désordonnée.
- une zone cristalline dans laquelle les chaînes sont disposées de manière ordonnée formant ainsi des cristallites.

2. Elaboration du polyéthylène

Le polyéthylène est obtenu par la polymérisation des monomères d'éthylène, sa formule chimique est : $(CH_2 = CH_2)$.

2.1. Polymérisation

La polymérisation est un processus qui consiste à additionner bout à bout un grand nombre de molécules pour former une chaîne macromoléculaire de grande longueur. Lorsque les macromolécules sont formées à partir d'un seul type de monomère, elles sont appelées homopolymère. Quand la polymérisation s'effectue en présence de mélange de différents monomères, on réalise une copolymérisation qui conduit à des copolymères. La polymérisation se produit sous l'effet d'une température et d'une pression élevée ainsi que sous l'influence d'un catalyseur éventuel. Le processus peut être décrit comme suit :



où M représente la molécule du monomère, M_n celle du polymère (macromolécule) et n le degré de polymérisation ou bien le nombre de motifs monomères de la macromolécule.

Le polyéthylène est formé comme suit [2] :



II. Types de polyéthylène

Selon les conditions de polymérisation (pression, température, catalyseurs,...), on distingue deux grandes variétés de polyéthylène : le polyéthylène à basse densité (PEBD) et le polyéthylène à haute densité (PEHD). Ajouté à ces deux types, on peut obtenir par réticulation le polyéthylène réticulé chimiquement dit PRC.

1. Polyéthylène à basse densité (PEBD)

Le polyéthylène à basse densité a été découvert en 1933 par Fawcett et Gibson. Ce matériau est constitué de chaînes macromoléculaires comprenant des ramifications latérales de longueurs variables [3].

Le polyéthylène basse densité (PEBD) est obtenu par polymérisation sous des pressions de 1000 à 3000 bars et à une température comprise entre 130 et 400 °C. Sa densité est de 0,92 g/cm³ et son taux de cristallinité de 70%. Sa température de fusion varie de 105 à 110 °C [4].

2. Polyéthylène à haute densité (PEHD)

Le polyéthylène à haute densité dit à « basse pression » est obtenu par la polymérisation sous des pressions inférieures à 50 bars et à une température voisine de 100 °C. Sa densité est de 0,96 g/cm³ et son taux de cristallinité de 93%, sa température de fusion se situe entre 130 et 145°C [4].

3. Polyéthylène réticulé chimiquement (PRC)

3.1. Principe de réticulation

La réticulation est la modification de la structure moléculaire du polymère. Elle consiste à lier les chaînes de molécules par des liaisons radiales (pontages) et à les transformer en un réseau tridimensionnel qui permet d'éviter le glissement de toutes les chaînes moléculaires les unes par rapport aux autres [5]. La réticulation peut être schématisée comme suit [6] :

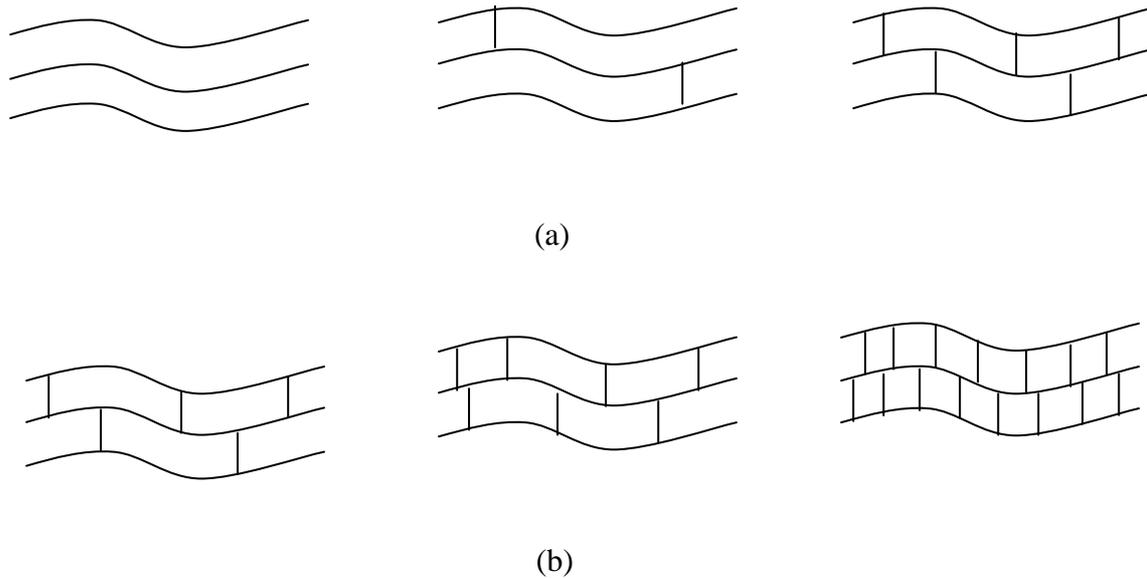
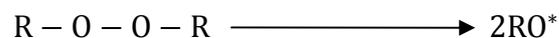


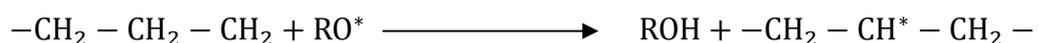
Figure I.1 : Processus de réticulation : (a) polymère linéaire (b) polymère tridimensionnel

3.2. Réticulation chimique du polyéthylène

A partir du polyéthylène, on peut obtenir par réticulation chimique du polyéthylène réticulé chimiquement (PRC). Le procédé consiste à incorporer du peroxyde de dicumyle à une teneur de 2% dans le polyéthylène, avant ou pendant l'extrusion, puis à soumettre le mélange à une température supérieure à 150°C, sous une vapeur d'eau ou d'azote. Le polyéthylène réticulé chimiquement est un élastomère. Les peroxydes organiques sont des composés dont la formule générale est R-O-O-R où R est un radical quelconque aromatique ou aliphatique. Le principe de la réticulation est le suivant [4] : à haute température, ces produits se décomposent pour donner des radicaux libres très actifs selon la réaction :



Ces derniers se combinent avec les hydrogènes de chaînes du polymère pour former des sites réactifs et un alcool :



Le taux de réticulation est caractérisé par le nombre de pontages : il est évalué par des méthodes chimiques ou des essais mécaniques. Pour réticuler un câble en polyéthylène, il faut [4] :

-choisir une température supérieure à 150°C pour décomposer le peroxyde et le rendre actif ;

-opérer sous pression pour empêcher des produits volatils formés lors de la décomposition du peroxyde de s'échapper du polymère en formant des vacuoles ou des défauts de surface.

III. Propriétés du polyéthylène

1. Propriétés du PEBD

a. Propriétés chimiques

En général, le PEBD présente une bonne résistance chimique, il est [7] :

- Très résistant aux acides faibles.
- Résistant aux acides forts non oxydants.
- Très résistant aux bases faibles et fortes.

b. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PEBD dépendent essentiellement de sa masse molaire et de sa cristallinité. Nous pouvons citer entre autre [7] :

- La résistance à la traction variant de 9 à 23MPa.
- L'allongement à la rupture variant de 150% à 1000%.
- Le module d'élasticité en traction variant de 200 à 500M Pa.

c. Propriétés électriques

Le PEBD est une substance non polaire, caractérisée par une permittivité relative faible (≈ 2 à 3) limitant ainsi le courant de déplacement, un facteur de pertes diélectriques relativement faible, et une rigidité diélectrique élevée [7].

2. Propriétés du PEHD

a. Propriétés chimiques

Le PEHD présente une bonne résistance chimique, il est :

- Résistant aux acides,
- Résistant à l'huile végétale et animale,
- Résistant à l'huile minérale,
- Très résistant à l'eau.

b. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du PEHD sont [8] :

- Bonne résistance à la traction qui se situe entre 18 à 35 MPa.
- Module de Young de 700 à 1400 MPa.
- Bonne tenue à la rupture.
- Bonne résistance aux chocs, aux flexions et aux cisaillements.

c. Propriétés électriques

Le polyéthylène haute densité présente d'excellentes propriétés électriques quelque soient sa masse molaire et sa cristallinité [8].

- Très bonne rigidité électrique : 150kV/mm.
- Résistivité transversale de 10^{15} à 10^{18} $\Omega \cdot \text{cm}$.
- Permittivité relative de 2,3 – 2,5.

3. Propriétés du PRC

La réticulation du polyéthylène lui offre un comportement élastique dont ses propriétés mécaniques sont améliorées.

Les propriétés thermiques et électriques ne sont pas très différentes de celles du PEBD. Il semblerait même qu'un PRC résiste mieux à la propagation des arborescences électriques qu'un PE (non réticulé) [9].

IV. Applications

Le polyéthylène (PE) est utilisé dans plusieurs domaines :

- L'isolation et la protection dans les câbles électriques,
- La tuyauterie : pipe gaz naturel et eaux,
- L'industrie alimentaire : bidon d'huile, flacons...,
- Les équipements de navires et de voitures...,
- Les équipements sportifs : ski, surf...,

V. Conclusion

Après avoir exposé dans ce chapitre le matériau isolant qui est le polyéthylène, et nous avons vu que ses propriétés sont bonnes pour l'isolation des câbles de haute tension (HT). Ce matériau se dégrade sous l'action d'un champ électrique. Les arborescences électriques sont des phénomènes précurseurs de la dégradation, et feront l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II

Arborescences électriques

L'arborescence est un phénomène de dégradation des isolantes hautes tensions qui se manifeste par des formations rappelant une forme d'arbre [10]. Dans le présent chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude des arborescences électriques tout en décrivant tout d'abord les arborescences en général et leurs origines.

I. Définition et origines des arborescences

Les diélectriques solides, utilisés dans l'isolation en haute et moyenne tension, présentent des défauts tels que des microcavités et impuretés macroscopiques [11-13]. 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 » [14].

Les arborescences sont classées selon l'endroit où elles prennent naissance et l'environnement d'exploitation de l'isolant.

. Selon l'endroit où elles prennent naissance, on distingue deux types d'arborescences [15] :

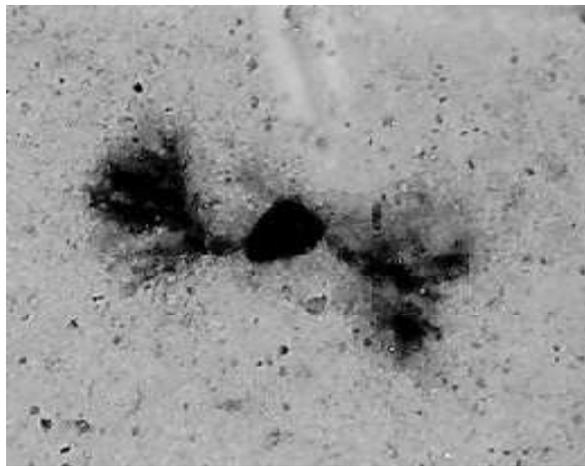
- Les arborescences ouvertes (vented trees) (Figure II.1.a) qui sont issues de défauts de contact écran/isolant, et sont susceptibles aux pénétrations d'air et d'humidité, peuvent causer d'éventuelles réactions chimiques, une augmentation de la conductivité et une croissance large et rapide [16,17]. Elles sont de tailles réduites dans les premiers stades de vieillissement et peuvent continuer à croître jusqu'à être en mesure de court-circuiter l'isolation, c'est pour cette raison qu'elles sont souvent considérées comme les plus dangereuses [17].

- Les arborescences en nœud-papillon (bow-tie trees) (Figure II.1.b) ne se développent pas largement et semblent cesser de grandir assez rapidement [16,17], leur surface ne semble pas être conductrice [16]. Elles ne sont donc pas dangereuses [16,18].

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



(a)



(b)

Figure II.1 : (a) Arborescences ouvertes et (b) Arborescences en nœud-papillon.

. L'environnement d'exploitation de l'isolant génère deux familles d'arborescences [15] :

- Les arborescences électrochimiques dans lesquelles on distingue les arborescences chimiques qui se développent en présence de produits chimiques et les arborescences d'eau qui se développent en milieu humide [18].
- Les arborescences électriques qui se développent en milieu anhydre [18].

La seule mesure physique qui fait une différence entre les deux catégories de dégradation est la mesure des décharges partielles.

Dans la suite de ce chapitre nous nous intéressons uniquement à l'étude des arborescences électriques qui est l'objet de notre travail.

II. Arborescences électriques

L'étude des arborescences électriques dans les isolants synthétiques a débuté avec les travaux de Mason [19,20]. Depuis, des recherches fructueuses n'ont pas cessé de mettre de la lumière sur ce phénomène qui continue à préoccuper les fabricants et les utilisateurs d'isolation, qui considèrent les arborescences électriques comme un réel danger pour les câbles électriques.

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. Dans les câbles, les observations sont rares car le développement est assez rapide, et il est suivi d'un claquage qui détruit les zones atteintes [21].

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. Lorsque les essais sont effectués sur des éléments de câbles, l'aiguille est enfoncée radialement, la seconde électrode est constituée par le conducteur. En pratique, il s'agit de reproduire les conditions nécessaires à l'apparition des arborescences. La pointe sert alors de site d'initiation [4].

2. Structures et formes d'arborescences

Les arborescences électriques sont constituées de canaux creux renfermant essentiellement de l'hydrogène [22] et dont le diamètre varie de quelques nanomètres à l'initiation [23] à quelques micromètres (2 à 50 μm) pendant la propagation [22,24].

On distingue plusieurs formes d'arborescences : de type branche, de type buisson et de type buisson ramifié [25,26]. D'après les travaux de Noto et Yoshimura [27] sur le polyéthylène sous tension alternative à 50Hz :

-Si $E < 5,4 \cdot 10^8 \text{ V/m}$, l'arborescence est de type branche (Figure II.2.a).

-Si $5,4 \cdot 10^8 \text{ V/m} < E < 6,0 \cdot 10^8 \text{ V/m}$, l'arborescence est de type buisson (Figure II.2.b).

-Si $E \sim 6,0 \cdot 10^8 \text{ V/m}$, l'arborescence est de type buisson ramifié (Figure II-c).



(a)



(b)



(c)

Figure II.2 : (a) Arborescences de type branche, (b) type buisson, (c) type buisson ramifié [27].

3. Les phases d'évolution des arborescences électriques

Les études ont montré que le développement du phénomène est toujours caractérisée par trois phases [4] :

- 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 microcanaux dans l'espace interélectrode.
- la phase d'avalanche qui conduit au claquage.

1. Phase d'initiation

C'est la phase la plus mal connue puisqu'aucune mesure n'a pu être réalisée pendant cette période. Aucune décharge partielle d'une amplitude supérieure à $5 \cdot 10^{-2}$ Pc ni émission lumineuse ne sont détectées durant la phase d'incubation [14,22]. Il semble que la présence des microcavités à la pointe est nécessaire.

On connaît mal la valeur des temps d'initiation précédant l'apparition des arborescences. Ces temps peuvent varier d'une valeur nulle à quelques dizaines de minutes [21]. L'influence de la fréquence a été analysée [27] : il est généralement admis que le temps d'incubation est d'autant plus court que la fréquence est élevée. Le temps d'initiation est proportionnel à $\frac{1}{f^x} \cdot E^n$ [21] :

$$n \sim 9 \text{ à } 20 \text{ et } x \sim 1$$

avec :

E : Champ électrique appliqué

f : Fréquence.

