

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZO



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE

Présenté par

M. CHAUCHE Farid

Ingénieur d'état en Electrotechnique

En vue de l'obtention du diplôme de

Magister en Electrotechnique

Option : Entraînements Electriques

Thème

**Vieillessement thermique d'une isolation à base de
polyamide imide et de polyester-imide utilisée dans les
machines électriques**

Devant le jury d'examen composé de:

Mr. CHAIBI Rachid, Professeur, UMMTO, Président.

Mr. NEDJAR Mohammed, Professeur, UMMTO, Rapporteur.

Mr. MEGHERBI Mohammed, Professeur, UMMTO, Examineur.

Mr. SADAOUI Youcef, Maître de Conférences (A), UMMTO, Examineur.

Mr. MOUDOUD Mustapha, Maître de Conférences (A), UMMTO, Examineur.

Le 16 mars 2015

Résumé

Ce travail traite le vieillissement thermique d'une isolation à base de polyamide imide et de polyester-imide utilisé dans les machines électriques. Des vieillissements thermiques d'éprouvettes en forme de torsades ont été réalisés à plusieurs températures. La tension de claquage a été étudiée en fonction du temps d'exposition à la contrainte de la chaleur. Une analyse statistique par le modèle de Weibull a été faite. L'étude montre que la courbe de durée de vie de système d'isolation est une droite, en exploitant la courbe l'indice de température du matériau a été déterminé.

Mot-clé : Polyester-imide, Polyamide imide, Vieillissement thermique, Tension de claquage, Durée de vie, Statistique de Weibull.

Remerciements

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

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

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

Je désire aussi remercier M. SADAOUI Youcef, Maître de Conférence (A) à l'UMMTO pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de faire partie de jury d'examen.

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

Mes très vifs remerciements vont à l'égard de M. BELABBAS Farhat, chef du service du laboratoire de physique de l'entreprise Electro-Industrie d'Azazga, pour son aide à la réalisation de mon travail ainsi que tout le personnel au sein de l'entreprise pour son aide et chaleureux accueil.

Enfin, toutes mes attentions vont vers mes parents, ma famille, mes amis....C'est grâce à eux et à leurs soutiens que le me trouvent aujourd'hui honoré de ce titre.

Sommaire

INTRODUCTION	01
CHAPITRE I : EMAUX ISOLANTS	
1. EMAUX DE POLYAMIDE IMIDE.....	03
1.1. Famille chimique.....	03
1.2. Synthèse	03
1.3. Propriétés	04
1.3. Utilisation	04
2. EMAUX DE POLYESTER IMIDES	05
3. EMAUX DE POLYURETHANE	06
3.1. Famille chimique	06
3.2. Propriétés.....	06
4. EMAUX DE POLYIMIDES	07
4.1. Caractéristiques	07
4.2. Propriétés électriques des polyimides	08
4.3. Utilisation	08
5. EMAUX DERIVES DES ACETALS	08
5.1. Caractéristiques.....	08
5.2. Utilisation	08
CHAPITRE II : Vieillessement thermique des émaux isolants	
1. ENDURANCE THERMIQUE DES POLYMERES.....	10
1.1. Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides.....	11
1.2. Choix des températures de vieillissement	13
1.3. Durée de vie.....	13
1.4. Vitesse de dégradation	14
2. PROCESSUS INTERVENANTS DANS LA DEGRADATION DES EMAUX ISOLANTS	15
2.1. Processus chimique intervenant dans la dégradation thermique des polymères	15

2.1.1. Ruptures de chaîne statistique	15
2.1.2. Dépolymérisation.....	16
2.1.3. Oxydation	16
2.1.4. Réticulation	16
2.2. Processus physique intervenant dans la dégradation des polymères	16
2.2.1. Vieillissement sans transfert de masse	17
2.2.1.1 Processus de vieillissement par relaxation de volume ou d'enthalpie	17
2.2.1.2 Post cristallisation	17
2.2.1.3 Relaxation d'orientation	17
2.2.1.4 Choc thermique	18
2.2.2. Vieillissement avec transfert de masse	18
2.2.2.1. Pénétration de solvant.....	18
2.2.2.2. Migration d'adjuvants	18
a)Évaporation	19
b) Extraction.....	19
c) Exsudation	19
3.DEGRADATIONS DES EMAUX ISOLANTS.....	19

CHAPITRE III : Le modèle statistique de Weibull et son application à la rupture diélectrique des isolants solides

1. MODELE STATISTIQUE DE WEIBULL	24
1.1. Bases du modèle.....	24
1.2. Modèle à deux paramètres.....	26
1.3 Modèle à trois paramètres	26
1.4. Signification des paramètres.....	27
1.4.1. Paramètre d'échelle X_0	27
1.4.2. Paramètre de forme α	27
1.4.3. Paramètre de localisation X_s	28
2. AVANTAGES DE LA LOI DE WEIBULL	28
3. APPLICATION DU MODELE DE WEIBULL A L'ETUDE DE LA TENUE DIELECTRIQUE DES ISOLANTS SOLIDE.....	28

3.1. Tenue diélectrique à long terme	29
3.2. Tenue diélectrique électrique à court terme	29
CHAPIRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION	
1. PREPARATION DES ECHANTILLONS	31
2. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX.....	33
2.1. Vieillessement thermique	33
2.2 Conditionnement des éprouvettes	35
2.3. Essais de claquage	35
3. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES.....	36
3.1. Calcul des probabilités de rupture	37
3.2. Lissage des points expérimentaux	37
3.3. Détermination des facteurs d'échelle et de forme	38
4. RESULTATS ET DISCUSSION	38
4.1. Diagramme de Weibull à deux paramètres	38
4.2. Variation de la tension nominale de claquage en fonction du temps de vieillissement...53	
4.3. Variation du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement	54
4.4. Courbe d'endurance thermique du matériau.....	55
5. DISCUSSION ET ESSAI D'INTERPRETATION	56
CONCLUSION	58
BIBLIOGRAPHIE	60

Introduction

Depuis la deuxième guerre mondiale, l'industrie chimique produit une grande variété de polymères synthétiques dont certains ont rapidement conquis le domaine de l'isolation électrique en raison de leurs propriétés physico-chimiques intéressantes, de leur facilité de mise en forme et d'autres avantages technico-économiques. Leur utilisation dans des systèmes, allant du composant de microélectronique au domaine de la haute tension en passant par l'électronique de puissance et les machines électriques, a joué un rôle prépondérant dans les progrès faits pour le matériel électrique.

Malgré leurs nombreux avantages qui leur ont permis de se substituer à la plupart des matériaux traditionnels comme le papier imprégné d'huile, ces matériaux se dégradent, à long terme, suite à un vieillissement thermique. La dégradation thermique, se traduisant par une évolution lente et irréversible de leurs propriétés, peut conduire à la diminution de la durée de vie des systèmes électriques où ils sont utilisés.

Les essais d'endurance thermique ont pour objet d'évaluer la durée de vie de matériels électriques. On étudie les changements de leurs propriétés suite à une exposition prolongée à la chaleur. L'estimation de la durée de vie est indispensable pour les fabricants et les utilisateurs de matériels tels que les câbles électriques, les machines électriques, les condensateurs, ... etc. L'analyse des mécanismes de dégradation est nécessaire afin d'augmenter la fiabilité des dispositifs électriques, par exemple on peut renforcer la formulation d'un polymère en ajoutant un anti-oxydant.

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. Le claquage des émaux est, dans une large mesure, la cause principale de la défaillance de machines électriques. Il correspond au passage d'un arc électrique dans le volume de l'isolant entre une partie sous tension et une autre.

Ce travail traite l'effet du vieillissement thermique sur la tension de claquage d'un émail à base de polyester - imide et de polyamide imide. Les essais de vieillissement ont été effectués au Laboratoire de Génie Electrique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Quant aux expériences de rupture diélectrique, elles ont été réalisées au Laboratoire de Physique de l'Entreprise Electro - Industries sise à Azazga. Le mémoire est divisé en deux

parties : une partie bibliographique composée des chapitres 1, 2, 3 et une deuxième concernant les essais, les résultats obtenus et leur discussion qui fera l'objet d'un quatrième chapitre.

Dans le premier chapitre, nous présentons les émaux isolants les plus utilisés: polyester-imide, polyamide imide et polyuréthane. Sont présentées leurs formules chimiques, propriétés, utilisation... etc.

Le deuxième chapitre est consacré à la description de la méthode de vieillissement thermique des isolants solides : températures des étuves, choix d'une propriété ainsi que la détermination de la courbe d'endurance thermique et de l'indice de température. Les mécanismes physico-chimiques intervenants lors de la dégradation thermique seront également exposés.

Le troisième chapitre est réservé au modèle statistique de Weibull et son application à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides.

Le chapitre quatre décrit les techniques expérimentales concernant la réalisation des éprouvettes, le vieillissement des échantillons et les essais de claquage. Une analyse statistique des valeurs de la tension de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres. L'exploitation des résultats statistiques permet de déterminer la courbe de durée de vie. Une interprétation et une discussion des résultats obtenus ont été exposées.

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

Chapitre 1

Emaux isolants

Dans ce chapitre, nous présentons les émaux les plus utilisés dans l'isolation de bobinages de machines électriques.

1. EMAUX DE POLYAMIDE IMIDE

1.1. Famille chimique

La formule chimique du polyamide imide est la suivante [1] :

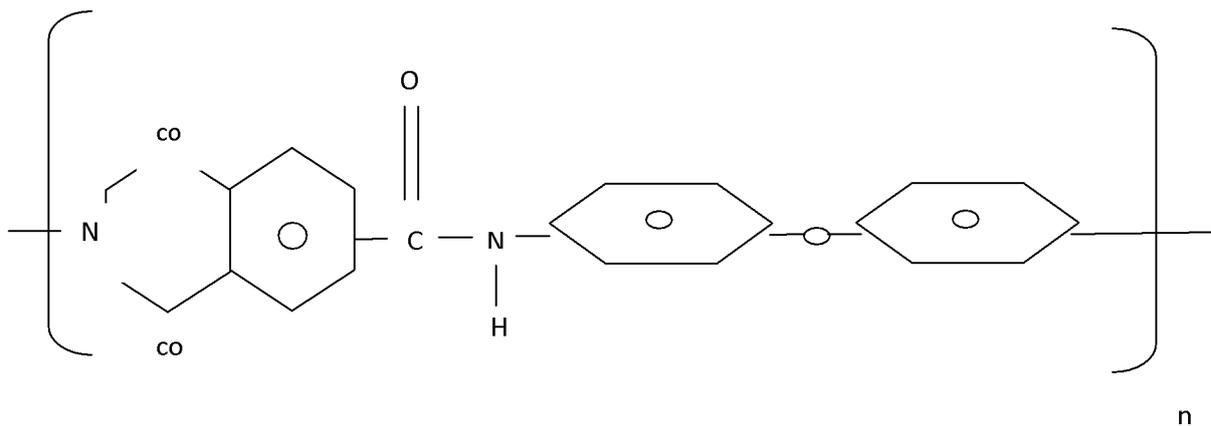


Figure 1 : Formule chimique de polyamide imide.

1.2. Synthèse

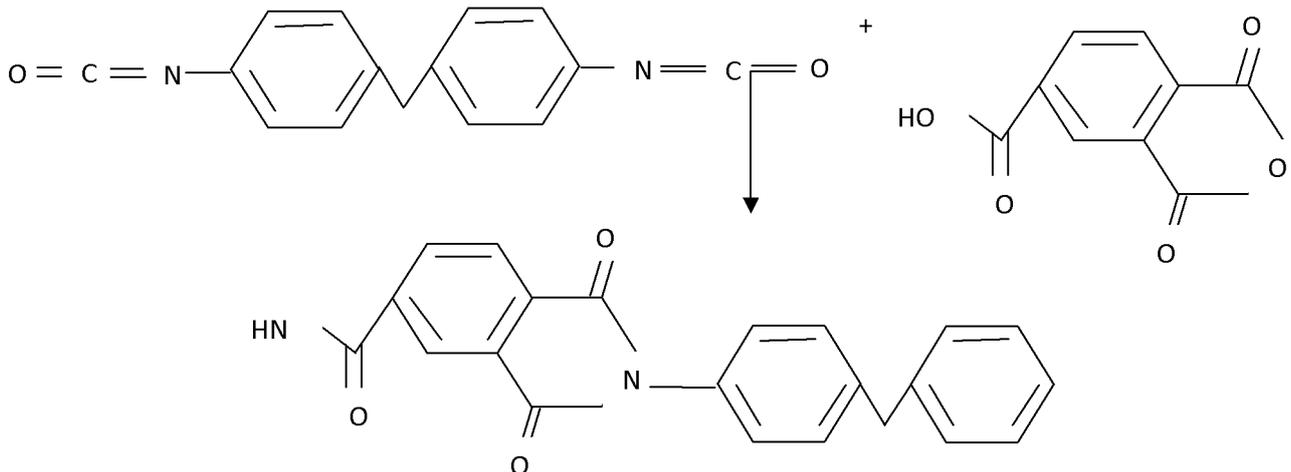


Figure 2 : Schéma de la réaction de la synthèse de polyamide imide.

Les polyamides imides sont le produit de la réaction d'un di-isocyanate comme le di-phénylméthane di-isocyanate sur l'anhydride trimellitique [2]. La réaction est conduite en

réacteur dans un solvant, le N-méthyl-pyrrolidone et s'accompagne d'un dégagement de CO₂. La figure 2 montre la synthèse du polyamide imide.

1.3. Propriétés

Les polyamide imides sont des polymères hautement performants, amorphes et de haute stabilité thermique. Ils ont d'excellentes propriétés à température élevée, une bonne résistance aux radiations et à l'usure mais restent très onéreux et sont attaqués par les alcalis [2]. Les polyamide imides se distinguent par leur tenue à de nombreux agents chimiques et leurs bonnes propriétés de glissement.

Les propriétés physiques des polyamides imides (PAI) sont :

- Classe thermique : 220°C.
- Thermo-plasticité : 400°C.
- Densité : 1,380 g/cm³ [3].
- Conductivité thermique : 0,24 W m⁻¹K⁻¹[3].

Les propriétés mécaniques sont :

- Résistance à la traction à 23°C : 117 MPa [3].
- Allongement à la rupture à 23°C : 10% à 18% [1, 3].
- Module d'Young à 23°C : 5,2 MPa [1,3].

Les propriétés électriques des PAI sont [4] :

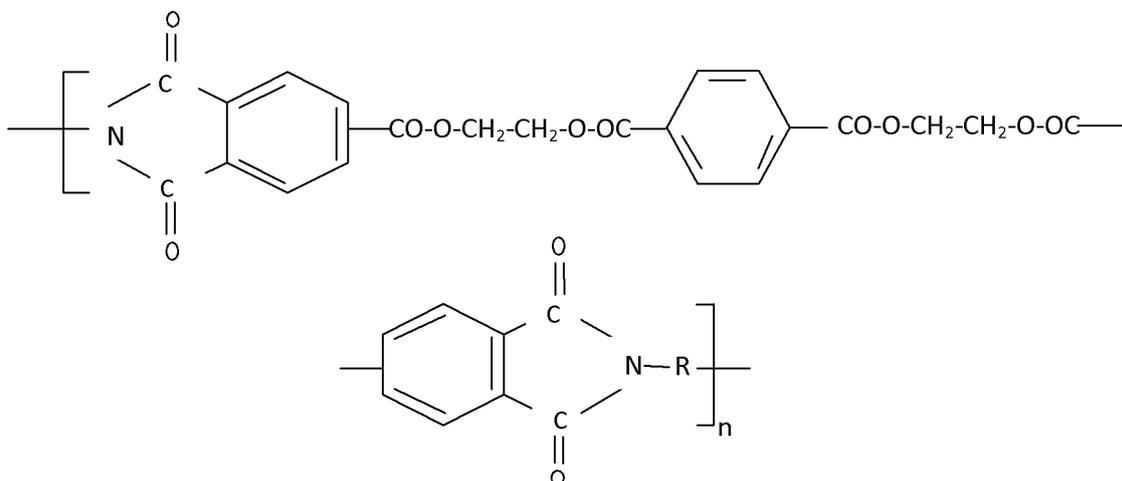
- Résistivité transversale : 3.10¹³ Ω cm.
- Résistivité superficielle : supérieure à 10¹⁷ Ω.
- Constante diélectrique à 106 Hz : 4.
- Facteur de dissipation à 106 Hz égal à 9.10⁻³.

1.4. Utilisation

Les polyamide imides sont utilisés dans l'industrie de l'automobile et dans les bobinages de machines électriques [4]. Ils sont également employés dans de groupes frigorifiques pour leur excellente tenue aux réfrigérants (dérivés fluorés) [5]. Dans le domaine de l'isolation de bobinages de machines électriques, les polyamides imides sont généralement utilisés en surcouches sur des polyesters ou polyester imides pour obtenir des fils de classe 200°C avec une thermo-plasticité de 340°C pour des diamètres allant de 0,1 jusqu'à 0,5 mm [2,5].

II. EMAUX DE POLYESTER IMIDES

Les émaux de polyester-imide sont obtenus avec des vernis de polyester modifiés par des groupes imides, et souvent, en plus, par des groupes isocyanurates [5]. La formule chimique des polyester-imides est la suivante [6].



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

Figure 4 : Formule chimique de polyester-imide.

1.5. Caractéristiques

Les polyester-imides sont caractérisés essentiellement par leur performance thermique et leur grande résistance chimique, y compris la tenue aux réfrigérants [5]. Les applications des émaux de polyester-imides concernent une grande gamme de fil de sections circulaires ou rectangulaires de toutes dimensions pour des utilisations très étendues aussi bien en électronique qu'en électrotechnique. Les caractéristiques dimensionnelles sont basées sur l'emploi de grades définissant les différentes épaisseurs dans l'ordre croissant (1, 2, 3) [7]. Les polyester-imides sont surtout utilisés comme émaux pour fils résistants à la température [6]. Des agents de réticulation sont employés et permettent d'obtenir des polyester-imides avec une structure tridimensionnelle semblable à celle des thermodurcissables [8,9].

Des expériences d'endurance thermique ont été réalisées sur des éprouvettes de fils de cuivre émaillés au polyester-imide de classe H (180°C) [10]. Les échantillons sont des torsades de 125 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 vieillissement.

- Un indice de température de 182°C.
- Une énergie d'activation de 24,31 kcal/mol.

Des essais de vieillissement hydrolytique du polyester-imide ont montré une bonne résistance du matériau à l'action de l'humidité [11]. La tension de claquage dépend de la vitesse de la rampe de tension [12].

3. EMAUX DE POLYURETHANNE

3.1. Famille chimique

Les polyuréthannes sont obtenus par la réaction d'un di-isocyanate avec un di-alcool [13]. On obtient ainsi un polymère en chaîne de caractère thermoplastique. Les propriétés de ces émaux dépendent des produits de départ, très variés, et des produits de réticulation employés.

Différents agents de réticulation sont utilisés [14]. Le niveau de réticulation peut être varié dans de larges proportions, avec la conséquence que cela comporte concernant la dureté du matériau [15]. Pour les différents procédés de mise en œuvre, on peut consulter les travaux de Bost, Bhandger, Trotignon et al, et Baulé [13, 16-18].

De façon générale les polyuréthannes thermoplastiques répondent à la formule chimique suivante [16-18] :

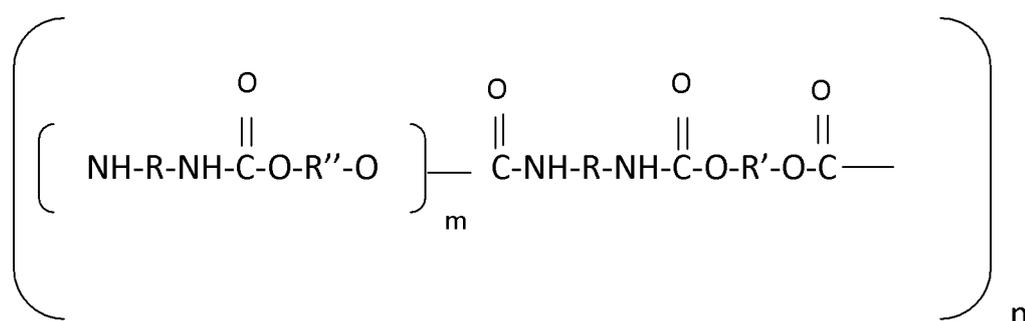


Figure 4 : Formule chimique de polyuréthane.

