

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

MEMOIRE

Présenté par

Melle AIT-SAADI ZOHRA

Ingénieur d'état en Electrotechnique

En vue de l'obtention du grade de

MAGISTER

Spécialité : Electrotechnique

Option : Entrainements électriques

Vieillessement électrique du polyester-imide et du polyamide imide utilisés dans les machines électriques

Devant le Jury d'examen composé de :

M^r. Hassane MOHELLEBI, Professeur, UMMTO, Président

M^r. Mohammed NEDJAR, Professeur, UMMTO, Rapporteur

M^r. Rachid CHAIBI, Professeur, UMMTO, Examineur

M^r. Rabah BOUDISSA, Maitre de conférences A, Université de Bejaia, Examineur

M^r. Samy Hassani OULD OUALI, Maitre de conférences B, UMMTO, Examineur

2011/2012

REMERCIEMENTS

Je tiens à présenter mes remerciements les plus sincères à mon encadreur, M^r. Nedjar Mohammed, Professeur à l'UMMTO, j'aimerais lui présenter mes vifs sentiments de reconnaissance pour avoir dirigé ce travail, et aussi pour sa patience, ses précieux conseils, et la grande disponibilité qu'il m'a offerts à tout moment tout au long de ce travail.

Également, j'adresse mes remerciements à M^r. Mohellebi Hassane, Professeur à l'UMMTO, M^r. Chaïbi Rachid, Professeur à l'UMMTO, M^r. Boudissa Rabah, Maître de conférences à l'Université de Béjaïa et M^r. Ould Ouali Samy Hassani, Maître de conférences à l'UMMTO pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être membres de jury et d'examiner ce travail.

Mes très vifs remerciements vont à l'égard de M^r. Belabbas Ferhat, Chef de service du Laboratoire de physique à l'entreprise Electro-Industries de Azazga, pour son aide à la réalisation de mon travail ainsi que toute l'équipe du Laboratoire de Physique et le personnel au sein de l'entreprise pour son aide et chaleureux accueil.

Je tiens également à présenter ma profonde gratitude à tous les enseignants du bloc Haute tension de l'Université de Béjaïa et tous ceux qui m'ont aidé à réaliser mes expériences au sein de l'Université pour leurs disponibilité et leurs orientations.

Finalement, j'aimerais particulièrement exprimé ma grande sympathie à tous mes ami(e)s et collègues de travail au laboratoire de Génie Electrique de l'UMMTO pour la bienveillance qu'ils m'ont toujours témoigné à tous moment.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- La mémoire de mon père ;
- ma chère mère ;
- mes frères et sœurs ;
- mes neveux Yanis, Rayane, Accel et
ma nièce Sylva ;
- toute ma famille et ceux qui m'ont aidé à
réaliser ce travail;
- mes amies safouche, rosa, zina(2), ouzna,
chabha, salwa et tous mes amis.

Introduction.....	1
CHAPITRE I- EMAUX ISOLANTS	
1. Structure de base de macromolécules.....	3
2. Emaux isolants.....	3
3. Utilisations.....	4
3.1. En fils ronds.....	4
3.2. En fils méplats.....	4
4. Domaines d'application.....	5
4.1. En électrotechnique.....	5
4.2. En électronique.....	5
5. Emaux de polyester-imide.....	5
6. Emaux de polyamide imide.....	6
6.1. Famille chimique du polyamide imide.....	6
6.2. Propriétés du polyamide imide.....	6
CHAPITRE II- RUPTURE DIELECTRIQUE DES POLYMERES	
1. Différents mécanismes de claquage.....	7
1.1. Claquage thermique.....	7
1.2. Claquage d'origine électronique.....	7
1.2.1. Claquage intrinsèque.....	7
1.2.2. Claquage associé au volume libre.....	7
1.2.3. Claquage par avalanche.....	8
1.3. Claquage électromécanique.....	8
2. Rupture à court terme.....	9
2.1. Effet de la tension et du système d'électrodes.....	9
2.2. Effet de la température.....	10
2.3 Effet de l'épaisseur de l'isolant.....	10
3. Rupture à long terme.....	11
4. Décharges partielles.....	12
4.1. Naissance des décharges partielles.....	13
4.1.1. Tension aux bornes de la vacuole.....	13
4.1.2. Caractérisation de la nocivité des décharges.....	13
5. Arborescences électriques.....	13
5.1. Phase d'incubation.....	14
5.1.1. Formation de l'arborescence par décharges partielles.....	14
5.1.2. Action des porteurs chauds sur la structure du polymère.....	14
5.1.3. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique.....	15
5.2. Phase de propagation.....	15
5.3. Phase d'avalanche.....	15
6. Modèles de durée de vie.....	16
6.1. Modèle de puissance inverse.....	16

6.2. Modèle exponentiel.....	16
CHAPITRE III- LE MODELE STATISTIQUE DE WEIBULL ET SON APPLICATION A LA RUPTURE DIELECTRIQUE DES ISOLANTS SOLIDES	
1. Modèle statistique de weibull.....	18
1.1. Bases du modèle.....	18
1.2. Modèle à deux paramètres.....	20
1.3. Modèle à trois paramètres.....	20
1.4. Signification des paramètres.....	20
1.4.1. Paramètre d'échelle X_0	20
1.4.2. Paramètre de forme α	21
1.4.3. Paramètre de localisation X_s	21
2. Avantages de la loi de weibull.....	21
3. Application du modèle de weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides.....	22
3.1. Tenue diélectrique à long terme.....	22
3.2. Tenue diélectrique électrique à court terme.....	23
CHAPITRE IV- TECHNIQUES EXPERIMENTALES	
1. Préparation des échantillons.....	24
2. Dispositif pour essais de vieillissement électrique.....	26
3. Appareils de mesure.....	27
4. Mode opératoire.....	29
4.1. Conditionnement des échantillons.....	29
4.2. Essais de vieillissement électrique.....	30
CHAPITRE V- RESULTATS ET DISCUSSION	
1. Traitement statistique des données.....	31
1.1. Calcul des probabilités de rupture.....	31
1.2. Lissage des points expérimentaux.....	31
2. Résultats et discussion.....	32
2.1. Polyester-imide.....	32
2.1.1. Diagrammes de Weibull à deux paramètres.....	32
2.1.2. Courbe d'endurance électrique du polymère.....	43
2.2. Polyamide imide.....	44
2.2.1. Diagrammes de Weibull à deux paramètres.....	44
2.2.2. Courbe d'endurance électrique du polymère.....	55
Conclusion.....	56
Bibliographie.....	57

Actuellement les polymères tels que le polyamide imide, le polyester - imide et le polyuréthane sont très utilisés 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.

Pendant le fonctionnement des machines électriques, l'isolation est soumise à l'action de la température, de la tension, des radiations, d'humidité, ...etc. L'action de ces contraintes peut être séparée ou combinée. Le champ électrique est l'une des contraintes les plus importantes. En effet, quand on soumet un matériau isolant à un champ électrique, ses propriétés se dégradent en fonction du temps d'application de cette contrainte, ce qui est connu sous le nom de vieillissement électrique. Il est généralement admis que cette dégradation est un phénomène irréversible se traduisant par une réduction de la durée de vie du polymère. Le vieillissement électrique conduit, à long terme, à la création de décharges partielles et d'arborescences électriques au sein du matériau.

L'évaluation de l'endurance électrique d'un isolant est indispensable afin de pouvoir l'utiliser dans les dispositifs électriques tels que les condensateurs, machines électriques, câbles de transport d'énergie, ... etc. La connaissance des mécanismes de dégradation permet d'améliorer les performances des propriétés d'un matériau par exemple en cherchant une formulation appropriée du mélange qui consiste à varier la quantité de résine, le type ou la qualité de chaque additif.

Le but de ce travail est d'étudier le vieillissement électrique sous tension alternative du polyester-imide et du polyamide-imide utilisés comme isolants dans les dispositifs électriques. Les expériences ont été réalisées dans les laboratoires de haute tension de l'Université de Béjaia et de physique de l'Entreprise Electro - Industries sise à Azazga.

Ce mémoire est divisé en deux parties: une première partie concernant une recherche bibliographique composée de trois chapitres et une deuxième expérimentale comprenant deux chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés pour nos expériences : polyester - imide et polyamide imide.

Le deuxième chapitre traite la rupture diélectrique des isolants solides : mécanismes, ruptures à court et à long termes, décharges partielles et arborescences. Les différents modèles d'endurance électrique ou durée de vie des polymères sont aussi décrits.

Le modèle statistique de Weibull et son application à l'étude de la rupture diélectrique des isolants solides feront l'objet du troisième chapitre. Les avantages de ce modèle sont cités.

Le chapitre 4 décrit les techniques expérimentales concernant la réalisation des échantillons, le banc d'essai et le générateur de haute tension. La méthode d'essai a été décrite.

Dans le chapitre 5 sont rassemblés les résultats concernant, respectivement, le polyester – imide et le polyamide imide. Une analyse statistique des temps de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres. Ceci a conduit aux courbes d'endurance électrique des deux matériaux diélectriques sous tension alternative. Une interprétation et une discussion des résultats obtenus ont été données.

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

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

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

Actuellement plusieurs émaux isolants (fils émaillés) sont de plus en plus utilisés dans l'émaillage de fils de bobinage de machines électriques. 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]. 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.

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 à celui d'émaillage doivent faire intervenir ou bien le comportement du vernis d'imprégnation, ou bien l'ensemble des deux 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.

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 de grandes machines électriques tournantes et les gros transformateurs.

4. DOMAINES D'APPLICATION

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

4.1. En électrotechnique

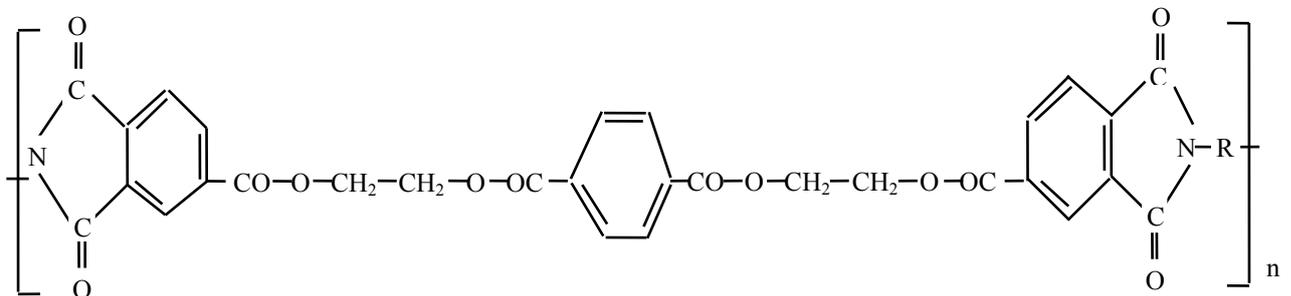
En fréquence industrielle et à courant continu, les principales qualités à exiger sont la stabilité thermique, la résistance mécanique, la résistance aux agents chimiques d'agression (éventuellement aux solvants des vernis d'imprégnation).

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) [9]. Les polyester-imides sont surtout utilisés comme émaux pour fils résistant à la température [7].

Des agents de réticulation sont utilisés et permettent d'obtenir des polyester-imides avec une structure tridimensionnelle semblable à celle des thermodurcissables [10,11].

Des essais de vieillissement thermique ont été réalisés sur des éprouvettes de fils émaillés isolés au polyesterimide de classe H (classe 180°C) [12]. Les échantillons sont des

torsades de 125 mm de longueur. Le diamètre du fil est de 0,63 mm et l'épaisseur de l'isolant est égale à 35 μm (grade 2). Ces expériences ont conduit à :

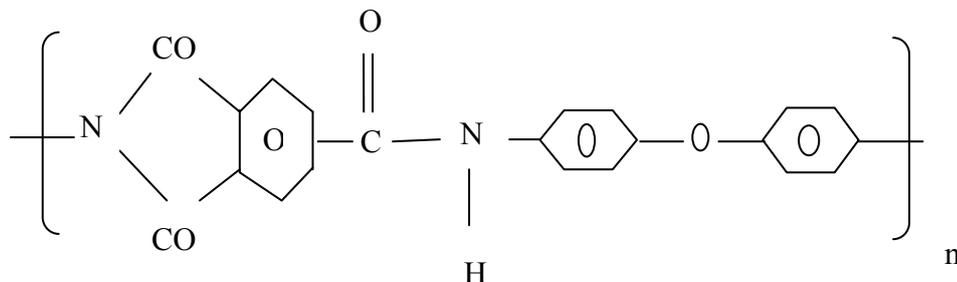
- une tension de claquage de 5,34 kV avant le vieillissement
- un indice de température de 182°C
- une énergie d'activation de 24,31 kcal/mol.

Des expériences de vieillissement hydrolytique du polyester imide ont montré une bonne résistance du matériau à l'action de l'humidité [13]. La tension de claquage dépend de la vitesse de la rampe de tension [14].

6. EMAUX DE POLYAMIDE IMIDE

6.1. Famille chimique du polyamide imide

La formule chimique du polyamide imide est la suivante [15] :



6.2. Propriétés du polyamide imide

Les propriétés physiques sont :

- Densité : 1,380 g/cm^3 [15]
- Conductivité thermique : 0,24 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [16]

Les propriétés mécaniques sont:

- Résistance à la traction à 23°C : 117,2 MPa [16]
- Allongement à la rupture à 23°C : 10-18% [15,16]
- Module d'Young à 23°C : 5,200 MPa [15,16]

Les propriétés électriques à 23°C sont [16]:

- Résistivité transversale : $3,0\cdot 10^{13}$ $\Omega\cdot\text{m}$
- Résistivité superficielle : $> 1,0\cdot 10^{17}$ Ω
- Rigidité diélectrique : 17,3 kV/mm
- Constante diélectrique à 106 Hz: 4,0
- Facteur de dissipation à 106 Hz: $9\cdot 10^{-3}$.

Dans ce chapitre, nous présentons une synthèse sur les différents mécanismes de la rupture diélectrique des polymères.

1. DIFFERENTS MECANISMES DE CLAQUAGE

1.1. Claquage thermique

Une explication du phénomène de claquage thermique est donnée par Coelho et al [17]. 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.

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) [17]. On distingue le claquage intrinsèque, le claquage par avalanche et celui associé au volume libre.

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 [18].

1.2.2. Claquage associé au volume libre

Artbauer [19] 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 [20]. L'effet du taux de plastifiant (dioctyle phthalate) sur la rigidité diélectrique du polychlorure de vinyle utilisé dans les câbles moyenne tension a été mis en évidence [21,22]. L'addition de copolymères contenant des pièges à électrons permet d'augmenter la rigidité diélectrique du polyéthylène [23]. Dans une certaine mesure, les

impuretés chimiques peu ionisables et les défauts physiques de type dislocation jouent un rôle analogue de limitation du libre parcours électronique [17].

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 al donnent une explication du processus [17]: 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. Le claquage par avalanche est caractérisé par un seuil de 10^8 V/m nécessaire pour que des collisions ionisantes puissent se produire et le processus qui en découle est rapide.

1.3. Claquage électromécanique

L'application d'un champ électrique à un matériau peut créer des contraintes mécaniques. La pression qui s'exerce sur le diélectrique lorsque les électrodes sont fixes, ou force de compression de Maxwell est de la forme [24]:

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

où:

ε : permittivité du diélectrique [F.m]

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 ($d < d_0$) [25]. 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 (II.2) [25]:

$$d_c = d_0 e^{-0,5} \quad (\text{II.2})$$

Le champ réel de claquage est [25]:

$$G_c = \frac{V}{d_c} = \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.3})$$

où:

Y: module d'Young du matériau

ϵ_r : permittivité relative du diélectrique

ϵ_0 : permittivité du vide.

Le champ apparent expérimental vaut V/d_0 , soit:

$$G_{\text{app}} = \frac{V}{d_0} = \frac{G_c d_c}{d_0} = 0,606 \left(\frac{Y}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.4})$$

$$G_{\text{app}} = 0,606 G_c \quad (\text{II.5})$$

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 seulement du module d'Young mais aussi du seuil de plasticité du matériau [25].

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 [26]. L'effet de la charge d'espace est important dans les phénomènes de claquage [20]. Cette dernière dépend de la morphologie du matériau [27]. La rigidité diélectrique des polymères polaires est plus importante que celle des polymères non polaires [20]. 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 [28].
- souvent du métal des électrodes

– de l'état de surface des électrodes [29].

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 [20] montre 3 régions (figure II.1). On observe une décroissance de la rigidité diélectrique des basses températures vers les hautes températures.

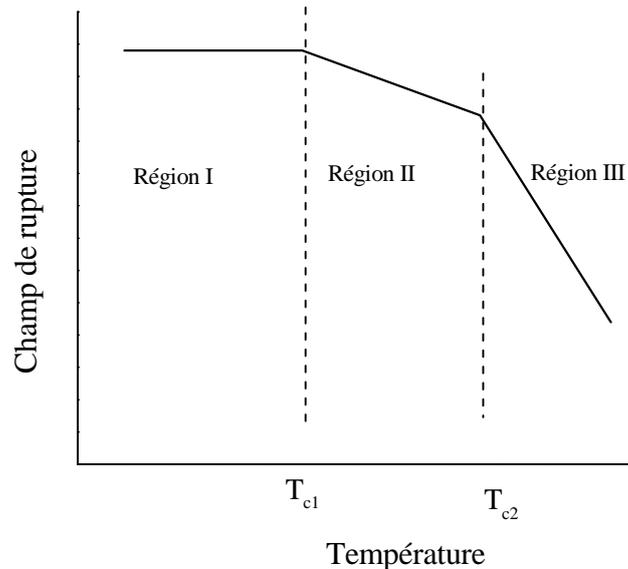


Figure II.1. Allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique

Dans le cas du polyéthylène, sous champ alternatif uniforme, le gradient électrique de rupture diminue en fonction de la température [30].