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 [25]. Leur présence se signale par des dégagements gazeux et des phénomènes lumineux [10,22].

La propagation se fait dans la direction du champ électrique. Il est admis que la limite entre les régions cristallines et les régions amorphes représente une zone pouvant faciliter le cheminement [18].

Les canaux ont un diamètre de l'ordre du micron [28]. Les gaz formés sont principalement l'hydrogène, la vapeur d'eau, de faibles quantités d'hydrocarbures non saturés [29] et des produits relativement conducteurs [28]. La vitesse de propagation est de l'ordre de $1\mu\text{m/s}$ [25].

Le temps de propagation est proportionnel à $\frac{1}{f^x} \cdot E$ [21].

avec :

$x \sim 1$ et E : champ électrique.

3. Phase d'avalanche

Après l'établissement du courant de décharge entre deux électrodes, l'arborescence mène invariablement à la rupture. L'origine de ce courant est l'énergie électrostatique cumulée dans l'échantillon et dans les capacités parasites dues au montage. Le claquage est provoqué par la remontée d'un filament de l'électrode reliée à la terre vers l'électrode haute tension.

III. Théories expliquant la phase d'incubation

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 :

- celles qui font appel à l'action des décharges partielles,
- celles qui prennent en compte l'action des porteurs chauds,
- celles qui envisagent une rupture électromécanique.

1. Formation de l'arborescence par décharges partielles

Il est généralement admis que des décharges partielles non mesurables se développent dans les microcavités et produisent des trous acérés à la pointe desquels le champ électrique est transféré [30]. Ces cavités seraient dues aux dilatations différentielles du polymère et du métal et à l'air absorbé [30]. Si ces microcavités n'existent pas à l'origine, elles sont créées par une fatigue électromécanique aux points de concentration du champ électrique [31].

2. Action des porteurs chauds sur la structure du polymère

Eichhorn [18] 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 :

1- Injection d'électrons par effet de champ à l'interface métal-polymère et accélération de certains d'entre eux jusqu'à des énergies de l'ordre de 10 eV. Sous un champ de 10 MV/cm, cette énergie correspond à un libre parcours moyen électronique de 100 Å qui est supposé exister aux interfaces des parties cristallines et des parties amorphes du polymère.

2- Les électrons les plus énergétiques effectuent des collisions ioniques avec les molécules du polymère et il peut y avoir rupture de liaisons. Ils se piègent et constituent une charge d'espace. Une partie de ces électrons piégés peut être dépiégée pendant les alternances positives de la tension appliquée.

Une action répétée de ce processus conduit à la formation au sein du polymère, d'une zone de composés de bas poids moléculaires qui diffusent et laissent finalement une cavité dans laquelle les décharges sont susceptibles de s'amorcer. Le schéma décrivant ce phénomène d'incubation est exposé à la figure (II.3) :

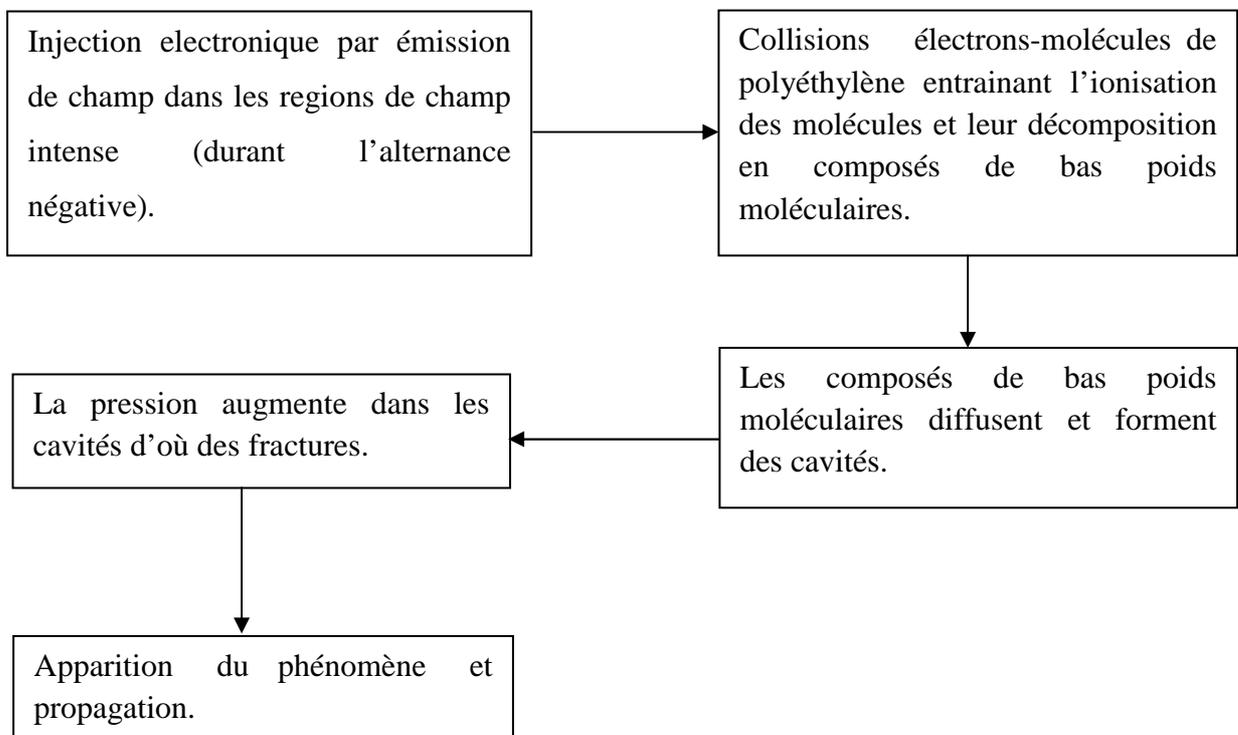


Figure II.3 : Processus de dégradation sous l'action des porteurs chauds [18].

3. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique

Noto et Yoshimura [27] 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. 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 [27] 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.

IV. 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.

a. 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 [21,32]. 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 [22].

Le concept des électrons chauds est aussi évoqué pour expliquer la propagation des canaux d'arborescences [33]. L'action des électrons chauds accélérés dans les microcavités serait à l'origine de leur extension [22].

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 [34].

b. 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 [14,22] ; ce mécanisme de dégradation prépondérant dans l'EPDM, peut être, favorisé par l'état amorphe du matériau [10]. 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 (~ 0,1 eV à 0,2 eV) et A une constante.

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 [22] que la rupture par arborescence est une rupture thermique, hypothèse d'ailleurs confirmée par M. Nagao [35] grâce à son analyse thermographique.

Le diagramme ci-dessous résume la conception de la rupture par arborescence d'après

C. Laurent [22].

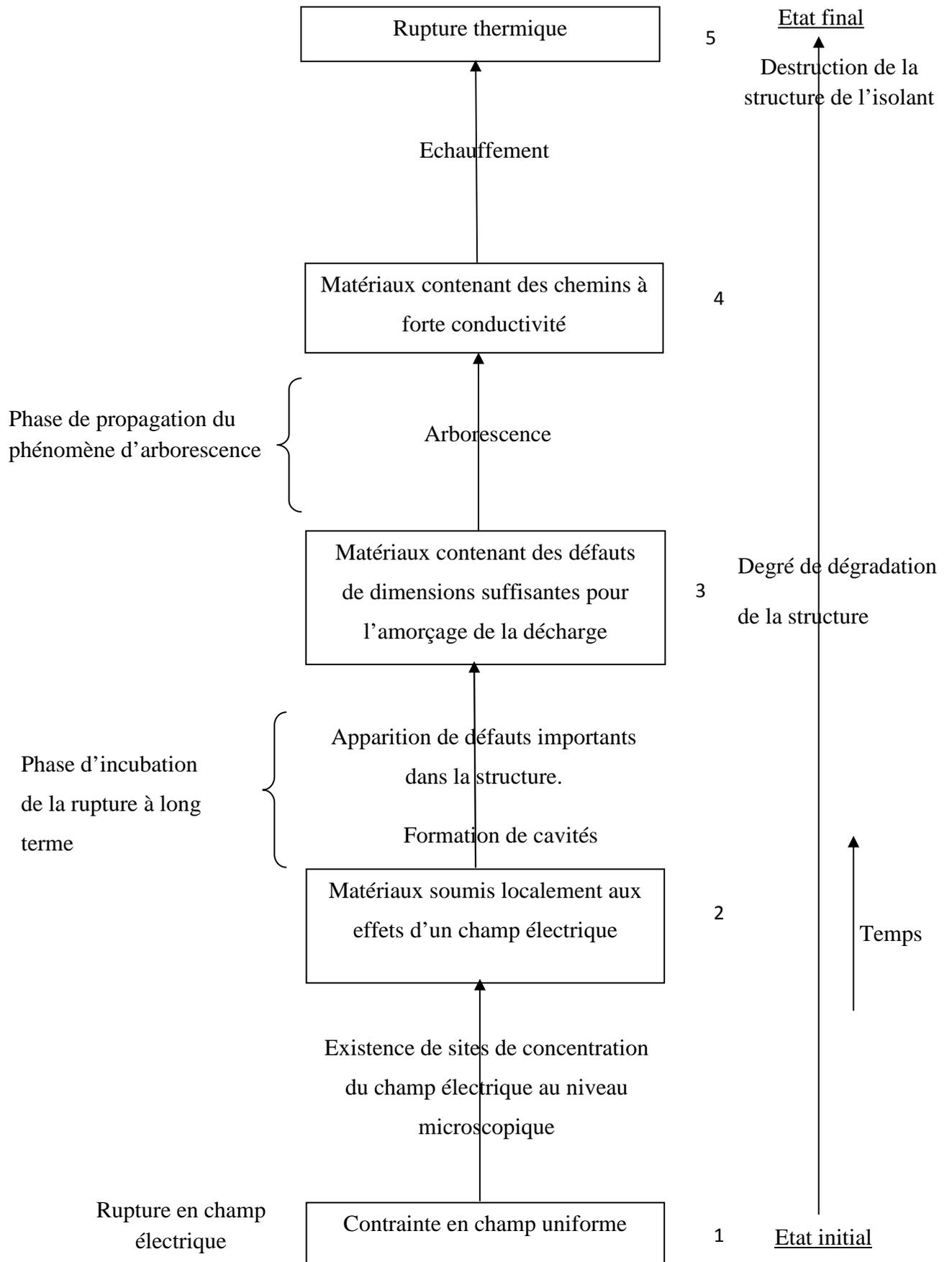


Figure II.4 : Processus de la rupture par arborescence [22].

V. 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 [28,30].
- les charges d'espace ainsi l'effet de la polarité.
- la fréquence [14], température [36], propriétés mécaniques [14], nature de gaz piégé [14], morphologie du polymère dans le volume [18] 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 [21,30].
- 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 [30].

VI. 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 [30]. 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.

VII. Conclusion

Cette étude nous a permis d'apporter des précisions sur les arborescences en général et électriques en particulier, 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 dans les polymères utilisés dans les câbles de haute tension, on a opté pour sa modélisation, ce qui est l'objet de notre prochain chapitre.

Chapitre III

Modèles mathématiques de la propagation des arborescences électriques

Plusieurs théories ont été développées par de nombreux chercheurs dans le but d'expliquer le phénomène de la propagation des arborescences électriques dans les isolants polymères [38].

Dans ce chapitre quatre différents modèles ont été décrits dont chacun est basé sur sa propre notion, par la suite, nous nous sommes intéressés au dernier modèle qui est basé sur l'effet de la pression électrostatique.

I. Modèle de propagation fractale de l'arborescence électrique

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 (Figure III.1). En assimilant le nombre de branches qui forme l'arborescence électrique à X , on a généralement [39] :

$$X = (L/L_b)^{d_f} \quad (III.1)$$

où, L est la longueur de l'arborescence électrique, L_b 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, d_f est la dimension fractale de l'arborescence électrique. Selon le modèle mathématique de l'évolution du groupe fractal [39]

$$\frac{dX}{dt} = K \quad (III.2)$$

où, K est la fréquence des incréments de l'arborescence électrique suivant le micromécanisme 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.

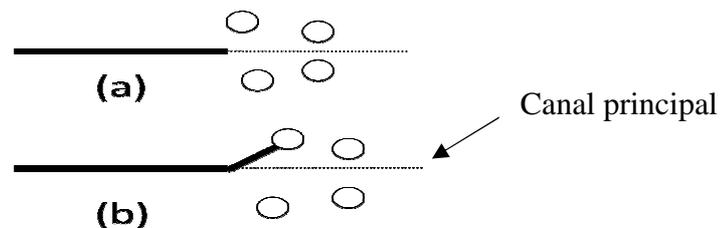


Figure III.1 : Branche et cavités environnantes [39]

- (a) : Formation d'une branche submicroscopique dans le canal principal.
 (b) : Jonction d'une branche submicroscopique à la branche principale.

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 [39]. Selon le modèle cinétique de la rupture diélectrique dépendante de temps pour les polymères [40] 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 (III.1) peut être déterminée en calculant le taux de rupture de liaisons du polymère comme suit [40] :

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

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.

3. Taux de croissance de l'arborescence électrique

Avec les formules (III.1) et (III.3), on peut développer une formule de la vitesse de propagation de l'arborescence électrique suivante [39] :

$$\frac{dL}{dt} = \frac{kTL_b^{d_b}}{hd_f} \cdot L^{(1-d_f)} \cdot \exp\left(\frac{\alpha\pi\varepsilon E^2 C_0 - U_0}{kT}\right) \quad (III.4)$$

Par l'intégration de (4) on obtient la loi de propagation de l'arborescence comme suit [39] :

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

4. Durée de vie

Le temps de l'évolution de l'arborescence électrique jusqu'au claquage t_g peut être calculé en intégrant (4) à partir d'une longueur initiale de l'arborescence L_0 jusqu'à une longueur critique L_c , i.e. [39]:

$$t_g = \left(\frac{L_c}{L_b}\right)^{d_f} \frac{h}{kT} \exp\left(\frac{\alpha\pi\epsilon E^2 C_0 - U_0}{kT}\right) \quad (III.6)$$

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 [39]. Il est très clair que le temps de la durée de vie décroît exponentiellement quand E augmente et diminue quand T augmente [39].

II. Méthode de simulation de la propagation des arborescences électrique en utilisant les automates cellulaires

L'idée entière est basée sur la variation inhérente de la permittivité [38], l'arborescence électrique suit le chemin où le matériau isolant est localement plus faible, i.e. l'arborescence électrique se développe en prenant en compte la rigidité diélectrique locale [41], et l'utilisation des automates cellulaires de Von Neumann, une méthode qui prend en compte seulement les interactions locales [38].

2. Automates cellulaires

Les automates cellulaires (AC) sont des modèles des systèmes physiques où l'espace et le temps sont discrets et les interactions sont seulement locales. Les automates cellulaires, introduits initialement par Von Neumann, ont été extensivement utilisés comme modèles pour des systèmes complexes [41].

La théorie des automates cellulaires est basée sur la notion que chaque système physique peut être divisé en un nombre de cellules et donc un tableau de $n \times m$ cellules. Chaque cellule du tableau interagît seulement avec les cellules appartenant à son voisinage local [42]. A chaque instant $(t+1)$, l'état de chaque cellule est défini par les états des cellules voisines et son état elle-même à l'instant (t) précédent.