3.2. Propriétés

Les polyuréthannes possèdent des propriétés diélectriques très moyennes, insuffisantes en haute tension et haute fréquence [15]. Pour un polymère chargé, les propriétés électriques à la fréquence de 50 Hz sont [19] :

- Facteur de pertes diélectriques : $1,5 \cdot 10^{-2}$.
- Permittivité relative : 6,7 à 7,5.
- Rigidité diélectrique : 15 à 20 kV/mm.
- Résistivité transversale : $2 \cdot 10^{14}$ à $3 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$.

La caractéristique principale des polyuréthanes est surtout leur soudabilité, c'est-à-dire la possibilité d'être soudés sans dénudage préalable [5]. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes, en particulier, la résistance à l'usure, au vieillissement et aux huiles [15]. Leur durée conventionnelle sous contrainte thermique est supérieure à 20 000 h à des températures comprises entre 130 à 150°C tandis que leur résistance est moyenne aux réfrigérants et bonne aux diélectriques chlorés [1].

4. EMAUX DE POLYIMIDES

Les polyimides sont obtenus en deux étapes par polycondensation d'un dianhydride et d'une diamine. Le chauffage au-dessus de 300°C provoque l'élimination du solvant et de l'eau de la polycondensation [20].

4.1. Caractéristiques

Ces émaux sont caractérisés essentiellement par leur bonne tenue à la température (jusqu'à 240°C), une thermo-plasticité également très élevée et une tenue excellente aux chocs thermiques.

Le Kapton est un polymère de la famille du polyimide, C'est plus précisément un PolyPyroMellitimide DiAnhydride OxyDianiline. Sa température de transition vitreuse est élevée supérieure (à 360° C) [21] Sa perte de poids s'amorce à 500°C. En présence de températures supérieures, il y a carbonisation mais le polymère ne brûle pas. C'est pourquoi, il est utilisé dans des isolations dites hautes températures. C'est un polymère peu cristallin (5%). Après recuit pendant 24 heures à 240°C, son taux de cristallinité passe à environ 9% [2].

4.2. Propriétés électriques des polyimides

Les propriétés électriques des polyimides sont :

- La permittivité relative décroît progressivement de 3,5 à la température ambiante jusqu'à 3 à 260° C [20].
- Le facteur de pertes diélectrique dépend de la température et de la fréquence. Jusqu'à 100°C, il croît avec la fréquence, tandis qu'au-delà de 200°C, il diminue quand elle augmente. De 100 à 200° C, ce facteur de pertes, indépendant de la fréquence, est environ égal à 0,0015 [20].
- La résistivité transversale a pour valeur $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ à la température ambiante et décroît linéairement jusqu'à $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ à 300°C [20].
- La rigidité diélectrique des polyimides est de 20 kV /mm [22]. Le champ de rupture devient maximum pour des recuits supérieurs à 300° C [23].

4.3. Utilisation

Grâce à leurs bonnes propriétés diélectriques et à leurs tenues mécanique, thermique et aux radiations ionisantes, les polyimides non chargés conviennent pour les applications électriques dans des conditions difficiles. Compte tenu de leur prix, environ trente fois au dessus du prix des polyamides [20], les fils émaillés de ce type seront réservés à des applications spéciales pour un fonctionnement à très hautes températures [5].

5. EMAUX DERIVES DES ACETALS

Parmi ces dérivées, les formals polyvinyliques ont occupé une place de choix en raison de leur universalité d'emploi. Produit de la réaction entre l'aldéhyde formique et l'alcool polyvinylique, ils sont obtenus, entre autres procédés, à partir de l'acétate de polyvinyle dissous dans le milieu alcoolique et hydrolysé en milieu acide fort [5].

5.1. Caractéristiques

- Ils ont de très bonnes propriétés mécaniques. Leurs propriétés électriques, excellentes à l'état sec, restent satisfaisantes après immersion dans l'eau ou séjour en atmosphère humide [5].
- Leur résistance au vieillissement thermique, à l'air libre, est assez élevée. La durée de vie des fils émaillés non imprégnés de 0,8 mm de diamètre, à la

température de 120°C, est de l'ordre de 20 000 h. Cette durée de vie peut être, toutefois, augmentée dans le cas d'une association avec un vernis d'imprégnation approprié.

- Leur tenue à l'humidité et aux agents chimiques d'agression est bonne ; leur résistance aux diélectriques chlorés est moyenne.

5.2. Utilisation

Ces émaux sont utilisés en association avec des agents de modification tels que les isocyanates, formophénoliques, mélamines, en particulier, l'association avec des résines isocyanates permet d'obtenir des émaux ayant une bonne résistance aux réfrigérants ou des propriétés électriques améliorées [5].

Ces émaux dont l'indice thermique variant de 105° C à 120° C ont connu un grand développement en raison de leurs performances mécaniques, ne sont plus guère utilisés que pour les transformateurs dans l'huile minérale en raison de leur très bonne tenue à l'hydrolyse. Pour les autres applications, ils ont été remplacés par des émaux d'indices de température plus élevés [5].

Chapitre II

Vieillissement thermique des émaux isolants

Ce chapitre concerne le vieillissement thermique des polymères isolants et les mécanismes conduisant à leur dégradation. On peut appeler vieillissement toute altération lente et irréversible d'une ou plusieurs propriétés d'un matériau exposé aux contraintes de service et de l'environnement [24-27].

Dans le domaine de l'isolation électrique, la contrainte thermique constitue une contrainte sévère de service pouvant affecter sérieusement les propriétés du matériau polymère en les dégradant et réduisant ainsi la durée de vie des câbles et appareils électriques [29]. Il est donc indispensable de définir des températures maximales admissibles en services continus pour les divers matériaux isolants, de telle façon que les dégradations subies au cours de leur utilisation n'affectent pas leurs performances à un trop haut degré. La prise en compte de la contrainte thermique lors de la conception d'un système d'isolation a pour objet de définir les matériaux devant supporter les températures de fonctionnement et qui se dégradent le moins possible au cours de leur utilisation.

Le vieillissement des matériaux, dans leurs conditions réelles d'utilisation, est caractérisé par des cinétiques de dégradation lentes. Le recours à des essais accélérés est donc une nécessité pour évaluer et quantifier le vieillissement en laboratoire. Le choix de l'essai accéléré est une étape qui conditionne la qualité et la pertinence des résultats de l'étude [24].

Les mécanismes intervenants dans le vieillissement thermique des polymères peuvent être classés en deux catégories : le vieillissement physique et le vieillissement chimique. Dans le premier cas, il n'y a pas altération de la structure chimique des macromolécules, seule la configuration spatiale du matériau est affectée, dans le deuxième cas, il y a modification de la structure chimique des macromolécules [26]. Aux basses températures, il est généralement admis que le mécanisme physique intervient après des premiers stades de dégradation thermique, le processus chimique apparaît aux temps prolongés de vieillissement. À températures élevées, les effets du vieillissement thermique sont généralement attribués aux changements de la structure chimique de macromolécule.

1. ENDURANCE THERMIQUE DES POLYMERES

Certains auteurs comme Fallou [29] et Moriane [30] se sont intéressés à l'étude de l'endurance thermique des polymères. La caractéristique du vieillissement ou la stabilité à

long terme des isolants solides doit permettre à répondre à l'une des questions suivantes :

- Pendant quel temps t peut-on maintenir un matériau isolant sous contrainte C_0 ?
- Si l'on désire une durée de maintien ou durée de vie donnée t_0 , quelle contrainte maximale sera autorisée ?

La contrainte peut être la température, la tension ou le champ électrique. La figure II-1 montre la variation de la durée d'un matériau en fonction de la contrainte appliquée.

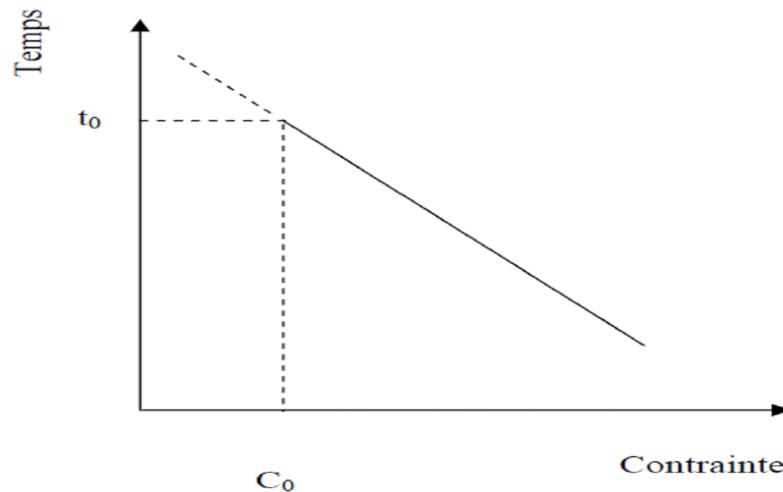


Figure II.1 : Durée de vie en fonction de la contrainte appliquée [29].

1.1. Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides

Les travaux relatifs à l'endurance thermique de matériaux isolants solides ont pour objet la mise au point de méthodes générales de détermination de leur stabilité. Le but de ses essais est de simplifier les résultats et de les exploiter sous formes d'indice de température attribuées aux matériaux pour leurs propriétés mécaniques d'une part et pour leurs propriétés électriques d'autre part [31].

Généralement on détermine les variations d'une propriété du matériau en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ de la contrainte appliquée.

Si l'on fixe une valeur de la propriété P_0 choisie en fonction des critères d'emploi, on obtient la relation $C(t)$ relative à la propriété P_0 . Cette courbe est appelée courbe du durée de vie. La propriété peut être électrique, (rigidité diélectrique par exemple) ou une propriété mécanique (charge à la rupture).

En ce qui concerne les essais de vieillissement thermique, on soumet les matériaux à l'action prolongée de la chaleur puis on détermine l'évolution d'une ou de plusieurs de leurs propriétés en fonction du temps, ce qui permet de tracer les caractéristiques $P=f(t)$ donnée à figure II.2

Le choix d'une valeur limite de la propriété P_0 permet de déterminer les temps pour lesquels cette limite est atteinte ou durée de vie et ceci pour plusieurs températures de vieillissement. En répétant les essais, on peut tracer la courbe d'endurance thermique $t=f(T)$, comme le montre la figure II. 3

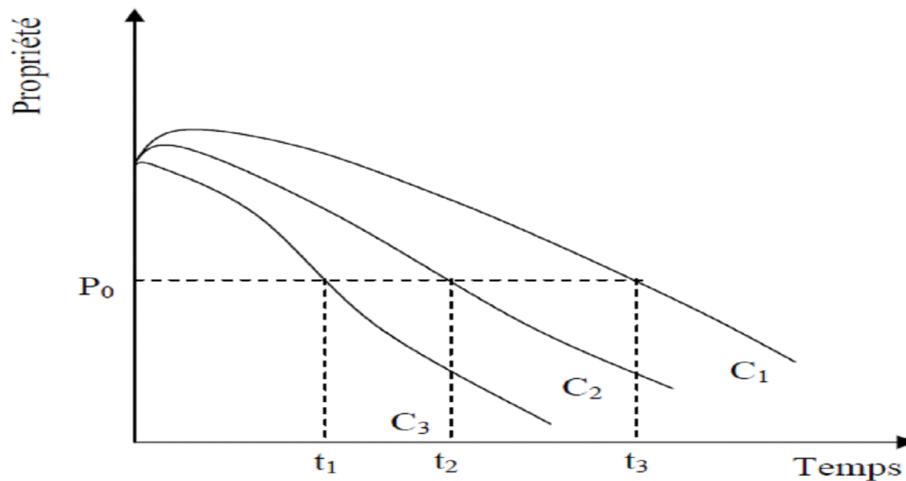


Figure II.2 : Variation de P en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures T [32].

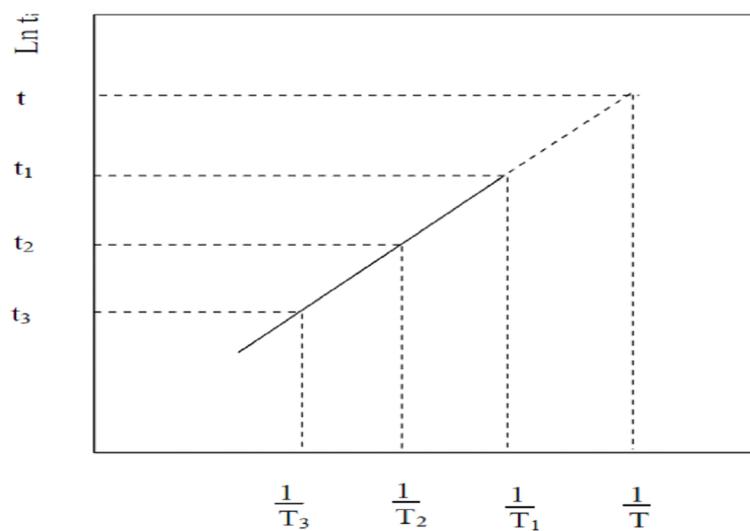


Figure II.3 : Variation de $\log(t)$ en fonction de l'inverse de la température absolue T [32].

Généralement on s'intéresse à l'indice de la température qui est, par définition, le nombre égal à la température exprimée en degré Celsius qui correspond, sur le graphique de l'endurance thermique, à un temps normalement égal à 20 000 heures. Certains chercheurs font des vieillissements très accélérés correspondant à un temps de 500 heures au lieu de 5000 heures soit une division par 10 [29].

1.2. Choix des températures de vieillissement

La norme 216-1 de la Commission Electrotechnique Internationale [33] fixe un minimum de 3 températures différant chacune de la plus voisine de 20° C telles que le critère de dégradation soit atteint :

- En un temps inférieur à 100 heures pour la température la plus élevée.
- En un temps inférieur à 5000 heures pour la température la plus basse.

1.3. Durée de vie

L'effet de la température sur les isolants électriques a été examiné en 1930 par Montsinger qui a présenté une formule empirique décrivant la réduction de la durée de vie pour un accroissement de 8°C de la température du papier utilisé comme isolant dans les transformateurs [34].

La durée de vie est le temps nécessaire pour qu'une propriété techniquement importante atteigne une valeur limite telle que le matériel puisse encore fonctionner de façon satisfaisante [35]. La durée de vie t d'un matériau isolant solide en fonction de la température de vieillissement est donnée par une relation de type Arrhenius [36] :

$$\ln t = A + \frac{E}{RT} \quad (1)$$

avec :

A : constante caractéristique du matériau,

R : constante des gaz parfait,

T : Température absolue,

E : Energie d'activation du phénomène.

D'autres auteurs [38,39] ont proposé une relation analogue à (1) :

$$t = C \exp(B/T) \quad (2)$$

avec :

C, B : constantes caractéristiques du matériau,

T : Température absolue,

t : durée de vie d'un matériau soumis à la contrainte de la température.

La caractéristique $\ln(t)$ en fonction de $(1/T)$ est généralement une droite qui, dans certains cas, peut avoir une cassure. D'une manière générale, on peut admettre pour le matériel des durées de vie de 25 à 30 ans pour une utilisation annuelle de 2000 à 7500 h environ. Pour du matériel plus petit, des durées de vie de 20000 à 100 000 h sont probablement plus réalistes [39].

1.4. Vitesse de dégradation

Les dégradations qui se produisent dans les matériaux isolants et affectent leurs caractéristiques ont pour origine essentielle des réactions chimiques. Aussi est-il logique de retrouver pour l'évolution de ces propriétés des lois analogues à celles qui régissent ces relations chimiques. Cela se traduit, de façon pratique, par une loi conforme à la relation d'Arrhenius, liant la vitesse d'évolution V d'une propriété quelconque à la température absolue T [28] :

$$\ln V = \frac{-A}{T} + B \quad (3)$$

avec :

A, B : constantes caractéristiques du polymère.

La vitesse de dégradation est aussi donnée par une relation analogue à (3) :

$$V = V_0 \exp(-E/T) \quad (4)$$

avec :

E : Energie d'activation du phénomène,

R : Constante des gaz parfaits,

V_0 : Constante,

T : température absolue.

La dégradation est d'autant plus rapide que la température est élevée.

2. Processus intervenants dans la dégradation des émaux isolants

Le vieillissement thermique est caractérisé par des mécanismes complexes faisant intervenir des phénomènes purement physiques (migration de plastifiant, évolution de la morphologie...) [26] ou des phénomènes purement chimiques parmi lesquels l'oxydation par l'oxygène atmosphérique qui joue souvent un rôle prédominant [40-43]. Les analyses physico-chimiques permettent de suivre une ou plusieurs caractéristiques intrinsèques d'un matériau comme la température de transition vitreuse, le taux de cristallinité ou de mettre en évidence l'apparition de produits de dégradation spécifiques de rendre compte de l'altération de la structure chimique ou des propriétés physiques du polymère. Le regroupement de telles informations s'avère intéressant pour identifier et comprendre le type de mécanisme mise en jeu lors de la dégradation thermique des polymères.

2.1. Processus chimique intervenant dans la dégradation thermique des polymères

Le mécanisme chimique de la dégradation thermique se traduit par une modification, de manière irréversible, de la structure chimique d'un matériau exposé à l'action prolongée de la chaleur : des liaisons covalentes rompues, d'autres nouvelles liaisons formées, etc.... Il peut s'effectuer en atmosphère inerte ou dans l'air [41]. En général, les réactions chimiques induites par la dégradation thermique des polymères sont les suivantes [41, 42] :

2.1.1. Ruptures de chaînes statistiques

La rupture de chaînes statistiques se produit sur des sites distribués au hasard dans le réseau macromoléculaire. Les coupures de chaînes provoquent une diminution de la masse moléculaire moyenne dans le cas de polymères linéaires et une réduction du taux de réticulation dans le cas de polymères tridimensionnels [26]. Les propriétés physiques telles que les propriétés optiques, élastiques et thermiques sont très peu affectées par les coupures

de chaînes statistiques, cependant elles affectent considérablement les propriétés mécaniques car elles sont responsables de la fragilisation du matériau [44].

2.1.2. Dépolymérisation

Les réactions de dépolymérisation comme leur nom l'indique, est l'inverse de la réaction de polymérisation. Elles font intervenir une élimination séquentielle des molécules de monomère à partir d'un site particulièrement instable préexistant ou résultant d'une coupure de chaîne statistique [45]. Ces réactions peuvent prendre naissance même en absence d'oxygène. L'évaporation de produits de scission de plus bas poids a une double conséquence : d'une part un rétrécissement du matériau et d'autre part la formation des produits volatils susceptibles d'être à l'origine de décharges partielles dans les isolations à haute tension [46].

2.1.3. Oxydation

Le processus d'oxydation est une réaction en chaîne amorcée par la thermolyse de liaisons les plus faibles du polymère en radicaux libres réactifs avec l'oxygène [43]. L'oxydation se manifeste au cours du vieillissement thermique sous forme d'une accumulation de groupes carbonyles (acide, cétone, aldéhydes...). La concentration de ces groupes est d'autant plus importante dans la zone amorphe que dans la zone cristalline d'un polymère semi-cristallin à cause de la diffusion facile de l'oxygène dans cette partie [47]. Plusieurs facteurs affectent le processus d'oxydation des polymères, on peut citer le non saturation du polymère, la présence d'ions métalliques, la présence de groupes chimiques tels que les groupes carbonylés, les catalyseurs et les antioxydants avec la structure et la morphologie du matériau. L'oxydation des polymères a pour conséquence: la formation des groupes polaires tel que cétone, aldéhyde et acides, qui augmentent le facteur de pertes diélectriques et diminuent la rigidité diélectrique du matériau isolant [45] ainsi que la rupture des chaînes qui est responsable de l'augmentation de la charge à la rupture [46].