2.3. Effet de l'épaisseur de l'isolant

Généralement le champ de claquage diminue quand l'épaisseur augmente [31,32]. La rigidité diélectrique d'un matériau est liée à l'épaisseur e [mm] de l'isolant par la relation suivante [33]:

$$E = k e^{-n} \quad (\text{II.6})$$

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 isolant 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, Ces mécanismes sont détaillés dans des ouvrages [6,34,35]. La rupture à long terme peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années [26].

Le problème de la rupture se résumant à un transfert d'énergie entre le champ électrique et les porteurs de charge, une théorie de rupture à long terme doit pouvoir expliquer comment sous un champ relativement faible, les porteurs peuvent gagner l'énergie de quelques électron-volts nécessaires à la rupture de liaisons dans un isolant. Dans la littérature, il n'existe pas à proprement parlé de théorie de rupture à long terme. Un modèle a été développé par Jonscher et al [36] qui s'applique aussi bien à la rupture aux temps courts qu'aux temps longs. Le modèle repose sur 2 hypothèses qui résultent d'une analyse détaillée des caractéristiques générales de la rupture dans une large gamme de matériaux de structures différentes. Les différentes étapes du processus sont [36]:

Stade 1

Le matériau est en équilibre sous champ faible ou nul. En moyenne, le champ électrique n'a aucune action sur sa structure: s'il y a création de défauts, ils le sont sous forme métastable. La structure peut donc revenir à son état initial.

Stade 2

Le champ est suffisant pour créer de nouveaux défauts à partir de défauts initiaux de façon irréversible. Ce processus entraîne une augmentation de la densité de charges au sein du matériau.

Stade 3

Sous l'action combinée du champ électrique et du temps, la densité de défauts est telle que la probabilité pour qu'ils se groupent en amas n'est pas nulle.

Stade 4

Les porteurs dont le libre parcours moyen est de plus en plus grand, au sein de ces amas, sont susceptibles d'acquérir des énergies importantes donc de produire des défauts de dimensions plus importantes qui peuvent apparaître sous forme d'arborescence par exemple.

Stade 5

La rupture se fait selon un mécanisme de percolation entre les amas des défauts.

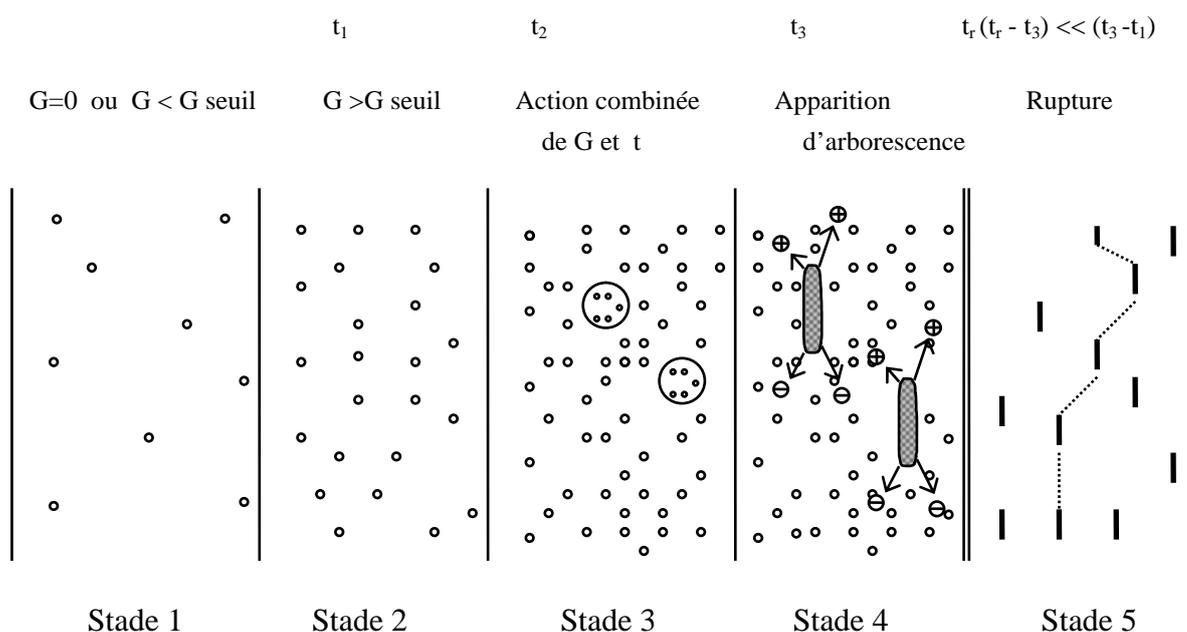


Figure II.2. Modèle proposé par Jonscher et al intégrant une action cumulative du champ et du temps.

Le modèle présenté sous forme schématique à la figure II.2 repose sur l'hypothèse qu'il faut apporter moins d'énergie pour étendre les défauts initiaux de la structure que pour en créer de nouveaux. Il propose donc la création de défauts au sein du matériau à partir de défauts initiaux liés à sa structure désordonnée. Ce sont les porteurs de charge qui sont à l'origine de l'extension des défauts initiaux. En l'absence de porteurs, il ne peut y avoir aucune évolution.

4. DECHARGES PARTIELLES

En 1936, Robinson [37] dont l'intérêt s'était porté sur les câbles haute tension imprégnés à l'huile, mettait déjà en cause la présence de cavités et le bombardement de leurs parois par les ions. Par leurs dimensions, leur pression et les contraintes de tension auxquelles sont soumises les cavités, 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.

4.1. Naissance des décharges partielles

4.1.1. Tension aux bornes de la vacuole

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.

4.1.2. Caractérisation de la nocivité des décharges

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. Plusieurs travaux font appel aux mécanismes de dégradation et de claquage par les décharges partielles [38,39].

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.

5. ARBORESCENCES ELECTRIQUES

L'étude des arborescences électriques dans les isolants synthétiques a débuté vers 1951 avec les travaux de Mason [40,41]. Elles ont comme origine des défauts au sein d'un matériau tels qu'il se produit une concentration importante du champ électrique. Dans les câbles, les observations sont rares car le développement est assez rapide, et il est suivi d'un claquage qui détruit les zones atteintes [42].

Les expérimentateurs simulent des défauts en introduisant une aiguille pointue dans un isolant. La tension est appliquée entre l'aiguille et une électrode généralement plane et en contact avec le matériau. Lorsque les essais sont effectués sur des éléments de câbles, l'aiguille est enfoncée radialement, la seconde est constituée par le conducteur. En pratique, il s'agit de reproduire les conditions nécessaires à l'apparition des arborescences. La pointe

sert alors de site d'initiation. Les études ont montré que le développement du 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 de microcanaux dans l'espace interélectrode.
- la phase d'avalanche qui conduit au claquage.

5.1. Phase d'incubation

La période d'incubation est considérée comme le phénomène prédisruptif dans le domaine de la rupture à long terme 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.

5.1.1. 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 [43,44]. Ces cavités seraient dues aux dilatations différentielles du polymère et du métal et à l'air absorbé ou occlus [44]. Si ces microcavités n'existent pas à l'origine, elles sont créées par une fatigue électromécanique aux points de concentration du champ électrique [45]. Un échauffement dû aux pertes diélectriques peut s'ajouter à cette fatigue [46].

5.1.2. Action des porteurs chauds sur la structure du polymère

Eichhorn [47] a été l'un des premiers à émettre 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.

5.1.3. Formation de l'arborescence par rupture électromécanique

Noto et al [48,49] 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 [48] 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.

5.2. Phase de propagation

Le processus de propagation des arborescences électriques est mieux compris. On admet que des décharges se produisent dans les canaux rendant conducteur le gaz qui les remplit: le champ est reporté à leur pointe et provoque des claquages locaux qui les font progresser [42,43,50]. Le développement des arborescences électriques est toujours accompagné de décharges partielles mesurables qui apparaissent au moment où les premières branches sont visibles au microscope [51-53]. Certains auteurs pensent que le bombardement électronique ou ionique dû aux décharges provoque un échauffement suivi d'un claquage local [54] ou bien décompose l'isolant en gaz [43].

La propagation se fait dans la direction du champ électrique. Le cheminement complexe des filaments résulterait de la rencontre aléatoire des facteurs tels que les contraintes internes, l'orientation cristalline et les effets des traitements thermiques [55]. Il est admis que la limite entre les régions cristallines et les régions amorphes représente une zone pouvant faciliter le cheminement [44,47].

5.3. 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.

6. MODELES DE DUREE DE VIE

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

6.1. 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 [56]. Il est donné par la relation suivante [57]:

$$t=kG^{-n} \quad (\text{II.7})$$

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 [57]. 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.

Dans certains cas, la courbe d'endurance électrique est formée de deux ou plusieurs segments de droite [58-60]. Le coefficient n constitue un critère d'évaluation de l'endurance en tension du matériau: plus sa valeur est élevée, meilleur est l'isolant [61]. Ce coefficient est compris entre 4 et 20 [62].

6.2. Modèle exponentiel

Dans le cas du modèle exponentiel, la relation entre le champ électrique appliqué et la durée de vie est donnée par [57]:

$$t=C\exp(-kG) \quad (\text{II.8})$$

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 [63].

L'objet principal de la statistique est de faire, à partir d'observations d'un phénomène aléatoire, un sujet de loi générant ces dernières en vue d'analyser ce phénomène ou de prévoir un évènement futur [64].

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 sous des contraintes liées aux conditions de fonctionnement [65].

La rupture diélectrique des isolants solides est un phénomène aléatoire et une étude statistique est indispensable: pour des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique de champ ou de temps de rupture mais une distribution de valeurs. Il est donc nécessaire de tester un nombre important 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 bien connu depuis longtemps, que quelque soient les précautions prises par les fabricants de matériaux isolants, les défauts ne peuvent être éliminés complètement. Ces défauts peuvent exister lors de la mise en œuvre du matériau ou créés durant le vieillissement. 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 prédire la durée de vie des matériaux isolants solides, plusieurs approches mathématiques (Loi de Gauss, Loi normale, ...etc.) sont utilisés. Le modèle le plus employé pour la caractérisation de la rupture diélectrique de ces matériaux est le modèle de Weibull [23].

1. MODELE STATISTIQUE DE WEIBULL

Les principales lois statistiques utilisées en fiabilité sont les lois : exponentielle, de Weibull, normale et log-normale [66]. Dans le cas des isolants solides, les distributions de Weibull et log-normal sont les plus utilisées [57,67].

1.1. Bases du modèle

Le modèle de Weibull est utilisé pour le décrire [23,68]. Le nom de Walodi Weibull (1887-1979) est attaché au domaine de la statistique traitant des durées de vie des matériaux et donc de l'étude statistique de leur panne. Weibull s'intéressa aux problèmes de résistance des matériaux et de leur rupture [69].

A l'origine, le modèle statistique de Weibull a été établi en mécanique [68]. L'intérêt de cette distribution est de permettre un bon ajustement d'une grande variété de problèmes de rupture [69]. Il exprimait la probabilité de rupture d'une chaîne en fonction de la

probabilité de rupture d'un maillon. La rupture d'une chaîne se produit au niveau de son maillon le plus faible quelles que soient les qualités des autres maillons [70]. Pour bien comprendre le concept du maillon le plus faible, on introduit trois hypothèses [71]:

- Hypothèse 1 : le matériau est assimilé à une chaîne de n maillons, la contrainte de rupture est celle du maillon le plus faible. En effet, isolons par la pensée chaque défaut au sein de l'élément de volume V qui le contient. Le matériau est un ensemble d'éléments de volume placés en série. La rupture de l'un d'eux provoque la rupture complète de l'ensemble. Pratiquement, un maillon correspond à un élément de volume V.
- Hypothèse 2 : les résistances à la rupture des maillons sont des variables aléatoires indépendantes.
- Hypothèse 3 : la population de la résistance à la rupture des maillons est homogène. En d'autres termes, les résistances à la rupture des différents maillons suivent la même loi de probabilité.

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 [70]:

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

Le modèle statistique de Weibull ou la loi de chaîne s'écrit [70] :

$$P(X) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X - X_S}{X_0} \right)^\alpha \right] \quad X > 0 \quad (\text{III.2})$$

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 cette méthode peut être trouvée dans des ouvrages de référence [23,66,70]. 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.

La prise de conscience de ce que les problèmes de la rupture diélectrique des câbles obéissent à une loi de dispersion de valeurs extrêmes de type de celle qui gouverne les dispersions de rupture de chaînes, a conduit certains auteurs à proposer de représenter la dispersion des champs ou tension de rupture par une loi exponentielle du même type que celle de Weibull [72].

1.2. Modèle à deux paramètres

C'est le cas où $X_s = 0$, le modèle de Weibull est dit à 2 paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit [72] :

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

ou sous sa forme linéaire :

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

Si le phénomène observé suit le modèle de Weibull à 2 paramètres, le graphique où l'on porte en abscisses $\text{Log} X$ et $\text{Log Ln} \frac{1}{1-P(X)}$ 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 [72] :

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

ou encore sous sa forme linéaire:

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

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

1.4. Signification des paramètres

1.4.1. Paramètre d'échelle X_0

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

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

1.4.2. Paramètre de forme α

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 [73]. D'après Oudin et al [74] :

- Si $\alpha < 1$, on a une « mortalité infantile » des échantillons. Ainsi, les éléments défectueux échouent et tombent en panne tôt et le taux d'échec ou bien la probabilité de claquage diminue avec le temps, cette mortalité est aussi appelée « défauts de jeunesse » [75].
- Si $\alpha = 1$, la loi Weibull correspond à la loi de Poisson et la probabilité de claquage est indépendante du temps d'application de la tension.
- Si $\alpha > 1$, la probabilité de claquage augmente avec le temps, ce qui correspond à un vieillissement normal, c'est-à-dire à une fatigue initialement nulle et qui s'accroît avec le temps [74,75].

En général, dans le cas des polymères et pour les distributions en temps (essais à champ constant), on a : $0,5 < \alpha < 3$ [23].

1.4.3. Paramètre de localisation X_s

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. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la détermination du seuil de rupture diélectrique des isolants solides [76,77].

2. AVANTAGES DE LA LOI DE WEIBULL

Après une étude comparative entre la loi de Weibull et la loi Log-normal, Oudin et al ont montré que [74] :

- Pour des probabilités faibles, l'hypothèse de la loi de Weibull correspond à des probabilités plus fortes et par conséquent plus pessimiste que l'hypothèse Laplacienne. On peut considérer que cette prévision plus pessimiste apporte plus de sécurité.
- Le modèle de Weibull permet de retrouver la durée de vie donnée par le modèle de puissance inverse.
- Il a une forme simple, c'est la raison pour laquelle il est utilisé par de nombreux auteurs ou d'ingénieurs [71].

- Il permet de décrire la rupture et la distribution statistique des résistances à la rupture d'un grand nombre de matériaux, dans des conditions de sollicitation simple [71].

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 deux 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 la rupture diélectrique a été présentée par Dissado [78]. Le modèle statistique de Weibull est très utilisé pour l'évaluation de la fiabilité des câbles électriques [79,80].

3.1. Tenue diélectrique à long terme

La probabilité de claquage sous champ constant s'écrit [74] :

$$P(G,t) = 1 - \exp(-C t^a G^b) \quad (\text{III.7})$$

avec :

G : champ électrique appliqué

C : constante dépendant de la géométrie de l'échantillon.

t : temps au bout duquel se produit le claquage.

a : paramètre de dispersion en temps.

b : paramètre de dispersion en champs.

avec : $n = \frac{b}{a}$, n étant le coefficient d'endurance électrique.

La relation se met souvent sous la forme explicite [74] :

$$P(G,t,v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{G}{G_0} \right)^b \left(\frac{t}{t_0} \right)^a \left(\frac{v}{v_0} \right) \right] \quad (\text{III.8})$$

où :

G_0 , t_0 et v_0 sont les valeurs d'échelles respectivement à la contrainte G , à la durée t et au volume v de l'isolant étudié.

3.2. Tenue diélectrique électrique à court terme

Dans le cas de vieillissement à court terme, le matériau est soumis à une rampe de champ électrique de vitesse de montée constante V . On peut écrire :

$$G = Vt \quad (\text{III.9})$$

avec :

G : champ électrique appliqué

V : vitesse de montée de la rampe du champ électrique

t : temps au bout duquel se produit le claquage.

En remplaçant t par sa valeur dans l'expression (III.7), on obtient l'expression de la probabilité de claquage :

$$P(G) = 1 - \exp \left[-C \frac{G^{a+b}}{V^a} \right] \quad (\text{III.10})$$

Le modèle statistique est utilisé pour l'évaluation de la tenue diélectrique des isolants solides sous rampe de tension à vitesse de montée constante [73,81-83].

Dans ce chapitre, nous présentons les dispositifs expérimentaux utilisés pour l'étude du vieillissement électrique du polyamide imide et du polyester imide employés comme isolants dans les machines électriques. La première partie, concernant la réalisation des éprouvettes, a été réalisée au Laboratoire de Physique de l'Entreprise Electro-Industries sise à Azazga. Quant à la deuxième partie, portant sur les essais de vieillissement électrique, elle a été effectuée au Laboratoire de Haute Tension de l'Université de Béjaia.

1. PREPARATION DES ECHANTILLONS

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



Figure IV.1. Bobine de fil de cuivre isolé au polyamide imide.

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 IV.2. La longueur des éprouvettes est de 125 ± 5 mm conformément aux recommandations de la norme NF EN 60317-0-1 [84]. La force de traction exercée et le nombre de tours nécessaires pour la réalisation d'une torsade sont indiqués dans le tableau IV.1. et conformes aux recommandations de la norme NF EN 60317-0-1[84]. Les deux extrémités ont été, ensuite, dénudées comme le montre la figure IV.3. La boucle de la torsade a été coupée en deux points afin d'éviter le court-circuit. Ensuite, les deux extrémités ont été écartées d'une distance suffisante afin d'empêcher le contournement (Figure IV.4).