Les paramètres nécessaires pour simuler la propagation de l'arborescence sont les suivants [42] :

- Un nombre de valeurs correspondant à chaque cellule (valeur du potentiel, permittivité électrique)

- Une règle qui est la même pour chaque cellule, est appliquée pour chacune d'elles. La règle à chaque simulation de l'automate cellulaire est souvent une fonction F qui est modifiée selon les besoins spécifiques de chaque simulation.

L'état de chaque cellule (i,j) à l'instant $(t+1)$ est défini par les huit cellules environnantes à l'instant (t) précédent et l'état de la cellule elle-même (Figure III.2) :

$$C_{t+1}(i,j) = F [C_t(i-1, j-1), C_t(i-1, j), C_t(i-1, j+1), C_t(i, j-1), C_t(i, j), C_t(i, j+1), C_t(i+1, j-1), C_t(i+1, j), C_t(i+1, j+1)] \quad (\text{III. 7})$$

- Le potentiel appliqué à l'électrode pointe.
- La longueur a de la cellule dans l'axe x multipliée par la longueur b de l'axe y définit les dimensions de chaque cellule individuelle et simultanément les dimensions de l'échantillon ($a \times n, b \times m$).

	$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$	
	$(i, j-1)$	(i, j)	$(i, j+1)$	
	$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$	

Figure III.2 : Le voisinage de la (i, j) cellule est formé par la même cellule et les huit cellules indiquées [42].

3. Algorithme de simulation de la propagation de l'arborescence électrique en utilisant les automates cellulaires

Le problème de la propagation de l'arborescence électrique sera vérifié en deux dimensions. La figure III.3 montre l'électrode pointe/plan. Le diélectrique solide est placé entre les électrodes pointe/plan, et est subdivisé en une matrice de cellules carrées identiques, avec des cotes de longueur a et il est représenté par un AC. Chaque cellule du diélectrique est considérée comme une cellule de l'AC [41].

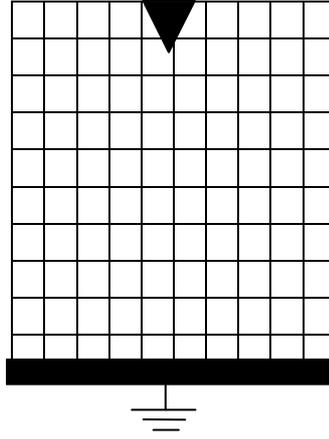


Figure III.3 : Représentation de l'AC du diélectrique entre deux électrodes pointe/ plan.

L'intensité du champ électrique a une relation directe avec la constante diélectrique et la tension de la cellule.

$$E_t(i, j) = \varepsilon(i, j) \frac{V_t(i, j)}{a(i, j)} \quad (III.8)$$

avec :

- $E_t(i, j)$: intensité du champ électrique de la cellule (i, j) à l'instant t
- $\varepsilon(i, j)$: constante diélectrique de la cellule (i, j)
- $V_t(i, j)$: tension de la cellule (i, j) à l'instant t
- $a(i, j)$: largeur de la cellule

L'algorithme qui décrit la création et la propagation de l'arborescence électrique dans un diélectrique solide est représenté à la figure ci-dessous [41] :

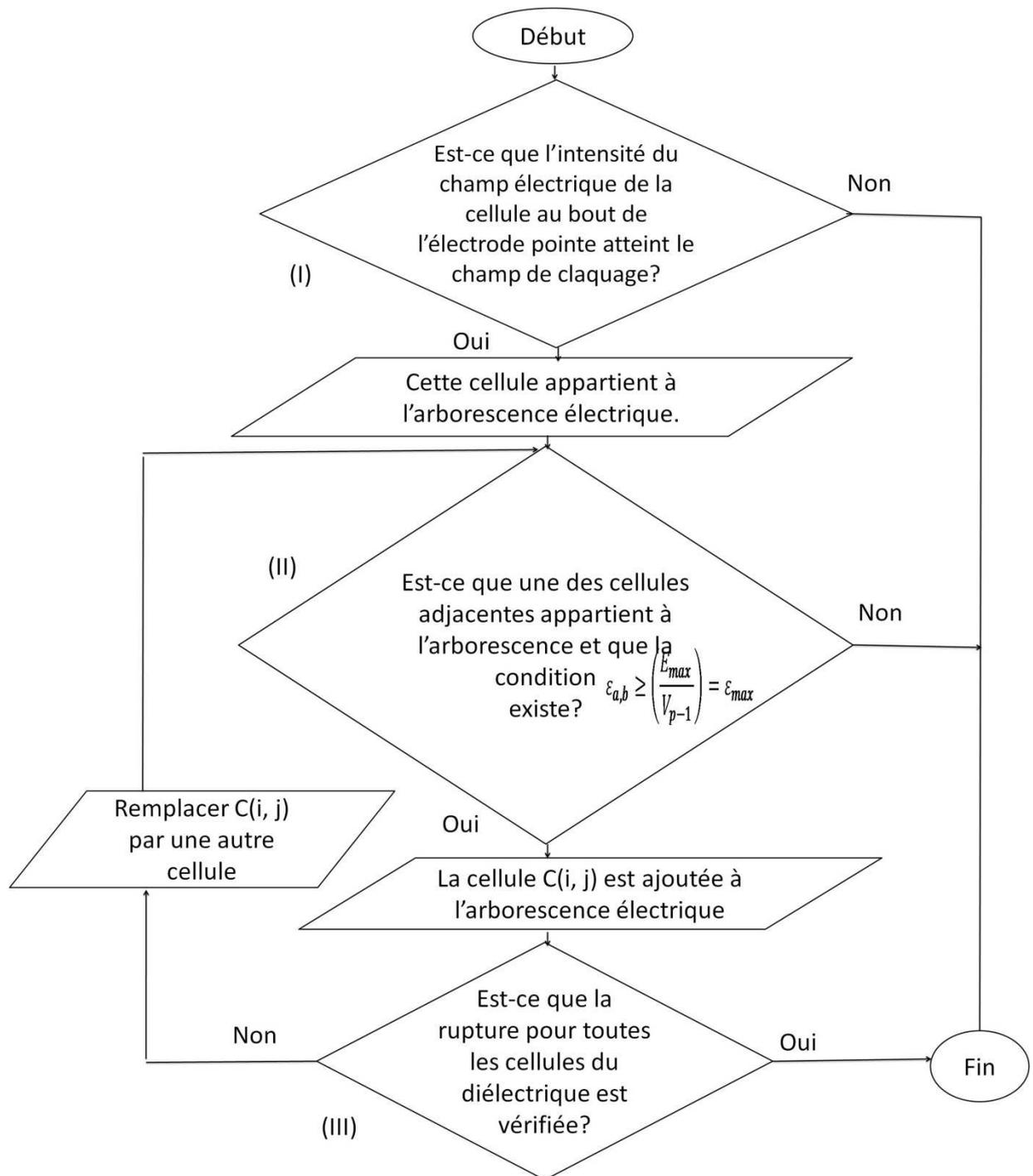


Figure III.4 : Algorithme d'analyse de l'arborescence électrique pour un diélectrique solide [41].

I : vérifie que : Si $\epsilon_{a,b} V_{p-1} \geq E_{max}$? $i = a, j = b$, sont des coordonnées des cellules attachées au bout de l'électrode pointe, V_{p-1} est la tension de ces cellules et elle n'est pas égale à la tension de l'arborescence électrique mais elle est identique pour toutes ces cellules. Si la réponse est négative, alors l'arborescence électrique n'aura pas lieu et la simulation est finie, mais si la réponse est positive, alors passe à **II**.

II : Généralement quand la cellule étudiée $C(i, j)$ arrive à joindre l'arborescence électrique et que au moins une des cellules adjacentes appartient à ce dernier et la condition :

$$\varepsilon_{a,b} \geq \left(\frac{E_{max}}{V_{p-1}} \right) = \varepsilon_{max} \text{ existe.}$$

III : vérifie **II** pour toutes les cellules.

III. Modèle numérique de la propagation des arborescences électriques

1. Définition

Le modèle numérique sert à examiner la propagation des arborescences électriques dans l'isolation polymère [43]. Cela est réalisé en utilisant un système d'électrode aiguille hyperbolique/plan ; l'aiguille est enfoncée dans l'isolant [43]. Un mode de la propagation d'arborescence (structures de types branches ou buisson) est obtenu par la combinaison des contraintes électriques et mécaniques [43,44].

2. Approche physique pour la propagation de l'arborescence électrique

Le champ électrique minimum pour initier une fissure dans le milieu isolant est de 4 MV/cm [44,45] ; la valeur du champ critique (E_c). Durant la propagation de l'arborescence électrique, chaque filament est considéré comme une fissure [46]. La densité d'énergie électrostatique à la pointe de la fissure (W_e)

$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \quad J/m^3 \quad (III. 9)$$

Le champ électrique (E) est très élevé à la pointe du filament, ceci donnera lieu à la contrainte mécanique.

avec :

- ε_0 : permittivité de l'air
- ε_r : Permittivité relative du matériau
- E : Champ électrique

La contrainte mécanique (σ), induite par l'effet du champ électrique, sera [46]

$$\sigma = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2 \quad J/m^3 \quad (III. 10)$$

où, ε_r est la permittivité relative du diélectrique.

Alors, la densité d'énergie mécanique (W_m) peut être calculée à partir de [46,47]

$$W_m = \frac{\sigma^2}{2Y} \quad J/m^3 \quad (III.11)$$

où Y est le module d'élasticité.

L'énergie totale W sera égale à ($W_m + W_e$). Au claquage, $W_m \gg W_e$ [47]. D'où W par rapport à une unité de volume sera

$$W = \left[\frac{\sigma^2}{2Y} \right] \pi r^2 dl = \frac{\varepsilon_0^2 \varepsilon_r^2 \pi r^2}{8Y} E^4 dl \quad (III.12)$$

où, r est le rayon de la fissure avec une longueur incrémentale dl .

A partir de l'équation (III.12), l'énergie totale W est proportionnelle à E^4 . Si cette énergie décrit l'énergie critique W_c au champ électrique critique E_c , l'initiation de l'arborescence est atteinte.

$$W_c = \frac{\varepsilon_0^2 \varepsilon_r^2 \pi r_0^2}{8Y} E_c^4 dl_0 \quad (III.13)$$

$$\frac{W}{W_c} = \left(\frac{E}{E_c} \right)^4 \quad (III.14)$$

(I.e., critère de volume égal), où, r_0 est le rayon de la fissure au champ électrique critique E_c .

3. Modes de la propagation des arborescences électriques

Pour l'arborescence buisson en volume détruit, le nombre de fissures initiées est très élevé. Ce nombre couvre le volume entier [43]. Le nombre total de fissures (N) dans le volume détruit de forme sphérique avec un rayon R_d sera [43] :

$$N = \frac{\frac{4}{3}\pi R_d^3}{\frac{1}{3}\pi r_0^2 R_d} = 4 \left[\frac{R_d}{r_0} \right]^2 \quad (III.15)$$

Les valeurs déclarées de r_0 et R_d sont respectivement $1\mu m$ et $10\mu m$ [48], i.e., $R_d = 10r_0$. Alors, N sera égal à 400 fissures.

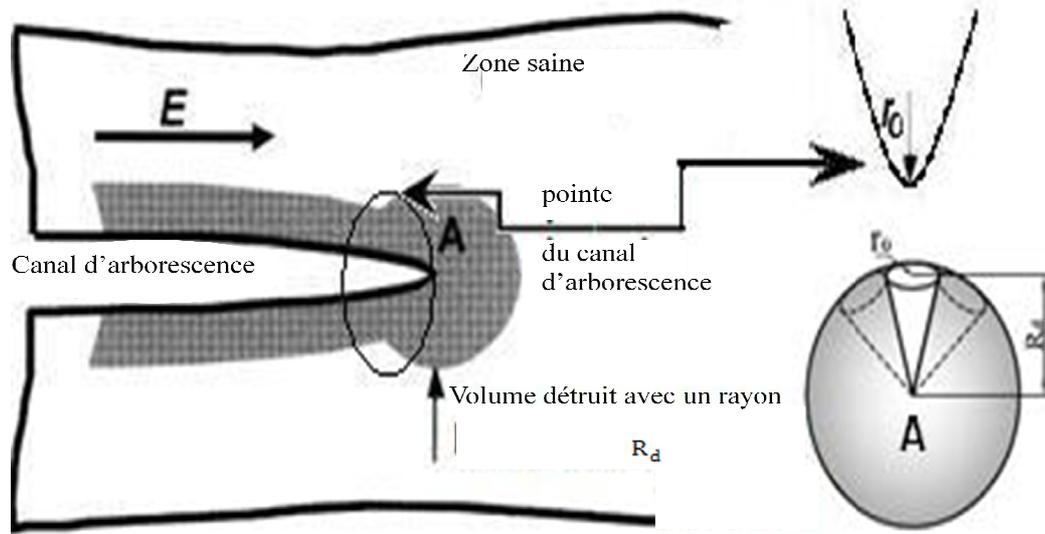


Figure.III.5 : Microstructure du champ local à la pointe du canal d'arborescence, le volume déformé de rayon R_d et le canal d'arborescence de rayon r_0 [43].

Dans le cas de 2 dimensions, le milieu diélectrique se craque mécaniquement lorsque $\frac{S}{S_0} = 0,6$, où S et S_0 sont respectivement les surfaces avant et après la rupture [47]. D'où le matériau est comprimé par 0,4 fois de la dimension initiale. Cela signifie que le volume affaissé est égal à $0,4^3$ [43]. Alors le facteur d'énergie pour l'affaissement du volume sera égal à 0,064 multiplié par N fissures, i.e., $n_d = 25,6$ fissures nécessaire pour couvrir le volume déformé [43]. Donc, le nombre critique nécessaire de fissures (n_c), en 2 dimensions, pour l'arborescence buisson est $n_c = \sqrt[3]{n_d} = 2,944$.

En substituant dans l'équation (III.14)

$$\frac{W}{W_c} = n_c \quad (III.16)$$

et

$$\left(\frac{E}{E_c}\right) = \sqrt[4]{n_c} \quad (III.17)$$

Le rapport E/E_c est égal à 1,31 pour n_c égal à 2,944.

donc,

- $E/E_c < 1,31$ indique une arborescence de type branche,
- $E/E_c > 1,31$ indique une arborescence de type buisson [44].

IV. 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 [49] dans le cas de suspensions dans les diélectriques liquides.

