

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



712

Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **protection et contrôle des réseaux électrique**

DÉGRADATION DES CABLE SOUSTERRAIN PAR ARBORESCENCE

Présenté par :

- FERKOUS FAISSAL
- HAIMOUD MOUHAMED

Sous la direction de : M.KACHI MILOUD

JUIN 2011



Introduction



Les câbles souterrains isolés aux polymères sont principalement employés pour le transport et la distribution d'énergie électrique. Compte tenu de l'extension rapide de l'urbanisation et pour des raisons de sécurité et d'esthétique, les sociétés de câbleries électriques cherchent toujours à fabriquer des câbles souterrains, beaucoup plus améliorés et répondant aux conditions de service.

L'adaptation d'un nouveau matériau reste toujours en question. Les caractéristiques physiques et chimiques de l'isolant du câble doivent être adaptées aux contraintes auxquelles le câble sera soumis. De plus, la validité d'une conception nouvelle ne peut être confirmée définitivement que par des résultats expérimentaux et théoriques satisfaisants.

Modéliser de façon correcte, les contraintes (arborescence d'eau, décharge partielle ..) en service normale et leurs effets à long terme sur l'isolation, sert à résoudre les problèmes des fabricants des câbles électriques.

Devant la nécessité croissante au fil des années, de voir augmenter le niveau de tension de service, le problème de tenue en température des câbles s'est trouvé posé. C'est ainsi qu'a été introduite la méthode de réticulation du produit dont le résultat est le polyéthylène réticulé Chimiquement (PRC). Bien que ce produit a été commercialisé dans les années cinquante, ce n'est qu'en 1967 que le Japon décidait d'installer le premier câble de 110 kV isolé au PRC.

Comme il est connu, pour de hautes tensions de service, les câbles isolés au Polyéthylène (PE) ont été remplacés par des câbles isolés en PRC, afin de supporter la chaleur dégagée par le conducteur. D'autres produits (éthylène propylène diène monomère (EPDM), le polychlorure de vinyle (PVC)) appartenant à la famille des caoutchoucs élastomères ont un bon fonctionnement au cours du vieillissement thermique.

Afin de mettre en évidence et de constater les phénomènes de vieillissement par arborescence d'eau, nous procédons à la modélisation des propriétés électriques des matériaux polymères utilisés dans l'isolation des câbles moyenne tension. Nous nous sommes intéressées plus particulièrement aux propriétés électriques de l'arborescence d'eau. Trois parties constituent notre travail.

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique comportant des généralités sur les câbles est les différents types des matériaux d'isolation utilisés.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation des principaux polymères utilisés dans

L'isolation des câbles (PE, PRC, PR, EPDM et le PVC), et le phénomène de dégradation par l'arborescence (d'eau, électrique, décharge partielle) et les mécanismes et processus intervenant lors du vieillissement. Ce chapitre est clôturé par une comparaison des propriétés électriques et mécaniques de ces matériaux.

Le troisième chapitre concerne la modélisation et l'analyse du câble avec défaut est la variation de la tension et la puissance de l'entrée en fonction de la longueur de l'arborescence d'eau.

Chapitre I

Technologie des câbles

Introduction

Les câbles forment une grande partie des réseaux d'interconnexion, de répartition et de distribution. La plupart des installations actuelles ont plusieurs années de service ce qui signifie que l'état des câbles est de plus en plus dégradé. Parmi les phénomènes derrière la dégradation des câbles on trouve l'arborescence électrique et l'arborescence d'eau. Ces deux phénomènes touchent l'isolation du câble avec chacun une nature différente mais partagent la même forme d'une branche d'arbre.

L'arborescence électrique est constituée de microcavités dans lesquelles se crée une décharge partielle. L'arborescence d'eau est composée de microcavités mais remplies d'eau qui se transformer en arborescence électrique si certaines circonstances sont réunies. Une fois l'arborescence électrique se développe le claquage de l'isolant devient quasiment immanent. Il s'ensuit que l'étude et la bonne connaissance de ces phénomènes est d'une importance capitale pour tout ingénieur ou technicien qui devra affronter le domaine des câbles.

Les câbles

Les câbles se composent d'un (ou de plusieurs) conducteur central, d'une isolation dont la rigidité diélectrique est élevée, la permittivité et les pertes diélectriques les plus faibles possibles et d'un manteau conducteur en général mis à la terre (Figure I.1 (b)).

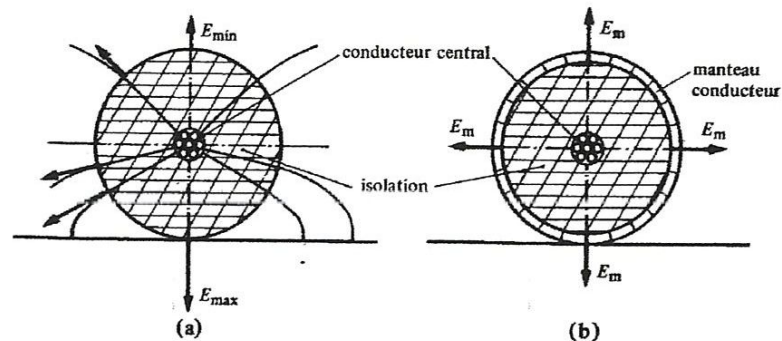


Figure I.1 : Câble unipolaire: (a) sans manteau (cette solution est à proscrire car la répartition des champs électriques est fonction du mode de pose); (b) avec manteau.

I.1 - Avantage et inconvénients des câbles

Les lignes souterraines constituées de câbles isolés offrent, en réalité, plusieurs avantages par rapport aux lignes aériennes essentiellement on cite :

- **Préservation de la nature :** Les lignes aériennes provoquent une pollution visuelle qui peut être très gênante notamment à l'approche des agglomérations et postes d'interconnexions.
- **Construction simple :** L'utilisation des câbles élimine tout support, tel que les pylônes ou chaînes d'isolateur.
- **Petites dimensions :** L'isolation synthétique, possédant de très bonnes caractéristiques diélectriques et qui sont supérieures à celle de l'air, permet de rapprocher les phases ou point de les assembler toutes en une seule gaine. D'autre part, une ligne aérienne peut occuper une distance d'environ 16 m pour le cas d'une ligne de transport à 220 kV.

Les câbles souterrains ne sont pas sans inconvénients, ils posent également quelques problèmes :

- Trop chers.
- Problème lié à la dégradation de l'isolation.

- Limitation de la longueur de transport à cause de l'excès du réactif généré par le câble lui-même, d'où une tension instable et très dépendante de la charge. De même la quantité de puissance active transportable par le câble se trouve limitée également par la circulation de la puissance réactive et l'échauffement du câble.

- Techniques spéciales pour la détection de défauts.

I.2 Catégories de câbles

Classification de câbles suivant l'isolation

On rencontre actuellement trois catégories principales de câbles à haute tension:

- les câbles isolés au papier et imprégnés;
- les câbles à isolations synthétiques;
- les câbles à isolation gazeuse.

Classification de câbles suivant la tension

I.3.1 Câble BT :

Employés pour les installations domestiques les circuits, d'alimentation des appareils de faible puissance, les réseaux de distribution basse tension, câble pour téléphonie... Il est composé d'un conducteur centrale et d'un isolant généralement du PVC.



Figure I.2 : Câble BT

1.3.2 Câble MT

Utilisé pour les réseaux de répartition MT à des distances de quelques kilomètres, ils sont installés souvent à l'entrée et dans les agglomérations et reliant généralement les transformateur MT-BT :

Liaisons dans les postes de transformation et les centrales, liaisons entre lignes aériennes et postes de transformation, liaisons aéro-souterraines.

Ils sont particulièrement adaptés aux liaisons devant fonctionner dans une température ambiante élevée, ou à proximité de sources de chaleur, ou susceptibles d'être soumises à des surcharges fréquentes ou à des courants de court-circuit élevés.

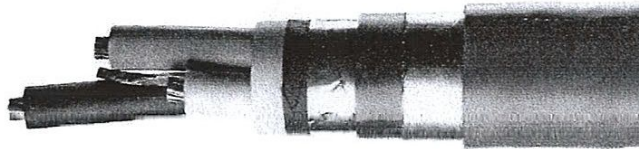


Figure I.3 : Câble MT

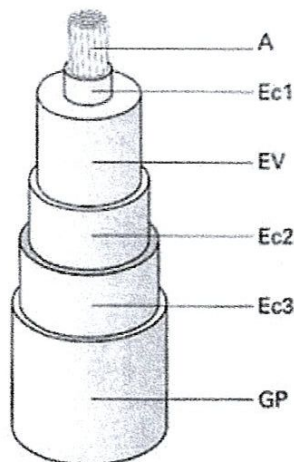
Construction :

- Ame en cuivre ou en aluminium.
- Enveloppe isolante : en polychlorure de vinyle (PVC).
- Assemblage des trois conducteurs de phases sous une gaine dite de ceinture.
- Ecran dont la partie métallique est constituée d'un ruban en cuivre de 0,1 mm d'épaisseur enroulé en hélice.
- Dans le cas des câbles armés :
 - gaine intérieure de séparation.
 - armure formée de deux feuillets en acier, enroulés en hélice.
- Gaine extérieure : rouge en PVC.

1.3.3 Câble HT

Les réseaux souterrains moyenne tension et haute tension sont de même composition, (Figure I.4)

Câble HT utilisé pour les réseaux de transport à haute tension.



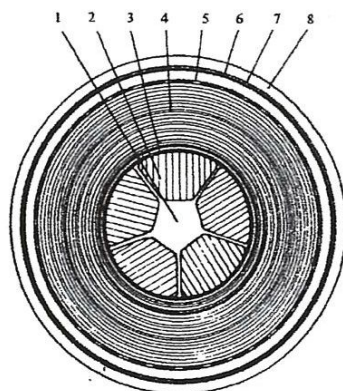
- A âme en cuivre ou en aluminium
- Ec1 écran semiconducteur sur âme
- Ec2 écran semiconducteur sur isolant
- Ec3 écran métallique en plomb, en cuivre ou en aluminium
- EV enveloppe isolante en polyéthylène basse ou haute densité ou réticulé
- GP gaine de protection extérieure en polychlorure de vinyle ou en polyéthylène

Figure I.4 : Câble HT

I.4. L'isolation

I.4.1. Câbles isolés au papier et imprégnés

Un tel câble est constitué d'un conducteur central en cuivre ou en aluminium, formé par une corde, ou d'un conducteur tubulaire qui peut, dans ce cas, être parcouru par un flux d'huile de refroidissement



- | | |
|---|---|
| 1 conduit d'huile | 5 écran Hôchstädter et papier semi-conducteur |
| 2 conducteurs sectoriels | 6 manteau de plomb |
| 3 papier semi-conducteur et écran amagnétique | 7 armure de pression |
| 4 isolation | 8 manteau synthétique |

Figure I.5 : Coupe d'un câble unipolaire 220 kV, à isolation papier huile.

1.4.2 Câble à isolation synthétique :

Ces câbles sont constitués par un conducteur central formé par une corde de cuivre ou d'aluminium. Une couche de matière semi-conductrice est déposée à la surface du conducteur pour limiter et homogénéiser le champ électrique, et ceci afin de réduire le risque de destruction lente de l'isolant et tôt ou tard sa perforation. Ce matériau, situé à mi-chemin entre un conducteur et un isolant, est constitué par du noir e carbone mélangé à un copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle (résistivité transversale mesurée en courant continu $\rho \approx 5 \cdot 10^{-2} \Omega m$).

Le même problème se posant sur la surface interne du manteau du câble formé par un guipage de bandes de cuivre ou d'aluminium, on est contraint de déposer une couche de semi-conducteur.

Les tensions sont limitées par la présence d'inclusions d'air et d'impuretés à l'intérieur de l'isolation synthétique lors de l'extrusion sur les câbles, abaissant la rigidité du diélectrique. Des recherches ont permis, par exemple, de mettre au point un polyéthylène dit réticuler, imprégné d'hexafluorure de soufre(SF6) supposant des champs électriques maximaux de l'ordre de 20kv/mm. Les câbles ainsi isolés supportent des tensions de l'ordre de 225kv.

1.4.3 Câble à isolation gazeuse :

Les câbles à isolation gazeuse comprennent deux (2) tubes coaxiaux, le tube intérieur étant centré au moyen de viroles en résine époxy.

L'isolation est obtenue au moyen d'un gaz possédant de bonnes caractéristiques diélectriques comme l'hexafluorure de soufre. La rigidité diélectrique du SF6 est de l'ordre de 10kv/mm, c'est-à-dire environ 3 fois la rigidité diélectrique de l'air aux conditions normales (pression 760mmHg, température 20°C, humidité absolue 11gr/m3).

1.5. Matériau et construction du câble MT

1.5.1. Matériaux et constitution

a. conducteur : les matériaux conducteurs le plus souvent utilisés pour les câbles sont le cuivre et l'aluminium.

Cuivre : cuivre électrolytique pur recuit dans le cas le plus général des câbles étamé lorsque il est recouvert d'un isolant vulcanisé au soufre l'étamage facilite les soudures.

Aluminium : le recuit est effectué afin d'éviter l'oxydation du métal et donner un léger écrouissage correspondant à la qualité ¾ dur. Les conducteurs d'aluminium se substituent progressivement aux conducteurs cuivre.

b. Semi conducteur : Le semi conducteur a pour but de remplir les interstices entre les conducteurs afin de donner au câble une forme cylindrique

C. isolant : on distingue d'une part le papier imprégné (PI), d'autre part les isolants synthétiques. Avant l'apparition des isolants synthétiques, la technologie du papier imprégné régnait dans le domaine des câbles, à plus forte raison dès l'apparition de câbles à masse huileuse non migrante. Depuis une quarantaine d'années, les câbles en PI sont fortement concurrencés par les isolants synthétiques dont les qualités et les performances ne cessent d'augmenter.

d. Armures :

C'est la protection contre les chocs. Les armures peuvent aussi jouer le rôle d'écran pour l'écoulement des courants de court-circuit. Les armures sont toujours métalliques ; elles peuvent être réalisées de différentes façons :

- armure en feuillards d'acier

Le feuillard est une bande de 0,2 mm, 0,5 mm ou 0,8 mm d'épaisseur suivant le diamètre du câble, et de largeur comprise entre 20 et 50 mm. On pose généralement 2 feuillards à déjoint, le deuxième recouvrant l'espace laissé libre par le premier (généralement 1/3 de la largeur). Les feuillards peuvent être galvanisés ou nus.