Figure IV.2. Tour à bobiner avec échantillon en cours de réalisation.

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

Tableau IV.1. Charge et nombre de tours appliqués à la torsade [84]



Figure IV.3. Boucle formée de la torsade confectionnée avec le tour à bobiner



Figure IV.4. Eprouvette en forme de torsade réalisée.

2. DISPOSITIF POUR ESSAIS DE VIEILLISSEMENT ELECTRIQUE



Figure IV.5. 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 IV.5. 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. 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

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 IV.6)
- Un transformateur haute tension pouvant délivrer une tension pouvant atteindre 100 kV, 50 Hz en alternatif et 135 kV en continu (figure IV.7),
- 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 IV.8),
- Une cage de faraday (figure IV.9),
- Un diviseur de tension capacitif ($C = 1 \text{ nF}$).



Figure IV.6. Source de tension SG1.



Figure IV.7. Transformateur haute tension avec une résistance d'amortissement.



Figure IV.8. Voltmètre de crête MU11

La figure IV.9 montre l'ensemble cage de Faraday, appareils de mesure, bâti avec échantillons.



Figure IV.9. Ensemble cage de Faraday, appareils de mesure et dispositif d'essai.

4. MODE OPERATOIRE

4.1. Conditionnement des échantillons

Conformément aux recommandations de la norme NF EN 60317-0-1 [84], avant les essais de claquage, 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.



Figure IV.10. Ensemble dessiccateur et échantillons en cours de conditionnement.

La figure IV.10 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 alternative de fréquence 50 Hz est appliquée à l'ensemble d'une population de 50 éprouvettes. La tension est délivrée par la source de tension SG1 (Figure IV.6) qui est mise sous mode manuel. Sa valeur est affichée par le voltmètre de crête MU11 (figure IV.8). Les temps de rupture sont mesurés à l'aide du chronomètre montré à la Figure IV.11. Le vieillissement étant long, à cet effet, nous avons procédé à des temps cumulés.



Figure IV.11. Chronomètre utilisé pour la mesure des temps de claquage.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats concernant le vieillissement électrique du polyester - imide et du polyamide imide. Une analyse statistique des temps de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres qui a été décrit au chapitre III.

1. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

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

$$X_i = \log t_i \quad (\text{V.1})$$

$$Y_i = \log \text{Ln} (1/(1-P_i)) \quad (\text{V.2})$$

avec:

t_i : temps de claquage,

P_i : probabilité de rupture.

1.1. Calcul des probabilités de rupture

La probabilité de claquage a été calculée en utilisant la relation suivante [57]:

$$P(i) = \frac{i}{N+1} 100\% \quad (\text{V.3})$$

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.

1.2. 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 [73]. 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.

2. RESULTATS ET DISCUSSION

2.1. Polyester-imide

2.1.1. Diagrammes de Weibull à deux paramètres

Dans les figures V.1 - V.22 sont exposés les diagrammes de Weibull à 2 paramètres du temps de rupture pour différents niveaux de la tension appliquée. L'équation de la meilleure droite de Weibull a été construite. Les valeurs du paramètre d'échelle ou temps nominal de rupture ont été déterminées. Nous constatons que la dispersion des points expérimentaux varie d'une distribution à une autre. Dans la plupart des cas, les données sont plus dispersées pour les faibles probabilités.

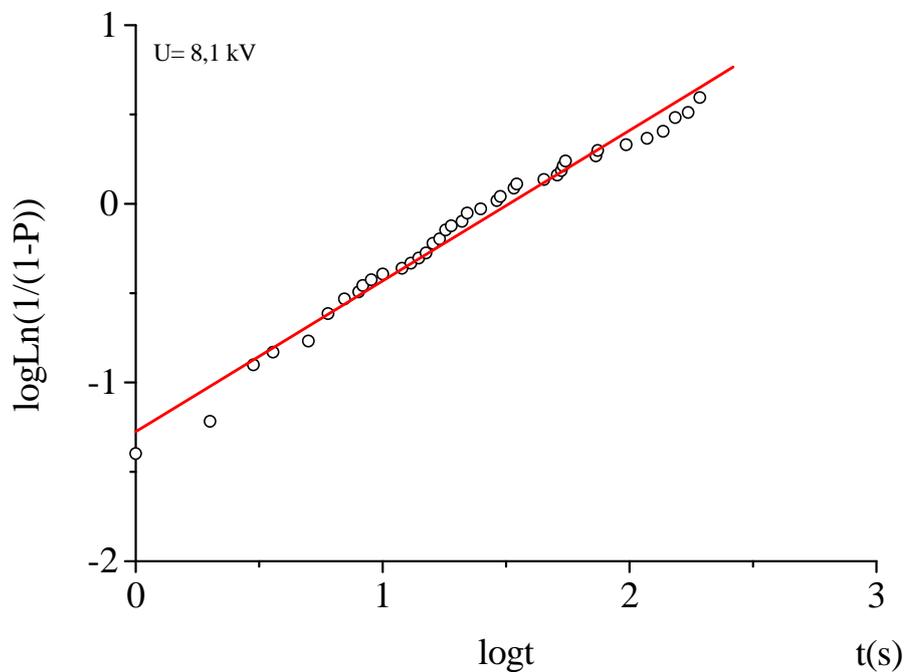


Figure V.1. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 8,1 kV.

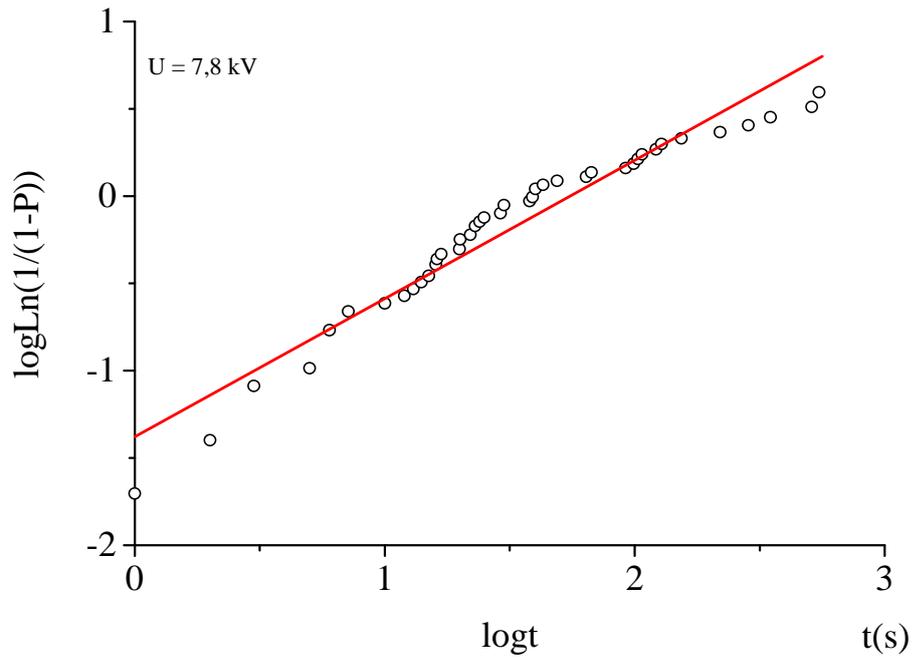


Figure V.2. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,8 kV.

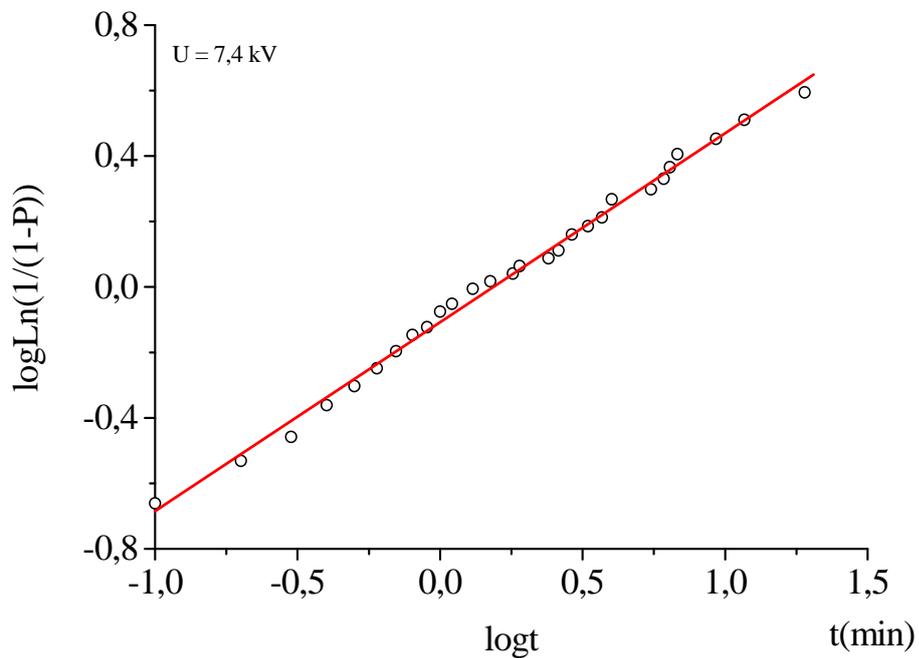


Figure V.3. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,4 kV.

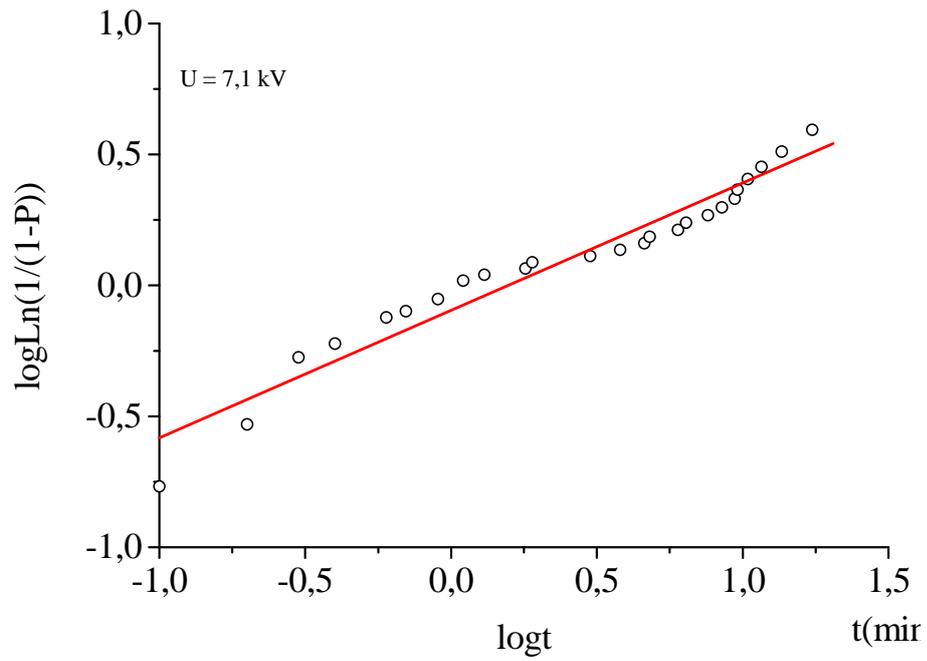


Figure V.4. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,1 kV.

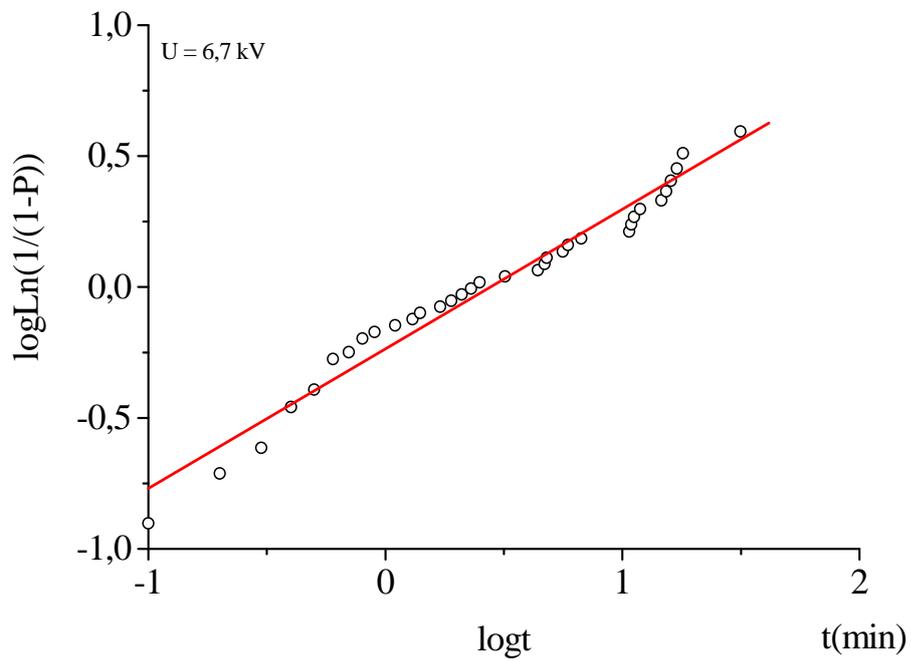


Figure V.5. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,7 kV.

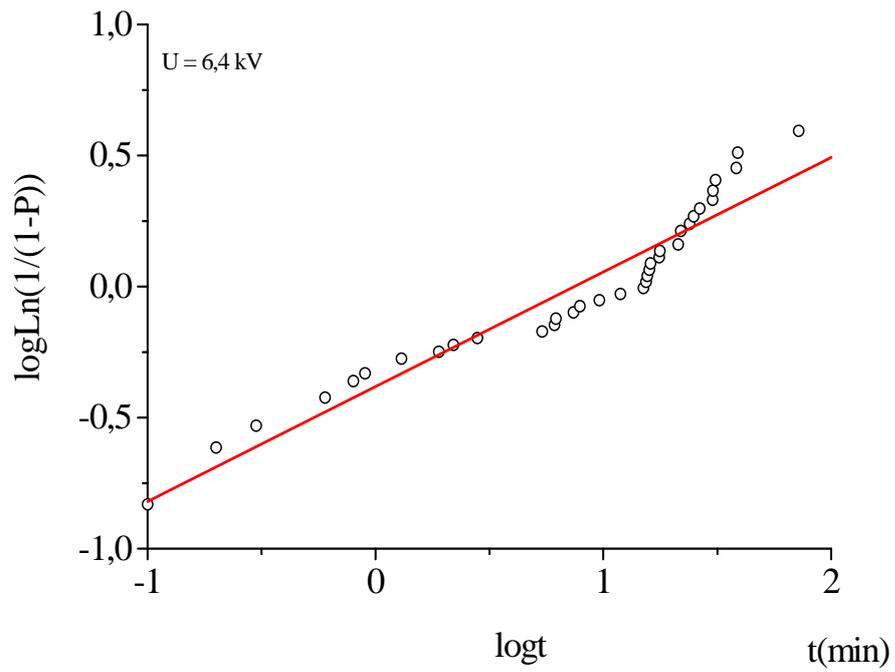


Figure V.6. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,4 kV.

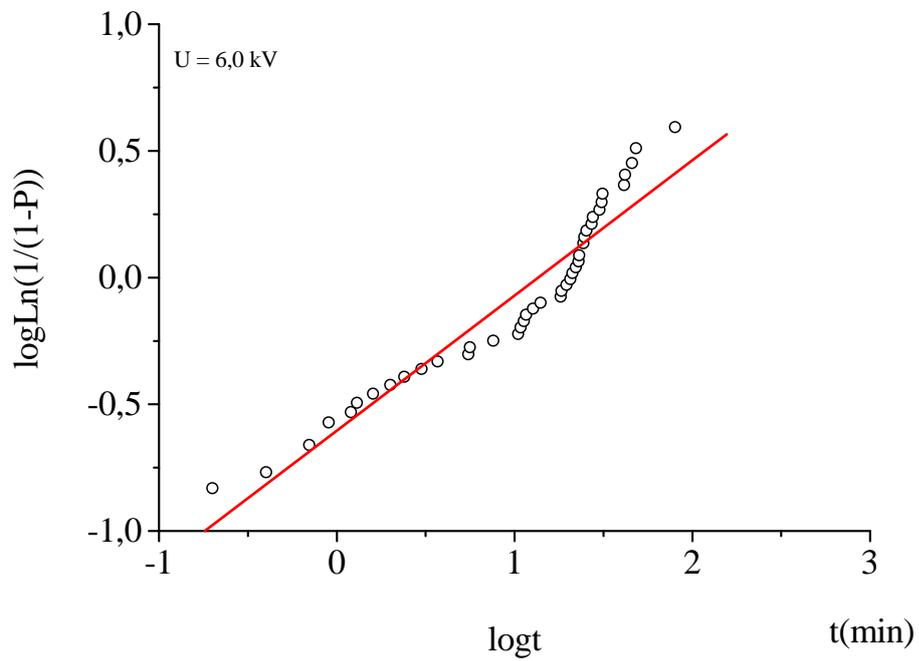


Figure V.7. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,0 kV.