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 ($\sigma = 0$) [50]:

$$P_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (\varepsilon_r - 1) E^2 \quad (III.18)$$

avec :

ε_0 : Permittivité de l'air

ε_r : Permittivité relative du polymère

E : Champ électrique

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

$$P_e = K . E^2 \quad (III.19)$$

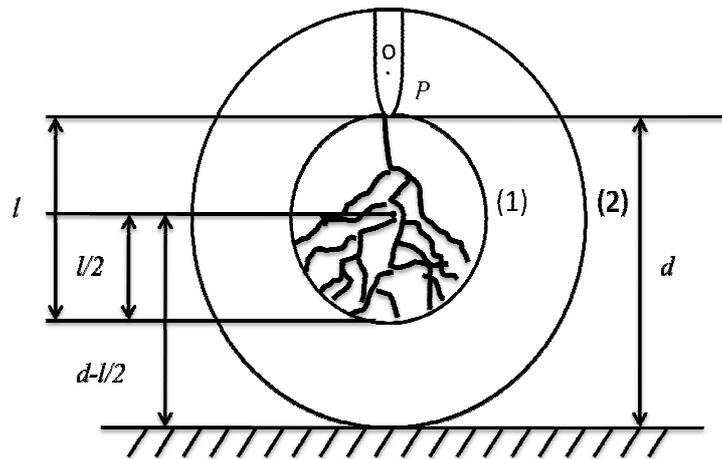
2. Expression du champ électrique

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.

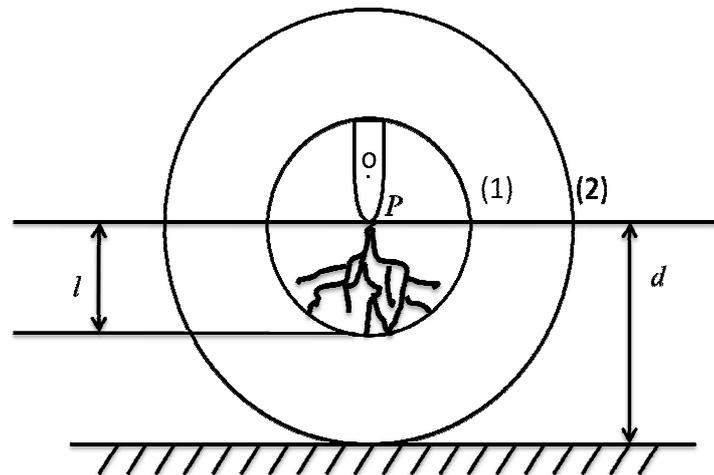
Selon que l'arborescence est en forme de buisson ou de branche, le champ électrique est déterminé en utilisant une approximation sphérique ou une approximation hyperboloïdale.

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 (Figure III.6) [11].



(a)



(b)

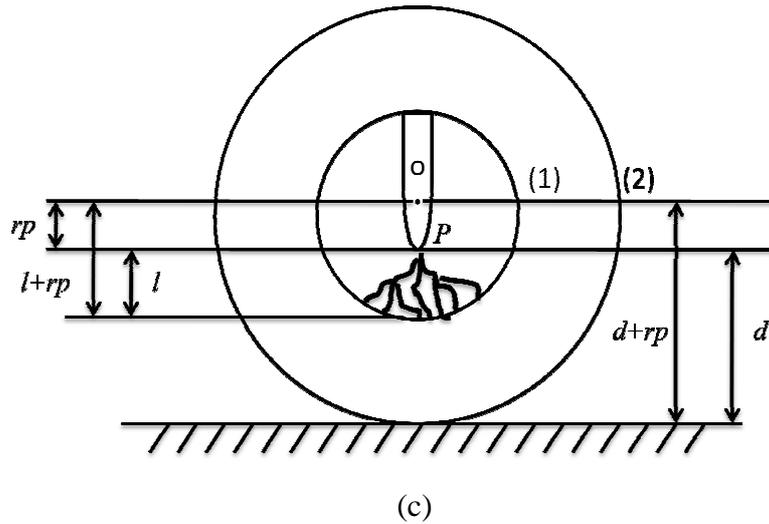


Figure III.6 : Représentation schématique des différents modèles sphériques.

(a) : Sphère tangente à la pointe, (b) : Sphère centrée sur la pointe P

(c) : Sphère centrée en O.

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 (Figure III.6.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 [50] :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{\left(2 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)}{\left(1 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)\left(\frac{l}{d}\right)} \quad (III.20)$$

U : Tension appliquée aux électrodes.

d : Distance interélectrode.

l : Longueur de l'arborescence.

V : Potentiel électrique.

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 (Figure III.6.b). Le champ électrique sur le front de la sphère interne obtenu pour les conditions aux limites suivantes :

$$\begin{aligned} (1) : r = l &\rightarrow V(r) = U \\ \text{et} \\ (2) : r = d &\rightarrow V(r) = 0 \end{aligned}$$

a pour expression :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{1}{\left(\frac{l}{d}\right) \left(1 - \left(\frac{l}{d}\right)\right)} \quad (III. 21)$$

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 (Figure III.6.c). Le champ électrique sur le front de la sphère interne déterminé pour les conditions aux limites :

$$\begin{aligned} (1) : r = l + r_p &\rightarrow V(r) = U \\ \text{et} \\ (2) : r = d + r_p &\rightarrow V(r) = 0 \end{aligned}$$

a pour expression :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{(1 + (r_p + d))}{\left(1 + \left(\frac{l}{d}\right)\right) \left(\left(\frac{l}{d}\right) + \left(\frac{r_p}{d}\right)\right)} \quad (III. 22)$$

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 , (Figure III.7.a), soit à une pointe dont le rayon est égal à r_p (Figure III.7.b) [11].

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

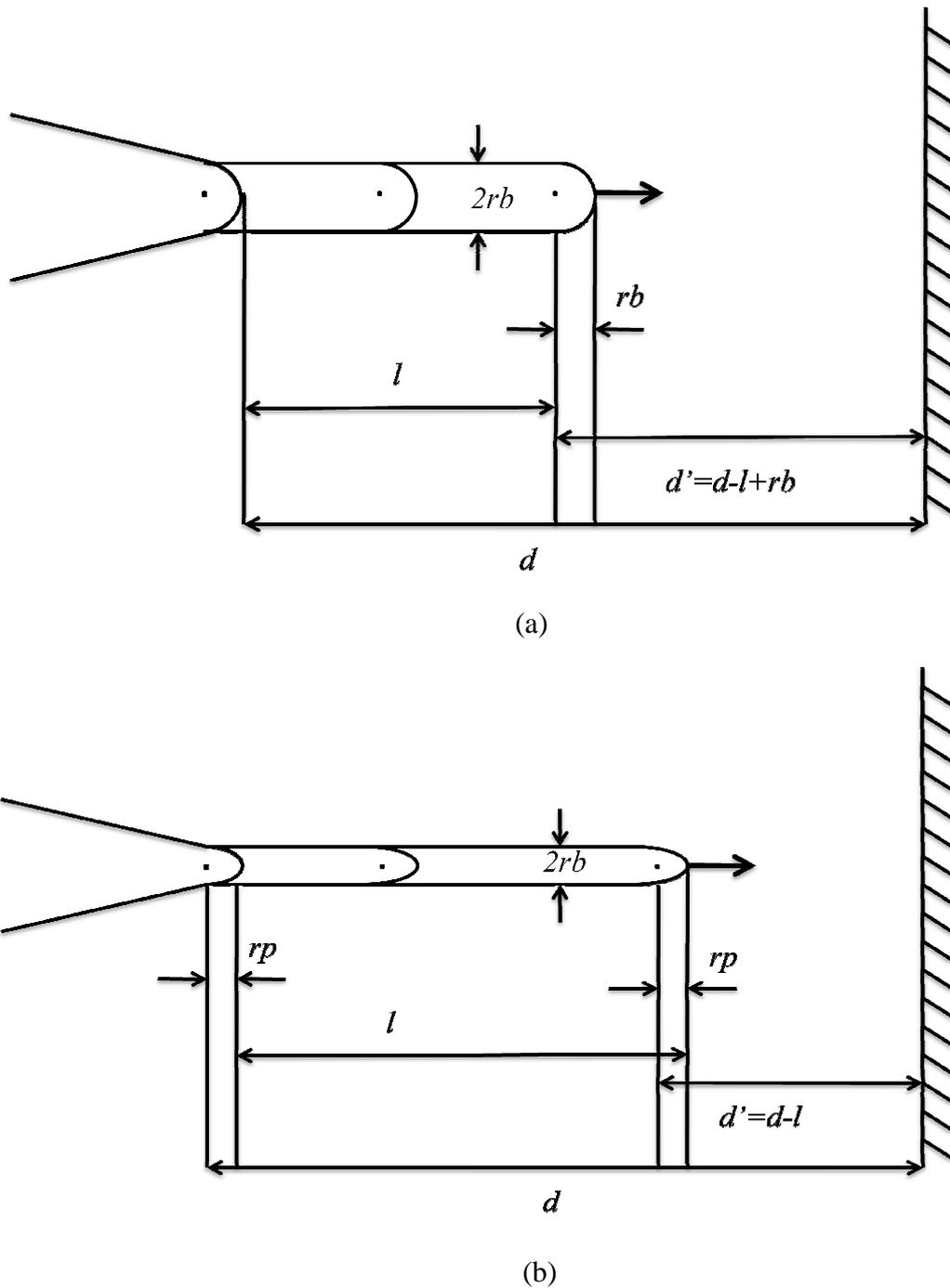


Figure III.7 : Représentation schématique du modèle filamentaire.

(a) : approximation sphérique, (b) : approximation hyperboloïdale

2.2.1. Approximation sphérique

Le champ électrique sur le front de la sphère de rayon r_b (figure III.7.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

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \left(\frac{d}{r_b} + \frac{1}{1 - \left(\frac{l}{d}\right)}\right) \quad (III. 23)$$

2.2.2. Approximation hyperboloïdale

La branche progresse tel une extension de la pointe, se déplaçant vers l'électrode pointe opposée (figure III.7.b). Le champ électrique à l'extrémité de la branche peut être estimé, en assimilant le système d'électrodes à des hyperboloïdes [51].

Son expression approchée est donnée par :

$$E(l) = \left(\frac{U}{d}\right) \frac{\frac{2d}{r_p}}{\ln\left(1 + 4\left(\frac{d-l}{r_p}\right)\right)} \quad (III. 24)$$

3. Bilan énergétique

3.1. 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 [50] :

$$W = \int_{R_0}^R 4\pi R^2 \cdot P_e \cdot dR \quad (III. 25)$$

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

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (III.26)$$

avec : ρ : masse volumique du polymère

L'équation (III.25) et (III.26) 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 ($\frac{dR}{dt} = cste$), donc, $\frac{dR^2}{dt^2} = 0$, l'expression de P_e devient :

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (III.27)$$

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 $l(t)$.

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

Les expressions (III.20), (III.19) et (III.27) 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 :

$$\frac{dl}{dt} = g \frac{U}{d} \frac{\left(2 - \left(\frac{l}{d} \right) \right)}{\left(1 - \left(\frac{l}{d} \right) \right) \left(\frac{l}{d} \right)} \quad (III.28)$$

avec : $g = \sqrt{\frac{8K}{\rho}}$

A partir de l'équation (III.28) 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 (III.28), on aura :

➤ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{1}{gU} \left(\frac{l^2}{2} + d.l + 2d^2 + \ln \left(1 - \left(\frac{l}{2d} \right) \right) \right) \quad (III.29)$$

➤ Temps de retard au claquage :

Pour $l = d$ on aura :

$$t_c \approx 0,1137 \cdot \frac{d^2}{g.U} \quad (III.30)$$

L'étude de la fonction (III.30) montre que t_c décroît lorsque l'amplitude de la tension augmente et croît avec l'augmentation de la distance interélectrode.

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

Du fait de la périodicité de l'onde de tension, l'équation (III.28) doit être intégrée après chaque période T , en prenant comme conditions initiales, les conditions finales de l'intégration précédente. Ceci est traduit par l'équation suivante [50] :

$$\int_{(i-1)T}^t g.U_m \sin wt dt = \int_{l_{i-1}}^l \frac{d-l}{2d-l} dl \quad (III.31)$$

Pour $i = 1, \dots \dots n$

Où : n : le nombre de la période T

$l_i - 1$: Longueur de l'arborescence à la $(i-1)$ éme période.

Cette explication reste valable pour les modèles suivants.

Remarque : l'étude du temps de l'évolution de l'arborescence et le temps de retard au claquage semble impossible puisque chacun dépendra des états précédents $(l_i - 1, n)$ qui sont inconnus. C'est pourquoi, nous ne nous intéressons pas à ces variables même dans les prochains modèles, pour ce cas de tension.

3.1.2. Arborescence assimilée à une sphère centrée sur la pointe

❖ Sphère centrée en P

Les expressions (III.21), (III.19) et (III.27) nous donnent :

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

avec : $l = R$

d'où :

$$\frac{dl}{dt} = g_p U \frac{1}{l \left(1 - \left(\frac{l}{d} \right) \right)} \quad (III.32)$$

avec : $g_p = \sqrt{\frac{2K}{\rho}}$

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

Après séparation de variables et intégration de l'équation (III.32) on aura :

➤ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{1}{6 \cdot g_p \cdot d \cdot U} l^2 (3d - 2l) \quad (III.33)$$

➤ Temps de retard au claquage :

Pour $l = d$ on aura :

$$t_c = \frac{d^2}{6 \cdot g_p \cdot U} \quad (III.34)$$

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

Pour la même raison que pour le modèle précédent, l'équation de propagation de l'arborescence s'écrit :

$$\int_{(i-1)T}^t g_p \cdot U_m \sin wt \, dt = \int_{l_{i-1}}^l l \left(1 - \frac{l}{d}\right) \, dl \quad (III.35)$$

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 (III.22), (III.19) et (III.27) nous donnent :

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

avec : $l + r_p = R$

d'où :

$$\frac{dl}{dt} = g_o U \frac{(d + r_p)}{(d - l)(l + r_p)} \quad (III.36)$$

avec : $g_o = \sqrt{\frac{2K}{\rho}}$

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

Après séparation de variables et intégration de l'équation (III.36) on aura :

➤ Temps d'évolution d'arborescence :

$$t = \frac{1}{g_o U (d + r_p)} \left(r_p d \cdot l + \frac{l^2}{2} (d - r_p) - \frac{1}{3} l^3 \right) \quad (III.37)$$

➤ Temps de retard au claquage :

Pour $d = l$ on aura :

$$t_c = \frac{d^2}{6g_o U} \left(\frac{d + 3r_p}{d + r_p} \right) \quad (III.38)$$

Si $r_p \ll d$, $t_c \approx \frac{d^2}{6g_o U}$

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

De la même manière que précédemment, on aura :

$$\int_{(i-1)T}^t g_o U_m \sin wt \, dt = \int_{l_{i-1}}^l \frac{(d-l)(l+r_p)}{(d+r_p)} \, dl \quad (III.39)$$

Remarquons que pour $r_p \ll d$, ce modèle se réduit au modèle précédent (sphère centrée sur p).