- armure en feuillards d'aluminium

Identique au type ci-dessus mais en alliage d'aluminium. Elle est utilisée sur les mono conducteurs, pour éviter les pertes dues aux courants de Foucault. Elle peut jouer le rôle d'écran.

- armure en fils d'acier galvanisé

Pour réaliser ce type d'armure, on enroule autour du câble un certain nombre de fils d'acier galvanisé, dont le diamètre est compris entre 1 et 3 mm suivant le diamètre du câble. Ce type d'armure est utilisé en France par les Houillères (Câbles de Mines) ou sur des câbles sous fluviaux. C'est une armure lourde, elle renforce les câbles aussi bien latéralement que longitudinalement.

e. Ecrans :

Les écrans ou blindages ne sont pas destinés à la protection mécanique mais à la protection électrique. Ils sont constitués de 1 ou 2 rubans de cuivre ou d'aluminium enroulés en hélice, ne laissant aucun espace libre, ou par une nappe de fils électriquement réunis par une contre spire en ruban. Ils peuvent être également réalisés par une tresse en fils de cuivre.

Le rôle des écrans peut être différent suivant les types de câbles :

- faire barrière aux champs électrostatiques extérieurs aux câbles ;
- répartir équipotentiellement le champ électrique à l'intérieur du câble (câble MT ou HT à champ radial) ;
- écouler les courants capacitifs ainsi que, en cas de défaut, le courant de court-circuit homopolaire

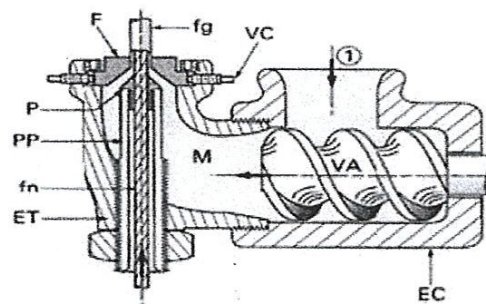
f. Gaine externe : en PVC ou PE

Du polychlorure de vinyle (PVC), ou du polyéthylène (PE), chaque un est très employé pour ses bonnes caractéristiques : électriques, mécaniques, de tenue au froid et au vieillissement thermique, de résistance à l'eau et aux produits chimiques courants ainsi qu'à la propagation de la flamme.

1.6 La fabrication des câbles électriques

La fabrication d'un câble complexe comporte de nombreuses opérations. La fabrication d'un conducteur (âme et enveloppe isolante) nécessite deux opérations principales :

- **l'extrusion**, qui va disposer la matière isolante autour de l'âme conductrice
- **la réticulation**, qui va faire polymériser et durcir la matière isolante.



EC	corps d'extrudeuse	M	mélange à extruder
ET	tête d'extrudeuse	P	poinçon
F	filière	PP	porte-poinçon
fn	fil nu	VA	vis d'alimentation
fg	fil gainé	VC	vis de centrage

La flèche ① correspond à l'entrée du mélange isolant dans la vis

Figure. I.6 : Machine à vis sans fin (extrudeuse) pour isolation des conducteurs

1.6.1 Polychlorure de vinyle (PVC)

Le PVC ($[-CH_2-CHCl-]_n$) est, en général, mélangé avec des plastifiants et des charges appropriés, de façon à donner une matière thermoplastique isolante, difficilement inflammable, insensible à l'ozone, résistant aux huiles, aux solvants, aux acides et absorbant peu l'humidité. Ce matériau est sensible à la diffusion éventuelle d'additifs provenant des constituants adjacents (gaines, bourrages). (0)

Il sert comme isolant pour la filerie et les câbles d'installation intérieure.

Sa permittivité, sa résistivité thermique et, surtout, son facteur de pertes diélectriques est relativement élevé. Cette dernière caractéristique, en particulier, a limité l'emploi du PVC aux tensions inférieures à 10 ou 15 kV, domaine dans lequel on apprécie sa résistance aux décharges partielles : il est moins sensible à ces dernières que les autres matériaux, et, en particulier, a tendance à s'oxyder en surface.

1.6.2 Polyéthylène (PE)

Polymère d'éthylène ($[-CH_2-CH_2-]_n$) fabriqué par divers procédés de haute et basse pressions, avec des masses moléculaires très diverses, il s'oxyde très rapidement, est inflammable et peu hygroscopique.

Les procédés hautes et basses pressions permettent d'obtenir respectivement des polyéthylènes basse densité et haute densité.

Les excellentes propriétés électriques du PE [rigidité diélectrique élevée, pertes diélectriques et permittivité faibles] le font largement utiliser dans les câbles d'énergie jusqu'à la tension de 500 kV. Sa résistivité thermique est, de plus, nettement plus faible que celle du papier imprégné et donne ainsi la possibilité de réaliser un refroidissement forcé externe efficace. On ajoute au PE un antioxydant de protection.

1.7. Matériaux isolants

La différence majeure entre câble et conducteur réside dans le fait qu'un câble représente l'ensemble du système conducteur isolant. L'isolation dans le cas des câbles, comme tout autre appareil électrique, joue un rôle décisif dans la détermination des performances du câble et de sa durée de vie.

Un isolant est un matériau de très grande résistivité ($\rho \approx 10^{17} \Omega \cdot m$) et ainsi seul un faible courant parvient à le traverser que l'on qualifié de courant de fuite. Physiquement et du point de vue conduction, la grande résistivité des isolants vient de la largeur de la bande interdite qui est dans ce cas très large

comparativement au conducteur et au semi-conducteur. En effet, le diagramme de la bande d'énergie classe les matériaux en trois catégories :

Conducteurs : Pour ce type de matériau une faible énergie (une tension) permet le déplacement des charges, ce qui correspond à une très faible bande interdite où la bande de valence et de conduction se chevauchent (Figure I.7.a).

Semi-conducteurs : dans le cas d'un semi-conducteur la bande interdite est autour de 1eV.

Isolants : les isolants possèdent une large bande interdite (environ au delà de 3eV) d'où la nécessité de d'une très grande tension pour provoquer la conduction d'un faible courant.

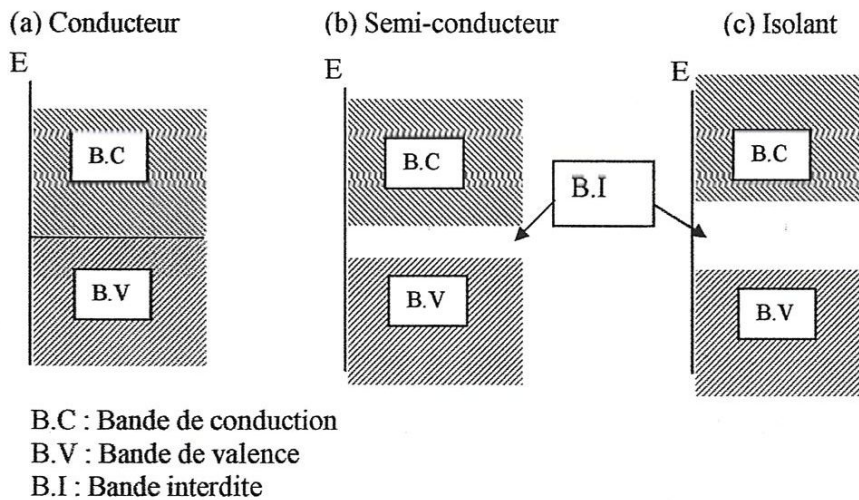


Figure. I.7 : le diagramme de la bande d'énergie

I.7.1.Polarisation d'un matériau isolant

Les matériaux isolants ou diélectriques sont susceptibles de se polariser formant macroscopiquement un dipôle électrique (charges positive et négative séparées par une distance). Ce phénomène de polarisation est dû à l'orientation des charges liées et molécules composant le matériau. Ainsi on distingue plusieurs types de polarisation :

Polarisation électronique : la polarisation électronique résulte de la déformation des nuages électroniques sous l'action d'un champ électrique.

Polarisation ionique : elle résulte de la déformation du réseau cristallin sous l'action d'un champ électrique. Il se produit un déplacement mutuel des ions constituant la molécule.

Polarisation d'orientation : la polarisation d'orientation résulte de la tendance qu'ont des molécules polaires à s'orienter dans le sens du champ électrique.

On caractérise le pouvoir de polarisation P d'un matériau vis-à-vis d'un champ électrique appliqué E par $P = \epsilon E$, où ϵ est un scalaire appelé permittivité du matériau. Le tableau ci-dessous montre la permittivité relative de quelques matériaux.

Matière	Permittivité ϵ
Eau	80
Polyéthylène – PE	2.3 – 2.5
Polychlorure de vinyle – PVC	5 - 8

I.7.2. Diélectrique en régime variable

En régime harmonique (sinusoïdale) l'orientation des molécules ne peut pas suivre les variations du champ et se produit alors un déphasage entre le champ appliqué et l'orientation des molécules. Dans ce cas la permittivité devient une grandeur complexe fonction de la fréquence du champ telle que : $\epsilon = \epsilon' + j\epsilon''$. L'angle de déphasage δ entre la partie réelle et imaginaire est appelé angle de perte. On caractérise de ce fait les pertes diélectriques dues à ce déphasage par la tangente de l'angle ($\tan(\delta)$).

Si la polarisation est variable dans le temps $P(t)$, un courant de polarisation J_p s'ajoute au courant de conduction (dc fuite), où $J_p = dP(t)/dt$. Par conséquent en régime alternatif le courant de polarisation augmente avec la polarisabilité du matériau (nature polaire des molécules) et la fréquence de la tension appliquée.

En régime variable les pertes diélectriques résultent de la polarisation augmentent la température de l'isolant, qui peut s'ajouter à l'échauffement due aux courants de conduction, et si elle est assez élevée le matériau peut claquer thermiquement (paragraphe suivant).

I.7.3. Vieillessement et mécanisme de claquage

Un isolant est susceptible de vieillir et voit ses caractéristiques se dégrader. En état dégradé, l'isolant peut conduire des courants de fuite de plus en plus importants et ainsi s'échauffer d'avantage. D'autre part sa permittivité peut augmenter et en conséquence les pertes diélectriques rendant le claquage thermique plus probable.

Le claquage est l'aboutissement d'une série de processus complexes et interactifs. Assez souvent, l'un des mécanismes est prédominant. On distingue le claquage intrinsèque du matériau qui est lié à des phénomènes électroniques ou mécaniques et le claquage pratique qui survient au voisinage d'un défaut ou par suite d'une dégradation progressive du matériau. Les valeurs de rigidité diélectrique intrinsèque des matériaux isolants nobles atteignent plusieurs centaines de kV/mm, voire 1MV/mm, alors qu'en pratique

elle est limitée à quelques dizaines de kV/mm. On trouve à travers la littérature les mécanismes de claquage suivants :

- Claquage électronique
- Claquage thermique
- Electromécanique

Cependant on pratique l'isolation solide peut être perdue à cause des défauts et mécanismes tel que :

- inclusions gazeuse et solides
- forme pointue des électrodes
- décharges partielles et décharge superficielles
- Arborescence électrique ou électrochimique.

Chapitre I I

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

Introduction

L'utilisation depuis les années cinquante, des produits synthétiques dans l'isolation des câbles moyenne et haute tension a hautement facilité le transport de l'énergie électrique. Ces nouveaux produits, en particulier le polyéthylène (PE) et le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC), ont montré un meilleur comportement dans les câbles des réseaux, comparés à ceux isolés au papier imprégné d'huile. Cette isolation, extrudée à base de polyoléfines, élimine le problème de migration des matières d'imprégnation, augmente la température admissible après un court circuit en moyenne tension (MT) et écarte surtout le problème de la maintenance. En revanche, les études faites sur la tenue de l'isolation synthétique des câbles de haute tension (HT) alternatives montrent que la rupture des matériaux polymères est due, soit à la présence des cavités ou impuretés au sein du matériau, soit au vieillissement dans un intervalle de temps, suite à des contraintes électriques et thermiques de service. L'utilisation du PE a été limitée, dès les années soixante, aux basses et aux moyennes tensions (MT, BT). Quant au PRC, il reste présent dans tout type de réseau BT, MT et surtout dans les réseaux HT. Cependant, son utilisation vaste n'élimine pas ces inconvénients. Le plus important d'eux est la porosité et la teneur en eau qui est les plus importantes relativement au PE. En effet, et même avec le meilleur procédé de réticulation sèche.

II.1 Les différents matériaux d'isolation utilisés dans les câbles :

On utilise plusieurs matériaux dans la fabrication des isolations comme :

- isolant à papier imprégné
- isolant synthétique
- isolant à gaz comprimé.

II.1.1 Papier imprégné

Pendant des décennies, le papier imprégné d'huile a été l'isolant le plus employé. En France, il n'est plus utilisé pour les liaisons sous tensions alternatives terrestres quelle que soit la tension de service, mais de nombreux réseaux de câbles réalisés avec ce type d'isolant sont encore en service. De tels câbles sont encore fabriqués dans certains pays.

II.1.2 Polychlorure de vinyle (PVC)

Le PVC $[-CH_2-CHCl-]_n$ est, en général, mélangé avec des plastifiants et des charges appropriés, de façon à donner une matière thermoplastique isolante, difficilement inflammable, insensible à l'ozone, résistant aux huiles, aux solvants, aux acides et absorbant peu l'humidité. Ce matériau est sensible à la diffusion éventuelle d'additifs provenant des constituants adjacents (gaines, bourrages).

Il sert comme isolant pour la filerie et les câbles d'installation intérieure.

On peut remarquer que la permittivité, la résistivité thermique et, surtout, le facteur de pertes diélectriques est relativement élevé. Cette dernière caractéristique, en particulier, a limité l'emploi du PVC aux tensions inférieures à 10 ou 15 kV, domaine dans lequel on apprécie sa résistance aux décharges partielles : il est moins sensible à ces dernières que les autres matériaux, et, en particulier, a tendance à s'oxyder en surface.

II.1.3 Polyéthylène (PE)

Polymère d'éthylène $[-CH_2-CH_2-]_n$ fabriqué par divers procédés de haute et basse pressions, avec des masses moléculaires très diverses, il s'oxyde très rapidement, est inflammable et peu hygroscopique.

Les procédés hautes et basses pressions permettent d'obtenir respectivement des polyéthylènes basse densité (PEbd, $d=0,91$ à $0,93$) et haute densité (PEhd, $d=0,94$ à $0,96$).