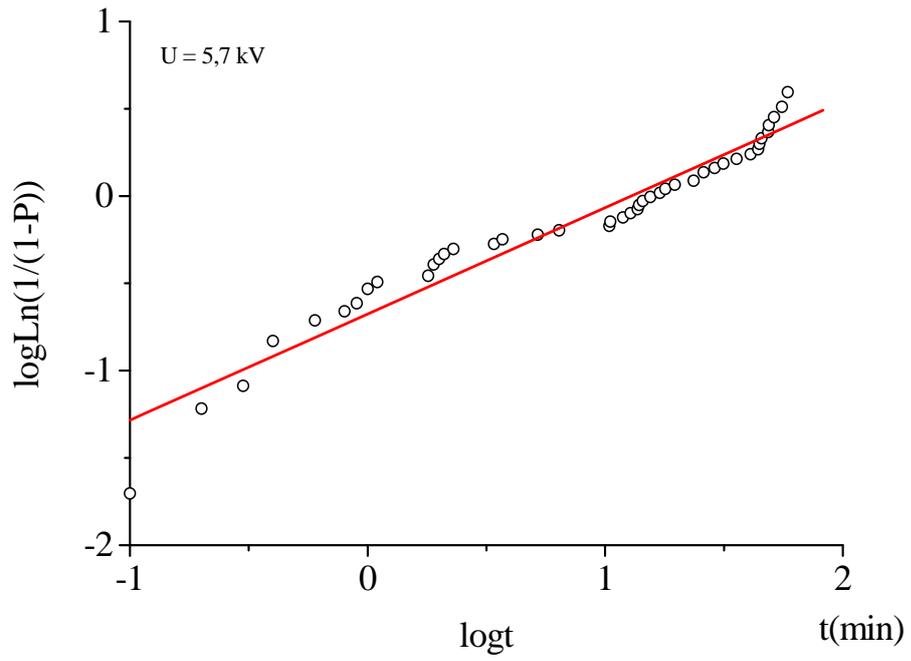


Figure V.8. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,7 kV.

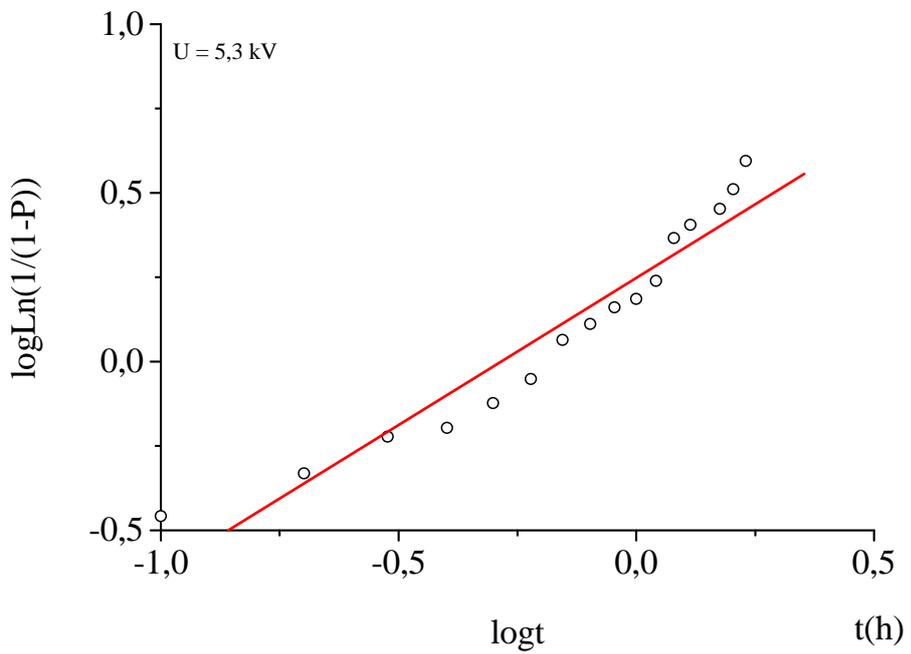


Figure V.9. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,3 kV.

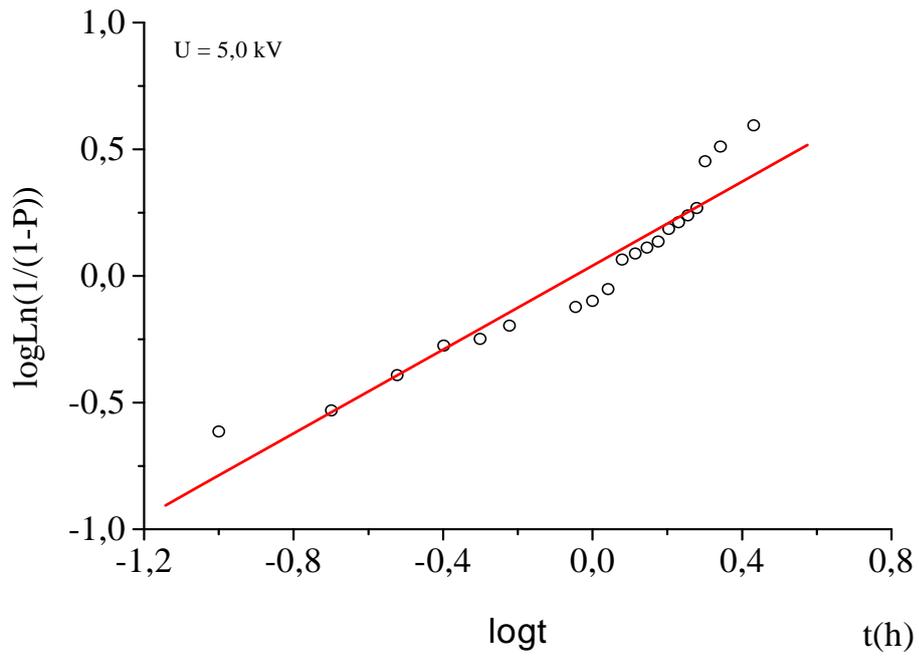


Figure V.10. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,0 kV.

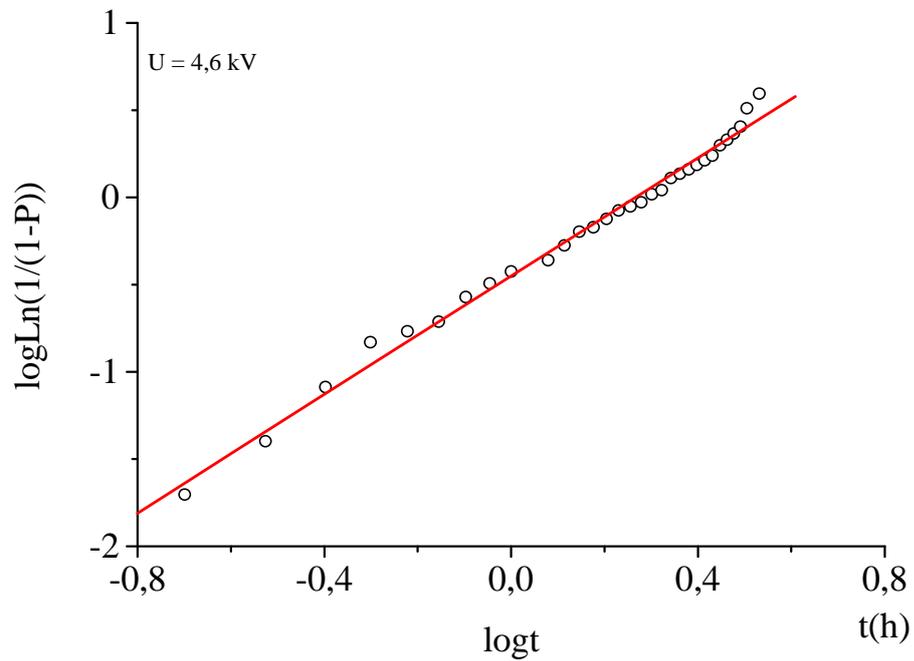


Figure V.11. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 4,6 kV.

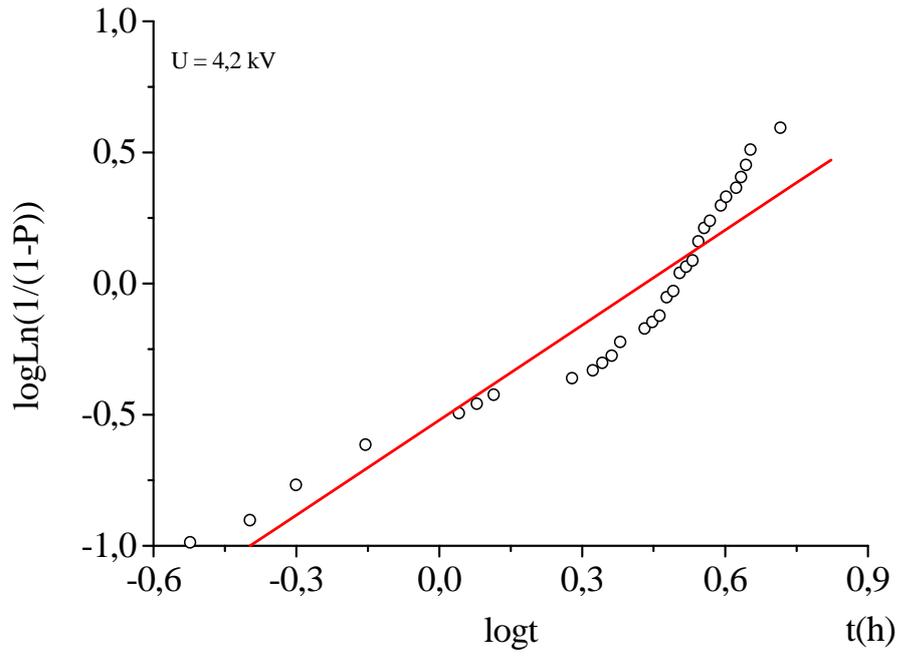


Figure V.12. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 4,2 kV.

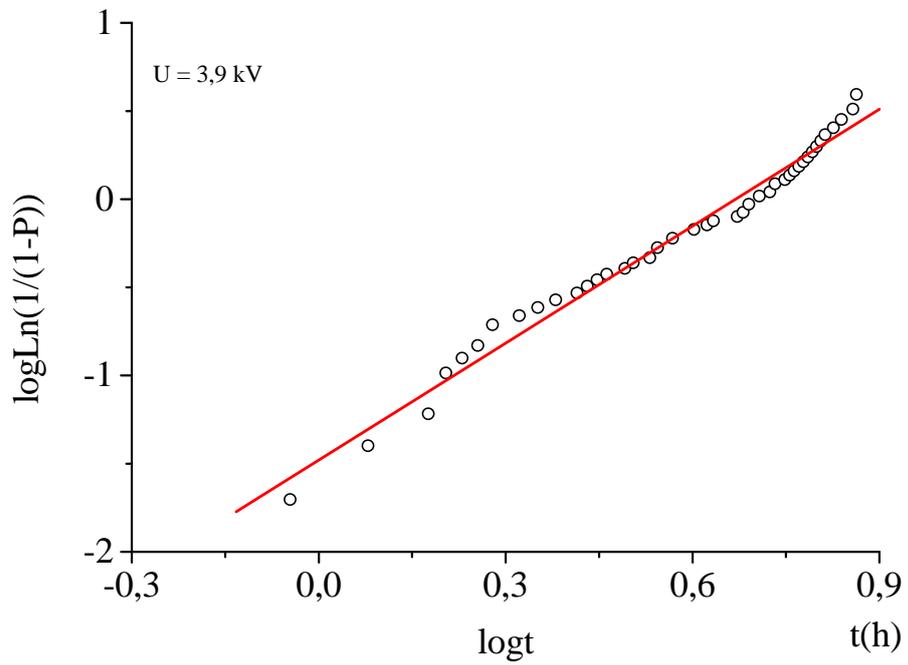


Figure V.13. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 3,9 kV.

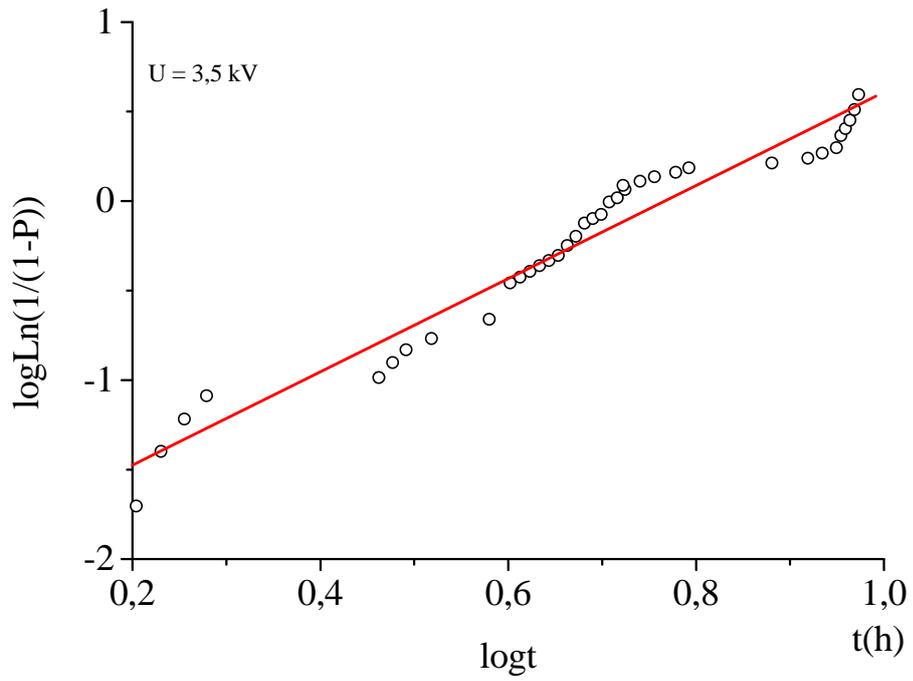


Figure V.14. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 3,5 kV.

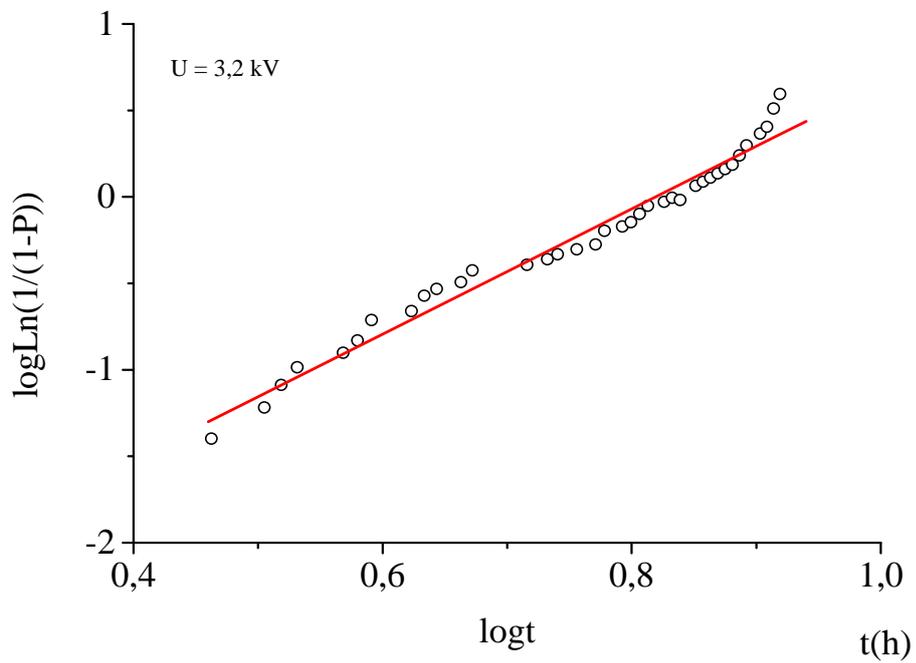


Figure V.15. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 3,2 kV.

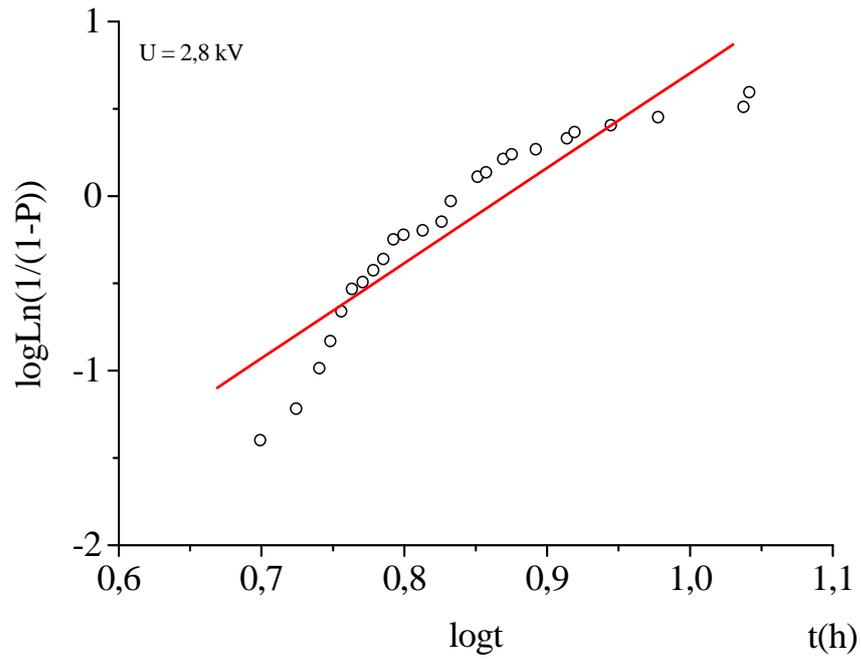


Figure V.16. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 2,8 kV.