3.2. 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 [50]:

$$W = \int_{l_0}^l \pi r_b^2 P_e \, dl \quad (III.40)$$

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

$$E_c = \frac{1}{2} \rho (\pi r_b^2 l) \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 \quad (III.41)$$

Les équations (III.40) et (III.41) 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 :

$$P_e = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{dl}{dt} \right)^2 \quad (III.42)$$

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 :

3.2.1. Approximation sphérique

Des expressions (III.19), (III.23) et (III.42), 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 :

$$\frac{dl}{dt} = g_b \frac{U}{d} \left(\frac{U}{r_b} + \frac{1}{1 - \left(\frac{l}{d}\right)} \right) \quad (III.43)$$

avec : $g_b = \sqrt{\frac{2K}{\rho}}$

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

Après séparation de variables et intégration de (III.43) on aura :

➤ Temps d'évolution d'arborescence :

$$t = \frac{r_b l + r_b^2 \ln(d + r_b - l)}{g_b U} \quad (III.44)$$

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

$$t_c = \frac{1}{g_b U} r_b (d + r_b - \ln(r_b)) \quad (III.45)$$

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

La même application que pour les arborescences en buisson, peut être donnée pour traduire la cinétique de la propagation sous tension alternative sinusoïdale. On peut alors écrire :

$$\int_{(i-1)T}^t g_b U_m \sin(wt) dt = \int_{l_{i-1}}^l \left(r_b - \frac{r_b^2}{(d + r_b - l)} \right) dl \quad (III.46)$$

3.2.2. Approximation hyperboloïdale

Des équations (III.19), (III.24) et (III.42), 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 :

$$\frac{dl}{dt} = g_b \frac{U}{d} \frac{\frac{2d}{r_p}}{\ln\left(1 + 4\frac{(d-l)}{r_p}\right)} \quad (III.47)$$

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

Après intégration de (III.47) et séparation de variables on aura :

➤ Temps d'évolution de l'arborescence :

$$t = \frac{r_p}{2g_b U} \left(l \left(\ln\left(\frac{r_p + 4(d-l)}{r_p}\right) - 1 \right) - \frac{r_p + 4d}{4} \ln\left(1 - \frac{4l}{r_p + 4d}\right) \right) \quad (III.48)$$

➤ Temps de retard au claquage :

$$t_c = \frac{r_p}{2g_b U} \left((d - r_p)(\ln(5) - 1) - \frac{r_p + 4d}{4} \ln\left(\frac{5r_p}{r_p + 4d}\right) \right) \quad (III.49)$$

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

$$\int_{(i-1)T}^t g_b \cdot U_m \sin wt \, dt = \frac{r_p}{2} \int_{l_{i-1}}^l \ln\left(1 + 4\left(\frac{d-l}{r_p}\right)\right) \, dl \quad (III.50)$$

V. Conclusion

Ces modèles font ressortir les différents facteurs influents sur la propagation des arborescences électriques. La cinétique de propagation de ces deux types d'arborescences est déterminée sur le polyéthylène, en fonction des différents paramètres : forme de la tension appliquée, son amplitude, sa fréquence, la distance interélectrode et le rayon de courbure de la pointe. Les résultats de cette étude seront présentés dans le quatrième chapitre de ce travail.

Chapitre IV

Résultats de simulation et discussion

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation sur la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène sous champ alternatif, 50 Hz. Pour vérifier les modèles présentés dans le troisième chapitre, nous avons effectué une application de ces modèles pour une charge électrique superficielle nulle ($\sigma = 0$). La variation de propagation de ces arborescences a été étudiée en fonction des contraintes figurant sur chacun des modèles. Aux résultats de simulation, sont conjuguées des mesures optiques relevées de la littérature, permettant la validation de ces premiers.

I. Système d'électrodes

La figure VI.1 présente la configuration expérimentale adoptée : double pointe asymétrique. L'électrode pointe présente un rayon de courbure de $3 \mu\text{m}$. La contre-électrode a un rayon de courbure de $500 \mu\text{m}$ et joue le même rôle qu'un plan dans une structure pointe-plan [4]. La distance interélectrode est $d=4 \text{ mm}$.

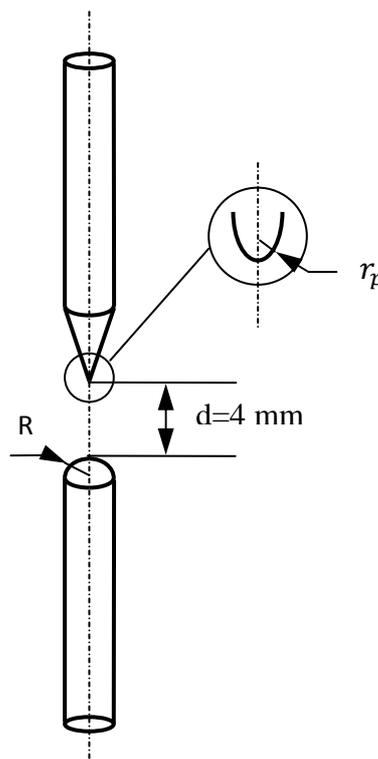


Figure IV.1 : Configuration expérimentale $r_p=3 \mu\text{m}$ et $R=500 \mu\text{m}$.

II. Présentation de la méthode de simulation

Dans ce chapitre, nous avons étudié les courbes de propagation des arborescences $l(t)$, où l est la longueur de l'arborescence et t la durée d'application de la tension. Pour ce faire, nous avons élaboré un programme informatique sous 'Matlab'. Nous avons utilisé la méthode

d'intégration de Gear permettant d'intégrer les équations différentielles décrivant la cinétique de propagation des arborescences.

Le polyéthylène étudié a une permittivité relative $\varepsilon_r = 2,3$ et une masse volumique $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$.

Nous avons considéré plusieurs niveaux de tension appliqués : 12 kV, 14 kV et 16 kV de fréquence 50 Hz. Pour valider ou rejeter nos résultats, nous avons comparé ces derniers à ceux de littérature (mesures optiques) [4, 52, 53], Les résultats obtenus répondent bien au mode de propagation de l'arborescence. Cependant, pour être conforme avec l'échelle des résultats de la littérature [4, 52, 53], nous avons introduit un facteur de correction F_c qui varie selon la forme d'arborescence considérée, ainsi qu'avec la forme et la valeur de la tension appliquée. Les caractéristiques $l(t)$, obtenues par mesures optiques, ont permis de déterminer la valeur du facteur de correction F_c qui est égal à la pente de la droite $l = f(l_m)$, où l est la longueur simulée et l_m , la longueur mesurée correspondant au même temps d'application de la tension. Cette longueur est obtenue sous des conditions expérimentales identiques (à la limite voisine) aux données de la simulation numérique. Les arborescences sont considérées de type buisson.

La méthode de calcul est exposée pour chacun des modèles décrits auparavant pour la propagation des arborescences, sous forme d'organigrammes qui décrivent l'algorithme pour chaque modèle dont chacun génère trois courbes donnant la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour les trois niveaux de tension.

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. Le calcul de ce modèle sous forme d'organigramme avec la déclaration des paramètres, le choix du pas d'intégration, et le facteur de correction avec la déclaration de l'équation du modèle sont exposés à la figure IV.2.

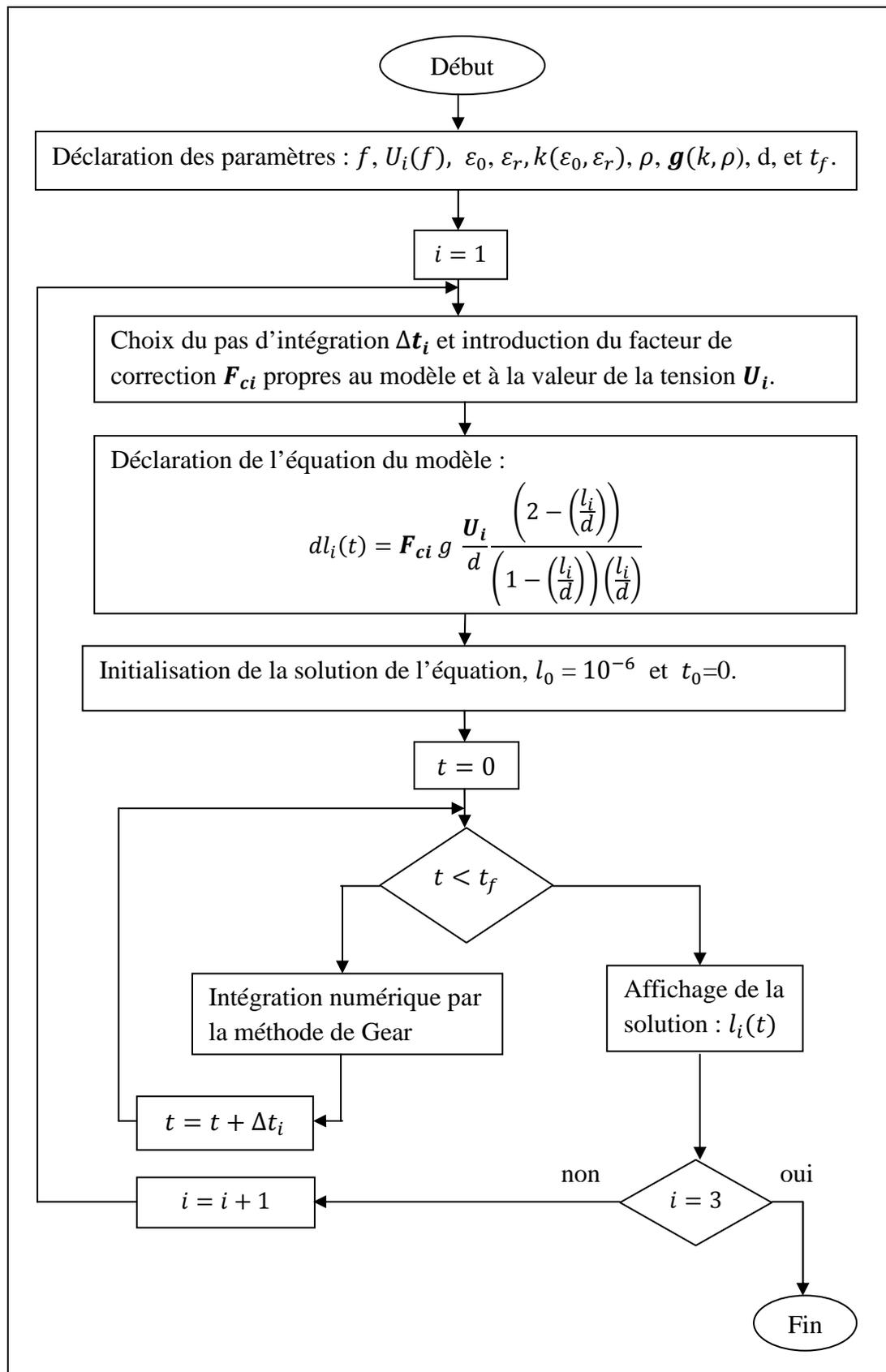


Figure IV.2 : Algorithme du modèle de la sphère tangente à la pointe P.

2. Modèle de la sphère centrée sur la pointe P

Ce modèle ne prend pas également en considération tous les paramètres qui influencent sur la cinétique de l'arborescence. La figure IV.3 présente l'algorithme de ce modèle.

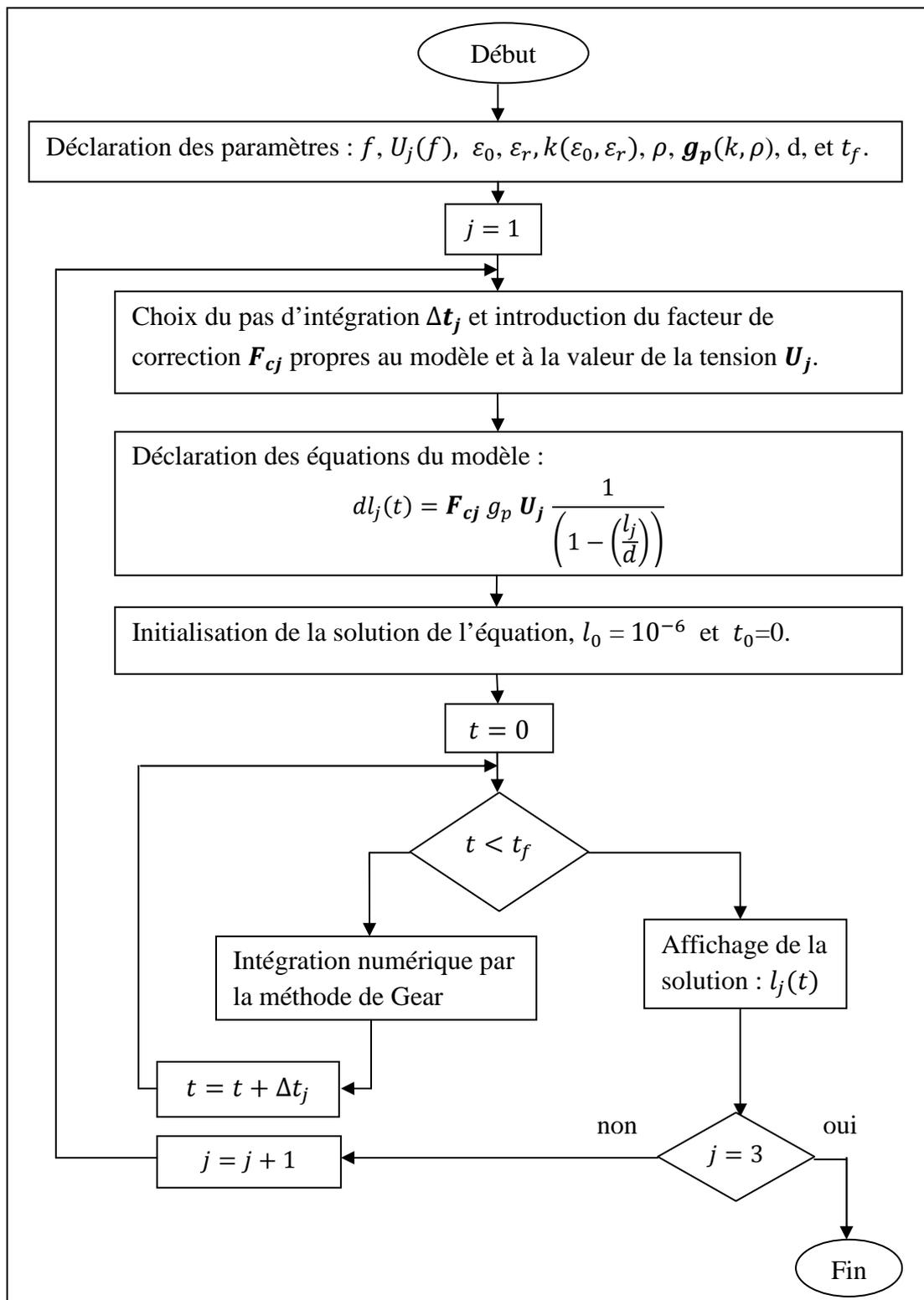


Figure IV.3 : Algorithme du modèle de la sphère centrée sur P.

3. Modèle de la sphère centrée en O

Ce modèle, par contre, tient compte du rayon de courbure de l'électrode pointe. La méthode de calcul est résumée à la figure IV.4.

