

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULoud MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Magister en électrotechnique

Option : Entraînements Electriques

Présenté par :

BOUAZIZ Nadia

Thème :

Effet du vieillissement thermique sur la tenue diélectrique du polyester-imide utilisé dans les machines électriques.

Devant le jury composé de :

Rachid CHAIBI, Professeur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou,
Mohammed NEDJAR, Professeur, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou,
Hassane MOHELLEBI, Professeur, Université de Tizi-Ouzou,
Youcef SADAoui, Maître de conférences A, Université de Tizi-Ouzou,
Samy Hassani OULD OUALI, Maître de conférences B, Université de Tizi-Ouzou,

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

Soutenu le : 08 Mai 2012.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire, germé d'un arbre qui a puisé toute sa force de la volonté du tout puissant afin d'orner ses branches d'un fruit bien façonné, a nécessité l'investissement de maintes personnes participant de près ou de loin à ce que mes efforts soient récompensés de ce modeste travail. Pour cela, et visant à exprimer à tout un chacun mes sincères reconnaissances de leurs contributions ;

En premier lieu, ma reconnaissance va au professeur NEDJAR Mohammed, mon Directeur de mémoire pour tous ce qu'il avait fait pour moi. Le travail avec lui m'a appris que l'échec ne tue pas mais il nous rend de plus en plus puissant et que l'échec n'est qu'un ensemble d'expériences qui précèdent la victoire.

Mes remerciement vont également aux professeurs CHAIBI Rachid et MOHELLEBI Hacène et aux Docteurs SADAoui Yacine et OULD OUALI Samy Hassani qui ont accepté de faire partie du Jury de mémoire. Une reconnaissance particulière à Messieurs CHAIBI , MOHELLEBI et OULD OUALI de les avoir comme enseignant durant ma formation en poste graduation Entraînements Electriques.

De même, je tiens à remercier le Directeur de l'Entreprise Electro-industries, qui m'a donné son accord et m'a permis de réaliser les essais en rapport avec ma présente étude au sein de ses laboratoires, ainsi que tous les travailleurs que j'y ai connus et qui m'ont à leur tour bénéficié de leurs expériences professionnelles durant toute la période que j'ai passé en leur compagnie.

Je manifeste aussi mon entière gratitude au responsable du laboratoire de Haute Tension de l'Université de Bejaïa et particulièrement au Docteur HERZINE Mohammed Seghir de m'avoir orienté et guidé durant la réalisation des essais de claquage et surtout de mettre à ma disposition tout le matériel du laboratoire et particulièrement l'étuve de vieillissement pour une période de neuf mois environ. Merci de m'avoir permis de bien accomplir mes expériences même si cela nécessitait, des fois, de travailler durant des heures tardives dans la soirée.

Une attention particulière est adressée aux bibliothécaires de la faculté de Génie Electrique et d'Informatique qui m'ont tout le temps et à toute heure facilité l'accès aux différents ouvrages qui ont pris part dans la constitution de mon mémoire et qui s'ajoute ainsi à la liste de ma bibliographie.

Je remercie mes amis et mes collègues du département d'électrotechnique, préparant leurs mémoires de Magister, avec lesquels je partageais les mêmes soucis de m'avoir aidé d'une façon ou d'une autre à réaliser ma présente recherche.

Je remercie également tous mes collègues de la direction de l'Energie et des Mines de la wilaya de Tizi Ouzou pour leurs encouragements et particulièrement ma chère amie AICHA.

Enfin, une grande reconnaissance est réservée à mes parents et aux membres de mes deux familles qui ont sus m'aider avec leur amour et leur estime nourris de patience et de compréhension.

Actuellement, les exigences en termes de fiabilité des machines électriques ne cessent d'accroître non seulement chez les utilisateurs mais aussi chez les fabricants. La machine électrique constitue un système d'éléments ; le défaut dans l'un d'entre eux conduit à la réduction de la capacité liée à des exigences minimales. Ce défaut peut être le résultat d'une dégradation normale, une mauvaise conception, une mauvaise utilisation, ... ou une combinaison de ceux-ci. Si le défaut n'est pas détecté ou s'il est laissé se développer, il conduira à une défaillance de l'élément qui provoquera l'arrêt prématuré de la machine.

En ce moment, les enquêtes industrielles et les études statistiques sur les défauts dans les machines électriques ont montré qu'un grand pourcentage de leur défaillance résulte des défauts liés aux enroulements. Plusieurs études ont démontré que la majorité des défauts de bobinage résultent de la détérioration de l'isolation des fils. Généralement cette défaillance démarre à partir d'un défaut entre spires qui se développe en entraînant finalement des défauts entre les bobines.

L'isolation des enroulements d'une machine est soumise à des contraintes thermiques (échauffement), mécaniques et électriques. En effet, il est indispensable de comprendre les mécanismes et phénomènes de vieillissement conduisant soit à la perte des propriétés fonctionnelles, soit à la rupture diélectrique des émaux isolants.

Le présent manuscrit s'inscrit dans le cadre du vieillissement thermique des isolants solides. Le but est d'établir la caractéristique de durée de vie du polyester-imide en fonction de la température. Les essais ont été réalisés au niveau du laboratoire de Haute Tension de l'université de Béjaia. Les éprouvettes ont été réalisées au Laboratoire de Physique de l'Entreprise « Electro-Industries » sise à Azazga.

L'objectif du présent travail est d'étudier l'effet du vieillissement thermique sur la tenue diélectrique du polyester- imide utilisé dans l'isolation de machines électriques. Une étude statistique des données de la tension de claquage a été faite en utilisant le modèle de Weibull. Ce mémoire comporte cinq chapitres répartis en deux parties principales. Les trois premiers chapitres constituent la première partie concernant la recherche bibliographique. Les deux derniers sont réservés à la partie expérimentale.

Le premier chapitre est consacré à une présentation des propriétés physiques et chimiques du polyester- imide, sa formulation chimique et ses différentes applications dans les systèmes d'isolation de machines électriques.

Le deuxième chapitre est réservé à une synthèse de l'effet du vieillissement thermique sur les propriétés des isolants solides. Une méthode de prédiction de la durée de vie (modèle d'Arrhenius) sera présentée.

Le troisième chapitre concerne les modèles statistiques appropriés à la rupture diélectrique. Nous nous sommes intéressés en particulier au modèle statistique de Weibull et son application à la caractérisation de la tenue diélectrique des isolants solides.

Dans le quatrième chapitre sont décrites les différentes techniques expérimentales de réalisation et de conditionnement des éprouvettes, étuves de vieillissement, générateur de haute tension continue et alternative.

La présentation et l'exploitation des différents résultats obtenus font l'objet du dernier chapitre. Les diagrammes de Weibull à deux paramètres seront exposés. Les caractéristiques de durée de vie du polyester-imide seront présentées. L'énergie d'activation et l'indice de température ont été déterminés. Enfin, le chapitre se termine par une étude comparative des valeurs obtenues, une tentative de discussion et un essai d'interprétation des résultats obtenus.

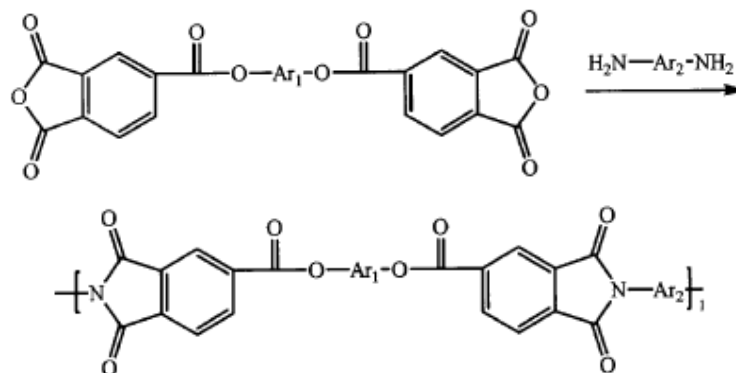
Finalement, nous terminons cette étude par une conclusion générale dans laquelle sont présentés les résultats avec des perspectives sur ce travail.

L'émail constitue l'isolation de machines électriques. Selon la température d'utilisation, il peut être constitué d'une ou de plusieurs couches de polymère de même nature ou de natures différentes [1]. Dans le présent chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude d'un matériau constitutif de l'émail qui est le polyester- imide.

1. Présentation du polyester- imide

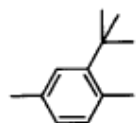
1.1. Formulation chimique

Les polyester- imides sont généralement obtenus par la réaction entre les dianhydrides contenant des liaisons ester avec des diamines [2, 3-5]. La figure I.1 donne la structure chimique du polyester-imide [6] :

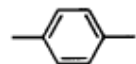


avec:

Ar₁

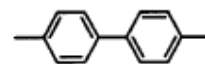


BPBDA

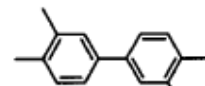


PBDA

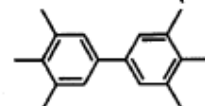
Ar₂



BZD



OTOL



TMBZD

BPBDA : t- Butyl- P- dioxybenzene bisecteranhydride

PBDA: Phenylene- bis (trimellitate) dianhydride

BZD : Benzidine

OTOL: O – tolidine

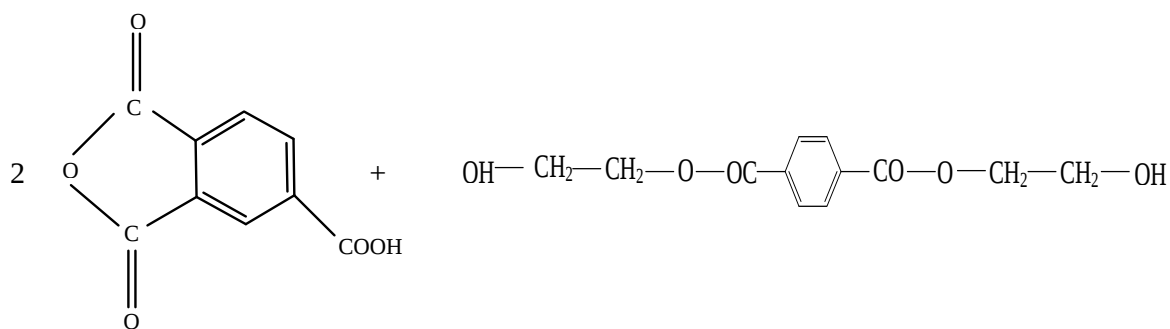
TMBZD: 3, 3, 5, 5-tetramethyl benzidine

Figure I.1 Formule chimique du polyester- imide [6].

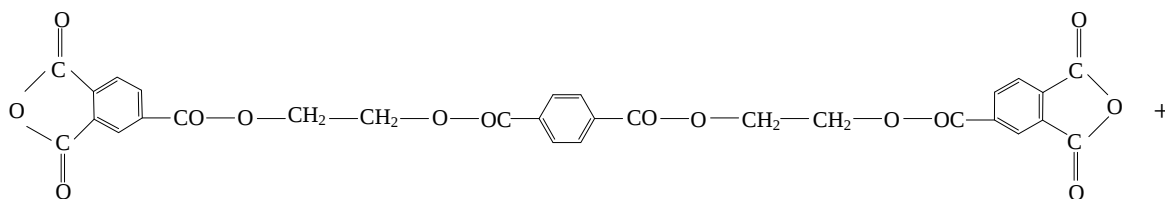
1.2. Réaction générale de synthèse du polyester-imide

Des séries de polyester-imide basées sur le bis (trimellitates) dianhydride aromatique dans la chaîne principale sont préparées par polycondensation de t- Butyl- P- dioxybenzene bisecteranhydride (B.P.B.D.A) et Phénylene- bis (trimellitate) dianhydride (P.B.D.A) avec benzidine (BZD) et leurs dérivés [6].

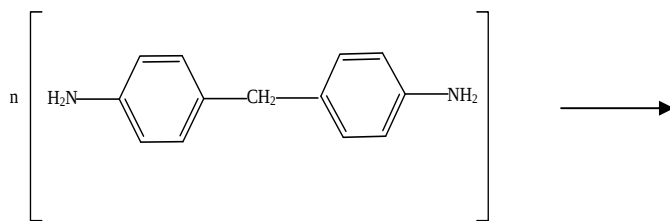
Le mode d'obtention d'un polyester-imide type a été proposé par Elias et Vohwinkel. Il est préparé en traitant l'anhydride 4 -carboxyphtalique par le bi (2- hydroxyethyl) terephthalate. Ils ont obtenu un produit intermédiaire avec des groupements anhydrides terminaux [3]. La figure I.2 présente le mécanisme général de synthèse du polyester-imide.



Sous l'effet d'imidation, on obtient le dianhydride intermédiaire qui sera ensuite traité par une diamine avec le 4-4-diaminediphénylméthane pour conduire au polyester- amide-acide.

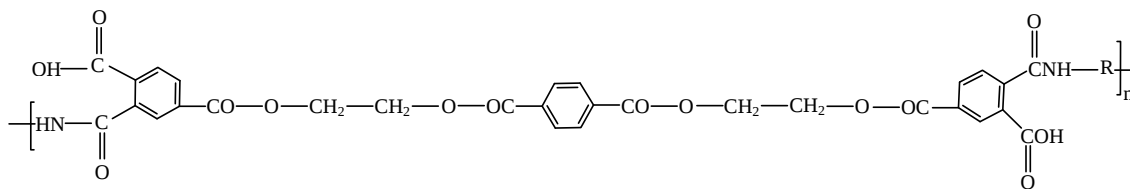


Dianhydride intermédiaire



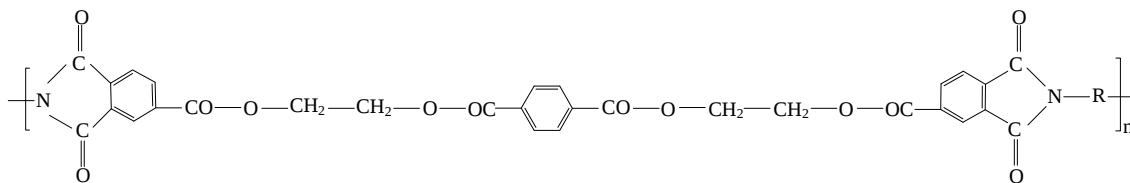
Diamine

On obtient le pré-polymère amide acide suivant:



Pré- polymère amide acide

Sous l'effet de la chaleur, on obtient une cyclisation



Polyester- imide

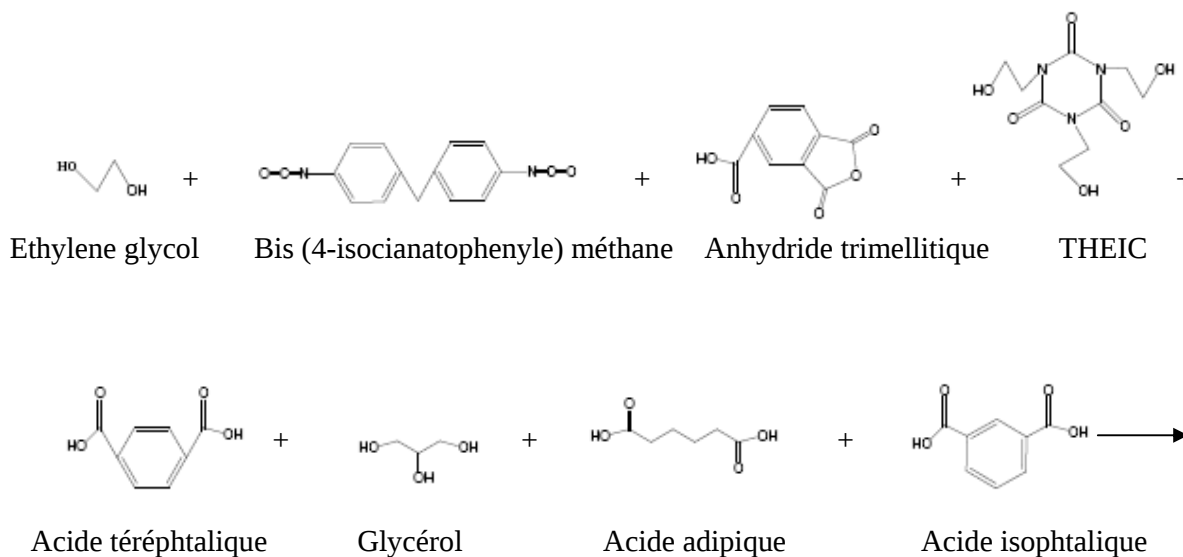
Figure I.2. Mécanisme général de synthèse du polyester- imide [3].

1.3. Polyester-imide au THEIC

Il existe des polyester-imides au Tri-(2-Hydroxyethyl) Isocyanurate (PEI au THEIC) qui se caractérisent par leur classe thermique de 200 °C, mais surtout leur thermoplasticité se trouve augmentée (>320°C). Ces vernis sont utilisés sur des diamètres de 0,1 à 5 mm. Ils sont très souvent employés en sous couche de polyamide-imides pour obtenir des fils de classe de 200°C [1].

1.4. Synthèse du polyester-imide à partir du THEIC

La figure I.3 suivante présente les réactions de formation d'un polyester- imide à partir du THEIC [1] :



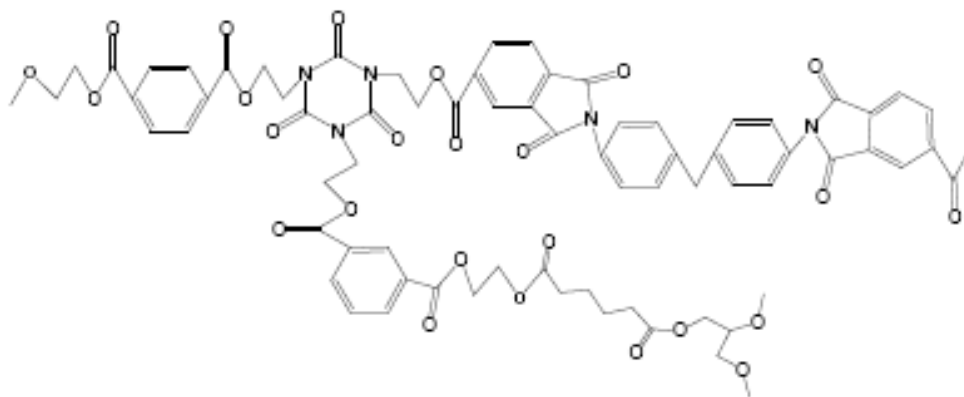


Figure I.3 Schéma type de synthèse de polyester-imide à partir du THEIC.

Lors de la réaction de polycondensation, il y a dégagement de CO_2 et de H_2O . L'introduction du THEIC complexifie la structure de l'émail, augmente sa tenue en tension ainsi que sa plasticité. La présence de composés trifonctionnels fait de ce matériau (polyester-imide) un polymère réticulé [1].

I.5. Propriétés

Le polyester-imide est un matériau infusible : il possède une bonne résistance chimique ainsi qu'une bonne adhésion sur le cuivre. Il est peu hydrophile. Son indice de température (IT) correspondant à une durée de vie conventionnelle de 20 000 heures [7], se situe entre 180°C et 200°C . La Figure I.4, représente l'indice de température (Point T) [1]. Ce dernier est utilisé par les constructeurs pour s'assurer de la qualité du fil émaillé.

a) Classe thermique

C'est la température maximale de fonctionnement des bobinages. Pour le polyester - imide, elle est définie par les normes CEI 85 et CEI 34-1[1] :

- classe H : 180°C .
- Classe C : 200°C .

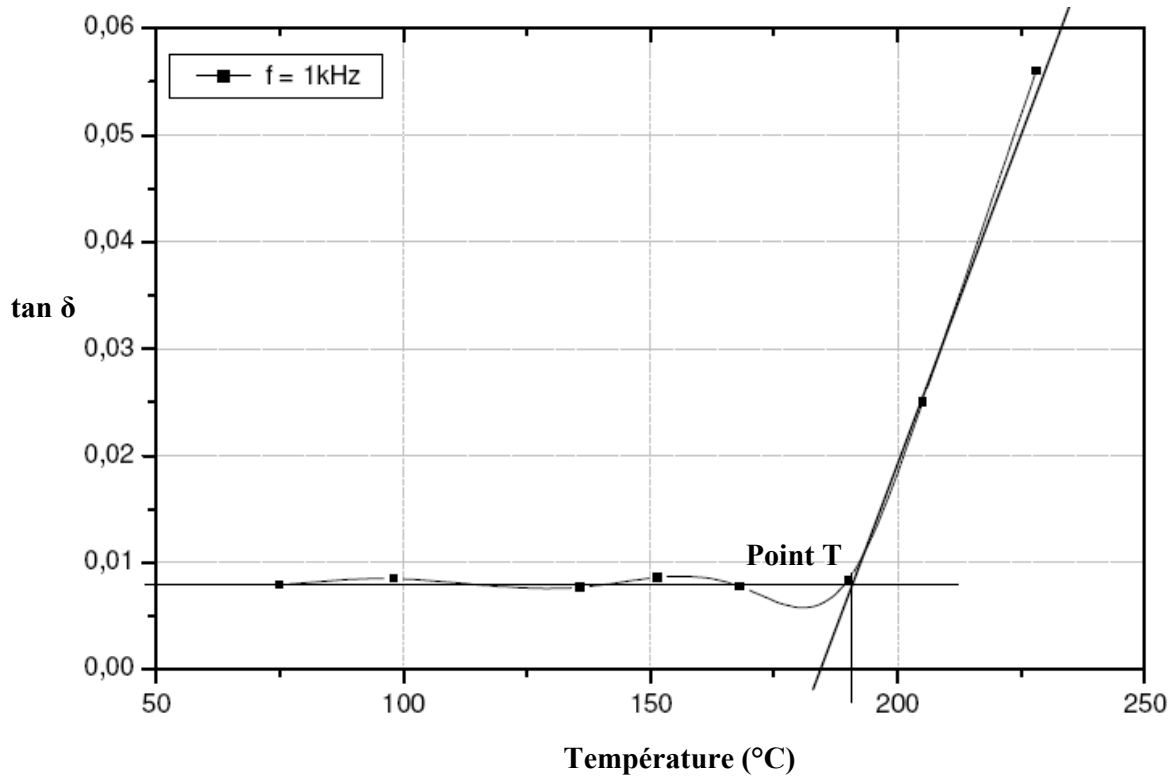


Figure I.4. Indice de température du polyester- imide [1].

b) Constante diélectrique

La permittivité absolue (ε) est le produit de la permittivité relative (ε_r) par la constante diélectrique du vide (ε_0):

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$$

$$\text{Avec: } \varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-19} \text{ F.m}^{-1} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$$

La valeur de la permittivité relative est toujours supérieure à 1, elle est fonction de la nature du matériau. Elle représente l'accroissement de la quantité de charges stockées du fait de l'insertion du milieu diélectrique entre les deux plaques d'un condensateur [8]. Pour une épaisseur de 0,01 mm, la constante diélectrique des émaux isolants, à $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, est $\varepsilon_r = 4,5$ [9].

c) Rigidité diélectrique et tension de claquage

Pratiquement, la rigidité diélectrique représente le rapport entre la tension de claquage et la distance entre les électrodes auxquelles cette tension est appliquée dans des conditions d'essai spécifiées. Pour que cela soit tout à fait exact, il conviendrait que le champ soit uniforme, c'est-à-dire que les électrodes soient planes et parallèles avec des bords tels qu'ils ne provoquent en aucun point le renforcement du champ [10].