2.1.4. Réticulation

Le processus de réticulation se traduit par la formation de liaisons fortes ou covalentes entre les chaînes voisines d'un polymère exposé à la contrainte de la température. Le processus d'oxydation s'accompagne généralement d'un effet de réticulation ou de pontage entre chaînes voisines qui réduit la souplesse de l'isolant le rendant ainsi cassant.

2.2. Processus physique intervenant dans la dégradation des polymères

On appelle, vieillissement physique tout phénomène conduisant à une altération des propriétés d'utilisation du matériau sans qu'ils y aient modification de la structure chimique de ce dernier [26]. On distingue deux grandes catégories de phénomènes selon qu'ils impliquent ou non un transfert de masse, c'est-à-dire un transport de petites molécules du matériau vers l'environnement ou de l'environnement vers le matériau [26, 49].

2.2.1. Vieillissement sans transfert de masse

2.2.1.1. Processus de vieillissement par relaxation de volume ou d'enthalpie

Ce processus est un phénomène qui se manifeste par une évolution de la morphologie d'un polymère à l'état vitreux. Il s'agit en fait d'un phénomène lié à l'instabilité thermodynamique propre aux matériaux amorphes au dessous de leur température de transition vitreuse (T_v). Lors de la mise en œuvre, le polymère est refroidi, sa viscosité augmente brutalement lors de franchissement de la zone de transition vitreuse, et la mobilité moléculaire devient trop faible. Pour que le polymère adopte sa configuration d'équilibre, le matériau se fige avec un excès de volume et d'enthalpie. A une température pas trop basse au dessous de T_v , la mobilité résiduelle va cependant, permettre une évolution vers un état d'équilibre. Cette évolution est appelée vieillissement par relaxation de volume [48] le vieillissement physique se traduit par l'augmentation du volume spécifique. Il est un phénomène auto-ralenté puisque la vitesse d'évolution est liée au volume libre qui diminue au cours de temps [49]. Il affecte toutes les propriétés dépendant de volume libre et la mobilité moléculaire. La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue et le facteur de pertes d'électriques diminue [26, 45, 48,49].

2.2.1.2. Post-cristallisation

Dans le cas d'un polymère semi-cristallin, le taux de cristallinité maximal n'est atteint qu'au terme de recuit prolongé. Le vieillissement thermique à une température comprise entre celle de fusion et celle de la transition vitreuse pourra se traduire par une augmentation du taux de cristallinité [26].

2.2.1.3. Relaxation d'orientation

Au terme des opérations de mise en œuvre, lorsque les macromolécules sont figées dans une configuration orientée, elles tendent à revenir à l'état d'équilibre dès que les conditions permettront une certaine mobilité moléculaire (température voisine de T_v ou superplastification par un solvant, etc....). Sur le plan pratique, ce mécanisme de vieillissement se traduit essentiellement par une modification dimensionnelle. On observe un retrait dans la direction d'orientation et un gonflement dans la direction perpendiculaire si l'orientation est unidirectionnelle [26].

2.2.1.4 Choc thermique

Les matériaux polymères sont soumis à des variations rapides de température, ils vont donc subir des dilatations différentielles liées au gradient de température dans l'épaisseur ou la coexistence de phase ayant des coefficients de dilatation très différents. Le vieillissement par choc thermique résulte d'une fonction d'un endommagement mécanique et peut être en principe prédit si l'on dispose des données relatives à la diffusivité thermique, à la dilatation et à la loi du comportement mécanique du matériau dans l'intervalle des températures étudiées [49].

2.2.2. Vieillessement avec transfert de masse

Les phénomènes de transfert de masse font appel aux notions de solubilité, de diffusion et de plastification. Le transfert peut s'opérer dans les deux sens.

2.2.2.1. Pénétration de solvant

Si une espèce de faible masse moléculaire se rencontre dans l'environnement et présente une solubilité non nulle, on constate qu'elle va pénétrer dans le polymère en provoquant des effets indésirables. Dès que la concentration devient importante, le solvant le plus courant dans l'environnement est évidemment l'eau qui peut poser de problèmes parce que les matériaux isolants ne sont pas totalement hydrophobes, La pénétration des solvants dans le polymère est influencée par la structure chimique du motif structural élémentaire, de la morphologie et du taux de réticulation du polymère [49].

2.2.2.2. Migration d'adjuvants

Les propriétés finales des polymères dépendent de la nature des atomes constitutifs, de l'agencement des unités monomères et de l'organisation des chaînes dans l'espace. Lors de la mise en œuvre du polymère, des additifs sont ajoutés pour conférer au matériau des propriétés spécifiques. Ces derniers jouent un rôle important sur le comportement du diélectrique vis-à-vis des différentes contraintes imposées par le service. La plupart de ces adjuvants incorporés lors de la mise en œuvre se déplace du matériau vers l'environnement au cours de fonctionnement sous les conditions de service. Le transfert de ses petites particules s'effectue en trois mécanismes [26] :

a) Évaporation

C'est le cas le plus rencontré dans les applications électriques, les molécules de plastifiant à la surface peuvent donc passer dans l'atmosphère d'où la naissance d'un gradient de concentration dans l'épaisseur du matériau. L'apparition de ce gradient entraîne la diffusion du plastifiant vers la surface et conduira à sa disparition progressive [26, 45,48]. La vaporisation du plastifiant dépend du poids moléculaire de ce dernier.

b) Extraction

Les phénomènes d'extraction sont à prendre en compte dans les cas de contact entre polymère et un milieu liquide, ici c'est la stabilité de l'adjuvant dans le liquide qui est susceptible de jouer le rôle le plus important et sera en tout cas le premier paramètre à considérer lors du choix du matériau [26].

c) Exsudation

L'exsudation est le résultat d'une évolution du matériau vers l'équilibre. Dans certains cas, le mélange (polymère + adjuvant) peut être déstabilisé par un corps tiers provenant de l'environnement [26]. Dans tous les cas, le départ de l'adjuvant se traduit par les pertes des propriétés du polymère. Dans le cas de plastifiant, on observe une diminution de l'allongement à la rupture, une augmentation de la température de transition vitreuse T_v et du module de Yong. Dans le cas de stabilisant, c'est la stabilité chimique qui diminuera [26, 52].

3. Dégradations des émaux isolants

Dans un environnement normal de travail des machines électriques les émaux isolants subissent des contraintes qui peuvent être classées en quatre catégories selon leurs origines : thermique, mécanique, électrique et chimique [25]. Pour certains matériels comme les machines tournantes, les contraintes thermiques jouent un rôle très important car elles influencent directement la durée de vie des isolants [24,25].

Les sources internes de la chaleur correspondent aux différentes pertes localisées dans le cuivre (Pertes Joule), dans le fer (Pertes par hystérésis et pertes par courant de Foucault) et dans l'isolant lui-même (Pertes diélectriques). Si les pertes fer peuvent être évacuées assez facilement par le contact intime entre le circuit magnétique et la carcasse extérieure ou par un système de ventilation, la chaleur créée par les pertes cuivre doit souvent traverser l'isolant [24]. Les machines électriques sont soumises à des différences de température provoquées par la variation de la température ambiante, du couple demandé par la charge mécanique ou tout simplement, à l'occasion des régimes transitoires [24].

Le vieillissement thermique des isolants solides se traduit par une évolution lente et irréversible des propriétés d'un matériau soumis l'action combinée du temps et de la température. Plusieurs études affirment que le changement de ces propriétés est le résultat de la modification de la structure chimique du polymère [50-58]. Les réactions de dégradation sont des réactions de scission de chaînes, de réarrangements et d'oxydation. Elles entraînent un dégagement de produits de dégradation et une perte de masse de l'isolant [2]. L'environnement de la machine joue souvent un rôle important, la présence de pollutions de toutes natures combiné avec l'oxygène de l'air est souvent un facteur d'accélération des réactions chimiques qui attaquent l'émail [24].

Des essais de vieillissement thermique ont été réalisés sur des échantillons de fils émaillés composés de polyamide imide et de polyester imide ont montré que les premiers produits de dégradation sont issues de dégradation de la fonction ester. Tandis que la dégradation de la fonction imide et la fonction amide n'apparaît que à des températures plus hautes [2]. Les principaux produits de la dégradation du polyamide imide et du polyester imide sont: l'alcool benzylique, l'acide benzoïque, le benzaldéhyde, le benzonitrile, le benzène, le p Benzoquinone, le Phénol et le Phényle iso cyanate [2].

L'alcool benzylique et l'acide benzoïque proviennent de la dégradation de la fonction ester. La température permet la rupture de la liaison C-O, ce que peut amener à la perte de CO ou de CO₂ selon la localisation de la cassure comme le montre la figure II.4.

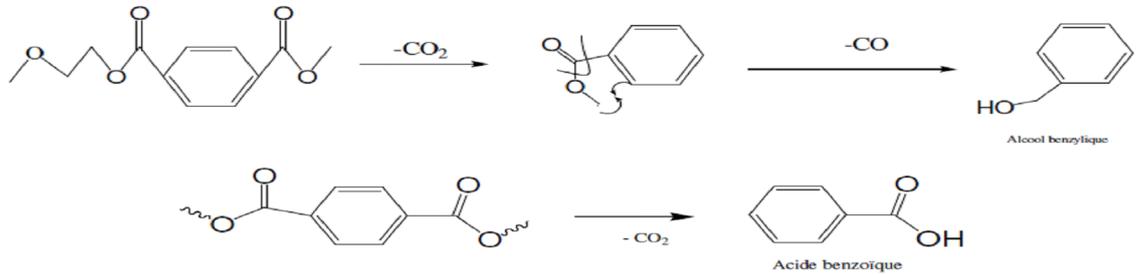


Figure II.4 : Dégradation de la fonction ester

L'apparition du benzaldéhyde peut être le résultat d'une scission dans la fonction carbonyle et d'un dégagement de CO₂.

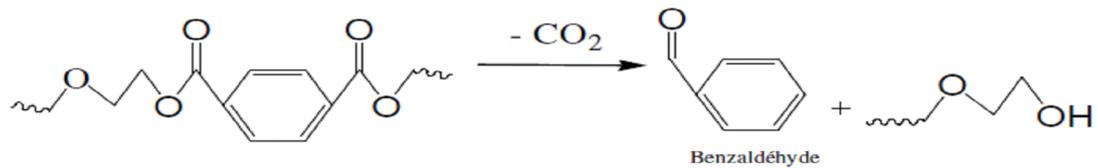


Figure II.5 : Formation de benzaldéhyde.

Le benzonitrile proviendrait pour les plus basses températures de la décomposition de la fonction imide du polyester imide car le matériau était dégradé, la stabilité de la fonction imide s'en retrouve affaiblie. Il peut être aussi issu de la dégradation de polyamide imide pour des températures plus hautes. La fonction imide se dégrade par l'intermédiaire d'un mécanisme d'équilibre amide /iso imide [50-53], cet équilibre est l'origine de la formation du benzonitrile. Il peut aussi être l'origine de la formation d'une partie de l'acide benzoïque.

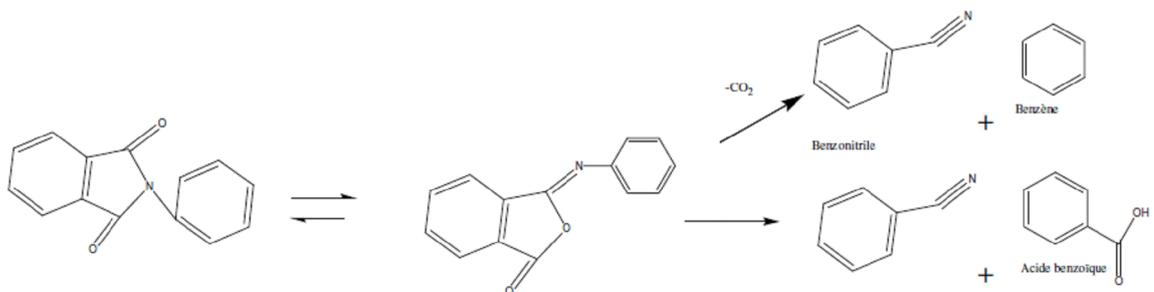


Figure II.6 : Formation du benzonitrile et de l'acide benzoïque.

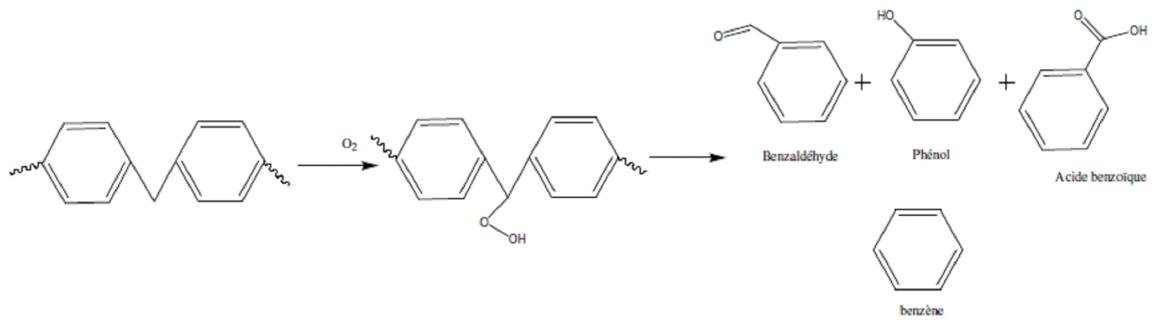


Figure II.7: Dégradation des méthylènes.

La température est responsable de la perte d'atome d'hydrogène dans les groupes méthylènes. En présence d'oxygène celui-ci s'oxyde en hydro peroxyde [54,55], qui peut ensuite se dégrader et donner un phénol et benzaldéhyde.

L'oxygène atmosphérique peut ne pas participer directement à la décarboxylation des structures imides. Son action serait plutôt un effet indirect de fragilisation par oxydation de la chaîne polymère, conduisant à la dégradation du matériau [56,57].

Kovorski [56] fait intervenir les structures peroxydiques. Il montre l'influence de l'oxygène sur la dégradation. L'intrusion de l'oxygène peut conduire à l'apparition de produit de dégradation comme le p benzoquinone (Figure II.8) ou le phénol et le phényle iso cyanate (figure II.9) selon le lieu d'attaque de l'oxygène.

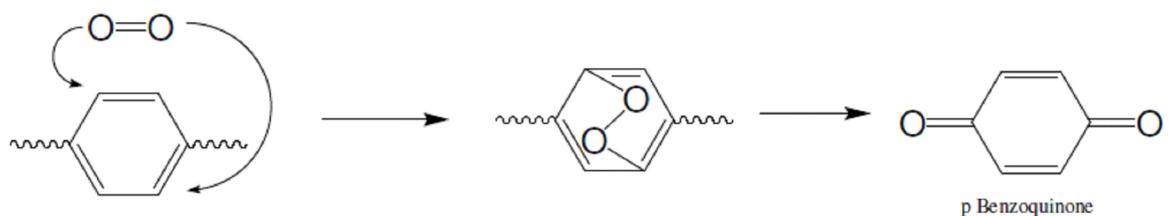


Figure II.8 : Dégradation du cycle aromatique par l'oxygène.

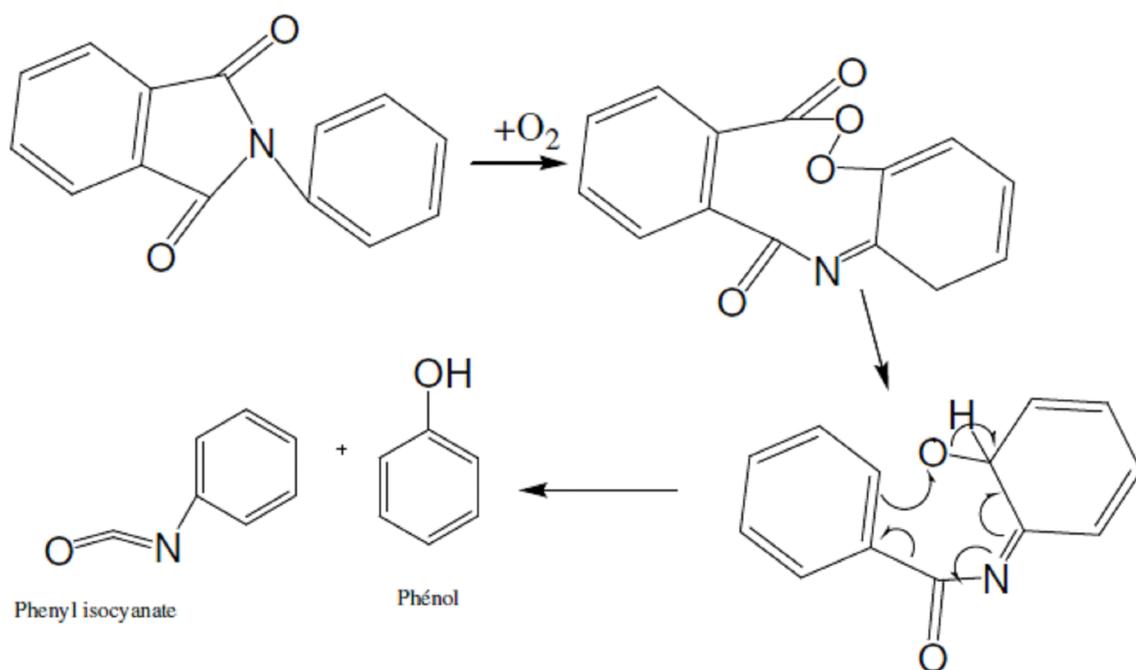


Figure II.9: Dégradation de la fonction imide par l'oxygène.

Chapitre III

Le modèle statistique de Weibull et son
application à la rupture diélectrique des
isolants solides

L'objet principal de la statistique est de faire, à partir d'observations d'un phénomène aléatoire, un sujet de loi générant ces observations en vue d'analyser ce phénomène ou de prévoir un évènement futur [59].

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 [60].

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 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 pas être éliminés complètement. Ces défauts peuvent exister lors de la mise en œuvre du matériau ou créés durant le vieillissement. Il est donc indispensable 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 utilisées. Le modèle le plus employé pour la caractérisation de la rupture diélectrique de ces matériaux est le modèle de Weibull [61].

1. Modèle statistique de Weibull

Les principales lois statistiques utilisées en fiabilité sont les lois : exponentielle, de Weibull, normale et log-normale [62]. Dans le cas des isolants solides, les distributions de Weibull et log-normal sont les plus utilisées [62, 63].

1.1. Bases du modèle

Le modèle de Weibull est utilisé pour décrire la rupture d'un matériau [64]. Le nom de Wallodi 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 [65].

A l'origine, le modèle statistique de Weibull a été établi en mécanique [64]. L'intérêt de cette distribution est de permettre un bon ajustement d'une grande variété de problèmes de rupture [65], 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 [66]. Pour bien comprendre le concept du maillon le plus faible, on introduit trois hypothèses [67]:

- 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 [66]:

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

Le modèle statistique de Weibull ou la loi de chaîne s'écrit [66] :

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

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 [61, 62, 67]. 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. Le modèle de Weibull est utilisé pour étudier la rupture diélectrique de matériaux isolants solides [61, 68, 69].

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 tensions de rupture par une loi exponentielle du même type que celle de Weibull [67].

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 [73] :

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

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 [67] :

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

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 [70]. D'après Oudin et al [71] :

- 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 » [72].
- 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 [71, 72].

En général, dans le cas des polymères et pour les distributions en temps (essais à champ constant), on a : $0,5 < \alpha < 3$ [61].

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 [73, 74].

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 [71] :

- 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 [75].
- 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 [75].

3. Application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique 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 [76]. Le modèle statistique de Weibull est très utilisé pour l'évaluation de la fiabilité des câbles électriques [77, 78].

3.1. Tenue diélectrique à long terme

La probabilité de claquage sous champ constant s'écrit [71]:

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

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.

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 [70, 79-81].

