

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté par

Mr ABELLA Salem

Ingénieur d'état en Electrotechnique

En vue de l'obtention du grade de

Magister en Electrotechnique

Option : Entraînements Electriques

Thème

**Vieillessement électrique du polyester – imide
sous tension continue**

Jury :

- | | |
|---|-------------|
| - Mr CHAIBI Rachid, Professeur, UMMTO | PRESIDENT |
| - Mr NEDJAR Mohammed, Professeur, UMMTO | RAPPORTEUR |
| - Mr MEGHERBI Mohamed, Professeur, UMMTO | EXAMINATEUR |
| - Mr SADAOUI Youcef, Maître de Conférences A, UMMTO | EXAMINATEUR |
| - Mr MOUDOUD Mustapha, Maître de Conférences B, UMMTO | EXAMINATEUR |

A la mémoire de mes chers regrettés Père et frère ;

A ma mère ;

A mes sœurs ;

A ma femme ;

A Nordine et Youba.

AVANT PROPOS

Ce travail a été préparé au sein du Laboratoire de physique de l'Entreprise Elécto-Industries d'Azazga et le Laboratoire de Haute Tension de l'université de Béjaia.

Je tiens à témoigner ma reconnaissance à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont à **MR NEDJAR Mohammed**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Pour avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire, pour ses conseils et ses encouragements incessants durant la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier également :

Monsieur **CHAIBI Rachid**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, qui me fait l'honneur de présider le jury de présent mémoire.

Messieurs : **MEGHERBI Mohamed**, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, **SADAoui Youcef** et **MOUDOUD Mustapha**, Maîtres de conférences à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, pour avoir accepté de juger ce travail.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : EMAUX ISOLANTS	
1. STRUCTURE DE BASE DE MACROMOLECULES	3
2. EMAUX ISOLANTS	3
3. UTILISATIONS	6
3.1. En fils ronds	6
3.2. En fils méplats	6
4. DOMAINES D'APPLICATION	6
4.1. En électrotechnique	6
4.2. En électronique	6
5. EMAUX DE POLYESTER-IMIDE	6
CHAPITRE II : MECANISMES DE LA RUPTURE DIELECTRIQUE DES ISOLANTS SOLIDES	
1. MECANISMES DE CLAQUAGE	8
1.1. Claquage thermique	8
1.2. Claquage d'origine électronique	9
1.2.1. Claquage intrinsèque	9
1.2.2. Claquage associé au volume libre	9
1.2.3. Claquage par avalanche	10
1.3. Claquage électromécanique	10
2. RUPTURE À COURT TERME	11
2.1. Effet de la tension et du système d'électrodes	11
2.2. Effet de la température	12
2.3. Effet de l'épaisseur de l'isolant	12
3. RUPTURE À LONG TERME	13
4. DECHARGES PARTIELLES	13
4.1. CLASSIFICATION DES DEFAUTS DES ISOLATIONS HAUTE TENSION	14
4.1.1. Cavités gazeuses	14

4.1.1.1. Microcavités préexistant au sein du matériau	14
a) Cavités d'eau	14
b) Cavités de gaz	15
4.1.1.2. Cavités créées au cours de la mise en oeuvre ou du fonctionnement du système	15
4.1.2. Hétérogénéités	15
4.2. CARACTERISTIQUES DES DEFAUTS DE CABLES ELECTRIQUES	15
4.3. Définition	16
4.4. Naissance des décharges partielles	16
4.4.1. Tension aux bornes de la vacuole	16
4.4.2. Nombre de décharges	18
4.4.3. Energie de décharges partielles	18
4.4.4. Evolution de la pression avec les décharges, dans des cavités superficielles	19
5. NOCIVITE DES DECHARGES PARTIELLES	19
6. MESURE DE DECHARGES PARTIELLES	21
7. ARBORESCENCES ELECTRIQUES	21
7.1. PHASE D'INCUBATION	22
7.1.1. Formation de l'arborescence par décharges partielles	22
7.1.2. Action des porteurs chauds sur la structure du polymère	22
7.1.3. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique	23
7.1.4. Travaux effectués	23
7.2. PHASE DE PROPAGATION	25
7.3. PHASE D'AVALANCHE	27
8. MODELES DE DUREE DE VIE	27
8.1. Modèle de puissance inverse	27
CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES	
1. PREPARATION DES ECHANTILLONS	29
2. DISPOSITIF POUR ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ELECTRIQUE	32
3. APPAREILS DE MESURE	33

4. MODE OPERATOIRE	35
4.1. Conditionnement des échantillons	35
4.2. Essais de vieillissement électrique	36
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION	
1. MODÈLE STATISTIQUE DE WEIBULL	37
1.1. Bases du modèle	37
1.2. Modèle à deux paramètres	38
1.3. Modèle à trois paramètres	38
1.4. Signification des paramètres	39
1.4.1. Paramètre d'échelle	39
1.4.2. Paramètre de forme	39
1.4.3. Paramètre de localisation	39
3. APPLICATION DU MODELE DE WEIBULL A L'ETUDE DE LA TENUE DIELECTRIQUE DES ISOLANTS SOLIDES	39
4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES	40
4.1. Calcul des probabilités de rupture	40
4.2. Lissage des points expérimentaux	40
5. RESULTATS ET DISCUSSION	41
5.1. Polyester-imide de classe H	41
5.1.1. Diagrammes de Weibull à deux paramètres	41
5.1.2. Courbe d'endurance électrique du polymère	46
5.1.3. Facteur de forme	47
5.2. Polyester – imide avec couche de polyamide imide (classe C)	47
5.2.1. Diagrammes de Weibull	47
5.2.2. Courbe d'endurance électrique du polyester – imide avec couche de polyamide imide	54
5.2.3. Facteur de forme	54

5.3. Discussion	55
CONCLUSION	56
BIBLIOGRAPHIE	57

INTRODUCTION

Dans le domaine des câbles haute tension destinés au transport de l'énergie électrique, les polymères tendent à remplacer de plus en plus le papier imprégné. Sur le plan électrique, ce dernier donnait certes toute satisfaction, mais la fabrication était beaucoup plus coûteuse et la mise en œuvre plus délicate. Les câbles à isolation synthétiques sont préférés pour des raisons technico-économiques. En effet, ils présentent plusieurs avantages parmi lesquels : températures de fonctionnement et de court-circuit plus élevées, pertes diélectriques et permittivités plus faibles, légèreté, meilleure fiabilité ainsi que l'absence de surveillance et de maintenance.

Actuellement, les émaux isolants tels que le polyester-imide, le polyamide imide et le polyuréthane sont très employés comme isolants dans les machines électriques. Leur choix est dicté par différents facteurs : l'environnement de travail, la tension appliquée, la vitesse de rotation de machines et la température de fonctionnement. La rupture diélectrique de l'isolation est, dans une large mesure, la cause principale de la défaillance de ces machines.

Pendant l'application de champs électriques intenses, ces polymères sont sujets au vieillissement; ce qui conduit à des avaries dans les équipements où ils sont employés. Une meilleure connaissance du phénomène de vieillissement électrique de ces matériaux peut aboutir, entre autre, à augmenter la fiabilité et la durée de vie de machines électriques.

Au cours des différentes phases de l'élaboration d'un isolant, des impuretés de taille microscopique et de formes diverses peuvent être incorporées à l'isolant ou créées à l'interface des zones conductrices ou semi-conductrices malgré les précautions prises par les fabricants de matières premières que par les constructeurs. Des inhomogénéités dans la structure de l'isolant peuvent être créées au cours de l'extrusion ou du refroidissement de la couche isolante. Ces hétérogénéités induisent des perturbations dans la distribution du champ électrique ainsi qu'un renforcement de ce dernier pouvant conduire à l'apparition de décharges partielles et à la génération, à plus ou moins long terme, d'arborescences électriques. Le développement de ces arborescences peut avoir une issue fatale sur l'isolation

Le présent travail traite le vieillissement électrique du polyester – imide utilisé comme isolant dans les machines électriques. Il est bien connu que la rupture diélectrique est un phénomène aléatoire. Par conséquent, une étude statistique des temps de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull.

Dans le premier chapitre, nous présentons le polyester - imide : formule chimique, propriétés physiques et chimiques, ...etc.

Le deuxième chapitre concerne la rupture diélectrique des isolants solides. Dans un premier temps, les différents mécanismes du phénomène de claquage sont décrits. Ensuite sont exposées les décharges partielles, leur naissance, leur extinction, leur mesure et leur nocivité sur la durée de vie des isolants solides. Dans un deuxième temps, nous présentons les différents phénomènes d'initiation et de propagation de l'arborescence électrique dans les polymères. Les différents facteurs influençant ces phénomènes ont été détaillés : forme de tension, polarité, charge d'espace, propriétés mécaniques du polymère, préparation des échantillons, configuration des électrodes, fréquence, distance interélectrode Quelques méthodes utilisées pour limiter l'initiation ont été citées.

Le troisième chapitre décrit les techniques expérimentales utilisées durant nos essais. Sont présentés les méthodes d'élaboration des échantillons et d'essai de vieillissement électrique du polyester – imide sous champ continu. Deux matériaux diélectriques ont été considérés : le polyester – imide de classe H et le polyester – imide avec une couche de polyamide imide (classe C).

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous décrivons la méthodologie du calcul statistique. Les diagrammes de Weibull ont été tracés. Les courbes d'endurance électrique du polyester – imide sous champ continu ont été établies. Une discussion et une interprétation des résultats ont été données.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives.

CHAPITRE I : EMAUX ISOLANTS

Dans ce chapitre, nous présentons les émaux isolants: macromolécule, procédés de polymérisation, imprégnation, formule chimique, propriétés, utilisation et comportement au vieillissement.

1. STRUCTURE DE BASE DE MACROMOLECULES

Les aspects physico-chimiques et moléculaires déterminent très largement le comportement physique des polymères, la composition élémentaire, la disposition des atomes et des liaisons, l'ordre d'enchaînement et les aspects topologiques définissant la structure de base d'une macromolécule. Elle dépend de la matière chimique des unités, du milieu réactionnel,... [1].

Le processus de polymérisation d'un polymère peut être décrit comme suit [2] : la polymérisation rompt la double liaison, ce qui active le monomère et lui permet de se lier à d'autres, pour former une longue chaîne ou macromolécule. Il suffit que deux ou trois molécules se lient pour créer un polymère. Mais en faire un solide aux propriétés mécaniques intéressantes, il faut que les chaînes soient plus longues au moins 500 monomères ; leur longueur ou leur masse moléculaire totale sont des paramètres structuraux importants.

On utilise habituellement le degré de polymérisation qui est le nombre de monomères par macromolécule. La masse moléculaire est le produit du degré de polymérisation par la masse moléculaire du monomère. La plupart des propriétés des polymères dépendent du degré de polymérisation moyen.

2. EMAUX ISOLANTS

L'émail constitue l'isolation électrique élémentaire car il se trouve en contact intime avec le conducteur (cuivre) en raison de son procédé de fabrication. Selon la température d'utilisation, il peut être constitué d'une ou de plusieurs couches de polymères de même nature ou de natures différentes. Dans certains cas (pour assurer une meilleure tenue aux décharges partielles par exemple) il peut être renforcé par un composite inerte comme des fibres de mica ou des charges d'oxyde métallique. L'émail est constitué de plusieurs couches de vernis d'émaillage déposées successivement

Les qualités d'un émail sont déterminées en tenant compte des conditions de son emploi. Les éléments à faire intervenir pour le choix d'un émail sont: les dimensions des conducteurs, les conditions de mise en oeuvre, le mode de bobinage (long ou rapide), le traitement d'imprégnation, les températures maximales d'utilisation et le milieu ambiant [3]. La détermination de la capacité d'une machine à supporter un fonctionnement en régime permanent sous l'effet de la température est primordiale. Cette grandeur est définie comme étant sa classe thermique. La classe thermique définit la température maximale de fonctionnement des bobinages. Les trois classes les plus utilisées sont reportées dans le Tableau I-1. Elles donnent les températures maximales de l'isolant.

Classe	Température maximale (°C)
B	125
F	155
H	180

Tableau I.1. Différentes classes des émaux isolants

Les qualités adhésives de ces émaux sur différents matériaux ont été mises en évidence [4]. Les fabricants d'émaux sont portés sur l'élévation et la stabilisation des qualités de ces produits, dans des conditions de plus en plus sévères de leur emploi.

Les vernis d'imprégnation sont déposés sur les bobinages déjà formés. Leur rôle est d'augmenter la tenue mécanique du bobinage, la dissipation calorifique, la protection par rapport à l'environnement et la tenue diélectrique pour les moyennes et hautes tensions. Ces polymères sont de natures différentes selon principalement la gamme de température d'utilisation. Pour obtenir une bonne imprégnation, il est nécessaire de bien maîtriser les paramètres comme la pénétration à coeur des enroulements, le point de gélification pour fixer celui-ci dans le bobinage et enfin la polymérisation de ce vernis pour garantir les propriétés recherchées. Les plus utilisés sont généralement des vernis époxydes, polyester ou polyester - imide.

L'imprégnation de fils émaillés au moyen de vernis appropriés est généralement indispensable après bobinage. Le choix du vernis d'imprégnation et son association correcte au vernis d'émaillage doivent faire intervenir ou bien le comportement du vernis d'imprégnation, ou bien l'ensemble des deux vernis superposés. Ainsi, il faut tenir compte des conditions d'application du vernis d'imprégnation, de sa résistance au vieillissement, de ses qualités diélectriques, de sa tenue aux huiles, aux agents chimiques, aussi de son action prolongée sur le fil émaillé. Le vernis d'imprégnation ne doit pas attaquer l'émail ni être l'objet d'incompatibilités diverses.

L'expérience a montré que les fils émaillés et les vernis ou résines isolantes pouvaient avoir une action réciproque au cours du vieillissement thermique. L'interaction entre vernis et émail peut conférer à l'ensemble fil émaillé-verniss d'imprégnation une durée de vie supérieure ou inférieure à celle du fil émaillé essayé isolément [5].

Des travaux sur le fil émaillé au formvar ont montré que le vernis apporte une protection efficace à l'émail contre la dégradation thermique du matériau et qu'il ne se

produit pas d'incompatibilité sensible. De plus, au point de vue de tenue diélectrique, les tensions de claquage sont plus élevées dans le cas du fil émaillé avec vernis en raison de la surépaisseur apportée par ce dernier [6]. Le vernis est à diluer avec un solvant approprié pour obtenir l'épaisseur de revêtement désirée. De nombreuses tentatives sont faites actuellement pour mettre au point et normaliser des méthodes plus rapides. Cependant, le choix du vernis d'imprégnation restant souvent difficile, il sera de préférence effectué en relation directe avec les sociétés productrices des produits à associer [3].

Les fils émaillés présentent une bonne résistance à l'action de la température et de l'humidité et une bonne résistance chimique aux solvants des vernis d'imprégnation. Les émaux isolants sont caractérisés par leur classe (F, H, C, ...etc). Parmi les émaux, on retrouve principalement [3] : les émaux dérivés d'acétates polyvinyliques, de polyuréthanes, polyester, polyester - imide, polyamide – imide et de polyimide.

Les polyester - imides (PEI) sont en général de classe 180°C et sont "brasables" (ils se décomposent pendant un temps court dans un bain de brasure à 450°C). Ils possèdent en général une très bonne souplesse et une bonne adhérence au cuivre mais une thermoplasticité assez faible (270°C) (la thermoplasticité étant la capacité d'un film polymère à fluer sous une certaine charge avec la température). On les retrouve sur des diamètres de 0,03 à 0,8 mm.

3. UTILISATIONS

Les cas d'utilisation les plus courants des émaux sont [3] :

3.1. En fils ronds

Ils sont utilisés dans le matériel grand public (électroménager, outillage portatif), l'automobile, les moteurs électriques et les transformateurs de petite et moyenne puissance (≤ 100 kW), les ballasts (éclairage) et les petits bobinages pour l'électronique (en particulier, les bobines de déviation pour tubes TV).

3.2. En fils méplats

Les émaux isolants sont utilisés dans les grandes machines électriques tournantes et les gros transformateurs

4. DOMAINES D'APPLICATION

Les deux domaines essentiels d'application sont [3] :

4.1. En électrotechnique

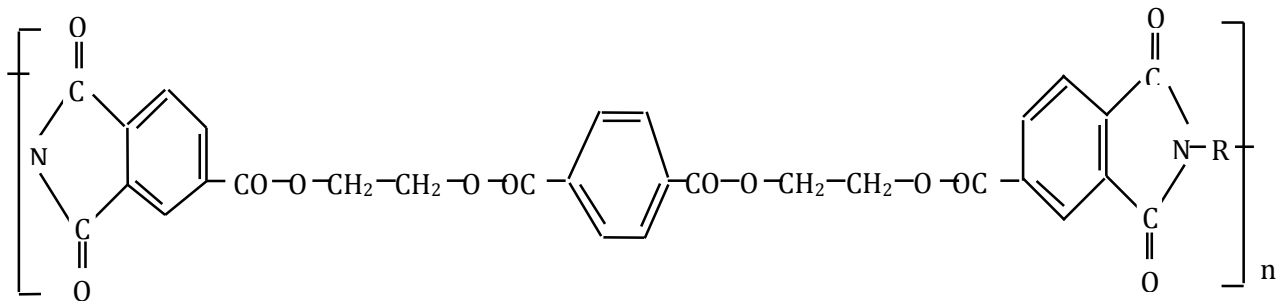
En fréquence industrielle et à courant continu, les principales qualités à exiger sont la stabilité thermique, la résistance mécanique, la résistance aux agents chimiques d'agression (éventuellement aux solvants des vernis d'imprégnation).

4.2. En électronique

On recherche particulièrement des pertes diélectriques réduites, une faible hygroscopicité, des facilités de soudage et de collage. Dans tous les cas, une résistance particulière aux contraintes thermiques peut être imposée.