Les excellentes propriétés électriques du PE [rigidité diélectrique élevée, pertes diélectriques et permittivité faibles (tableau2)] le font largement utiliser dans les câbles d'énergie jusqu'à la tension

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

de 500 kV. Sa résistivité thermique est, de plus, nettement plus faible que celle du papier imprégné et donne ainsi la possibilité de réaliser un refroidissement forcé externe efficace. On ajoute au PE un antioxydant de protection.

II.1.4 Polyéthylène réticulé (PR)

Le PR possède sensiblement les mêmes qualités électriques que le polyéthylène, mais de meilleures qualités thermiques. La réticulation peut être obtenue par différents procédés. La mise en oeuvre de charges minérales dans le PR améliore le comportement mécanique à la température de fusion, mais diminue les propriétés diélectriques. En France, le PR s'est généralisé, pour le moment, dans les réseaux jusqu'aux tensions de 90 kV.

II.1.5 Caoutchouc éthylène propylène :

Il s'agit de EPR (éthylène -propylène rubber), de EPM (*éthylène -propylène -matériel*) et de EPDM (éthylène -propylène diénomère).

Copolymère ou ter polymère d'éthylène propylène, réticuler par voie chimique, ce matériau présente une excellente résistance à l'ozone et aux intempéries, et une grande souplesse.

Par ailleurs, on doit souligner son excellente résistance aux décharges partielles et superficielles ainsi qu'aux radiations ionisantes.

Ce matériau est surtout réservé aux applications spéciales, telles que les câbles souples BT et HTA, où il s'est substitué au caoutchouc butyle.

II.1.6 Caoutchouc de silicone

Obtenu par polymérisation de dérivés du siloxane, il résiste bien à l'ozone, à la lumière, à la chaleur, aux huiles et il est utilisable entre -80°C et $+250^{\circ}\text{C}$. C'est un bon isolant, se transformant,

II.2 Propriétés de l'isolation polymères :

Parmi les polymères utilisés dans la fabrication des câbles et qui répondent le mieux aux exigences industrielles, le Polyéthylène (PE), le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC), l'Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM) et le polychlorure de vinyle (PVC) sont les mieux adaptés.

II.2.1. Les Polyéthylènes (PE) :

Les polyéthylènes (PE) sont obtenus par polymérisation de l'éthylène $\text{CH}_2=\text{CH}_2$, en présence de catalyseurs, dans certaines conditions de température et de pression. La molécule du polyéthylène peut présenter des ramifications qui provoquent une diminution de la densité du matériau et de sa cristallinité (Figure 2.1):

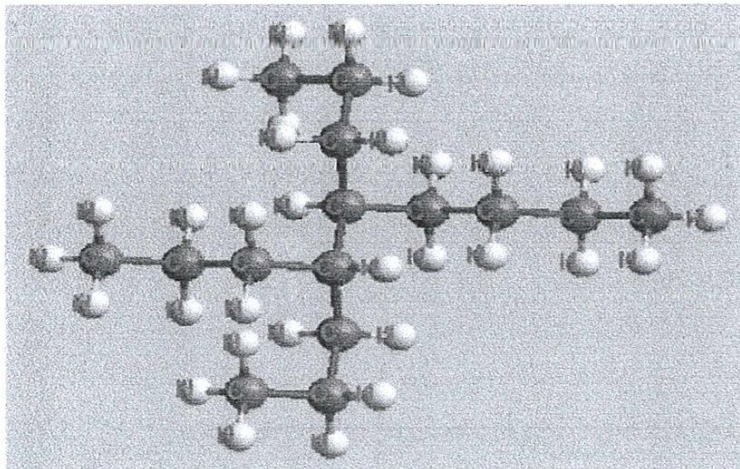
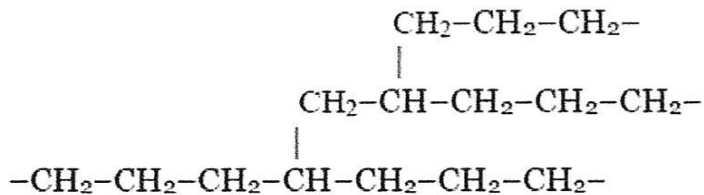


Figure 2.1 : Molécule de PE ramifiée

Cette polymérisation peut être obtenue:

- Soit à haute pression (3000 bars) et à température élevée (400°C).

Les polyéthylènes obtenus sont dits à haute pression ou basse densité (PEBD)

- Soit à basse pression (50 bars) et à une température inférieure à 180°C .

Les polyéthylènes obtenus sont dits à basse pression ou haute densité (PEHD).

Le PEBD continue d'être largement utilisé dans la fabrication des câbles en raison de son faible coût et la facilité de sa mise en œuvre. De surcroît, le PEBD est électriquement meilleur que le PEHD. Par contre, sa faible résistance thermique limite assez sévèrement son emploi, lorsqu'on l'utilise en haute tension où la température dans l'âme du câble peut dépasser 90°C. Notons que le PEBD est un produit thermoplastique qui se ramolli et devient déformable vers 80°C et fond vers 100°C. Malgré

de constant progrès dans la recherche, additif et de stabilisant, les câbles isolés au PEHD ne sont utilisés couramment que dans la gamme de 60 à 132kV. Une meilleure performance est réalisée pour des câbles de service à isolant en PEBD, réalisée en France par la firme SILEC, où la tension de service atteint 225kV.

II.2.2. Le polyéthylène réticulé chimiquement (PRC) :

II.2.2.1. Mise en oeuvre du PRC:

Le PRC est obtenu à la base du PE, le procédé le plus utilisé consiste à incorporer du peroxyde de décumyl (Figure 2.2) à une teneur de 2% dans le PE, avant ou pendant l'extrusion puis à soumettre le mélange à une température supérieure à 150°C sous une pression de vapeur d'eau ou d'azote.

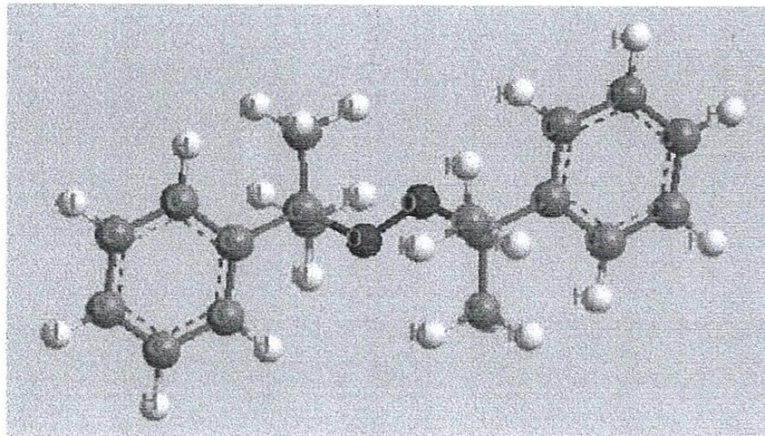
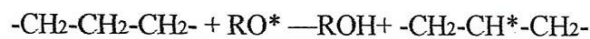


Figure 2.2: Structure moléculaire du peroxyde de décumyl

Lors de ces opérations, le peroxyde organique composé, dont la forme générale est $R-O-O-R$, où R est un radical quelconque aromatique ou aliphatique, se décompose à haute température selon la réaction : $R-O-O-R \longrightarrow 2RO^*$, pour donner des radicaux libres très actifs. Ces derniers se combinent avec les hydrogènes des chaînes du polymère pour former des sites réactifs et un alcool :



Puis deux sites réactifs se combinent à leur tour pour créer un pontage entre deux chaînes:

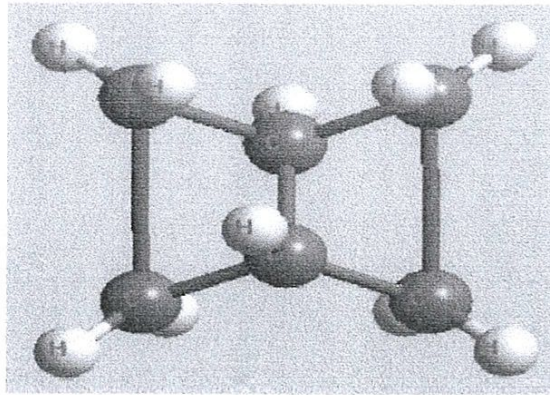
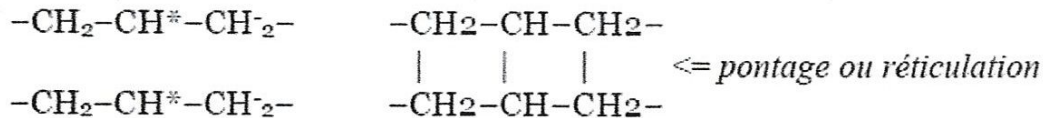


Figure 2.3 : Molécule du PRC

Le taux de réticulation est caractérisé par le nombre de ces pontages : il est évalué par des méthodes chimiques ou des essais mécaniques. Le PRC a une morphologie sphérolitique semi cristalline, l'unité morphologique est le sphérolite, est un corps polyédrique, généré à partir d'un noyau et enveloppé par une matrice amorphe. L'intérieur est constitué d'un arrangement de cristaux lamellaire radialement répartis et séparés les uns des autres par le matériau amorphe.

II.2.2.2. Avantages et inconvénients de l'isolation en PRC :

Le PRC présente les avantages suivants :

- Pertes diélectriques extrêmement faibles et quasi indépendantes de la température
- Bonne étanchéité à l'eau ;
- Forte résistance d'isolement ;
- Meilleure conductivité thermique;
- Haute rigidité diélectrique ;
- Température de fonctionnement élevée (90°C en service normal) ;
- Bonne tenue en court-circuit (à 250°C).

Toutefois le PRC présente certains inconvénients par rapport aux polyéthylènes PEBD et PEHD

Filtrage plus difficile: au cours de la fabrication, on impose un filtrage permettant d'éviter les inclusions et les protubérances et d'éliminer certaines particules telles que les fibres de verres.

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

Porosité et teneur en eau plus importantes: avec le meilleur procédé de réticulation sèche, la teneur en eau atteint dans le PRC plus de 100ppm, alors que la quantité d'eau maximale admise dans les câbles HT à isolation PE est de 10 ppm (partie par million).

II.2. 3.1 Propriétés électriques de PVC:

La rigidité diélectrique est de 37kV/mm pour une éprouvette de 3 mm d'épaisseur à 20°C.

Le facteur de pertes diélectriques est élevé:

$\text{tg } \delta$ (à 50 Hz) = 0.015 à 20°C.

* La constante diélectrique est élevée :

ϵ_r (à 50 Hz) = 3.4 à 20°C.

II.2.3.2 Propriétés mécaniques PVC :

Le PVC a une bonne résistance à la traction : 5.5 à 6 kgf/mm².

L'allongement à la rupture est généralement de l'ordre de 100% pour les produits non plastifiés et de 200 à 400 % pour les compositions plastifiés.

Les propriétés mécaniques sont fortement dépendantes de la température. Au dessous de 140 à 150, le PVC perd toutes ses propriétés mécaniques.

II-3. Polymères utilisés dans l'isolation des câbles:

Les polymères utilisés dans l'isolation électrique des câbles présentent généralement une bonne rigidité diélectrique en haute tension. Toutefois, cette qualité diélectrique de l'enveloppe isolante peut être affectée par la variation de trois facteurs essentiels, en l'occurrence

II-3.1. Pureté du matériau :

Les inclusions conductrices et protubérances des écrans ont pour effet d'accroître le champ électrique à leur voisinage et donc d'induire le claquage sous un champ électrique moyen plus faible que celui qui produirait la rupture en leur absence. Le champ de claquage décroît avec la taille des inclusions.

II-3.2. Présence de vacuoles :

Les vacuoles sont le siège de décharges partielles qui dégradent l'isolant et conduisent à la rupture du matériau par arborescences électriques.

II-3.3. Teneur en humidité :

La présence ou la pénétration d'eau dans l'isolation électrique conduit à la formation d'arborescences électrochimiques. Avec le temps, ces dernières se développent jusqu'à ce que elles puissent causer l'apparition d'arborescences électriques qui à leur tour provoquent un claquage d'isolant.

II-4. Propriétés de l'isolation :

Parmi les polymères utilisés dans la fabrication des câbles et qui répondent le mieux aux exigences industrielles, le Polyéthylène (PE), le Polyéthylène Réticulé Chimiquement (PRC), l'Éthylène Propylène Diène Monomère (EPDM) et le polychlorure de vinyle (PVC) sont les mieux adaptés.

Qualité d'isolation	Rigidité électrique MV/m	Résistance d'isolation Ohm.m	ϵ_r permittivité relative	$\tan \delta$	Kg/m ³	Résistance thermique C ⁰ .m/w
Papier imprégné	50(AC) 170(DC)	$5 \cdot 10^{12}$	3.5-4	$10 \cdot 10^{-3}$	1250	5-6
PE	900	10^{14} - 10^{17}	2.3-2.5	$0.4 \cdot 10^{-3}$	910-925	3.5
XLPE	700	10^{14} - 10^{17}	2.4	$0.55 \cdot 10^{-3}$	900	3.5
EPR	100(DC)	-	3.3	$6 \cdot 10^{-3}$	1200	5
PVC	450-630	$7 \cdot 10^{11}$	5-8	$100 \cdot 10^{-3}$	1400	6

Tableau 2.1: Comparaison entre caractéristique d'isolation synthétique et papier imprégné

II-4.1. Permittivité diélectrique de l'isolant:

Dans un diélectrique, la polarisation est due à des mécanismes de déformations de répartition des charges électriques sous l'influence du champ électrique. Une relaxation diélectrique induit une perte d'énergie au niveau du matériau. Une telle configuration est équivalente à un circuit comportant une résistance en parallèle avec une capacité La polarisation est donc caractérisée par l'apparition de deux minces couches de charges électriques de signes opposés, chacune sur une face du matériau.

La relaxation est due au déphasage entre le déplacement électrique D et le champ électrique E.

Le vecteur densité du champ électrique (2-1):

$$D = \epsilon E = \epsilon_0 \epsilon_r E \tag{2-1}$$

ϵ_0 : Permittivité du vide,

\mathcal{E}_r : Permittivité relative du diélectrique ;

II-4.2. La conductivité électrique :

Un modèle théorique pour la conductivité électrique applicable à tous les genres des diélectriques pleins n'est pas encore disponible. En utilisant comme expression (2-2):

$$\sigma(r) = (r)Ae^{\left[a|E(r)| - \frac{b}{T(r)} \right]} \quad (2-2)$$

Avec $\sigma(r)$: la conductivité électrique en fonction du rayon du conducteur,

A : une constante $(\Omega .m)^{-1}$.

a : constante connue comme coefficient d'effort (champ).