Chapitre IV

Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus sur le vieillissement thermique du fil émaillé utilisé dans les machines électriques. La première partie, concernant la réalisation des éprouvettes, a été faite au Laboratoire de Physique de l'Entreprise Electro-Industries sise à Azazga. Quant à la deuxième partie, portant sur les essais de vieillissement, elle a été effectuée au Laboratoire de Génie Electrique de l'Université de Tizi-Ouzou. Les essais de rupture diélectrique ont été, également, réalisés à Electro - Industries. Une étude statistique des valeurs de la tension de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull.

1. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Une bobine de fil de cuivre émaillé, fournie par l'entreprise nationale TREFICUIVRE, a été utilisée pour nos expériences. Elle est constituée de fil de cuivre de diamètre de 0,63 mm et recouverte d'une première couche d'isolant en polyester-imide et d'une deuxième en polyamide imide. L'isolation est de grade 2 et de classe C (220°C). La figure IV.1 montre la bobine.



Figure IV.1. Bobine de fil de cuivre émaillé de classe C

A partir d'une longueur de fil de cuivre de 400 mm, des échantillons en forme de torsade ont été confectionnés à l'aide du tour à bobiné 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 [82]. 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 [82]. Les deux extrémités ont été, ensuite, dénudées comme le montre la figure IV.3. La boucle de la torsade est coupée en deux points afin d'obtenir entre les deux extrémités une distance suffisante pour éviter le court-circuit lors des essais de rupture diélectrique. Ces deux extrémités ont été écartées (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	7,00	12
0,500	0,710		

Tableau IV.1. Charge et nombre de tours appliqués à la torsade [82]

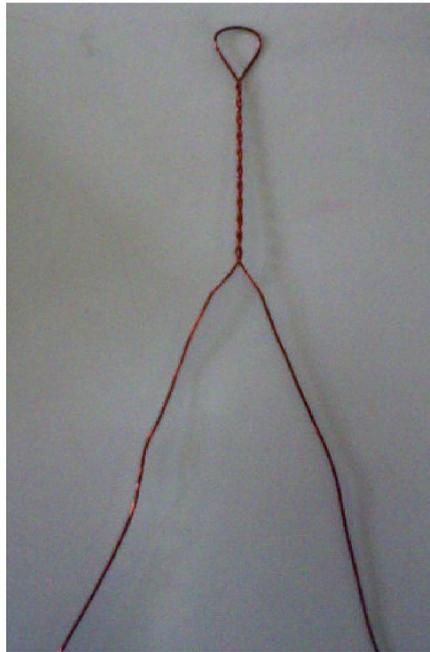


Figure IV.3. Boucle formée de la torsade confectionnée avec le tour à bobiner



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

2. DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

2.1. Vieillissement thermique

Plusieurs échantillons ont introduits dans des étuves à air ventilée réglées à plusieurs températures : 210, 230, 240 et 250°C. Après différents temps de vieillissement, une population de 80 éprouvettes a été prélevée.

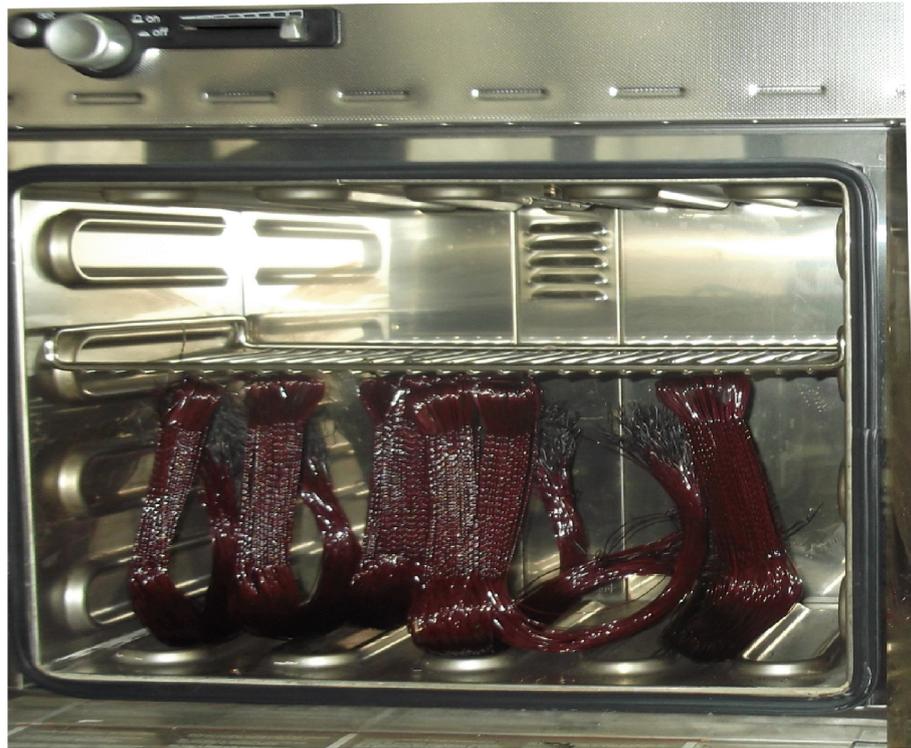


Figure IV.5 : Echantillons en cours de vieillissement.

La figure IV.5 montre des éprouvettes soumises à un vieillissement thermique à la température de 230°C. Après un certain temps de vieillissement, l'isolant a changé de couleur comme le montre la figure IV.6.



Figure IV.6 : Echantillons vieillis avec un changement de couleur.

2.2. Conditionnement des éprouvettes

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. La figure IV.7 montre des éprouvettes conditionnées dans le dessiccateur.



Figure IV.7 : Echantillons en cours de conditionnement dans un dessiccateur.

2.3. Essais de claquage

Les expériences ont été réalisées à l'air libre à l'aide d'un générateur de haute tension à courant alternatif, de fréquence 50 Hz exposé à la Figure IV.8. Les essais consistent à soumettre l'échantillon (les deux parties en cuivre dénudées) considéré à une rampe de tension de vitesse constante de 0,5 kV/s jusqu'au claquage. Après rupture, la tension correspondante a été relevée. A la figure IV.9 est présenté un échantillon soumis à l'essai de rupture diélectrique.



Figure IV.8. Générateur de haute tension utilisé pour les essais de claquage.



Figure IV.9. Echantillon au cours de l'essai de claquage.

3. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES

Pour l'analyse statistique des valeurs de tension de claquage, nous avons utilisé le modèle de Weibull [64] qui a été décrit précédemment. Le calcul des coordonnées des points expérimentaux dans une représentation de Weibull conduit aux expressions suivantes:

$$X_i = \log V_i \quad (IV.1)$$

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

avec:

V_i : tension de claquage,

P_i : probabilité de rupture.

3.1. Calcul des probabilités de rupture

La probabilité de claquage a été calculée en utilisant la relation suivante [83]:

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

avec:

N : nombre total d'échantillons testés, dans notre cas $N = 80$,

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

3.2. 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 [70].

Les paramètres de Weibull calculés par la méthode des moindres carrés ont été comparés à ceux dérivés de la méthode du maximum de vraisemblance [70,80,84]. D'après les résultats de ces travaux, on peut conclure que:

- les valeurs nominales sont invariantes d'une méthode à une autre,
- les valeurs du facteur de forme sont assez différentes avec une tendance à de plus grandes valeurs par la méthode des moindres carrés.

Actuellement, les méthodes statistiques permettant le calcul des intervalles de confiance d'une distribution de Weibull reposent sur la méthode du maximum de vraisemblance [85,86]. L'utilisation d'une simple régression linéaire (méthode des moindres

carrés) pour estimer les intervalles de confiance sur les différents percentiles de la distribution est incorrect et conduit à une sous-estimation de la largeur des intervalles [87], ce qui peut induire des erreurs d'interprétation. La méthode du maximum de vraisemblance est très utilisée pour le lissage des points expérimentaux dans le tracé des diagrammes de Weibull [68,69,79]. De plus, il a été reporté que cette méthode a été généralisée pour traiter les données de rupture diélectrique [88]. Par conséquent, notre choix s'est porté sur cette méthode.

Le tracé des diagrammes de Weibull consiste à tracer $\log\text{Ln}(1/(1-P))$ en fonction de $\log V$. 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.

3.3. Détermination des facteurs d'échelle et de forme

La valeur nominale de la tension de claquage ou facteur d'échelle correspondant à une probabilité de 63,2% a été déterminée pour chaque temps de vieillissement, à une température donnée. Il en est de même pour le facteur de forme.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Diagramme de Weibull à deux paramètres

a) Avant vieillissement

Dans les figures IV.10-IV.38 sont exposées les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage avant et après vieillissement.

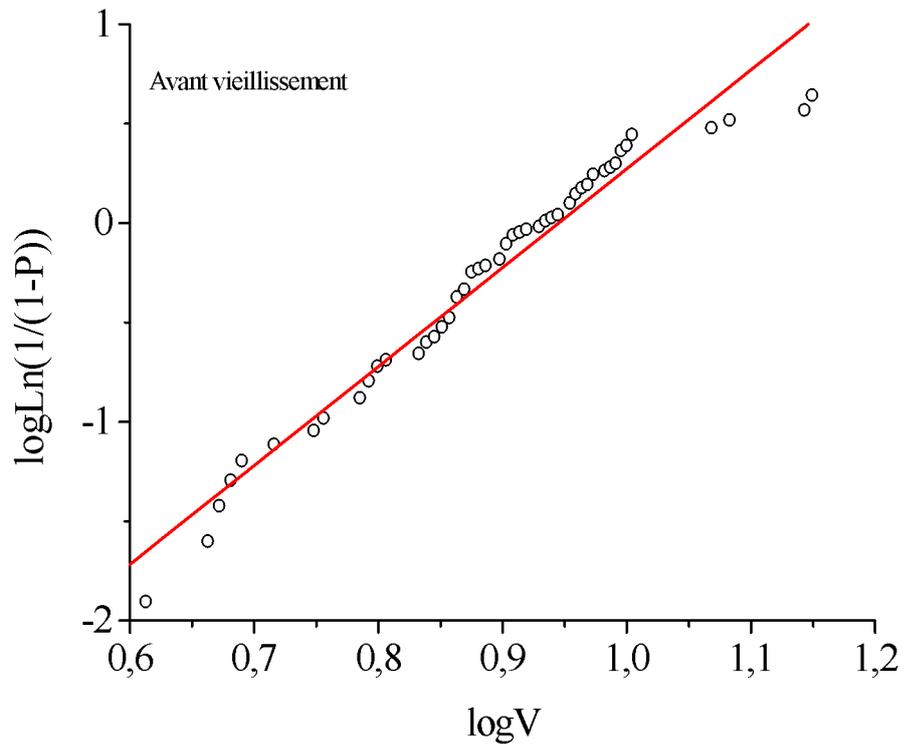


Figure IV.10. Diagramme de Weibull de la tension de claquage avant vieillissement

b) Vieillissement à 210°C

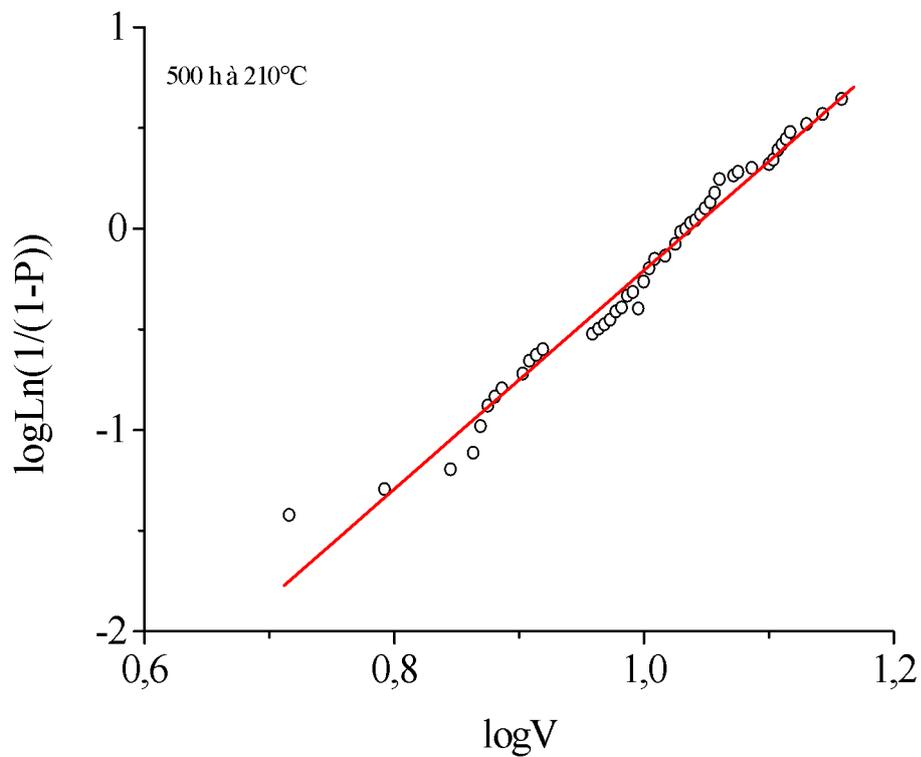


Figure IV.11. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 500 h de vieillissement à 210°C.

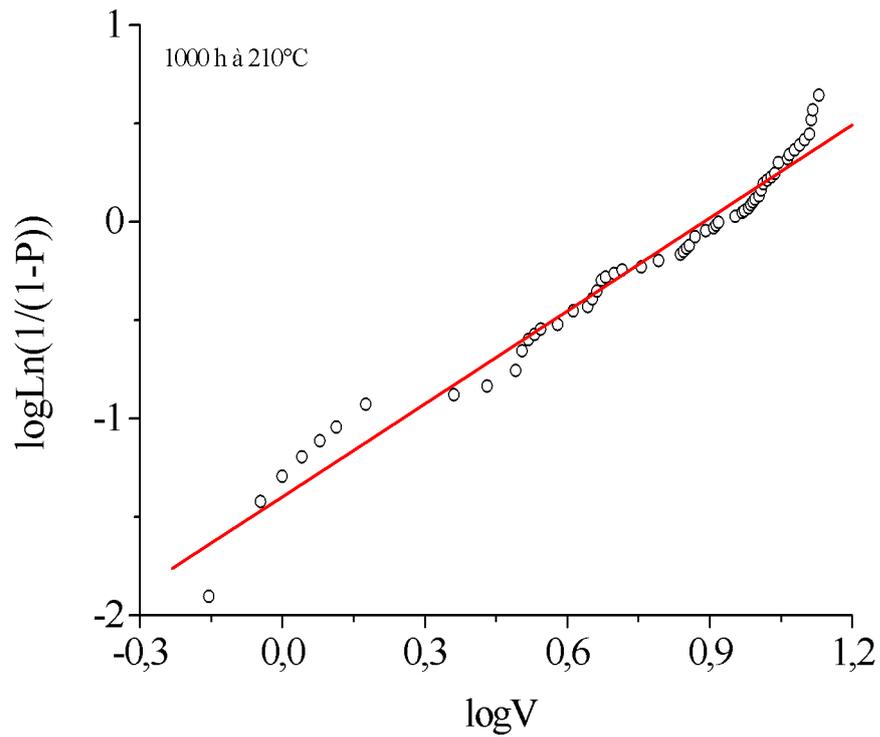


Figure IV.12. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 1000 h de vieillissement à 210°C.

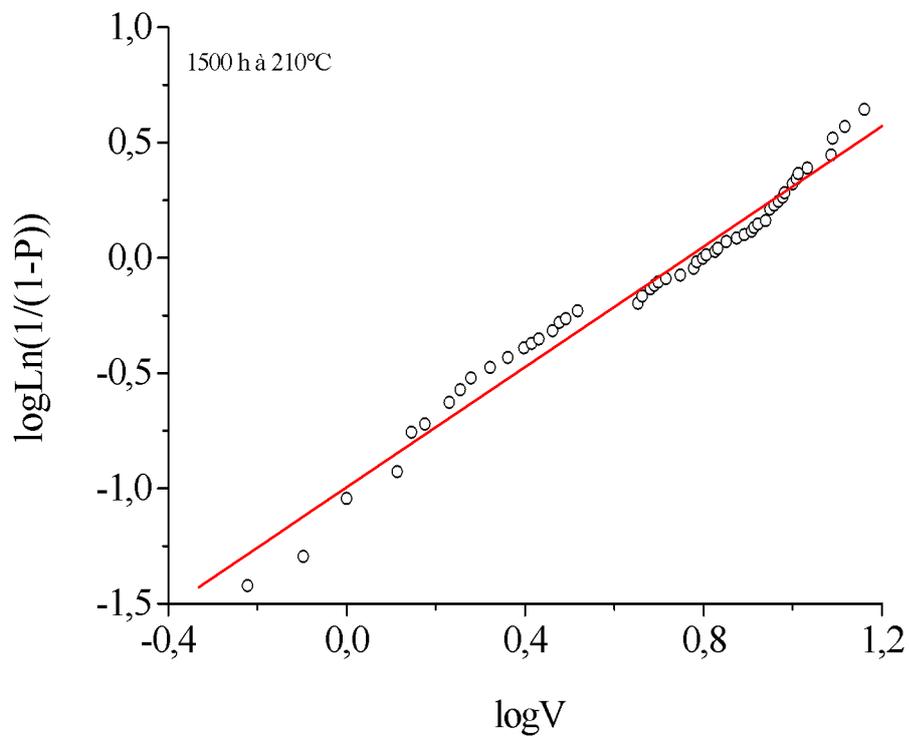


Figure IV.13. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 1500 h de vieillissement à 210°C.

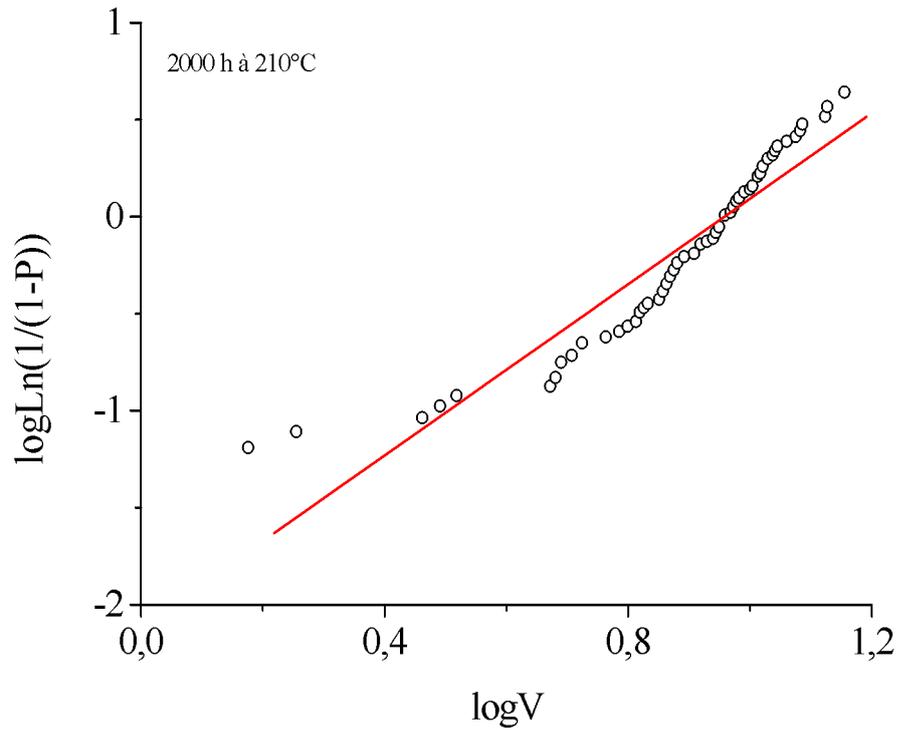


Figure IV.14. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 2000 h de vieillissement à 210°C.