5. EMAUX DE POLYESTER-IMIDE

Les polyester-imides sont généralement obtenus par la réaction entre les dianhydrides contenant des liaisons ester avec des diamines [7,8]. La formule chimique du polyester-imide est la suivante [7]:



R: groupement alkyle quelconque (primaire, secondaire ou tertiaire).

Les applications des émaux de polyester-imide concernent une grande gamme de fils, de section circulaire ou rectangulaire de toutes dimensions pour les utilisations très étendues aussi bien en électronique qu'en électrotechnique. Les caractéristiques dimensionnelles sont basées sur l'emploi de grades définissant différentes surépaisseurs dans l'ordre croissant (grade 1, 2, 3). Les polyester-imides sont surtout utilisés comme émaux pour fils résistant à la température.

CHAPITRE II : MECANISMES DE LA RUPTURE DIELECTRIQUE DES ISOLANTS SOLIDES

Dans ce chapitre, nous intéressons à la rupture diélectrique des isolants solides : mécanismes de claquage, arborescences électriques, décharges partielles, durée de vie sous champ électrique.

1. MECANISMES DE CLAQUAGE

1.1. Claquage thermique

Une explication du phénomène de claquage thermique est donnée par Coelho et Aladenize [9]. Lorsqu'un courant traverse un matériau isolant, la conductivité augmente avec la température. Par suite la température s'élève, le courant augmente à son tour et ainsi de suite. Si la chaleur accumulée ne s'évacue pas suffisamment vite, le processus peut conduire à un emballement thermique, c'est ce qu'on appelle le claquage thermique.

Le champ électrique de claquage qui permet d'amener la température T d'un matériau jusqu'à sa valeur critique T_{mc} se calcule en résolvant l'équation fondamentale traduisant le bilan énergétique:

$$C_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}(K \text{ grad } T) = \sigma G^2 \quad (\text{II.1})$$

avec:

C_v : chaleur spécifique

K : conductivité thermique

σ : conductivité électrique

G : champ électrique appliqué

t : temps d'application du champ électrique.

Les termes σG^2 et $C_v \frac{\partial T}{\partial t}$ représentent respectivement l'apport d'énergie d'origine électrique et l'élévation de la température de l'échantillon en fonction du temps. La dissipation thermique de l'échantillon se traduit par le terme $\text{div}(K \text{ grad } T)$. On suppose qu'il n'y a pas d'accumulation de charges c'est à dire $\text{div}(\rho G) = 0$.

La résolution de cette équation donne la température en fonction du temps de chaque point l'échantillon. Dans le cas d'un échantillon de grande surface, la tension critique de

claquage est donnée par la relation suivante [10]:

$$V_{oc} \approx \left(\frac{8K_0 k T_0^2}{\sigma_0 W} \right)^{0,5} \exp \left(\frac{W}{2k T_0} \right) \quad (II.2)$$

avec: $W \gg kT$ et $T_{mc} > T_0$

où:

W: énergie d'activation

k: constante de Boltzmann

σ_0 : constante

T_0 : température ambiante

K_0 : conductivité thermique.

1.2. Claquage d'origine électronique

Pour qu'un claquage purement électronique puisse survenir, une condition nécessaire mais non suffisante, est qu'il existe des électrons pouvant être accélérés et acquérir ainsi dans le champ une énergie comparable à l'énergie d'ionisation des atomes constitutifs (5 à 10 eV) [9].

1.2.1. Claquage intrinsèque

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

1.2.2. Claquage associé au volume libre

Artbauer [12] est le premier à utiliser la notion de volume libre dans le claquage et ceci en considérant que les électrons peuvent acquérir suffisamment d'énergie avec le champ électrique en traversant le volume libre pour causer la rupture diélectrique.

La structure chimique (poids moléculaire, réticulations, additifs) et physique (cristallinité, taille des sphérolites, microvides, contraintes mécaniques) influent directement

sur le claquage [13].

1.2.3. Claquage par avalanche

La théorie de la rupture par avalanche envisage le claquage comme la conséquence d'une augmentation régulière du nombre de porteurs créés par ionisation. L'origine de ces porteurs (injection des électrodes, génération dans le volume) est envisagée mais le champ électrique est considéré uniforme. Coelho et Aladenize donnent une explication du processus [9]: lors de la collision ionisante avec un atome du matériau, l'électron incident peut céder, à l'atome assez d'énergie pour l'ioniser sans être piégé. L'atome se charge positivement en libérant un nouvel électron, de sorte qu'on a alors 2 électrons libres qui peuvent acquérir dans le champ assez d'énergie pour provoquer chacun une nouvelle collision ionisante donc 2 électrons et ainsi de suite. Chaque électron libre accéléré produirait une avalanche exponentielle d'ions positifs fixes et un nuage d'électrons libres balayé par le champ.

1.3. Claquage électromécanique

Stark et Garton [14] ont introduit l'hypothèse d'un claquage électromécanique dans le polyéthylène. La pression qui s'exerce sur le diélectrique lorsque les électrodes sont fixes, ou force de compression de Maxwell est de la forme [15]:

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon E_{\max}^2 \quad (\text{II.3})$$

où:

ε : permittivité du diélectrique

E_{\max} : valeur maximale du champ appliqué.

L'application d'une tension V à un échantillon d'épaisseur d_0 provoque l'apparition de forces de compression sur le matériau dues à l'attraction mutuelle des deux électrodes. Cette contrainte mécanique provoque une diminution de l'épaisseur (d

$< d_0$) [14]. A l'équilibre, la compression d'origine électrique est compensée par la force plastique. La valeur critique de l'épaisseur est donnée par l'expression [14]:

$$d_c = d_0 e^{-0,5} \quad (\text{II.4})$$

Le champ réel de claquage est [14]:

$$G_c = \frac{V}{d_c} = \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.5})$$

où:

Y: module de Young du matériau

ϵ_r : permittivité relative du diélectrique

ϵ_0 : permittivité du vide.

Le champ apparent expérimental vaut V/d_0 , soit:

$$G_{app} = \frac{V}{d_0} = \frac{G_c d_c}{d_0} = 0,606 \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.6})$$

$$G_{app} = 0,606 G_c \quad (\text{II.7})$$

Cette relation n'est valable que dans la zone élastique (zone de réversibilité) du matériau et d'une manière générale, le claquage se produit dans la zone plastique (zone de non réversibilité). Pour cela, on tient compte non plus du module d'Young mais aussi du seuil de plasticité du matériau [14].

2. RUPTURE A COURT TERME

La rupture est un phénomène localisé: l'introduction d'électrons chauds dans la structure des polymères s'accompagne d'une dégradation du matériau résultant de l'impact de ces porteurs sur les molécules du milieu. Sous des champs de 1 à 10 MV/cm, les temps de rupture restent inférieurs à la seconde: c'est la rupture diélectrique à court terme [16]. L'effet de la charge d'espace est important dans les phénomènes de rupture diélectrique [13]. La rigidité diélectrique des polymères polaires est plus

importante que celle des polymères non polaires [13]. La tenue diélectrique des polymères dépend de plusieurs facteurs.

2.1. Effet de la tension et du système d'électrodes

La tension de rupture dépend:

- de la distance interélectrode
- de la géométrie des électrodes qui détermine la configuration du champ électrique

- de la forme de l'onde de tension, de la fréquence et de son mode d'application par palier ou par rampe. Des essais effectués sur des échantillons de câbles ont montré que la tension de claquage est plus importante en continu qu'en alternatif [17].
- souvent du métal des électrodes
- de l'état de surface des électrodes [18].

En courant alternatif, la tension de claquage diminue en fonction des dimensions des cavités; elle est constante en impulsionnel [19]. Pour une distance interélectrode d et une tension de rupture V_r données, on a:

$$V_r (\text{uniforme}) > V_r (\text{champ divergent négatif}) > V_r (\text{champ divergent positif}).$$

2.2. Effet de la température

L'allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique en courant continu pour des polymères non polaires, tel que le polyéthylène d'après Ieda [13] montre 3 régions (figure II.1). On observe une décroissance de la rigidité diélectrique des basses températures vers les hautes températures.

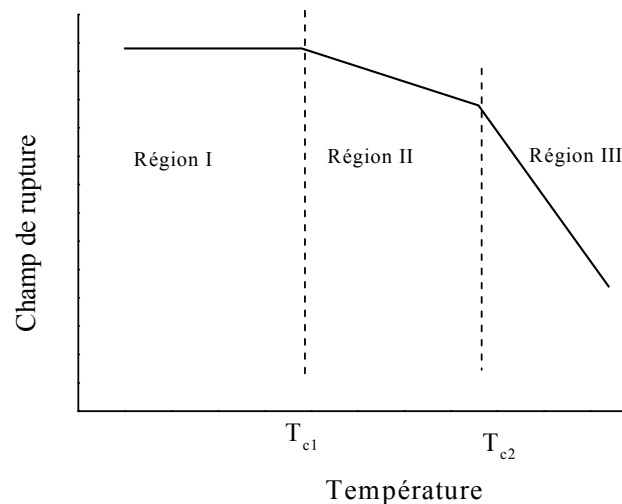


Figure II.1. Allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique

2.3. Effet de l'épaisseur de l'isolant

Généralement le champ de claquage diminue quand l'épaisseur augmente [20,21]. La rigidité diélectrique d'un matériau est liée à l'épaisseur e de l'isolant par la relation suivante [22]:

$$E = k e^{-n} \quad (\text{II.8})$$

où:

k: constante dépendant des conditions de mesure, de la géométrie et des propriétés des électrodes

n: constante

$0,5 < n < 0,7$ suivant le matériau considéré.

3. RUPTURE A LONG TERME

Il est difficile de faire une distinction entre le claquage à court terme et le claquage à long terme. Il n'est pas aisé de définir cette frontière temporelle. Dans le cas de la rupture à long terme, on parle plutôt de vieillissement électrique du matériau. Le vieillissement d'un matériau est, en général, tout phénomène qui se traduit par une évolution lente et irréversible de ses propriétés avec le temps. Les mécanismes qui interviennent sont: l'oxydation, l'hydrolyse, la photoxydation, La rupture à long terme peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années [16].

4. DECHARGES PARTIELLE

La dégradation des isolants par décharges partielles est connue depuis longtemps. En effet, il est certain que les méfaits causés par ces décharges dans les câbles électriques, alternateurs, moteurs, condensateurs et transformateurs ont préoccupé les utilisateurs. Quel que soit le soin apporté à la mise en œuvre d'un système d'isolation, il existe des cavités gazeuses, dont les parois sont constituées soit par le seul isolant, soit par le matériau et une partie conductrice. Il est difficile de connaître par une mesure directe leur volume et la pression qui y règne, cette dernière dépendant des conditions de préparation de l'isolation, qui font souvent appel au dégazage par application d'une dépression de quelques torrs, parfois une suppression de quelques dizaines de pascals. De plus, les cavités qui sont formées lors de la polymérisation du matériau présentent des caractéristiques variables selon la profondeur à laquelle elles se situent dans le mur isolant. L'étude de l'effet des défauts sur les propriétés de matériaux diélectriques est nécessaire afin d'améliorer leur fiabilité.

Une des plus importantes investigations sur le claquage diélectrique de l'isolation est la localisation de la source de décharges et sa caractérisation [23]. Ces dernières causent des changements physiques et chimiques des matériaux isolants qui, à long terme, conduisent à la rupture diélectrique [24]

4.1. CLASSIFICATION DES DEFAUTS DES ISOLATIONS HAUTE TENSION

Pour améliorer les techniques de fabrication de câbles, il est important de réduire la densité des défauts dans l'isolation. Il s'agit de localiser et d'examiner les défauts qui réduisent la rigidité diélectrique de l'isolant. Les défauts qui peuvent être classés en deux catégories:

- les cavités gazeuses qui peuvent donner lieu à des phénomènes de décharges,
- les hétérogénéités aux interfaces ou dans la masse de l'isolant autour desquelles le champ électrique peut prendre des valeurs importantes.

4.1.1. Cavités gazeuses

Elles peuvent avoir deux origines:

- microcavités préexistant au sein du matériau,
- cavités créées au cours de la mise en oeuvre ou du fonctionnement du système.

4.1.1.1. Microcavités préexistant au sein du matériau

Deux cas sont à envisager en fonction de la nature réticulée ou non réticulée de la structure du matériau. La réticulation s'accompagne d'un dégagement de gaz qui a tendance à former des bulles si la technologie de fabrication n'est pas bien adaptée: pression ou longueur de refroidissement insuffisante. Dans le cas d'un matériau réticulé, c'est le procédé de réticulation qui est responsable de la formation de cavités. Dans le cas d'un matériau semi-cristallin non réticulé c'est la cristallisation qui pourrait donner naissance à des cavités de dimensions beaucoup plus petites.

a) Cavités d'eau

Elles se forment dans le matériau lorsque la réticulation est réalisée par voie humide. Dans le polyéthylène, à la température de fusion, l'eau est plus soluble dans le matériau qu'à température normale et se mélange au polymère. Au refroidissement, les phases se séparent

et donnent naissance à la formation de gouttelettes d'eau qui diffusent au bout d'un certain temps, laissant des cavités.

b) Cavités de gaz

L'agent de réticulation le plus couramment utilisé est le dicumylperoxyde (DCP). Certains produits de décomposition de cet agent sont gazeux (méthane). Ils restent piégés dans le matériau au cours de la cristallisation, puis diffusent laissant ainsi des microcavités localisées [25]. La densité et les dimensions des microcavités dépendent du mode de réticulation. Les différentes évaluations font état de 10^3 à 10^5 cavités/m³ de dimensions comprises entre 1 et 10 μm [26].

4.1.1.2. Cavités créées au cours de la mise en oeuvre ou du fonctionnement du système

Au cours de fonctionnement de machines électriques ou de l'appareillage, il apparaît des soufflures ou des décollements dus à des contraintes thermiques ou mécaniques. Ces défauts font également perdre leur homogénéité à l'isolation. On rencontre des occlusions lorsque l'adhérence des matériaux en présence n'est pas parfaite, soit qu'il s'agisse d'isolants entre eux (matériaux composites) ou de contacts isolant – métal.

4.1.2. Hétérogénéités

Elles peuvent conduire à des concentrations locales du champ électrique. Dans le cas des inhomogénéités de forme sphérique de constante diélectrique ϵ , noyées dans l'isolant sous champ uniforme, le facteur multiplicatif du champ n'exède pas 3. Si l'inhomogénéité est de forme ellipsoïdale, le facteur multiplicatif peut être beaucoup plus important [27].

4.2. CARACTERISTIQUES DES DEFAUTS DE CABLES ELECTRIQUES

Dans les câbles isolés au PRC, plusieurs particules ont été observées : Ca, Fe, Si et Al [28]. Dans les câbles au PR, les cavités apparaissent être sphériques : leur nombre et leurs dimensions dépendent du processus de refroidissement [29]. Sous l'action d'un champ électrique, la génération des défauts peut se produire [30]. Il a été montré que la rigidité diélectrique, sous champ alternatif, des câbles en PRC diminue avec l'augmentation des dimensions de la cavité [19]. D'autres chercheurs [31] ont rapporté une diminution de la

rigidité diélectrique de l'éthylène propylène diène monomère (EPDM) en fonction de la concentration en particules de fer.

4.3. Définition

La Commission d'Electrotechnique Internationale N° 270 [32] donne la définition suivante : « une décharge partielle est une décharge électrique dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'intervalle isolant séparant deux conducteurs ».

4.4. Naissance des décharges partielles

Par leurs dimensions, leur pression et les contraintes de tension auxquelles sont soumises les cavités sont telles, que conformément à la loi de Paschen, des décharges y prennent naissance créant parfois des perturbations sur les circuits électroniques avoisinants et contribuant surtout à la détérioration plus ou moins lente de l'isolant. La mise en court-circuit, par une décharge, d'une vacuole dans une isolation, donne naissance à un certain nombre de phénomènes physiques dus à la transformation de l'énergie électrique fournie en énergie thermique, lumineuse et acoustique.

Plusieurs chercheurs ont apporté leur contribution à l'étude des décharges partielles [33-36]. Les études concernent les phénomènes électriques auxquelles elles donnent naissance, le comportement des matériaux soumis à leur attaque, tant au point de vue durée de vie que l'évolution physico-chimique de la matière solide et du gaz qui la baigne.

4.4.1. Tension aux bornes de la vacuole

Gemant et al [37], dès 1932, ont proposé le schéma équivalent d'une isolation avec une cavité. Cette représentation idéalisée à la figure II.2 comprend la capacité totale du mur isolant a , et la capacité b de la partie saine en série avec la capacité c de la cavité.

Si on applique aux bornes d'une éprouvette une tension U_a au moins égale à une valeur U_s appelée tension de seuil, telle que la différence de potentiel V_c aux extrémités de la vacuole atteint la tension disruptive U_i du gaz qu'elle contient, des décharges prennent naissance, constituant une cause d'érosion permanente et contribuant ainsi à la détérioration plus ou moins lente de l'isolation. La condition nécessaire et suffisante pour créer des décharges est donc $V_c = U_i$.

La différence de potentiel aux bornes de la cavité dépend de la valeur de la tension appliquée à l'ensemble, de la nature même du matériau, de la géométrie du défaut, des conductivités superficielle et volumique de l'isolant [38].

La tension d'amorçage dépend, conformément à la loi de Paschen, de la nature, de la pression et de l'épaisseur de la lame de gaz contenu dans la cavité. Pour l'air, on constate qu'à la pression atmosphérique, la tension minimale d'amorçage est de 350 V pour une distance de 8 μm .

D'après Laurent [39], des cavités de l'ordre de 10 μm peuvent être le siège de décharges partielles si l'isolant est soumis à des gradients au moins égale à 20 kV/mm. Il est à noter que la loi de Paschen a été établie pour des électrodes métalliques, ce qui est loin des conditions d'une vacuole gazeuse à paroi diélectrique.