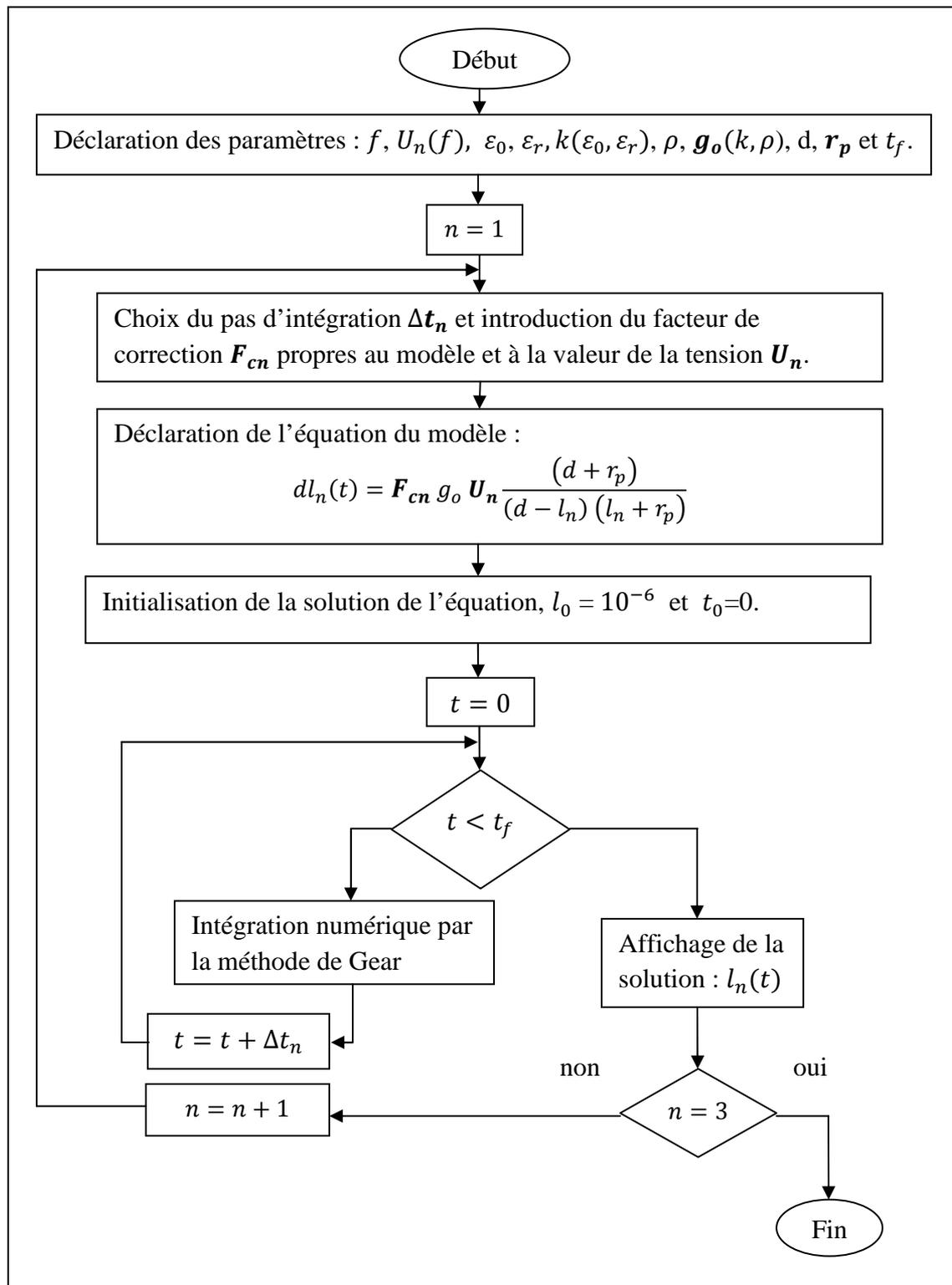


Figure IV.4 : Algorithme du modèle de la sphère centrée en O.

III. Résultats de simulation

Dans les figures VI.5-13 sont exposées les courbes de la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour chaque type de modèle et pour différents niveaux de tension : $U=12$ kV, 14 kV, et 16 kV. Les résultats ont été confrontés à ceux obtenus expérimentalement.

1. Niveau de tension de 12 kV

Les figures IV.5-7 représentent l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour les trois modèles, et pour un niveau de tension de 12 kV.

1.1. Modèle de la sphère tangente

La figure IV.5 montre la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le cas du modèle de la sphère tangente, et pour un niveau de tension de 12 kV.

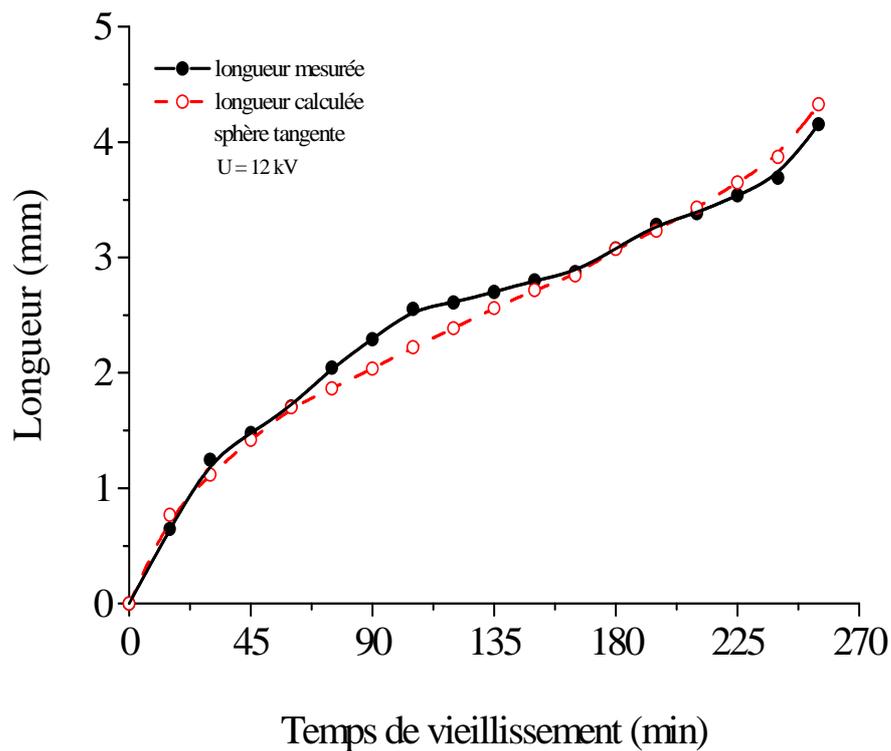


Figure IV.5 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 12 kV (modèle de la sphère tangente).

1.2. Modèle de la sphère centrée en P

La figure IV.6 expose la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour la sphère centrée en P, et pour un niveau de tension de 12 kV.

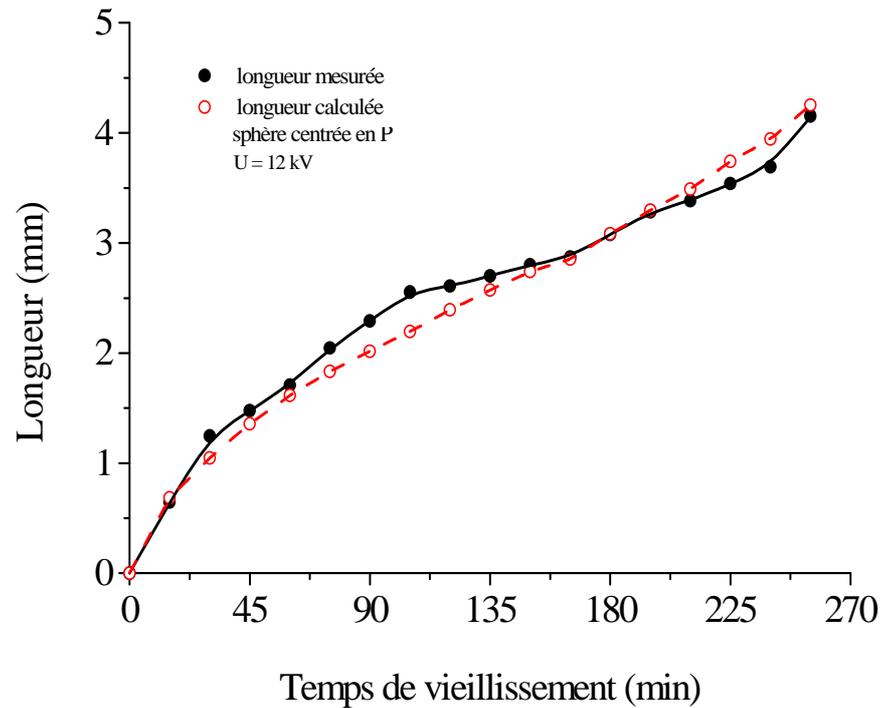


Figure IV.6 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 12 kV (modèle de la sphère centrée en P).

1.3. Modèle de la sphère centrée en O

La figure IV.7 donne l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le cas du modèle de la sphère centrée en O, et pour une tension de 12 kV.

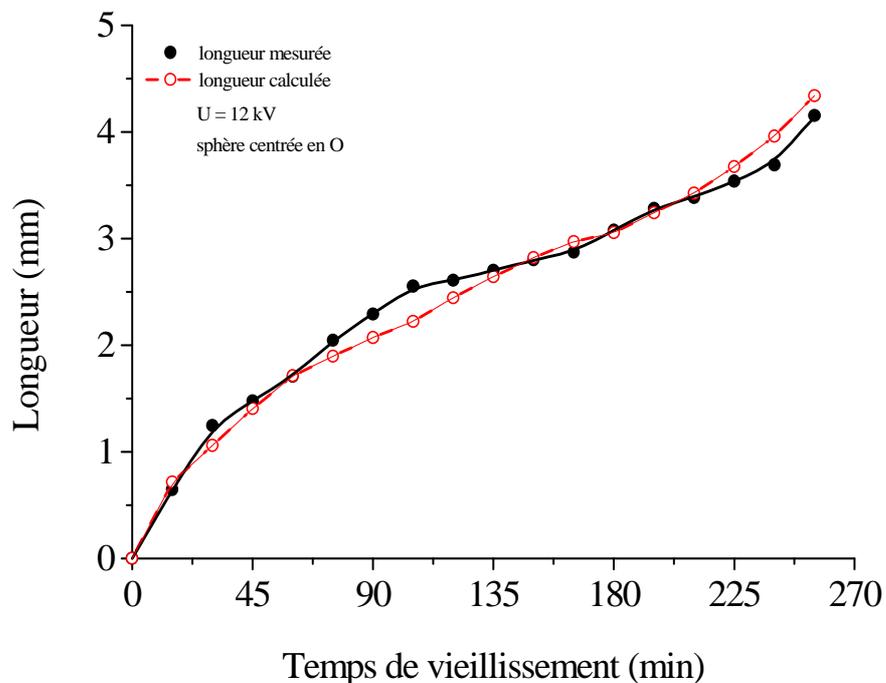


Figure IV.7 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 12 kV (modèle de la sphère centrée en O).

2. Niveau de tension de 14 kV

Les figures IV.8-10 représentent l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour les trois modèles établis, et pour un niveau de tension de 14 kV.

2.1. Modèle de la sphère tangente

La figure IV.8 expose la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le cas du modèle de la sphère tangente sur la pointe P, et pour un niveau de tension de 14 kV.

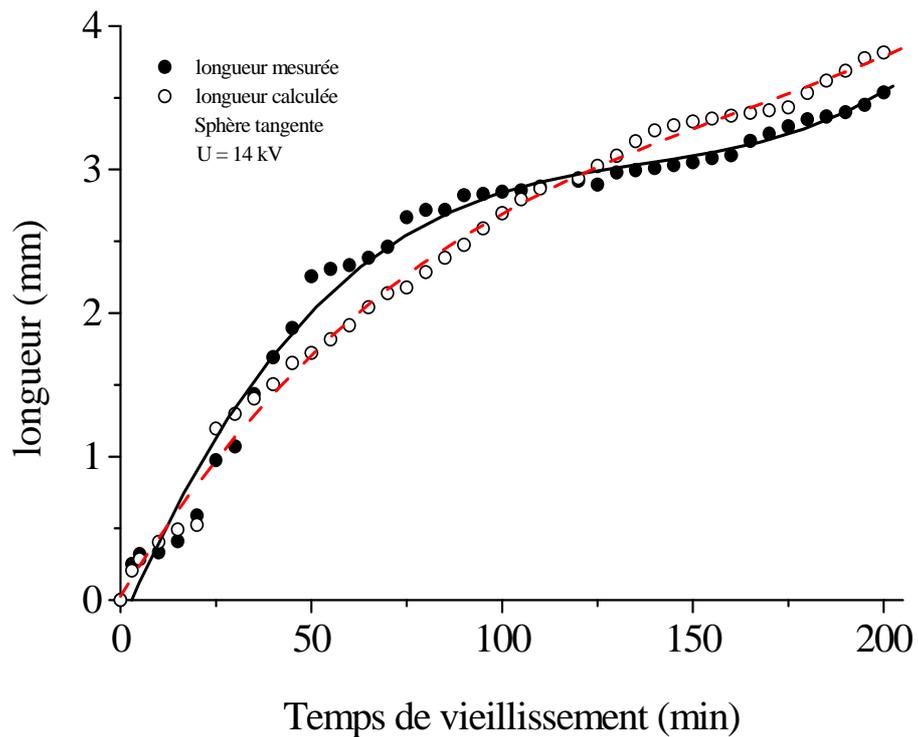


Figure IV.8 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 14 kV (modèle de la sphère tangente).

2.2. Modèle de la sphère centrée en P

La figure IV.9 représente la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le cas du modèle de la sphère centrée sur la pointe P, et pour un niveau de tension de 14 kV.

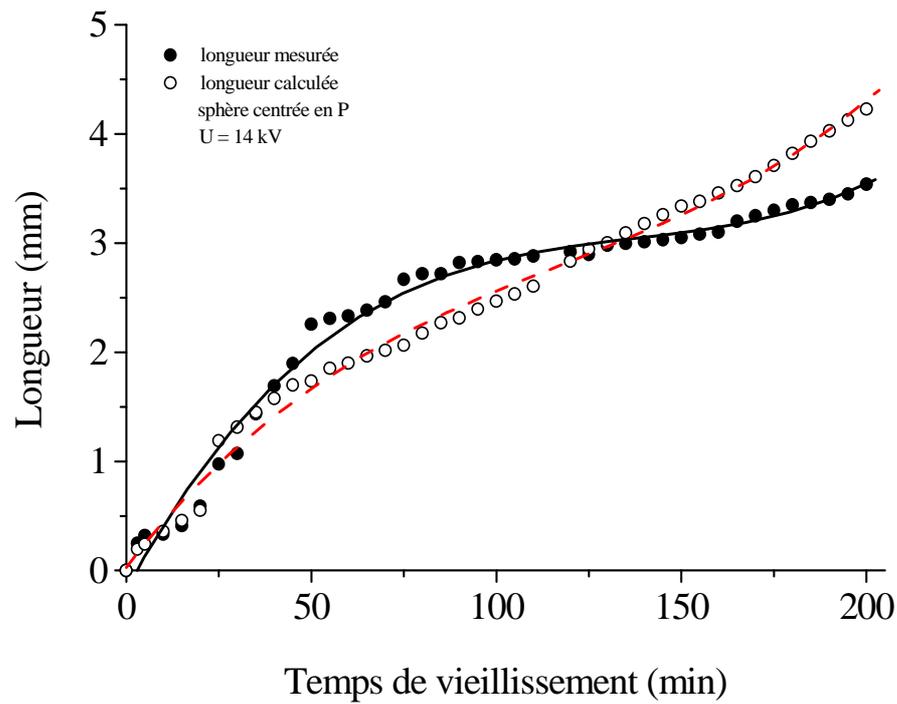


Figure IV.9 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 14 kV (modèle de la sphère centrée en P).