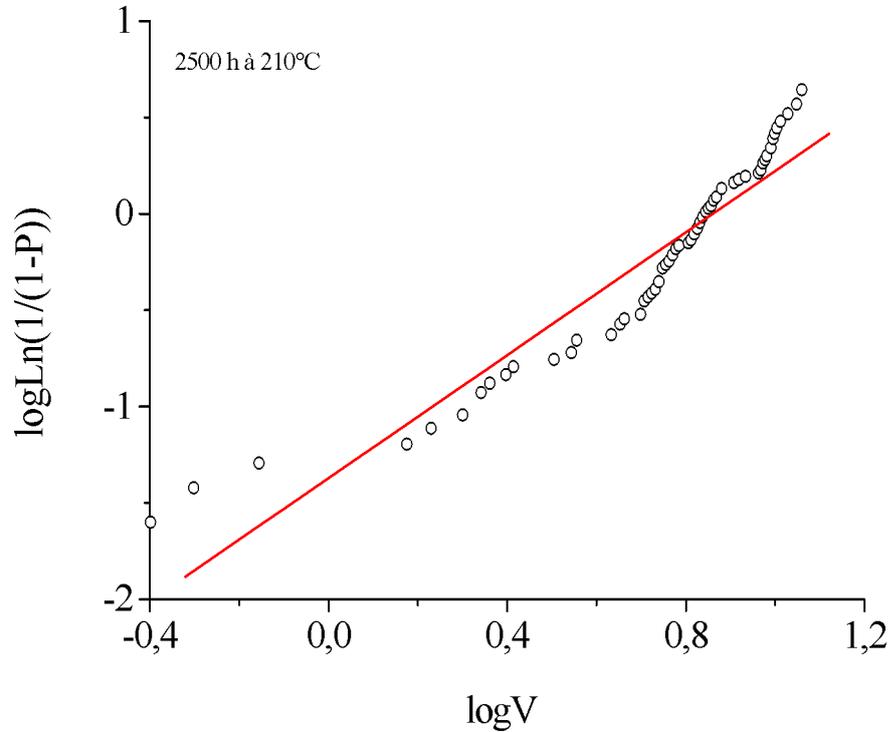


Figure IV.15. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 2500 h de vieillissement à 210°C.

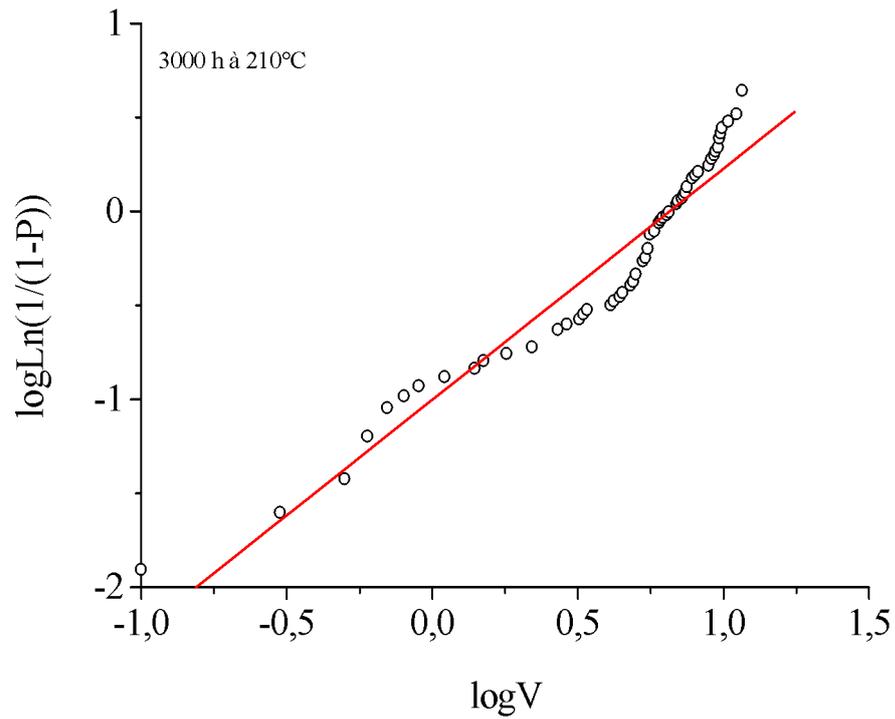


Figure IV.16. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 3000 h de vieillissement à 210°C.

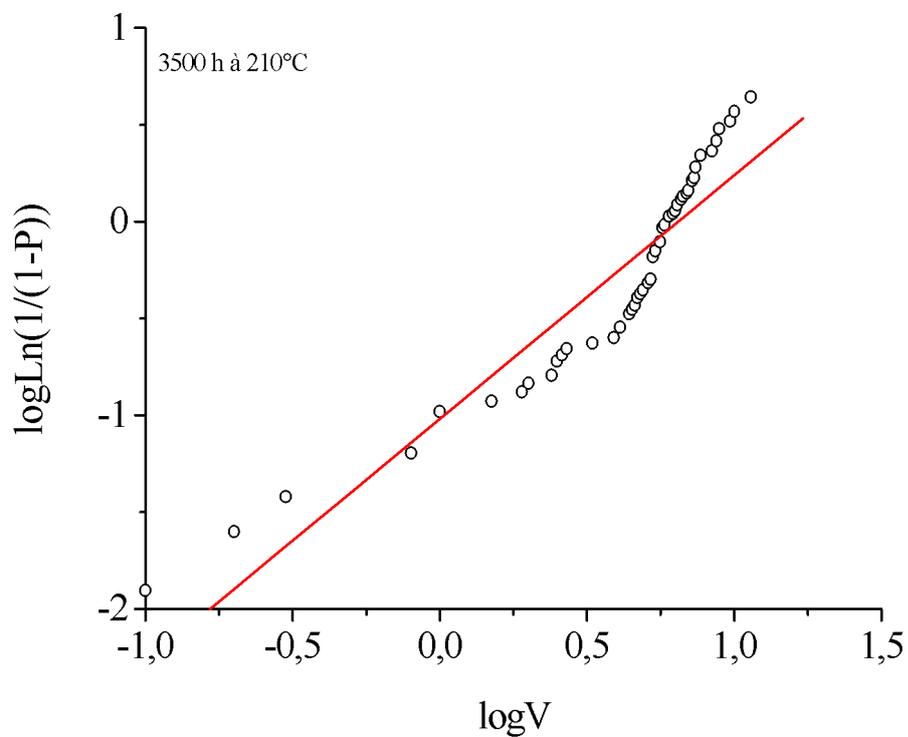


Figure IV.17. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 3500 h de vieillissement à 210°C.

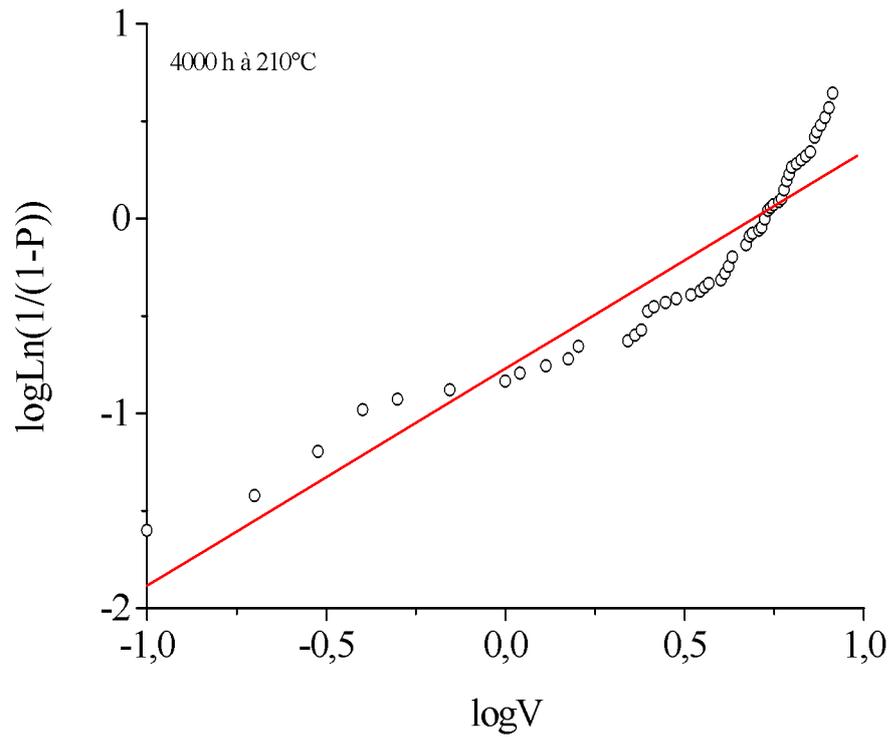


Figure IV.18. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 4000 h de vieillissement à 210°C.

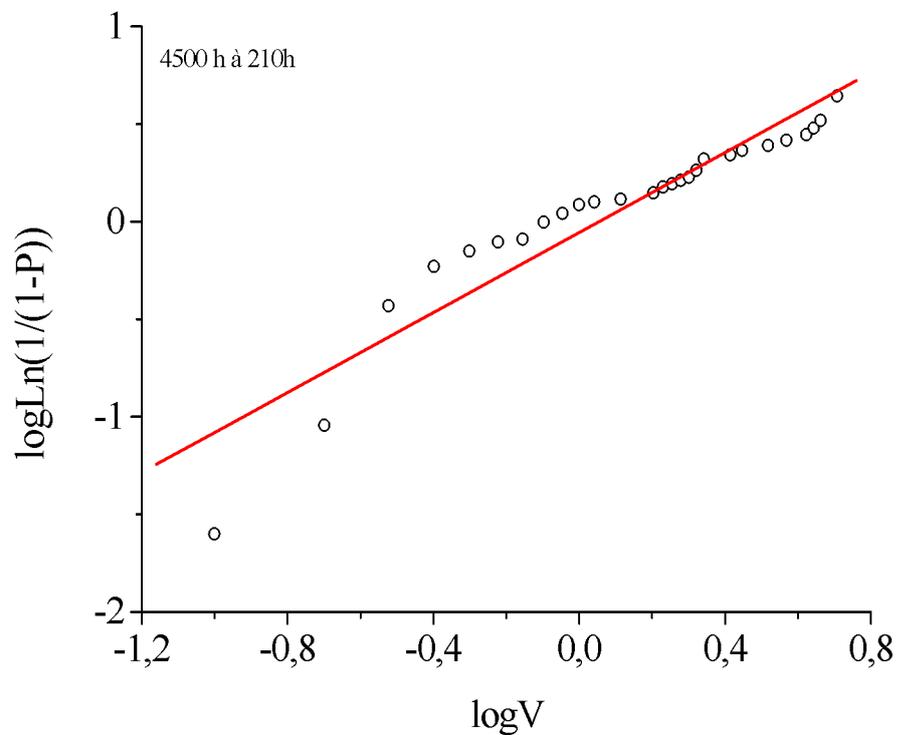


Figure IV.19. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 4500 h de vieillissement à 210°C.

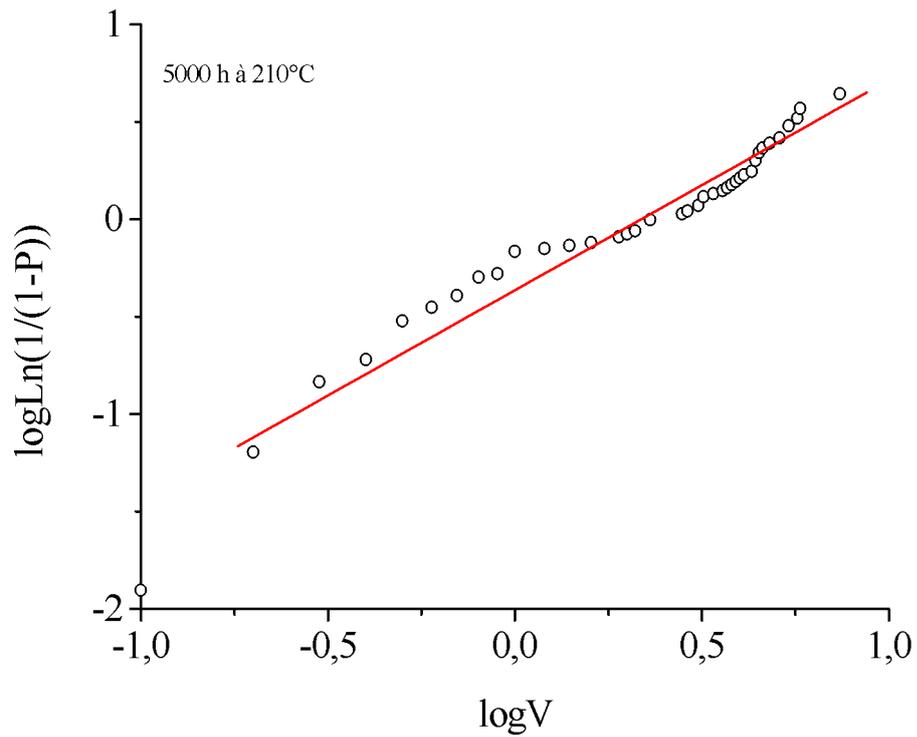


Figure IV.20. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 5000 h à 210°C.

c) Vieillissement à 230°C

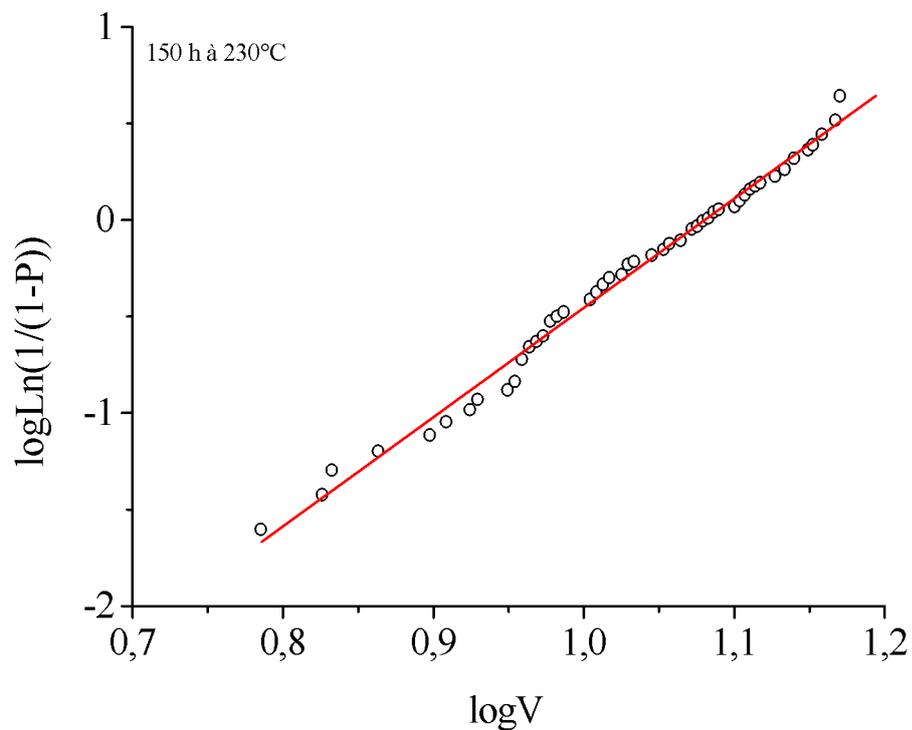


Figure IV.21. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 150 h de vieillissement à 230°C.

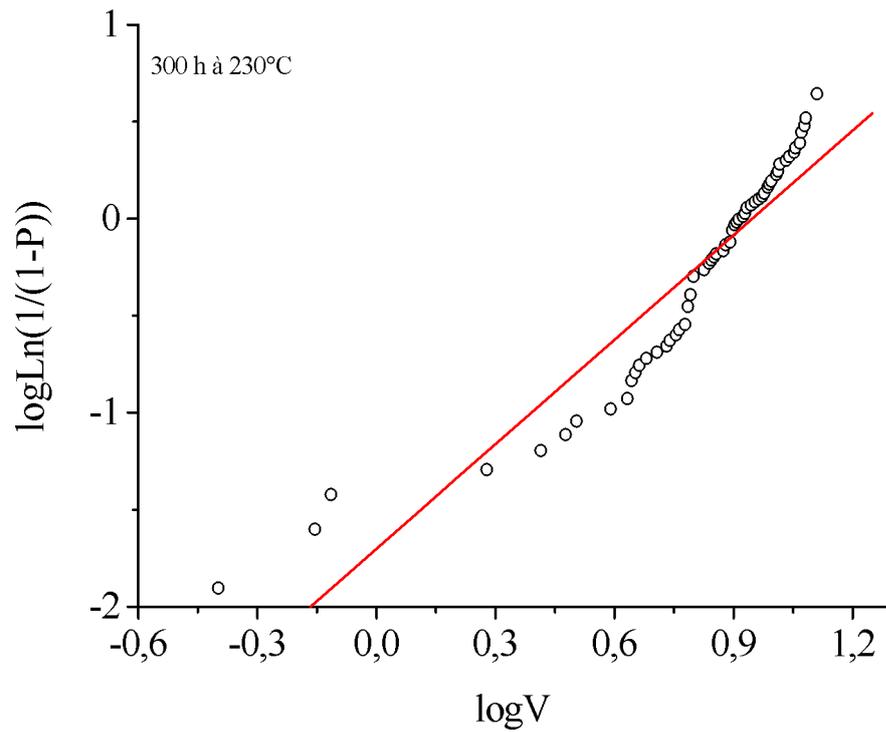


Figure IV.22. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 300 h de vieillissement à 230°C.

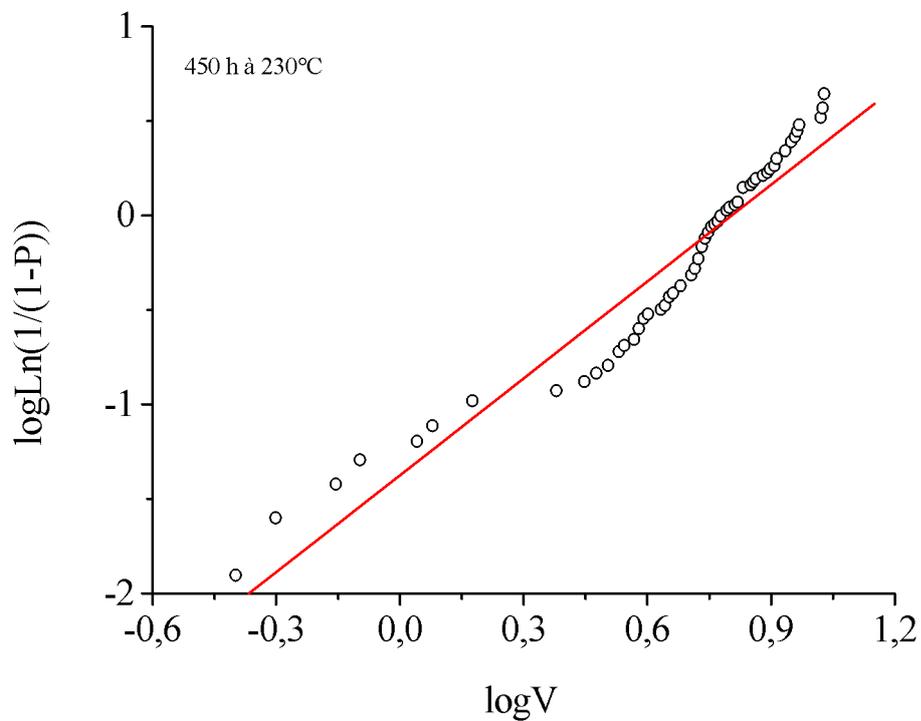


Figure IV.23. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 450 h de vieillissement à 230°C.