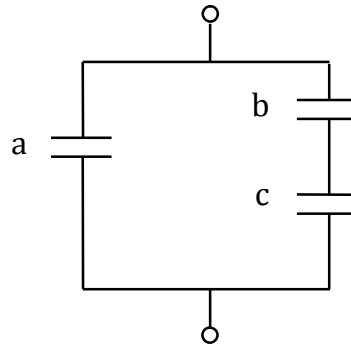


Figure II.2. Schéma équivalent d'un isolant avec une cavité.

Dans le cas d'un champ divergent, il a été montré que la tension d'amorçage augmente avec le rayon de courbure de la pointe [40]. La tension d'initiation des décharges partielles croît quand la fréquence du signal diminue [41]. Dans l'étude des films minces de polypropylène, Shobha et al ont établi la relation de la tension d'amorçage U_i en fonction des dimensions de la vacuole [42]:

$$U_i = A \left(\frac{d}{\rho} \right)^{-B} \quad (\text{II.9})$$

avec:

A et B sont des constantes

d est le diamètre de la vacuole

ρ est la hauteur de la vacuole.

Selon les travaux de ces auteurs, la tension d'extinction représente 12 à 20% de la tension d'amorçage [42]. Fieux [43] donne une expression de la tension d'extinction U_e en fonction de la tension d'initiation U_i :

$$U_e = \alpha U_i \quad \text{avec } \alpha = 0,8 \quad (\text{II.10})$$

4.4.2. Nombre de décharges

Garton [44] indique que sur le polyéthylène, 10^9 décharges sont nécessaires, pour créer des sites d'érosions visibles, dues aux impacts de ces dernières. La dégradation est plus sensible à l'énergie des électrons qu'à leur nombre [45]. Dans le cas d'une isolation comportant une vacuole unique, soumise à un champ alternatif, Bui Ai [46] a montré que ce nombre par seconde s'exprime par la relation:

$$n = 4f \frac{V_c - U_e}{U_i - U_e} \quad (\text{II.11})$$

avec:

f : fréquence de la tension appliquée

V_c : tension aux bornes de la vacuole

U_i : tension d'amorçage

U_e : tension d'extinction.

4.4.3. Energie de décharges partielles

On peut calculer l'énergie E dissipée par une décharge se produisant dans une cavité [47]:

$$E = Q_r (V_a - V_e) \quad (\text{II.12})$$

avec:

Q_r : charge réelle de la décharge

V_a : tension d'allumage de la décharge

V_e : tension d'extinction de la décharge.

Cependant, les grandeurs Q_r , V_i et V_e n'étant pas accessibles à la mesure, il est généralement impossible de mesurer l'énergie d'une décharge prise individuellement. On utilise alors l'expression suivante [47]:

$$E_T = \sum_{t=0, i=1}^{T, N} U_i \cdot Q_i \quad (\text{II.13})$$

où:

E_T : énergie des décharges

$U_i = U(t_i)$, tension aux bornes de l'objet en essai à l'instant de la décharge

Q_i : charge apparente de la i ème décharge

N : nombre de décharges pendant le temps T

T : temps d'application de la tension à l'isolant

t_i : instant où se produit la i ème décharge.

Le calcul de l'énergie des décharges consiste en l'addition des produits élémentaires $U_i \cdot Q_i$ sur un nombre entier de périodes de la tension d'alimentation, en tenant compte du signe.

4.4.4. Evolution de la pression avec les décharges, dans des cavités superficielles

L'influence de la pression du gaz dans les vacuoles sur les décharges dans l'isolation a été mise en évidence [48,49]. L'effet de la nature du gaz sur le changement de pression due aux décharges a été rapporté [50,51].

Lorsque les décharges conduisent à une détérioration et une perforation par arborescences, on doit tenir compte de cette évolution de la pression dans la cavité où prennent naissance "les branches d'arbre" pour expliquer l'évolution de ces dernières. Dans ce domaine, Nawata et al [52] donnent une analyse de ces phénomènes. Ce mode de perforation fait apparaître clairement les actions concomitantes d'une baisse de pression et d'un champ qui devient très élevé à la pointe d'une branche.

L'abaissement du potentiel d'amorçage et le développement des décharges sont, aussi selon Olyphant [53], la conséquence d'une réduction de la pression à l'intérieur de la cavité.

5. NOCIVITE DES DECHARGES PARTIELLES

La dégradation liée aux décharges partielles est un processus lent. Pour être mis en évidence, il nécessite de grandes périodes allant jusqu'à quelques années. La durée de vie des

isolants solides est étroitement liée à l'énergie des décharges partielles [47]. Plusieurs travaux font appel aux mécanismes de dégradation et de claquage par les décharges partielles [38,46].

Afin de déterminer la résistance des isolants à l'action des décharges partielles, deux types d'expériences étaient habituellement mis en oeuvre:

- la détermination de la durée de vie, c'est à dire du temps de rupture de l'isolant soumis à une contrainte permanente de tension.
- le relevé des variations de propriétés physiques ou chimiques, permettant de comparer deux grandeurs reliées d'une part aux causes du phénomène et, d'autre part, à ses conséquences.

Des chercheurs [54] ont entrepris une étude de la dégradation du polyéthylène en présence de divers gaz (N_2 , SF_6 , H_2). En soumettant le polyéthylène [6] à l'action de décharges partielles en présence séparément d'azote, d'air synthétique, d'oxygène et d'hexafluorure de soufre, les produits de dégradation obtenus sont différents. La dégradation des isolants solides est directement reliée à l'énergie de conversion dans les cavités [55]. L'énergie électrique est transférée éventuellement comme énergie thermique à la cavité et au volume de l'isolant avoisinant.

La nature des parois joue un rôle important sur les caractéristiques des décharges [56,57]. En effet, l'émission de champ, l'émission secondaire et la conductivité superficielle sont différentes pour un isolant et pour un métal ou pour deux parois métalliques ou deux parois isolantes. Les décharges partielles érodent le bord de la cavité et augmente lentement sa dimension [58].

Il faut souligner l'importance des caractéristiques géométriques et physiques des cavités et tenir compte en particulier :

- des résistivités volumiques et superficielles du matériau, c'est ainsi qu'une grande conductivité électrique entraîne l'accroissement de l'amplitude des décharges.
- de l'aire moyenne intéressée sur chaque électrode, par une décharge considérée isolément.

de la pression régnant dans les cavités et son évolution au cours du temps, compte tenu de la nature du gaz, notamment de son caractère électronégatif, de ses réactions chimiques qui se produisent dans le solide ou à l'extérieur de ce dernier.

Plusieurs auteurs ont mentionné les mécanismes de dégradation qui se produisent : production de gaz ($\text{CO}_2, \text{H}_2, \text{C}_2\text{H}_2, \text{CH}_4$), changement de structure, produits solides, dégradation due à des gaz actifs, et échauffement [59].

Dans le cas du polyéthylène, l'action directe des électrons n'est pas la seule cause de la dégradation, seule une interaction avec les molécules d'oxygène de l'air ambiant peut conduire à une activation de l'oxygène de l'isolant [45].

6. MESURE DE DECHARGES PARTIELLES

Il existe plusieurs moyens de mesure des paramètres des décharges partielles qui font appel à des mesures acoustiques, optiques et électriques. Des investigations ont été faites par plusieurs chercheurs : Yao et al [60], Menguy [47], Guzmán et al [61] et Bartnikas [62].

7. ARBORESCENCES ELECTRIQUES

Les arborescences ont comme origine des défauts au sein du matériau tels qu'il se produit une concentration importante du champ électrique. Les expérimentateurs simulent des défauts en introduisant une aiguille pointue dans un isolant. La tension est appliquée entre l'aiguille et une électrode généralement plane et en contact avec le matériau. En pratique, il s'agit de reproduire les conditions nécessaires à l'apparition des arborescences. La pointe sert alors de site d'initiation. Le phénomène est toujours caractérisé par 3 phases:

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

7.1. 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.

7.1.1. 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 [63,64]. Ces cavités seraient dues aux dilatations différentielles du polymère et du métal et à l'air absorbé [64]. Si ces microcavités n'existent pas à l'origine, elles sont créées par une fatigue électromécanique aux points de concentration du champ électrique [65].

7.1.2. Action des porteurs chauds sur la structure du polymère

Eichhorn [66] 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.

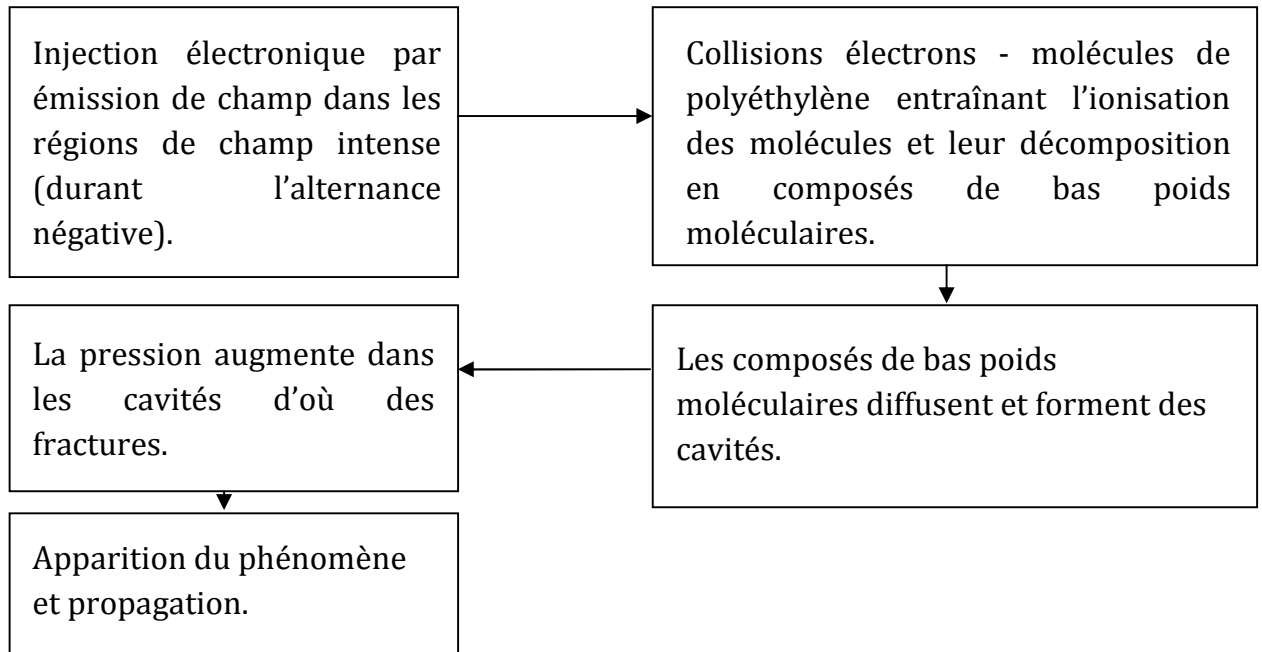


Figure II.3. Processus de dégradation sous l'action des porteurs chauds [66].

7.1.3. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique

Noto et Yoshimura [29] 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 [29] 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.

7.1.4. Travaux effectués

Il semble que la présence de microcavités à la pointe est nécessaire [63]. De nombreux chercheurs ont montré que les décharges partielles ne sont décelées qu'à partir de l'instant où l'arborescence se développe, ce retard à l'apparition pouvant être assez long [64]. Noto et Yoshimura [67] donne une explication du phénomène d'initiation :

Application de la tension \longrightarrow (1) Génération de la cavité \longrightarrow Amorçage de décharge partielle dans la cavité \longrightarrow (2) Elargissement de la cavité

Le processus (1) est dû à la force de compression de Maxwell. Le processus (2) est attribué à une augmentation de la pression du gaz généré par les décharges partielles qui augmente la température de la cavité. Les auteurs ont rapporté une augmentation de la longueur de la cavité, suivant la direction de l'axe des électrodes, en fonction du temps d'application de la tension.

Dans le but de simuler une cavité, Kreuger [68] a utilisé des éprouvettes faites de plusieurs couches de films de polyéthylène élaborées avec des trous de différents diamètres. Après 3 h d'application d'un champ électrique de 15 kV/mm, 50 Hz, il a été observé une augmentation du diamètre et de l'épaisseur de la cavité réduisant grandement la durée de vie des échantillons

Les temps d'incubation peuvent varier d'une valeur nulle à quelques dizaines de minutes [63,69]. L'influence de la fréquence a été analysée [29]: 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 $\frac{1}{f^x} E^n$ [69]:

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

avec:

E: champ électrique appliqué

f: fréquence.

D'après les travaux de Suwarno et al [70], le nombre de décharges de l'arborescence électrique augmente avec la fréquence. A une fréquence constante, le nombre et l'intensité moyenne des décharges augmentent linéairement avec la tension appliquée.

Kudo [71]. a montré que la tension d'initiation augmente avec le rayon de courbure de l'électrode pointe. Il a été établi également que la tension d'incubation dépend de sa forme :
 $V_{\text{alternative}} < V_{\text{impulsionelle (+)}} < V_{\text{impulsionelle (-)}}$

Le mode de préparation des éprouvettes est important [72]. La présence d'additifs peut influencer fortement l'apparition et même empêcher la formation d'arborescences [73].

Lorsque le polyéthylène est préalablement dégazé sous vide primaire (10^{-3} Torr), c'est à dire ne contient plus qu'une quantité résiduelle de gaz, le seuil d'apparition de l'arborescence en tension alternative est deux fois plus élevé que dans les conditions normales de pression [74].

La charge d'espace joue un rôle important pendant la phase d'incubation [75]. Sa présence permet aussi d'expliquer que les arborescences apparaissent à des tensions plus élevées sous tension continue que sous tension alternative [76], ainsi que l'effet de polarité [77].

Des travaux entrepris sur l'étude du comportement des polymères sous champs électriques élevés ont abouti à l'hypothèse de l'existence d'un seuil de champ électrique à partir duquel une injection importante de charge se produit [78]. Sous contrainte alternative, la dégradation devient cumulative: à chaque alternance, le matériau subit une dégradation irréversible suite au changement de signe de la charge injectée. L'injection massive de charges n'est possible que si la mobilité des porteurs atteint des valeurs comparables à celles de la bande de conduction, ce qui ne se produit qu'une fois le champ critique d'injection atteint [78]. Lebey et Laurent ont rapporté que l'injection n'est effective qu'au delà d'un champ critique égal à 1 MV/cm [79]. Plusieurs chercheurs ont souligné l'importance du rôle du matériau des électrodes dans les phénomènes d'injection [80].

L'indication de la présence d'une arborescence se fait soit par une observation directe par microscope, soit par la présence de décharges partielles à la pointe d'électrode au moment de l'initiation. Hozumi et al [81] ont développé une technique d'observation du phénomène d'initiation en mesurant les décharges partielles dans le polyéthylène.

D'autres mécanismes peuvent jouer un rôle important dans la phase d'initiation : surchauffe locale et décomposition thermique du matériau [82], propriétés mécaniques du diélectrique [83], interface [84], humidité [85], dommage mécanique dû à la forte pression électrique [67] et "cracking" compte tenu des changements répétés de polarité [86]. D'après Arbab et Auckland [87], cette fatigue est due à l'action prolongée des vibrations mécaniques.

7.2. PHASE DE PROPAGATION

On admet 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 [63]. Le développement des arborescences électriques est toujours accompagné de décharges partielles mesurables qui apparaissent au moment où les premières branches sont visibles au microscope [88]. Certains auteurs pensent que le bombardement électronique ou ionique dû aux décharges provoque un échauffement suivi d'un claquage local [52] ou bien décompose l'isolant en gaz [63].

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 [64,65].

L'effet de 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 [64,88].

Les canaux ont un diamètre de l'ordre du micron [88]. Les gaz formés sont principalement l'hydrogène, la vapeur d'eau, de faibles quantités d'hydrocarbures non saturés [89] et des produits relativement conducteurs [88]. La vitesse de propagation est de l'ordre de $1\mu\text{m/s}$ [90]. Le temps de propagation est proportionnel à $\frac{1}{f^x} E$ [69].

avec:

$x \sim 1$ et E le champ électrique.

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 [91]. L'effet de la polarité a été mise en évidence [77].

Plusieurs paramètres influent sur le processus de propagation : fréquence [92], température [85], propriétés mécaniques [83,87,92], nature du gaz piégé [93,84], morphologie du polymère dans le volume [66] et l'interface [95].

Des impulsions de courant ont été mesurées par Arima et Watanabe [96]. Les émissions lumineuse [64,97] et acoustique [98] ont été mises en évidence.

On distingue plusieurs formes d'arborescence: de type branche, de type buisson et de type buisson ramifié [90,97]. D'après les travaux de Noto et Yoshimura [29] sur le polyéthylène sous tension alternative à 50 Hz:

- si $E < 5,4.10^8$ V/m , l'arborescence est du type branche
- si $5,4.10^8$ V/m $< E < 6,0.10^8$ V/m, l'arborescence est du type buisson
- si $E \sim 6,0.10^8$ V/m, l'arborescence est du type buisson ramifié.

Deux facteurs importants ont une influence sur la propagation de l'arborescence [64]. Le premier est 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. Un second facteur intervenant sur le développement est 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 [64]. Le gaz peut diffuser dans l'isolant et les charges reprennent alors.

7.3. PHASE D'AVALANCHE

Après l'établissement du courant de décharge entre les 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.

8. MODELES DE DUREE DE VIE

On considère que le matériau est soumis seulement au champ électrique.

8.1. Modèle de puissance inverse

Le modèle de puissance inverse est, en général, le modèle le plus fréquemment utilisé dans les études de vieillissement électrique des isolants solides. Ce modèle est un modèle empirique introduit par Peek en 1929 [99]. Il est donné par la relation suivante [100]:

$$t = k G^{-n} \quad (\text{II.14})$$

Ou $\log t = \log k - n \log G$

avec:

t: durée de vie

G: champ électrique appliqué

k: paramètre à déterminer à partir des essais

n: coefficient d'endurance électrique à déterminer expérimentalement.