La tension de perforation des émaux de polyester- imide à $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ et $(50 \pm 5) \%$ d'humidité, pour une épaisseur de 0,01mm, est selon la norme DIN53481 [11], égale à 760 V.

d) Souplesse et adhérence

Les émaux de polyester-imide possèdent, en général une très bonne souplesse et une bonne adhérence au cuivre mais une thermoplasticité assez faible. On les retrouve sur des diamètres de 0,03 à 0,8 mm [1].

e) Propriétés physiques

La courbe de figure I.5 montre l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction de la température. La température de transition vitreuse (T_g) sépare l'état vitreux de l'état élastique. Alors que la température de fusion ou de plasticité (T_p) sépare les deux états élastique et plastique.

Selon les résultats obtenus par F. Aymonino, la température de transition vitreuse du polyester- imide est égale à 180°C et la valeur de la température de plasticité est égale à 270°C [1].

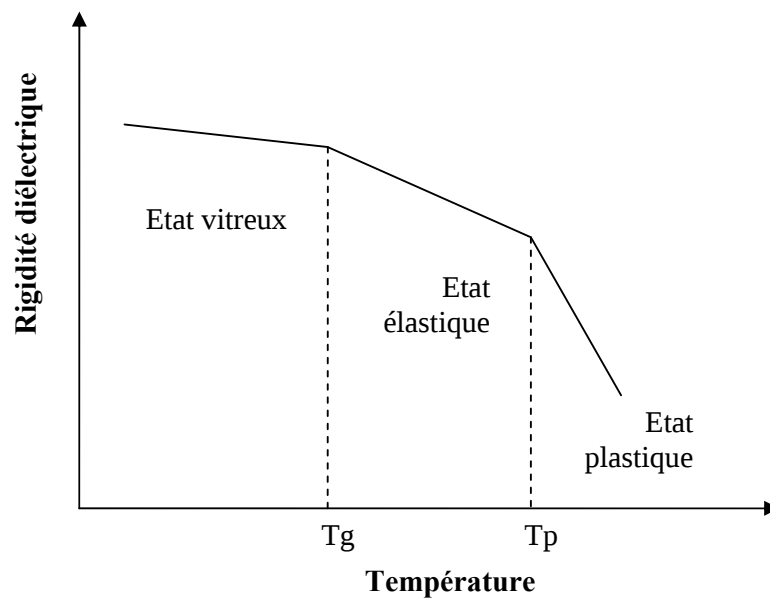


Figure I.5 Evolution de la rigidité diélectrique en fonction de la température [1].

f) Autres

Les émaux de polyester- imide sont aussi caractérisés par :

- Séchage à une température voisine de 145°C [12].
- Selon les recommandations de la norme DIN 53482 [13], pour une épaisseur de 0,01 mm, on obtient une résistance d'isolement spécifique ρ à $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ qui vaut $10^{14} \Omega.cm$ après une minute.
- Une absorption d'humidité de 0,5 % après 96 h dans l'eau selon la norme DIN 53483 [9].

2. Domaines d'application

Les applications des émaux de polyester- imide concernent une grande gamme de fils, de section circulaire ou rectangulaire de toutes dimensions pour les utilisations très étendues aussi bien en électrotechnique qu'en électronique [12]. Dans les applications à fréquence industrielle

et à courant continu, les principales propriétés nécessaires de ces émaux sont la résistance mécanique, la stabilité thermique et la résistance aux agents chimiques [2].

Les émaux du polyester-imide sont très utilisés dans les systèmes d'isolations de machines électriques notamment les machines asynchrones, pour assurer les fonctions suivantes [1] :

- l'isolation entre les différents conducteurs jointifs d'une même bobine : c'est l'isolation entre spires.
- l'isolation entre les différentes phases du moteur (en triphasé).
- L'isolation des enroulements par rapport à la carcasse métallique.

Les émaux du polyester-imide sont très utilisés dans les systèmes d'isolation de machines tournantes alternatives fonctionnant sous très haute température dont le domaine d'application principal est celui de désenfumage des tunnels et parking souterrains lors d'incendies.

Plusieurs études de l'effet de la température sur les isolants électriques ont été effectuées, nous pouvons citer à titre d'exemple les travaux de Montsinger en 1930 [14]. Il avait présenté une règle empirique décrivant le doublement de la durée de vie pour un abaissement de 10°C de la température de l'isolation au papier de transformateur [14].

1. Vieillessement thermique des polymères

On appelle vieillissement, tout phénomène à l'exception des phénomènes purement mécaniques tels que le fluage ou la fatigue, se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés d'un matériau [15]. Cette évolution ne fait intervenir que le matériau, l'atmosphère et la température. Comme elle peut faire intervenir aussi des phénomènes purement physiques: évolution de la morphologie, dégazages, migration de plastifiants,... ou des phénomènes chimiques. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique des polymères ou dans certains cas seulement les additifs [15]. Le vieillissement thermique peut être continu ou par cycle [16].

2. Vieillessement chimique

Lorsqu'un polymère est porté à des températures élevées, il subit des phénomènes de dégradation thermique. Le vieillissement chimique s'accompagne de modifications structurales irréversibles du réseau macromoléculaire.

Selon l'environnement gazeux considéré, il est nécessaire de tenir compte de la dégradation par thermolyse, processus purement thermique, et de la thermo-oxydation en cas de présence d'oxygène qui implique les effets combinés de la température et de l'oxydation.

2. 1. Effets de la dégradation thermique des polymères

Sous une atmosphère inerte, les avis divergent sur l'importance relative à accorder aux mécanismes purement thermiques de thermolyse. D'après Van Krevelen, les effets les plus importants de la dégradation thermique sont la dépolymérisation et les coupures statistiques de chaînes [17].

Par contre Verdu distingue quatre familles de processus pouvant avoir lieu, à savoir : les coupures statistiques de chaînes qui interviennent dans le réseau, la dépolymérisation c'est-à-dire la reformation des unités structurales initiales, la réticulation et les réactions au niveau des groupements latéraux [18].

2.1.1 Scission de chaînes et réticulation

Le processus de réticulation est caractérisé par la formation de ponts covalents, entre les segments de chaînes voisins, qui réduit la souplesse de l'isolant et son aptitude à l'allongement, ce qui a pour effet de le rendre cassant [19]. Dans le cas des polymères tridimensionnels, la réticulation se traduit par une augmentation de la température de transition vitreuse T_g et du module d'élasticité d'un côté, et par une diminution du taux de gonflement de l'autre côté [20].

Le vieillissement thermique des polymères peut conduire à la formation de radicaux libres susceptibles de se recombiner et donc d'augmenter le degré de réticulation du réseau macromoléculaire [21].

2.1.2. Oxydation surfacique du polymère

En présence d'oxygène, le polymère subit un phénomène de thermo- oxydation qui s'accompagne généralement d'un changement de couleur en surface [22]. Piccireli explique ce phénomène par la diffusion de l'oxygène de l'air au sein du polymère suivi par des réactions d'oxydation qui conduisent à la formation d'une couche oxydée en surface [23].

2.1.3. Dépolymérisation

Des réactions de dépolymérisation peuvent prendre naissance même en l'absence d'oxygène. L'évaporation de produits de scission de plus bas poids moléculaire a une double conséquence, d'une part un rétrécissement du matériau, d'autre part la formation de produits volatiles susceptibles d'être à l'origine de bulles gazeuses, elles même responsables de décharges partielles dans les isolants à haute tension [24,10].

3. Vieillissement thermique du polyester –imide

Les corrélations entre mesures électriques et physico-chimiques effectuées par Fabrice Aymonino dans son étude de vieillissement thermique des échantillons du polyester-imide [1], ont permis de constater divers parallèles notamment entre mesures électriques de capacité (Figure II.1) et physico- chimiques d'analyse thermo gravimétrique (Figure II.2).

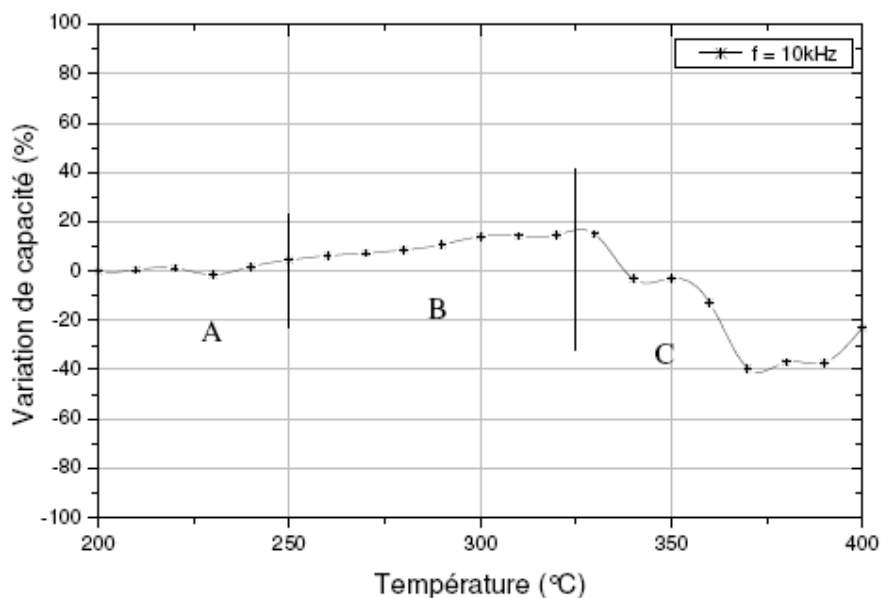


Figure II.1. Evolution de la variation de capacité en fonction de la température des plaques polyamide-imide/polyester-imide

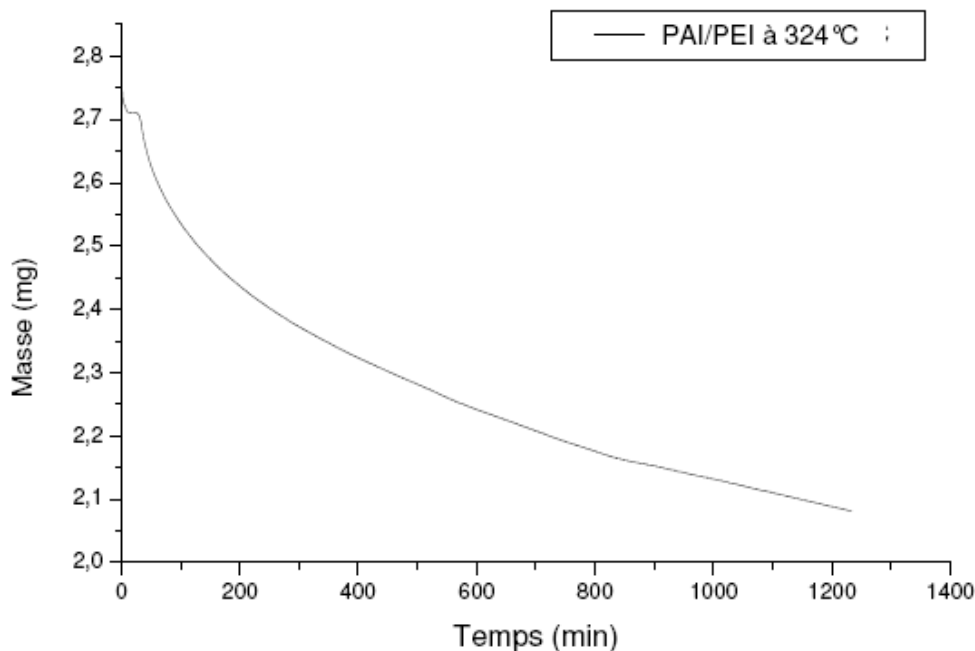


Figure II.2. Analyse thermogravimétrique isotherme du polyamide- imide/polyester-imide à 324 °C sous air.

Le phénomène de perte de masse relevée en ATG trouvait son image en électrique avec une variation importante et une baisse des valeurs de capacité. Fabrice Aymonino a conclu que la fonction ester était responsable de ces phénomènes.

4. Rôle de l'oxygène lors du vieillissement thermique

La présence d'oxygène lors du vieillissement thermique a un effet bénéfique en permettant une sur- réticulation ou un effet dégradant par oxydation [25,26]. Ces deux effets peuvent aussi être simultanés tel qu'il est prouvé par Lazari et Chiantore dans leur étude sur les résines acryliques, en observant une perte de masse consécutive à des scissions de chaînes et en même temps une réticulation du réseau [27]. Dans le cas du polyester-imide, F. Aymonino a montré aussi que la présence du dioxygène permet l'initiation des décompositions à des températures plus basses et ce de manière plus rapide (Figure II.3) [1].

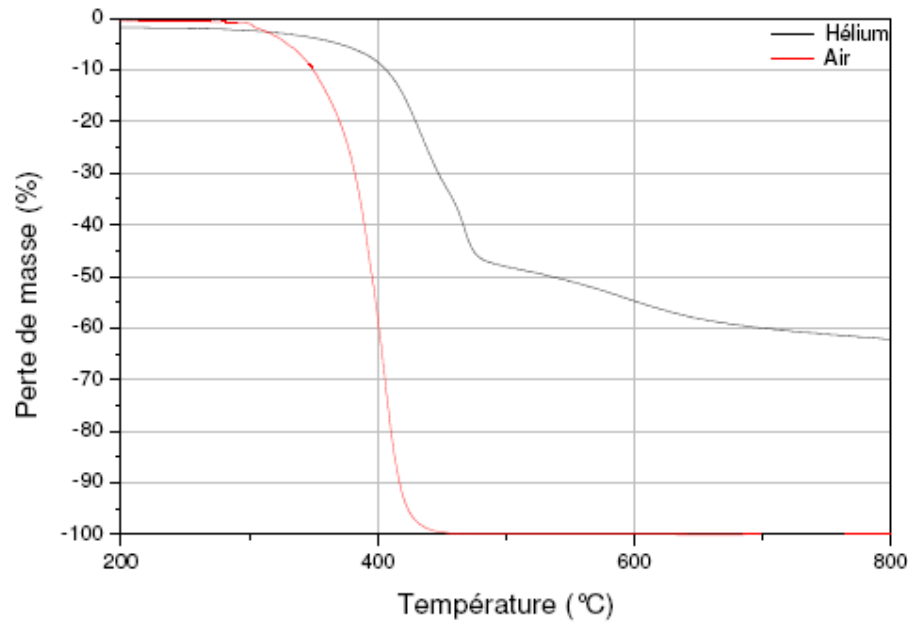


Figure II.3. Comparaison de la perte de masse du polyester-imide en fonction de la température dans l'air et l'hélium à 1°C / min.

5. Endurance thermique des polymères

5.1. Prédiction de la durée de vie

A la base de la loi empirique de Montsinger déjà citée, plusieurs chercheurs ont essayé de déduire le mécanisme de vieillissement dû à la température [29,30]. L'approche la plus importante est celle proposée par Dakin [30,31]. Selon la théorie de Dakin, l'effet de la température est d'augmenter la vitesse de réactions chimiques. Ainsi, la relation entre la vitesse de dégradation R et la température présente la même forme que celle de l'équation de la vitesse de réaction chimique, connue comme équation d'Arrhenius suivante [29]:

$$R = R' \exp \left[-\frac{\Delta W}{k \cdot \theta} \right] \quad (\text{II.1})$$

avec:

ΔW : Energie d'activation du processus.

k : Constante de Boltzmann (constante des gaz parfaits).

θ : Température.

R' : Constante.

Les travaux effectués sur des matériaux se poursuivent et plusieurs normes internationales ont été établies pour l'évaluation des coefficients d'endurance thermique des isolants en utilisant l'indice de température (température correspondant à une vie de 20 000 h) [16]. Parmi ces travaux, nous pouvons citer ceux effectués par Fallou et al [14,32] et ceux de Montanari [33].

La caractéristique du vieillissement ou la stabilité à long terme des isolants solides doit permettre de répondre à l'une des questions suivantes [24] :

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

La réponse nécessite la connaissance de la relation contrainte- temps : $C = f(t)$ telle est représentée à la figure II.4.

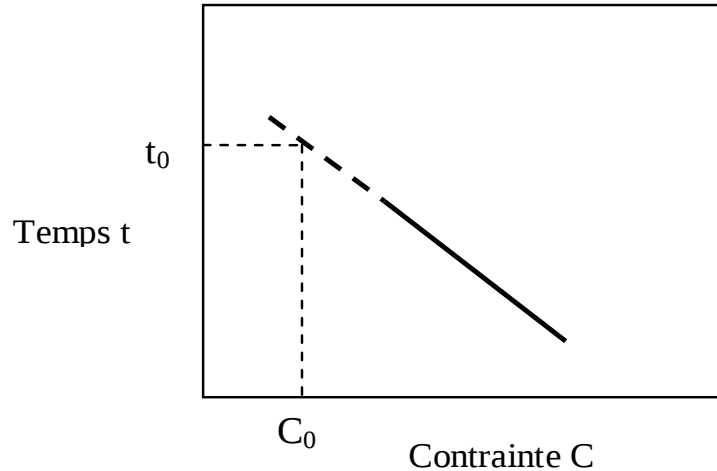


Figure II.4. Variation de la contrainte en fonction du temps de vieillissement [14]

La contrainte C peut être la température, la tension ou le champ électrique. 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 C .

La figure II.5 représente les variations de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la contrainte C .

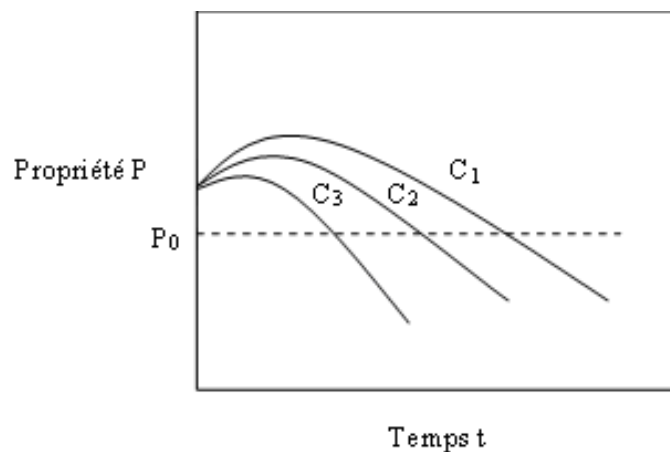


Figure II.5. Variations de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la contrainte C [14].

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 valeur de la propriété P_0 . Cette courbe est appelée courbe de durée de vie. La propriété peut être une propriété électrique telle que la rigidité diélectrique ou mécanique comme la charge à la rupture.

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

Dans les essais d'endurance thermique, on soumet les matériaux à l'action prolongée de la chaleur puis on détermine l'évolution d'une ou plusieurs de leurs propriétés en fonction du temps de vieillissement, ce qui permet de tracer les caractéristiques $P = f(t)$ [19]. La figure II.6 représente les variations de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la température [14].

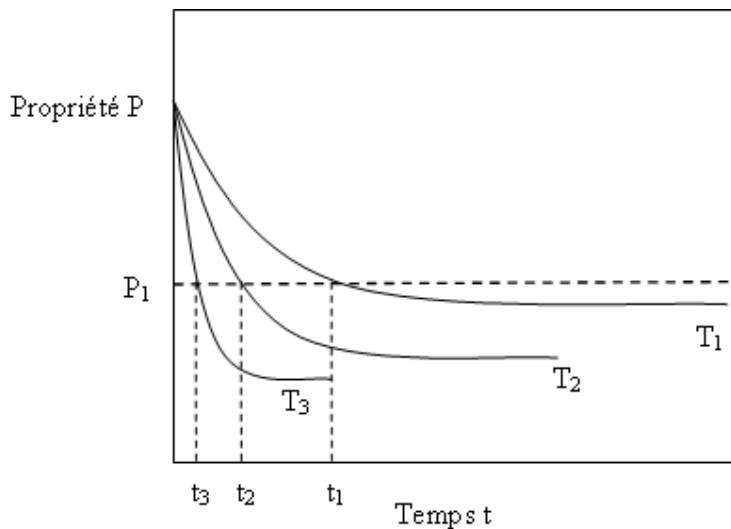


Figure II.6 Variations de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la température [14].

Le choix d'une valeur limite de la propriété P_1 permet de déterminer les temps pour lesquels cette limite est atteinte (durée de vie) et ceci pour plusieurs températures de vieillissement. En répétant les essais, on peut tracer la courbe d'endurance thermique ou durée de vie telle qu'elle est représentée à la figure II.7 [14, 19].

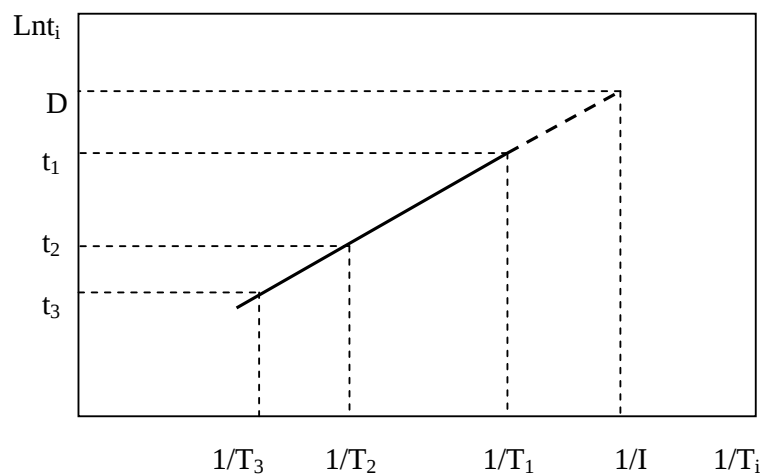


Figure II.7. Variation du logarithme de la durée de vie des polymères en fonction de l'inverse de la température absolue [14, 19].