2.3. Modèle de la sphère centrée en O

La figure IV.10 montre l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le cas du modèle de la sphère centrée en O, et pour une tension de 14 kV.

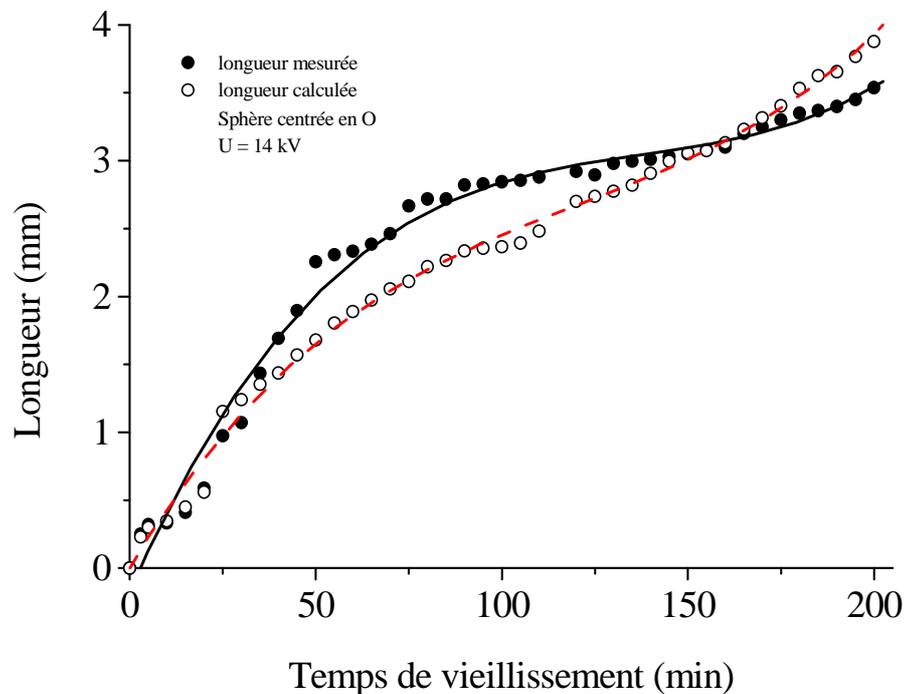


Figure IV.10 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 14 kV (modèle de la sphère centrée en O).

3. Niveau de tension de 16 kV

Les figures IV.11-13 représentent l'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour les trois modèles, et pour un niveau de tension de 16 kV.

3.1. Modèle de la sphère tangente

La figure IV.11 représente la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le cas du modèle de la sphère tangente, et pour un niveau de tension de 16 kV.

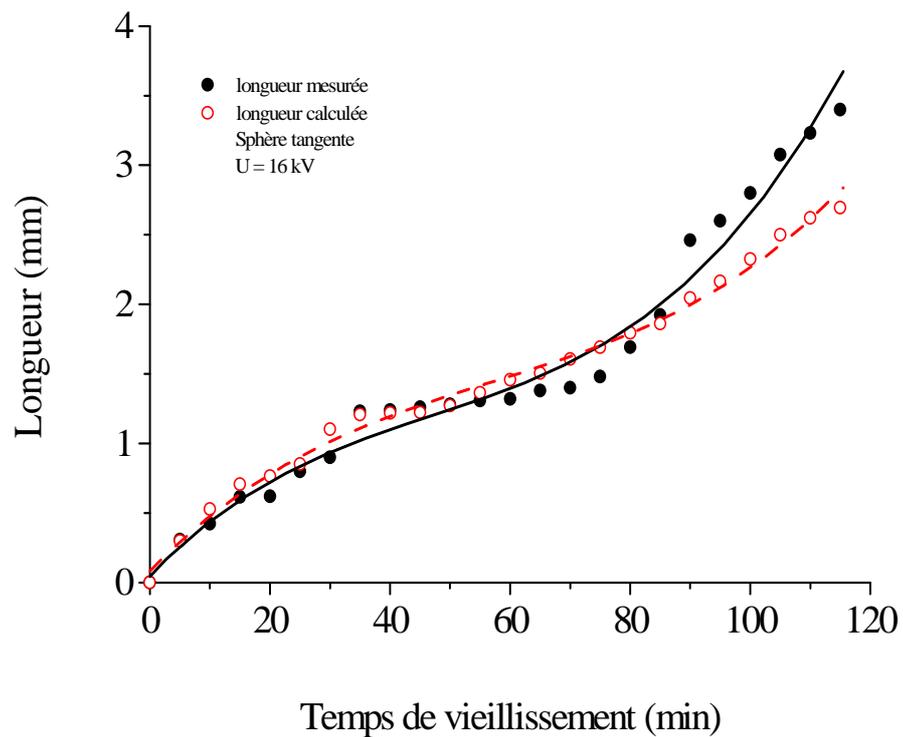


Figure. IV.11 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 16 kV (sphère tangente).

3.2. Modèle de la sphère centrée en P

La figure IV.12 représente la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement pour la sphère centrée en P, et pour un niveau de tension de 16 kV.

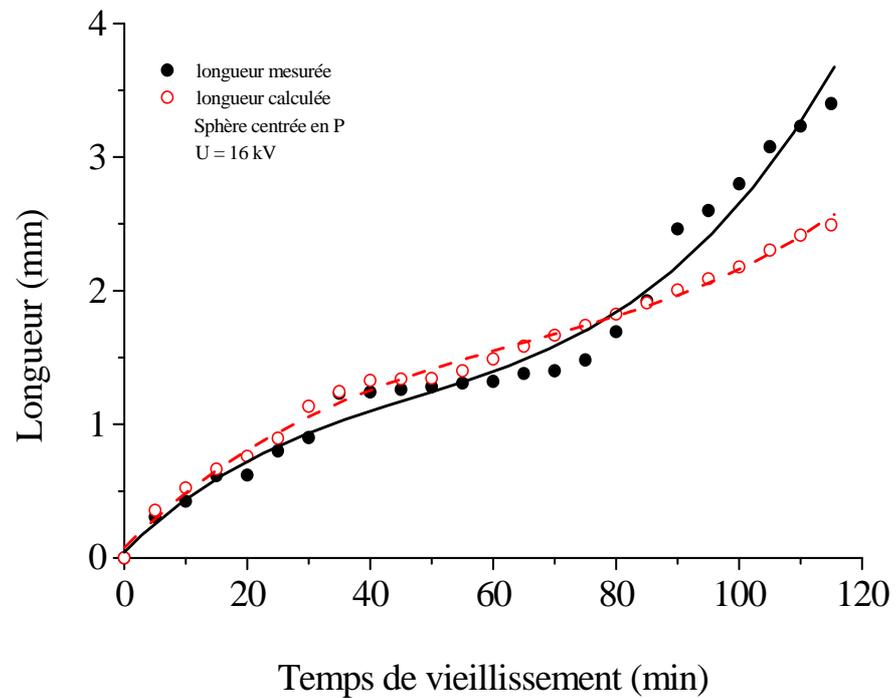


Figure IV.12 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 16 kV (modèle de la sphère centrée en P).

3.3. Modèle de la sphère centrée en O

L'évolution de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement dans le cas du modèle de la sphère centrée en O est exposée à la figure VI.13, et pour 16 kV.

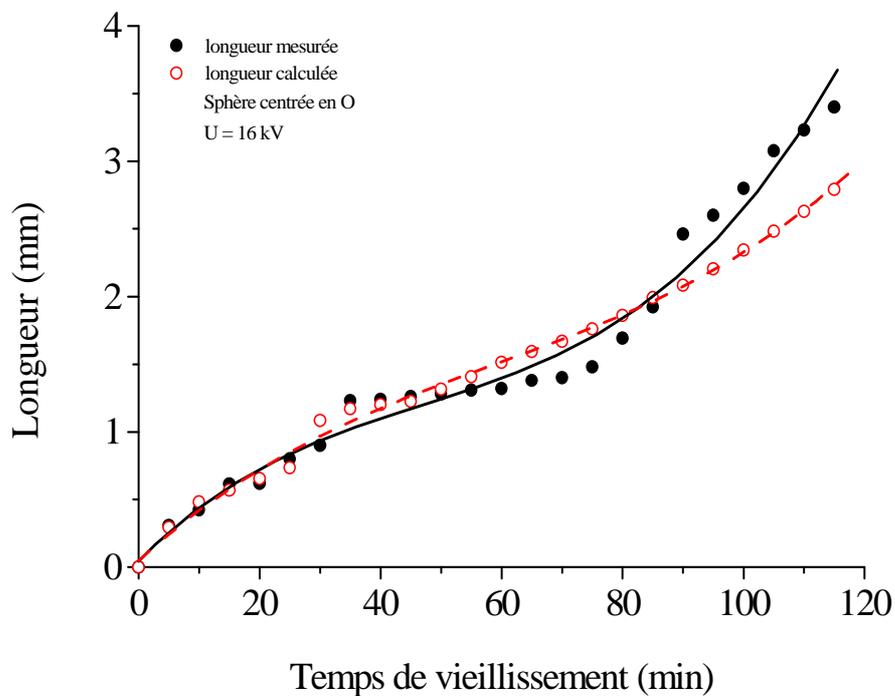


Figure IV.13 : Variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement, sous une tension de 16 kV (modèle de la sphère centrée en O).

IV. Erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et la longueur mesurée

Les figures IV.14-16 représentent l'erreur entre la longueur calculée et celle mesurée des trois modèles pour les trois niveaux de tension : $U=12$ kV, 14 kV, et 16 kV.

1. Niveau de tension de 12 kV

La figure IV.14 montre l'erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et celle mesurée pour les trois modèles établis, et pour un niveau de tension de 12 kV.

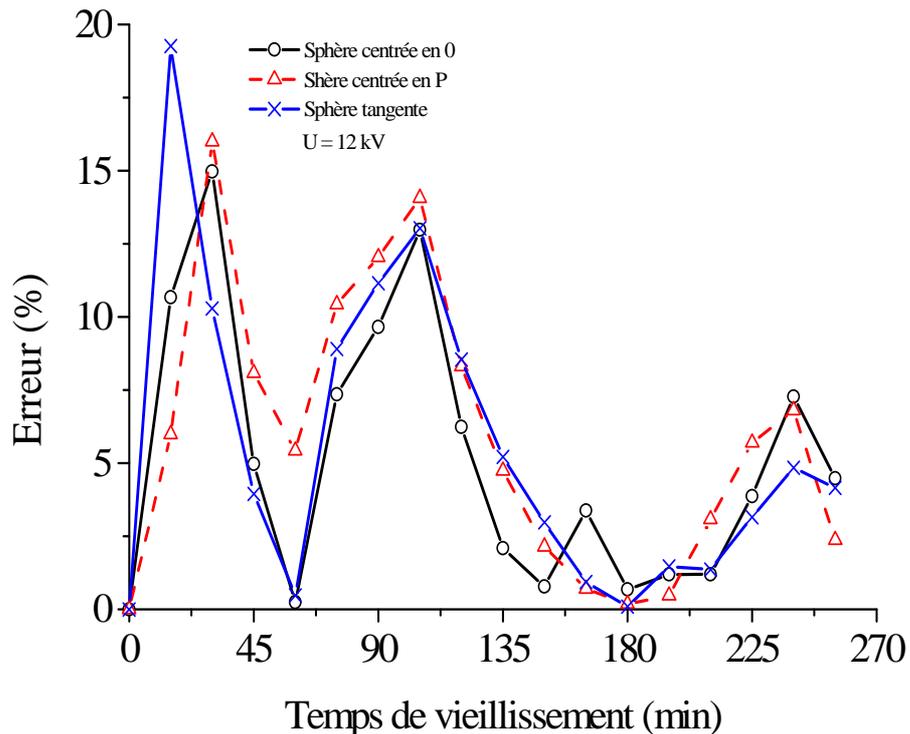


Figure IV.14 : Erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et celle mesurée pour les trois modèles pour un niveau de tension de 12 kV.

Les courbes de l'erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et celle trouvée expérimentalement pour les deux niveaux de tension 14 kV et 16 kV sont exposées par les figures IV.15-16.

2. Niveau de tension de 14 kV

La figure IV.15 représente l'erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et celle mesurée pour les trois modèles et pour un niveau de tension de 14 kV.

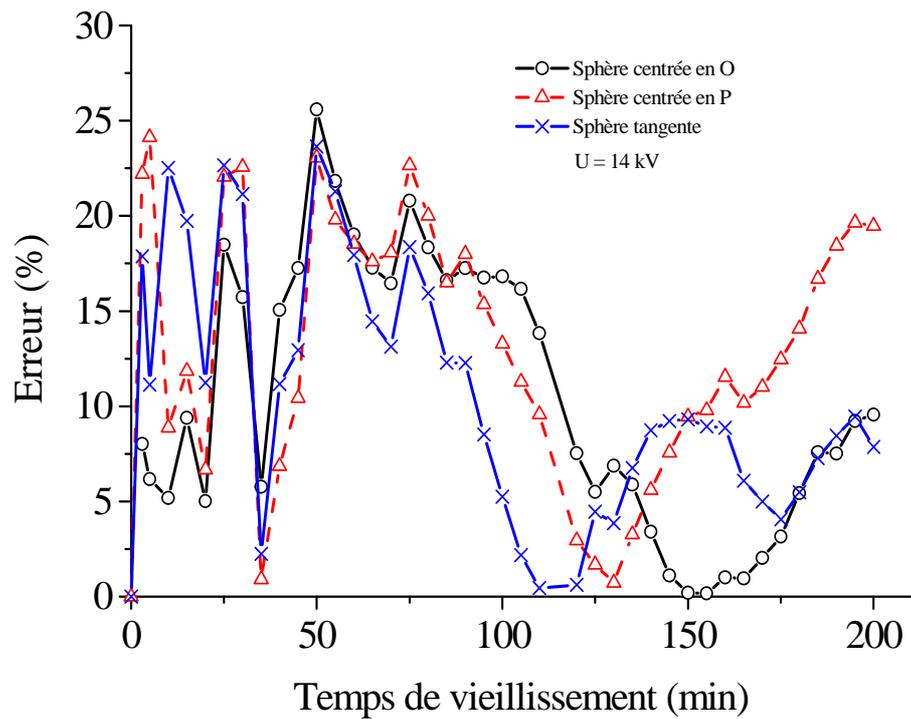


Figure IV.15 : Erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et celle mesurée pour les trois modèles pour un niveau de tension de 14 kV.

3. Niveau de tension de 16 kV

A la figure IV.16 est représentée l'erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et celle mesurée, et pour un niveau de tension de 16 kV.