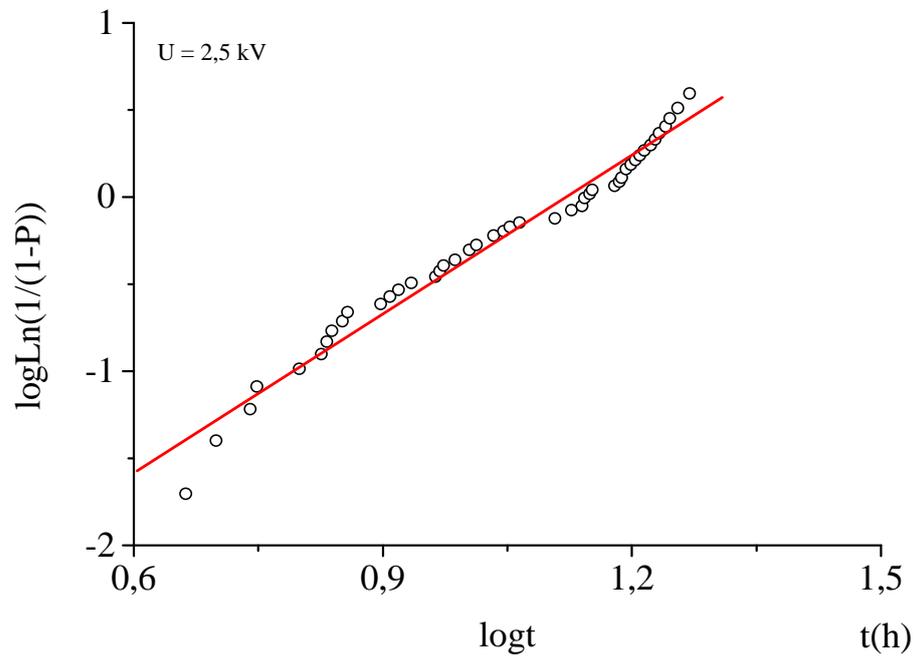


Figure V.17. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 2,5 kV.

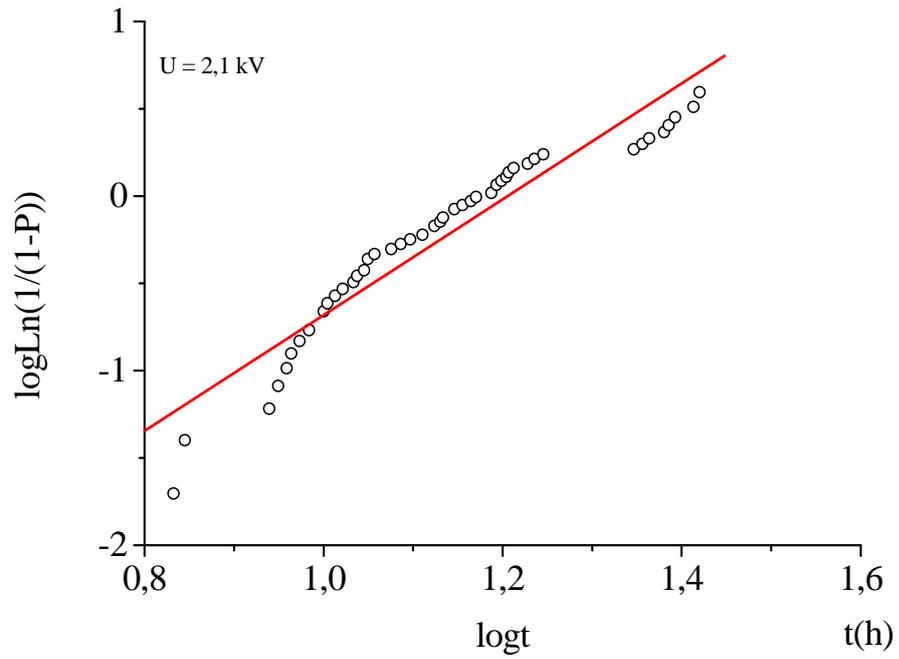


Figure V.18. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 2,1 kV.

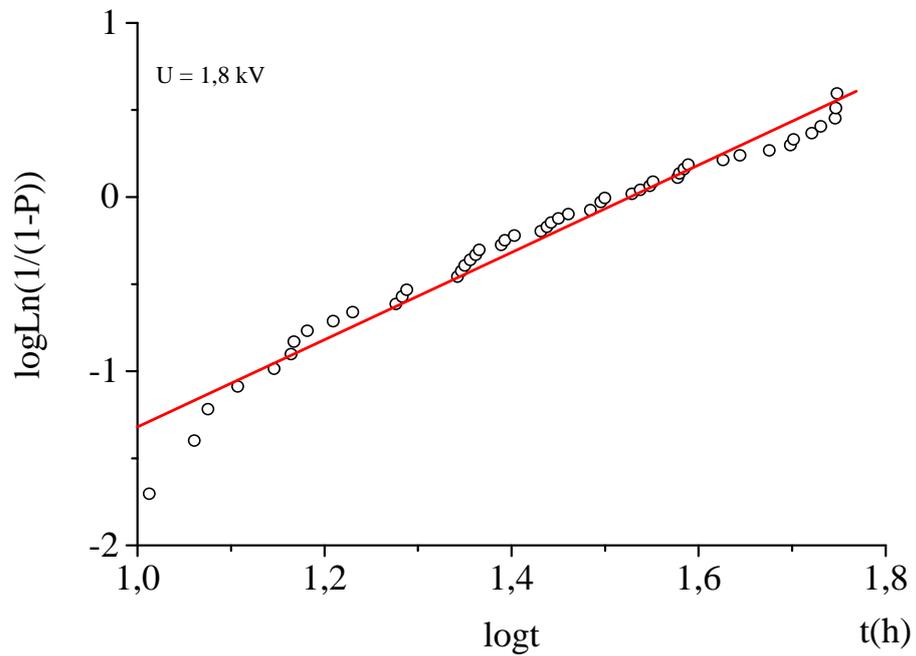


Figure V.19. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 1,8 kV.

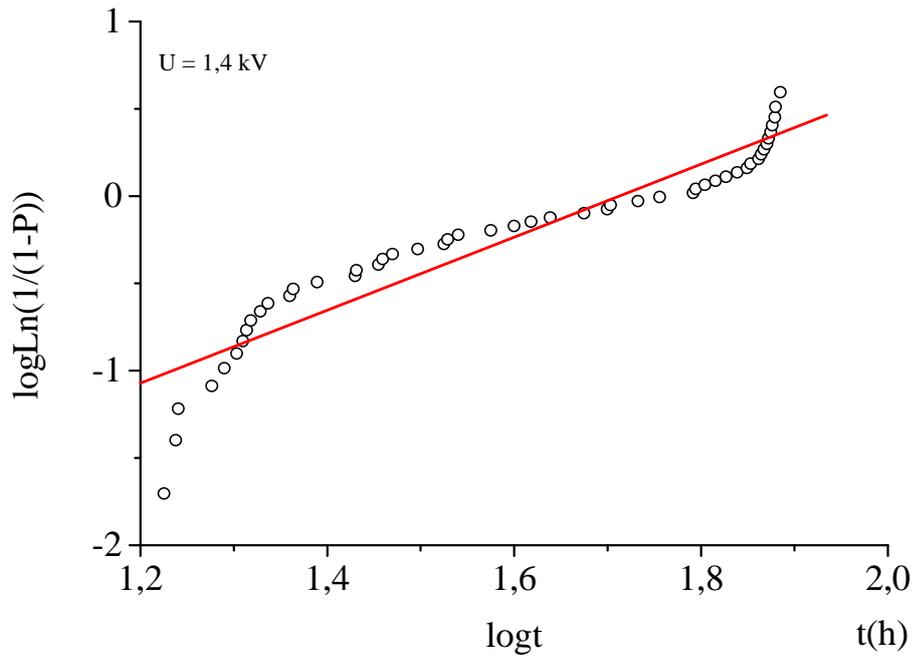


Figure V.20. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 1,4 kV.

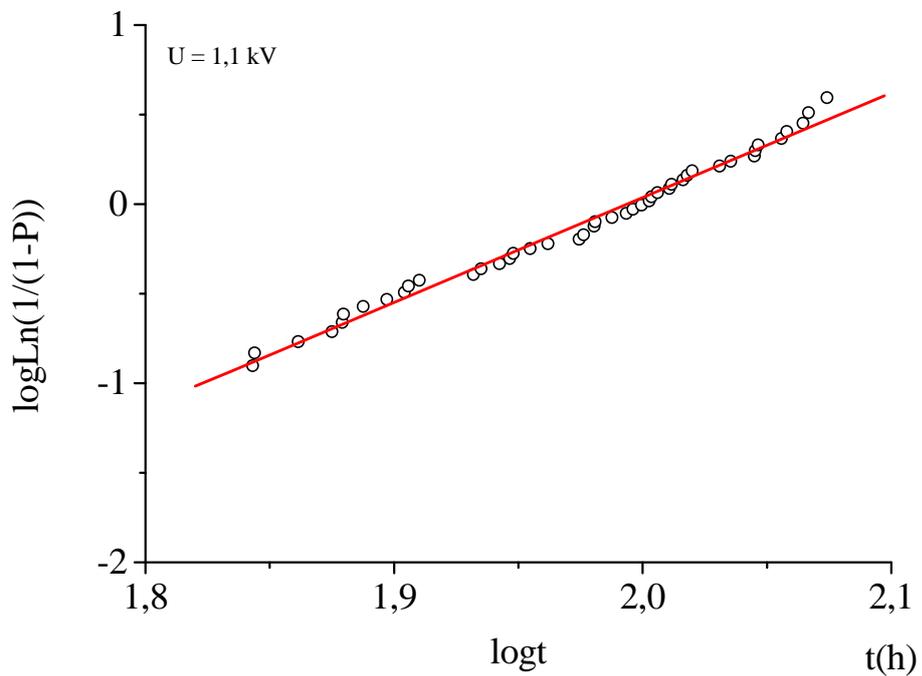


Figure V.21. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 1,1 kV.

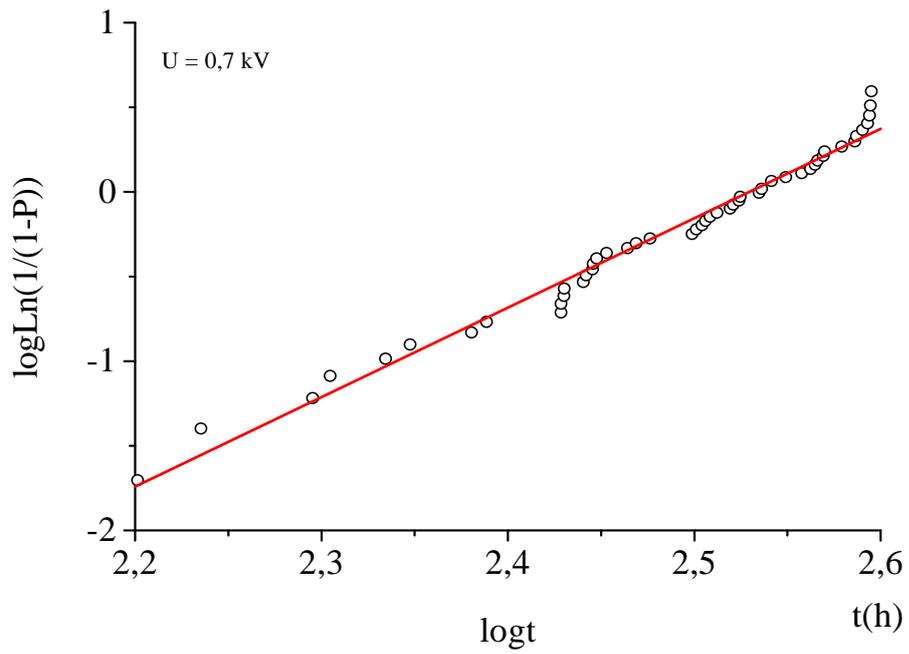


Figure V.22. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 0,7 kV.

2.1.2. COURBE D'ENDURANCE ELECTRIQUE DU POLYMERE

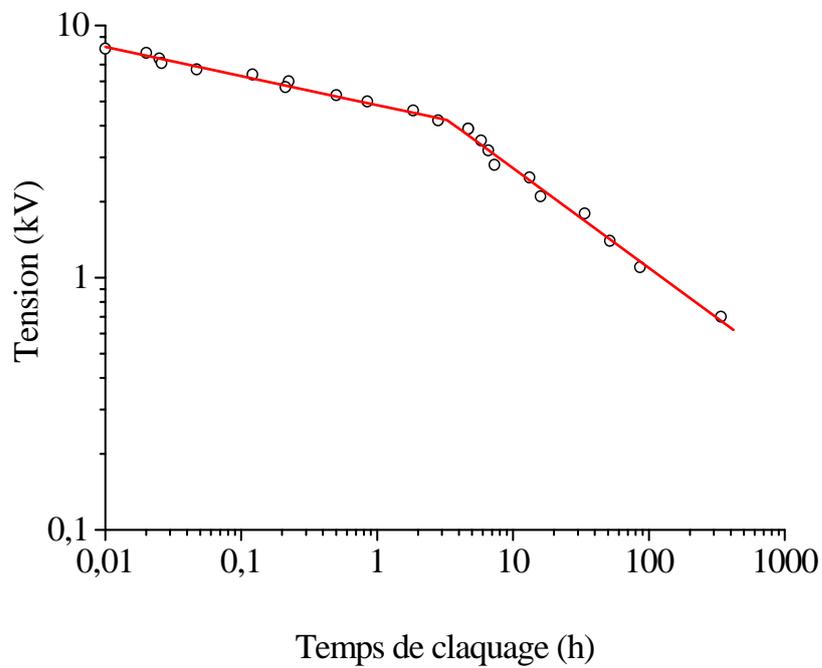


Figure V.23. Courbe d'endurance électrique du polyester-imide

La figure V.23 représente la caractéristique donnant la variation de la tension appliquée en fonction du temps nominal de rupture (63, 2%) ou courbe d'endurance électrique du polyester-imide. Nous constatons que la courbe est décroissante. Elle comprend deux segments de droite de pentes très différentes. La première zone correspond à des défauts de jeunesse. La deuxième zone caractérise le vieillissement réel de l'isolant. Ce phénomène a été reporté précédemment [59]. 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.

2.2. Polyamide imide

2.2.1. Diagrammes de Weibull à deux paramètres

Les figures V.24-V.45 présentent les diagrammes de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage du polyamide imide. La méthode de l'analyse statistique a été exposée au début de ce chapitre. Comme précédemment, nous constatons que la distribution varie d'un niveau de tension à un autre.

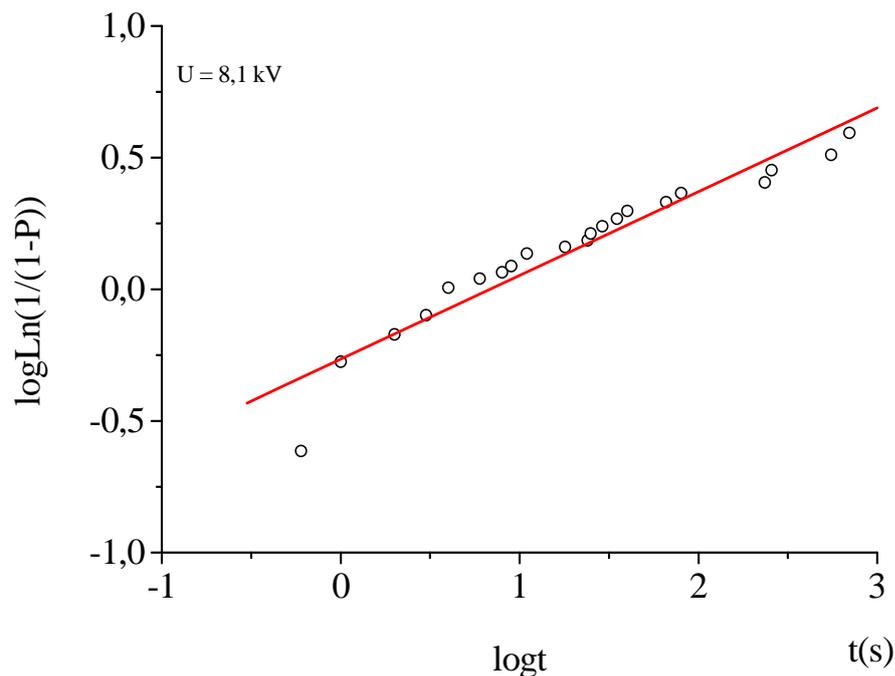


Figure V.24. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 8,1 kV.

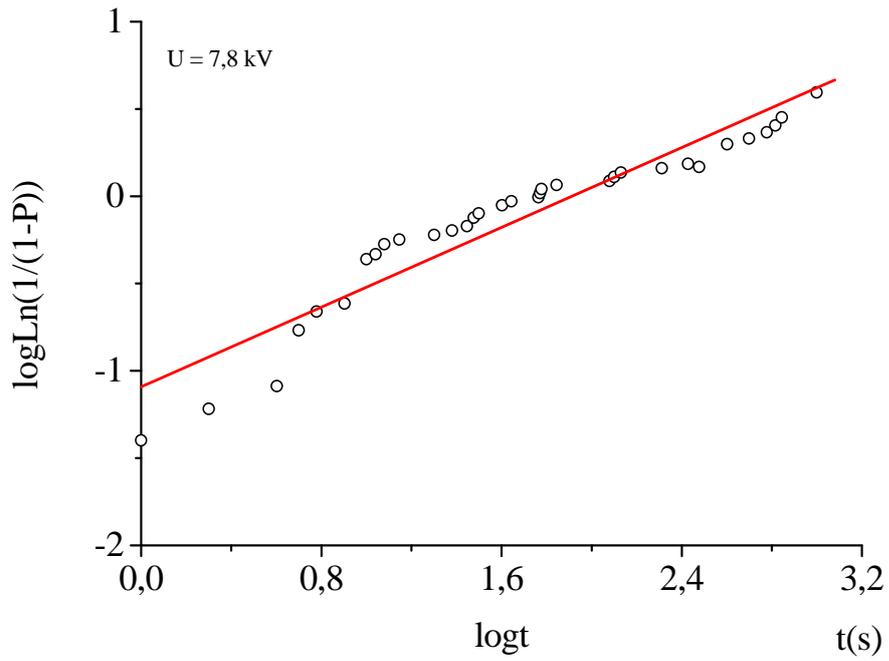


Figure V.25. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,8 kV.