Par extrapolation, on déduit de cette courbe, la température T correspondant à une durée de vie conventionnelle servant de référence D . Cette température est appelée « indice de température (IT) » du matériau considéré.

5.3. Modèle de durée de vie

De manière conventionnelle, la durée de vie est le temps nécessaire pour qu'une propriété physique ou chimique techniquement importante atteigne une valeur limite afin que le matériel puisse encore fonctionner de façon satisfaisante [34, 35]. La durée de vie d'un matériau isolant solide en fonction de la température de vieillissement est donnée par une relation de type Arrhenius [36] :

$$\ln t = A + \frac{E}{RT} \quad (\text{II.2})$$

avec :

A : Constantes caractéristique du matériau

R : Constante des gaz parfaits

T : Température de vieillissement.

E : Energie d'activation du phénomène

ou sous la forme exponentielle suivante [14, 37] :

$$t = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (\text{II.3})$$

avec

C et B : Constante caractéristiques du matériau

T : Température absolue

La caractéristique $\ln t$ en fonction de $1/T$ est généralement une droite qui, dans certains cas, peut avoir une cassure.

5.4. Vitesse de dégradation

Dans un domaine expérimental restreint, on peut considérer que la vitesse de dégradation V des polymères varie avec la température de vieillissement T selon la loi d'Arrhenius. Cette vitesse est donnée par la relation suivante [15] :

$$V = V_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (\text{II.4})$$

avec :

E : Energie d'activation du phénomène.

R : Constante des gaz parfaits.

V_0 : Constante.

T : Température absolue.

La vitesse de dégradation s'exprime aussi par une relation identique à la précédente [14]:

$$\ln V = \frac{-A}{T} + B \quad (\text{II.5})$$

avec:

A et B : Constantes caractéristiques du polymère.

T : Température absolue.

6. Choix des températures de vieillissement

La norme CEI 216.1 [38] décrit les conditions des essais d'endurance thermique des matériaux isolants. Pour le choix des températures de vieillissement, elle fixe un nombre minimum de trois températures différant chacune de la plus voisine de 20°C et pour que le critère de dégradation soit atteint [14]:

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

Dans le souci d'économie de temps à louer, certains chercheurs se sont penchés sur des méthodes de vieillissement très accéléré (VTA), réduisant le temps de vieillissement à 500 h, soit une division de 10 [36]. Ces investigations peuvent être justifiées par le fait que la relation $C = f(t)$ ne présenterait aucun intérêt si l'on devait, pour l'établir, attendre les durées souhaitées pour la vie d'un matériel.

Conclusion

La dégradation thermique peut être décomposée en trois stades [39] ; une perte de masse initiale et rapide due au départ des produits volatils dont l'eau, suivie d'une prise de poids par diffusion de l'oxygène au sein du polymère. Cet oxygène peut se lier chimiquement au réseau ou être piégé dans le volume. Finalement une perte de masse par rupture des chaînes et départ des produits de dégradation volatils formés. Les effets de la dégradation thermique sont nombreux et varient fortement en fonction du type de polymère et des conditions de vieillissement considérées [40].

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 des performances spécifiées pour la période de temps sous des contraintes liées aux conditions de fonctionnement [41].

1. Modèles statistiques appropriés à la rupture

Plusieurs modèles statistiques pour la prédiction de la durée de vie des isolants solides ont été développés, parmi lesquels on peut citer :

1.1. Loi normale

La loi normale est la distribution la plus utilisée ; elle présente la durée de vie des systèmes dont les défauts sont dispersés autour d'une valeur moyenne. Sa fonction de distribution est la suivante [42]:

$$F(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{X - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (\text{III.1})$$

avec:

X : variable aléatoire

μ : moyenne arithmétique

σ : variance

1.2. Loi log -normale

Selon la nature de la variable aléatoire, il peut être intéressant de faire appel à la loi log-normale et cela en effectuant un changement de variable. On obtient la fonction de distribution suivante [42] :

$$\begin{cases} F(X) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(X - \mu)}{\sigma}\right)^2\right] & \text{Pour } X \geq 0. \\ F(X) = 0 & \text{Pour } X < 0 \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

avec:

X : variable aléatoire

μ : moyenne arithmétique

σ : variance

1.3 Loi exponentielle

La fonction de distribution de la loi exponentielle est [43]:

$$F(X) = \frac{1}{2} \lambda \exp(-\lambda X) \quad (-\infty < X < +\infty) \quad (\text{III.3})$$

avec :

X : variable aléatoire

λ : constante

Cette loi est caractérisée par la propriété suivante: la probabilité de fonctionnement d'un élément sur un intervalle de temps $(t, t + \Delta t)$ ne dépend pas du temps antérieur. Elle est caractérisée par un taux de défaillance constant [43].

1.4. Loi de Weibull

Le modèle statistique de Weibull [44] exprime la probabilité de rupture d'une chaîne en fonction de la rupture d'un maillon [44, 45]. La probabilité de rupture pour la distribution de Weibull peut s'écrire dans sa forme générale [46] :

$$P(X) = \begin{cases} 1 - \exp \left[- \left(\frac{X - X_s}{X_0} \right)^\alpha \right] & X_s < X < +\infty \\ 0 & X < X_s \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

avec : $P(X)$: probabilité de rupture
 X : variable aléatoire
 X_0 : paramètre d'échelle
 X_s : paramètre de localisation
 α : paramètre de forme

Selon la valeur du paramètre de localisation X_s , on distingue deux modèles [47]:

1.4.1. Modèle de Weibull à deux paramètres

Dans le cas où $X_s = 0$, le modèle de Weibull est dit à deux paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit comme suit [2, 45] :

$$P(X, \alpha) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X}{X_0} \right)^\alpha \right] \quad (\text{III.6})$$

ou sous sa forme linéaire :

$$\log \text{Ln} \frac{1}{1 - P(X, \alpha)} = \alpha \log X - \alpha \log X_0 \quad (\text{III.7})$$

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

1.4.2 Modèle de Weibull à trois paramètres

Dans ce cas $X_s \neq 0$ et on a [44] :

$$P(X, \alpha) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{(X - X_s)^\alpha}{(X_0 - X_s)^\alpha} \right) \right] \quad X > 0 \quad (\text{III.8})$$

ou sous sa forme linéaire suivante :

$$\log \text{Ln} \frac{1}{1 - P(X, \alpha)} = \alpha \log(X - X_s) - \alpha \log(X_0 - X_s) \quad (\text{III.9})$$

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

1.5 Signification des paramètres de Weibull

1.5.1 Paramètre de forme

Le paramètre de forme α est un paramètre sans dimension. C'est lui qui définit l'allure des courbes de distribution de Weibull [48]. Il est par conséquent l'image de la dispersion de la variable aléatoire, plus α est grand, moins les valeurs sont dispersées [49, 50]. On a [51] :

- Si $\alpha < 1$: la probabilité décroît avec le temps d'application de la contrainte ce qui correspond à une «mortalité infantile» des échantillons qu'on appelle «défauts de jeunesse».
- Si $\alpha = 1$, la loi de Weibull correspond à la loi de Poisson.
- Si $\alpha > 1$, la probabilité de claquage augmente avec le temps, ceci correspond à un vieillissement normal, c'est à dire à une fatigue initialement nulle qui s'accroît avec le temps.

L'étude effectuée par Bournane et al sur la rupture diélectrique du polyester-imide montre que le facteur de forme varie en fonction de la vitesse de la rampe. Il a été démontré que les valeurs de la tension de claquage sont moins dispersées pour la vitesse de la rampe de 1 kV qui correspond à la valeur la plus élevée de $\alpha = 7,5$ [45].

1.5.2. Paramètre de localisation

La variable X_s apparaît comme un seuil en dessous duquel le vieillissement se trouve considérablement ralenti, la durée de vie du matériau tend alors vers l'infini [2]. Cette variable correspond à une simple translation des courbes de probabilité cumulée selon l'axe des abscisses. Le formalisme de Weibull s'écrit [2]:

$$P(X, \alpha) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{X - X_s}{X_0 - X_s} \right)^\alpha \right] \quad (\text{III.10})$$

D'une autre manière:

$$\text{Log} \text{Ln} \frac{1}{1 - P(X, \alpha)} = \alpha \text{Log}(X - X_s) - \alpha \text{Log}(X_0 - X_s) \quad (\text{III.11})$$

Dans l'étude de Bournane et al, le facteur de localisation renseigne sur la grosseur des défauts existants ou créés dans le polymère après vieillissement, sa valeur varie entre 0 et 4 kV [45].

1.5.3. Paramètre d'échelle

Le paramètre d'échelle X_0 est la valeur centrale caractéristique de la distribution de la population à étudier.

Pour déterminer la valeur de X_0 , on considère l'expression (III.11) dans le cas où $X_s = 0$, elle s'écrit :

$$\text{LogLn} \frac{1}{1 - P(X)} = \alpha \text{Log} X - \alpha \text{Log} X_0 \quad (\text{III.12})$$

Pour $X = X_0$, on a:

$$\text{LogLn} \frac{1}{1 - P(X)} = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$\text{d'où: } P = 1 - \frac{1}{e} = 0,632$$

Ce qui signifie: $P = 63,2 \%$.

2. Application du modèle de Weibull à la rupture des isolants solides

L'application du modèle statistique de Weibull à la caractérisation des isolants solides repose sur les hypothèses suivantes [52]:

➤ On considère que le phénomène de claquage est caractérisé par une variable aléatoire à deux dimensions: le temps t au bout duquel se produit la rupture de l'isolant et le gradient du potentiel qui a provoqué cette rupture.

➤ Le claquage est localisé dans un petit volume de l'isolant sur toute l'épaisseur.

Dans la pratique, on distingue:

- Dans le cas des essais sous champ constant (à long terme), $X_0 = t_0$ est la valeur nominale du temps de rupture.
- Dans le cas des essais sous rampe de tension, $X_0 = E_0$ représente la valeur nominale du champ de rupture.

Dans les deux cas, t_0 et E_0 sont caractérisés par une probabilité de rupture de 63.2 % correspondant à une densité maximale.

3. 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 [49] que:

- 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.

4. Diagramme de Weibull

Cette méthode consiste à classer les valeurs de X_i , $i=1,2,...,N$. (N étant le nombre total d'échantillons testés) par ordre croissant. La probabilité de rupture P_i , donnée par la méthode des rangs moyens, pour N grand est [47]:

$$P(i) = \frac{i}{N+1} \quad (\text{III.28})$$

avec:

i : rang des valeurs de X_i après classement par ordre croissant

N : nombre des échantillons testés

Si $N < 20$, on utilise la méthode des rangs médians qui est donnée par la formule suivante [53]:

$$P(i, N) = \left[\frac{0,69}{N} + (i-1) \left(\frac{1}{(N-1)} - \frac{1,38}{N(N-1)} \right) \right] \quad (\text{III.29})$$

Les résultats sont présentés dans un système d'axes, donnant $\text{Log ln}(1/(1-P))$ en fonction de $\text{Log} X$. Le graphe est une droite de pente α . Dans le cas expérimental, la représentation n'est pas toujours linéaire. En effet, un lissage numérique est indispensable pour avoir un tracé objectif des graphes. Le lissage des points expérimentaux peut être approché par des polynômes de degré 1, 2 ou 3 [2].

Dans le présent chapitre, nous présentons les différents dispositifs expérimentaux utilisés lors des essais réalisés concernant l'effet du vieillissement thermique sur la tenue diélectrique du polyester-imide utilisé comme isolation dans les machines électriques. Les essais de vieillissement ont été réalisés aux laboratoires de l'Electro-Industries et des universités de Tizi Ouzou et de Bejaïa. Avant l'élaboration des éprouvettes, le fil émaillé a subi des essais de contrôle de qualité.

1. Essais de contrôle

Les expériences ont été effectuées sur le fil de cuivre isolé au polyester-imide, prélevé de la bobine représenté à la figure IV.1, fournie par l'Entreprise SARL TREFICUIVRE. Le diamètre du conducteur est de 0,63 mm. Il est revêtu d'une couche du polyester-imide de grad 2, de 25 μm d'épaisseur et de classe thermique H (180°C).



Figure IV.1 : Bobine du fil de cuivre émaillé au polyester- imide

1.1. Détermination du diamètre du fil émaillé

Pour déterminer le diamètre du fil émaillé et l'épaisseur de son isolation, trois éprouvettes ont été préparées. A l'aide d'un palmer électronique (figure IV.2), trois mesures de diamètre ont été prises (120° entre deux points de mesure) de l'extrémité dénudée et de la partie revêtue, conformément aux recommandations de la norme CEI 60 851-2 [54]. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.1 et en accord avec les recommandations de la norme CEI 60317-0-1 [55].



Figure IV. 2 : Palmer électronique utilisé pour la mesure du diamètre.

Diamètre nominal (mm)	Tolérance $\pm$ (mm)	Diamètre mesuré (mm)	Diamètre extérieur maximal toléré (mm)	Diamètre extérieur mesuré (mm)	Différence minimale (mm)	Différence réelle mesurée (mm)
0,630	0,006	0,631	0,704	0,682	0,050	0,051

Tableau IV.1. Résultats de mesure du diamètre du fil de cuivre et de l'épaisseur de l'isolant.

1.2. Aptitude au bobinage

Lors du bobinage, le fil émaillé est soumis à des contraintes mécaniques qui peuvent être à l'origine des défauts de manipulation.

1.2.1. Adhérence et souplesse de la couche d'émail

A l'aide du tour à bobiner présenté aux figures IV.3 et IV.4, trois éprouvettes de 20 spires jointives ont été préparées. En utilisant le microscope oculaire (20 x, objectif 7 x), montré à la figure IV.5, l'adhérence de la couche isolante a été contrôlée conformément aux recommandations de la norme CEI 60 851-3 [56]. Toutes les éprouvettes (figure IV.6) n'ont pas présenté de fissure comme on peut le voir à la figure IV.7 : les résultats de l'essai sont en accord avec la norme CEI 60 317-01 [55].



Figure IV.3 : Tour à bobiner.

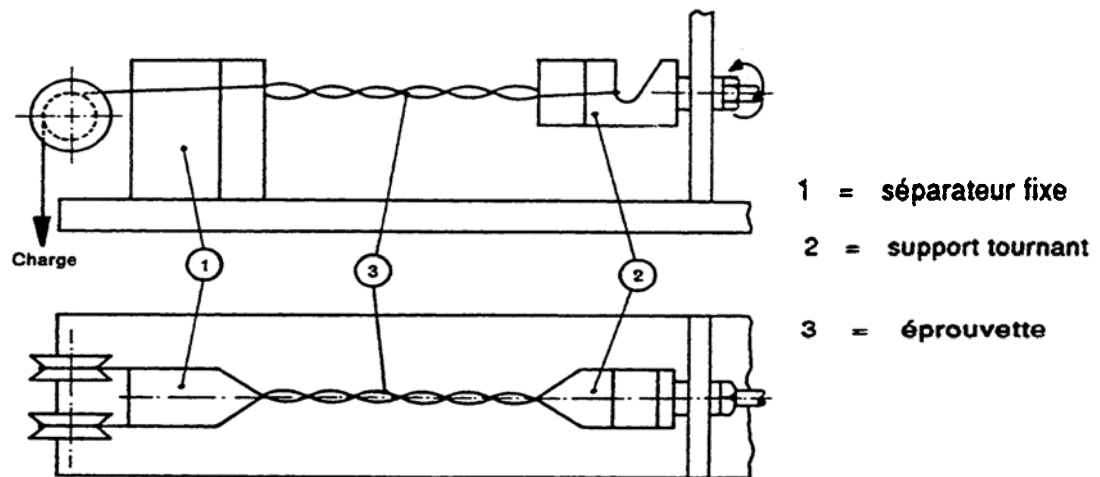


Figure IV.4 : Représentation schématique du tour à bobiner utilisé pour l'élaboration des éprouvettes.



Figure IV.5 : Microscope optique.

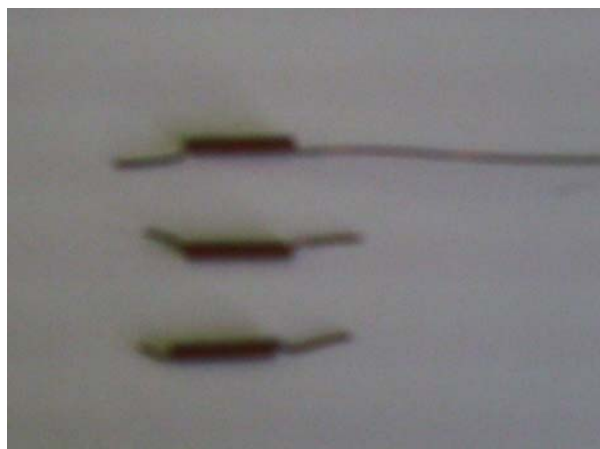


Figure IV.6 : Eprouvettes utilisées pour l'essai d'adhérence et de souplesse.



Figure IV.7 : Image de l'échantillon observé en utilisant le microscope optique (test d'adhérence).

1.2.2. Effet de ressort

A l'aide du dispositif pour effet de ressort présenté à la figure IV.8, trois éprouvettes ont été réalisées de la manière suivante : un poids de 12 N a été suspendu au fil émaillé, puis enroulé en 5 et 1/2 tours sur un mandrin de 37,5 mm de diamètre, conformément aux prescriptions de la norme CEI 60 851-3 [56]. Le but de cet essai est de vérifier les propriétés mécaniques du fil émaillé.



Figure IV.8 : Dispositif utilisé pour mesurer l'effet ressort.

Les angles de retour mesurés pour les trois éprouvettes sont α_1 , α_2 , α_3 . La valeur moyenne a été calculée. Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.2 et conformes aux prescriptions de la norme CEI 60317-0-1 [55].

Effet de ressort maximal normalisé (degré)	Effet de ressort mesuré (degré)	
50 pour le fil émaillé de grade 2	$\alpha_1 = 47$	$\alpha_{\text{med}} = 47$
	$\alpha_2 = 47$	
	$\alpha_3 = 47$	

Tableau IV.2 : Effet de ressort du fil émaillé.

1.3. Essai de choc thermique

L'objectif principal de cet essai est de vérifier la stabilité thermique de l'isolant. Trois éprouvettes ont été élaborées en enroulant le fil de cuivre sur un mandrin de 1,4 mm de diamètre et en confectionnant 25 spires jointives suivant les recommandations de la norme CEI 60317-0-1 [55]. Ces échantillons ont été introduits dans une étuve à air ventilé (figure IV.9), réglée à une

température de 200°C pendant 30 mn conformément aux prescriptions de la norme CEI 60 851-5 [57].



Figure IV. 9 : Etuve à air ventilé utilisée pour l'essai de choc thermique.

En utilisant le microscope optique présenté à la figure IV.5, ces éprouvettes ont été observées avant et après le choc thermique. Elles n'ont présenté aucune fissure ni craquelure (Figure IV.10). Les résultats sont donc conformes aux recommandations de la norme CEI 60 317-0-1[55].



Figure IV.10 : Image d'un échantillon observé sous microscope optique après le choc thermique.

2. Préparation des éprouvettes pour les essais de vieillissement thermique

Un fil d'une longueur de 400 mm environ est prélevé de la bobine présentée à la figure IV.1. Des torsades ont été réalisées sur une longueur de 125 ± 5 mm en utilisant le tour à bobiner décrit précédemment et en respectant les recommandations de la norme CEI 60 851-5 [57]. La charge et le nombre de tours appliqués à la torsade sont inscrits dans le tableau IV.3.

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.3 : Charge et nombre de tours appliqués à la torsade.

La boucle de la partie torsadée a été coupée en deux points afin d'éviter le court-circuit lors des essais de rupture diélectrique. Les deux extrémités ont été écartées et dénudées (figure IV.11). La figure IV.12 montre une éprouvette réalisée.



Figure IV.11. a : Utilisation de la flamme pour dénuder les éprouvettes.



Figure IV.11. b : Refroidissement dans une solution d'alcool et d'eau distillée.

Figure IV.11. Dénudation des échantillons.

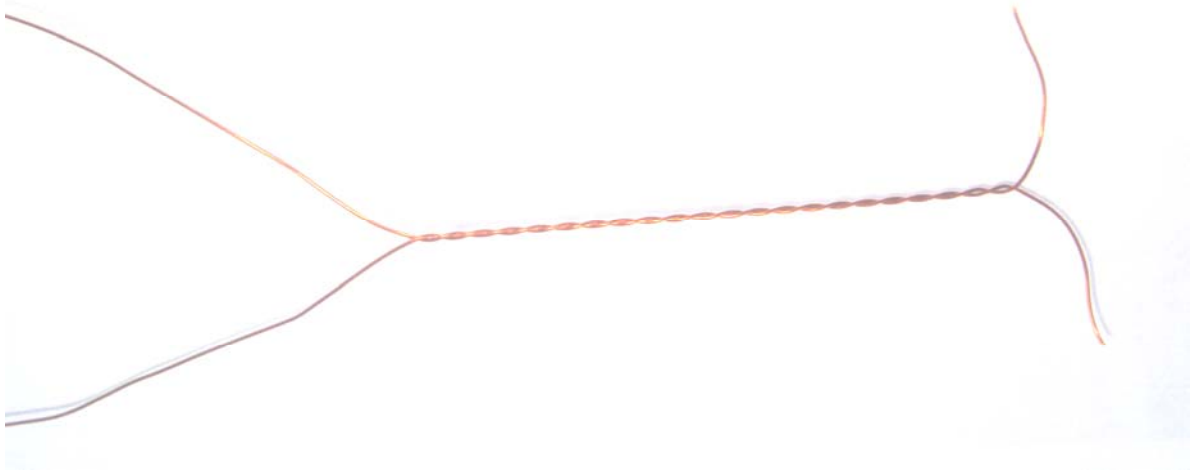


Figure IV.12 : Epreuve réalisée.

3. Déroulement des essais

Les éprouvettes ont été soumises à un vieillissement thermique dans des étuves (figure IV.13), réglées à 190, 210, 230 et 250 °C conformément aux recommandations de la norme IEC 60 216- 1 [16]. La figure IV.14 présente des échantillons vieillis durant 4460 heures à 190°C.



Figure IV.13 Etuve de vieillissement.



Figure IV.14 Echantillons vieillis pendant 4460 h dans l'étuve chauffée à 190°C.

3.1. Mesure de la tension de claquage

Avant les essais de claquage, les échantillons ont été conditionnés dans un dessiccateur contenant du gel de silicone, pendant au moins 24 h pour éliminer toute présence d'humidité, conformément à la norme DIN53481/VDE0303 [58]. La figure IV.15 montre des éprouvettes en cours du conditionnement.