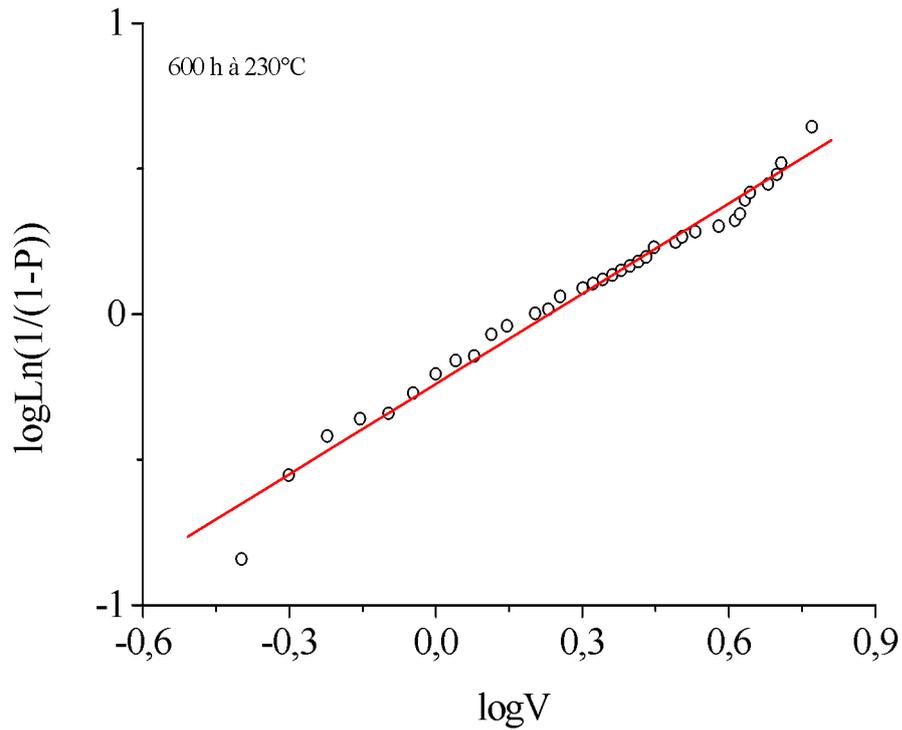


Figure IV.24. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 600 h de vieillissement à 230°C.

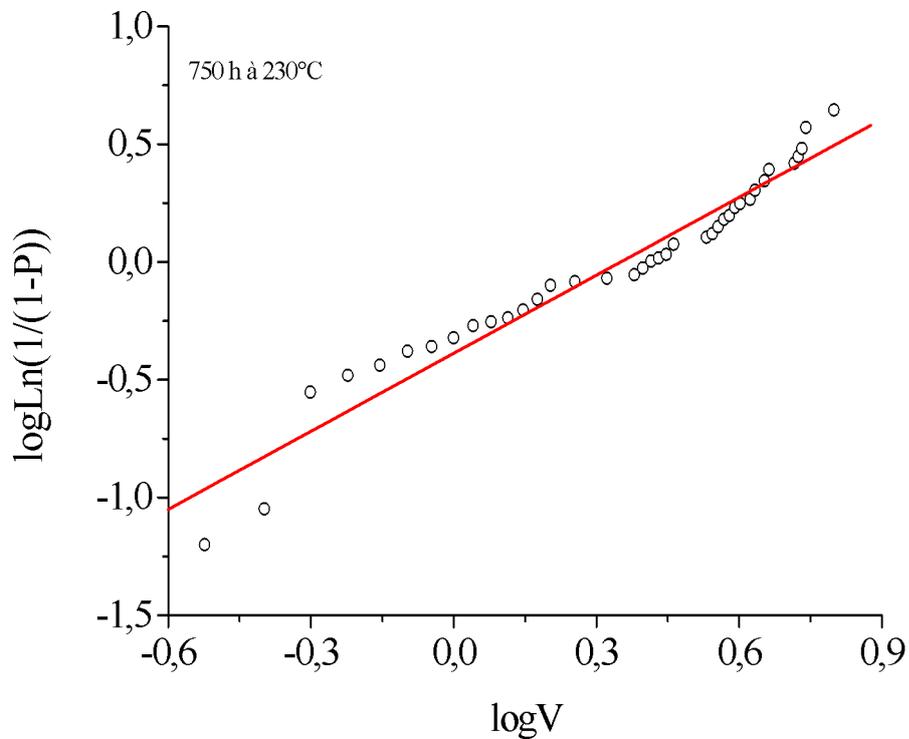


Figure IV.25. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 750 h de vieillissement à 230°C.

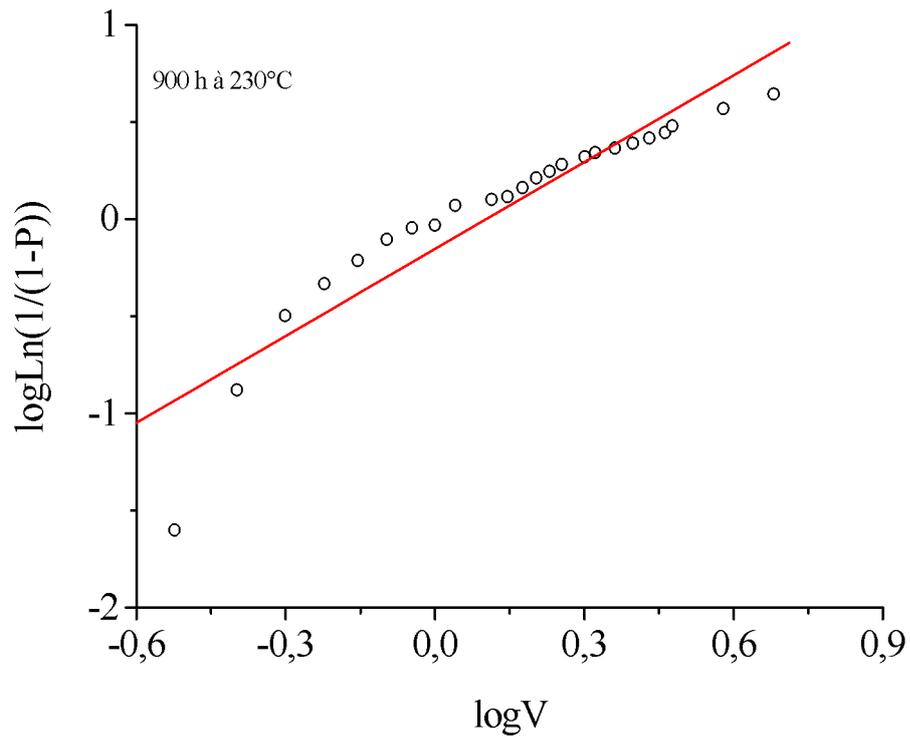


Figure IV.26. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 900 h à 230°C.

d) Vieillissement à 240°C

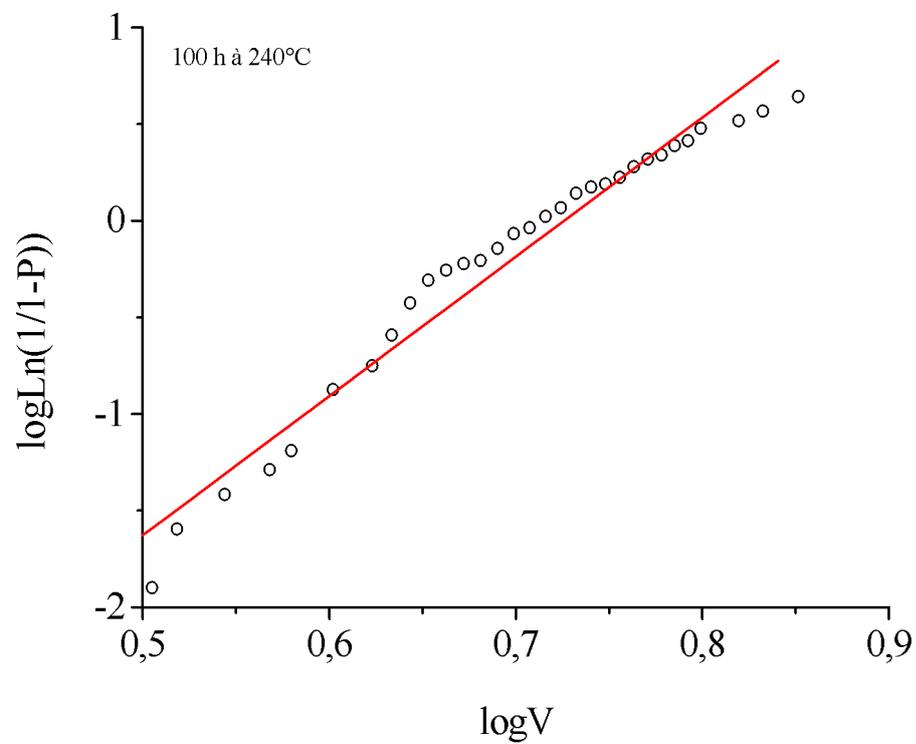


Figure IV.27. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 100 h de vieillissement à 240°C.

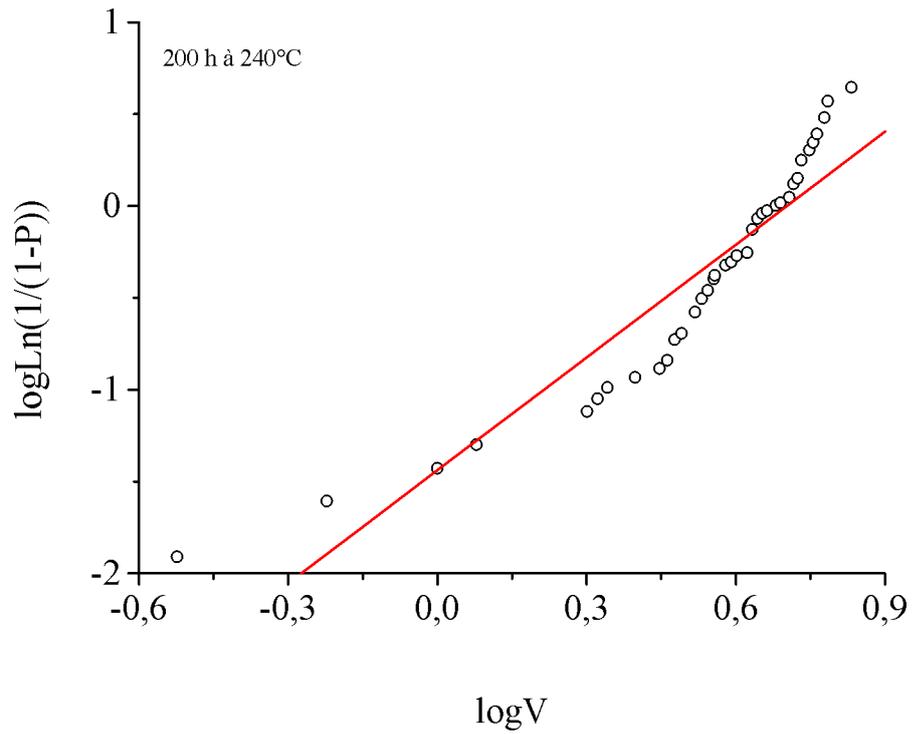


Figure IV.28. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 200 h de vieillissement à 240°C.

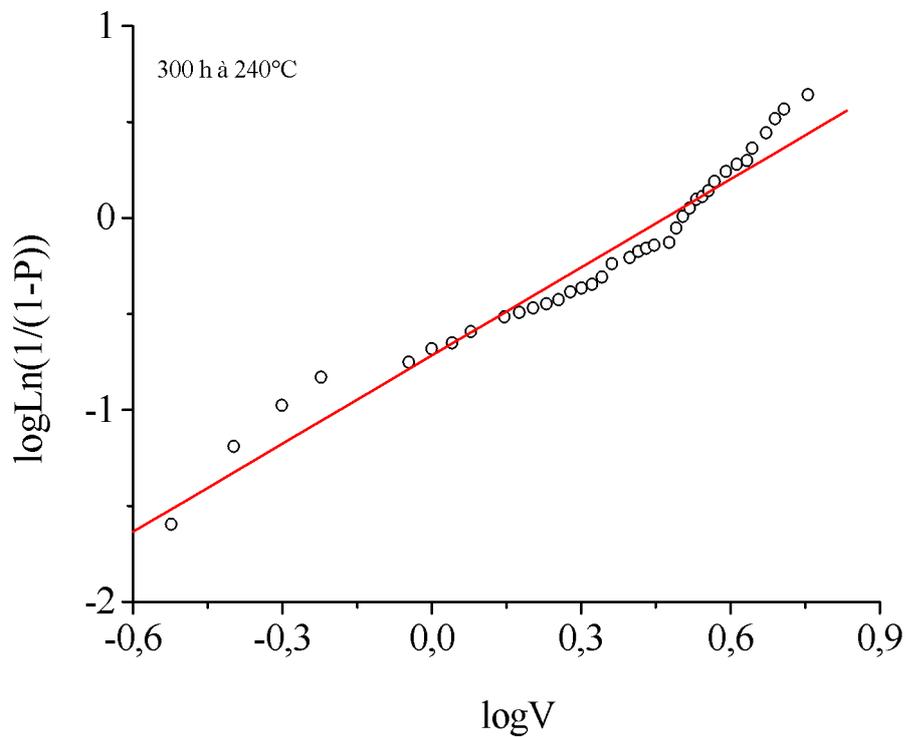


Figure IV.29. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 300 h de vieillissement à 240°C.

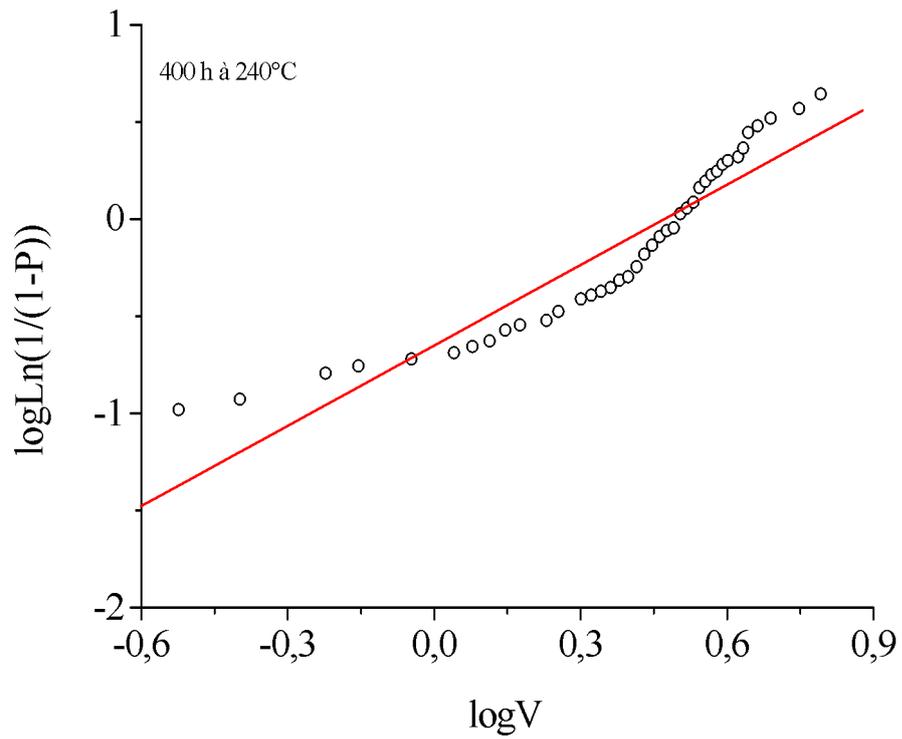


Figure IV.30. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 400 h de vieillissement à 240°C.

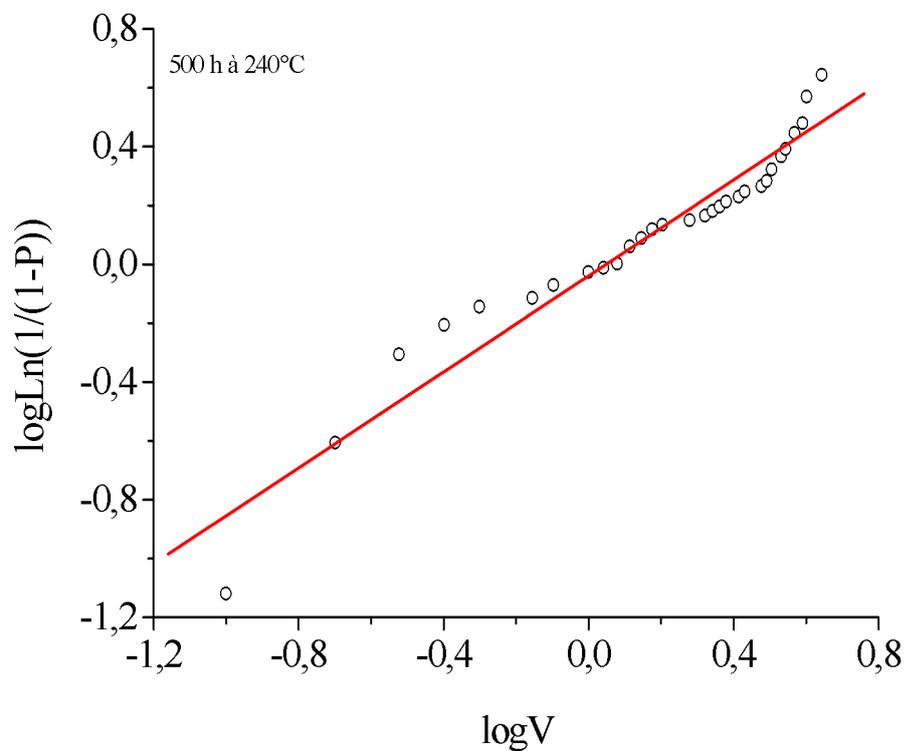


Figure IV.31. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 500 h de vieillissement à 240°C.

e) Vieillessement à 250°C

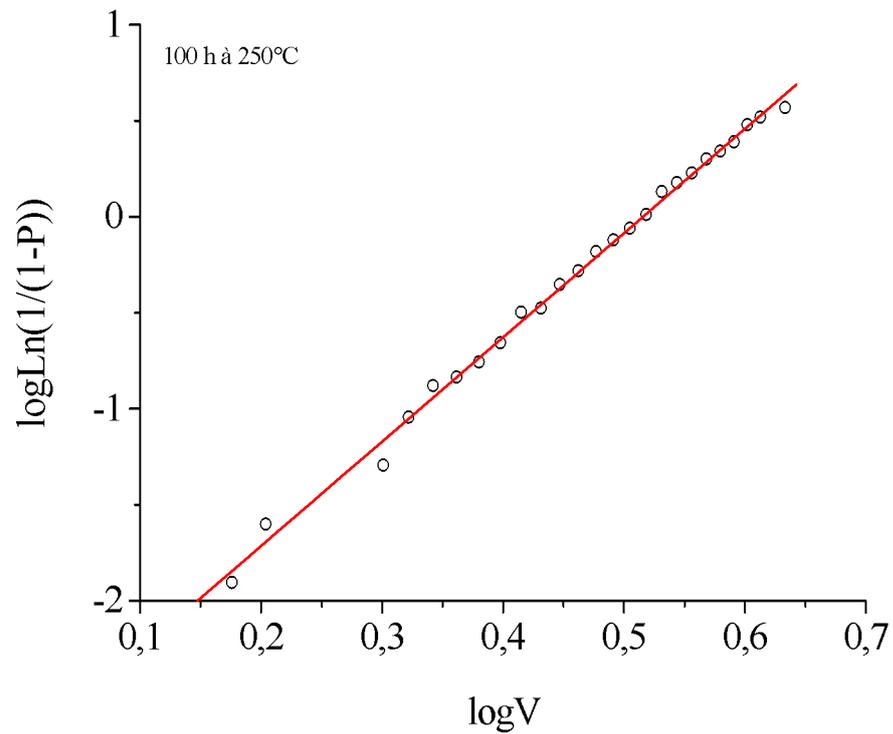


Figure IV.32. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 100 h à 250°C.