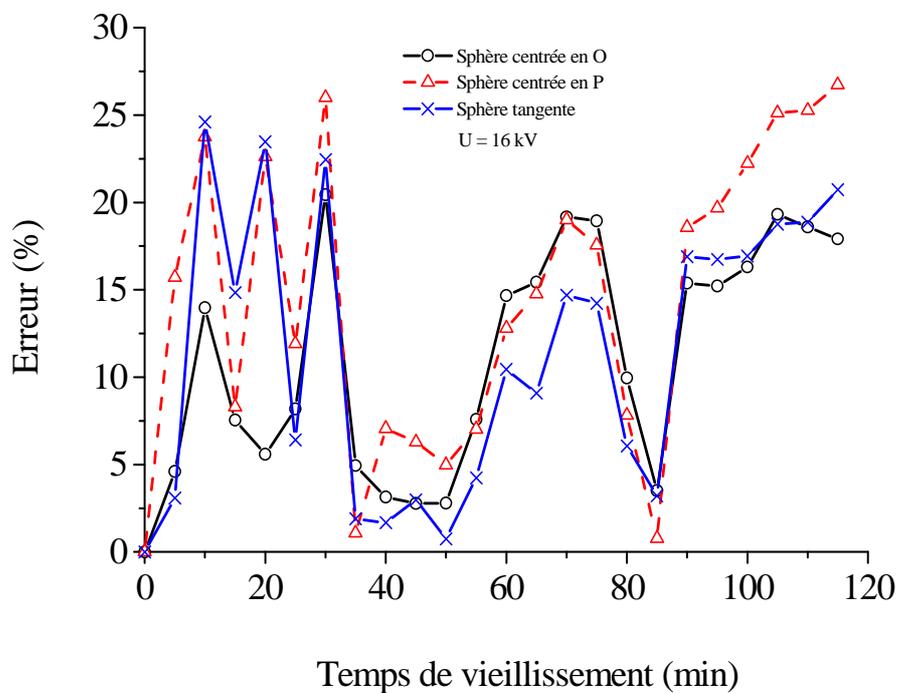


Figure IV.16 : Erreur entre la longueur de l'arborescence calculée et celle mesurée pour les trois modèles pour un niveau de tension de 16 kV.

V. Essais d'interprétation et discussion

1. Nos résultats de simulation obtenus sont en accord avec les données expérimentales. Pour les trois modèles établis, l'erreur ne dépasse pas 27%.
2. En se basant sur les trois modèles, nous ne pouvons pas conclure lequel est le mieux adapté pour décrire la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène sous tension alternative.
3. Pour les 3 niveaux de tension, l'arborescence se développe suivant 2 phases. Aux premiers stades du vieillissement, nous remarquons une croissance rapide de l'arborescence. La dernière phase est caractérisée par un ralentissement qui est plus important pour les niveaux de tension de 14 et 16 kV (palier). Au début du vieillissement, les vitesses de propagation sont : 0,6 $\mu\text{m/s}$ à 12 kV, 0,6 $\mu\text{m/s}$ à 14 kV et 0,5 $\mu\text{m/s}$ à 16 kV. Durant la deuxième phase du vieillissement, les vitesses sont 0,1 $\mu\text{m/s}$ pour les trois niveaux de tension. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles exposées dans la littérature [25,26]. Les longueurs des arborescences sont en accord avec ceux obtenus par d'autres auteurs [26]. La diminution de la vitesse de propagation est attribuée à une interaction entre les champs électriques voisins [21,30].
4. Concernant le mécanisme de développement des premiers canaux, il est généralement admis que des décharges se produisent dans les canaux rendant conducteurs le gaz qui les remplit; le champ électrique est reporté à leur pointe et provoque des claquages locaux qui les font progresser.
5. Le ralentissement de la propagation des microcanaux est dû à une augmentation de la tension d'amorçage U_i des décharges. Ce phénomène peut être décrit comme suit:
 - Pendant la première phase, la tension disponible est supérieure à U_i et les décharges s'effectuent sur toute la longueur du canal.
 - Durant la deuxième phase, lorsque les premiers canaux ont atteint une certaine longueur, telle que, compte tenu de la valeur de la pression interne de la cavité, la tension U_i devient supérieure à la tension disponible, la propagation des filaments s'arrête.
6. Les décharges partielles ont comme conséquence la décomposition du matériau d'où la création de gaz. Certains auteurs ont pu mettre en évidence la présence de plusieurs gaz dans le polyéthylène [54,55]. L'extinction des décharges peut être due à l'augmentation de la pression dans le canal. A ce stade, la vitesse diminue et on assiste à une multiplication de canaux. Ce phénomène a été rapporté par de nombreux chercheurs [56,57].

VI. Conclusion

Les résultats de ces modèles sont en bon accord avec ceux de la littérature [4, 52, 53], vu la concordance respective des allures et des échelles, bien que corrigées par un facteur de correction F_c . Il est vrai que les modèles proposés font intervenir plusieurs facteurs pouvant influencer la cinétique de propagation de l'arborescence. Cependant, certains facteurs, dont l'importance n'est pas négligeable, ne sont pas pris en considération, tels que la température, la contrainte mécanique, les rayonnements, la nature du matériau conducteur des électrodes. Ce qui a pour conséquence directe l'introduction de ces facteurs de correction traduisant l'écart existant entre l'échelle des résultats expérimentaux rapportés par la littérature qui tiennent compte de tous ces facteurs, donc se rapprochent le plus de la réalité.

Conclusion générale

Le travail, présenté dans ce mémoire, s'inscrit dans le cadre de l'étude de la dégradation des polymères utilisés dans les câbles de haute tension par le phénomène d'arborescences électriques. Une recherche bibliographique nous a permis de présenter d'abord le polyéthylène. Ensuite sont exposés les caractéristiques des arborescences électriques, les mécanismes qui les gouvernent, les paramètres qui influent sur elles, ainsi que les remèdes possibles apportés pour pallier aux problèmes sérieux qu'elles engendrent.

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 (existence d'un champ électrique au sein du polymère). 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 simulation numérique 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 de ces modèles proposés sont en parfait accord avec ceux de la littérature, et ce après l'introduction de facteurs de correction qui est une conséquence de l'abstraction de certains paramètres pouvant influencer l'évolution de l'arborescence, comme les facteurs liés à l'environnement de l'isolant tels que la température et les contraintes mécaniques.

Nos résultats montrent que l'arborescence se propage selon deux étapes. Durant la première, l'arborescence se propage rapidement. Pendant la deuxième étape, on assiste à un ralentissement de la propagation attribuée à l'augmentation de la pression des gaz de décomposition et à l'interaction entre les champs électriques voisins.

A la lumière des résultats de simulation numérique, nous n'avons pas pu porter un choix sur les modèles permettant de décrire de manière plus satisfaisante l'évolution de l'arborescence. Les caractéristiques obtenues dans le cas des trois modèles établis offrent un avantage particulier pour la description de la variation de la longueur de l'arborescence en fonction du temps de vieillissement trouvée expérimentalement.

En perspective, le travail peut être complété en introduisant d'autres paramètres tels que la température, la contrainte mécanique, les rayonnements, la nature du matériau conducteur, ... etc.

Bibliographie

-
- [1] L. Boukezzi, « Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation de câbles de haute tension », Thèse de doctorat en Génie Electrique, ENP d'Alger, 2007.
- [2] Dennis B. Malpass, « Introduction to industrial polyethylene: properties, catalysts, processes », Scrivener Publishing, New Jersey, USA, 2010.
- [3] R. Fournie, « Les isolants en électrotechnique. Essais, mécanismes de dégradation applications industrielles », Edition Eyrolles, Paris, 1990.
- [4] M. Nedjar, « Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long terme des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension », Thèse de doctorat d'état en Électrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2003.
- [5] M. Pays, « Câble de transport d'énergie. Technologie et caractéristiques », Techniques de l'Ingénieur, publication D4520, 1996.
- [6] J. Verdu, « Vieillissement chimique », Techniques de l'Ingénieur, publication A3151, 1980.
- [7] S. Fusessery, « Polyéthylène basse densité », Techniques de l'Ingénieur, publication A3310, 1996.
- [8] M. J. Blažek, « Study of the reaction kinetics of the thermal degradation of polymer », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005 .
- [9] Y. Mecheri, « Influence du mode de vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension », Thèse de Doctorat, ENP d'Alger, 2008.
- [10] M.A. Handala, « Contribution à l'étude de la propagation des arborescences Electriques dans l'EPDM », mémoire de Magister, ENP d'Alger, 1982.
- [11] N. Rouha, « Etude et modélisation de la dégradation des polymères par le phénomène d'arborescence », mémoire de Magister, ENP d'Alger, 1994.
- [12] J.P. Crine, S. Haridoss, P. Hinrichsen, H. Houdayer, G. Kajrys « Impureties in electrical trees grown in field aged cables », IEEE, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 94-100, 1998.
- [13] F. Noto, N. Yoschimura, « Initiation and growth of electrical trees in polymeric dielectric materials », IEEE, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 274-281, 1973.
- [14] 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.
- [15] N. Rouha « Caractérisation électrique et physico-chimique des arborescences électriques dans l'EPDM », Thèse de Doctorat, ENP d'Alger, 2014.

- [16] O. K. Spurr, R. M. Eichhorn, «Treeing in PE insulation power cables », Bound Brook, N. J, Technical Center, 1975.
- [17] A. Wimcholes, E. F. Steenis, « Arborescences dues à l'eau, état de la technique », Gr 15,21-02, session 29 Aout.1^{er} sept 1990.
- [18] R. M.Eichhorn, «Treeing in solid extruded electrical insulation », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-12, pp.2-18, 1977.
- [19] 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.
- [20] J. H. Mason, « Breakdown of solid dielectrics in divergent fields», Proceedings of IEE-Part B: Radio and Electronic Engineering, Vol.102, pp.725-727, 1955.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] C. Laurent, C. Mayoux « Analysis of the propagation of electrical treeing using optical and electrical methods», IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-15, N°1, pp.33-42, 1980.
- [27] F. Noto, N. Yoshimura, « Voltage and frequency dependence of tree growth in polyethylene », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.207-217, 1997.
- [28] 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.
- [29] T. W. Billing, J. H. Masson, « The effect of additives on discharge channel propagation in polyethylene », IEE Conference on Dielectric Materials Measurements and Applications, pp.93-96, 1970.

- [30] G. Baher, T. W. Dakin, J. H. Lawson, « Analyse du claquage par arborescence », Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.05.1974.
- [31] M. Nawata, H. Kawamura, M. Ieda, « Voltage and temperature dependence of treeing breakdown in plastic insulators », International Symposium of High Voltage Technology, pp.428-434, 1972.
- [32] F. Noto, N. Yoshimura, « Growth and Forms of trees in polyethylene studied using intermittent applied voltages », Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.165-170, 1972.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] B. Yoda, M. Sakaba, « Treeing degradation of high voltage polyethylene insulated cable », Hitachi Review, Vol.18, pp. 406-412, 1969.
- [37] 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.
- [38] I. Karafyllidis, M. G. Danikas, A. Thanailakis, A. M. Bruning, « Simulation of electrical tree growth in solid insulating materials », Springer - Verlag, pp. 183-192, 1998.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Rahim Ildarabi, Javad Sddeh Habib, Rajabi Mashhadi, Saeed Torabi, « A new method for simulation of electrical tree growth in solid insulating using Cellular Automata », TPE-06 3rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, pp. 829-833, Ankara, Turkey, 2006.

- [42] G. E. Vardakis, M. G. Danikas, « Simulation of electrical tree propagation using Cellular Automata: the case of conducting particle included in a dielectric in point-plane electrode arrangement », Elsevier, Journal of Electrostatics, pp.129-142, 2005.
- [43] A. El-Zein, M. Talaat, M. M. El. Bahy, « A numerical model of electrical tree growth in solid insulation », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.16, pp.1724-1734, 2009.
- [44] A. El-Zein, M. M. El. Bahy , M. Talaat ,« Types of electrical trees in solid insulation under electrical and mechanical energy basis», IEEE, 12th International Middle-East Power System Conference, pp.80-84, 2008.
- [45] L. A. Dissado, « The physicochemical basis of ageing in polymeric insulation », IEE Multifactor Ageing, IEE Colloquim, pp. 211-216, 1995.
- [46] J. C. Fothergill, « Filamentary electromechanical breakdown », IEEE, Transactions on Electrical Insulation, Vol. 26, pp. 1124-1129, 1991.
- [47] A. El. Zein, « Effect of extrusion pressure on polyethylene cable insulation treeing », 9th International Symposium on High Voltage Engineering. (ISH), pp. 1018-1-1018-4, 1995.
- [48] A. El. Zein,« Electrically induced pressure under switching operation and mechanical tensile strength as a new measurement tools of cable ageing », IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.1, pp.155-158, 1996.
- [49] A. Beroual, « Champ électrique dans un diélectrique liquide en présence de suspensions pour différentes formes de tension », ENP, Alger, Algérie, 1984.
- [50] N. Rouha, A. Beroual, C. Brosseau, « Modeling the treeing growth in solid electrical insulations», IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.750-753, 1996.
- [51] J. C. Dubois , «Diélectriques plastiques», Technique de l'Ingénieur, publication E1850, 1980.
- [52] Y. Gao, Y. D. Deng, B. X. Du, S. W. Li, N. Wang, « Electrical treeing behavior in XPPE under kHz-AC voltage », IEEE International Conference on Dielectrics, Vol.2, pp.724-727, 2016.
- [53] Minghui Bao, Xiaogen Yin, Junjia He, « Structure characteristics of electrical treeing in XLPE insulation under high frequencies », Science Direct, Elsevier, Physica B, Vol 406, pp.2885-2890, 2011.
- [54] C. Laurent, C. Mayoux, S. Noel, N.I. Sinisuka, « A study of emission lines from electrical trees », IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-18, N°2, pp. 125-130, April 1983.
- [55] D. E. Cooper, M. Farber, S. P. Harris, « Analysis of gaseous decomposition products of polyethylene exposed to high fields and partial discharges», Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 32-37, 1984.

- [56] R. Patsch, «Breakdown of polymers: tree initiation and growth», Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 323-334, 1975.
- [57] G. Löffelmacher, « The gas pressure generated in partial discharge channels in polyethylene and its effect on channel development », ETZ-A Vol.96, N°3, pp. 152-154, 1975.

Résumé : Ce travail porte sur la simulation de la propagation des arborescences électriques dans le polyéthylène dans un système d'électrodes pointe-plan, sous champ électrique alternatif 50 Hz.

Dans cette étude, nous avons proposés plusieurs modèles mathématiques de la propagation des arborescences électriques dans les polymères utilisés dans les câbles de haute tension, et 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 intervenant dans ce processus de dégradation, et cela en assimilant l'arborescence à des formes géométriques simples : sphère pour les arborescences de type buisson et canaux cylindriques pour les arborescences de type branches.

Les résultats de ces modèles sont en accord avec ceux de la littérature, et ce après l'introduction d'un facteur de correction F_c , relatif à chaque modèle, et dépendant de la forme d'arborescence considérée, ainsi qu'avec la forme et la valeur de la tension appliquée.

Mots clés : Polyéthylène, Vieillissement électrique, Décharges électriques, Arborescences

Abstract: This work aims to simulate the electrical treeing propagation in polyethylene in a point-plane electrode system, under electric alternating field (50 Hz).

In this study, we have proposed different mathematical models of electrical treeing propagation in polymers used in high voltage cables; our interest was given to models issued from the electrostatic pressure hypothesis with zero charge density.

The models describe the variation of the tree length in function of the aging time, and different factors involved in this degradation process, and this by assuming the treeing shapes to simple geometries: sphere to bush treeing and cylindrical channel to filamentary treeing.

Model results are in agreement with the literature ones, this have been done after using a correction factor F_c , related to each model, and depending of tree shape, shape and value of the applied voltage.

Key words: Polyethylene, Electrical aging, partial discharges, trees