$b = \left(\frac{Wq}{k} \right)$: constante connue comme coefficient de température avec W est l'énergie d'activation thermique, q étant la charge élémentaire, K est la constante de Boltzmann. Ce coefficient est différent selon le type de matériau, il peut être déterminé entre la plage de variation de température [-65°C, 150°C].

II-4.3. La résistivité électrique:

L'expression de la résistivité électrique en fonction des deux contraintes est donnée par (2-3) :

$$\rho = \rho_0 e^{aT} e^{mE} \quad (2-3)$$

Avec ρ_0 : résistivité à la température $T=0^\circ\text{C}$, elle est d'ordre de $10^{12} \Omega.m$ pour les isolants polymères.

a: coefficient de la température 0.1 K^{-1}

m: coefficient du champ électrique : 0.033 mm/kV

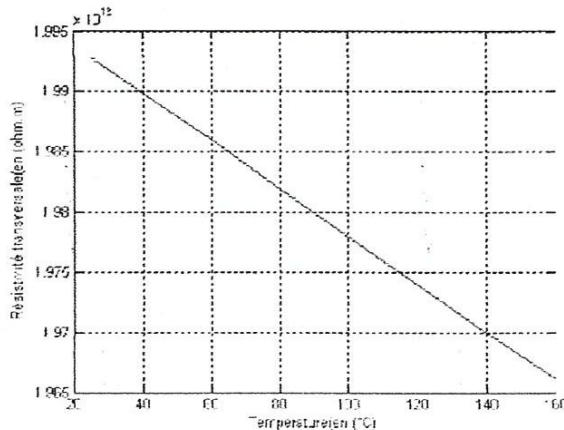


Figure 2.4 : Variation de la résistivité en fonction de la température

II-5. Stabilité thermique des polymères:

De toute évidence, un polymère, pour être utilisable, doit conserver un certain ensemble de propriétés physiques, quand il est porté à la température d'emploi. Ce sont les facteurs physiques qui sont prédominants. D'autre part, il doit conserver dans le temps ces propriétés minimales, il ne doit pas être dégradé par l'environnement, il y aura donc des facteurs chimiques qui interviendront pour limiter la stabilité thermique. Il est bon de noter que, le plus souvent, les facteurs chimiques n'interviendront que sous l'aspect duré, les facteurs physiques déterminant les propriétés instantanées.

II-5. 1. Facteurs physiques:

- Le plus important est le point de fusion des polymères, car au dessus de ce point, les propriétés électriques et mécaniques disparaissent complètement.
- Le point de transition vitreuse: détermine largement le domaine d'utilisation des polymères.
- Au point de fusion, le phénomène est équilibré, à pression constante, l'énergie libre de fusion est nulle à la température de fusion T_f .

II-5.2. Facteurs chimiques:

- L'oxydation thermique résulte de la formation de peroxyde et de groupements carbonyles. Pour éviter la formation de ces peroxydes, le noir de carbone est un bon stabilisateur.
- Le noir de carbone constitue de loin l'écran de protection le plus efficace pour le polyéthylène. La présence de 2% de ce noir de carbone porte la durée de vie des câbles de 1 à 20 ans. Une autre forme de stabilisation contre la photo oxydation consiste à absorber les radiations ultraviolettes et dissiper l'énergie absorbée de façon qu'elle ne dégrade pas le polymère.

II-6. Conduction des isolants polymères:

Aux champs électriques faibles (de l'ordre de 10^6 V/m), la conduction des isolants présente généralement un caractère ohmique. Pour les solides, il est admis qu'elle est due au déplacement d'ions et d'électrons. En ce qui concerne les polymères, de nombreux chercheurs insistent sur le rôle joué par les ions résultant de la dissociation d'impuretés qui ont été introduites dans le matériau lors des opérations de fabrications et de mises en œuvre.

En générale, la conductivité d'un matériau peut s'exprimer selon la formule suivante (2-4):

$$\delta = \sum_i^n n_i q_i \mu_i \quad (2-4)$$

Où

δ : Conductivité

n_i : Nombre de porteurs i

q_i : Charge d'un porteur i

μ_i : Mobilité d'un porteur i

Dans la plupart des cas, la conductivité δ varie avec la température suivant la formule suivante(2-5):

$$\delta = \delta_0 \exp\left(-\frac{W}{RT}\right) \quad (2-5)$$

Où

W: énergie d'activation.

R: constante des gaz parfaits.

T: température absolue.

Aux champs électriques élevés, la conduction des isolants perd son caractère ohmique dans les isolants solides.

II-7. Mécanisme de rupture de l'isolant en polymère:

Les isolants en polymère, utilisés en pratique, présentent des défauts quelque soit le soin apporté à leur mise en œuvre. Ces défauts jouent un rôle déterminant dans les processus de rupture diélectrique de ces isolants.

II-7.1 Mécanisme de rupture électrique:

La rupture électrique est de nature électronique. Elle ne dure qu'un temps très court, généralement d'un ordre inférieur à une seconde. Deux théories sont envisagées:

a. Théorie de rupture intrinsèque:

Cette théorie ne tient en compte que des phénomènes physiques propres à la morphologie et à la structure électronique de l'isolant. Les défauts qui y sont présents ne jouent aucun rôle dans ce type de rupture. Cette théorie suppose que les conditions pour lesquelles l'équation d'équilibre énergétique

électrons photons n'est plus respectée. Il s'ensuit l'apparition d'une avalanche électronique qui se développe pour une petite augmentation de champ au dessus d'une valeur critique, créant enfin de compte la rupture de l'isolant.

b. Théorie de rupture par avalanche :

Dans ce mécanisme, dit aussi rupture diélectrique par collisions ionisantes, on suppose que les électrons ont suffisamment d'énergie pour être injectés par la cathode. Ces électrons traversent l'isolant jusqu'à une certaine profondeur en créant des paires électrons – trous par collision avec les atomes de l'isolant.

Les trous, piégés profondément, forment un espace chargé positivement qui tend à extraire davantage d'électrons à la cathode. Dans le cas où le champ électrique dépasserait une certaine valeur critique, on un emballement du courant, et une rupture diélectrique s'ensuit

II-8. Les décharges partielles dans les cavités

La dégradation d'un isolant par un mécanisme d'arborescence est généralement initié par un défaut dans le système d'isolation. Ce défaut peut être présent sur une interface électrode-isolant ou dans le volume du matériau. Le renforcement de champ électrique, dû à un effet de pointe peut conduire à une injection de charges dans l'isolant.

Une décharge partielle est un claquage n'intervenant que sur une épaisseur limitée de l'isolant.

Dans les solides, elle se localise dans une cavité, due à un défaut ou à une "érosion" du matériau. Le phénomène de décharge partielle intervient lorsque des charges sont accumulées sur les bords d'une cavité. Lorsque la quantité de charges accumulées, donc le champ dans la vacuole, est suffisante, un électron germe présent dans la cavité peut provoquer l'ionisation du gaz par un mécanisme d'avalanche électrique. L'érosion due à l'impact des charges sur la paroi contribue à la croissance du défaut, début de l'arborescence.

II-9. Vieillessement des polymères:

Soumis à différentes contraintes durant l'exploitation, les isolants vieillissent. Le vieillissement est caractérisé par une altération partielle des propriétés diélectriques de ces isolants.

Les principaux types de vieillissement sont:

- Le vieillissement thermique: provoqué par l'action de longue durée de hautes températures, sur le diélectrique.

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

- le vieillissement électrochimique: engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique.
- le vieillissement électrique : (ionisation - décharges partielles): résultant des décharges dans les espaces, surtout gazeux, enfermés dans les diélectriques.

Les vieillissements sont caractérisés surtout par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques (par exemple: augmentation des pertes diélectriques, diminution de la résistivité). Très souvent, différents mécanismes apparaissent simultanément et influent mutuellement l'un sur l'autre.

II-9.1. Vieillissement thermique:

Le vieillissement thermique dépend de la structure du diélectrique. La dégradation du matériau est activée par la présence d'oxygène. Les principaux processus de vieillissement thermique sont:

La rupture des chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés électriques et mécaniques,

- le dégagement de gaz à faible poids moléculaire,
- l'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques.

Matériaux isolants	Température max Régime normale C ⁰	Température max Régime de C-C C ⁰
Papier imprégné	80-65	250-140
PE	70	150
XLPE	90	250
EPR	90	250
PVC	70	160-150

Tableau 2.2 : Les températures admissibles MAX pour quelque matériau isolant

II-9.2. Vieillissement Electrochimique:

Le processus de vieillissement électrochimique a lieu surtout sous l'action d'une tension continue de longue durée d'application, ainsi que d'une tension alternative de faible fréquence.

Le courant de fuite circulant à travers le diélectrique a un caractère électrolytique, lié au transfert d'ions. Ces ions peuvent être métalliques ou pas.

- Les ions non métalliques se déchargent au niveau des électrodes et peuvent former des substances actives se combinant avec le diélectrique.
- Les ions métalliques peuvent, après neutralisation, pénétrer dans le diélectrique et y créer souvent des chemins conducteurs appelés "dendrites".

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

Lors du processus de vieillissement électrochimique, la température du diélectrique augmente. Cette augmentation engendre non seulement une augmentation de la conductivité du matériau, mais aussi une activation des réactions chimiques qui sont la cause du vieillissement.

Pour retarder le vieillissement électrochimique, on utilise des "stabilisateurs" qui empêchent la formation d'acides.

Le vieillissement électrochimique est le plus souvent observé dans l'isolation à papier imprégné de diélectriques liquides chlorés.

II-9.3 Vieillissement Electrique:

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques du matériau, sous l'action prolongée d'une contrainte électrique (champ électrique) relativement élevée. Il est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité transversale du matériau. La dégradation est particulièrement accentuée par la présence d'impuretés de différentes natures, plus particulièrement des vacuoles de gaz au sein du diélectrique. Ces impuretés sont en général le siège de décharges partielles qui peuvent engendrer, après un temps relativement long, l'érosion du matériau et finalement la rupture diélectrique.

En pratique, la tension seuil d'apparition des décharges partielles correspond à la tension appliquée au matériau à partir de laquelle la charge apparente fournie par le réseau est égale un seuil donné. La tension seuil d'apparition des décharges partielles risque de diminuer en fonction du temps de vieillissement pour les champs appliqués relativement intenses. La tension seuil d'apparition des décharges partielle diminue aussi dans le cas du vieillissement thermique (application de fortes températures sur de longues périodes).

II-10. La dégradation en polyéthylène réticulé

Le processus de dégradation de l'isolation XLPE peuvent être classés en deux groupes principaux, soit extrinsèque, c'est à celles qui sont dues à des vides, les contaminants, les imperfections physiques ou mal dispersé composants, ou intrinsèque, c'est à dire, celles qui sont dues à des accusations changements physiques ou chimiques ou piégé.

Un processus de dégradation intrinsèques peut affecter un grand volume d'isolation, par exemple pour la dégradation thermique du matériau isolant. La dégradation extrinsèque entraîne généralement des changements localisés en matériau isolant non uniforme.

Physiques, chimiques et la dégradation électrique sont les mécanismes de détérioration importante affectant isolant polymère. Polymères n'atteindront pas leur structure cristalline finale juste après la fabrication. Durcissement final de la structure d'isolation qui va se passer sur plusieurs années, parce

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

que le durcissement est un processus lent par lequel les micros cavités et zones localement plus denses peut être formé à l'intérieur de l'isolant (**Figure2.4**). La structure inégale de l'isolation va augmenter l'effet de la dégradation électriques et les risques de rupture électrique. Isolant polymère est sensible même à de petites décharges partielles.

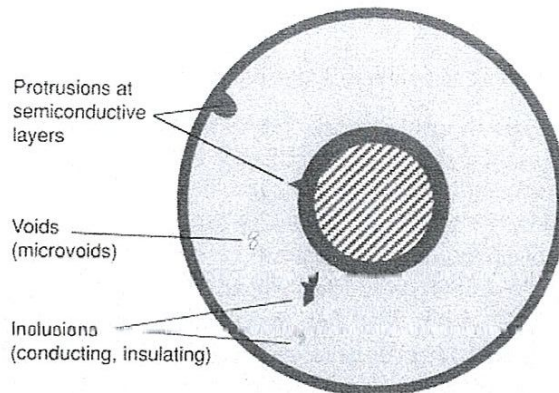


Figure2.4 : Défauts dans un câble entraînant une concentration de champ

II-11 La dégradation par arborescences :

Un phénomène indésirable affectant les isolations solides est le phénomène de dégradation par arborescence. Les arbres s'initient habituellement à partir d'un point où il existe une concentration du champ électrique (**Figure2.5**). On rencontre deux types d'arbres, les arbres électriques et les arbres d'eau.

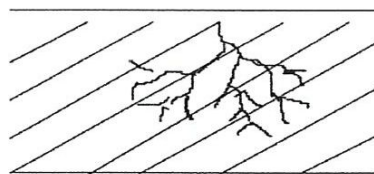


Figure2.5 : Une arborescence

II-11.1 Arborescence d'eau :

La majorité des câbles à isolation XLPE installé dans le sol sont exposés à l'humidité et sont par conséquent sensibles à la dégradation due aux arbres de l'eau. Arborescence d'eau se trouvent généralement d'initier et de développer dans l'isolation XLPE exposés à un champ électrique

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

alternatif et de l'humidité. Les impuretés dans le matériau d'isolation augmentent le risque d'initiation des arborescences d'eau. Les polyoléfines sont capable de prendre 2000 - 5000 ppm (Parties par million) de l'eau en fonction notamment de la cristalline, qui dans le cas du polyéthylène est directement liée à la densité spécifique du matériau. L'eau peut pénétrer l'isolant de l'environnement extérieur du câble si l'eau de blocage obstacles n'est pas utilisée.

La formation des arbres de l'eau commence à inhomogénéités microscopiques dans l'isolation. Humidité à l'intérieur de l'isolation va commencer à se propager dans la direction du champ électrique dans une forme buisson ou un arbre. Il existe deux types d'arbres d'eau, nœud papillon et ventilé.

a - Arbres de nœud papillon engager des impuretés et des vides dans l'isolant et ont tendance à se développer dans deux directions. Arbres de nœud papillon atteindre une longueur limite de quelques dizaines de μm , et de ne pas avoir un effet significatif sur la dégradation au champ électrique de faible souligne utilisés dans les câbles de distribution.