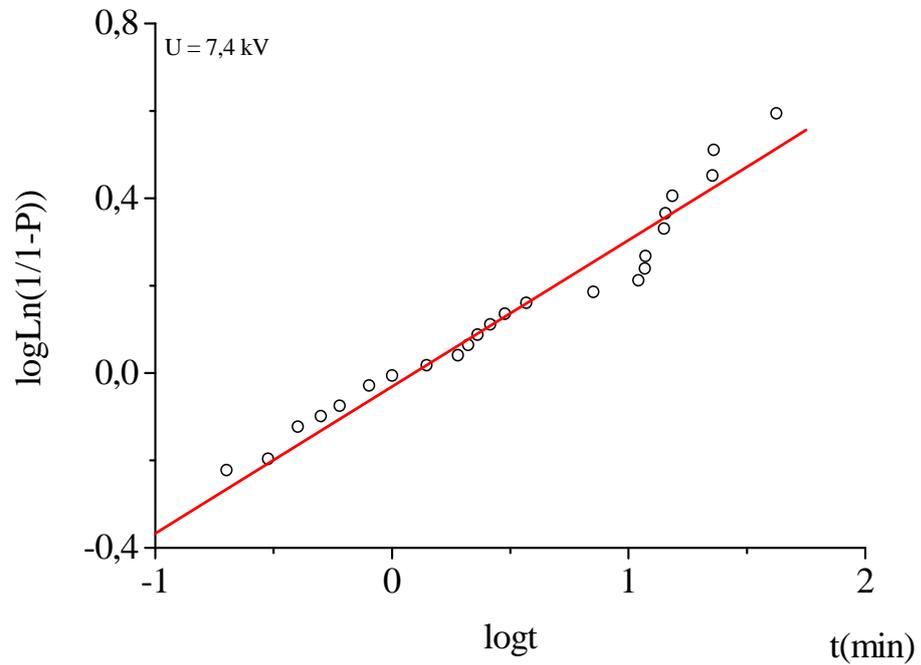


Figure V.26. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,4 kV.

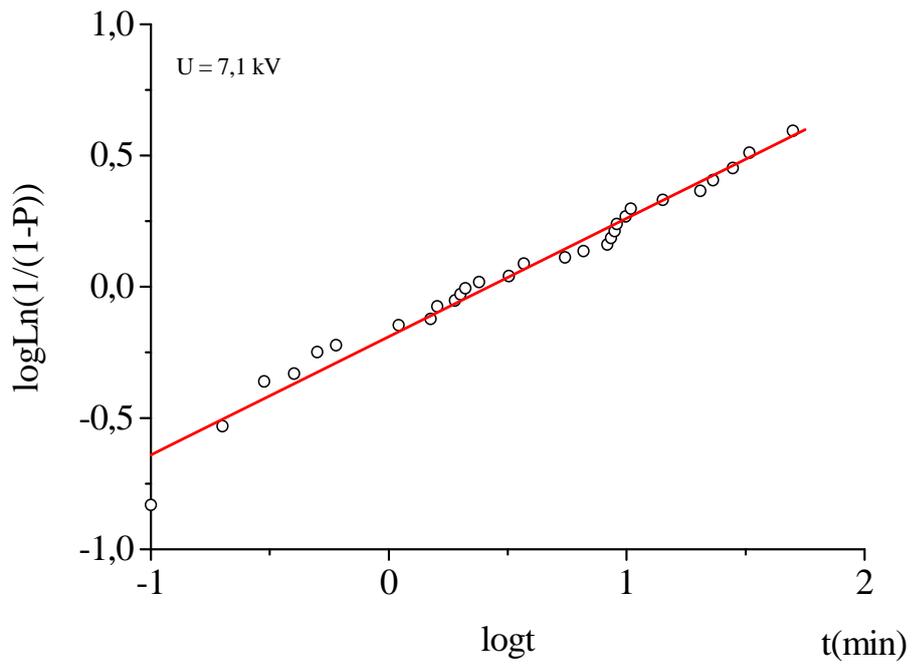


Figure V.27. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 7,1 kV.

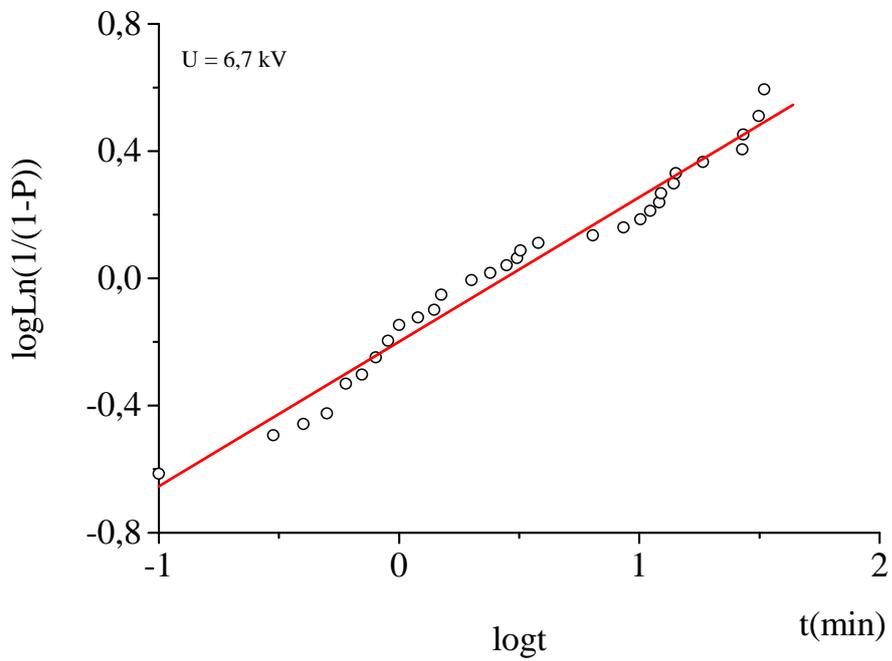


Figure V.28. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,7 kV.

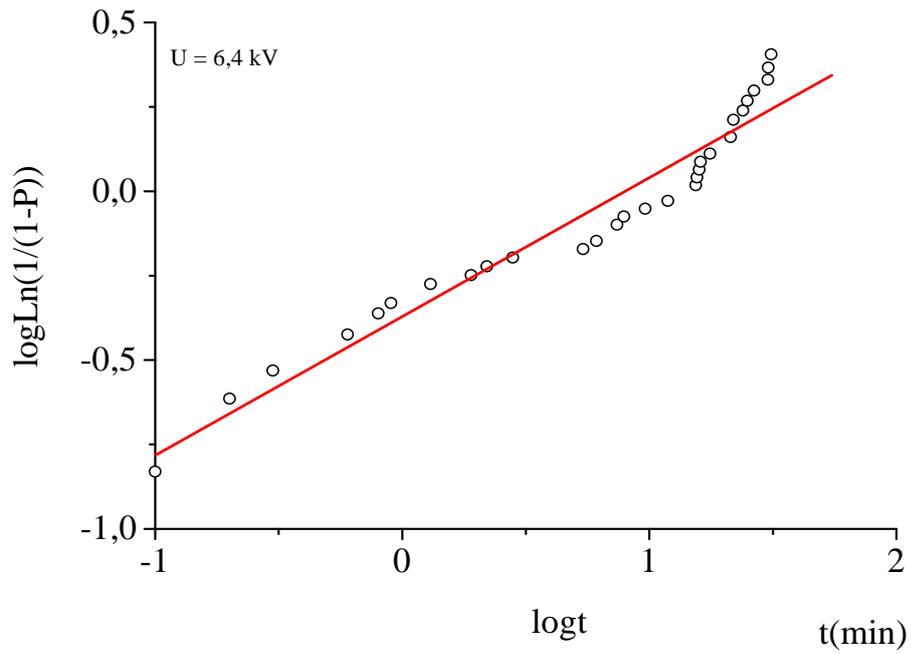


Figure V.29. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,4 kV.

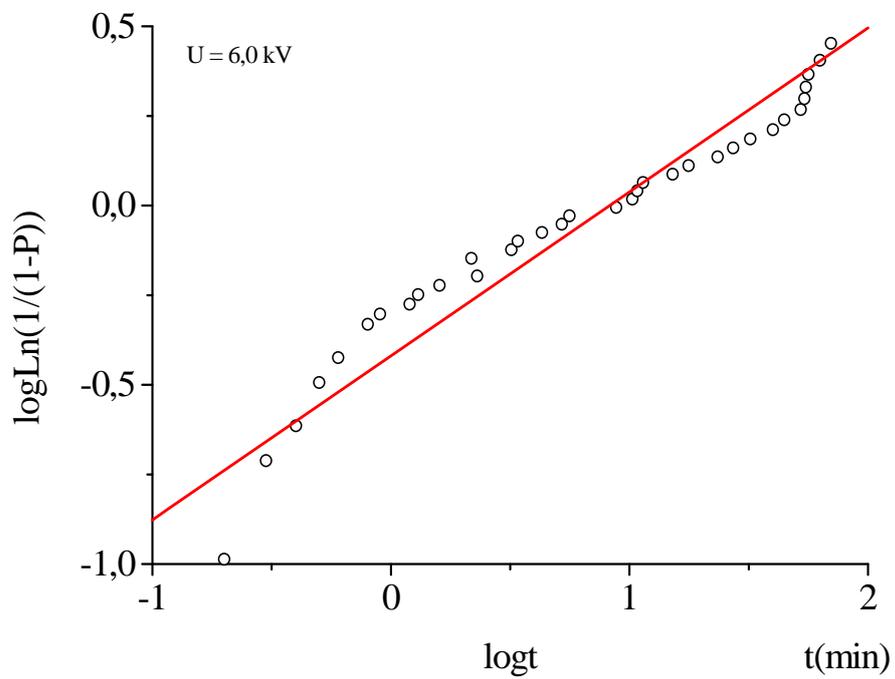


Figure V.30. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 6,0 kV.

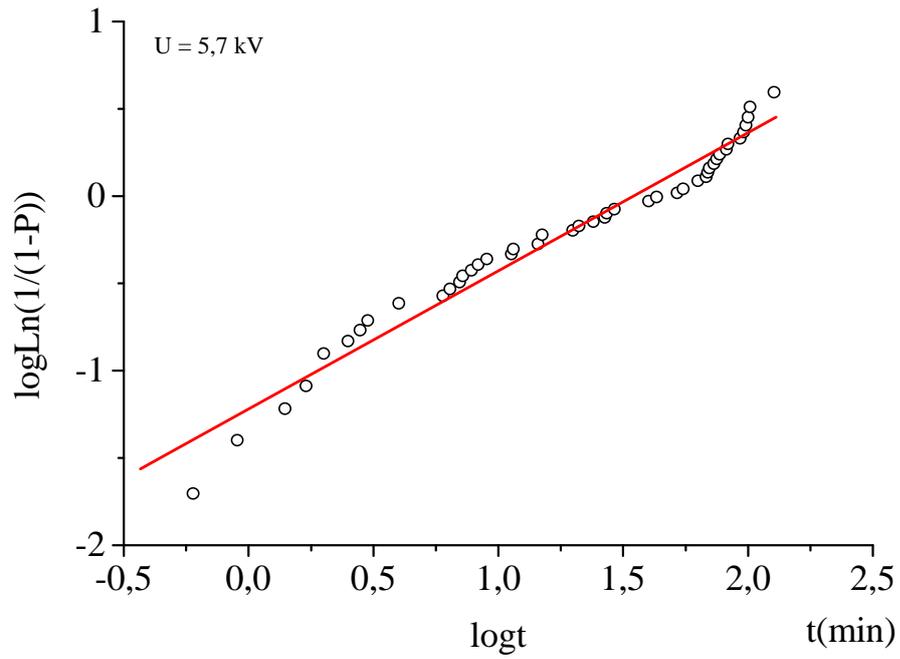


Figure V.31. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,7 kV.

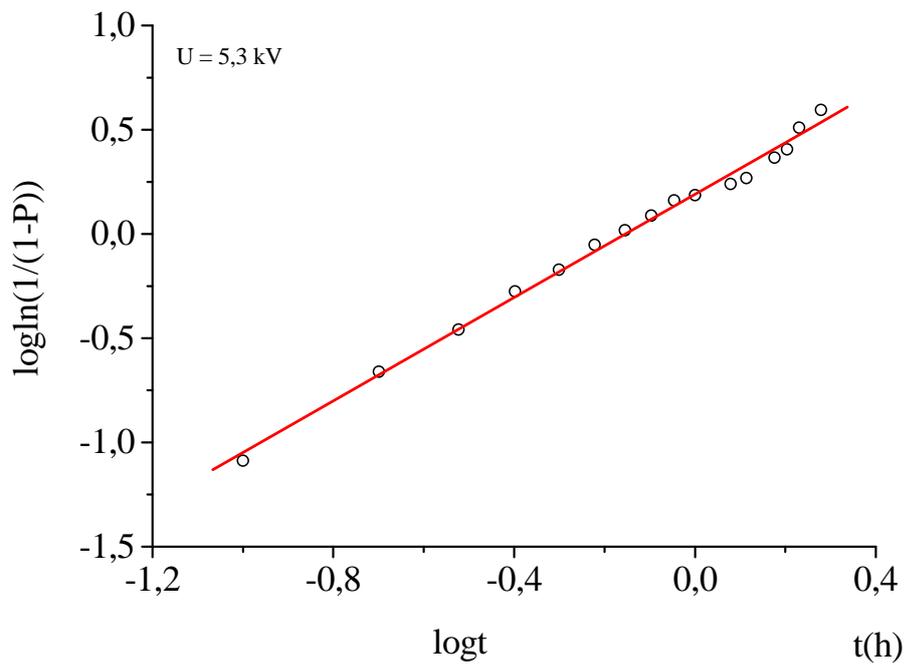


Figure V.32. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,3 kV.

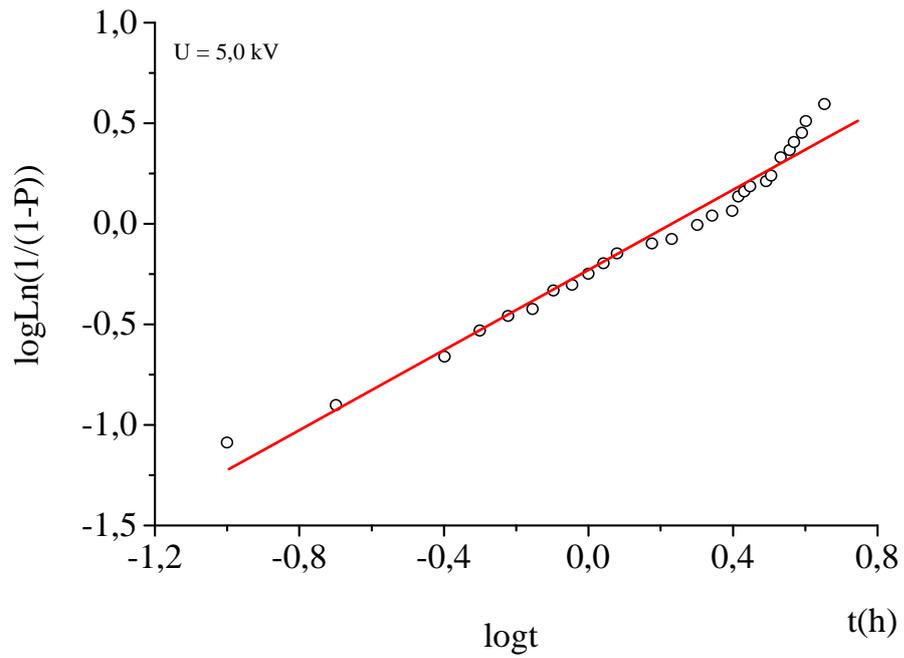


Figure V.33. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 5,0 kV.

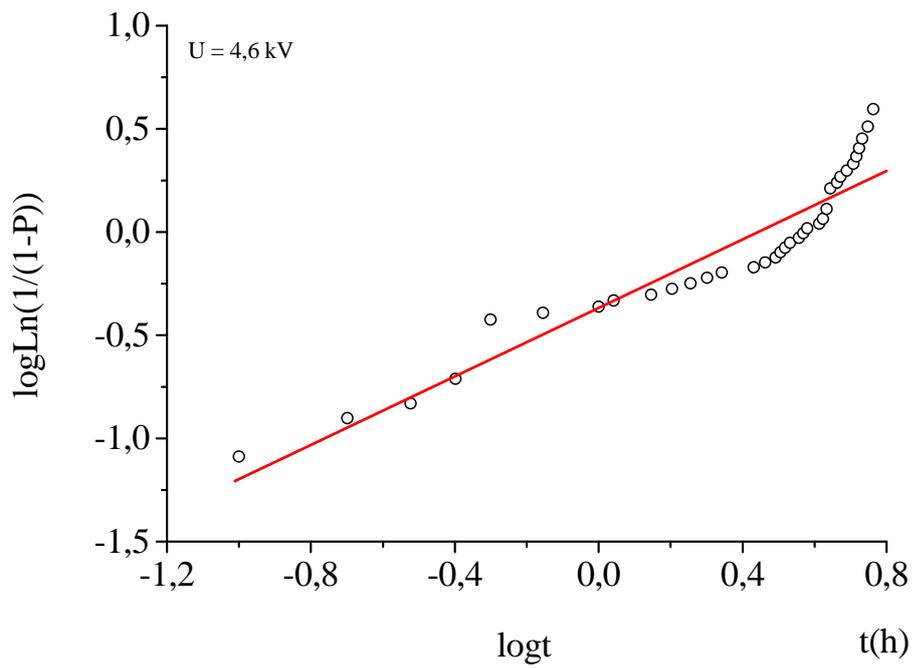


Figure V.34. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 4,6 kV.