Afin de vérifier la validité de l'application du modèle, il faut tracer la courbe donnant G en fonction de t en coordonnées bilogarithmiques. Si la courbe est une droite, le modèle peut être appliqué [100]. Des difficultés se présentent lors de l'extrapolation des résultats à des champs électriques très faibles. En effet, l'extrapolation de la droite de durée de vie conduit à conclure que l'isolant claquera au bout d'un certain temps à champ nul.

Le coefficient n constitue un critère d'évaluation de l'endurance en tension du matériau: plus sa valeur est élevée, meilleur est l'isolant [101]. Ce coefficient est compris entre 4 et 20 [102].

8.2. Modèle exponentiel

Dans le cas du modèle exponentiel, la relation entre le champ électrique appliqué et la durée de vie est donnée par [100]:

$$t = C \exp(-k G) \quad (\text{II.15})$$

Ou $\log t = \log C - k G$

Avec:

t: durée de vie

G: champ électrique appliqué

C et k: constantes à déterminer expérimentalement.

Pour valider le modèle, il faut représenter la courbe donnant G en fonction de t en coordonnées semi-logarithmiques (axe des ordonnées en échelle logarithmique). Si cette courbe est une droite, l'hypothèse d'utilisation du modèle est correcte [103].

CHAPITRE III : TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Dans ce chapitre, nous présentons les dispositifs expérimentaux utilisés pour l'étude du vieillissement électrique du polyester imide employé comme matériau diélectrique dans les machines électriques. Des éprouvettes sous forme de torsades ont été réalisées au Laboratoire de Physique de l'Entreprise Electro-Industries d'Azazga. Les essais de vieillissement électrique ont été effectués au Laboratoire de Haute Tension de l'Université de Béjaia. Vu le nombre d'échantillons à mettre en même temps au vieillissement, un bâti en bois pouvant contenir plusieurs torsades a été confectionné.

1. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Deux bobines de fil de cuivre émaillé ont été utilisées pour nos expériences. La première est constituée de fil de diamètre de 0,63 mm et recouverte d'une couche de polyester - imide de grade 2 et de classe H (180°C). La deuxième est, elle aussi, formée de fil de diamètre 0,63 mm mais isolé d'une première couche de polyester- imide et d'une deuxième (faible) de polyamide imide. Le matériau est de grade 2 et de classe C (220°C). La figure III.1 montre une bobine de fil de cuivre émaillé au polyester - imide.



Figure III.1. Bobine de fil de cuivre isolé au polyester -imide.

A l'aide du microscope présenté à la figure III.2, l'adhérence de la couche isolante a été contrôlée. Le test est satisfaisant puisque tous les échantillons n'ont pas présenté de craquelure.



Figure III.2. Microscope servant à observer les échantillons



Figure III.3. Tour à bobiner avec échantillon en cours de réalisation.

A partir d'une longueur fil de cuivre 400 mm, des échantillons en forme de torsade ont été confectionnés à l'aide du tour à bobiner montré à la figure III.3. La longueur des éprouvettes est de 125 ± 5 mm conformément aux recommandations de la norme

NF EN 60317-0-1 [104]. La force de traction exercée et le nombre de tours nécessaires pour la réalisation d'une torsade sont indiqués dans le tableau III.1. et conformes aux recommandations de la norme NF EN 60317-0-1[104]. Les deux extrémités ont été, ensuite, dénudées comme le montre la figure III.4. La boucle de la torsade a été coupée en deux points afin d'éviter le court-circuit lors de la mise sous tension. Ensuite, les deux extrémités ont été écartées, comme on peut le remarquer à la figure III.5, d'une distance suffisante afin d'empêcher le contournement de l'échantillon lorsque ce dernier est soumis au test de vieillissement électrique. Les éprouvettes ont été confectionnées avec beaucoup de précaution afin de ne endommager l'émail.

Diamètre nominal du conducteur (mm)		Charge (N)	Nombre de tours de la torsade
Supérieur à	Jusqu'à et y compris	7,00	12
0,500	0,710		

Tableau IV.1. Charge et nombre de tours appliqués à la torsade [104]



Figure III.4. Boucle formée de la torsade confectionnée avec le tour à bobiner

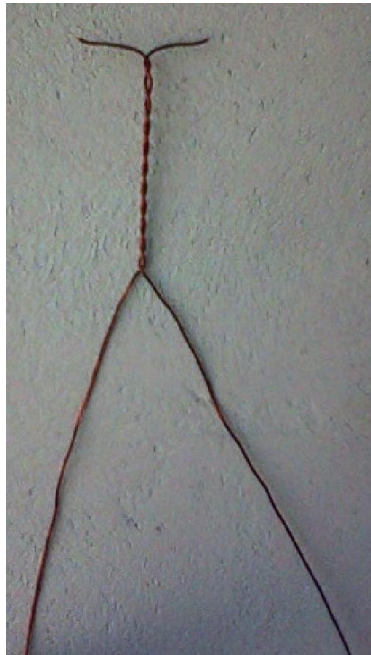


Figure III.5. Eprouvette en forme de torsade réalisée.

2. DISPOSITIF POUR ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ELECTRIQUE



Figure III.6. Bâti en bois réalisé avec échantillons fixés.

Pour effectuer les essais de claquage, nous avons fabriqué un dispositif expérimental. La première étape consiste à réaliser un bâti en bois de dimensions 210 cm × 60 cm x 120 cm. Ensuite, le bâti a été divisé en trois étages comme présentés à la Figure III.6. Ces derniers sont reliés entre eux à l'aide de deux rubans en cuivre conducteur servant d'électrodes de haute tension et de mise à la terre. Ces deux électrodes sont séparées d'une distance d'environ 30 cm. Chaque échantillon est fixé à deux barres en cuivre déposées sur un étage du bâti. Le dispositif peut recevoir 50 échantillons. Afin d'éviter l'amorçage dans l'air, la distance entre deux éprouvettes est fixée à 13 cm.

3. APPAREILS DE MESURE



Figure III.7. Source de tension SG1.

Pour la mesure du temps de rupture des éprouvettes, nous avons utilisé le dispositif expérimental du Laboratoire de Haute Tension de l'Université de Béjaia comportant les éléments suivants :

- Une source de tension SG1 (figure III.7)
- Un transformateur haute tension pouvant délivrer une tension pouvant atteindre 100 kV, 50 Hz en alternatif et 135 kV en continu (figure III.8),
- Une résistance $R= 106 \text{ k}\Omega$ qui joue le rôle d'amortisseur des courants de court-circuit (figure IV.7),
- Un voltmètre de crête (Ucr) AC/DC de type MU11 (figure III.9),

- Une cage de faraday (figure III.10),
- Un diviseur de tension capacitif ($C = 1\text{nF}$).



Figure III.8. Transformateur haute tension avec une résistance d'amortissement.



Figure III.9. Voltmètre de crête MU11

La figure III.10 montre l'ensemble cage de Faraday, appareils de mesure, bâti avec échantillons.



Figure III.10. Ensemble cage de Faraday, appareils de mesure et dispositif d'essai.

4. MODE OPERATOIRE

4.1. Conditionnement des échantillons



Figure III.11. Ensemble dessiccateur et échantillons en cours de conditionnement.

Avant la mise sous tension, les éprouvettes ont été conditionnées dans un dessiccateur contenant du gel de silicone régénéré à neuf, pendant au moins 24 h afin d'éliminer toute présence d'humidité. La figure III.11 montre le dessiccateur avec des éprouvettes en cours de conditionnement.

4.2. Essais de vieillissement électrique

La première étape consiste à fixer les éprouvettes sur le bâti. Pendant la deuxième étape, une tension continue de polarité positive est appliquée à l'ensemble d'une population de 50 éprouvettes. La tension est délivrée par la source de tension SG1 puis redressée avec un système de diodes (Figure III.7). Sa valeur est affichée par le voltmètre de crête MU11 (figure III.9). Les temps de rupture sont mesurés à l'aide du chronomètre montré à la Figure III.12. Le vieillissement étant long, à cet effet, nous avons procédé à des temps cumulés. Les expériences ont été réalisées à plusieurs niveaux de tension pour les deux types de polyester – imides décrits précédemment.



Figure III.12. Chronomètre utilisé pour la mesure des temps de claquage.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats concernant le vieillissement électrique du polyester - imide. Une analyse statistique des temps de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres que nous présenterons ci-dessous.

1. Modèle statistique de Weibull

La fiabilité d'un système ou d'un composant est la probabilité conditionnelle à un âge donné de remplir sa fonction, à l'intérieur des limites de performances spécifiées pour la période de temps et sous des contraintes aux conditions de fonctionnement [105].

La rupture est un phénomène aléatoire: pour des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique du champ de rupture mais une distribution de valeurs. Il faut donc tester un grand nombre d'échantillons identiques. Ce caractère statistique pourrait s'expliquer par l'existence d'hétérogénéités (ou de défauts) microscopiques locaux dans le matériau diélectrique. Il est donc nécessaire de mener une analyse statistique sur la dispersion des tensions ou des temps de rupture afin d'en déduire éventuellement des lois de vieillissement. Pour cela, il existe différentes approches mathématiques (Gauss, normale,...) dont la plus adaptée à notre cas est celle de Weibull.

1.1. Bases du modèle

A l'origine, le modèle statistique de Weibull a été établi en mécanique. Il exprimait la probabilité de rupture d'une chaîne en fonction de la probabilité de rupture d'un maillon [106]. La rupture d'une chaîne se produit au niveau de son maillon le plus faible quelles que soient les qualités des autres maillons. Ainsi la probabilité de rupture P_n d'une chaîne de n maillons s'exprime en fonction de la probabilité P d'un seul de ces maillons de la façon suivante:

$$P_n = P^n \quad (\text{IV.1})$$

Le modèle statistique de Weibull ou loi de chaîne s'écrit [107]:

$$P(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X - X_s}{X_o} \right)^\alpha \right] \quad x > 0 \quad (\text{IV.2})$$

avec:

$P(X)$: probabilité de rupture

X: variable aléatoire

X_0 : paramètre d'échelle

X_s : paramètre de localisation

α : paramètre de forme.

Une description détaillée de ce modèle peut être trouvée dans des ouvrages de référence [107,108]. Il s'agit d'une bonne image de ce qui se passe dans un isolant solide où un claquage local entraîne la rupture de l'ensemble de l'isolant.

1.2. Modèle à deux paramètres

Dans ce cas $X_s = 0$ et le modèle de Weibull est dit à 2 paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit [109]:

$$P(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{X_0} \right)^\alpha \right] \quad x > 0 \quad (\text{IV.3})$$

ou sous sa forme linéaire:

$$\log \text{Ln} \frac{1}{1-P(X)} = \alpha \log X - \alpha \log X_0 \quad (\text{IV.4}).$$

Si le phénomène observé suit le modèle de Weibull à 2 paramètres, le graphique où l'on porte en abscisses $\log X$ et $\log \text{Ln} \frac{1}{1-P(X)}$ en ordonnées doit être une droite de pente α .

1.3. Modèle à trois paramètres

C'est le cas où $X_s \neq 0$. Introduire un paramètre de localisation consiste tout simplement à translater les courbes de probabilité cumulée selon l'axe des abscisses. Le modèle de Weibull devient [109]:

$$P(X) = 1 - \exp \left[- \frac{(X - X_s)^\alpha}{(X_0 - X_s)^\alpha} \right] \quad x > 0 \quad (\text{IV.5})$$

ou encore sous sa forme linéaire:

$$\log \text{Ln} \frac{1}{1-P(X)} = \alpha \log (X - X_s) - \alpha \log (X_0 - X_s) \quad (\text{IV.6}).$$

Dans le cas où l'on porte en abscisses $\log (X-X_s)$ et en ordonnées $\log L_n \frac{1}{1-P(X)}$, le diagramme est une droite de pente α .

1.4. Signification des paramètres

1.4.1. Paramètre d'échelle

Il est destiné à définir une valeur centrale caractéristique de la population étudiée. Ce paramètre correspond à une densité de probabilité maximale.

Pour $X = X_0$, $\log L_n \frac{1}{1-P} = 0$ et on déduit $P = 1 - \frac{1}{e} = 63,2\%$.

1.4.2. Paramètre de forme

C'est un nombre sans dimension. C'est la pente de la caractéristique du modèle de Weibull dans sa représentation linéaire. Il est, par conséquent, l'image de la dispersion de la variable aléatoire. Plus α est grand, moins les valeurs sont dispersées [110]. En général, dans le cas des polymères et pour les distributions en temps (essais à champ constant), on a : $0,5 < \alpha < 3$ [108].

1.4.3. Paramètre de localisation

La variable X_s apparaît comme un seuil en dessous duquel le vieillissement se trouve considérablement ralenti, la durée de vie du matériau tend alors vers l'infini c'est à dire $P(X < X_s) = 0$. La valeur du seuil est forcément inférieure à la plus faible valeur trouvée expérimentalement.

La recherche du seuil peut se faire en utilisant la méthode des moindres carrés ou la méthode du maximum de vraisemblance. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la détermination du seuil de rupture diélectrique des isolants solides [111,112].

3. APPLICATION DU MODELE DE WEIBULL A L'ETUDE DE LA TENUE DIELECTRIQUE DES ISOLANTS SOLIDES

L'application du modèle statistique de Weibull à la caractérisation de la tenue diélectrique des isolants solides repose sur les hypothèses suivantes :

on considère que le phénomène de claquage est caractérisé par une variable aléatoire à 2 dimensions dont l'une est le temps t au bout duquel se produit la rupture de l'isolant et l'autre le gradient de potentiel G qui a provoqué cette rupture.

le claquage est localisé dans un petit volume du diélectrique. La rupture d'un élément microscopique entraîne la rupture du système isolant sur toute son épaisseur.

Une base de la théorie statistique de Weibull est présentée par Dissado [113].

4. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Le calcul des coordonnées des points expérimentaux dans une représentation de Weibull conduit aux expressions suivantes:

$$X_i = \log t_i \quad (\text{IV.7})$$

$$Y_i = \log \text{Ln} (1 / (1 - P_i)) \quad (\text{IV.8})$$

avec:

t_i : temps de claquage,

P_i : probabilité de rupture.

4.1. Calcul des probabilités de rupture

La probabilité de claquage a été calculée en utilisant la relation suivante [100]:

$$P(i) = \frac{i}{N+1} 100\% \quad (\text{IV.9})$$

avec:

N : nombre total d'échantillons testés, dans notre cas $N = 50$

i : rang de la valeur du temps de claquage après un classement par ordre croissant.

4.2. Lissage des points expérimentaux

La statistique de Weibull est une loi à valeurs extrêmes dont la fonction de distribution est, par conséquent, non symétrique. La méthode des moindres carrés et celle du maximum de vraisemblance sont les plus employées pour le lissage des points expérimentaux. Un lissage réalisé par la méthode des moindres carrés ne serait pas strictement valide d'un point

de vue statistique puisqu'il prend en compte les points expérimentaux sans leur accorder un poids statistique particulier. Les estimations au mieux des paramètres seraient plus rigoureuses en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance [110]. Par conséquent, notre choix s'est porté sur cette dernière.

Le tracé des diagrammes de Weibull consiste à tracer $\log \text{Ln}(1/(1-P))$ en fonction de $\log t$. Ensuite à effectuer un lissage linéaire des points expérimentaux en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Il faut chercher la meilleure droite de Weibull c'est-à-dire celle qui ajuste au mieux le diagramme dans sa représentation à deux paramètres.

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1. Polyester-imide de classe H

5.1.1. Diagrammes de Weibull à deux paramètres

Dans les figures IV.1 - IV.10 sont exposés les diagrammes de Weibull à 2 paramètres du temps de rupture pour différents niveaux de la tension appliquée.

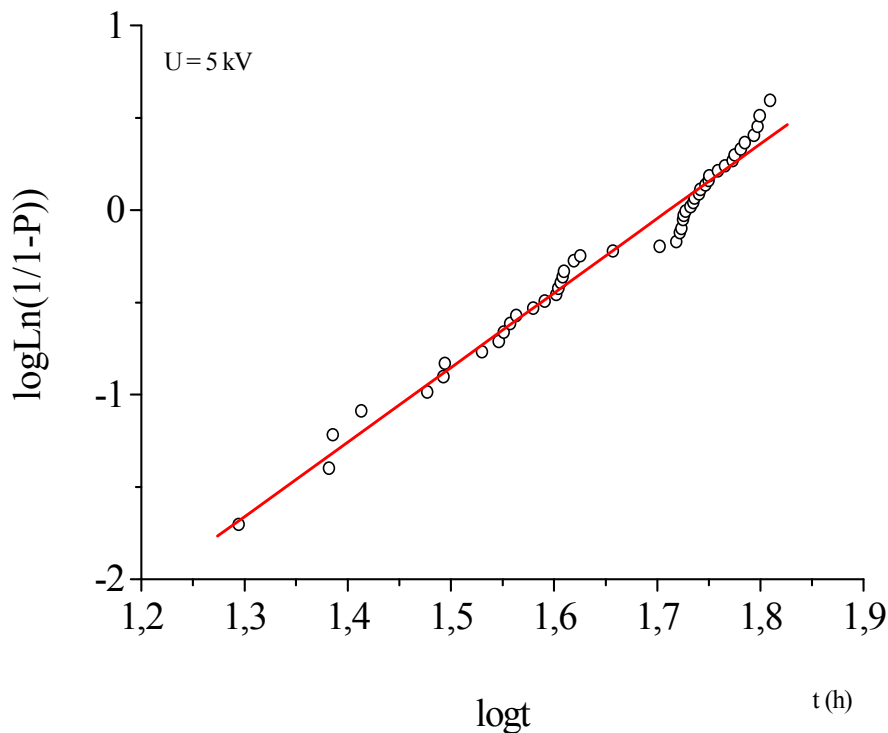


Figure IV.1 : Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5 kV.