Humidité résiduelle de réticulation peuvent également produire des petits arbres de nœud papillon, mais ces arbres de l'eau ne sont pas considérés comme nuisibles (**Figure2.6**).



Figure2.6 : Arbre d'eau de type noeud papillon

b - Arbres de l'eau ventile sont initiés à l'interface entre les écrans semi-conducteurs et de l'isolation et de grandir dans la même direction que le champ électrique appliqué. Arbres de l'eau à évent normalement besoin d'un temps plus que de s'incliner initiation arbres cravate. Arbres de nœud papillon saturer après une certaine longueur, mais les arbres de l'eau ventilés cesse croître et pourrait éventuellement pénétrer l'épaisseur d'isolant ensemble. Ainsi les arbres d'eau ventilés sont considérés comme responsables de la dégradation plus sévère que les arbres de nœud papillon. Les

arborescences d'eau cause l'amélioration de contraintes locales qui peuvent être la phase d'initiation pour un arbre électrique. Alternativement, une oxydation importante peut se produire dans les arbres à haute température, conduisant à une absorption accrue, une plus grande conductivité, et éventuellement d'emballement thermique (Figure2.7).

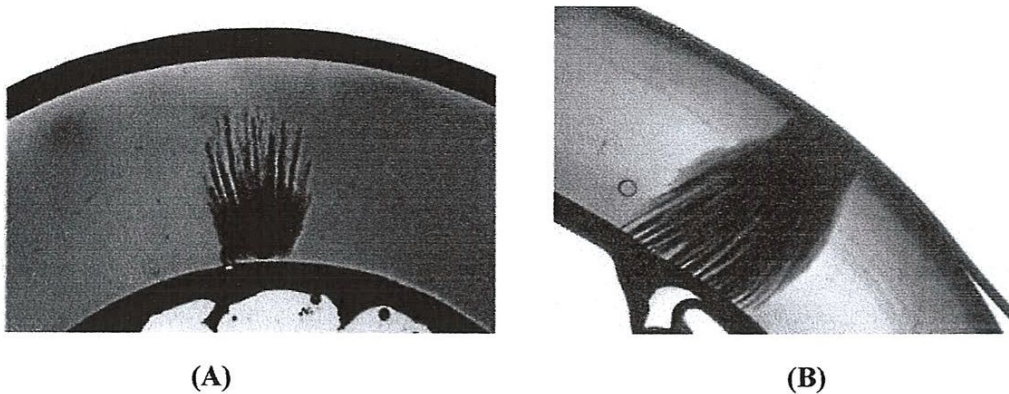


Figure2.7 : (A) - Arbres d'eau de type ventile poussant à partir des semi-conducteurs internes
(B) - Arbres d'eau de type ventile combler l'isolation

II-11.2 Arborescence électrique :

Un arbre électrique est un réseau de fins canaux conducteurs qui se propage assez rapidement à travers l'isolant pour provoquer la rupture. Arbres électrique peut démarrer à partir de la surface érodée du vide ou d'un arbre de l'eau ou de l'initiation ne peut avoir lieu dans les micros cavités du polymère, si la mise en valeur du champ électrique est plus grande.

Il y a deux phases d'arborescence électrique. Au cours de la phase d'initiation du mouvement de charge (0,1 - 0,2 pC) de chaque demi-cycle de la tension appliquée, le polymère se dégrade progressivement conduisant à la formation d'un petit vide.

L'injection de charge et d'électroluminescence provoquée par l'augmentation du champ électrique dans l'isolant joue un certain rôle au cours de la phase d'initiation d'un arbre électrique. Lorsqu'il est soumis à tension alternative le polyéthylène émet la lumière dans le visible et les gammes ultraviolettes (UV) dessus d'un certain seuil de tension, due aux charges de polarités positives et négatives injectés dans le polymère. La lumière (UV) provoque la photo dégradation due à des réactions photochimiques, crée des radicaux libres et rupture des chaînes conduisant à la formation d'une micro cavité, puis un arbre électrique.

Au cours de la phase de croissance sous forme d'arborescence comme le réseau de succursales est formé à partir du vide élargi en raison de décharges partielles dans les branches.

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

Le taux de croissance des arbres dépend de la contrainte électrique appliquée, la température et l'environnement et les contraintes mécaniques.

Lors de la fabrication ou l'installation d'un câble et ses accessoires, de petites cavités ou de bulles de gaz se forment à l'intérieur de l'isolation ou dans la surface entre les couches d'isolation.

Lorsque l'intensité du champ électrique à l'intérieur d'une cavité ou d'une bulle est suffisamment élevée des décharges partielles apparaissent.

Positive ions et les électrons formés par la décomposition partielle entreront en collision sur la surface de l'isolant et la dégradation de l'isolant va commencer (**Figure 2.8**).

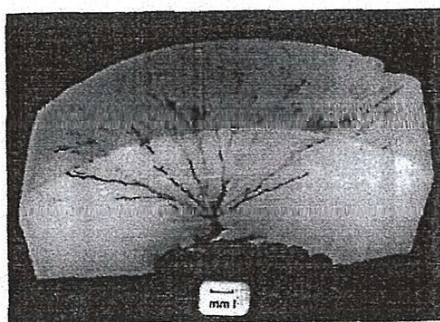


Figure 2.8: Arborescences électriques a dégradé l'isolent d'un câble

La rugosité de la surface de la cavité ou des impuretés à l'intérieur de l'isolation peut conduire à une concentration de décharges partielles dans un seul endroit. La concentration des décharges partielles conduira à une région dégradée dans le matériau isolant. Un canal conduit sous la forme d'un buisson ou un arbre commence à se développer à travers l'isolant. Cette formation est connue sous le nom d'un arbre électrique. La dégradation totale de l'isolant peut se produire lorsque la branche d'un arbre électrique relie les électrodes. La dégradation peut aussi se produire avant que l'arbre électrique relie les électrodes.

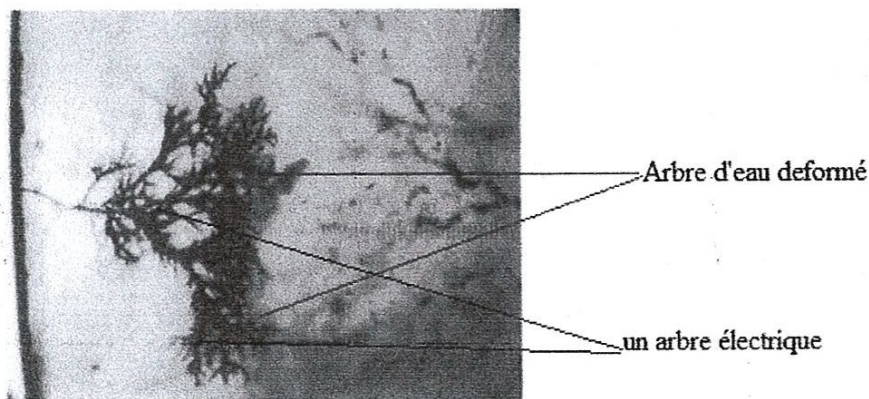


Figure 2.9 : le passage de l'arbre d'eau à un arbre électrique.

II-12 La différence entre Arborescence électrique et Arborescence d'eau

La différence entre un arbre d'eau et un arbre électrique est que l'arbre d'eau ne forme pas nécessairement un canal permanent et visible à travers l'isolant. Lorsque le champ électrique et l'humidité sont éliminés, les arbres de l'eau peuvent apparemment disparaître. Le claquage de l'isolant peut se produire quand l'arbre d'eau relie les électrodes. Dans certains cas le câble peut fonctionner sous la tension normale, même quand l'arbre d'eau relie les électrodes. La formation des arbres d'eau prendra des années. La croissance des arbres d'eau dépend de la présence de l'eau, l'intensité et la fréquence du champ électrique, le matériau d'isolation, la température et des contraintes mécaniques.

Les arbres sont formés à moindre intensité de champ électrique que les arbres électriques. Évidemment les câbles installés dans des environnements humides doivent être protégés contre la pénétration de l'humidité à l'isolation (Figure 2.13).

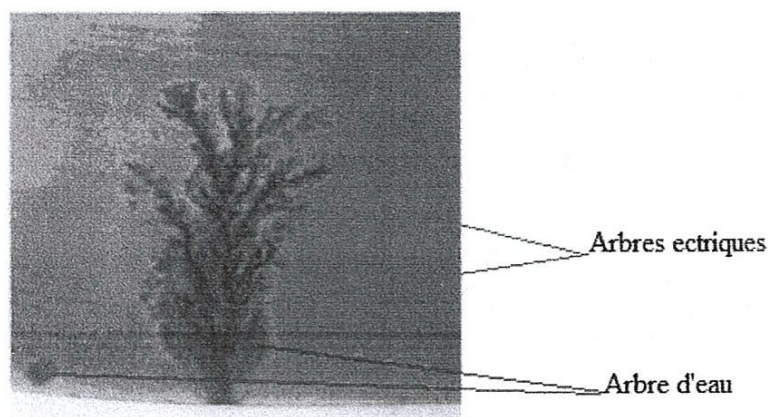


Figure II. 5 : Combinaison arbre d'eau et des arbres électriques

Méthodes pour réduire arborescence :

La méthode la plus efficace, si elle n'est pas économique, pour éviter la formation d'arbres de l'eau est de maintenir l'isolation absolument sèche. Ceci peut être accompli avec une gaine métallique étanche, comme le plomb, le cuivre ou l'aluminium. Câbles avec ces gaines ont été en service pendant plus de 40 ans sans dégradation connue. Bien sûr, le problème est de maintenir le métal de la corrosion ou être endommagés mécaniquement. (Cela s'applique également au papier-câbles isolés)

Phénomène de Dégradation et défauts de câbles

Autres moyens de dissuasion possible à la formation de l'arbre de l'eau:

1. lissage interfaces électrique des boucliers, en particulier à l'écran du conducteur lorsque les contraintes électriques sont les plus élevés.

2. Étroitement lié boucliers d'isolation qui doit être enlevé que mécaniquement.

Semi-conducteurs composés de petites quantités d'impuretés ioniques. Il a été démontré que les ions des boucliers sont concentrés sur les sites de l'arbre de l'eau dans l'isolant.

4. Conducteurs solides.

5. Volet de blocage.

6. La pression interne, tels que l'azote, de garder l'humidité.

7. Réduction ou l'élimination des vides et des contaminants.

Chapitre I I I

Modélisation et Analyse des câbles avec défaut

L'analyse du fonctionnement du câble et le calcul de ses paramètres en présence de l'arborescence d'eau est une étape qui n'est pas encore maîtrisée jusqu'à l'heure actuelle vue les différentes approches théoriques, dont la plupart sont numériques, et les méthodes de mesures, difficiles à maitres en œuvre. Dans le présent chapitre nous essayons modéliser analytiquement le câble en présence de l'arborescence d'eau en guise de déterminer ces paramètres et ainsi aboutir à des indices de présence du défaut.

3.1. Données du problème

La figure 3.1 montre le câble pris comme exemple pour le calcul. Le câble est mono-polaire de longueur 3km et alimente une charge $S_{ch}=1+j3.MVA$. Nous supposons que l'arborescence de type ventilé se produit au milieu du câble (1.5km -1.5km, fig.1). On dispose comme données initiales : la tension aux bornes de la charges $U_2=30kV$, la puissance de la charge $S_{ch}=1+j3MVA$, la section du conducteur centrale $S=100mm^2$.

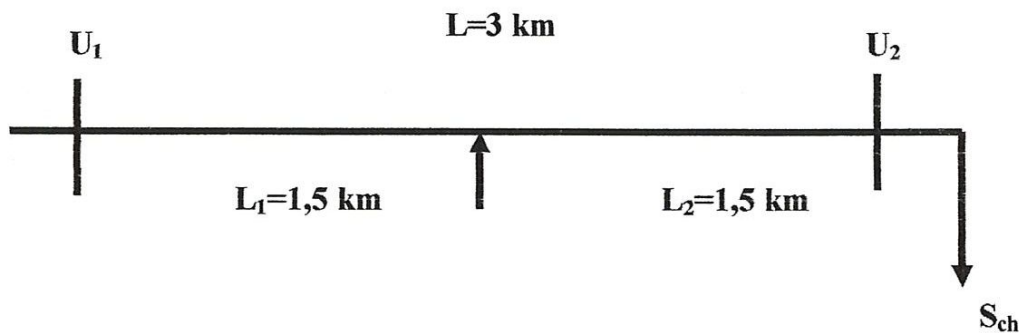


Figure 3.1: Câble considéré pour le calcul

3.2. Paramètres linéiques du câble sans dégradation

a- La résistance

Si l'on note ρ la résistivité du métal utilisé, chaque unité de longueur de conducteur a une résistance r_0 (Ω/km) qui s'écrit (en supposant la densité de courant uniforme ou en continu), la résistance d'un câble est donnée par :

$$R = \frac{L}{\sigma \times S} = \frac{\rho \times L}{S} \quad (3.1)$$

Donc la résistance linéique (par unité de longueur) est

$$r_0 = \frac{\rho}{S} \quad (3.2)$$

Où $\rho = \frac{1}{\sigma}$ est la résistivité du conducteur [$\Omega.m$].

$$S = \frac{\pi.d^2}{4} \text{ Section du conducteur (m}^2\text{)}$$

b- L'inductance :

La réactance est due aux effets du champ magnétique qui s'établit autour du conducteurs lors de passage du courant, ce dernier auto-induit une F.é.m. qui va s'opposé au courant (donc au flux qui la engendrée). L'effet de cette force détermine la résistance au courant du conducteur exprimé dans les modèles de la ligne par la réactance x_0 .

L'inductance d'un câble par unité de longueur est donnée par :

$$x_0 = 2\pi f \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{R_e}{r_i} \right) \cdot 10^{-3} \quad (3.2)$$

Où :

x_0 est en (ohm/km)

R_c : représente la distance entre le conducteur centrale et le conducteur de retour (fig.3.2).

r_i : représente le diamètre du conducteur centrale.