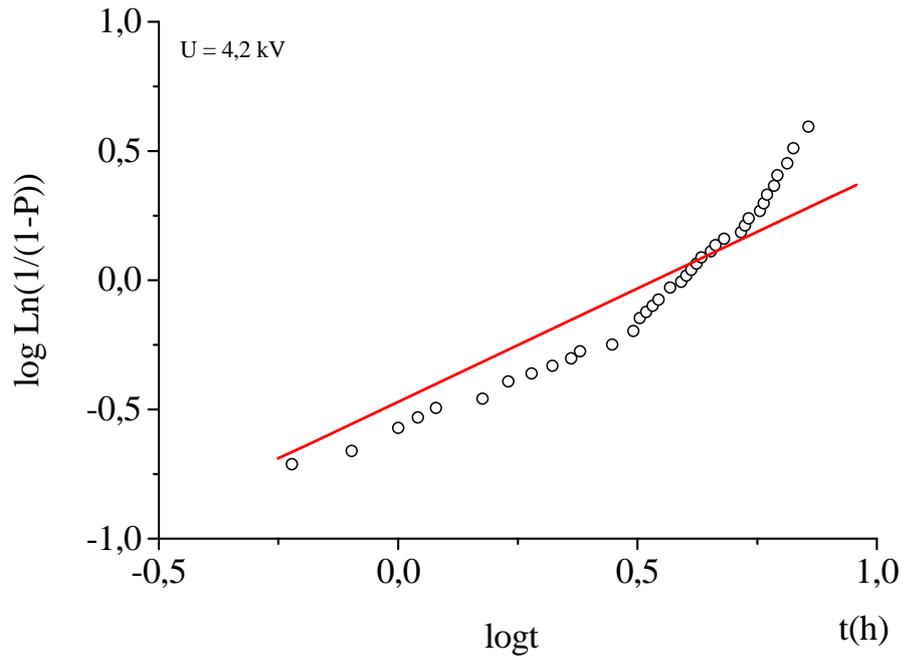


Figure V.35. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 4,2 kV.

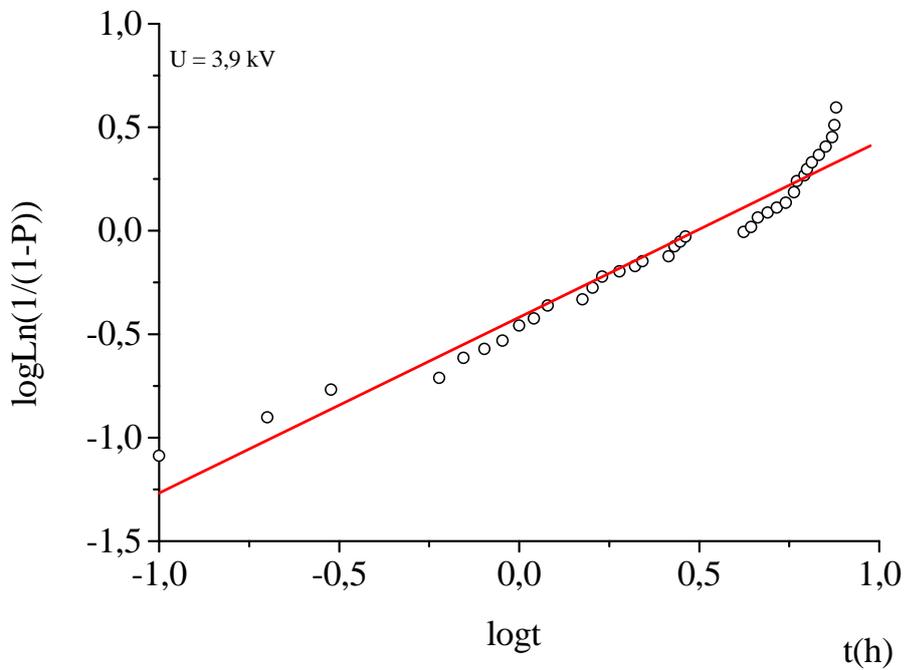


Figure V.36. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 3,9 kV.

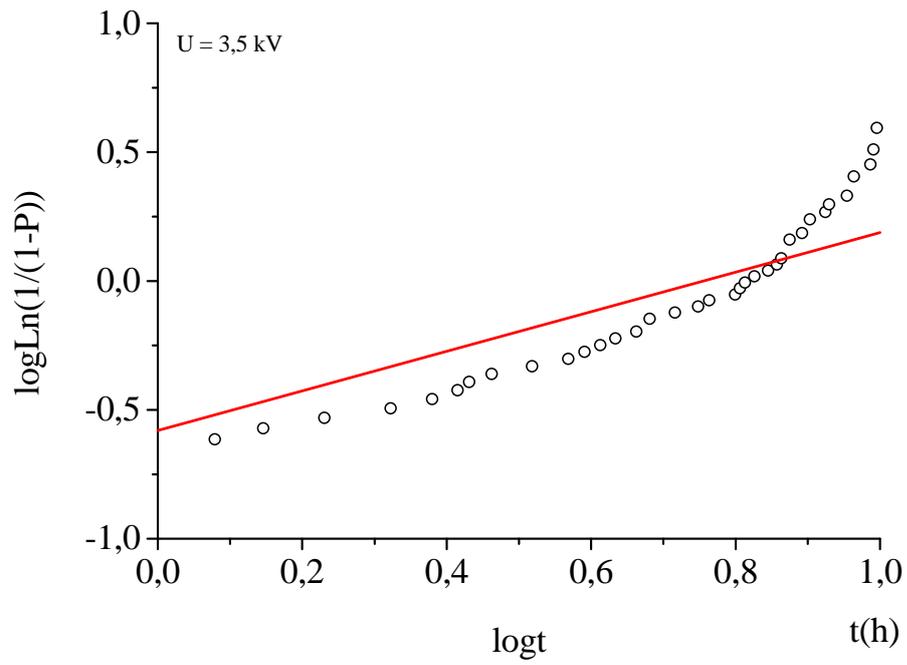


Figure V.37. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 3,5 kV.

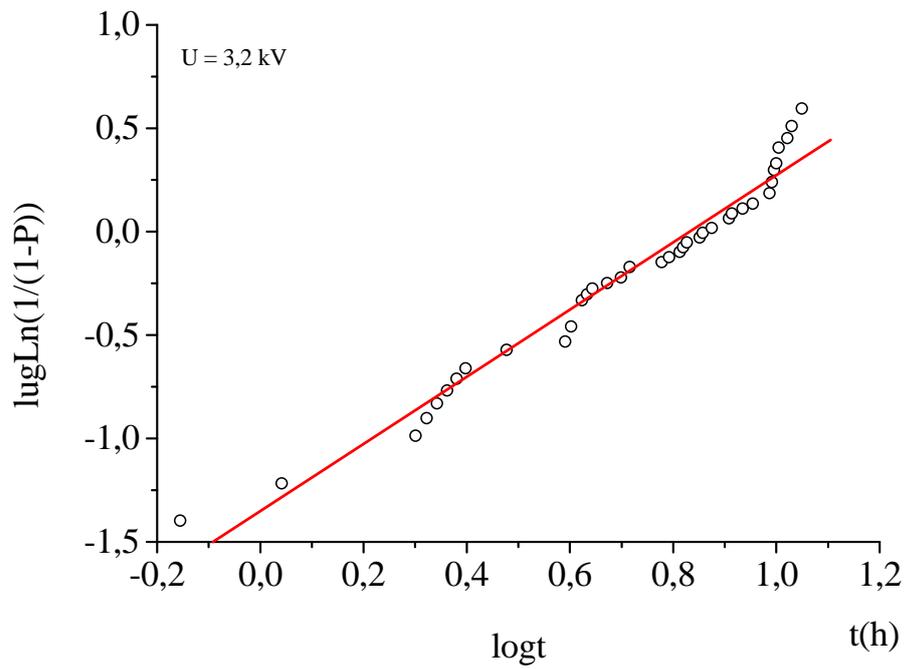


Figure V.38. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 3,2 kV.

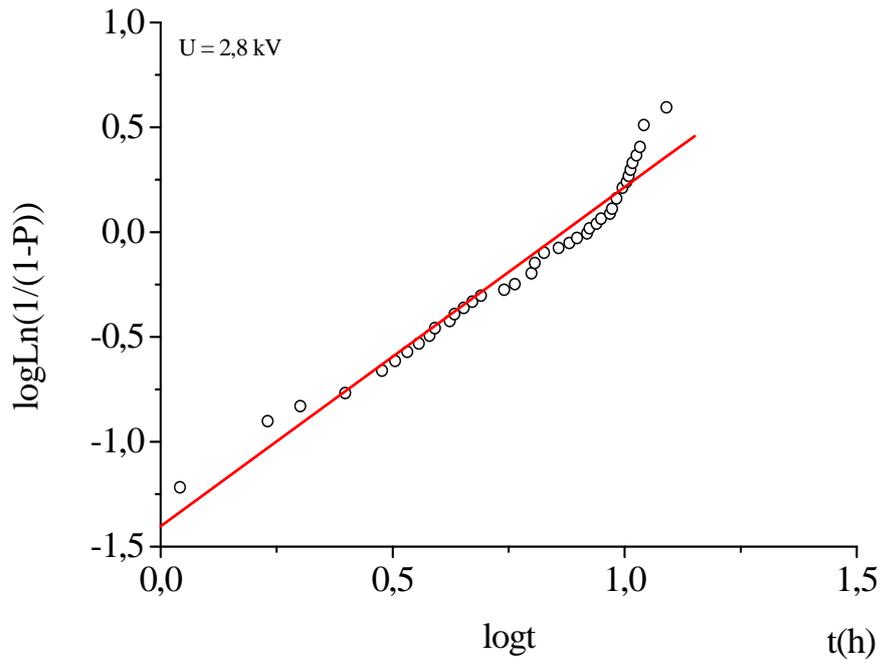


Figure V.39. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 2,8 kV.

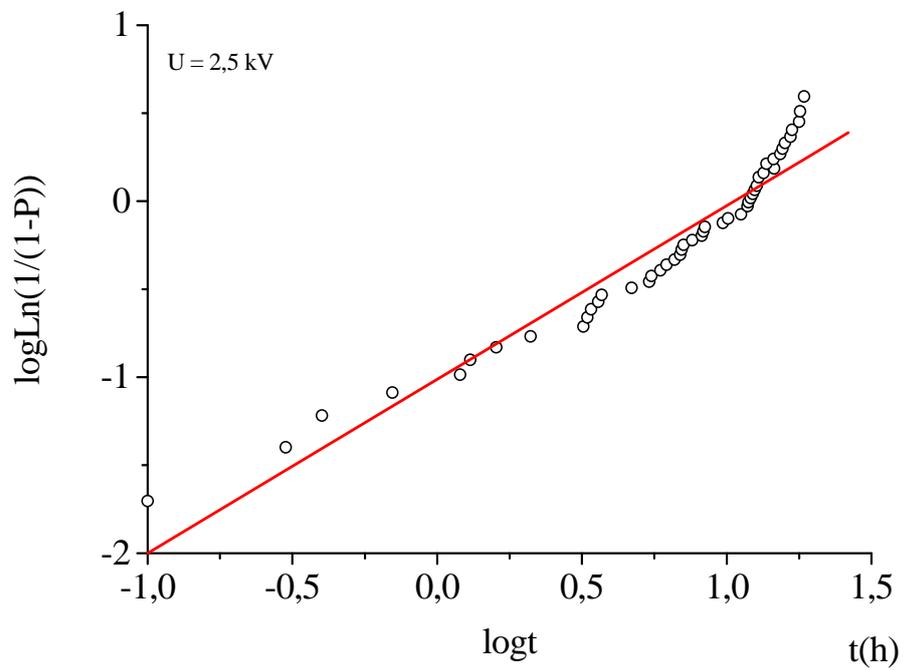


Figure V.40. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 2,5kV.

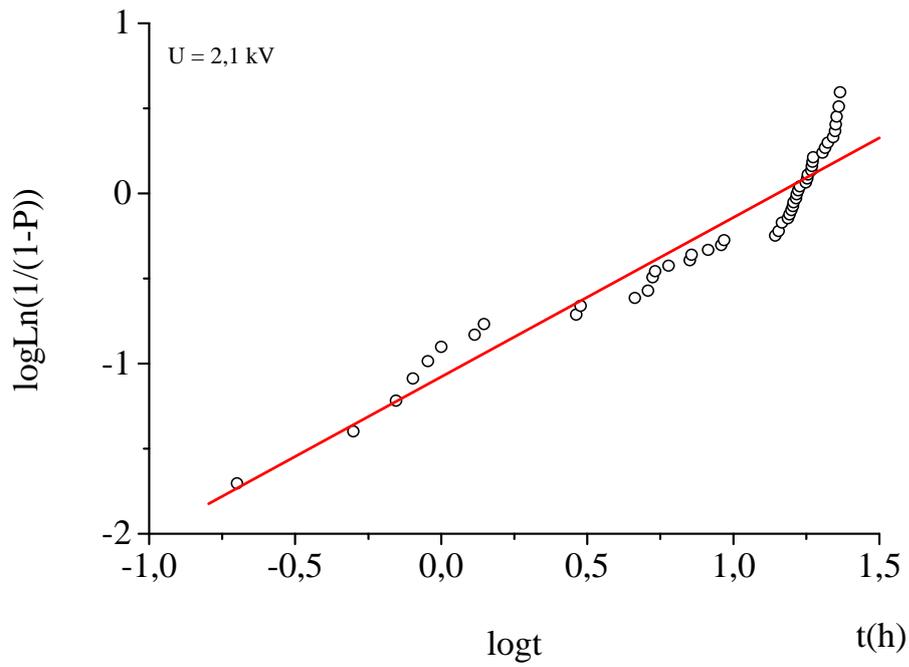


Figure V.41. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 2,1 kV.

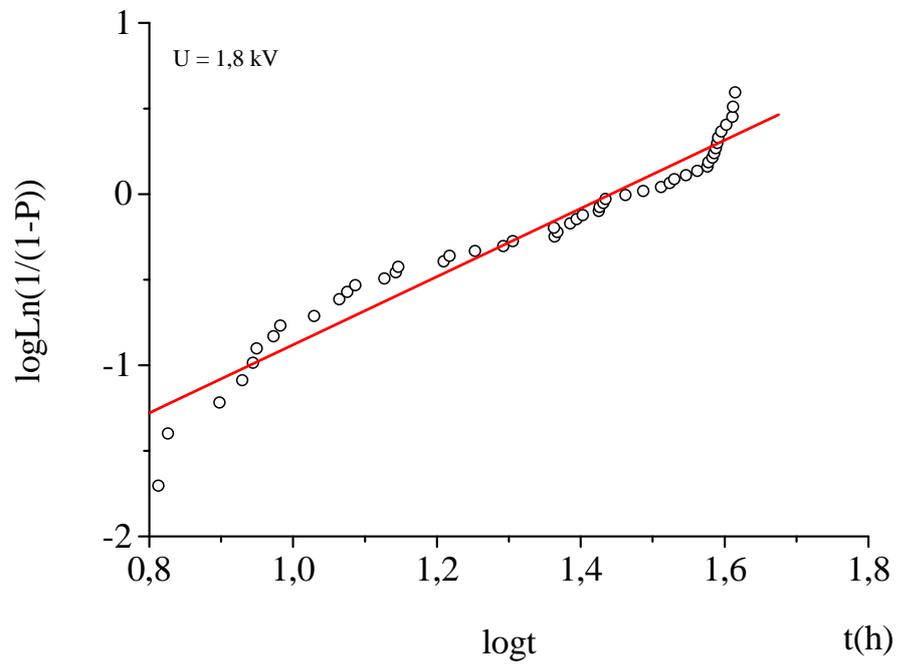


Figure V.42. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 1,8 kV.

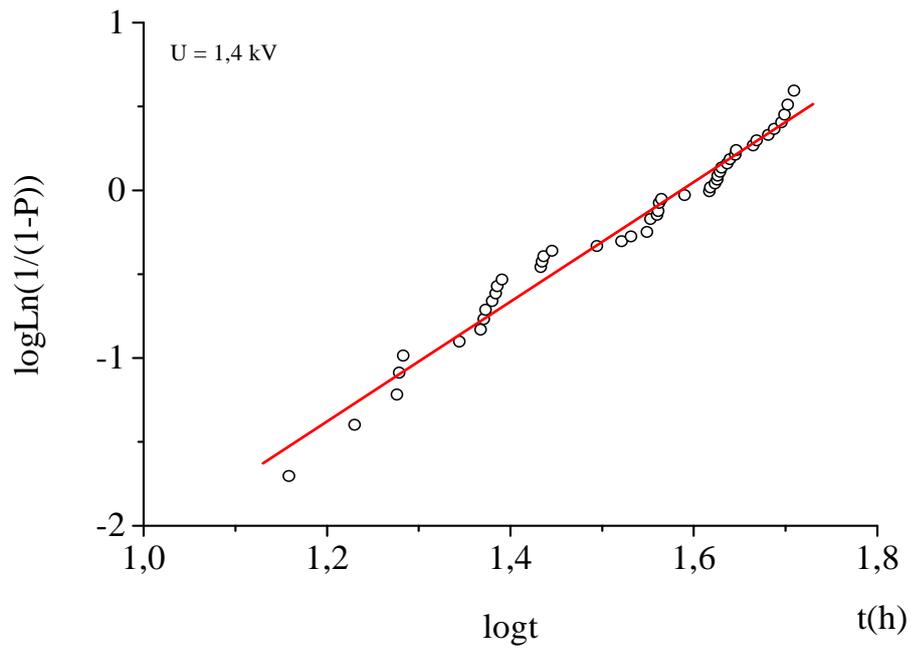


Figure V.43. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 1,4 kV.