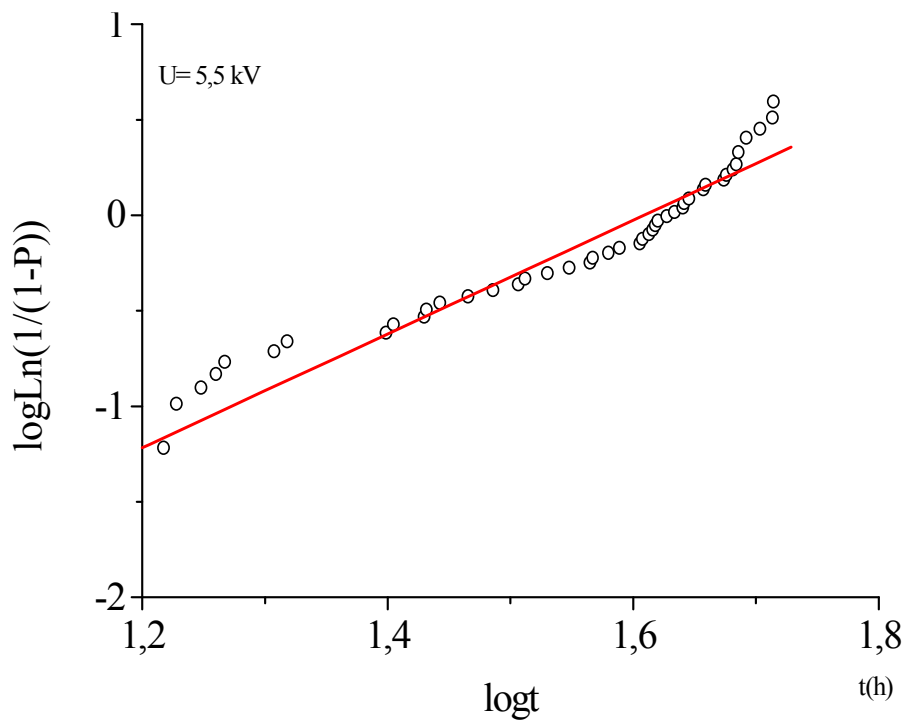


Figure IV.2 : Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,5 kV.

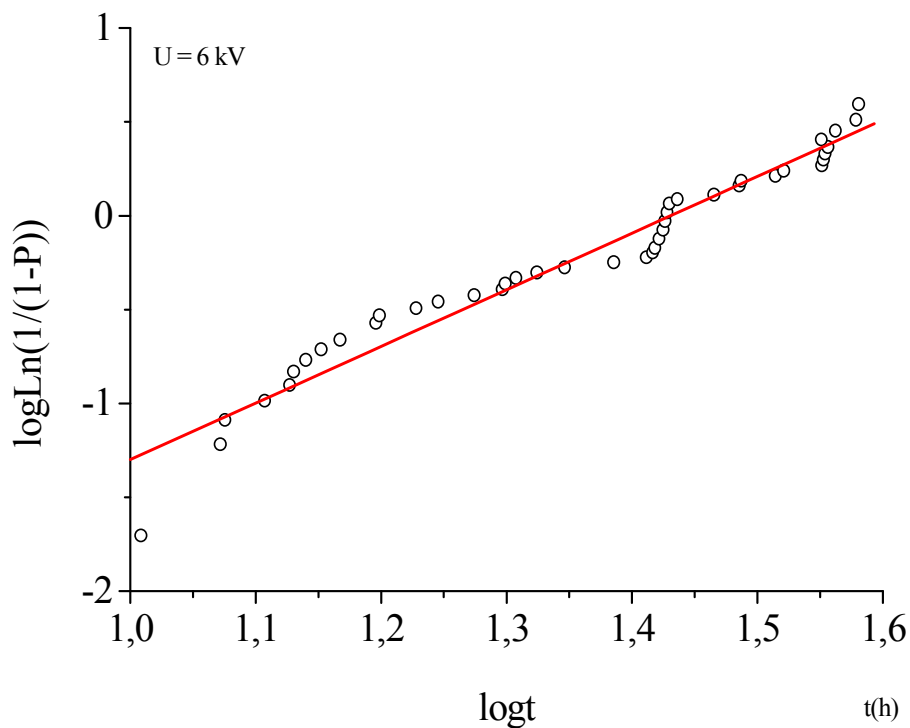


Figure IV.3 : Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6 kV.

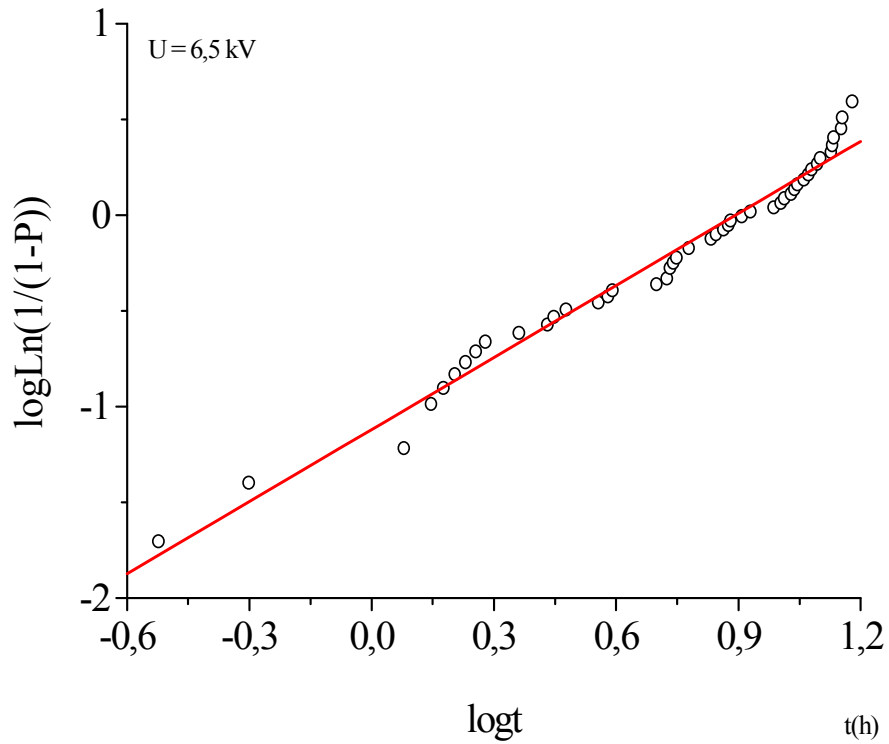


Figure IV.4 : Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,5 kV.

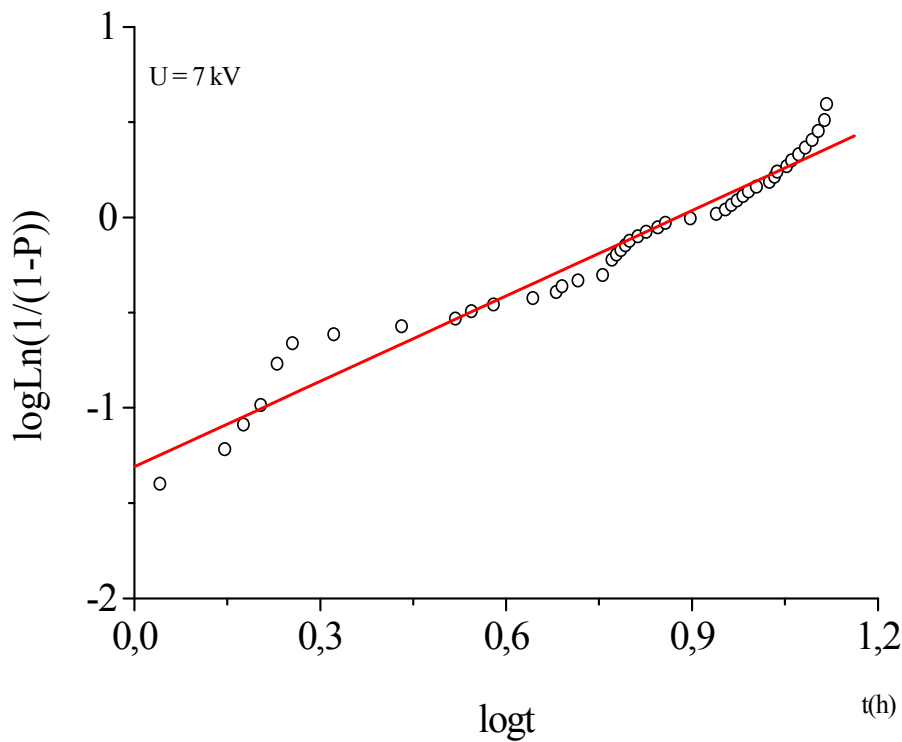


Figure IV.5 : Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7 kV.

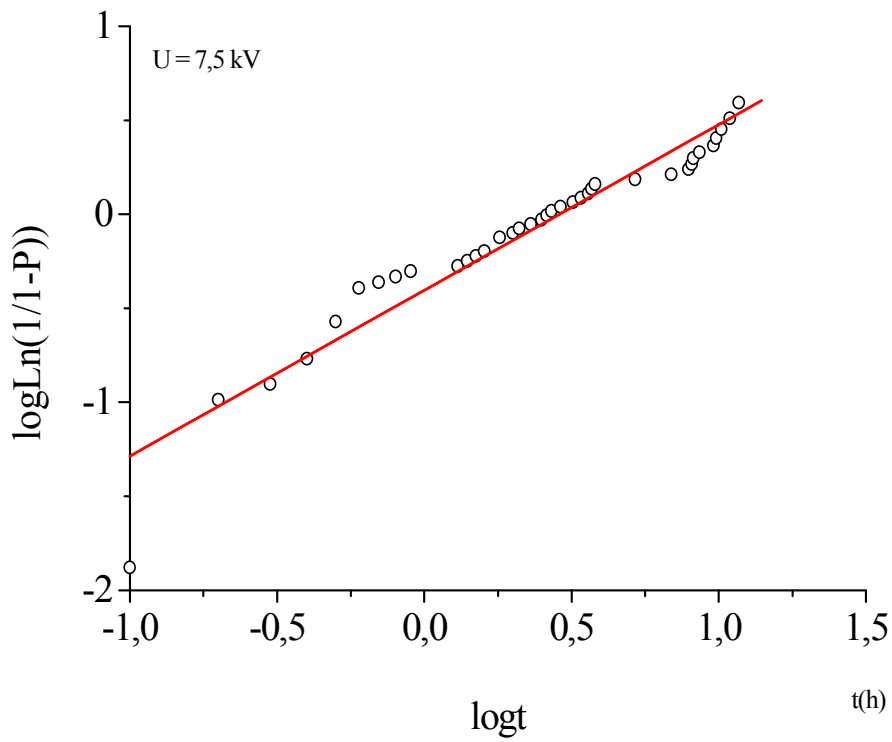


Figure IV.6 : Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,5 kV.

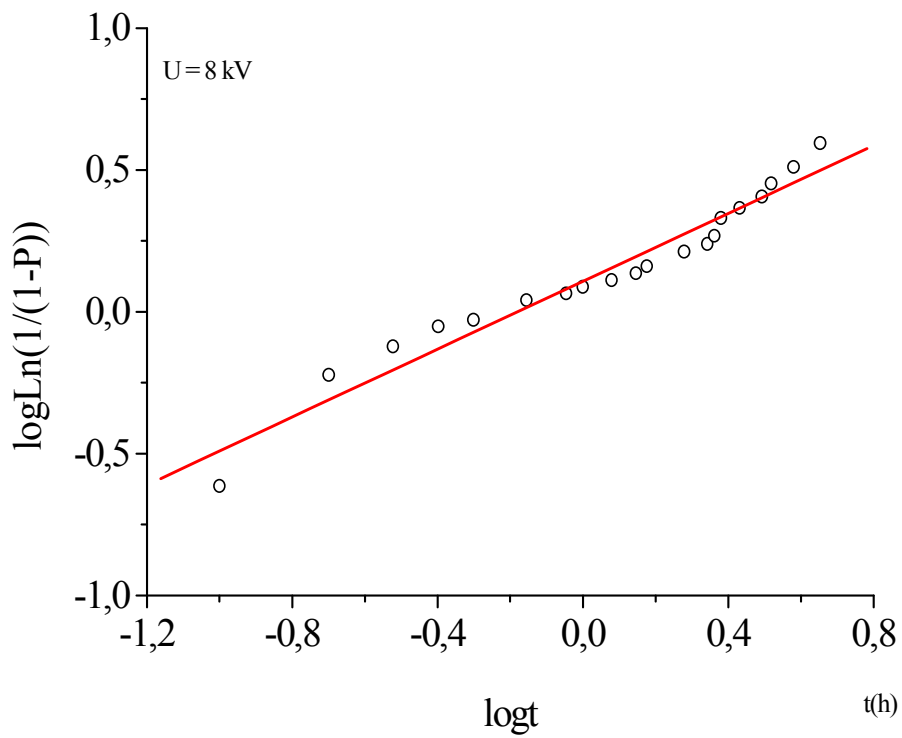


Figure IV.7 : Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 8 kV.

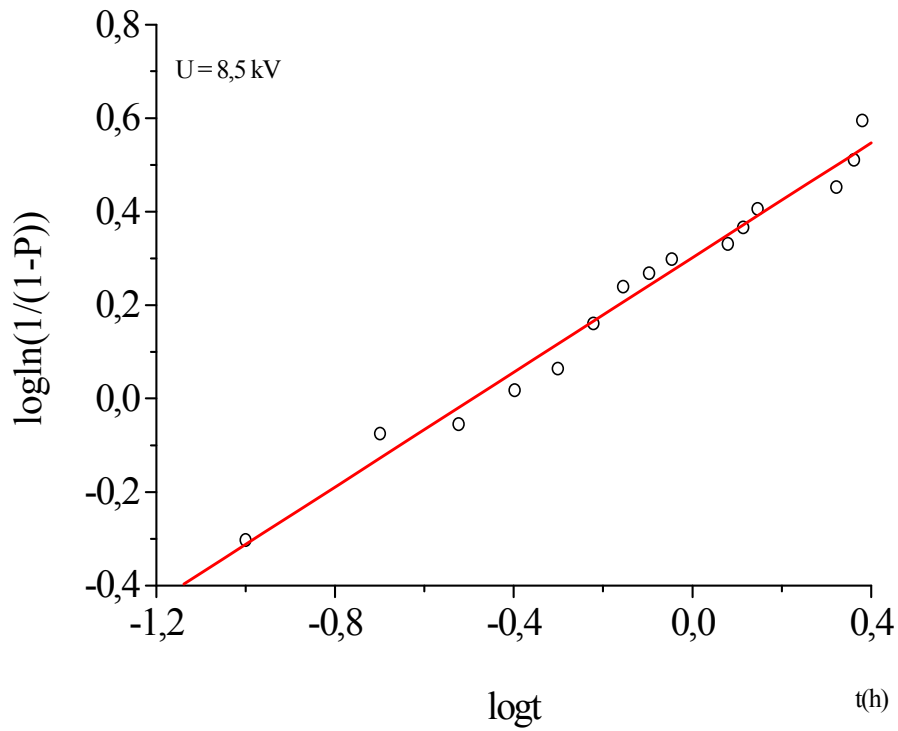


Figure IV.8: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 8,5 kV.

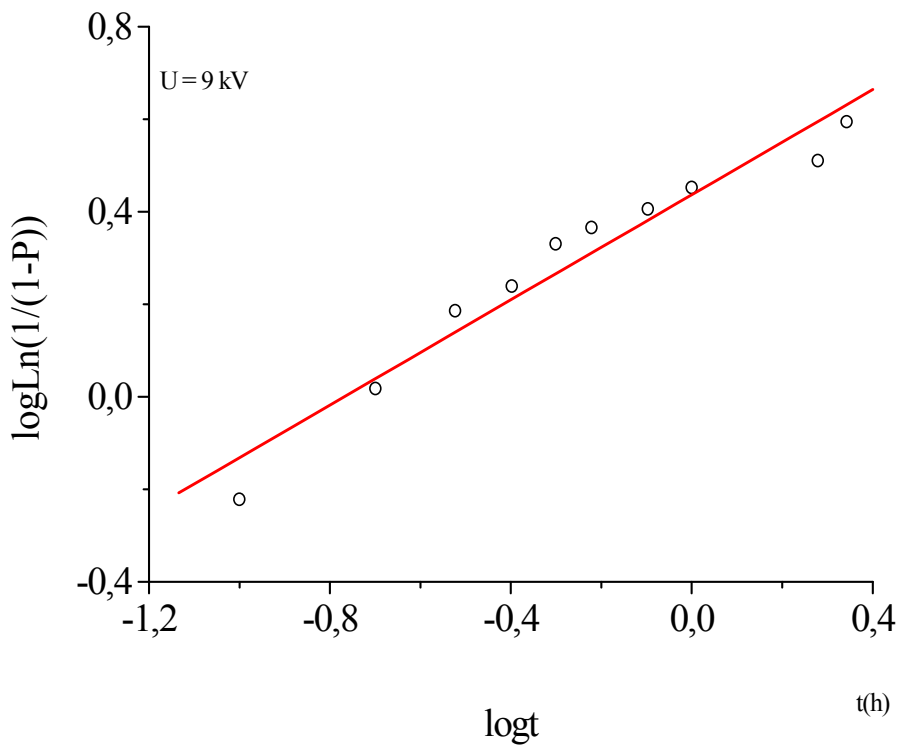


Figure IV.9: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 9 kV.