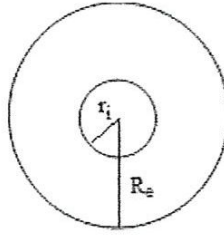


Figure 3.2: Dimensions du câble

c- Capacité :

La capacité est due aux effets du champ électrique qui s'établit entre la phase et la terre (le blindage). La capacité d'un câble est donnée par :

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_e}{r_i}\right)} \cdot 10^3 \quad (3.3)$$

C_0 est F/km

R_e et r_i respectivement, les rayons intérieurs et extérieurs de la partie isolante (fig.3.2).

ϵ_0 est la permittivité du vide. Sa valeur est : $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m

ϵ_r est la permittivité relative du matériau (2.3 pour le polyéthylène).

3.3 Modélisation du câble avec défaut :

L'arborescence d'eau, considérée comme le défaut unique pour notre cas, peut naître à n'importe quel point tout au long du câble et même en plusieurs points. Dans cette partie nous considérons qu'un seul point est touché et que le reste du câble est sain. Donc en présence d'un seul défaut le câble est scindé en deux tronçons qui se rejoignent au point du défaut (fig.3.3). Ainsi la

modélisation du problème (câble avec défaut) se réduit à la modélisation de deux câbles (tronçons sans défaut) séparés par un défaut.

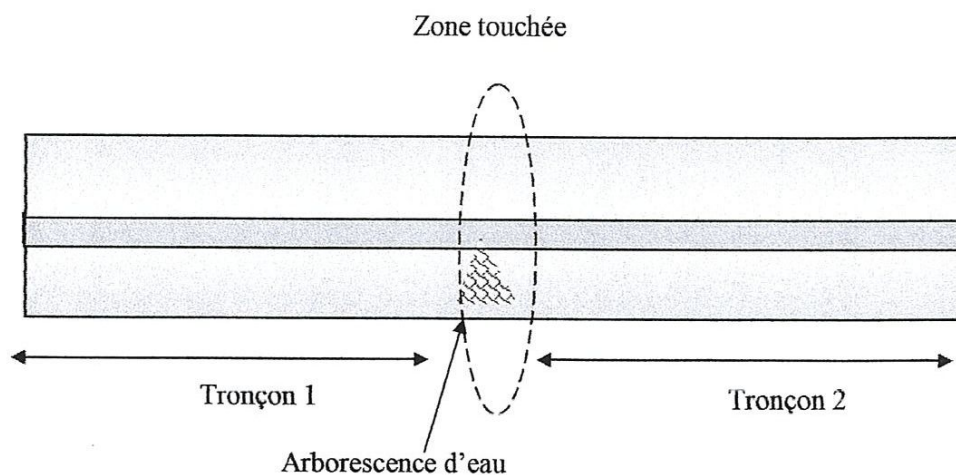


Figure 3.3: Câble avec défaut au milieu

3.3.1 Tronçons de câble

Les paramètres des tronçons de câble peuvent être calculés à partir des équations III.1 III.2 III.3. Si on considère que le défaut se situe au milieu du câble les paramètres des deux tronçons sont regroupés dans le tableau suivant. Sachant que le rayon du conducteur 7mm, rayon extérieur de l'isolant R=23mm.

	Trançon1	Trançon1
R (Ω)	0.472	0.472
x(Ω)	0.5074	0.5074
C (F)	$2.3206 \cdot 10^{-7}$	$2.3206 \cdot 10^{-7}$

3.3.2 Schéma équivalent de l'arborescence d'eau :

La zone touchée par l'arborescence est souvent de structure complexe (Figure.3.4) et donc elle est difficile à modéliser.

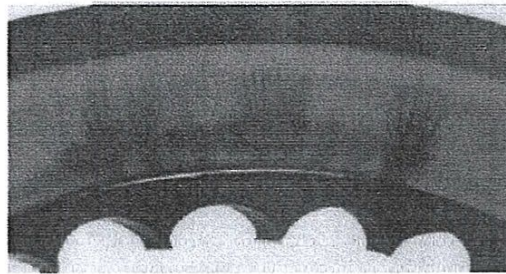


Figure 3.3: Exemple d'arborescence d'eau

a. Simplification géométrique du problème

Le problème peut être simplifié en transformant la forme irrégulière « d'arbre » et distribuée dans l'isolant en une forme régulière. La figure 3.5 montre la simplification considérée dans cette étude. La forme d'arbre est transformée en un cylindre équivalent qui entoure le conducteur. Ainsi il sera possible de représenter le défaut par un schéma équivalent dont les paramètres peuvent être déterminés à partir des équations précédentes.

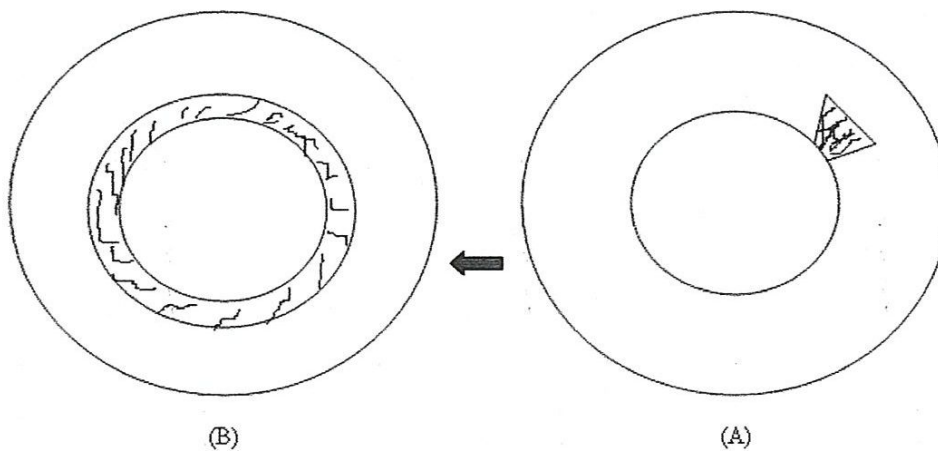


Figure 3.4: Simplification géométrique du problème d'arborescence

b. Schéma équivalent de l'arborescence

Après simplification la zone touchée peut être modélisée comme un isolant imparfait. En effet l'arborescence d'eau est un mélange de polyéthylène et de l'eau qui se loge dans des cavités orientées dans la direction du champ et prennent alors la forme d'arbre. En tant qu'isolant imparfait cette zone peut être modélisée par un schéma équivalent comportant une résistance, due à la conduction, et une capacité due à l'existence du champ électrique.

Ainsi le schéma équivalent de la zone touchée est celui montré par la figure 3.6, avec R_{wt} et C_{wt} résistance et capacité de l'arborescence elle-même et R_{pe} et C_{pe} résistance et capacité de la portion restante de l'isolant (polyéthylène).

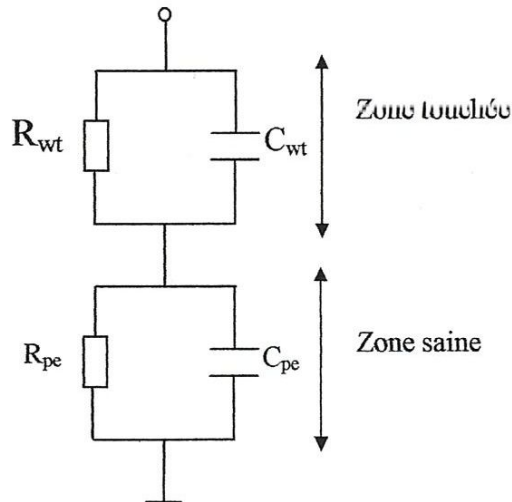


Figure 3.5: Schéma équivalent de la zone touchée

c. Paramètres du schéma équivalent

En tant que géométrie cylindrique les paramètres de l'arborescence peuvent être calculés à partir des formules établies pour un câble coaxial avec :

$$R_{wt} = \frac{\rho_{wt}}{2\pi H} \ln\left(\frac{R_{ewt}}{r_i}\right) \quad (3.4)$$

Avec :

H hauteur de l'arborescence,

R_{ewt} : rayon équivalent de l'arborescence (Figure 3.7).

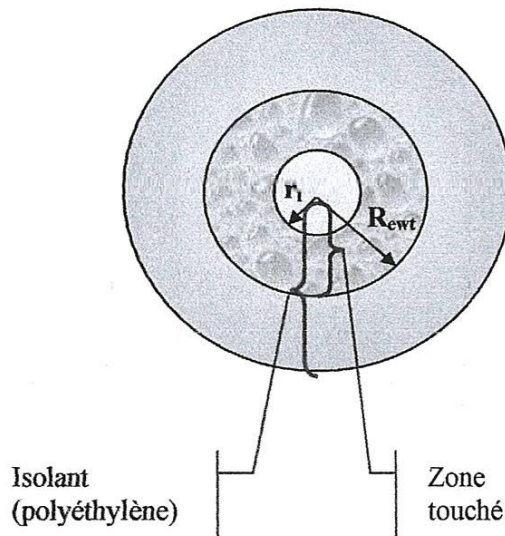


Figure 3. 6 : Dimensions du câble avec défaut simplifié

ρ_{wt} résistivité de l'arborescence (mélange : eau+polyéthylène). La résistivité du mélange est déterminée à partir de l'inverse de la conductivité sachant que cette dernière est calculée par la formule suivante:

$$\sigma_{wt} = \sigma_{PE} + k \frac{3(\sigma_w - \sigma_{PE})\sigma_{PE}}{\sigma_w + 2\sigma_{PE}} \quad (3.5)$$

Où

σ_{wt} : conductivité du mélange ;

σ_{PE} conductivité du polyéthylène seul

σ_w : conductivité de l'eau (0.005s/m)

k : facteur indiquant le taux de l'eau dans le mélange variant entre 0.1 à 0.5.

La capacité d'un coaxiale est donnée par :

$$C_{wt} = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{rwt} \cdot H}{\ln\left(\frac{R_{ewt}}{r_i}\right)} \quad (3.6)$$

Avec :

ϵ_0 La permittivité à vide, $\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12}$

La permittivité du mélange est déterminée comme suit :

$$\epsilon_{r_{wt}} = \epsilon_{PE} + k \frac{3(\epsilon_{\omega} - \epsilon_{PE})\epsilon_{PE}}{\epsilon_{\omega} + 2\epsilon_{PE}} \quad (3.7)$$

Avec :

$\epsilon_{r_{PE}} = 2.3$; $\epsilon_{r_{PE}}$ La permittivité relative de polyéthylène

où : $k=0.5-0.1$

Ainsi le schéma équivalent de la figure 3.6 peut être réduit en une résistance et capacités équivalentes. Le schéma équivalent de la zone touchée (fig.3.6) représente la liaison entre deux impédances en séries : celle de l'arborescence et celle du PE restant. De ce fait on a

$$Z_1 = \frac{R_{wt}}{1 + (R_{wt} \cdot C_{wt} \cdot \omega)^2} - j \frac{R_{wt}^2 \cdot C_{wt} \cdot \omega}{1 + (R_{wt} \cdot C_{wt} \cdot \omega)^2}$$

$$Z_2 = \frac{R_{PE}}{1 + (R_{PE} \cdot C_{PE} \cdot \omega)^2} - j \frac{R_{PE}^2 \cdot C_{PE} \cdot \omega}{1 + (R_{PE} \cdot C_{PE} \cdot \omega)^2}$$

Avec Z_1 impédance de l'arborescence et Z_2 impédance du PE.

Il s'en suit donc que :

$$Z_{eq} = Z_1 + Z_2$$

Avec la partie réelle représente la résistance équivalente et la partie imaginaire la susceptance telles que :

$$R_{eq} = \frac{R_{wt}}{1 + (R_{wt} \cdot C_{wt} \cdot \omega)^2} + \frac{R_{PE}}{1 + (R_{PE} \cdot C_{PE} \cdot \omega)^2} \quad (3.8)$$

$$C_{eq} = \frac{1 + (R_{wt} \cdot C_{wt} \cdot \omega)^2}{R_{wt}^2 \cdot C_{wt} \cdot \omega} + \frac{1 + (R_{PE} \cdot C_{PE} \cdot \omega)^2}{R_{PE}^2 \cdot C_{PE} \cdot \omega} \quad (3.9)$$

d. Calcul des paramètres du schéma équivalent

Soient les données du défaut :

Hauteur de l'arborescence $H=0.5m$. Taux de présence de l'eau $k=0.5$;

Les propriétés du mélange calculées à partir des équations ci-dessus

$$\sigma_{PE} = 7.2000e-013 \text{ s/m}$$

$$\sigma_{wt} = 1.8000e-012 \text{ s/m}$$

$$\epsilon_{wt} = 5.4686.$$

On remarque alors que la présence de l'eau dans le polyéthylène a nettement augmenté la conductivité et la permittivité de l'isolation de 2.5 et 2.3 fois respectivement.

Pour un rayon du conducteur $r_0=7mm$; et rayon extérieur de l'arborescence $R_{ewt} = (9, 1, 15, 17) mm$, on trouve les paramètres du schéma équivalent

$R_{ewt}(mm)$	9	12	15	17
$R_{wt}(\Omega)$	4.4442e+10	9.532 e+10	13.478 e+10	15.691 e+10
$C_{wt}(F)$	0.6050e-09	0.2821 e-09	0.1995 e-09	0.1714 e-09
$R_{PE}(\Omega)$	4.1481 e+11	2.8762 e+11	1.8897 e+11	1.3364 e+11
$C_{PE}(F)$	0.0682 e-09	0.0983 e-09	0.1496 e-09	0.2115 e-09
$R_{eq}(\Omega)$	6.4431e+3	5.3715 e+3	4.5417 e+3	4.0742 e+3
$C_{eq}(F)$	0.6732e-9	0.3804 e-9	0.3491 e-9	0.3829 e-9

Tableau 3.1

3.3.3 Analyse du régime permanent d'un câble avec le défaut

Considérant le fait que le défaut se produit au milieu du câble (à titre d'exemple) celui-ci sera considéré comme la liaison de deux tronçons qui se rejoignent au point de défaut (fig3.8).