Figure IV.15 : Ensemble dessiccateur et éprouvettes en cours de conditionnement

3.2. Essais de claquage sous tension continue

Le système de dispositif des essais de rupture diélectrique sous tension continue comprend les éléments présentés à la figure IV.16 :

- Un générateur de tension SG1 (figure IV.17).
- Un transformateur HT (100) pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV pour des essais en continu (figure IV.18).
- Une diode pour les essais en continu (polarisation directe et inverse) pouvant supporter une tension maximale de 270 kV (figure IV.20).
- Une capacité de filtrage ($C = 10 \text{ nF}$) (figure IV.20).
- Une résistance de limitation de courant $R = 106 \text{ k}\Omega$ (figure IV.20).
- Un diviseur résistif ($R = 250 \text{ M}\Omega$ et R_a).
- Un voltmètre de crête (Ucr) AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant la mesure des hautes tensions alternatives ou continues (figure IV.19).
- Une cellule d'essai composée de deux électrodes (Figure IV.21)

L'ensemble de ces éléments sont placés dans une cage de Faraday.

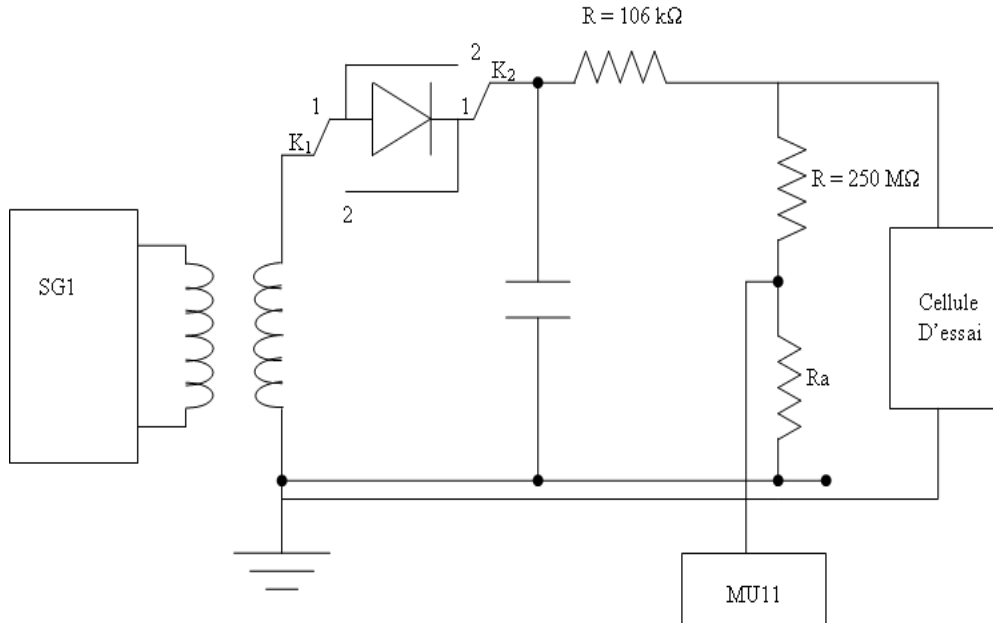


Figure IV.16 : Système du dispositif des essais de rupture diélectrique sous tension continue.
 Pour la polarité positive K_1 et K_2 sont sur la position 1
 Pour la polarité négative K_1 et K_2 sont sur la position 2



Figure IV.17 : Générateur de haute tension SG1.



Figure IV.18 : Transformateur de haute tension avec diode.



Figure IV.19 : Voltmètre de crête AC/DC de type MU11.



Figure IV.20 : Ensemble transformateur- diode – capacité et diviseur résistif.

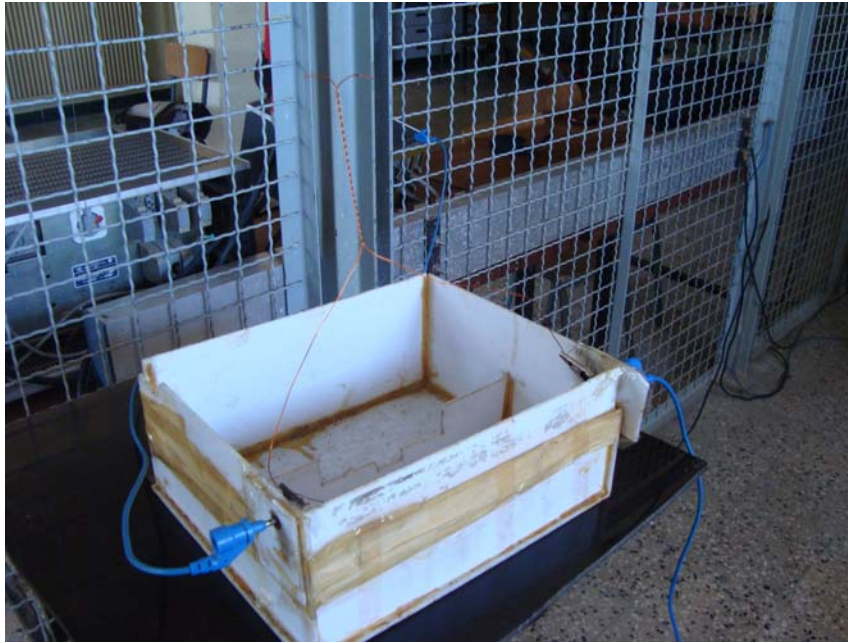


Figure IV.21 : Cellule d'essai et échantillon soumis à une tension continue.

3. 3. Essais de claquage sous tension alternative

Pour la mesure de la tension de claquage sous tension alternative, le dispositif utilisé est représenté à la figure IV.22 comprenant les éléments suivants:

- Un générateur de tension SG1 (figure IV.17).
- Un transformateur HT (100) pouvant fournir une tension allant de 0 jusqu'à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV pour des essais en continu (Figure IV.23).
- Une résistance de protection $R = 106 \text{ k } \Omega$ limitant le courant.
- Un diviseur de tension capacitif ($C_0 = 0,1 \text{ } \mu\text{F}$ et $C_u = 41,4 \text{ } \mu\text{F}$).
- Un voltmètre de crête (Ucr) AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant la mesure, selon le montage électrique, des hautes tensions alternatives, ou continues (figure IV.19).
- Une cellule d'essai composée de deux électrodes (Figure IV.21)

L'ensemble des appareils est placé dans une cage de Faraday.

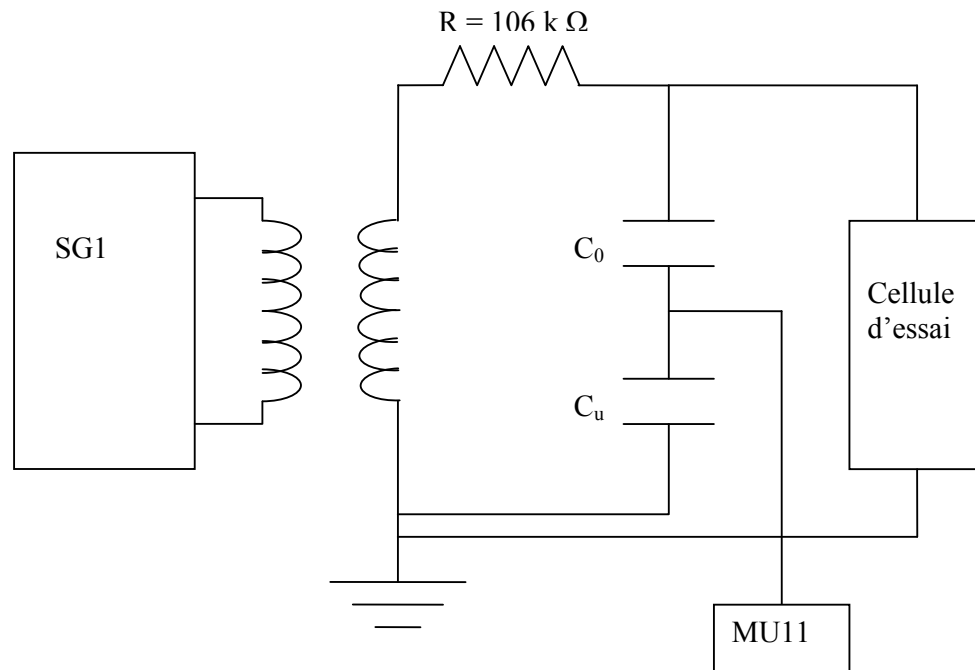


Figure IV.22 : Schéma du dispositif pour les essais de claquage sous tension alternative.



Figure IV.23 : Transformateur de haute tension avec résistance de limitation de courant.



Figure IV.24 : Ensemble transformateur, résistance de limitation de courant et diviseur capacitif.

4. Echantillons avant et après vieillissement

La figure IV.25 montre deux échantillons : l'un avant vieillissement et l'autre après 5830 h à 190°C.



Figure IV.25: Echantillons avant vieillissement (en bas) et après 5830 h à 190°C (en haut).

Les figures : IV.26- IV.28 représentent des échantillons après vieillissement de 3560 h à 210°C, 1200 h à 230°C et 480 h à 250°C.



Figure IV.26: Echantillons vieilli pendant 3460 h à 210°C.

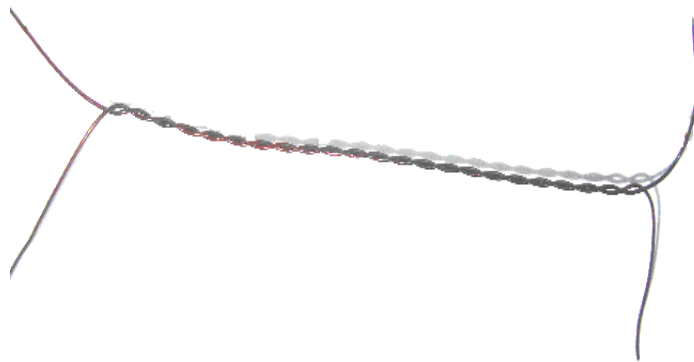


Figure IV.27: Echantillon vieilli pendant 1200 h à 230°C.



Figure IV.28: Echantillon vieilli pendant 480 h à 250°C.

5. Echantillon après claquage

La figure IV. 29 montre une éprouvette perforée.



Figure IV.29: Echantillon perforé sous champ alternatif après 5832 h à 190°C.

Dans ce chapitre, sont rassemblés les différents résultats obtenus. Une analyse statistique des valeurs de la tension de claquage a été faite en utilisant le modèle statistique de Weibull.

1. Mode opératoire

A une température et un temps de vieillissement donnés, trois populations de 50 échantillons chacune sont retirées de l'étuve. Ces éprouvettes sont soumises à l'essai de claquage sous tension alternative et continue de polarité positive et de polarité négative. La vitesse de montée de la rampe de tension est 1 kV/s. La valeur de la tension de rupture a été relevée à l'aide du voltmètre de crête.

2. Analyse statistique

Les résultats obtenus sont traités statistiquement en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres. La probabilité de rupture est donnée par la relation (IV. 1) [47]:

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

avec :

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

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

Les courbes donnant $\text{Log ln } (1/(1-P)) = f(\text{log}V)$ ont été tracées. La valeur nominale de la tension de claquage correspondant à une probabilité de 63,2 % ($\text{Log ln } (1/(1-P)) = 0$) a été déterminée.

3. Résultats et discussion

3.1. Vieillissement à 190°C

Le vieillissement à la température 190°C a atteint 5830 heures. Des prélèvements ont été effectués après environ 21 jours (504 h). Après 3860 heures, nous avons observé un changement de couleur du polymère montrant l'apparition de tâches bleues dans la partie torsadée. Ceci caractérise la dégradation.

3.1.1. Diagrammes de Weibull

a) Champ continu de polarité positive

Les figures V.1- 10 représentent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité positive.

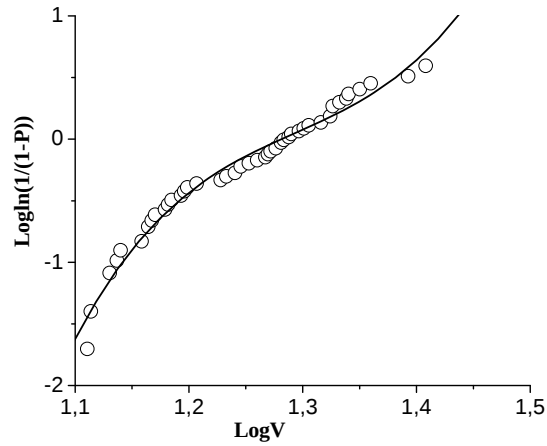


Figure V.1 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage avant vieillissement sous champ continu de polarité positive.

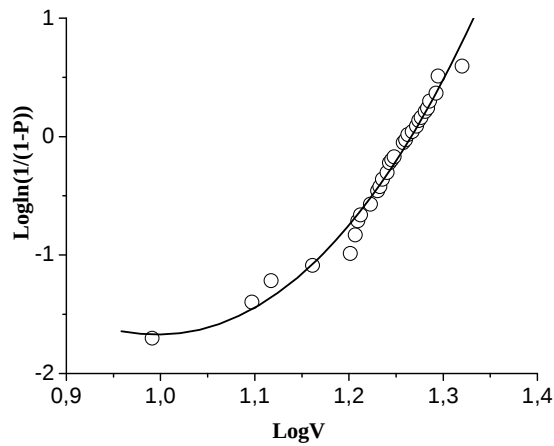


Figure V.2 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 530 h à 190°C sous champ continu de polarité positive.

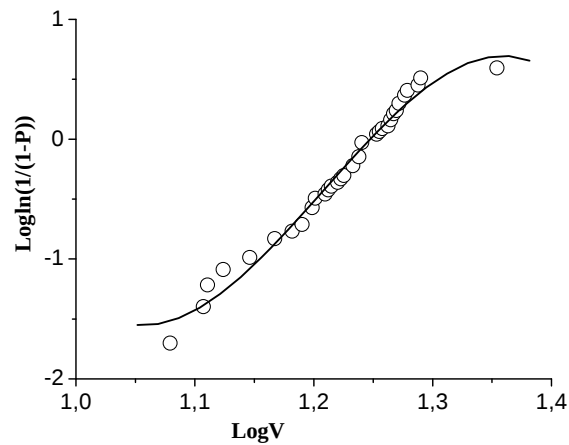


Figure V.3 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1100 h à 190°C sous champ continu de polarité positive.

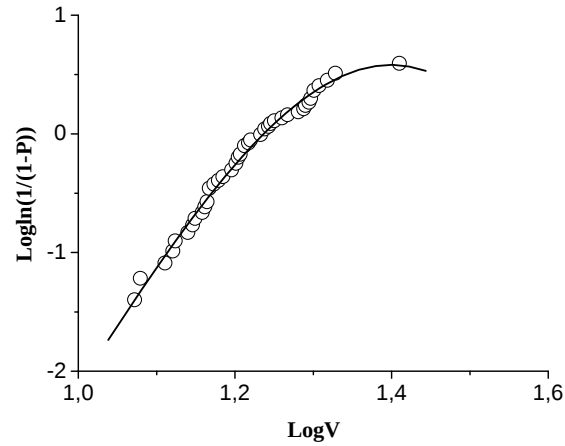


Figure V.4 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1210 h à 190°C sous tension continue de polarité positive.

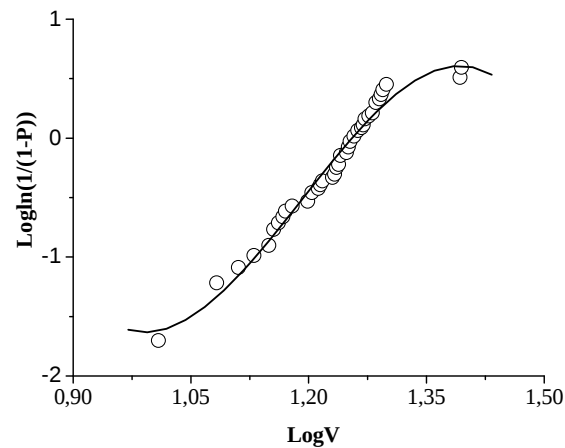


Figure V.5 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1370 h à 190°C sous champ continu de polarité positive.

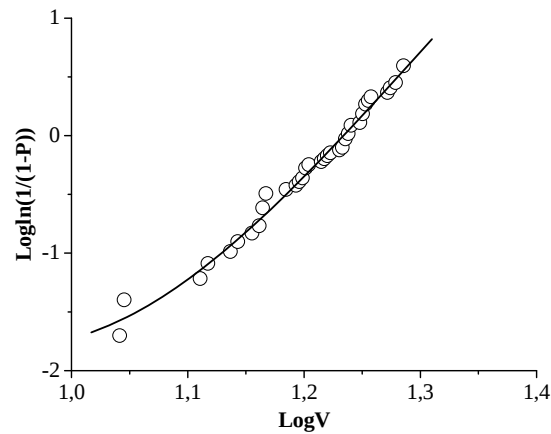


Figure V.6 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2690 h à 190°C sous champ continu de polarité positive.

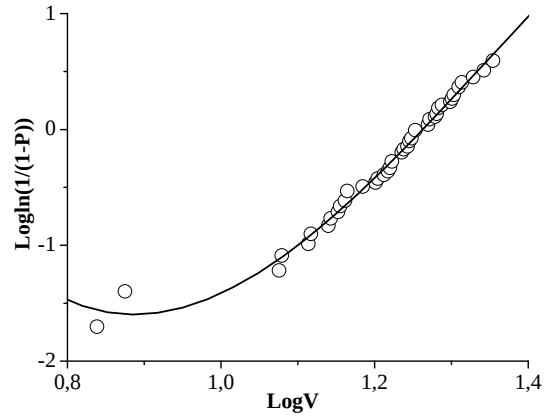


Figure V.7 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3360 h à 190°C sous champ continu de polarité positive.

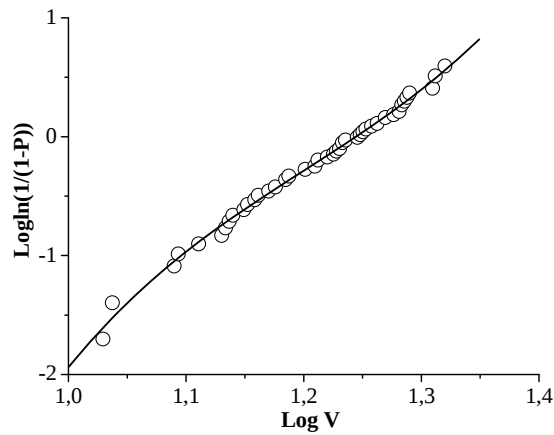


Figure V.8 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3860 h à 190°C sous champ continu de polarité positive.

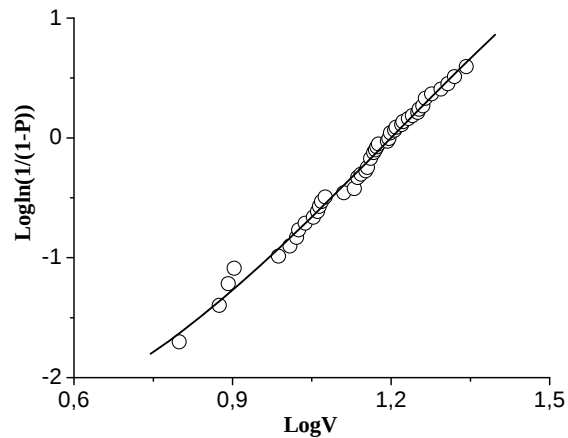


Figure V.9 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 4460 h sous champ continu de polarité positive.

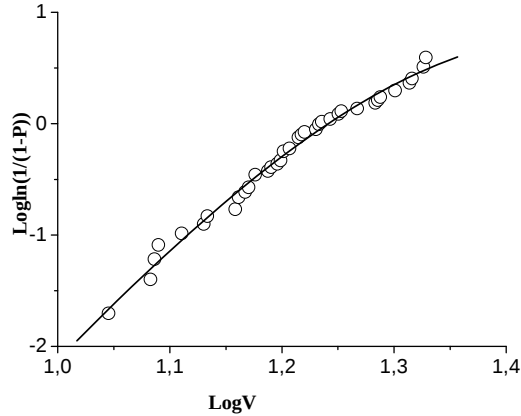


Figure V.10 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 5830 h à 190°C sous champ continu de polarité positive.

b) Champ continu de polarité négative

Les figures V.11-V.20 montrent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité négative.

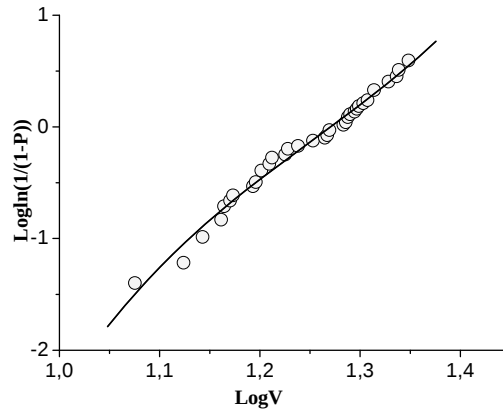


Figure V.11 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage avant vieillissement sous champ continu de polarité négative.