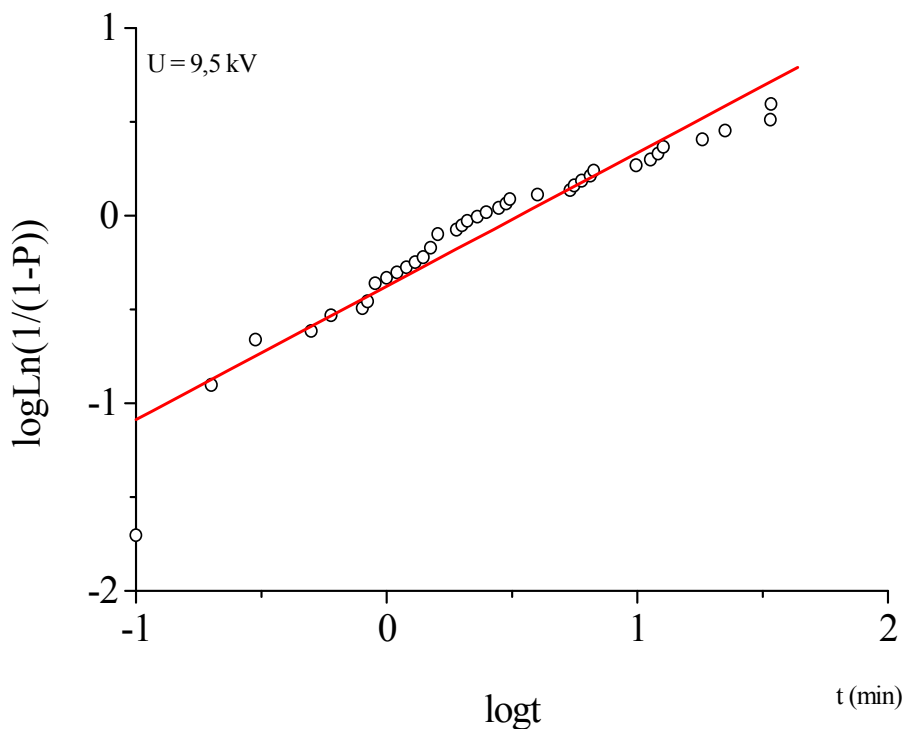


Figure IV.10: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 9,5 kV.

5.1.2. Courbe d'endurance électrique du polymère

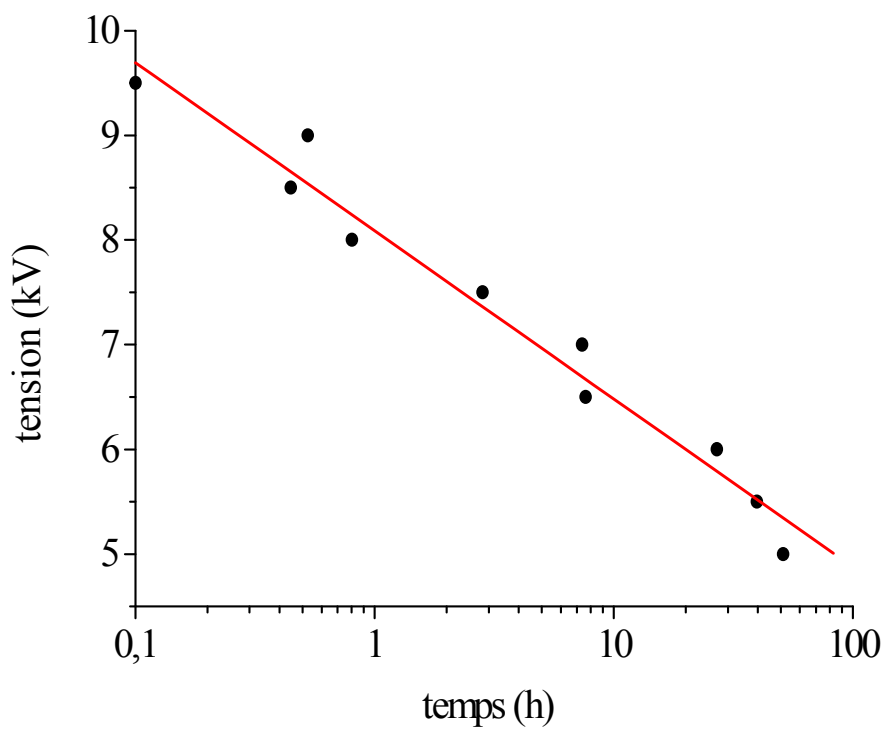


Figure IV.11 : Courbe d'endurance électrique du polyester – imide

En exploitant les diagrammes de Weibull, nous avons déterminé le facteur d'échelle (valeur nominale du temps de rupture) et le facteur de forme. La figure IV.11 donne la variation de la tension appliquée en fonction du temps de vieillissement dans une échelle semi-logarithmique.

5.1.3. Facteur de forme

Les valeurs du facteur de forme correspondant aux différents niveaux de tension appliquée sont présentées dans le tableau IV.1.

Tension (kV)	Facteur de forme
5	4,880
5,5	3,734
6	3,349
6,5	1,535
7	1,786
7,5	0,868
8	0,834
8,5	0,949
9	1,032
9,5	0,740

Tableau IV.1. Facteur de forme en fonction de la tension appliquée

5.2. Polyester – imide avec couche de polyamide imide (classe C)

5.2.1. Diagrammes de Weibull

Les diagrammes de Weibull correspondant à la tension de claquage du polyester – imide de classe H sont exposés aux figures IV.12-IV.23.

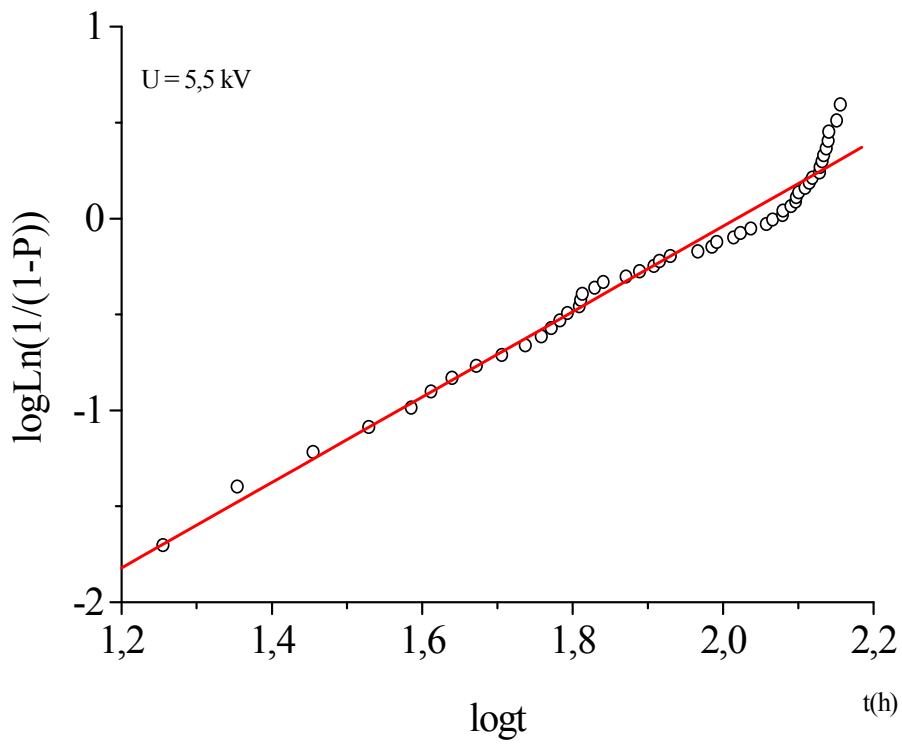


Figure IV.12: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,5 kV.

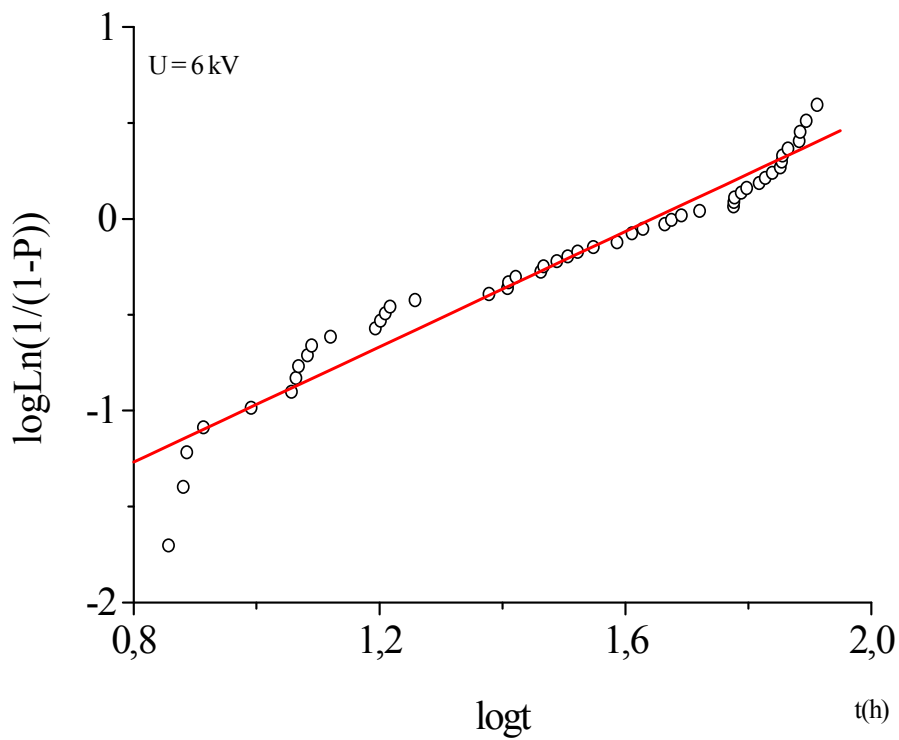


Figure IV.13: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6 kV.

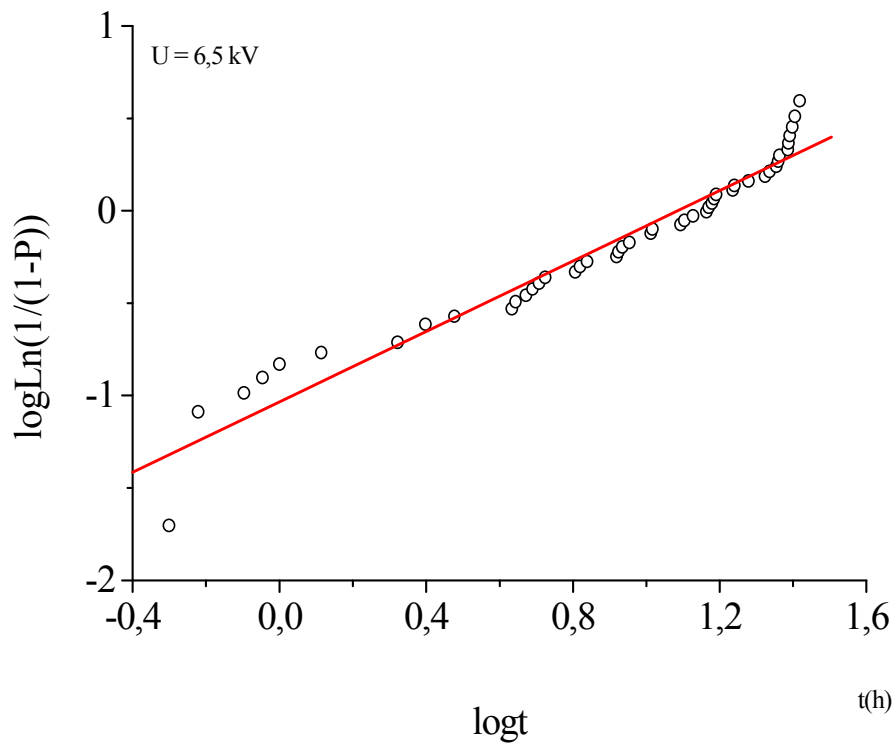


Figure IV.14: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,5 kV.

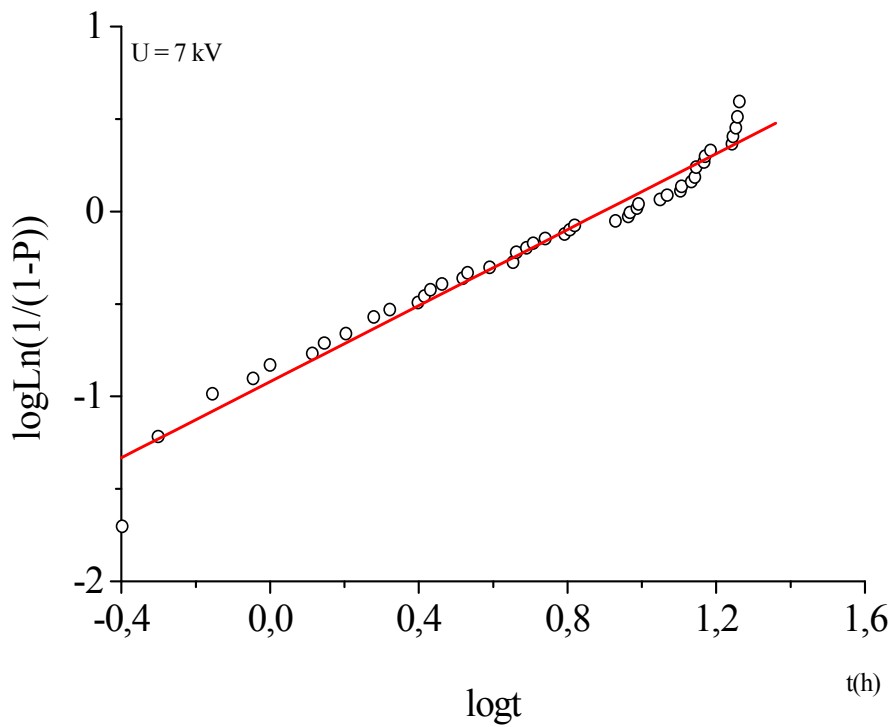


Figure IV.15: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7 kV.

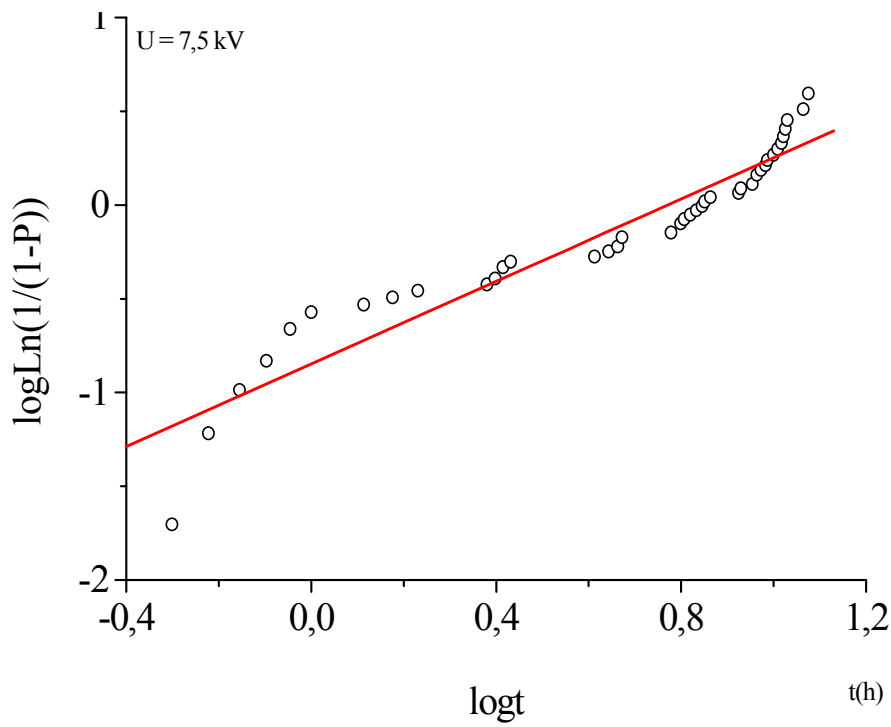


Figure IV.16: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,5 kV.

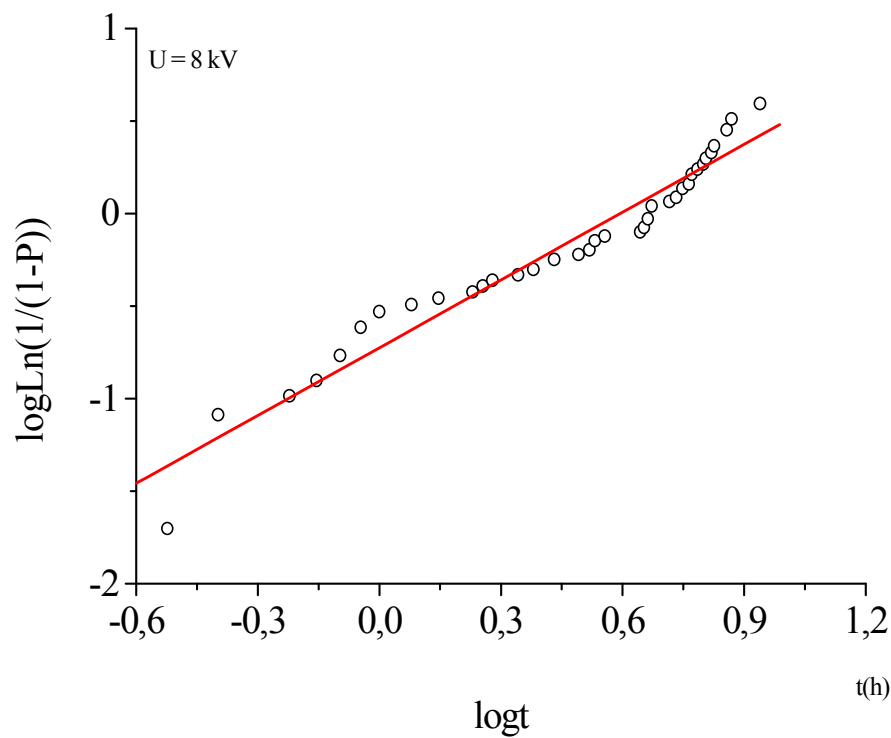


Figure IV.17: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 8 kV.