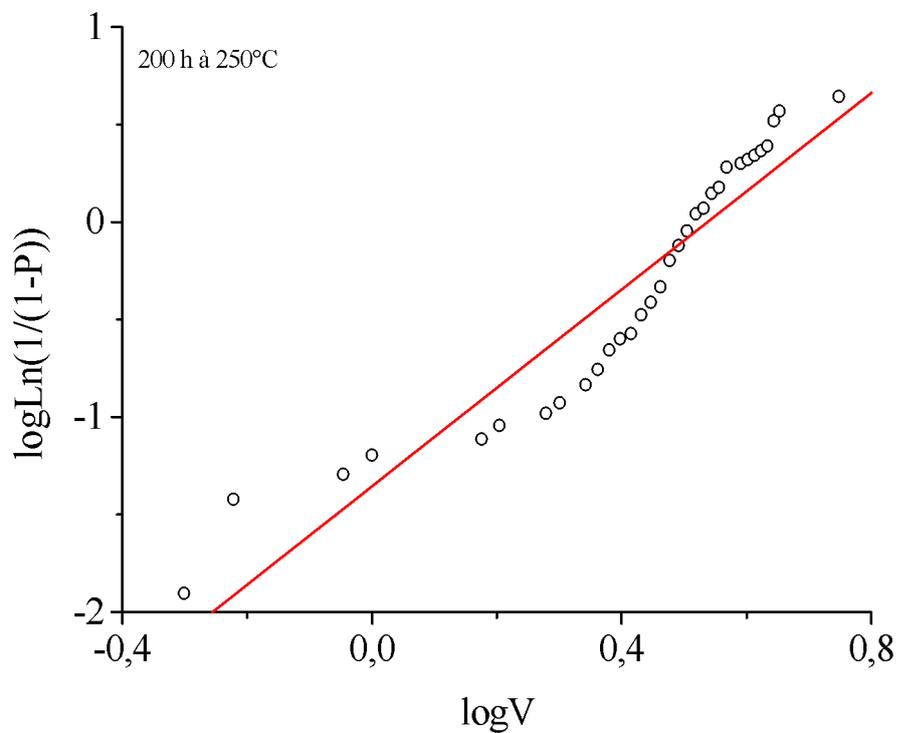


Figure IV.33. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 200 h de vieillissement à 250°C.

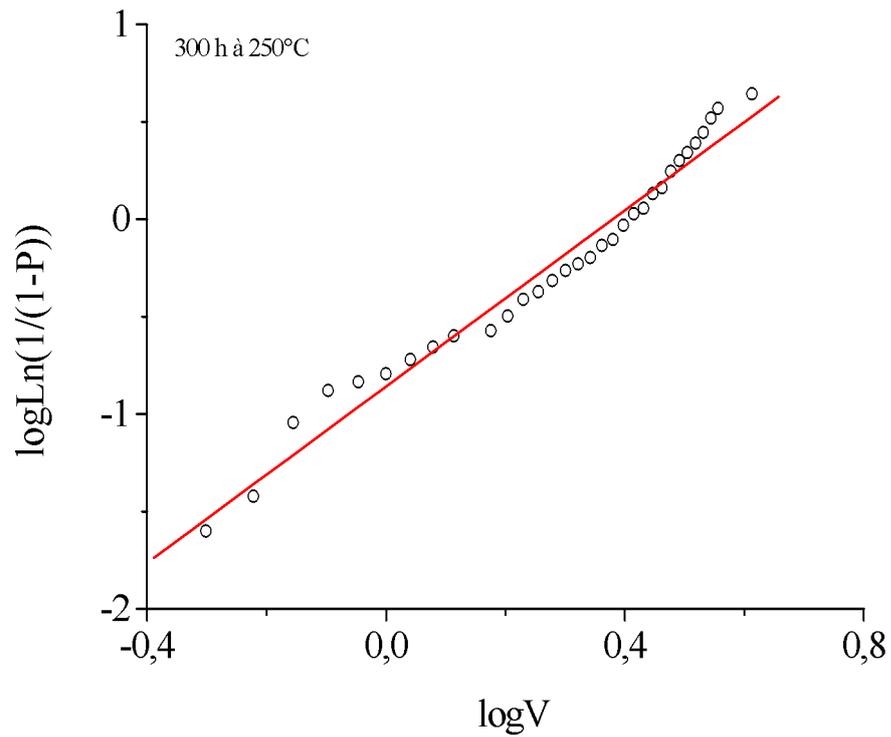


Figure IV.34. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 300 h de vieillissement à 250°C.

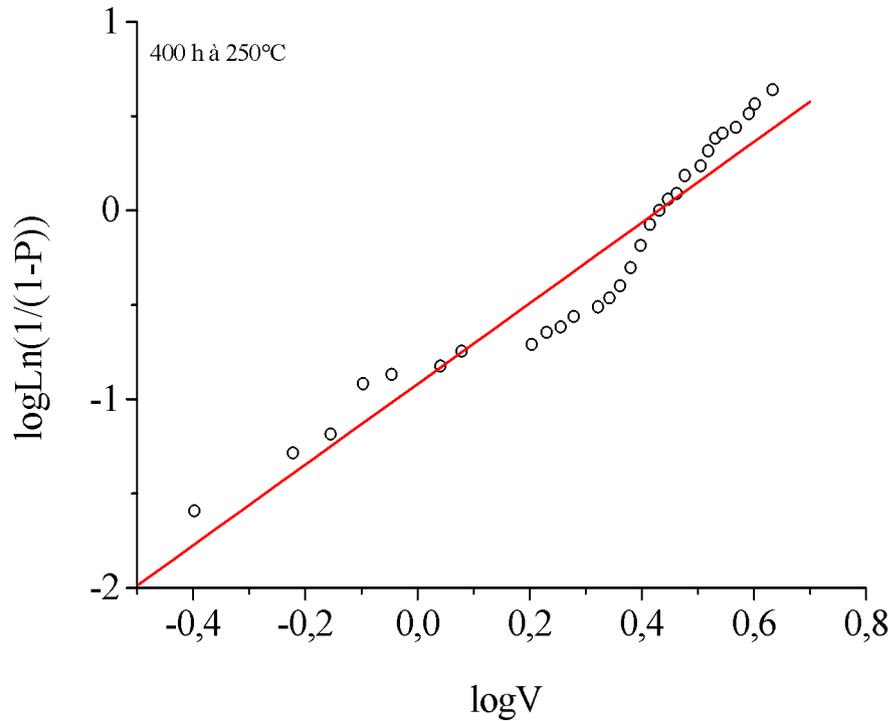


Figure IV.35. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 400 h de vieillissement à 250°C.

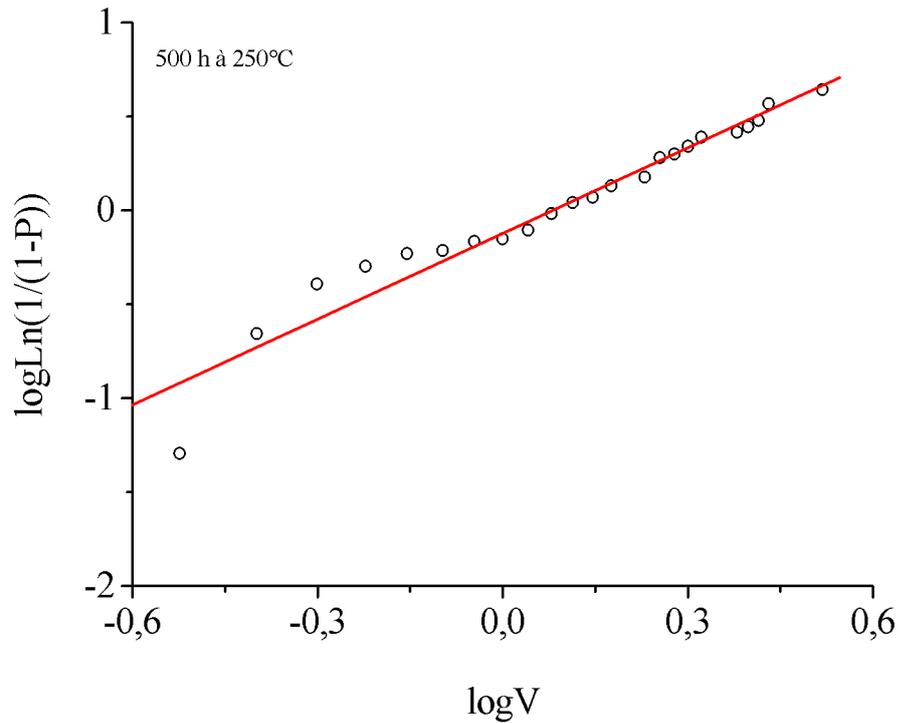


Figure IV.36. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 500 h de vieillissement à 250°C.

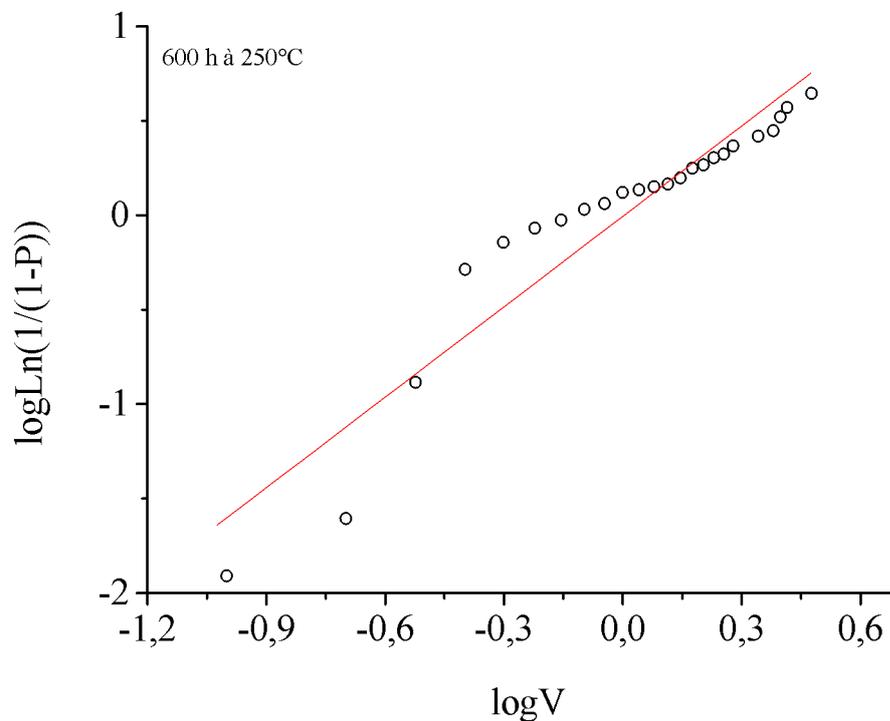


Figure IV.37. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 600 h de vieillissement à 250°C.

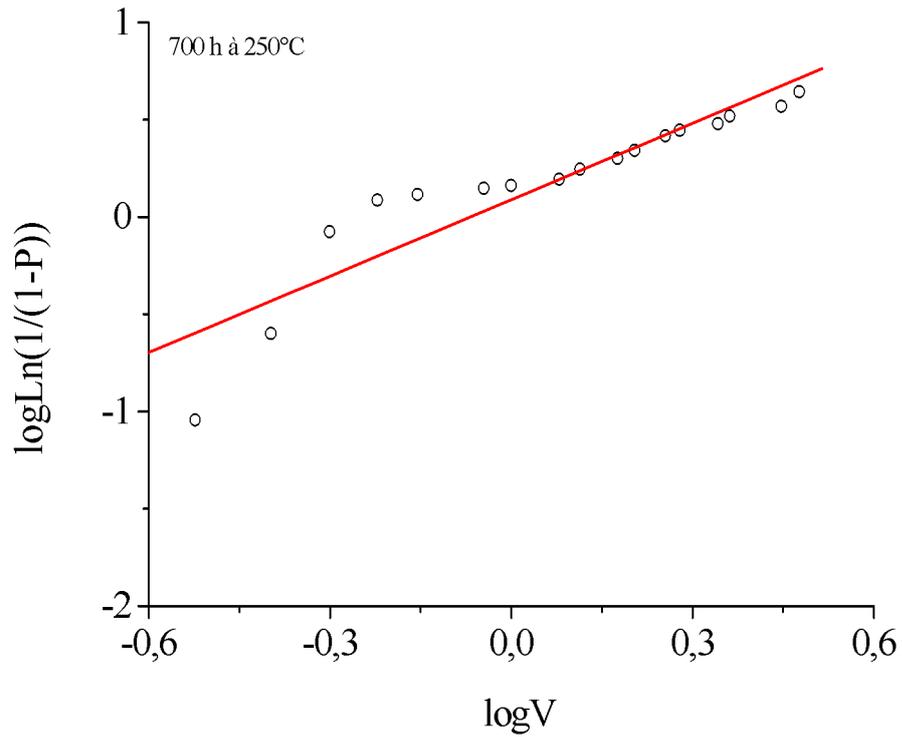


Figure IV.38. Diagramme de Weibull de la tension de claquage après 700 h de vieillissement à 250°C.

4.2. Variation de la tension nominale de claquage en fonction du temps de vieillissement

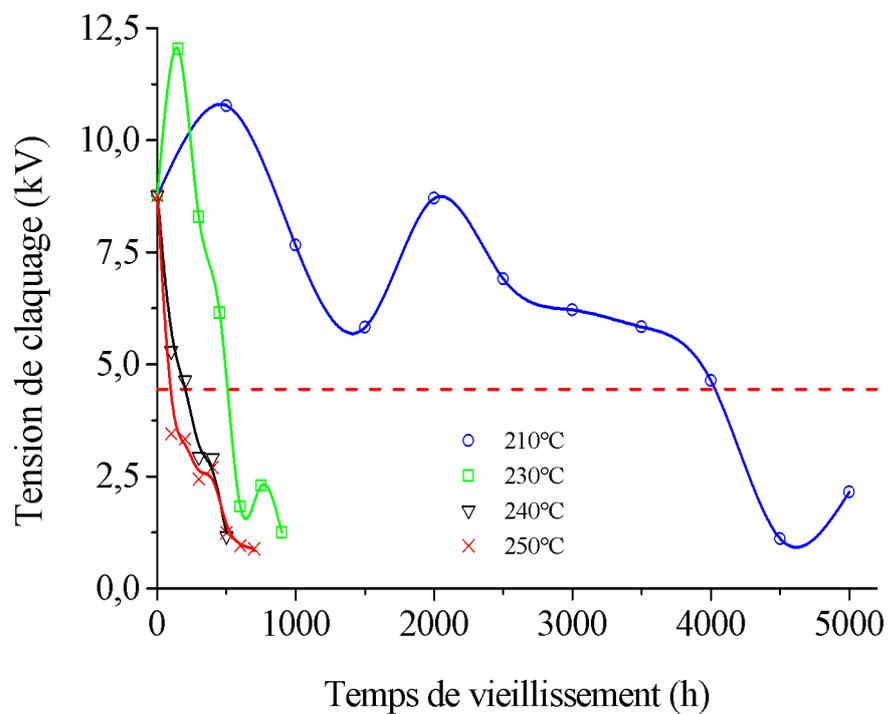


Figure IV.39. Variation de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement.

A la figure IV.39 est exposée la variation de la tension nominale (V_r) de claquage en fonction du temps de vieillissement (t) pour les différentes températures. Cette évolution peut être résumée comme suit :

- A 210°C, au début du vieillissement la tension de claquage augmente de 8,8 kV à 10,8 kV puis décroît rapidement jusqu'à 5,7 kV correspondant à un temps de vieillissement de 1417 h. Au-delà de temps, V_r croît jusqu'à 8,7 kV puis diminue en passant par un minimum correspondant à $V_r = 0,92$ kV et $t = 4614$ h, puis augmente légèrement et atteint 2,2 kV après 5000 h. La variation maximale est de 75%.
- A 230°C, V_r augmente jusqu'à 8,8 kV et atteint un maximum de 12,1 kV puis décroît brutalement à 1,6 kV après un temps de vieillissement de 633 h. Ensuite la tension de claquage augmente légèrement jusqu'à 2,3 kV et diminue à 1,3 kV pour $t = 908$ h. La variation maximale est 85%.
- A 240°C, la tension de claquage diminue rapidement de 8,8 kV à 1,2 kV correspondant à un temps de vieillissement de 500 h. La variation maximale est de 86%.
- A 250°C, V_r décroît de 8,8 kV à 0,9 kV après un temps de vieillissement de 715 h. La variation maximale est de 90%.

4.3. Variation du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement

L'évolution du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement est présentée à la figure IV.40. Les variations peuvent être décrites comme suit :

- A 210°C, la courbe présente deux maximums de 5,52 et 2,75 après des temps de vieillissement respectifs de 374 h et 2123 h. Au-delà d'un temps de 2984 h, le facteur de forme augmente de 1,82 à 2,13 correspondant à 3577 h, puis diminue jusqu'à 1,05 et reste pratiquement constant. La variation maximale est de 76%.
- A 230°C, le facteur de forme augmente de 4,44 à 5,52 puis diminue brusquement jusqu'à 1,09 après un temps de vieillissement de 652 h. Ensuite il augmente légèrement à 1,5 après 912 h. La variation maximale est de 74%.
- A 240°C, la courbe croît de 4,4 et atteint un maximum très nette de 6,47 pour un temps de vieillissement de 96 h puis décroît rapidement jusqu'à 0,95 après 517 h. La variation maximale est de 78%.

- A 250°C, la courbe a une évolution irrégulière avec une présence de deux pics de 3,7 et 3,1 après respectivement 204 h et 401 h de vieillissement. Après 706 h, le facteur de forme reste pratiquement constant. La variation maximale est de 75%.

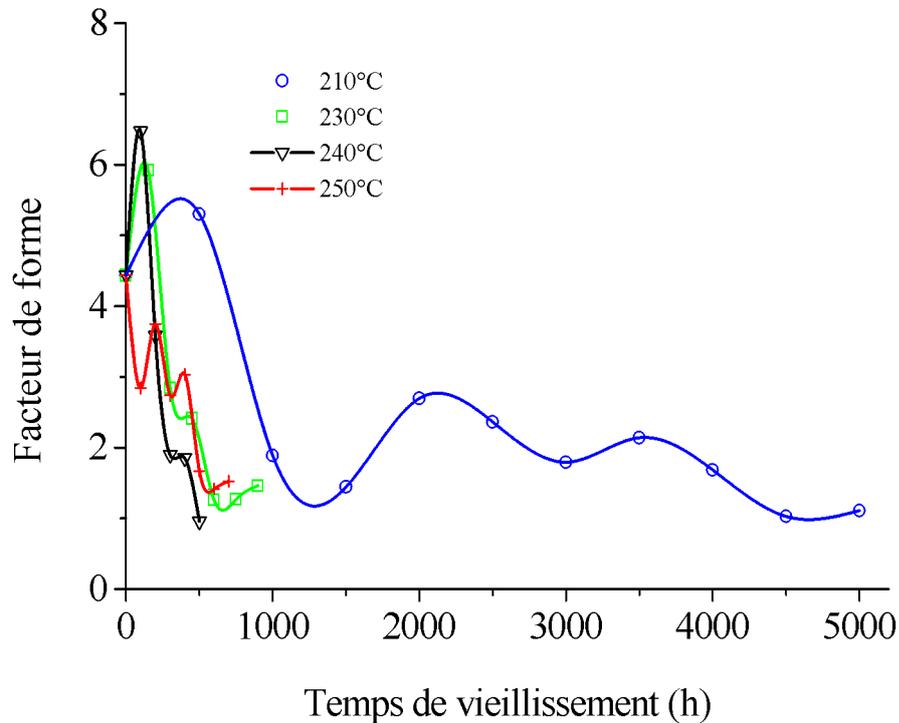


Figure IV.40. Variation du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement.

Chauvet [70] a montré, au cours de son étude sur la rupture diélectrique à court terme du polyéthylène, que plus le facteur de forme est grand, moins la distribution est dispersée. Nous pouvons conclure que la distribution des points expérimentaux est plus dispersée dans le cas d'un vieillissement de 508 h à 240°C correspondant à un facteur de forme de 0,96. De même, la distribution est moins dispersée pour un vieillissement de 96 h à 240°C dont le facteur de forme est de 6,51.

4.4. Courbe d'endurance thermique du matériau

Pour la détermination de la durée de vie du matériau, nous avons considéré un critère de dégradation correspondant à une diminution de 50% de la tension de claquage. A la figure IV.41 est présentée la courbe d'endurance thermique du polymère. Nous constatons que la courbe est droite. De plus, nous remarquons que plus la température de vieillissement est élevée, le matériau diélectrique se dégrade rapidement. Ce résultat est en accord avec la loi d'Arrhenius.