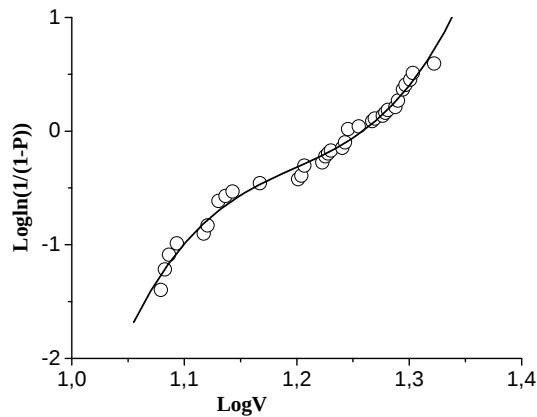


Figure V.12 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 530 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

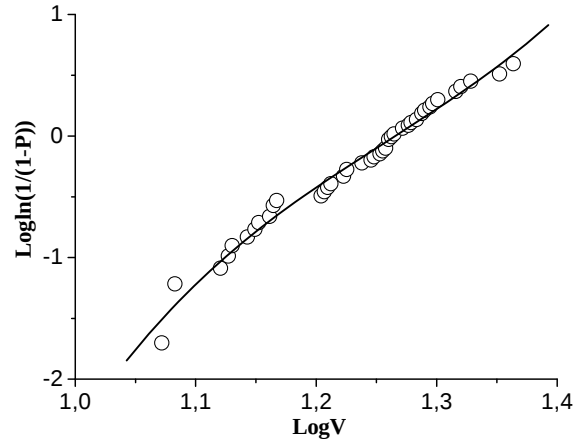


Figure V.13 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1100 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

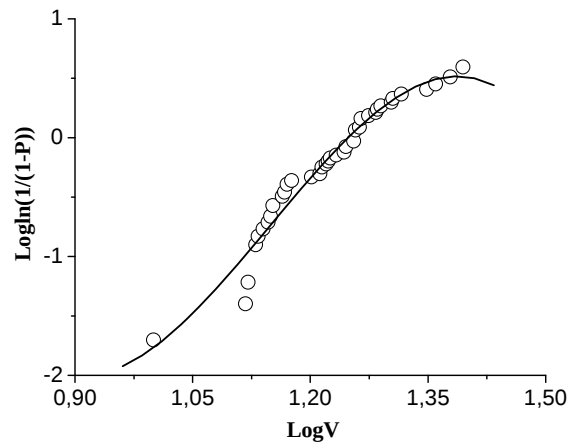


Figure V.14 Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1370 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

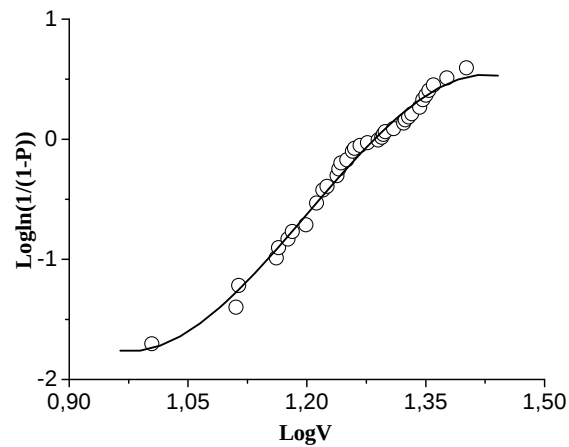


Figure V.15 Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2110 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

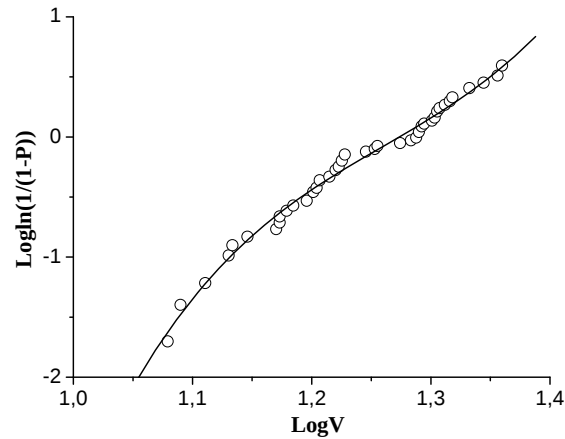


Figure V.16 Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2690 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

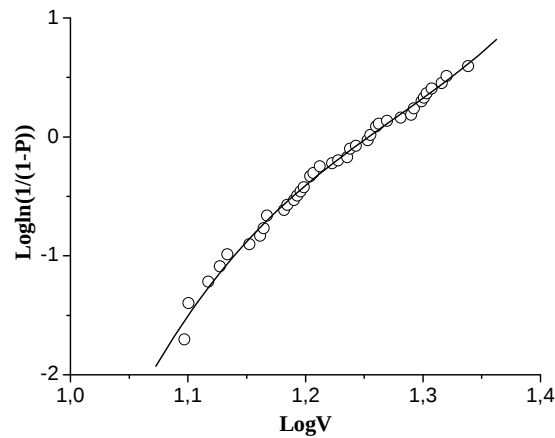


Figure V. 17 Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3360 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

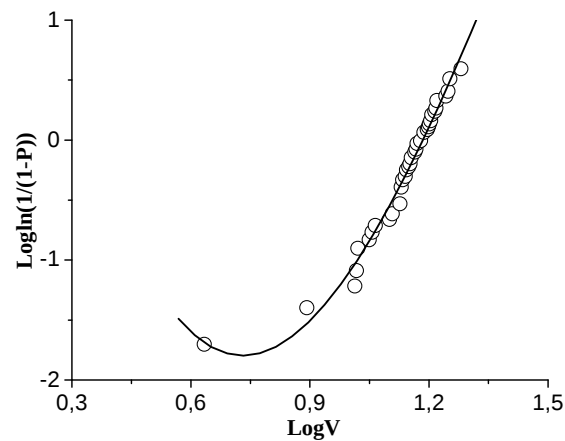


Figure V.18 Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3860 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

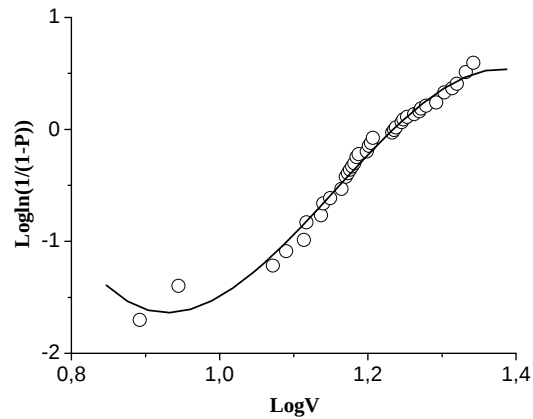


Figure V.19 Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 4 460 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

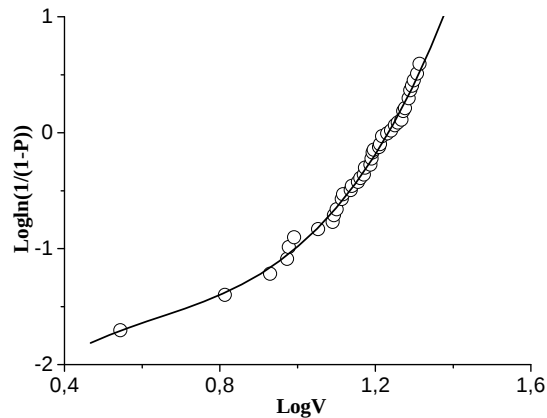


Figure V. 20 Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 5830 h à 190°C sous champ continu de polarité négative.

c) Champ alternatif

Dans les figures V. 21-V. 30 sont exposés les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ alternatif.

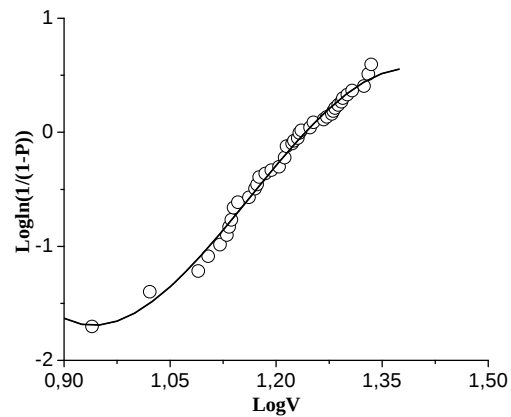


Figure V.21 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage avant vieillissement sous champ alternatif.

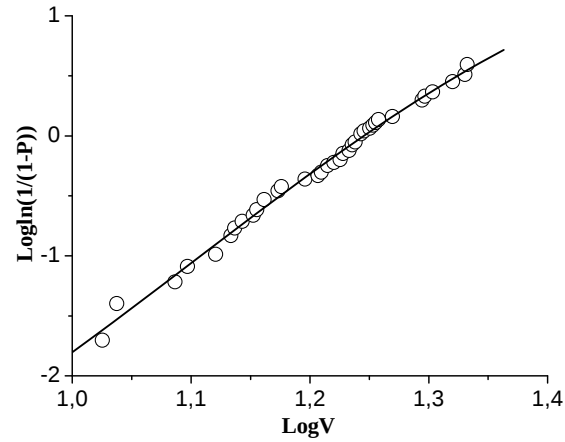


Figure V. 22 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 530 h à 190°C sous champ alternatif.

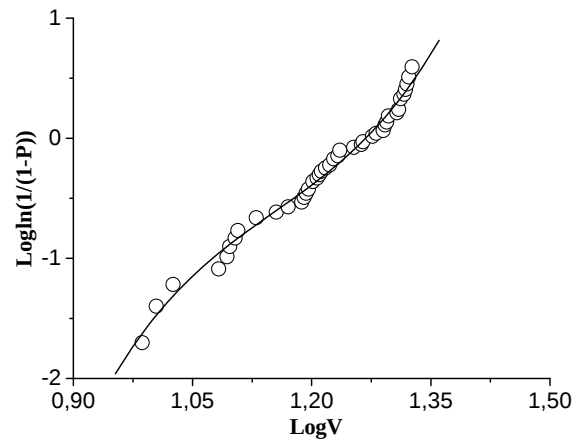


Figure V. 23 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1100 h à 190°C sous champ alternatif.

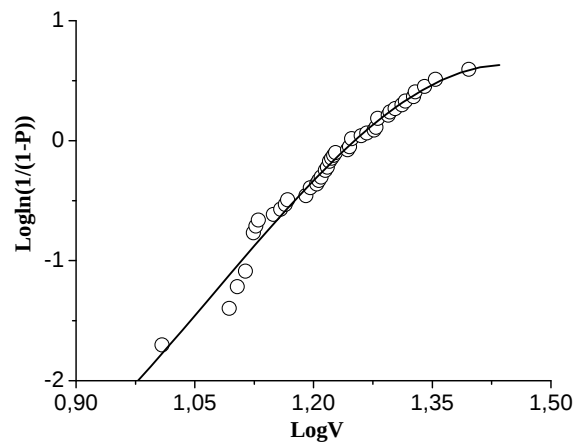


Figure V. 24 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1370 h à 190°C sous champ alternatif.

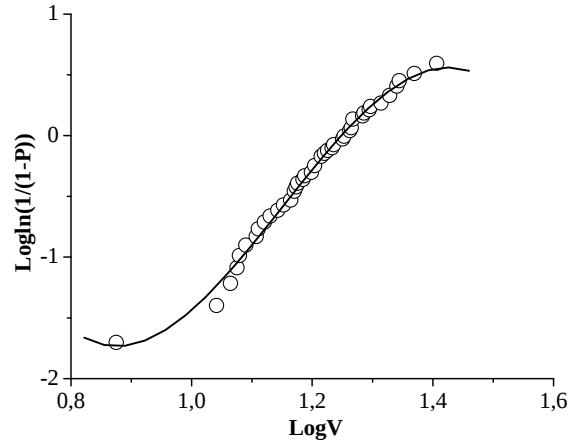


Figure V. 25 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2110 h à 190°C sous champ alternatif.

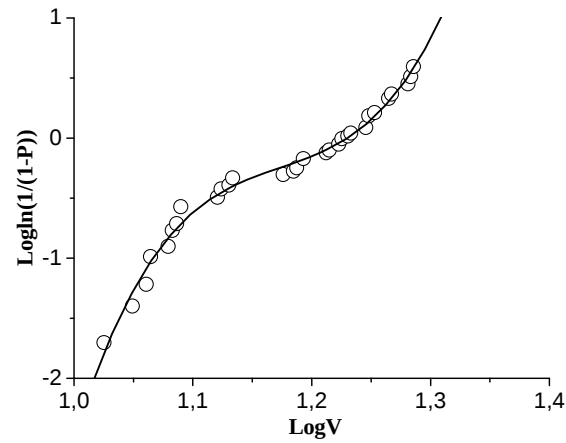


Figure V. 26 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2690 h à 190°C sous champ alternatif.

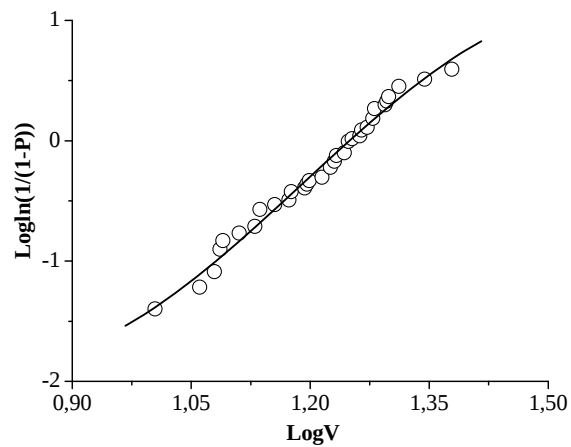


Figure V. 27 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3360 h à 190°C sous champ alternatif.

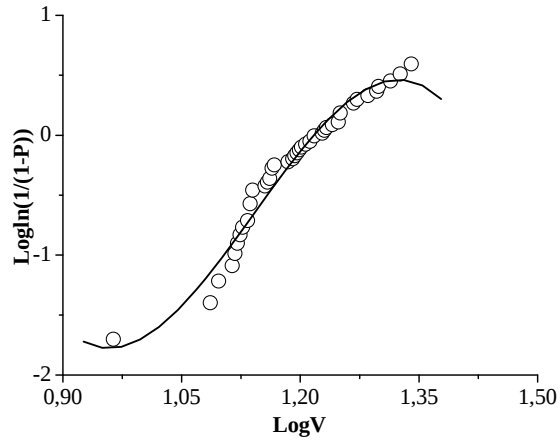


Figure V. 28 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3860 h à 190°C sous champ alternatif.

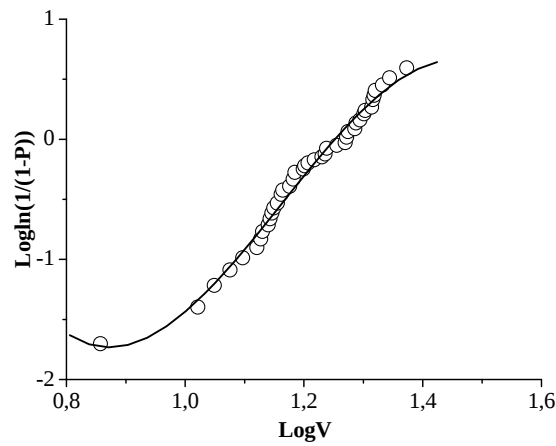


Figure V.29 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 4460 h à 190°C sous champ alternatif.

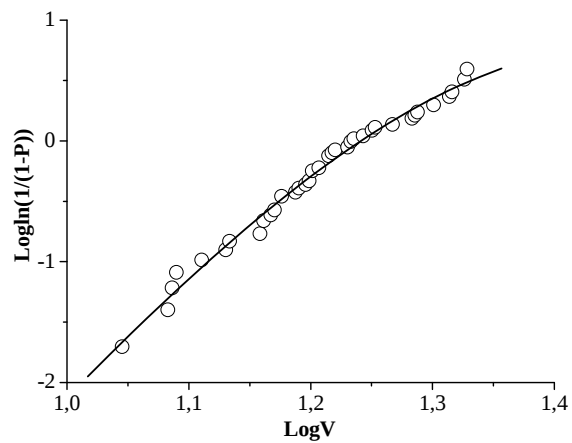


Figure V. 30 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 5830 h à 190°C sous champ alternatif.

3.2. Vieillissement à 210°C

Le temps de vieillissement à la température 210°C a atteint 3460 heures. Des prélèvements ont été effectués tous les 21 jours soit 504 heures. Au cours du vieillissement le changement de couleur du vernis a été observé après 1440 heures avec apparition de quelques taches bleues dans la partie torsadée.

3.2.1. Diagrammes de Weibull

a) Champ continu de polarité positive

Les figures V.31 –V.39 montrent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité positive.

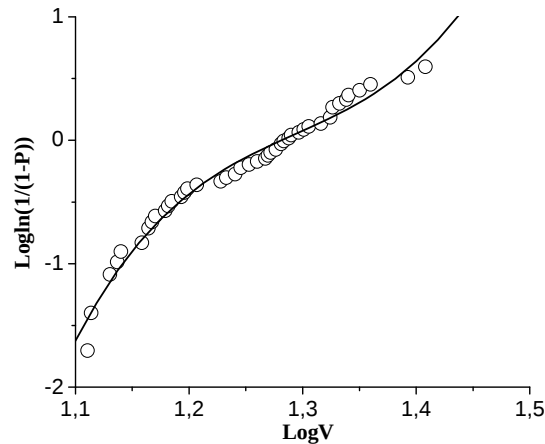


Figure V.31 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité positive avant vieillissement.

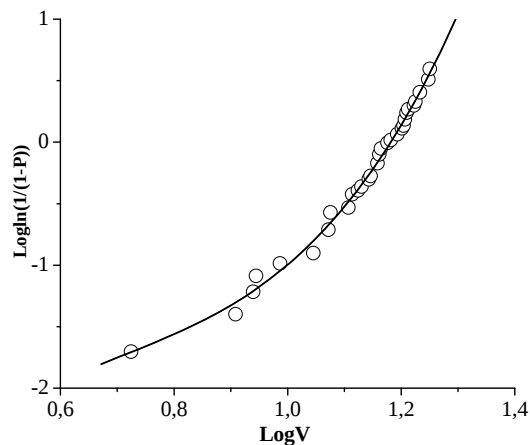


Figure V. 32 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 210°C sous champ continu de polarité positive.

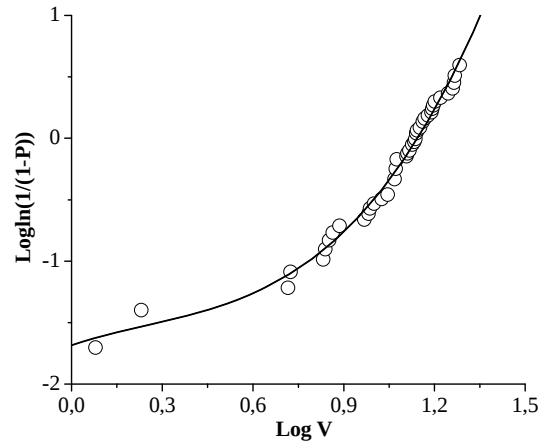


Figure V.33 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 940 h à 210°C sous champ continu de polarité positive

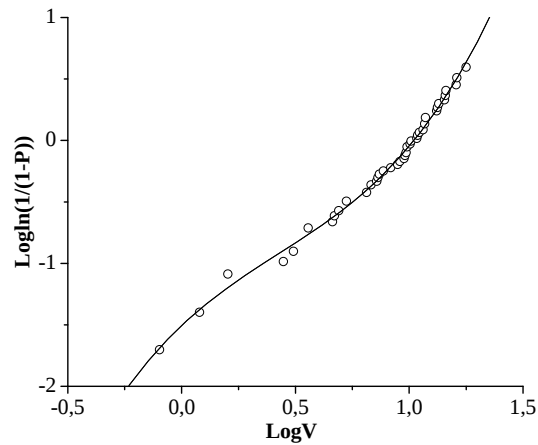


Figure V.34: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1440 h à 210°C sous champ continu de polarité positive.

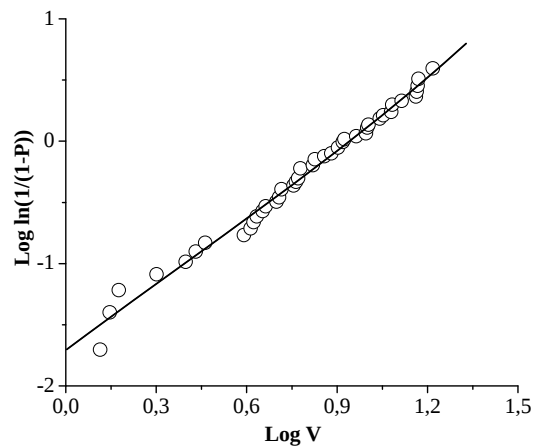


Figure V.35 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1950 h à 210°C sous champ continu de polarité positive.

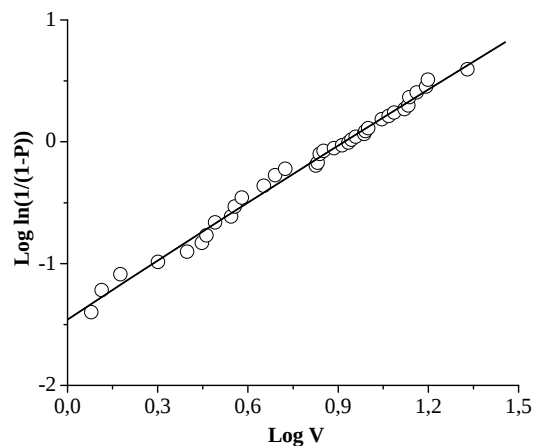


Figure V.36: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2470 h à 210°C sous champ continu de polarité positive.

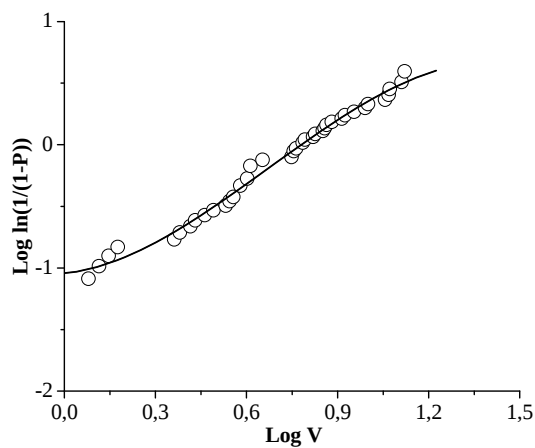


Figure V.37 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2880 h à 210°C sous champ continu de polarité positive.

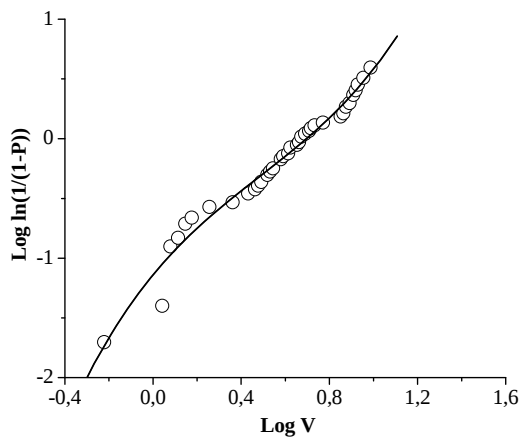


Figure V.38 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3360 h à 210°C sous champ continu de polarité positive.

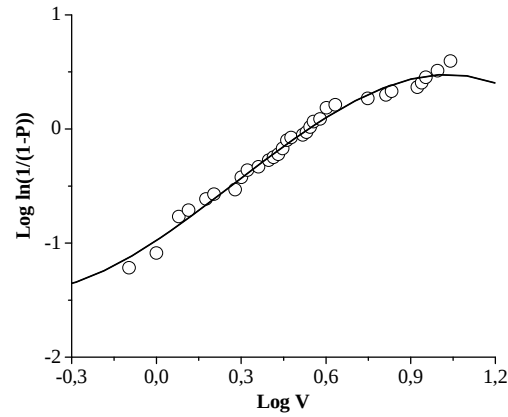


Figure V.39 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3460 h à 210°C sous champ continu de polarité positive.

b) Champ continu de polarité négative

Les figures V.40 – V.48 présentent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité négative.