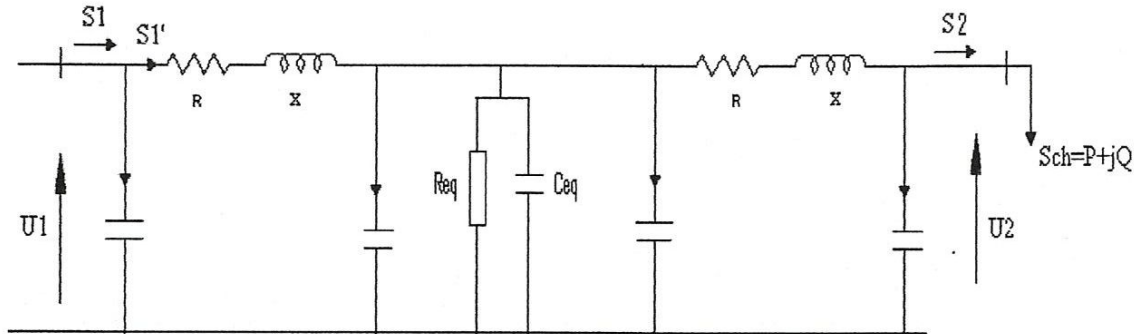


Figure 3.8 : Schéma équivalent du câble avec défaut pour l'analyse du régime de fonctionnement

a. Equations du régime

Considérant que le câble avec défaut au milieu alimente une charge $S_{ch}=1+j3$ MVA sous une tension de 30kV. Si on suppose que ces grandeurs sont imposées par le consommateur, la question qu'on se pose dans ce cas est quelle serait les variations des grandeurs d'entrées (U_1, S_1) en fonction de la largeur de l'arborescence d'eau.

On sait que la tension d'entrée :

$$U_1 = U_2 + \Delta U \quad (3.10)$$

Avec la chute de tension calculée par

$$\Delta U = \left(\frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U_2} \right) + j \left(\frac{P \cdot x - Q \cdot r}{U_2} \right) \quad (3.11)$$

$$P = P_{ch}$$

$$Q = Q_{ch} - Q_c$$

$$Q_c = \frac{c \cdot w}{z} \cdot U_2^2$$

$$S_2' = P + jQ$$

La puissance de début :

$$S_1' = S_2' + \Delta S \quad (3.12)$$

$$\Delta S = \Delta P + j \Delta Q \quad (3.13)$$

$$\Delta P = r \cdot I_{12}^2 \quad (3.14)$$

$$\Delta Q = x \cdot I_{12}^2 \quad (3.15)$$

$$I_{12} = S_2' / U_2 \quad (3.16)$$

$$S_2' = (P - jQ) \quad (3.17)$$

$$\Delta S = r \cdot \left(\frac{P - jQ}{U_2} \right)^2 + jx \left(\frac{P - jQ}{U_2} \right)^2 \quad (3.18)$$

$$S_1'' = P_1' + j(Q_1' - Q_c) \quad (3.19)$$

$$S_m = S_1'' + S_f \quad (3.20)$$

Avec $S_f = P_f + jQ_f$ pertes (puissance) du défaut telle que (3.21)

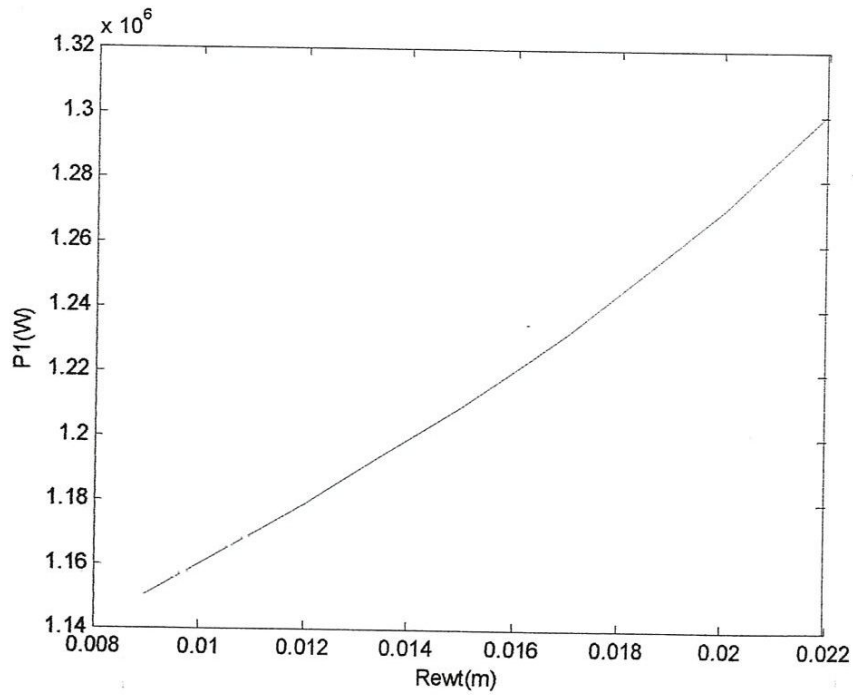
$$P_f = R_{eq} \cdot \left(\frac{U_1'}{R_{eq}} \right)^2 \quad (3.22)$$

$$P_f = \frac{(U_1')^2}{R_{eq}} \quad (3.23)$$

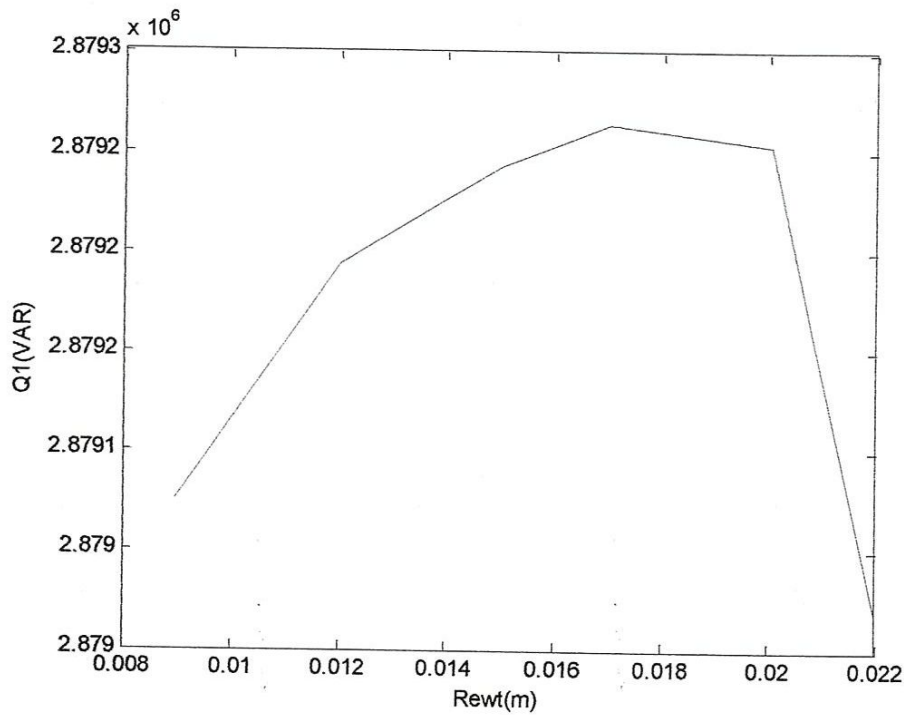
$$Q_f = \frac{(U_1')^2}{C_{eq}} = C_{eq} \cdot W \cdot U_1'^2 \quad (3.24)$$

	Diamètre extérieure de l'arborescence Rewt(mm)			
	9	12	15	17
U1	3.0133 - 0.0056i 10 ⁴	3.0133 - 0.0056i 10 ⁴	3.0134 - 0.0055i 10 ⁴	3.0134 - 0.0055i 10 ⁴
S1	1.1505 + 2.8791i 10 ⁶	1.1785 + 2.8792i 10 ⁶	1.2093 + 2.8792i 10 ⁶	1.2320 + 2.8793i 10 ⁶
Req	6.4431. 10 ³	5.3725 10 ³	4.5420 10 ³	4.0762 10 ³
Ceq	0.0673. 10 ⁻⁸	0.0380. 10 ⁻⁸	0.0349. 10 ⁻⁸	0.0383. 10 ⁻⁸

La **figure 3.9** montrent les variations de la tension d'entrée en fonction du diamètre extérieur de l'arborescence. Comme on peut le constater plus le diamètre de l'arborescence augmente plus la puissance absorbée par le câble augmente et cela malgré le fait que la charge est constante. D'autre part, la puissance réactive par contre elle augmente de manière non linéaire puis diminue lorsque l'arborescence couvre toute l'isolation. Cette augmentation de la puissance d'entrée est due à l'augmentation des pertes dans le câble (Figure.3.10).



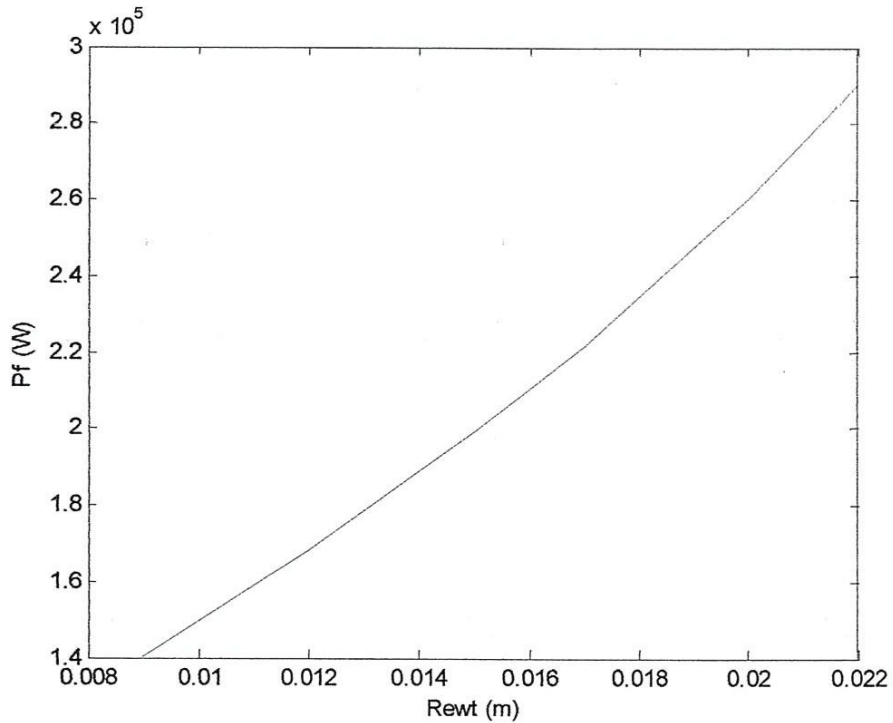
(a)



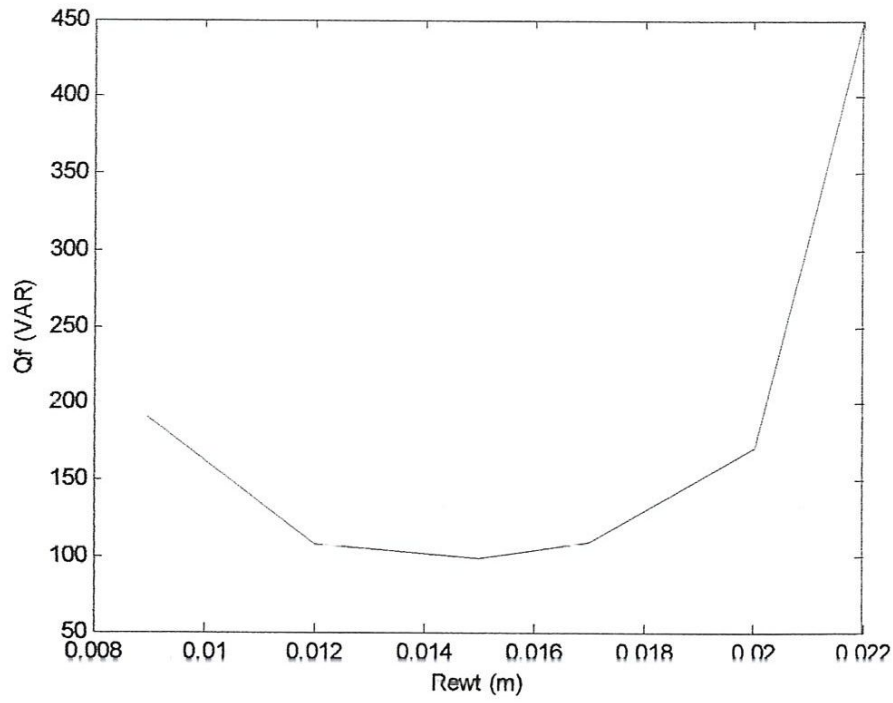
(b)

Figure 3.9 : variation de la puissance d'entrée en fonction du diamètre de l'arborescence : (a) puissance active et (b) puissance réactive.

La **figure 3.10** montre les variations des pertes dans le câble qui sont dues au défaut. Ces variations expliquent parfaitement les courbes relatives à la puissance d'entrée. Par ailleurs, les variations des pertes proviennent de celle des paramètres du montage équivalent. La figure 3.11 montre cette variation des paramètres (résistance équivalente et capacité équivalente) en fonction du diamètre de défaut. En corrélant les résultats présentés par les figures 3.9, 3.10 et 3.11 on constate que lorsque l'arborescence évolue, par augmentation de la zone touchée, la résistance et la capacité de cette zone diminuent entraînant l'augmentation des courants de fuite et donc des pertes actives.