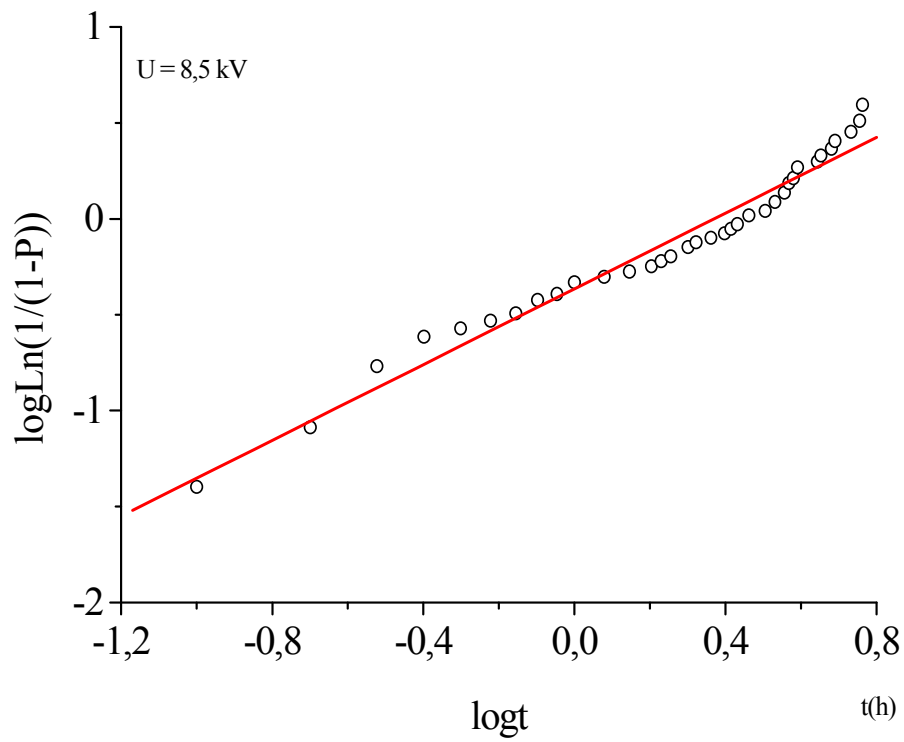


Figure IV.18: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 8,5 kV.

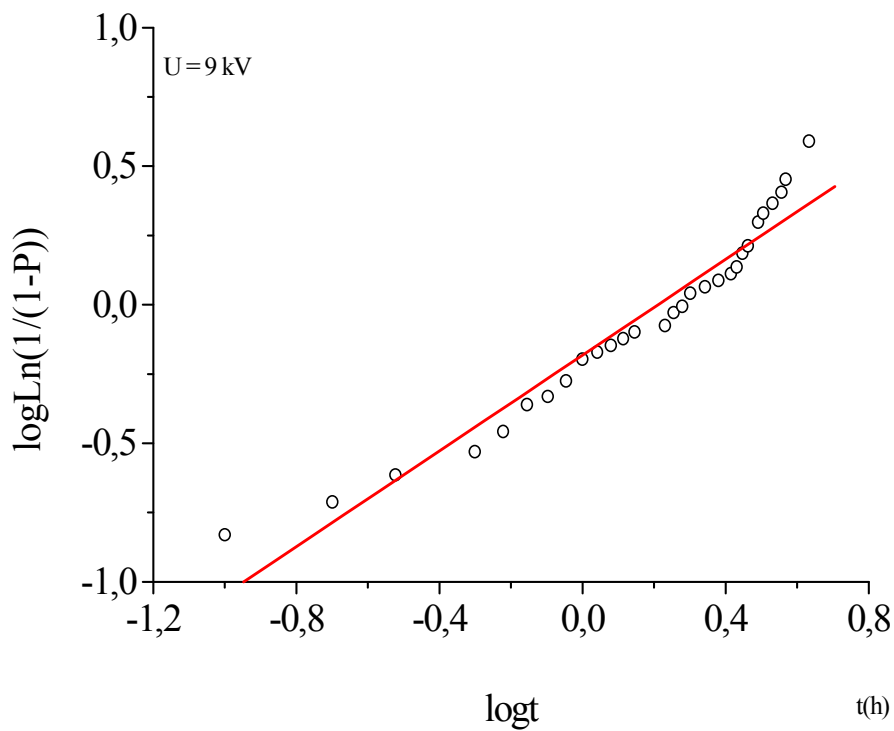


Figure IV.19: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 9 kV.

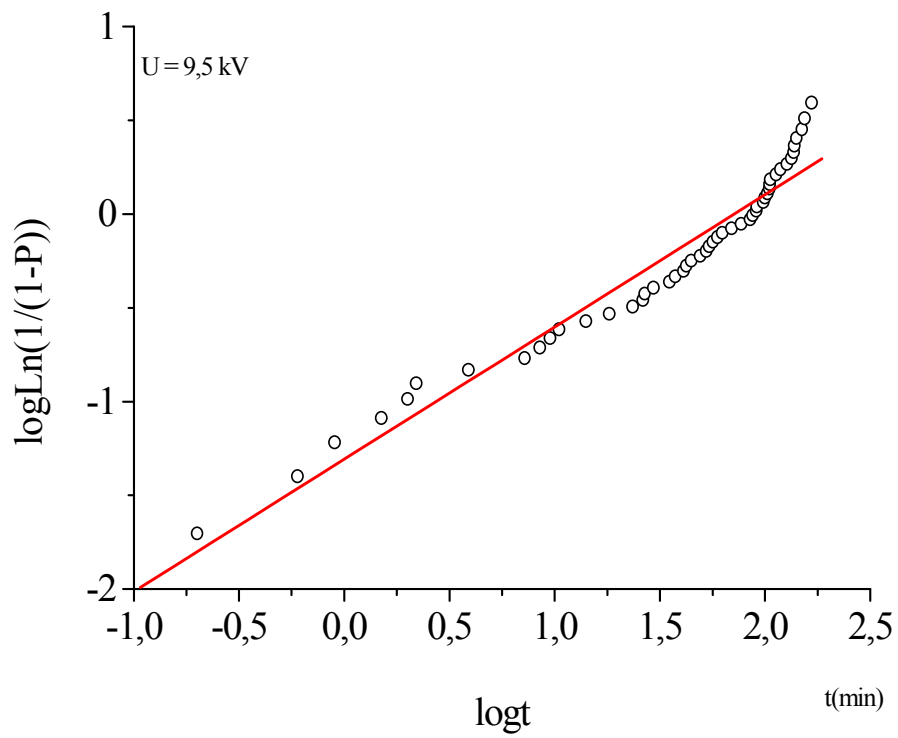


Figure IV.20: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 9,5 kV.

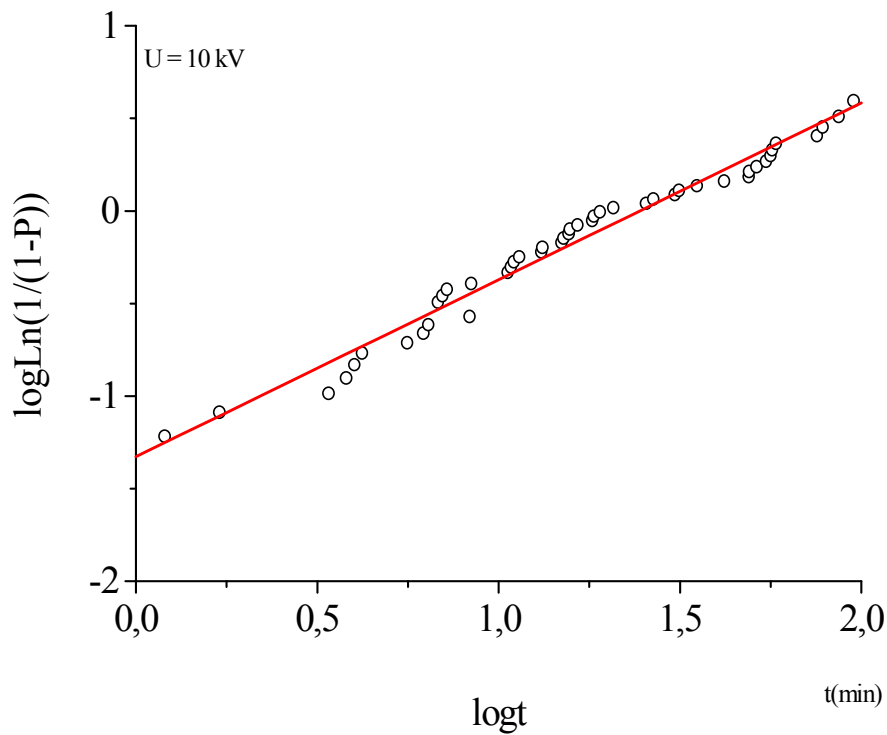


Figure IV.21: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 10 kV.

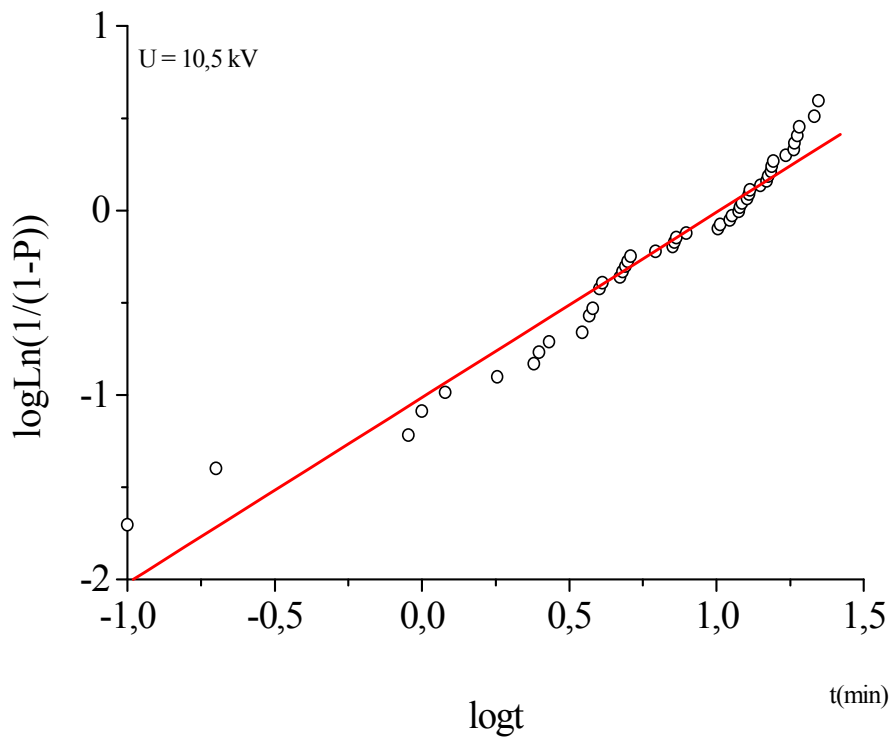


Figure IV.22: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 10,5 kV.

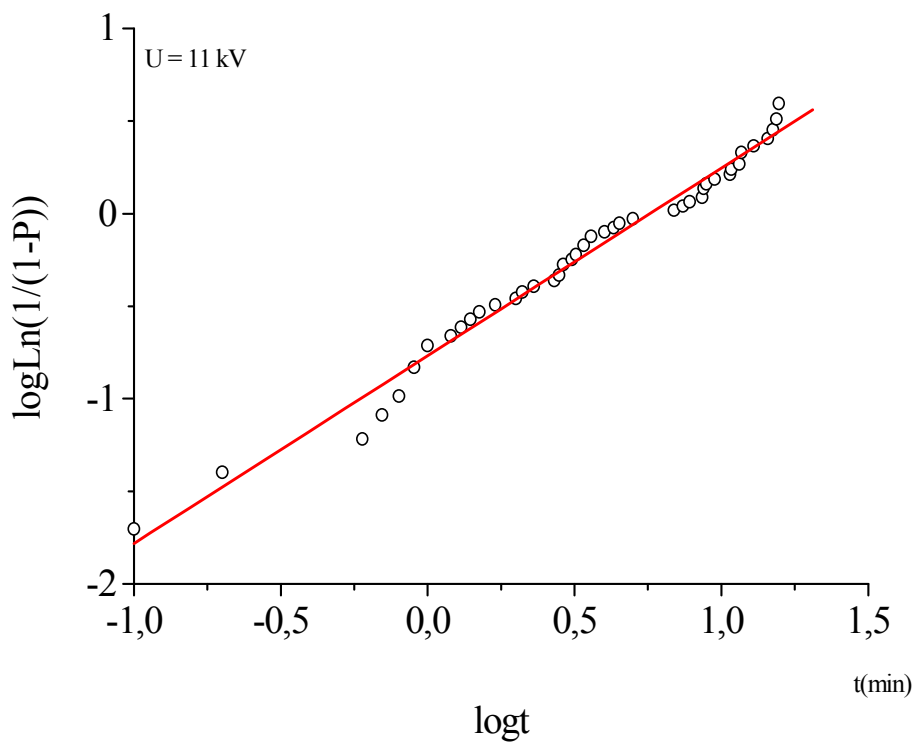


Figure IV.23: Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 11 kV.

5.2.2. Courbe d'endurance électrique du polyester – imide avec couche de polyamide imide

Nous avons déterminé la valeur nominale du temps de rupture et le facteur de forme correspondant à chaque niveau de tension. La figure IV.24 présente l'évolution de la tension appliquée en fonction du temps de claquage dans une échelle semi-logarithmique.

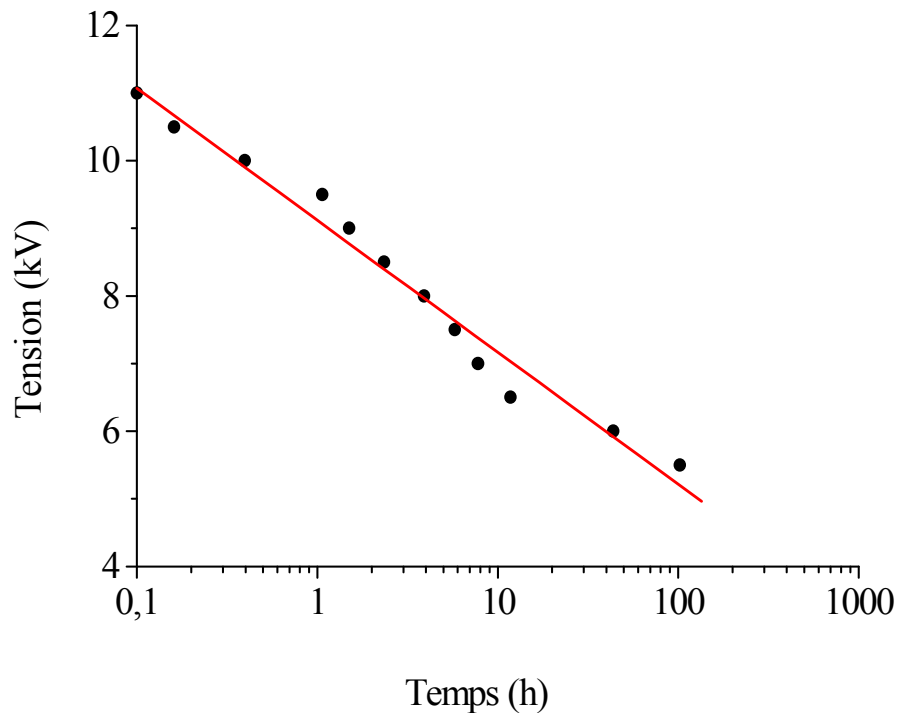


Figure IV.24 : Courbe d'endurance électrique du polyester – imide avec couche de polyamide imide

5.2.3. Facteur de forme

Dans le tableau IV.2. sont présentées les valeurs du facteur de forme des graphes de Weibull du temps de claquage correspondant à chaque niveau de tension.

Tension (kV)	Facteur de forme
5,5	2,715
6	1,668
6,5	1,177
7	1,169
7,5	1,302
8	1,434
8,5	1,189
9	1,108
9,5	0,989
10	0,95
10,5	1,325
11	1,12

Tableau IV.2. Facteur de forme en fonction de la tension appliquée

5.3. Discussion

La distribution des points expérimentaux varie d'une distribution à une autre. Les distributions sont plus dispersées pour les faibles probabilités

La courbe d'endurance électrique du polyester – imide (classes H et C) est une droite qui suit une loi exponentielle. Le temps de claquage augmente quand la tension appliquée diminue.

Pour une même tension, le temps de claquage est plus élevée dans le cas du polyester – imide de classe C c'est-à-dire avec couche de polyamide imide

Le facteur de forme varie d'une distribution à une autre. Dans la plupart des cas, le facteur de forme est plus élevé quand la tension est petite. Son évolution est liée au nombre et à la dimension des défauts existants ou créés dans le polymère.

Le vieillissement électrique du matériau produit des décharges partielles aux points où le champ électrique est amplifié. A long terme, ces décharges conduisent au claquage du matériau par arborescence électrique.

La dégradation de l'isolant est caractérisée par un changement de couleur et un dégagement de gaz.

CONCLUSION

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la rupture diélectrique à long terme des isolants solides utilisés dans les machines électriques. L'analyse statistique conduit à des diagrammes de Weibull des temps de rupture dont la distribution des points expérimentaux diffère d'un niveau de tension à un autre. En général, ces distributions sont plus dispersées pour les faibles probabilités. Pour les deux types de polyester – imide étudiés (de classes H et C), la courbe d'endurance électrique est une courbe décroissante qui suit un modèle de loi exponentiel. Le facteur de forme dépend du niveau de tension. Ceci est dû à la variation du nombre et de la dimension des défauts dans le matériau diélectrique en fonction de la tension appliquée aux éprouvettes. Pour un niveau de tension constant, les temps de claquage sont plus importants dans le cas du polyester – imide de classe C (avec couche de polyamide imide). La dégradation est caractérisée par un dégagement de gaz. Durant le vieillissement, des décharges partielles apparaissent dans des points de concentration de champ électrique (défauts) de l'isolant suivies d'arborescences électriques conduisant à la rupture diélectrique.