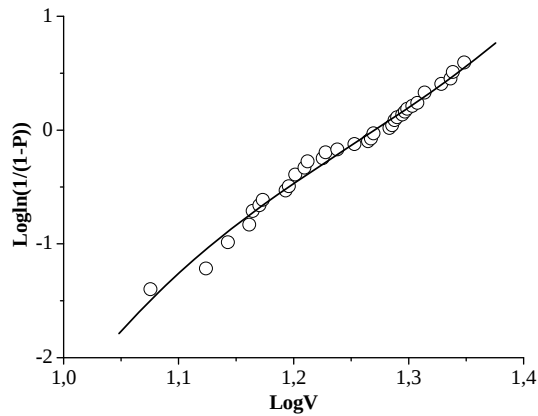


Figure V.40 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité négative avant vieillissement.

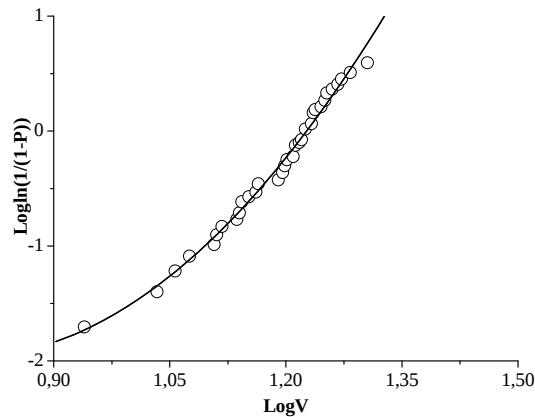


Figure V.41 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 210°C sous champ continu de polarité négative.

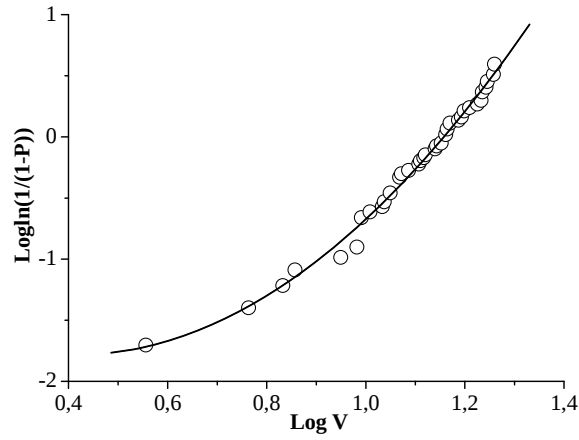


Figure V.42 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 940 h à 210°C sous champ continu de polarité négative.

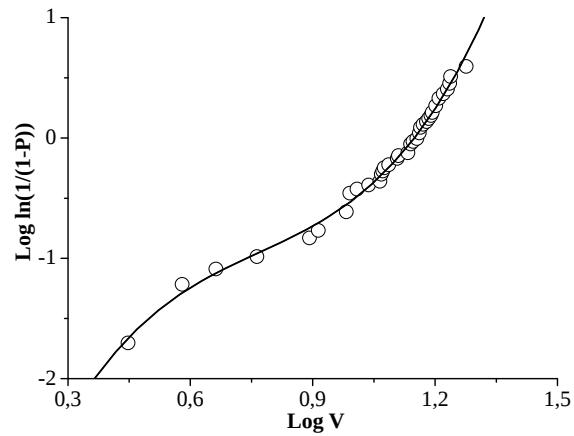


Figure V.43: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1440 h à 210°C sous champ continu de polarité négative.

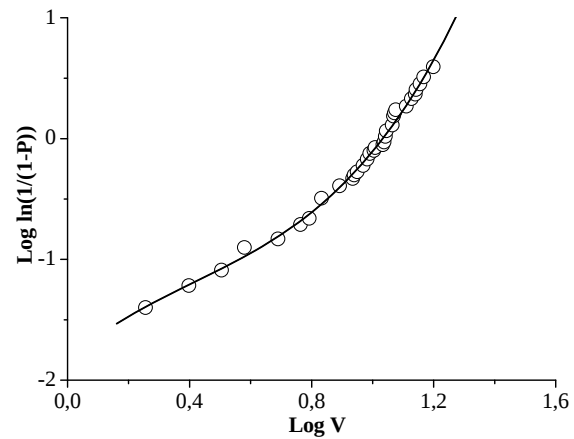


Figure V.44: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1950 h à 210°C sous champ continu de polarité négative.

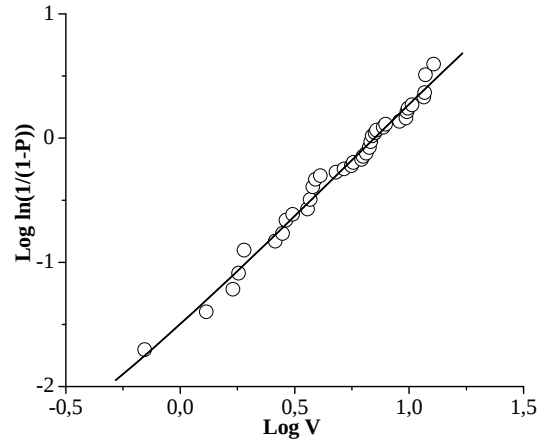


Figure V.45 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2470 h à 210°C sous champ continue de polarité négative.

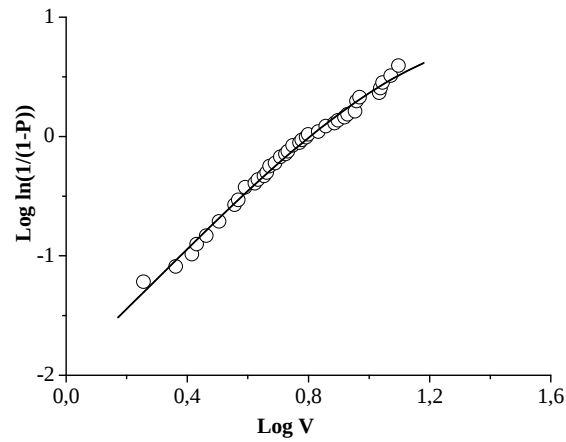


Figure V.46: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2880 h à 210°C sous champ continu de polarité négative.

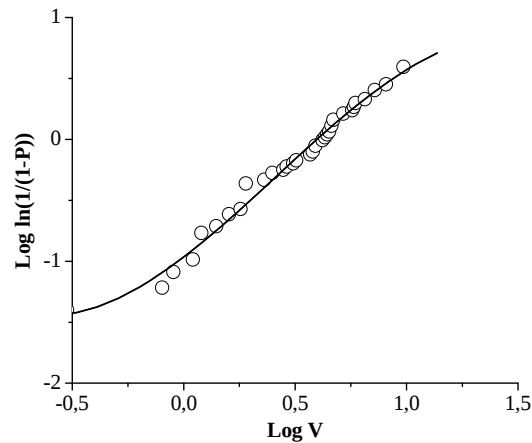


Figure V.47 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3360 h à 210°C sous champ continu de polarité négative.

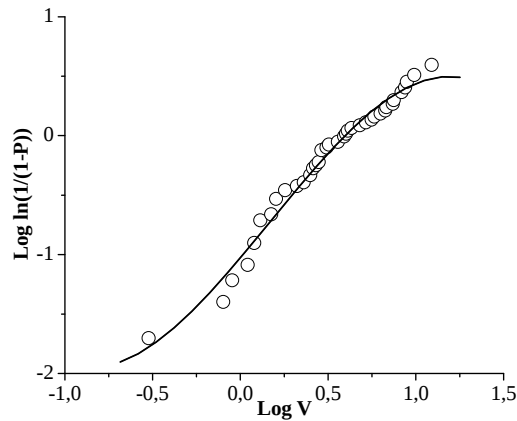


Figure V.48 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3460 h à 210°C sous champ continu de polarité négative.

c) champ alternatif

Les figures V.49 –V.57 montrent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ alternatif.

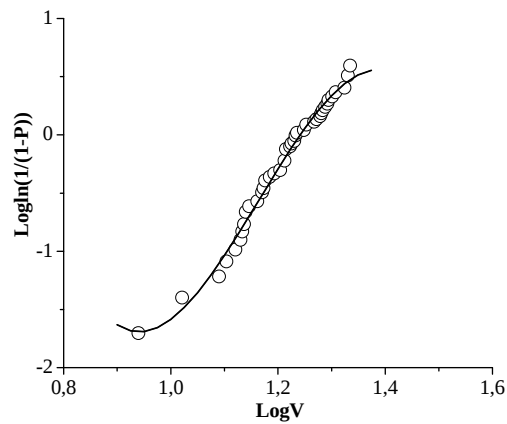


Figure V.49 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ alternatif avant vieillissement.

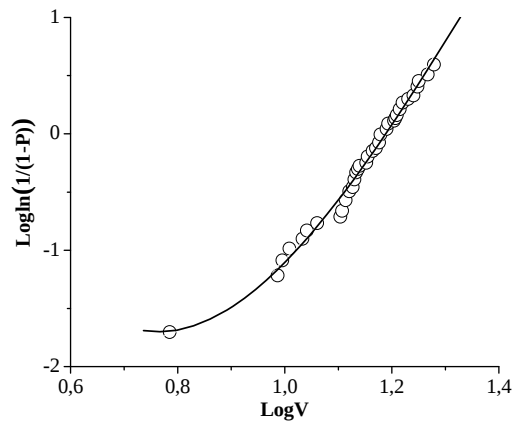


Figure V.50 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 210°C sous champ alternatif.

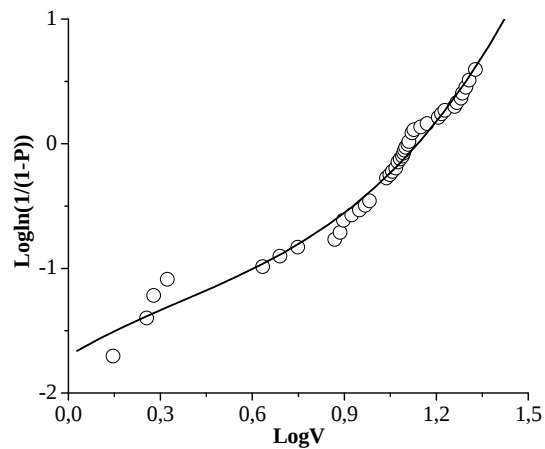


Figure V.51 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 940 h à 210°C sous champ alternatif.

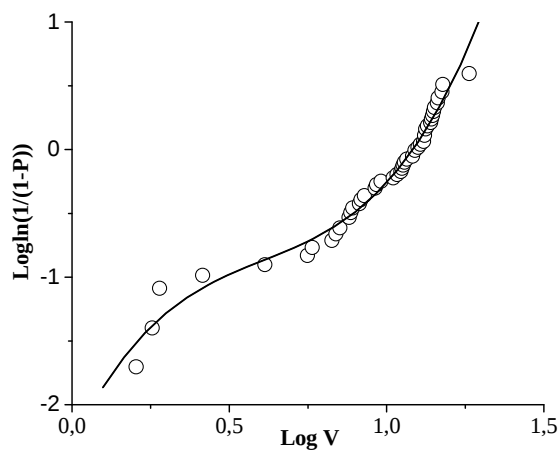


Figure V.52 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1440 h à 210°C sous champ alternatif.

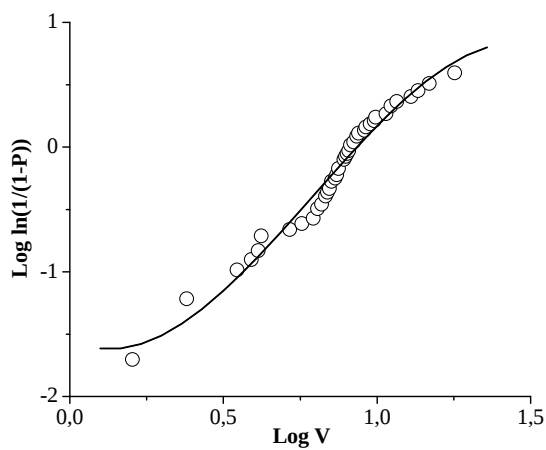


Figure V.53 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1950 h à 210°C sous champ alternatif.

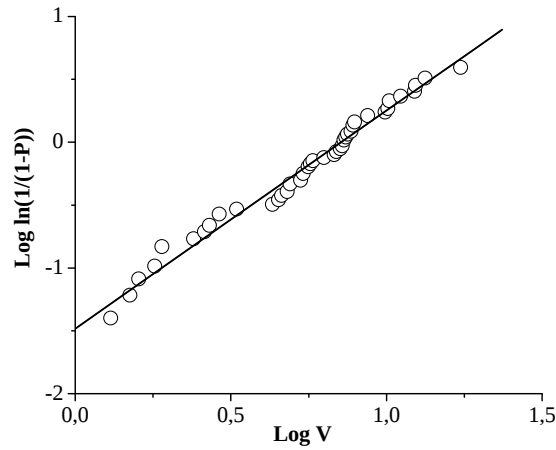


Figure V.54 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2470 h à 210°C sous champ alternatif.

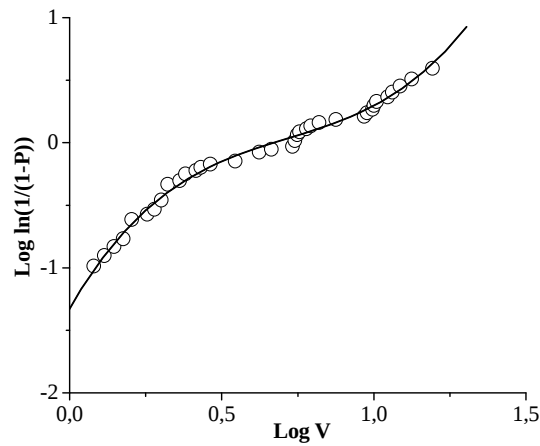


Figure V.55 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 2880 h à 210°C sous champ alternatif.

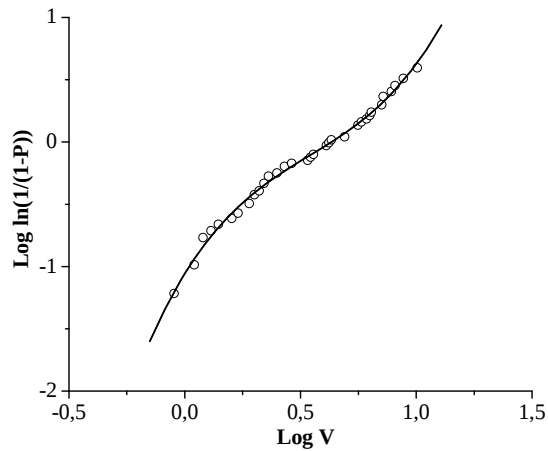


Figure V.56 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3360 h à 210°C sous champ alternatif.

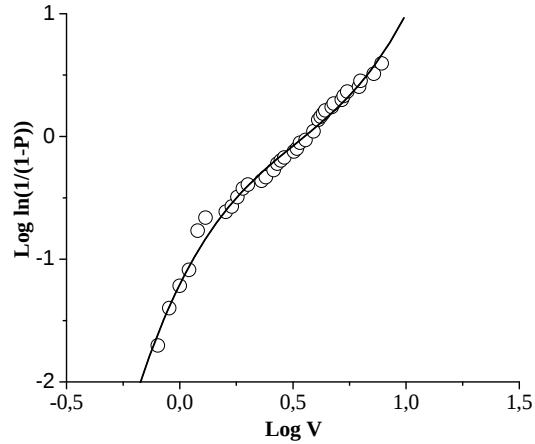


Figure V.57 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 3460 h à 210°C sous champ alternatif.

3.3. Vieillissement à 230°C

Pour la température 230°C, le temps de vieillissement a atteint 1200 h, les prélèvements sont effectués tous les 3 jours (72 h).

3.3.1. Diagrammes de Weibull

a) Champ continu de polarité positive

Les figures V.58 –V.66 montrent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité positive.

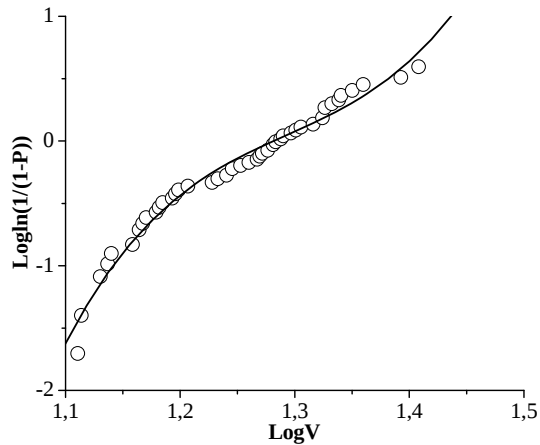


Figure V.58 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité positive avant vieillissement.

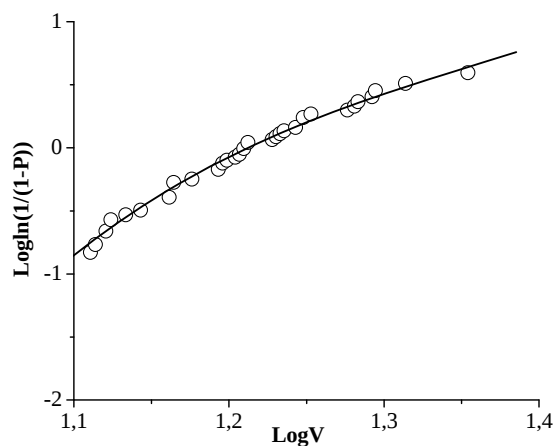


Figure V.59: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 120 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

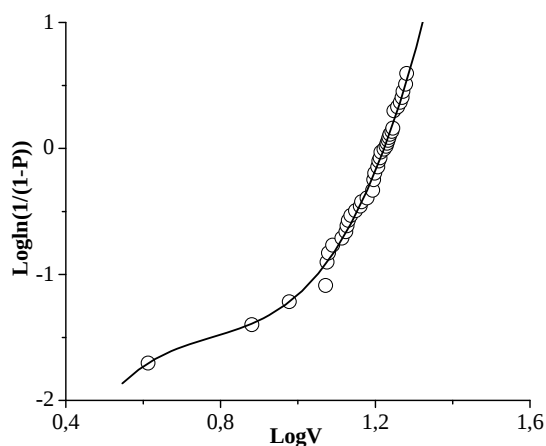


Figure V.60 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 290 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

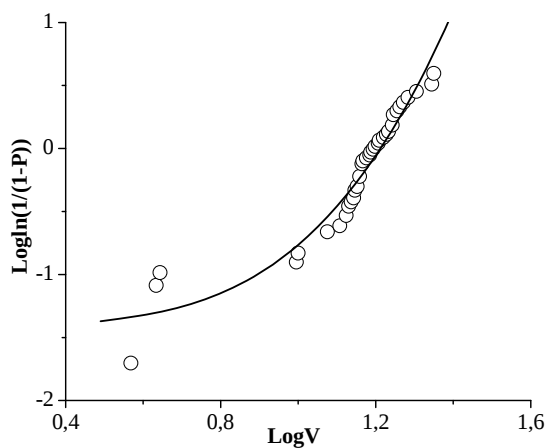


Figure V.61 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 360 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

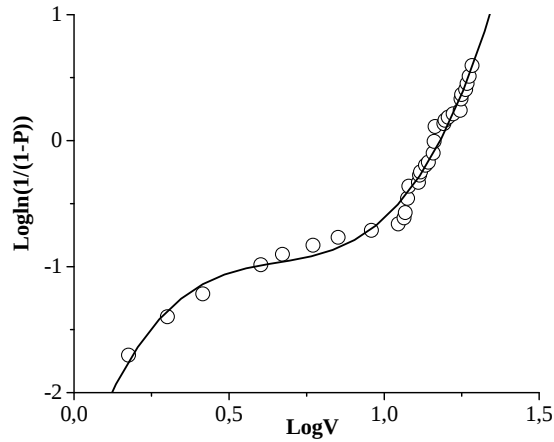


Figure V.62 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

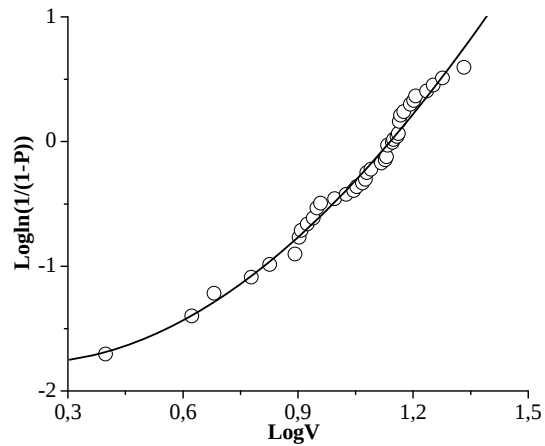


Figure V.63 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 620 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

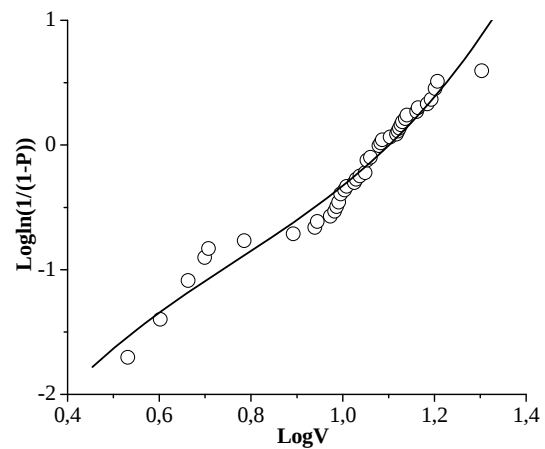


Figure V.64 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 720 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

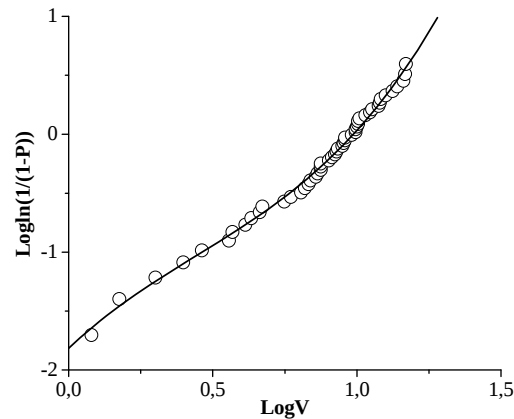


Figure V.65 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 960 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

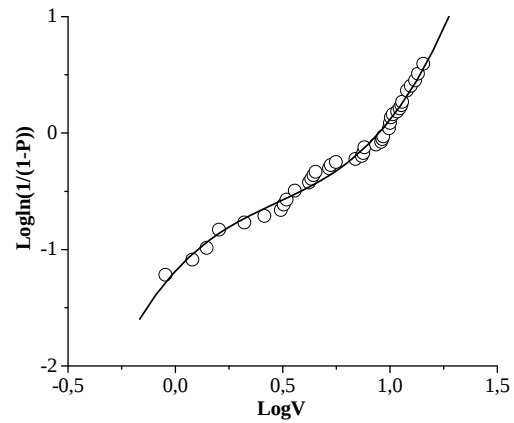


Figure V. 66 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1200 h à 230°C sous champ continu de polarité positive.

b) Champ continu de polarité négative

Les figures V.67-V.75 représentent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité négative.