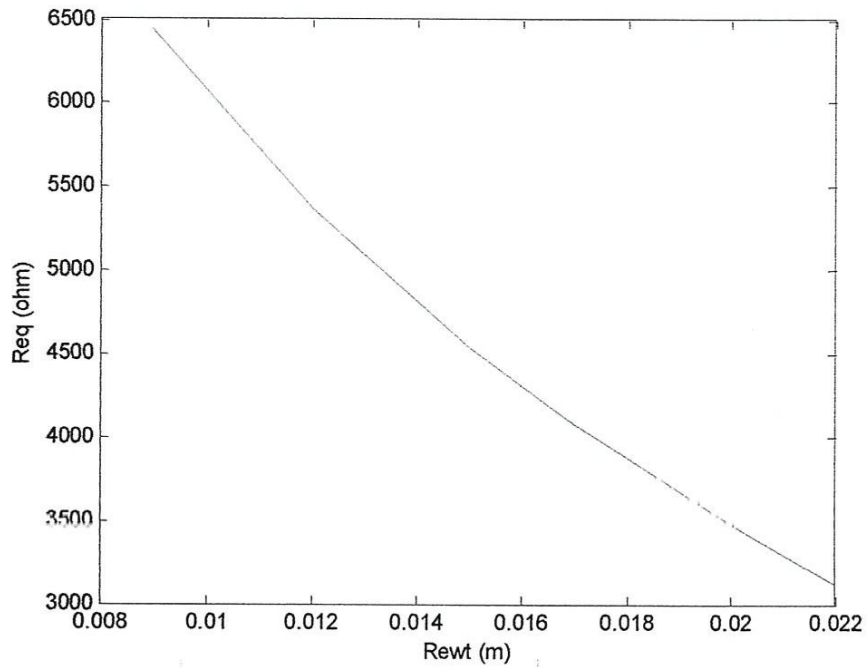


(a)

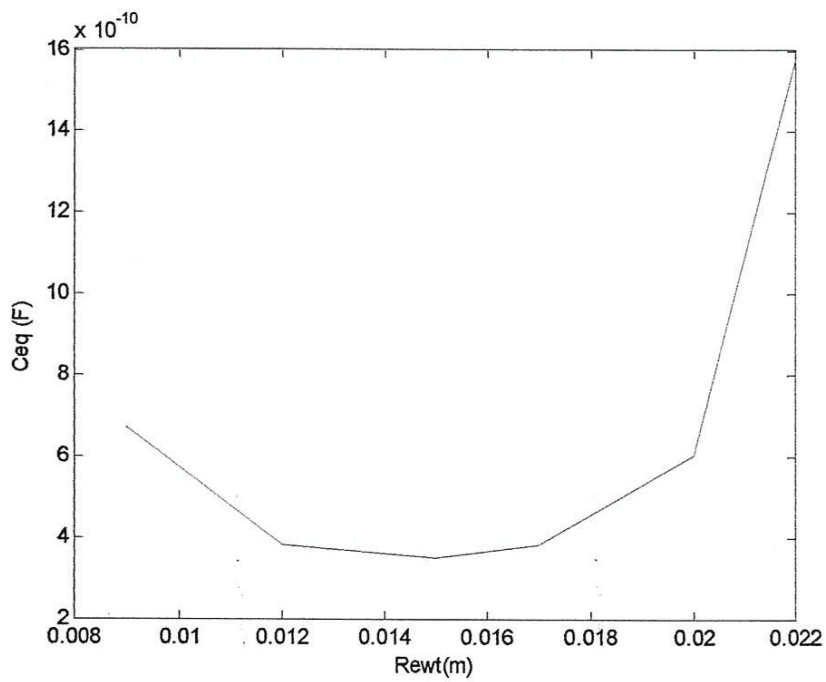


(b)

Figure 3.10 : Variations de la puissance de défaut (pertes) en fonction du diamètre : (a) pertes actives et (b) pertes réactives.



(a)



(b)

Figure 3.11 : Variations de la résistance et capacité équivalente en fonction du diamètre de défaut : (a) résistance équivalente et (b) capacité équivalente

Influence de la position du défaut

La figure 3.12 montre la puissance active et réactive à l'entrée de la ligne lorsque le défaut se trouve à 2/3 la longueur du câble compté à partir de l'entrée. Par comparaison avec les résultats précédents il apparaît clairement que les résultats se répètent impliquant de ce fait que la position du défaut n'a pas d'influence sur les pertes qu'il cause.

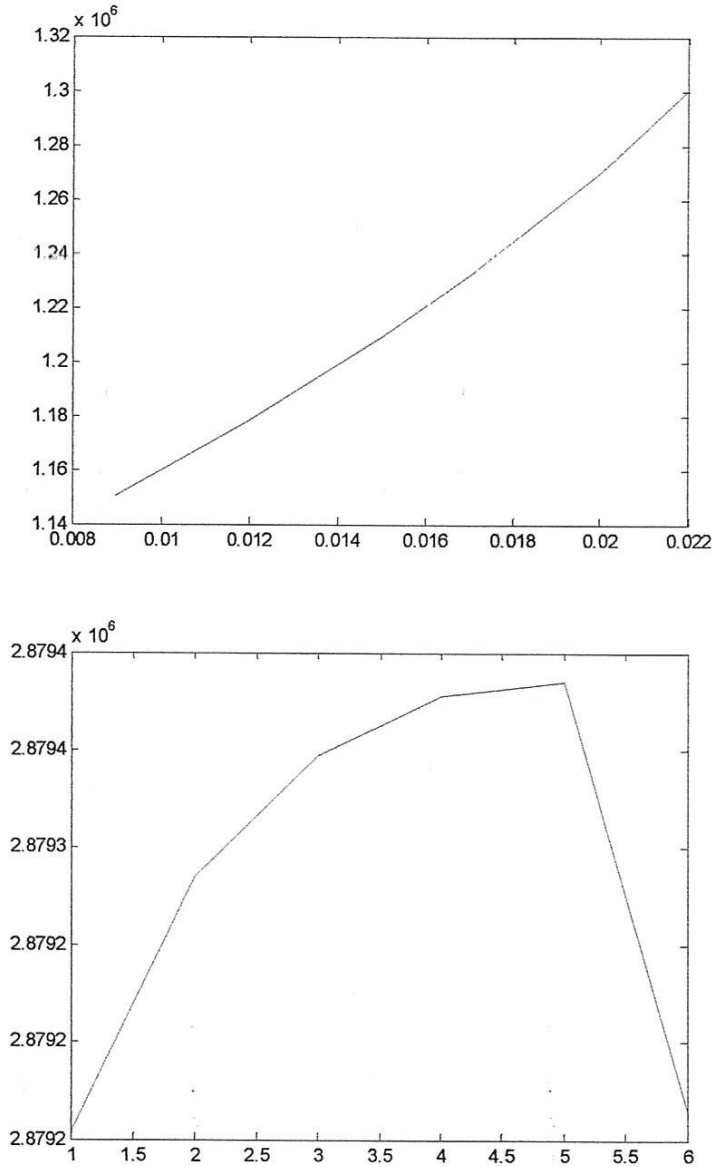


Figure 3.12 : Puissance active et réactive à l'entrée de la ligne

Influence de la puissance de la charge

La figure 3.13 montre l'influence de la puissance de la charge sur les pertes dues au défaut. Les calculs ont été fait pour une puissance $0.5(1+3j)$, $(1+3j)$, $2. (1+3j)$ et $3. (1+3j)$. On remarque que l'effet du régime de la charge est négligeable sur les pertes créés par le défaut étant donné la superposition des courbes pour les quatre régimes de charge.

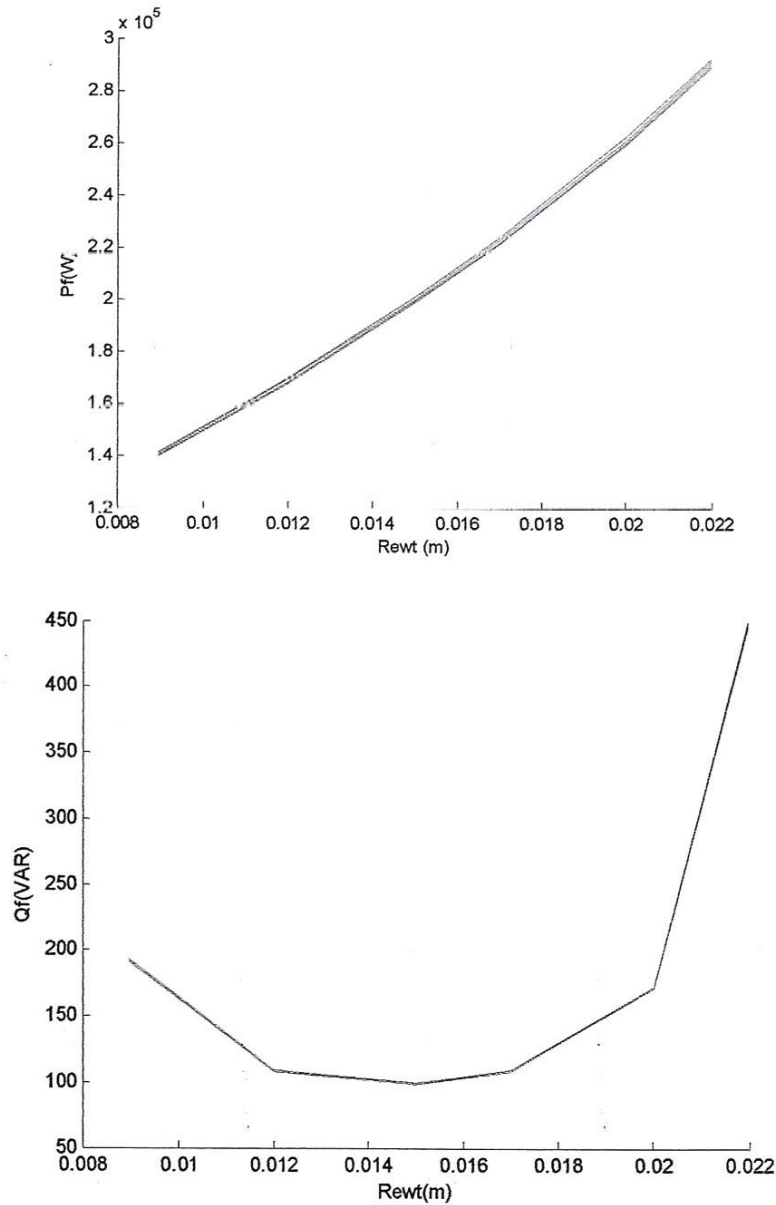


Figure 3.13 : variation de la puissance de défaut en fonction de la puissance de la charge : $S_{ch}'=0.5.S_{ch}$, S_{ch} , $2.S_{ch}$, $3.S_{ch}$

Conclusions

A travers ce mémoire nous avons essayé d'aborder le problème des câbles dégradés essentiellement par arborescence d'eau. Ce phénomène de nature complexe tant sa géométrie que sa constitution physique, il constitue une étape de dégradation précoce du câble qu'il faut déceler. Nous avons montré par un simple modèle analogique que l'arborescence d'eau en progressant entraîne le changement des caractéristiques du régime tension et puissance. Les résultats montrent que l'augmentation de la longueur de l'arborescence (accentuation de la dégradation) augmente les pertes actives dans les câbles. La position du défaut et le régime de la charge ε avère sans influence, le même résultat s'obtient si le défaut se produit à des endroits différents.

Références Bibliographiques

- [1]. Michel Aguet, Michel Ianoz ; Haute tension ; PPUR presses polytechniques ; 2004.
- [2]. dr.asser ali zaki ; Câbles d'énergie électrique ; Monchat Al Maaref, Alexandria ; 2001.
- [3]. Daniel Depris ; Réseaux Électriques Souterrains ; TEKNEA ; 1998.
- [4]. R. Bartnikas, Éd., Power and Communication Cables, J. Wiley & Sons, 2000.
- [5]. William A.Thue ; Electrical Power Cable Engineering ; Marcel Dekker ; 2003.
- [6]. L.A. Dissado, J.C. Fothergill; Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, Peter Peregrinus Ltd., 1992.
- [7]. E. David, thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1996.
- [8]. Petri Hyvönen ; PREDICTION OF INSULATION DEGRADATION OF DISTRIBUTION POWER CABLES BASED ON CHEMICAL ANALYSIS AND ELECTRICAL MEASUREMENTS ; Doctoral Dissertation 2008.
- [9]. Christophe GUILLERMIN ; Vieillissement électrique et thermique d'un composite résine époxyde silice : étude des charges d'espace et de la conduction ; Université Joseph Fourier Grenoble ; THESE de Doctorat 2004.
- [10]. H.R.Zeller, "Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Solid Dielectrics", IEEE Trans. Elect. Insul., vol. 1, No.2, April 1987.
- [11]. Luciano Simoni ; A General Phenomenological Life Model for Insulating Materials Under Combined Stresses ; IEEE Trans. Dielect. Elect. Insul., Vol. 6, No.2, pp 250-259, April 1999.
- [12]. J.C.Dubois ; Propriétés Diélectriques ; Technique de l'Ingénieur ; A3140 ,1984.
- [13]. L.Boukezzi ; Influence du vieillissement thermique continu sur les propriétés diélectriques et mécaniques du PRC utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension ; these de magister, ENP, 2000.
- [14]. Prof. A.A. Al-Arainy, ENVIRONMENTALLY INDUCED DEGRADATION OF INSULATING POLYMERS PRODUCED IN SAUDI ARABIA; Final Research Report N° EE-12/26/28 ; 2007.
- [16]. Patsch, R., Jung, J., "Water trees in cables: generation and detection", IEE Proceedings- Science, Measurement and Technology, Vol. 146, No. 5, pp. 253 – 259, (Sept. 1999).

SOMMAIRE

Introduction générale

1. Technologie des câbles

1.1. Définition	(2)
1.2. Catégorie des câbles	(3)
1.3. Types de câbles	(3)
1.3.1. Câble BT	(4)
1.3.2. Câble MT	(4)
1.3.3. Câble HT	(4)
1.4. L'isolation	(5)
1.5. Matériaux et construction du câble MT	(6)
1.6. La fabrication des câbles électriques	(8)
1.7. Matériaux isolants	(9)
1.7.1. Polarisation d'un matériau isolant	(10)
1.7.2. Diélectrique en régime variable	(11)
1.7.3. Vieillessement et mécanisme de claquage	(11)

2. Dégradation et modélisation des câbles

2.1. Les différents matériaux d'isolation utilisée dans les câbles	(14)
2.2. Propriétés de l'isolation polymères	(15)
2.3. Polymères utilisés dans l'isolation des câbles	(19)
2.4. Propriétés de l'isolation	(20)
2.5. Stabilité thermique des polymères	(22)
2.6. Conduction des isolants polymères	(22)
2.7. Mécanisme de rupture de l'isolant en polymère	(23)
2.8. Les décharges partielles dans les cavités	(24)
2.9. Vieillessement des polymères	(14)
2.11. La dégradation en polyéthylène réticulé	(26)
2.11. La dégradation par arborescences	(27)
2.12. La différence entre Arborescence électrique et Arborescence d'eau	(11)

3. Modélisation et Analyse des câbles avec défaut

3.1. Données du problème	(33)
3.2. Paramètres linéiques du câble sans dégradation	(34)
a- La résistance	(34)
b- L'inductance	(34)
c- Capacité	(35)
3.3. Modélisation du câble avec défaut	(35)
3.3.1. Tronçons de câble	(36)
3.3.2. Schéma équivalent de l'arborescence d'eau	(37)
3.3.3. Analyse du régime permanent d'un câble avec le défaut	(42)

Conclusion

Références Bibliographique