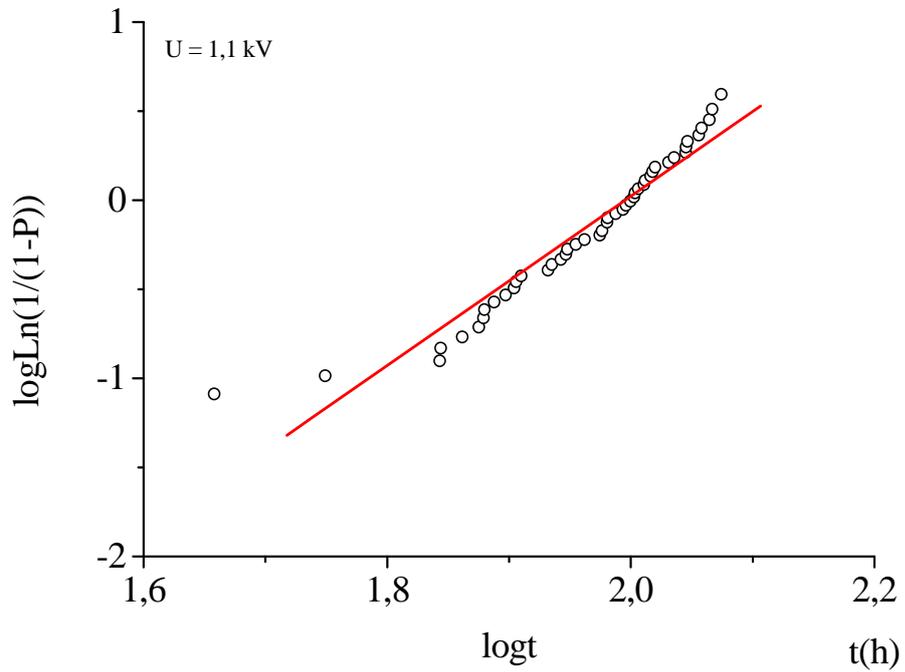


Figure V.44. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 1,1 kV.

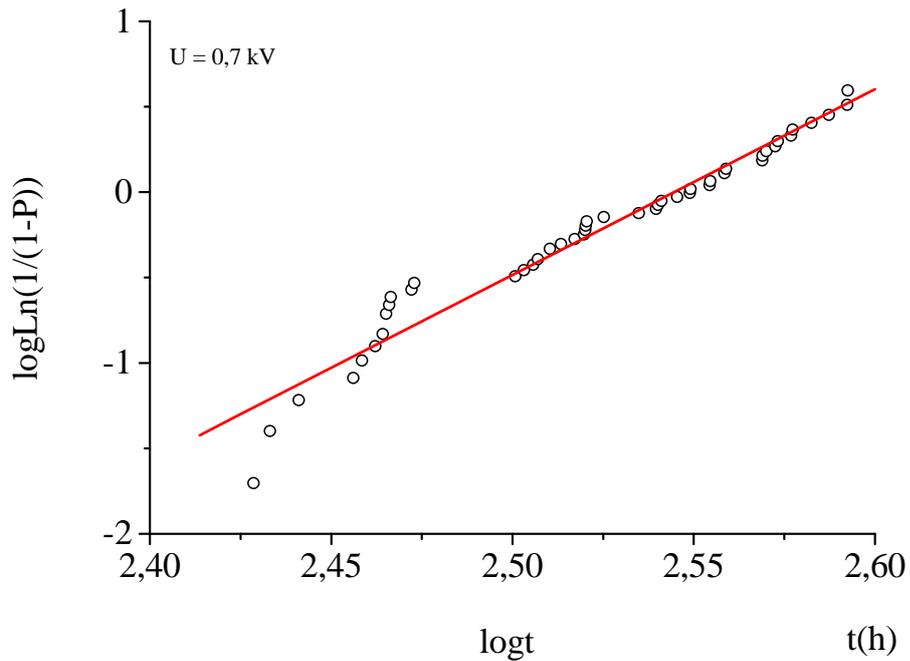


Figure V.45. Diagramme de Weibull du temps de claquage sous une tension de 0,7 kV.

2.2.2. Courbe d'endurance électrique du polymère

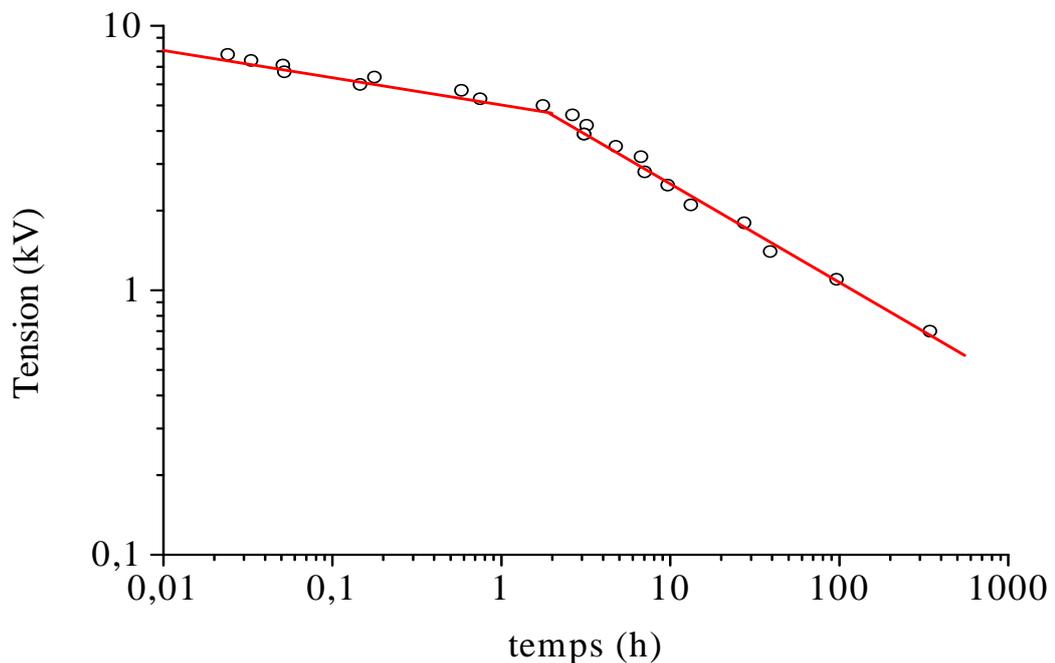


Figure V.46. Courbe d'endurance électrique du polyamide imide.

La figure V.46 représente la courbe de durée de vie du polyamide imide. Cette caractéristique montre deux régions (deux segments de droite). La courbe est décroissante. La première région correspond à des claquages se produisant rapidement dans des sites appelés défauts de jeunesse. La deuxième région correspond au vieillissement réel du matériau.

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 à 2 paramètres dont la distribution des points expérimentaux diffère d'un niveau de tension à un autre. Pour les deux matériaux étudiés qui sont le polyester - imide et le polyamide imide, la courbe d'endurance électrique est décroissante avec la présence de deux segments de droite. La première zone correspond à des claquages qui se produisent rapidement appelés défauts de jeunesse. La deuxième région correspond au vieillissement réel du polymère où plusieurs phénomènes peuvent se produire. L'action des décharges partielles joue un rôle important.

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

- [1] H.H. Nicol, H. Ehrithopher, 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] CEI 317-8, *Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage. Fil de bobinage de section circulaire en cuivre émaillé avec polyester-imide, classe 180*, 1988.
- [10] W.P. Chiang, W.C. Chiang, Condensation polymerization of multifunctional monomers and properties of related polyester resins. Thermal properties of polyesterimide varnishes, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 35, pp. 1433-1439, 1988.
- [11] C. Marais, G. Villoutreix, *Mise en oeuvre et propriétés de la résine polyimide PMR-15*, *Matériaux et Techniques*, 1996.
- [12] M. Nedjar, Investigation in thermal endurance of polyesterimide used in electrical machines, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 121, pp. 2886-2892, 2011.
- [13] M. Nedjar, Y. Mecheri, A. Lamure, M. Aufray, C. Drouet, Effect of moisture on the breakdown voltage of polyesterimide used in electrical machines, 2010 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 74-77, 2010.

- [14] M. Nedjar, S.H. Ould Ouali, Statistical investigation of short-term dielectric breakdown of polyesterimide and polyamide imide used in electrical machines, *Annales de Chimie, Science des Matériaux*, Vol.36 No.2, pp.59-72, 2011.
- [15] J. E. Mark, *Polymer Data Handbook*, Oxford University Press, Inc., 1999.
- [16] G. V. Cekis, *Modern plastics*, Mid-October Encyclopedia issue, 1990.
- [17] R. Coelho, B. Aladenize, *Les diélectriques, propriétés diélectriques des matériaux isolants*, édition Hermes, 1993.
- [18] R. Goffaux, R. Coelho, Sur la rupture filamentaire différée dans les isolants électriques, *Revue Phys. Appliquée*, 17, pp. 55-64, 1982.
- [19] J. Artbauer, Elektrische Festigkeit Von Polymeren, *Kolloid Z. und Z. Polymere*, Vol. 202, pp. 15-25, 1965.
- [20] M. Ieda, Dielectric breakdown process of polymers, *IEEE Trans. on Elect. Insul.*, Vol. EI-15 N°3, pp. 206-224, 1980.
- [21] M. Nedjar, Weibull statistics in the effect of dioctyl phthalate ratio on the polyvinyl chloride properties, *Annales de Chimie, Science des Matériaux*, Vol. 35/3, pp. 81-88, 2010.
- [22] M. Nedjar, Effect of plasticizer ratio on the properties of polyvinyl chloride used in insulation of high voltage cables, 10th International Electrical Insulation Conference (INSUCON) Birmingham, UK, May 2006.
- [23] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, G.C. Stevens, 1992.
- [24] E. Hallen, *Electromagnetic theory*, Chapman and Hall, pp. 35-73, 1962.
- [25] K.H. Stark, G.C. Garton, Electric strength of irradiated polyethylene, *Nature* 176, 60, pp. 1225-1226, 1955.
- [26] C. Laurent, La rupture diélectrique dans les polymères, *RGE*, N°10, pp. 745-755, 1985.
- [27] T. Kubota, N. Yoshifuji, K. Yatsuka, M. Kuno, Y. Inoue, M. Watanabe, Electrical breakdown strength of polyolefin with controlled spherulites, *Proceedings of the International Conference on Properties and Applications of Dielectrics Materials*, pp. 1173 -1176, 1991.

- [28] 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.
- [29] 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, 5-9 September 1983.
- [30] S. Péliissou, H. St-Onge, M.R. Wertheimer, Dielectric breakdown in polyethylene at elevated temperatures, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-19, N°3, pp. 241-244, June 1984.
- [31] J.J. OD'wyer, The theory of dielectric breakdown of solids, Oxford University Press, London, 1964.
- [32] 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.
- [33] J.C. Dubois, Propriétés diélectriques, Techniques de l'ingénieur, A3140, 1990.
- [34] J. Verdu, Vieillissement des plastiques, édition Eyrolles, 1984.
- [35] K. D. Wolter, J.F. Johnson, J. Tanaka, Polymer Degradation and its Measurement, chapter 5, Engineering dielectrics, Vol.II-A, Electrical properties of solid insulating materials: measurement techniques, Editor R. Bartnikas, pp. 313-439, 1987.
- [36] A.K. Jonscher, R. Lacoste, On a cumulative model of dielectric breakdown in solids, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-19, N°6, pp. 567-577, December 1984.
- [37] D.M. Robinson, Dielectric phenomena in high-voltage cables, Chapman and Hall, 1936.
- [38] C. Laurent, C. Mayoux, A. Sergent, Electrical breakdown due to discharges in different types of insulation, IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol. E1-16, N°1, pp. 52-58, February 1981.
- [39] 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.
- [40] J.H. Mason, The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharges, Proc. IEE, 98, pp. 44-59, 1951.
- [41] J.H. Mason, Breakdown of solid dielectrics in divergent fields, Proc. IEE, 102C, 2, pp. 254-263, 1955.

- [42] G. Bahder, C. Katz, J. Lawson, W. Wahlstrom, Electrical and electrochemical treeing effect in polyethylene and cross-linked polyethylene cables, IEEE Trans. PAS-93, pp. 977-987, 1974.
- [43] R. Croxford, Initiation of trees from conducting points or edges in solid insulation, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques , 15.06, 1973.
- [44] G. Bahder, T.W. Dakin, J.H. Lawson, Analyse du claquage par arborescence, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, 15.05, 1974.
- [45] M. Nawata, H. Kawamura, M. Ieda, Voltage and temperature dependence of treeing breakdown in plastic insulators, International Symposium on High Voltage Technology, pp. 428-434, 1972.
- [46] 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.
- [47] R.M. Eichhorn, Treeing in solid extruded electrical insulation, IEEE Trans. on Elect. Insul, Vol. EI-12, N°1, pp. 2-18, February 1976.
- [48] F. Noto, N. Yoshimura, Voltage and frequency dependence of tree growth in polyethylene, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 207-217, 1974.
- [49] F. Noto, N. Yoshimura, Initiation and growth of trees of polymeric dielectric materials, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 274-281, 1973.
- [50] F. Noto, N. Yoshimura, Growth and forms of trees in polyethylene studied using intermittent applied voltages, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 165-170, 1972.
- [51] Y. Shibuya, S. Zoledziowski, J.H. Calderwood, Void formation and electrical breakdown in epoxy resin, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, N°1, pp. 198-207, 1977.
- [52] 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.
- [53] 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.

- [54] 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.
- [55] J.H. Lawson, W. Vahlström, Investigation of insulation deterioration in 15 and 22 kV polyethylene cables removed from service, part II, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-92, pp. 824-835, 1973.
- [56] F.W. Peek, *Dielectric phenomena high in voltage engineering*, MC Graw Hill, 1929.
- [57] *IEEE Guide for the statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data*, ANSI/ IEEE Std. 930, 1987.
- [58] M. Nedjar, A. Bérroual, Electrical aging of polyurethane under AC voltage, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 109, pp. 789-794, 2008.
- [59] M. Nedjar, A. Bérroual, Weibull statistics in electrical aging of polyesterimide under AC voltage, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 116, pp. 1593-1596, 2010.
- [60] M. Nedjar, Z. Oudni, Aging of polyesterimide under AC voltage, *International Conference on Electrotechnics*, Oran, 2009.
- [61] L. Deschamps, C. Caillot, M. Paris, J. Perret, L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles haute tension et très haute tension, *RGE*, N° 5, pp. 343-360, 1983.
- [62] S. Zoledziowski, A. Sierota, Physical and statistical aspects of breakdown characteristics of solid dielectrics, *IEE Dielectric Materials Measurements and Applications*, pp. 84-87, 1992.
- [63] H. Hirose, A method to estimate the lifetime of solid electrical insulation, *IEEE Trans. on Elect. Insul*, Vol. 22, N° 6, pp. 745-753, 1987.
- [64] E. Morice, Quelques problèmes d'estimation relatifs à la loi de Weibull, *Revue de statistique appliquée*, tome 16, N°3, Vol. XVI, pp. 43-63, 1968.
- [65] I. Bazovski, *Fiabilité, théorie et pratique de la sureté de fonctionnement*, Editions Dunod, 1966.
- [66] A. Polard, C. Rivoire, *Fiabilité et statistiques prévisionnelles : la méthode de Weibull*, Editions Eyrolles, 1971.
- [67] G.C. Montanari, G. Pattini, L. Simoni, Long term behaviour of XLPE insulated cable, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.2, pp.596-602, 1987.

- [68] W. Weibull, A statistical distribution of wide applicability, *Journal of applied Mechanics*, Vol.18, pp.293-297, 1951.
- [69] J. Lamon, *Mécanique de la rupture fragile et de l'endommagement, approches statistiques et probabilistes*, Lavoisier, septembre 2007.
- [70] W.D. Wilkens, *Statistical methods for the evaluation of electrical insulating systems*, Chapter 7, *Engineering dielectrics*, Vol. II-B, *Electrical properties of solid insulating materials: measurement techniques*, Editor R. Bartnikas, pp. 491-529, 1987.
- [71] D. François, *Endommagements et rupture de matériaux*, EDP Sciences, Paris, 2004.
- [72] 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.
- [73] 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, Paul Sabatier, Toulouse, 1992.
- [74] J.M. Oudin, Y. Reyroll, H. Thevenon, *Théorie statistique de claquage électrique*, RGE N°4, pp. 430-436, 1968.
- [75] N. Khaleche, A. Boubakeur, A. Ouabdeslam et C.Laurent, *Application de la loi de Weibull aux phénomènes de vieillissement et d'évaluation de la durée de vie du polychlorure de vinyle*, 2^{ème} CEA94, Algérie, Novembre 1994.
- [76] C. Simon, *Champs de seuil et fiabilité des câbles haute tension*, Journées d'Etudes internationales sur les câbles d'énergie à isolant synthétique (JICABLE), pp. 226-232, 1987.
- [77] E. Loudghiri, *Sur la notion de champs de seuil dans la tenue diélectrique aux temps courts des isolants solides*, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1985.
- [78] L.A. Dissado, *Theoretical basis of the dielectric breakdown*, *J. Phys. D Appl. Phys*, Vol. 23, pp. 1582-1591, 1990.
- [79] J.M. Oudin, *Evaluation de la fiabilité de réseaux de câbles isolés à partir d'essais statistiques de claquage sur échantillons. Limites de l'extrapolation et anomalies statistiques possibles*, RGE, tome 80, N°4, pp. 330-334, 1971.

- [80] C. Simon, Recherche de la fiabilité des câbles exposés à des contraintes du gradient électrique, RGE, tome 80, N° 11, pp. 831-836, 1971.
- [81] 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.
- [82] C. Chauvet, C. Laurent, Weibull statistics in short-term dielectric breakdown of thin polyethylene films, IEEE Trans. on Elect. Insul, Vol 28, pp. 18-29, 1993.
- [83] M. Nedjar, Y. Sadaoui, S. Rezgui, F. Namani, Statistique de Weibull dans l'étude de la tenue diélectrique du polyester-imide sous champ alternatif, Algerian Journal of Technology, Série B, Numéro Spécial, pp. 64-67, 2009.
- [84] 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.