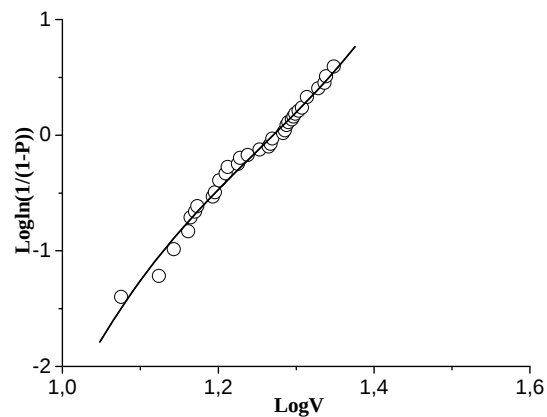


Figure V.67 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité négative avant vieillissement.

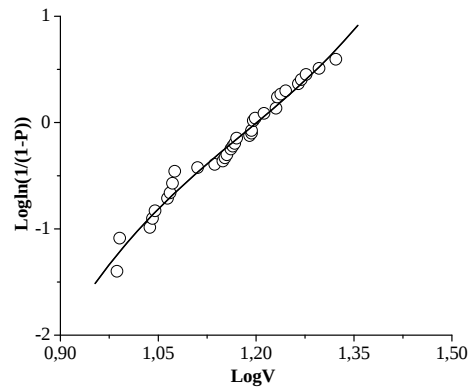


Figure V.68 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 120 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

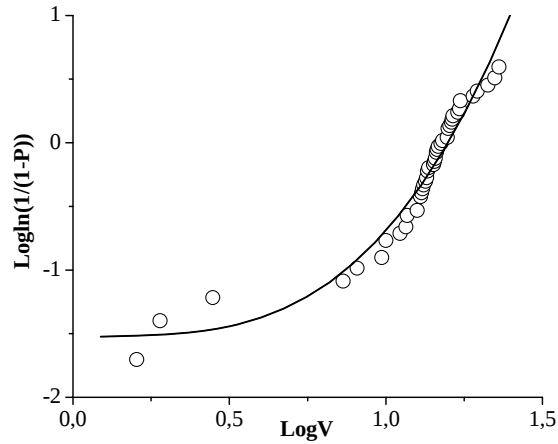


Figure V.69 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 290 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

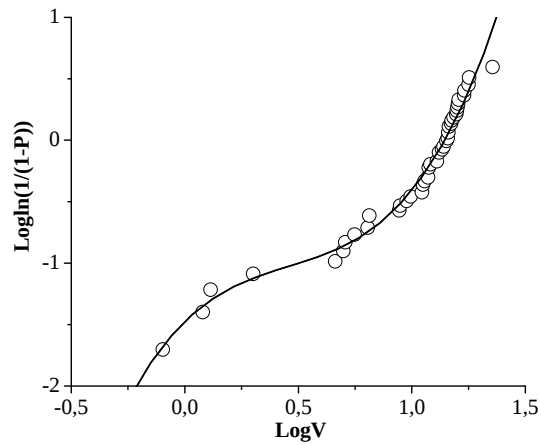


Figure V.70 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 360 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

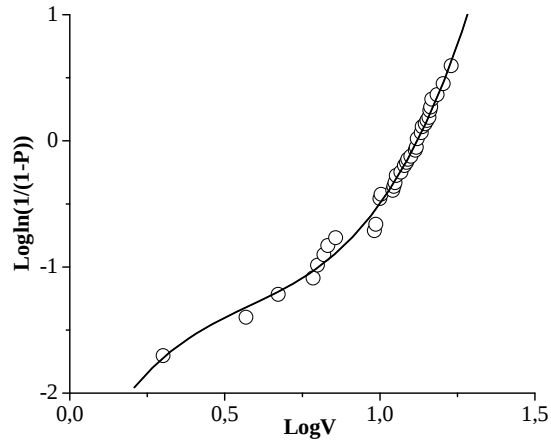


Figure V.71 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

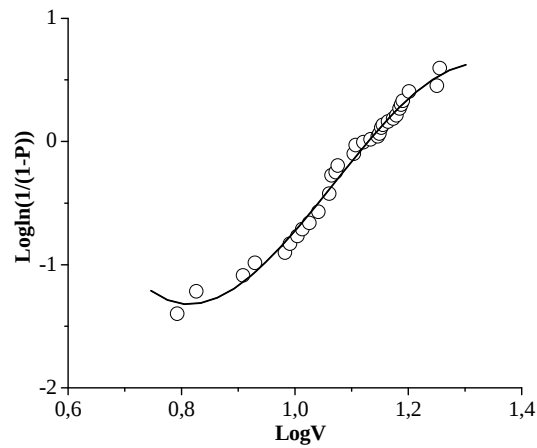


Figure V.72 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 620 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

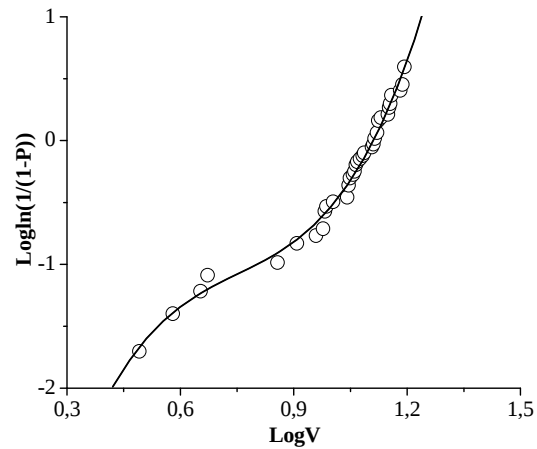


Figure V.73 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 720 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

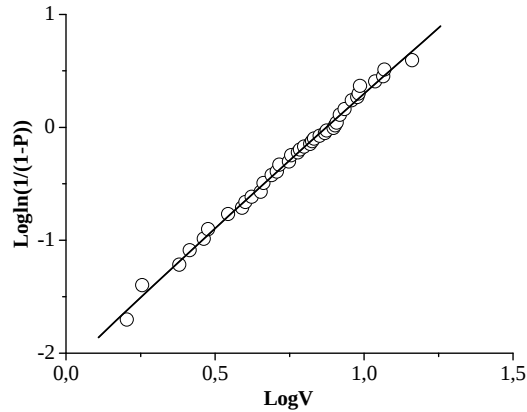


Figure V.74 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 960 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

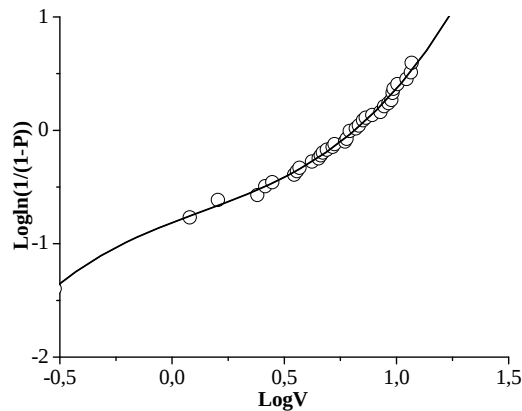


Figure V.75 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1200 h à 230°C sous champ continu de polarité négative.

c) Champ alternatif

Les figures V.76 – V.84 présentent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ alternatif avant vieillissement.

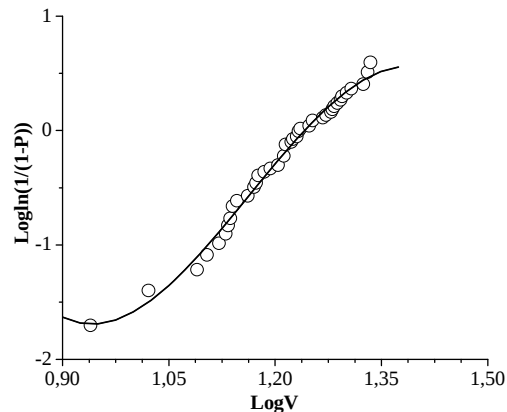


Figure V.76 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ alternatif avant vieillissement.

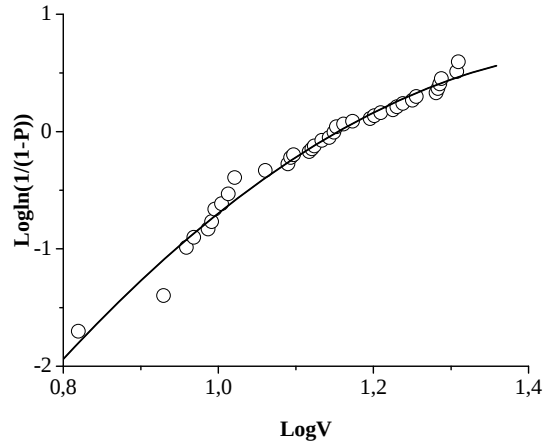


Figure V.77 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 120 h à 230°C sous champ alternatif.

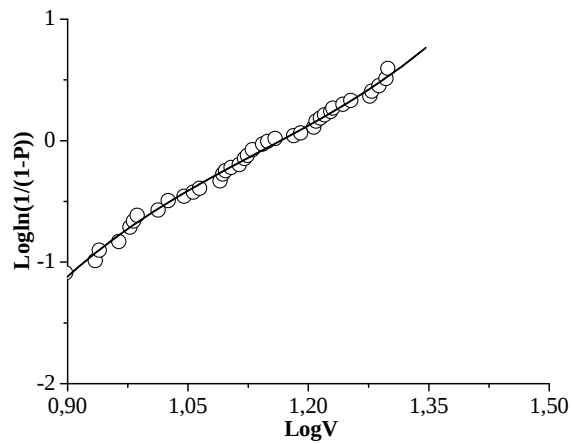


Figure V.78 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 290 h à 230°C sous champ alternatif.

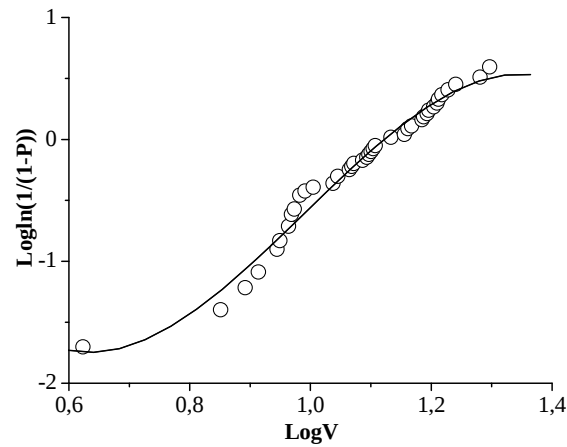


Figure V.79 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 360 h à 230°C sous champ alternatif.

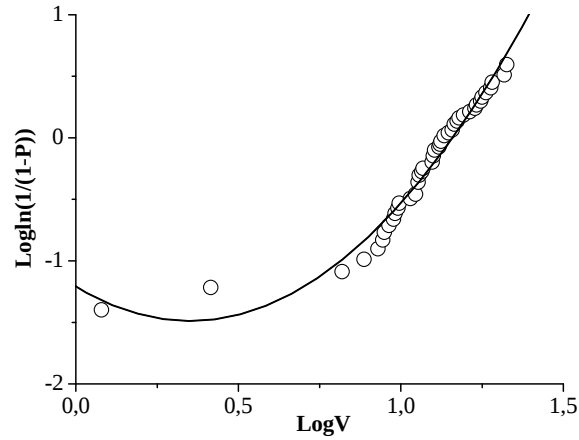


Figure V.80 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 230°C sous champ alternatif.

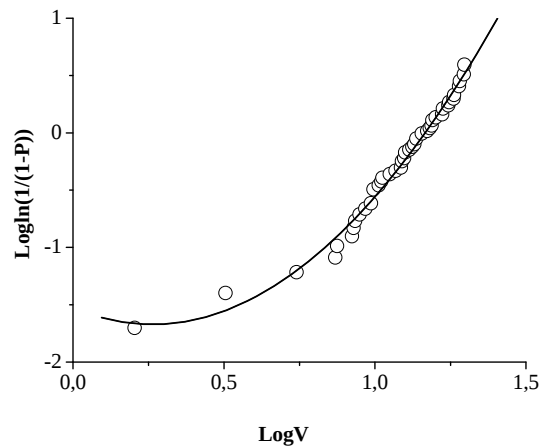


Figure V.81 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 620 h à 230°C sous champ alternatif.

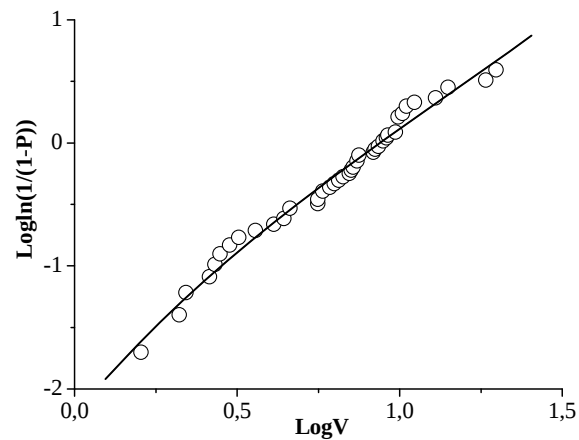


Figure V.82 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 720 h à 230°C sous champ alternatif.

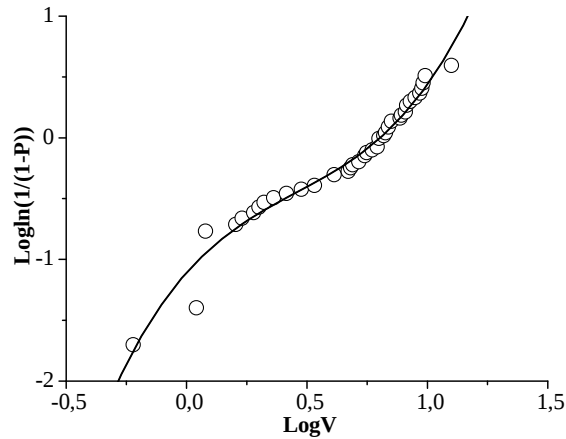


Figure V.83 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 960 h à 230°C sous champ alternatif.

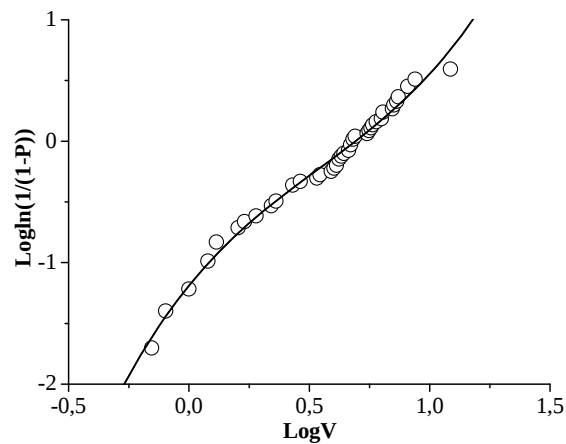


Figure V.84: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 1200 h à 230°C sous champ alternatif.

3.4. Vieillissement à 250°C

Le temps de vieillissement à 250°C a atteint 480 heures. Les prélèvements ont été effectués tous les 3 jours (72 h).

a) Champ continu de polarité positive

Les figures V. 85 – V.91 montrent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité positive.

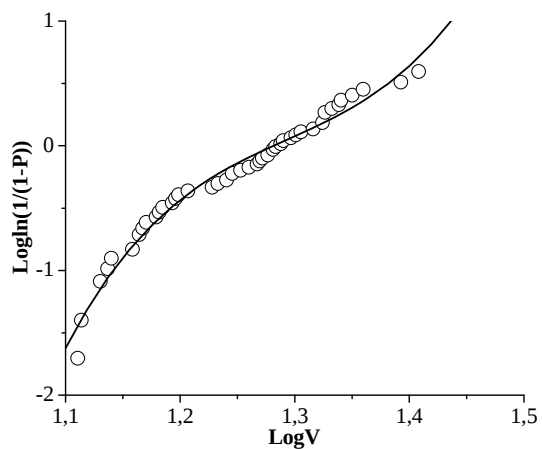


Figure V.85 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité positive avant vieillissement.

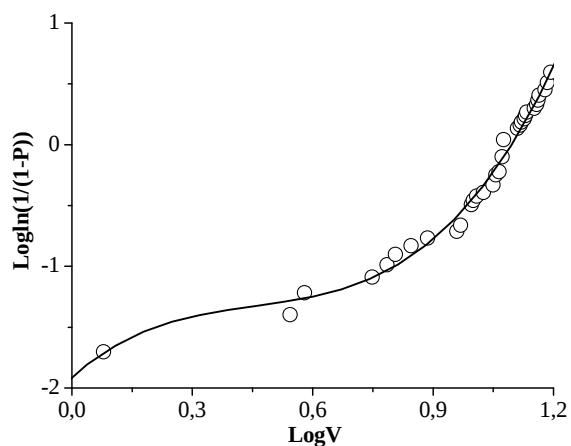


Figure V.86 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 72 h à 250°C sous champ continu de polarité positive.

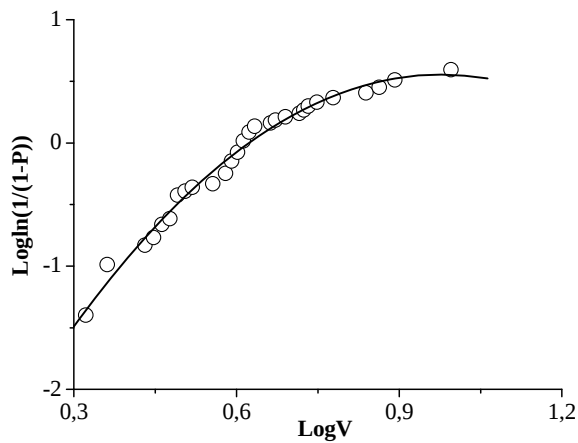


Figure V.87: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 140 h à 250°C sous champ continu de polarité positive.

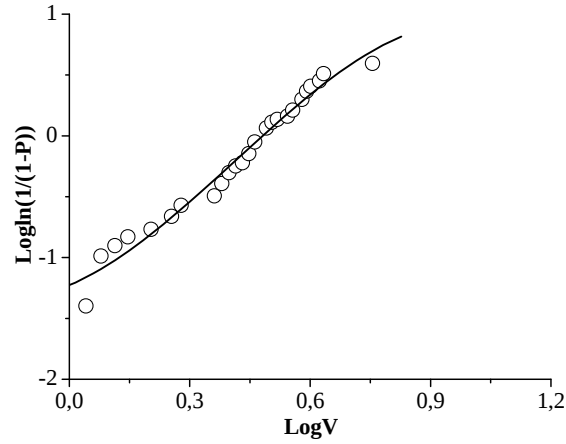


Figure V.88 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 220 h à 250°C sous champ continu de polarité positive.

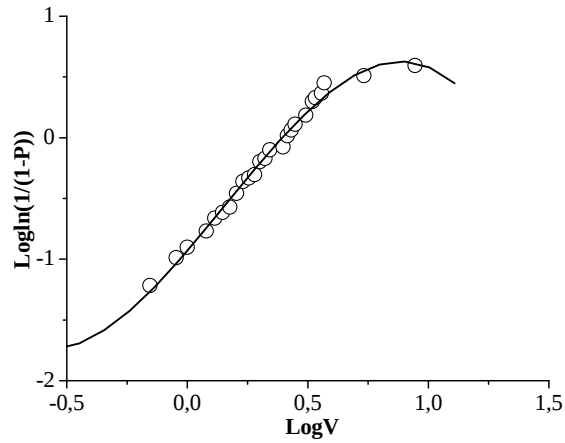


Figure V.89 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 310 h à 250°C sous champ continu de polarité positive.

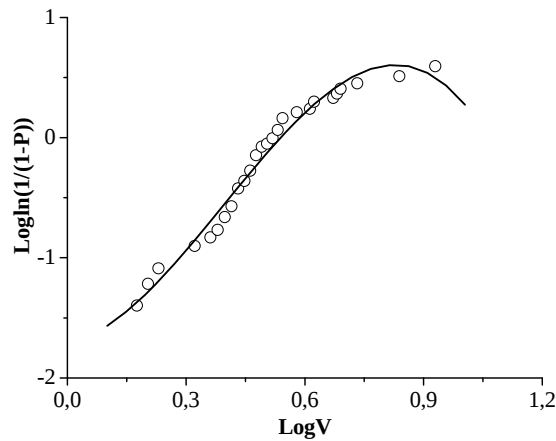


Figure V.90 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 360 h à 250°C sous champ continu de polarité positive.

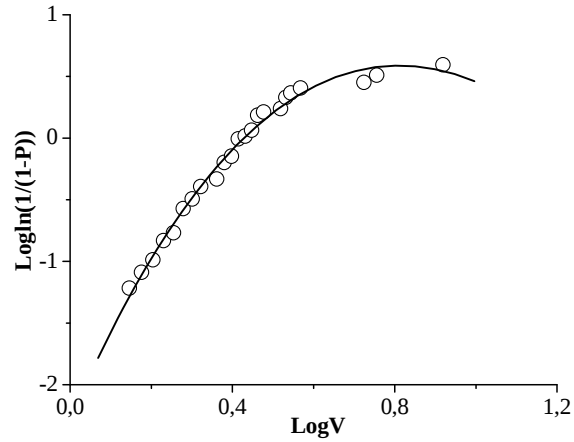


Figure V.91 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 250°C sous champ continu de polarité positive.

b) Champ continu de polarité négative

Les figures V. 92 – V.98 représentent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité négative.