Comme perspectives, ce travail peut être complété par des analyses physico-chimiques : DSC, FTIR, ATG, microscope électronique afin de donner une interprétation au mécanisme de dégradation.

BIBLIOGRAPHIE

-
- [1] H.H. Nicol, H. Ehritopher, J. Plummer, P. Decroly, *Traité des Matériaux, Matériaux polymères propriétés mécaniques et physiques*, Presses Polytechniques et Universitaires, Romande, 2001.
- [2] M. F. Ashby, David R.H. Jones, *Matériaux, microstructure et mise en œuvre*, édition Dunod, 1999.
- [3] P. Koechlin, *Emaux isolants (fils émaillés)*, Techniques de l'Ingénieur, D2630, 1983.
- [4] M. Leca, O. Segarceanu, S. Serban, Solubility, curing and heat resistance of some ester imide oligimers as a function of the nature and content of some comonomers, *Thermochimica Acta*, Vol. 299, pp. 153-160, 1997.
- [5] CEI 172, *Méthode d'essai pour la détermination de l'indice de température des fils de bobinage émaillés*, 1981.
- [6] R. Fournié, *Les isolants en électrotechnique, essais, mécanismes de dégradation, applications industrielles*, édition Eyrolles, 1990.
- [7] M.P. Stevens, *Polymers chemistry, an introduction*, New York, Oxford University Press, 1999.
- [8] M. Sukumar, D. Sajal, Synthesis and properties of polyesterimides and their isomers, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 26, pp. 957-978, 1981.
- [9] Coelho, B. Aladenize, *Les diélectriques, propriétés diélectriques des matériaux isolants*, édition Hermes, 1993.
- [10] J.J. O'Dwyer, *The theory of electrical conduction and breakdown of solids*, Clarendon Press, Oxford, 1973.
- [11] Coelho, *Matériaux isolants et champs électriques*, Découverte, pp. 19-24, 1972.
- [12] J. Artbauer, *Elektrische Festigkeit Von Polymeren*, *Kolloid Z. und Z. Polymere*, Vol. 202, pp. 15-25, 1965.
- [13] M. Ieda, Dielectric breakdown process of polymers, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-15 N°3, pp. 206-224, 1980.
- [14] K.H. Stark, G.C. Garton, Electric strength of irradiated polyethylene, *Nature* 176, 60, pp. 1225-1226, 1955.
- [15] E. Hallen, *Electromagnetic theory*, Chapman and Hall, pp. 35-73, 1962.
- [16] C. Laurent, La rupture diélectrique dans les polymères, *Revue Générale de l'Electricité*, N°10, pp. 745-755, 1985.

-
- [17] E. Gockenbach, G. Schiller, The breakdown behaviour of XLPE -samples at voltages of different shapes, Ninth International Symposium of High Voltage Engineering, August 28- September 1, pp 1493-1-1493-4, 1995.
- [18] T. Ónodi, S. Tóth, The effect of the surface quality of electrodes upon the electrical strength of thin layer insulations, Fourth International Symposium on High Voltage Engineering, 21.05, 1983.
- [19] K. Katsutsa, A. Toya, S. Katakai, M. Kanoaka, Y. Sekii, Influence of defects on insulating properties on XLPE cable, 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 485-489, 1991.
- [20] J.J. OD'wyer, The theory of dielectric breakdown of solids, Oxford University Press, London, 1964.
- [21] G.A. Vorob'ev, N.I. Lebedeva, G.S. Nadorava, Dependence of the breakdown voltage of the thickness of sample for some alkali halide crystals, Soviet Physics-Solid State, Vol. 13, pp 736-737, 1971.
- [22] J.C. Dubois, Propriétés diélectriques, Techniques de l'ingénieur, A3140, 1990.
- [23] E. Gulski, F.H. Kreuger, Computer-aided recognition of discharge sources, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.27, No.1, pp. 82-92, 1992.
- [24] R.J. van Brunt, Physics and chemistry of partial discharge and corona. Recent advances and future challenges, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, issue 5, pp. 761-784, 1994.
- [25] J. Muccigrosso, P.J. Philipps, The morphology of crosslinked polyethylene insulation, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-13, N° 3, pp. 172-178, 1978.
- [26] N. Yoshimura, M.S.A.A. Hamman, M. Nishida, F. Noto, Effect of microvoids on V-t Characteristics and tree growth in crosslinked polyethylene, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 342-351, 1978.
- [27] O. Bottger, R. Patsch, Zeitstandsfestigkeit kunststoffisolierter Hochspannungs-kabel, ETZ, B25, pp. 706-708, 1973.
- [28] S.T. Hagen, E. Ildstad, J. Sletbak, H. Faremo, Location and examination of defects in XLPE cable insulation, International Conference of Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 569-573, 1989.

- [29] F. Noto, N. Yoshimura, Voltage and frequency dependence of tree growth in polyethylene, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 207-217, 1974.
- [30] A.K. Jonscher, R.Lacoste, On a cumulative model of dielectric breakdown in solids, IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-19 (6), pp. 567-577, 1984.
- [31] J. Svahn, S. M. Gubanski, Influence of metal inclusions on AC breakdown strength in EPDM, IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998.
- [32] CEI Publication 270, Mesure des décharges partielles, 1968.
- [33] K. Kishi, S. Hatsukawa, K. Yatsuka, T. Fukui, The study of partial discharge generated from defects in XLPE insulation, 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, July 3-8, pp. 650-653, 1994.
- [34] T. Tanaka, T. Okamoto, Une étude avancée de mesures des décharges partielles sensible à la forme d'une vacuole, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 28 Août -3 Septembre, 15-02, 1998.
- [35] P.H.F. Morshuis, F.H. Kreuger, The evolution of the discharge mechanism in a dielectric bounded cavity due to surface effects, 3rd International Conference, on Properties and Applications of dielectrics Materials, pp. 672-675, 1991.
- [36] E. Gulski, H.R. Kreuger, Computer-aided analysis of discharge patterns, Journal of Physps D: Applied Physics 23, pp. 1569-1575, 1990.
- [37] A. Gemant, W.V. Philippoff, Die Funkenstrecke mit vorkondensator, zeitschfür Tekn-Physik, vol. 13, pp. 425-430, 1932.
- [38] C. Laurent, C. Mayoux, A. Sergent, Electrical breakdown due to discharges in different types of insulation, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. E1-16, N°1, pp. 52-58, 1981.
- [39] C. Laurent, Contribution à l'étude des mécanismes de la rupture à long terme des polymères, Thèse d'Etat Sciences Physique, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1984.
- [40] J. Andrianjohaninarivo, M. R. Wertheimer, A. Yelon, R.J. Densley, Systematic study of partial discharge inception voltage in polyethylene, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 278-283, 1981.

- [41] R. Plessow, W. Pfeiffer, Influence of the frequency on the partial discharge inception voltage, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 97-103, 1994.
- [42] R. Shobha, R.S. Nema, Internal partial discharge and breakdown characteristics of thin polypropylene films, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 408-413, 1993.
- [43] R. Fieux, Etude des variations de la tension seuil et de la tension disruptive dans une cellule à décharges partielles, Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1965.
- [44] G.C. Garton, The energy of discharges and their interaction with solid dielectrics, Gas discharges and the electricity supply industry, Butterworths, pp. 412-419, 1962.
- [45] Bui Ai, R. Lacoste, P. Mengin, J. Galand, Phénomènes de décharges partielles, Revue Générale de l'Electricité, Tome 79, N°3, pp. 253-258, 1970.
- [46] Bui Ai, Contribution à l'étude de la dégradation des isolants en feuilles sous l'action des décharges partielles, Thèse de Doctorat Sciences Physique, Toulouse, 1966.
- [47] C. Menguy, Mesure de l'énergie des décharges partielles et dégradation des isolants, SEE, pp. 233-240, 1989.
- [48] D.W. Kitchin, O.S. Pratt, Internal corona spaces in cables, Power Apparatus and Systems, No.3, pp.1066-1073, 1957.
- [49] D.R. James, I. Sauers, A.R. Ellis, M.O. Pace, D.J. Deschenes, Effect of gas pressure on partial discharge in voids in epoxy, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 628-632, 2003.
- [50] T. Tanaka, Y. Ikeda, Internal discharges in polyethylene with an artificial cavity, IEEE Transactions PAS, Vol. PAS-90 No.6, pp.2692-2702, 1971.
- [51] T. Ito, T. Sakai, Y. Toriyama, Time dependence of internal discharges in artificial voids, Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 267-273, 1973.
- [52] M. Nawata, H. Kawamura, Deterioration and breakdown due to treeing from a needle-shaped void in organic insulators, Electrical Engineering in Japan, Vol. 88, N°10, pp. 45-49, 1968.

- [53] M. J.R. Olyphant, internal corona testing of casting resins, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. E1-2, N°2, pp. 92-101, 1967.
- [54] P. Durand, R. Fournié, EDF, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, séries B, No. 1, pp.15-19, 1972.
- [55] M. Kurrat, Energy considerations for partial discharges, European Transactions on Electrical Power, 2 (1), pp. 39-44, 1992.
- [56] J.H. Mason, Breakdown of insulation by discharges, Proceedings IEE Vol. 100 part II N°3, pp. 149-158, 1965.
- [57] W.L. Harries, A. Von Engel, The mechanism of the low-frequency electrode less discharges in chlorine and the influence of irradiation, Proceedings of the Physical Society B, 64, 1951.
- [58] G. Leroy, R. Lacoste, Bui Ai, Analytical study of degradation of solid insulating materials through ionisation discharges, Proceeding of the International Conference CERL, pp. 393-403, 1962.
- [59] D. K. Wolter, J.F. Johnson, J. Tanaka, Degradation product analysis for polymeric dielectric materials exposed to partial discharges, IEEE Transactions on Electrical Insulation, EI-13 (5), pp. 327-336, 1978.
- [60] L. Yao, Q. Su, A new partial discharge detector, 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 598-601, 1994.
- [61] H. Guzmán, H.G. Kranz, Analysis of internal partial discharges in solid dielectrics using an electro-optical measurement system, IEEE 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 239-243, 1995.
- [62] R. Bartnikas, A commentary on partial discharge measurement and detection, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-22, N°5, pp. 629-653, 1987.
- [63] R. Croxford, Initiation of trees from conducting points or edges in solid insulation, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques , 15.06, 1973
- [64] G. Bahder, T.W.Dakin, J.H. Lawson, Analyse du claquage par arborescence, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.05, 1974.
- [65] M. Nawata, H. Kawamura, M. Ieda, Voltage and temperature dependence of treeing breakdown in plastic insulators, International Symposium High Voltage Technology, pp. 428-434, 1972.

-
- [66] R.M. Eichhorn, Treeing in solid extruded electrical insulation, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-12, N°1, pp. 2-18, 1976.
- [67] F. Noto, N. Yoshimura, Initiation and growth of trees of polymeric dielectric materials, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 274-281, 1973.
- [68] F.H. Kreuger, Determination of discharge resistance of dielectric materials, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 3, No.4, pp.106-114, 1968.
- [69] G. Bahder, C. Katz, Treeing effects in PE and XLPE insulation, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 190-199, 1972.
- [70] Suwarno, Y. Suzuoki, T. Mizutani, Effects of frequency and applied voltage on electrical treeing discharges, 5th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 366-370, 1995.
- [71] K. Kudo, Impulse treeing breakdown in polyethylene under non-uniform and qu-uniform fields, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 259-264, 1989.
- [72] S.S. Bamji, A.T. Bulinski, R. J. Densley, The effect of sample preparation of electrical tree resistance tests, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 425-431, 1987.
- [73] E. Zelenyanszki, Effet of antioxydants of inception of electrical trees in polyethylene, 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 117-120, 1991.
- [74] J.C. Filippini, J.Y. Koo, Y. Poggi, C. Laurent, C. Mayoux, S. Noel, Arborescences d'eau et arborescences électriques, Journées Internationales sur les Câbles à Isolation Synthétique, pp. 87-92, 1984.
- [75] T. Tanaka, A. Greenwood, Effects of charge injection and extraction on tree initiation in polyethylene, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, N°5, pp. 1749-1759, 1978.
- [76] M. Fukuzawa, M. Iwamoto, On the mechanisms of electrical breakdown initiated by the treeing: measurement of the space charge field formed in an LDPE film, 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 244-246, 1991.

-
- [77] M. Ieda, M. Nawata, DC treeing breakdown associated with space charge formation in polyethylene, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-12, N°1, pp. 19-25, 1977.
- [78] T. Hibma, H. R. Zeller, Direct measurement of space charge injection from a needle electrode into a dielectric, *Journal of Applied Physics*, Vol. 59, pp. 1614-1620, 1986.
- [79] T. Lebey, C. Laurent, Mesure du courant d'injection de charge dans les diélectriques solides sous tension alternative, *Revue Physique. Appliquée* 25, pp. 423-433, 1990.
- [80] N. Yoshimura, F. Noto, Effects of electrode materials on tree initiation in polyethylene under switching surge conditions, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-18, N°2, pp. 120-124, 1983.
- [81] N. Hozumi, T. Okamoto, T. Fukagawa, Simultaneous measurement of microscopic image and discharge pulses at the moment of electrical tree initiation, *Japanese Journal of Applied Physics*, No.27, pp. 572-576, 1988.
- [82] J.H. Mason, Breakdown of solid dielectrics in divergent fields, *Proc. IEE*, 102C, 2, 254-263, 1955.
- [83] D.W. Auckland, B.R. Varlow, Dependence of electrical tree inception and growth on mechanical properties, *International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics*, pp. 533-537, 1989.
- [84] S.S. Bamji, A.T. Bulinski, R.J. Densley, The role of polymer interface during tree initiation in LDPE, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-21, N°4, pp. 639-644, 1986.
- [85] B. Yoda, M. Sakaba, Treeing degradation of high-voltage polyethylene-insulated cable, *Hitachi Review*, Vol. 18, pp. 406-412, 1969.
- [86] Y. Yamada, Treeing phenomena in polyethylene, *Sumitomo Electrical Review*, 101, pp. 24-36, 1969.
- [87] M.N. Arbab, D.W. Auckland, The influence of vibration on the initiation of trees in dielectrics, *IEE Proceedings*, Vol. 133, Pt. A, N°9, pp. 618-622, 1986.
- [88] J. Perret, Y. Le Gall, 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.

-
- [89] 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.
- [90] M. Stoica, F. Tanasesco, G. Giurgiu, A. Ifrim, Le phénomène d'arborescences dans les matériaux diélectriques synthétiques destinés à l'isolation des câbles de force, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.11, 1978.
- [91] R. Goffaux, Formation du treeing, Bulletin Scientifique de l'AIM, N°2, pp. 97-117, 1972.
- [92] R.J. Densley, An investigation into the growth of electrical trees in XLPE cable insulation, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-14, N°3, pp. 148-158, 1979.
- [93] N. Shimizu, K. Horii, The effect of absorbed oxygen on electrical treeing in polymers, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 20, No.3, pp.561-566, 1985.
- [94] D.K. Das Gupta, K. Doughty, D.E. Cooper, E.O. Forter, Role of atmospheric gases in the space charge polarization of low density polyethylene in a divergent field, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 22, No.3, pp.325-332, 1987.
- [95] T. Okamoto, M. Ishida, N. Hozumi, Dielectric breakdown strength affected by the lamellar configuration in XLPE insulation at semiconducting interface, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 24, No.4, pp.599-607, 1989.
- [96] I. Arima, T. Watanabe, Current pulses caused by of electrical tree development, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-16, N°6, pp. 543-551, 1981.
- [97] C. Laurent, C. Mayoux, Analysis of the propagation of electrical treeing using optical and electrical methods, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-15, N°1, pp. 33-42, 1980.
- [98] H. Fujita, T. Nakanishi, K. Yamaguchi, Acoustic emission distributions and types of electrical trees in polyester resin, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-18, N°5, pp. 520-527, 1983.
- [99] F.W. Peek, Dielectric phenomena high voltage engineering, MC Graw Hill, 1929.
- [100] IEEE Guide for the statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data, ANSI/ IEEE Std. 930, 1987.

- [101] L. Deschamps, C. Caillot, M. Paris, J. Perret, L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles haute tension et très haute tension, *Revue Générale d'Electricité*, N° 5, pp. 343-360, 1983.
- [102] S. Zoledziowski, A. Sierota, Physical and statistical aspects of breakdown characteristics of solids dielectrics, *IEE Dielectric Materials Measurements and applications*, pp. 84-87, 1992.
- [103] H. Hirose, A method to estimate the lifetime of solid electrical insulation, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 22, N° 6, pp. 745-753, 1987.
- [104] Norme NFC EN 60317-0-1, Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage. Partie 0 : Prescriptions générales, section, fil de section circulaire en cuivre émaillé, juin 2000.
- [105] I. Bazovski, *Fiabilité, théorie et pratique de la sûreté de fonctionnement*, édition Dunod, 1966.
- [106] W. Weibull, A statistical distribution function of wide applicability, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 18, pp. 293-297, 1951.
- [107] W.D. Wilkens, Statistical methods for the evaluation of electrical insulating systems, Chapitre 7, *Engineering dielectrics, Vol.II-B, Electrical properties of solid insulating materials: measurement techniques*, Editor R. Bartnikas, pp. 491-529, 1987.
- [108] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, G.C. Stevens, 1992.
- [109] Commission Electrotechnique Internationale, Comité d'étude N°63, *Systèmes d'isolation: évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes*, Septembre 1989.
- [110] C. Chauvet, *Mise au point d'une méthodologie pour les essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des isolants synthétiques*, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1992.
- [111] C. Chauvet, C. Laurent, Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films, *IEEE Trans. on Electrical Insulation.*, Vol. 28, N°1, pp. 18 -29, 1993.

- [112] M. Nedjar, Evaluation de la tenue diélectrique à court terme et à long terme des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension, Thèse de Doctorat ès sciences physiques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2003.
- [113] L A. Dissado, Theoretical basis of the dielectric breakdown, J. Phys. D: Phys., Vol. 23, pp. 1582-1591, 1990.