En exploitant la courbe précédente, nous avons déterminé l'indice de température du matériau pour une durée de vie de 20 000 h. Sa valeur est de 194°C. Cette valeur est plus grande que celle reportée dans le cas du vieillissement thermique du polyester - imide qui est de 182°C [10].

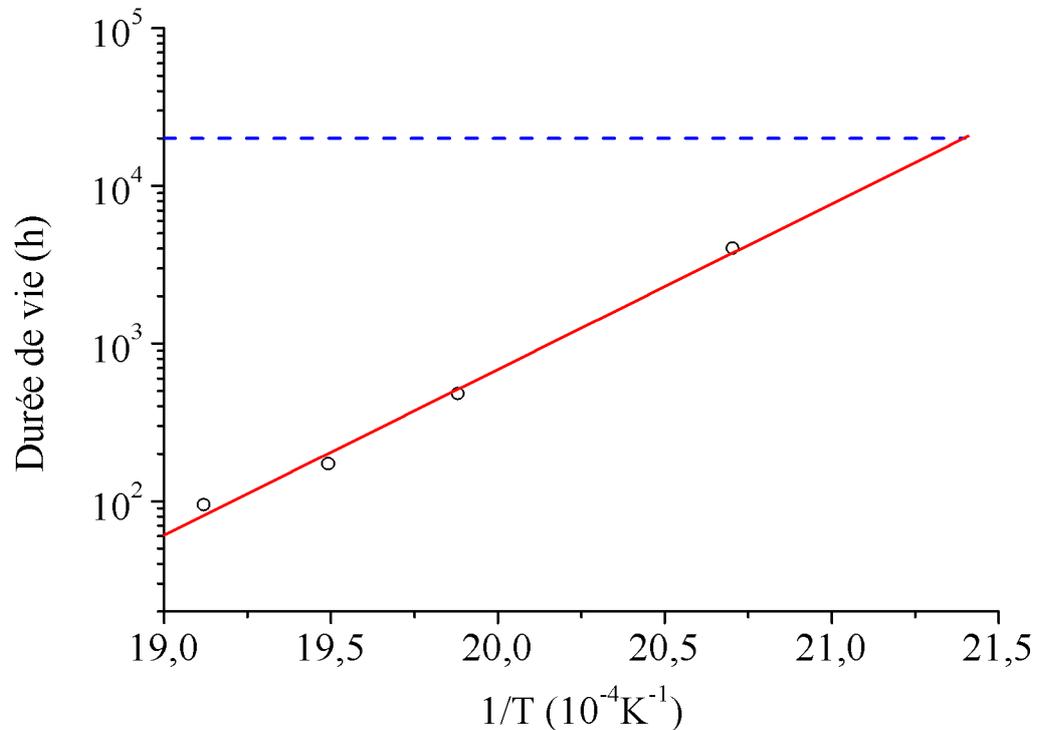


Figure IV.41. Courbe de durée de vie thermique du matériau.

5. Discussion et essai d'interprétation

D'après nos résultats, il ressort :

1. La dispersion des points expérimentaux varie d'une distribution à une autre. Pour une température donnée, nous remarquons que la dispersion est plus importante à la fin du vieillissement. Aussi, dans la plupart des cas, nous constatons, que les données sont plus dispersées pour les faibles probabilités.
2. La caractéristique donnant la valeur nominale de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement à 210°C présente deux pics sur attribués à la relaxation des dipôles présents à l'intérieur du polymère. La variation de la tension de rupture a atteint 90%. L'augmentation de la tension de claquage est due à la réticulation du polymère. Quant à sa diminution, elle est attribuée à la rupture de chaînes

- macromoléculaires. Plus la température de vieillissement est élevée, plus le polymère se dégrade rapidement, ce qui est en accord avec la loi d'Arrhenius.
3. Le claquage se fait par arborescence électrique dans le polymère. En effet, des défauts peuvent être introduits durant l'élaboration du matériau ou générés dans le polymère pendant le vieillissement. Quand le diélectrique est soumis à un champ électrique, des décharges partielles prennent naissance dans les défauts telles que les microcavités remplies de gaz où il y a intensification du champ électrique. De là, il y a initiation puis développement d'arborescence électrique conduisant à la rupture totale du mur isolant.
 4. Les courbes donnant le facteur de forme en fonction du temps de vieillissement ont une évolution irrégulière avec la présence de plusieurs pics. Ces variations traduisent la répartition aléatoire des défauts au sein du diélectrique durant le vieillissement. La variation maximale du facteur de forme a atteint 78%.
 5. Comme on peut le remarquer, il existe une certaine corrélation entre le facteur de forme et le facteur d'échelle (tension nominale de claquage).
 6. La courbe d'endurance thermique du polymère est une droite traduisant que le processus de dégradation est gouverné par une réaction chimique de premier ordre. On peut avoir éventuellement une action de l'oxygène (oxydation) et même une diffusion de cuivre dans l'isolant. Ces deux processus accélèrent le phénomène de dégradation.
 7. La dégradation du polymère est caractérisée par un changement de couleur du matériau du jaune au marron puis au noir ainsi qu'un dégagement de gaz. Dans le cas du vieillissement à 240°C et 250°C, nous avons observé même un effritement des éprouvettes.

Conclusion

Le travail présenté, dans ce mémoire, s'inscrit dans le cadre de l'étude du vieillissement thermique des isolants polymères. Elle concerne l'étude de l'endurance thermique d'émaux isolants de polyester – imide et de polyamide imide. L'évolution de la tension de claquage du matériau diélectrique en fonction du temps de vieillissement thermique a été étudiée.

Les valeurs obtenues de la tension de claquage ont été analysées statistiquement en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres. Le lissage des points expérimentaux a été effectué en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Pour chaque distribution de points expérimentaux, la meilleure droite de Weibull a été déterminée. Les paramètres d'échelle et de forme correspondant à chaque temps de vieillissement pour les différentes températures considérées ont été déterminés. La dispersion des points expérimentaux varie d'une distribution à une autre. Pour les faibles probabilités, la distribution des points expérimentaux est plus dispersée.

L'étude montre que la tension de claquage de l'isolation à base de polyester - imide et de polyamide imide varie en fonction du temps de vieillissement. Pour le vieillissement à 210°C, la caractéristique présente deux pics nets attribués à la relaxation des dipôles présents au sein du matériau. L'augmentation de la tension de claquage est due à une réticulation du matériau tandis que sa diminution est attribuée à une rupture de chaînes macromoléculaires. Cette diminution a atteint 90%. Plus la température de vieillissement est élevée, plus le polymère se dégrade rapidement. Ces résultats sont donc en accord avec la loi d'Arrhenius.

La rupture diélectrique se fait par arborescence électrique. Cette arborescence est initiée à l'endroit où le champ électrique est intensifié. Cette concentration de champ se produit dans des défauts tels que les vacuoles, impuretés, décollements à l'interface polymère – fil de cuivre. La propagation de l'arborescence mène à la destruction totale du matériau diélectrique.

L'évolution du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement traduit la répartition aléatoire des défauts au sein du diélectrique. La variation du facteur de forme a atteint 78%. Nous avons constaté une certaine corrélation entre la tension nominale de claquage et le facteur de forme. Quand la tension de claquage augmente, le facteur de forme croît aussi.

La dégradation du polymère est caractérisée par un changement de couleur (du jaune au marron puis au noir) et un dégagement de gaz. Pour les vieillissements à 240°C et 250°C, nous avons observé des fissures sur les éprouvettes.

La courbe de durée de vie du matériau est une droite traduisant que le processus de dégradation est gouvernée par une seule réaction chimique. Une action de l'oxygène de l'air et une diffusion de cuivre peuvent contribuer à l'accélération du processus de dégradation.

Comme perspectives, nous envisageons compléter ce travail par des analyses physico-chimiques: spectroscopie infrarouge (FTIR), analyse enthalpique différentielle (DSC), analyse thermogravimétrique (ATG) et microscope électronique à balayage (MEB),... etc. Ces analyses nous permettront de donner une interprétation au mécanisme de dégradation.

Bibliographie

- [1] James E. Mark, "Polymer Data Handbook", Oxford University Press, Inc., 1999.
- [2] F. Aymonino, "Contribution à l'étude du comportement des systèmes d'isolation de machines tournantes à courant alternatif fonctionnant à des hautes températures", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 2008.
- [3] G.V. Cekis, "Modern plastic", Handbook of plastics materials and technology, Vol. 63, pp. 37-55, 1990.
- [4] F. Kerkarine, "Effet de l'humidité sur la tenue diélectrique du polyamide imide", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [5] P. Coechlin, "Emaux isolants", Techniques de l'ingénieur (D 2630), 1996.
- [6] M.P. Stevens, "Polymer chemistry", Oxford University, second edition, 1990.
- [7] CEI 317-8, "Spécification pour types particuliers de fils de bobinage de section circulaire en cuivre émaillé avec polyester-imide de classe 180°C", 3^{ème} édition, 1990.
- [8] W. P. Chiang, W. C. Chiang, "Condensation polymerization of multi functional monomer and properties of related polyester resin, thermal properties of polyester imides varnished", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 35 pp. 1433-1439, 1988.
- [9] C. Marais, G. Villoueix, "Mise en œuvre et propriétés de la résine de polyamide", PMR 15, Matériaux et techniques, 1996.
- [10] M. Nedjar, "Investigation in thermal endurance of polyesterimide used in electrical machines", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 121, pp. 2886-2892, 2011.
- [11] M. Nedjar, Y. Mecheri, M. Lamure, C. Drouet, "Effect of moisture on the breakdown voltage of polyesterimide used in electrical machines", Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp 74-77, 2010.
- [12] 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 N°2, pp. 59-73, 2011.
- [13] J. Bost, "Matières plastiques, chimie, applications", édition Lavoisier, 1985.
- [14] M. Carrega, "Les polymères, de la molécule à l'objet", édition EDP Science, 1999.
- [15] P. Robert, "Matériaux de l'électrotechnique", édition Dunod, 1987.
- [16] M. S. Bhandanger, "Polyuréthanes", Polymeric Materials, Encyclopedia, CRC Press 1996.
- [17] J. P. Trotignon, M. Piperaud, J. Verdu, A. Dobraczynski, "Précis de matières plastiques, structures, propriétés, mise en œuvre et normalisation", édition Afnor et Nathan, 1984.

- [18] M. Baulé, “Polyuréthanes, mise en œuvre, critères de choix et applications”, Caoutchoucs et plastiques, N°575, pp 67-72, 1978.
- [19] B. Fallou, J. J. Blanchard, “Matériaux isolants solides, caractéristiques électriques”, Techniques de l’ingénieur, D 285, 1983.
- [20] P. Merot, “Polyimide linéaire”, Techniques de l’ingénieur, A 3 397, 1996.
- [21] E. Sugimoto, “Application of polyimide films to the electrical and electronic industries in Japan”, IEEE Electrical insulation Magazine, Vol. 5 N°1, pp 15-23, 1989.
- [22] J.C Dubois, “Propriétés diélectriques des polymères”, Techniques de l’ingénieur, E 1850, 1996.
- [23] J.K. Park, H.G. kim, J.T. Kim, D. C. Lee, “Electrical insulation properties of the polyimide prepared by VDPM”, Annual Report Conference of Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 281-284 1999.
- [24] R. Fournie “ Les isolants en électrotechnique, essais, Mécanismes de dégradation, Applications industrielles ”, Edition Eyrolles, Paris, 1990.
- [25] B. Pinel, F. Duchateau, “Fonction d’isolation dans les matériels électriques”, Techniques de l’ingénieur, D 2302, 1996.
- [26] J. Verdu, “Vieillessement physique des plastiques ”, Techniques de l’ingénieur, A 3150, 1996.
- [27] M. Dupeux, “Sciences des matériaux”, édition Dunod, Paris, 2008.
- [28] C. Menguy, “Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides”, Techniques de l’ingénieur, D 2310, 1996.
- [29] B. Fallou, “Comportement spécifiques des matériaux isolants soumis aux diverses contraintes (chaleur, champ électrique, radiations)”, RGE N°10, pp.756-767, 1985.
- [30] E. Moriane, “L’endurance thermique des isolants et système d’isolation. Incidence dans la construction des matériels, indices de température, contrôle de vieillissement thermique de différents matériaux isolants”, RGE N°7/8, pp 452-466, 1975.
- [31] P. Belloc, B. Fallou, “Etude du vieillissement thermique des matériaux utilisés dans la construction électrique”, RGE N°1, pp. 243- 264, 1970.
- [32] B. Fallou, “Caractéristiques des isolants solides, méthodes de mesure, valeurs et signification”, Techniques de l’ingénieur, D214 et D215, 1970.
- [33] CEI 216-1, “Méthodes générales pour la détermination des propriétés d’endurance thermique, des indices de températures et des profils d’endurance thermique”, 1974.

- [34] Z. Szczepanski "Uktady izolacyjne urzadzen elektroenergetyczne" praca zbiorowa W.W.T, Varsovie 1978.
- [35] G. Stevens, B. Fallou, A. Day, "Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants", CIGRE rapport N°3 groupe 15, 1982.
- [36] L. Deschanps, C. Caillot, M. Paris, J. Perret "l'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles HT et THT", RGE N°5, pp. 343-359 1983.
- [37] L. Simoni "Aging theory of engineering materials" Altra frequenza, volume XLII N° 10, pp. 501-509, 1973.
- [38] E. L. Brancato, "Insulation aging, historical and critical review", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.EI-13, pp. 308-317, 1978.
- [39] J. Carlier, "L'endurance thermique des isolants et systèmes d'isolation, incidence dans la construction des matériels, classification thermique des systèmes d'isolation des machines électriques de grande puissance", RGE N° 7/8, pp. 467-469, 1974.
- [40] M. Chatin, "Plastiques", Techniques de l'ingénieur, A 3000, 1986.
- [41] J. Gossot, "Les matières plastiques – fabrication et technologie", Edition Dunod, techniques, 1977.
- [42] J. Verdu, "Vieillissement chimique des plastiques : aspects généraux", Techniques de l'ingénieur, AM 151, 1996.
- [43] A. Nedjar, A. Beroual, A. Boubakeur, "Influence of thermal aging on the electrical properties of poly (vinyl chloride)", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 102 pp 4728-4733, 2006.
- [44] J. Verdu, "Différents types de vieillissement chimique des plastiques", Techniques de l'ingénieur, AM3152.
- [45] J. Verdu, "Vieillissement des plastiques" AFNOR Techniques, édition Eyrolles, Paris, 1984.
- [46] M. Nedjar, "Influence de vieillissement thermique sur les propriétés du PVC", Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 1991.
- [47] S. Luzauriaga, J. Kavarovo, I. Forteluly, "Degradation of pre-aged of polymer exposed to simulated recycling: properties and thermal stability, Polymer degradation and stability", Vol 91 ISSAS 6, pp. 1226-1232, 2006.
- [48] M. Nedjar, A. Beroual, A. Boubakeur " Thermal aging of polyvinyl chloride used in electrical insulation" , Annales de Chimie, Science des Matériaux, Vol. 38, pp 97-104, 2003.

- [49] Y. Mecheri, "Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylènes réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles moyenne tension", Thèse de Doctorat, ENP, 2008.
- [50] M. Kovarskii, N. G. Annekova, V. V. Cur'Yanova, A. B. Blyumenefel'D "The mechanism of oxidation of polyimides", Poly. Sci, USSR, vol1, pp. 2783-2790, 1973.
- [51] F. P. Gay, C. E. Berre, "Polypyromellitimides, details of pyrolysis", J. Polym. Sci, Vol 8, pp. 1935-1943, 1970.
- [52] P.N. Gribkova, V. V. Rod, Y. S. Vygodskii, S. V. Vinogradova, V. V. Korshak, "Degradation of aromatic polyamide at high temperature" Polym, sci, USSR Vol.12, pp.252-263, 1970.
- [53] V.V. Rod, P.N. Gribkova, Y.S. Vygodskii, S.V.Vinogradova, V.V. Korshak, "Influence of amide groups as links in polyamides in their thermal stability", Polym, Sci, USSR, Vol 10, pp. 1780-1787, 1968.
- [54] C. Sagnier, "Polyamide imide, polycondensation avec les Diisocyanates: microstructure, mécanismes de formation, mécanismes de dégradation thermo oxydante", Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard de Lyon, 1995.
- [55] S. Ghosh, D. Khastgir, A. K. Bhowmick, P. G. Makunda "Thermal degradation and ageing of segmented polyamides", Polymer degradation and stability, pp. 427-436, 2000.
- [56] B. Petigas, G. Seytre, O. Gain, I. Royauand, A. Serghei, A. Girmenz, A. Anton "High temperature aging of enameled copper wire-relationship between chemical structure and electrical behavior", Annual Report Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.84-88, 2011.
- [57] L. Dutruch, "Etude de la réticulation, de vieillissement et de la dégradation de bisnamides: couplage analyse thermo-gravimétrique-chromatographie en phase gazeuse", Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard de Lyon, 1996.
- [58] E. D. Owen, "Degradation and stabilization of PVC", Elsevier, 1984.
- [59] 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.
- [60] I. Bazovski, Fiabilité, théorie et pratique de la sureté de fonctionnement", Editions Dunod, 1966.
- [61] L.A. Dissado, J.C. Fothergill, "Electrical degradation and breakdown in polymers", G.C. Stevens, 1992.

- [62] A. Polard, C. Rivoire, “Fiabilité et statistiques prévisionnelles : La méthode de Weibull”, Editions Eyrolles, 1971.
- [63] 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.
- [64] W. Weibull, “A statistical distribution of wide applicability”, Journal of Applied Mechanics, Vol.18, pp.293-297, 1951.
- [65] J. Lamon, “Mécanique de la rupture fragile et de l’endommagement, approches statistiques et probabilistes”, Lavoisier, septembre 2007.
- [66] 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.
- [67] 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, 1989.
- [68] M. Nedjar, A. Bérroual, “Electrical aging of polyurethane under AC voltage”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 109, pp. 789-794, 2008.
- [69] 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.
- [70] 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.
- [71] J.M. Oudin, Y. Reyroll, H. Thevenon, “Théorie statistique de claquage électrique”, RGE, N°4, pp. 430-436, 1968.
- [72] N. Khaleche, A. Boubakeur, A. Ouabdeslam et C. Laurent, “Application de la loi de Weibull aux phénomènes de vieillissement et de l’évaluation de la durée de vie du polychlorure de vinyle”, 2^{ème} CEA94, Algérie, Novembre 1994.
- [73] C. Simon, “Champs de seuil et fiabilité des câbles haute tension”, Journées d’Etudes internationales sur les câbles d’énergie à isolant synthétique, pp. 226-232, 1987.
- [74] 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.
- [75] D. François, “Endommagements et rupture de matériaux”, EDP Sciences, Paris, 2004.
- [76] L.A. Dissado, “Theoretical basis of the dielectric breakdown”, J. Phys. D Appl. Phys, Vol. 23, pp. 1582-1591, 1990.

- [77] 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.
- [78] C. Simon, "Recherche de la fiabilité des câbles exposés à des contraintes du gradient électrique", RGE, tome 80, N° 11, pp. 831-836, 1971.
- [79] 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.
- [80] 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.
- [81] 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.
- [82] 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", 2000.
- [83] IEEE Guide for the statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data, ANSI/ IEEE Std. 930, 1987.
- [84] F. Bournane, M. Bournane, M. Nedjar, A. Béréal, "Apport de la loi de Weibull à la compréhension de la rupture diélectrique des isolants solides", Algerian Journal of Technology, Série B, Numéro Spécial, Proceedings de la 4^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, 16-17, pp.103-106, 2002.
- [85] J.F. Lawless, "Confidence Interval estimation for the Weibull and extreme-value distribution", Technometrics, Vol. 20, pp. 355-363, 1978.
- [86] J.F. Lawless, "Construction of tolerance bounds for the extreme-value and Weibull distributions", Technometrics, Vol. 17, N° 2, pp. 255-261, 1975.
- [87] G.C. Stone, J.F. Lawless, "The application of Weibull statistics to insulation ageing tests", IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol. EI-14, N°5, pp. 233-239, 1979.
- [88] J. Jacquelin, "Generalization of the method of maximum likelihood", IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 28 No.1, pp. 65-72, 1993.