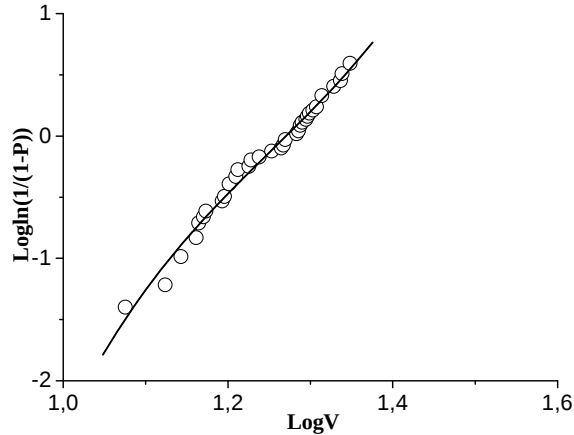


Figure V.92 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ continu de polarité négative avant vieillissement.

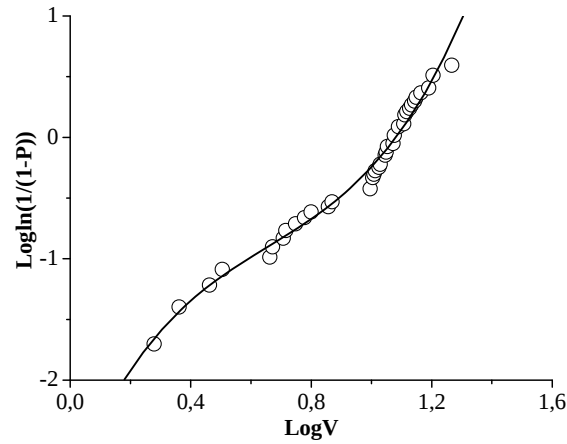


Figure V.93 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 72 h à 250°C sous champ continu de polarité négative.

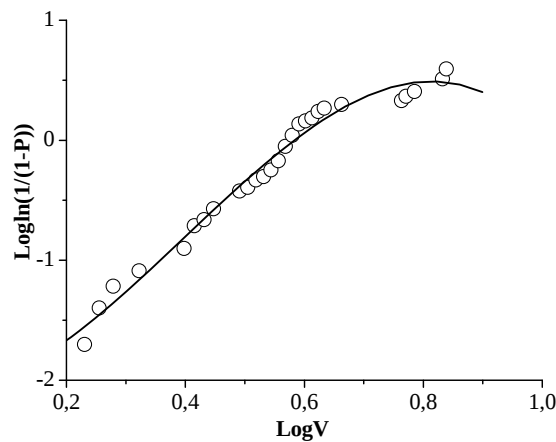


Figure V.94 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 140 h à 250°C sous champ continu de polarité négative.

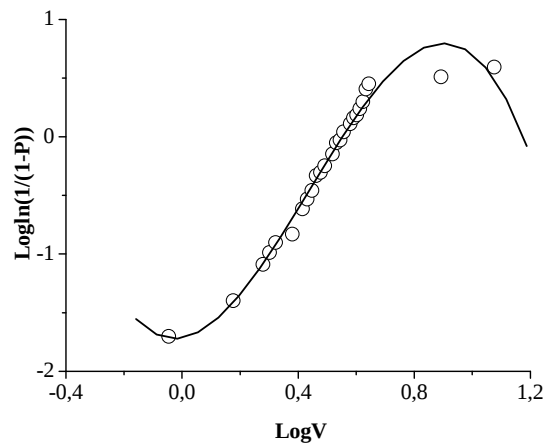


Figure V.95 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 220 h à 250°C sous champ continu de polarité négative.

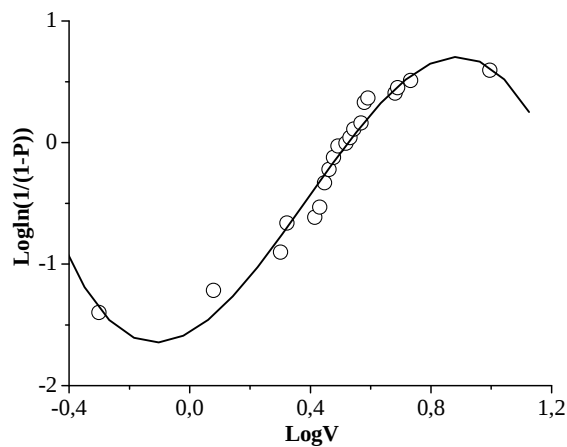


Figure V.96 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 310 h à 250°C sous champ continu de polarité négative.

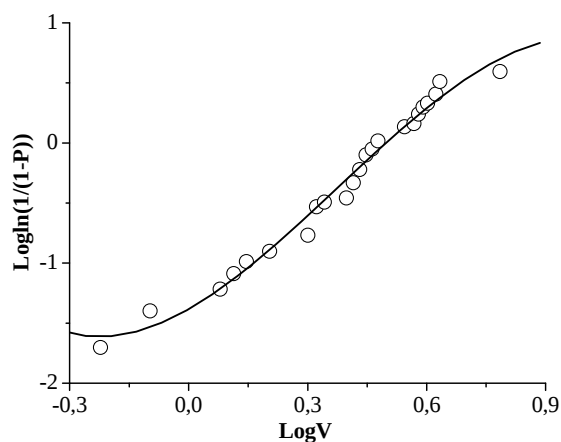


Figure V.97 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 360 h à 250°C sous champ continu de polarité négative.

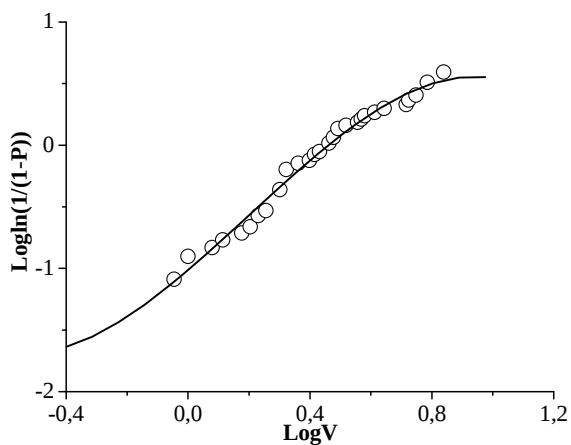


Figure V.98 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 250°C sous champ continu de polarité négative.

c) Champ alternatif

Les figures V. 99 – V.105 montrent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la tension de claquage sous champ alternatif.

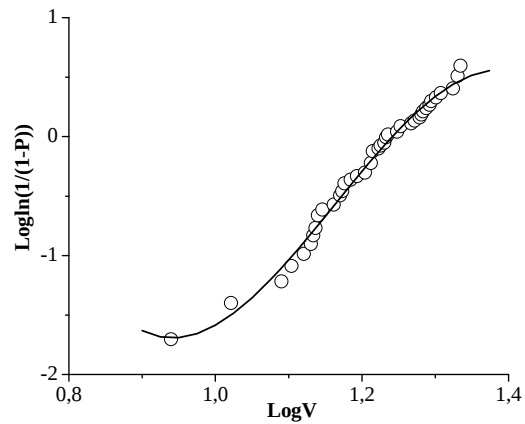


Figure V.99 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage sous champ alternatif avant vieillissement.

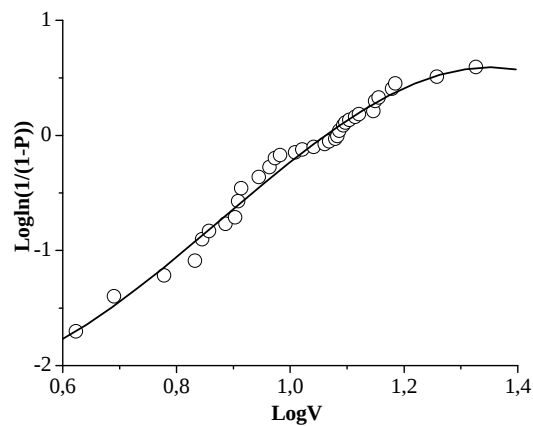


Figure V. 100 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 72 h à 250°C sous champ alternatif.

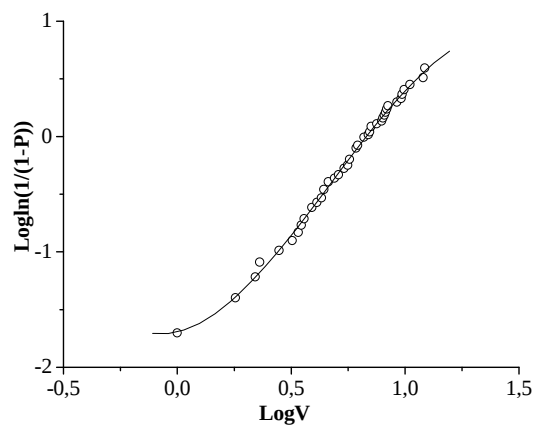


Figure V.101 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 140 h à 250°C sous champ alternatif.

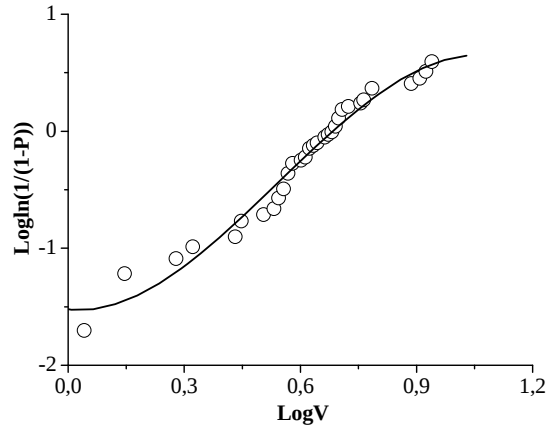


Figure V.102: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 220 h à 250°C sous champ alternatif.

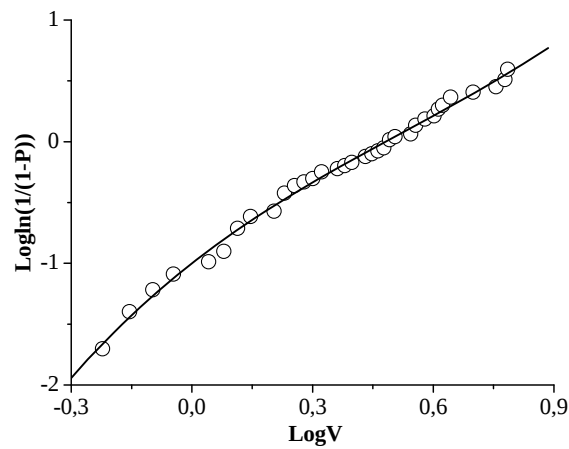


Figure V.103: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 310 h à 250°C sous champ alternatif.

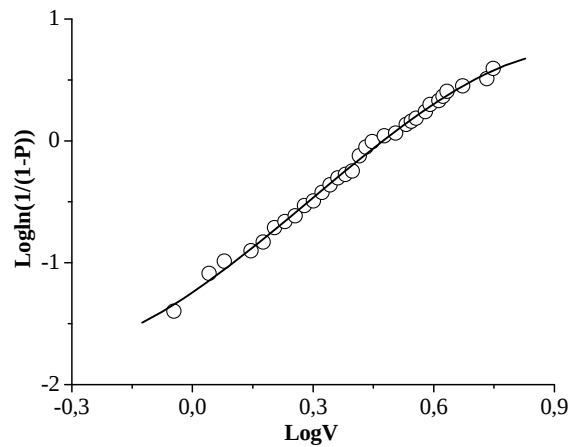


Figure V.104: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 360 h à 250°C sous champ alternatif.

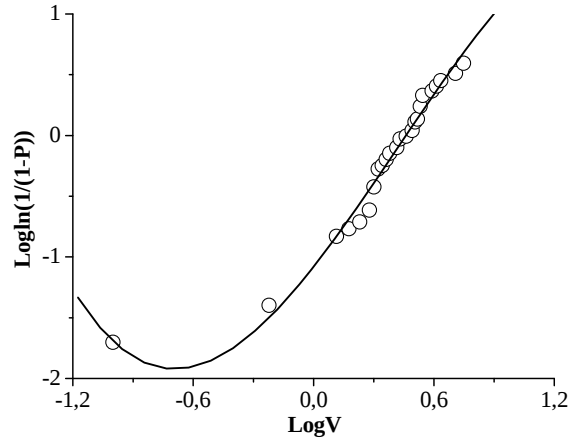


Figure V.105: Diagramme de Weibull à deux paramètres de la tension de claquage après 480 h à 250°C sous champ alternatif.

4. Comparaison des résultats obtenus

Les courbes donnant la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement aux différentes températures sous champ alternatif et continu de polarité positive et négative ont été tracées. Les résultats obtenus sont exposés aux figures V.106 (a, b, c).

4.1. Tension continue de polarité positive

L'évolution de la tension nominale de claquage sous champ continu de polarité positive en fonction du temps de vieillissement sous les différentes températures est présentée à la figure V.106.a.

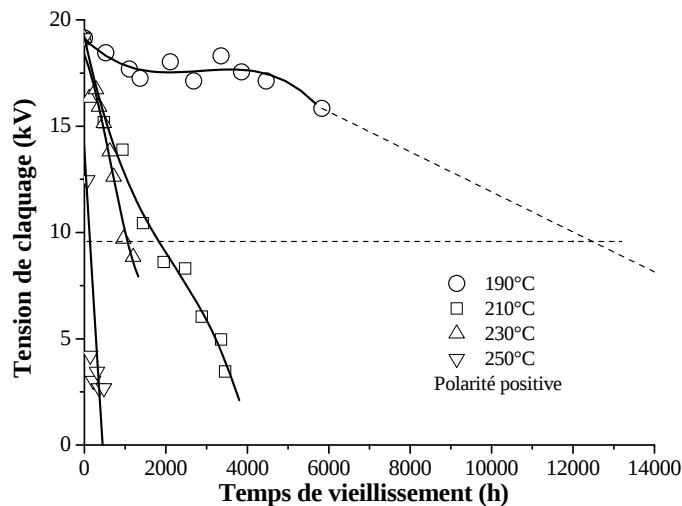


Figure V.106. a : Variation de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement sous champ continu de polarité positive pour les différentes températures.

Pour un vieillissement à 190°C, la tension nominale de claquage diminue de 19,15 kV à 17,25 kV après un temps de 1368 h puis augmente jusqu'à 18,3 kV correspondant à un temps de 3360 h. Au delà de ce temps, elle décroît de nouveau jusqu'à la valeur de 9,57 kV après une durée de 12 479 h.

La courbe caractérisant le vieillissement à 210°C présente une allure décroissante, après un temps de 3460 h la tension de claquage a atteint la valeur de 3,46 kV.

La caractéristique correspondant au vieillissement à 230°C est décroissante, la tension de claquage diminue en fonction du temps d'exposition à la chaleur, elle a atteint la valeur de 8,84 kV après un temps de 1200 h.

Alors qu'à la température 250°C, la tension de claquage décroît rapidement en fonction du temps de vieillissement. Après un temps de 480 h d'exposition à la chaleur, la tension nominale de claquage a diminué jusqu'à la valeur de 2,68 kV.

4.2. Tension continue de polarité négative

L'évolution de la tension nominale de claquage sous champ continu de polarité négative en fonction du temps de vieillissement sous les différentes températures est présentée à la figure V.106.b.

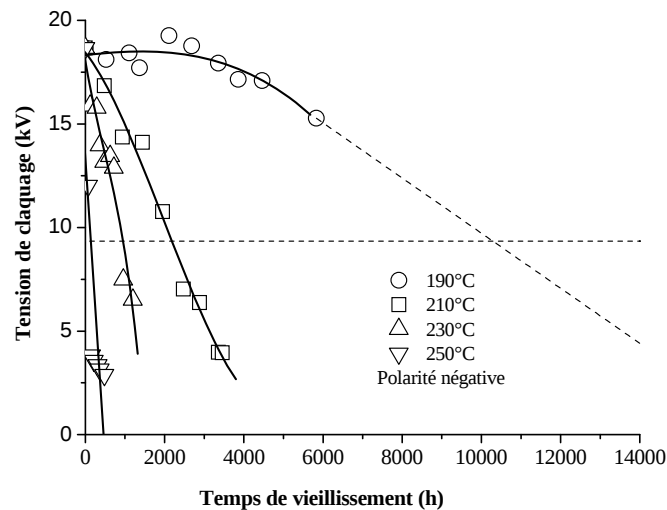


Figure V.106. b : Variation de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement sous tension continue de polarité négative pour les différentes températures.

Pour le cas du vieillissement à 190°C, la tension de claquage augmente de 18,67 kV à 19,26 kV après un temps de 2110 h, puis diminue jusqu'à la valeur de 9,34 kV correspondant à une durée de 10 295 h.

Pour le vieillissement à 210°C, la courbe est décroissante, la tension nominale de claquage diminue avec le temps de vieillissement, jusqu'à atteindre la valeur de 3,95 kV après 3460 h.

La courbe de variations de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement à 230°C est décroissante, la valeur de la tension nominale de claquage diminue jusqu'à 6,51 kV après une durée de 1200 h.

Dans le cas du vieillissement à 250°C, la courbe de variations de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement est décroissante, la valeur de la tension de claquage a atteint 2,88 kV après une durée de 480 h.

4.3. Tension alternative

L'évolution de la tension nominale de claquage sous champ alternatif en fonction du temps de vieillissement sous les différentes températures est présentée à la figure V.106.c.

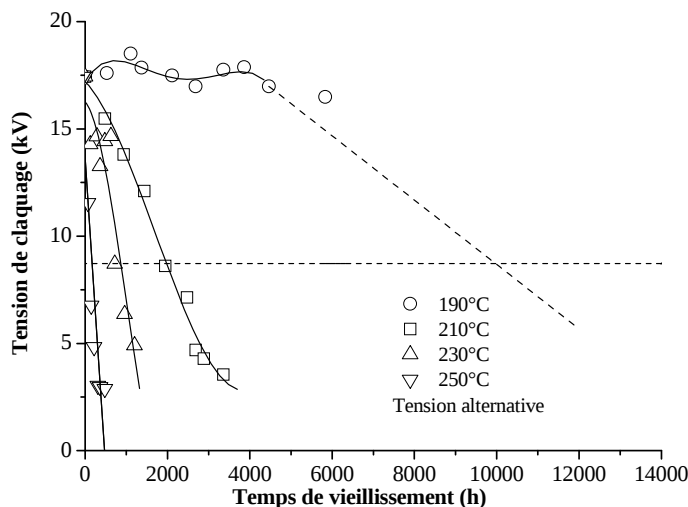


Figure V.106.c : Variation de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement sous champs alternatif pour les différentes températures.

Dans le cas de la température 190°C la tension nominale de claquage croît de 17,43 kV à 18,51 kV après une durée de 1100 h, puis décroît jusqu'à la valeur de 16,41 kV correspondant à un temps de 2690 h. Elle augmente de nouveau jusqu'à 16,98 kV après 4464 h ensuite décroît une nouvelle fois pour atteindre la valeur de 8,71 kV après une durée de 9971 h.

Dans le cas du vieillissement à 210°C, la tension de claquage diminue avec le temps de vieillissement, elle atteint la valeur de 3,55 kV après 3360 h d'exposition continue à la chaleur.

La courbe de variations de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement à 230°C est décroissante, la valeur de la tension nominale de claquage diminue jusqu'à 4,91 kV après une durée de 1200 h.

Finalement, la courbe de vieillissement à 250°C est une droite décroissante, la tension de claquage décroît rapidement et atteint la valeur de 2,89 kV après 480 heures.

5. Courbe de durée de vie

Les caractéristiques des figures V.106 (a, b, c) ont permis de déterminer la durée de vie du polyester-imide sous champ alternatif et continu de polarité positive et négative pour chaque température de vieillissement. Les résultats obtenus sont présentés au tableau V.1.

Température (°C)	190	210	230	250
Durée de vie sous champ alternatif (h)	9971	1984	869	167
Durée de vie sous champ continu de polarité positive (h)	12479	1826	1053	131
Durée de vie sous champ continu de polarité négative (h)	10295	2186	948	132

Tableau V.1 : Durée de vie du polyester-imide

La figure V.107 présente les courbes de durée de vie du polyester-imide.

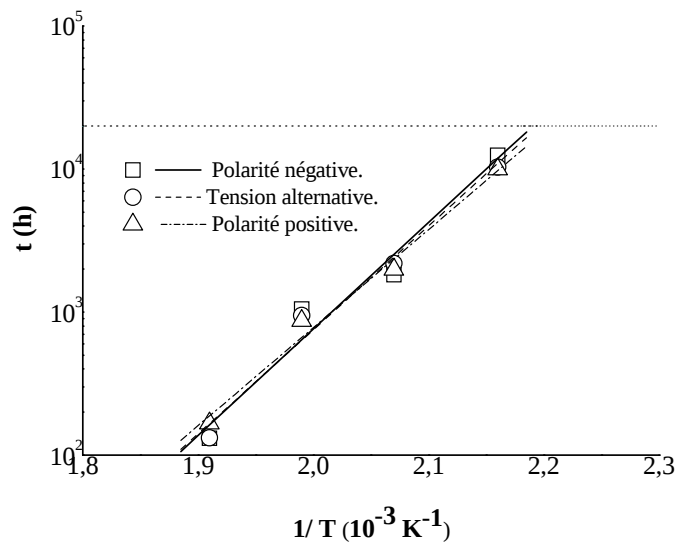


Figure V.107. Courbes de durée de vie du polyester-imide.

Les courbes de durée de vie du polyester-imide présentées à la figure V.107 sont linéaires, elles permettent de calculer les énergies d'activation de la dégradation thermique pour chaque température en déterminant leurs pentes successives. Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau V.2.

6. Calcul de l'énergie d'activation et de l'indice de température

L'exploitation des courbes de durée de vie du polyester-imide présentées à la figure V.107 a permis de calculer les énergies d'activation du polyester-imide ainsi que la valeur de l'indice de température correspondant. Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau V.2.

Champ appliqué Valeurs calculées	Alternatif	Continu de polarité positive	Continu de polarité négative
E (kcal/ mole)	31,455	34,142	33,326
TI (°C)	180,5°C	183,6°C	182,4°C

Tableau V.2 : Energie d'activation et indice de température du polyester-imide.

D'après les résultats du tableau V.2, nous pouvons constater que la valeur de l'indice de température augmente avec celle de l'énergie d'activation. Le matériau a un indice de température aussi grand et une énergie d'activation assez importante dans le cas de fonctionnement sous champ continu de polarité positive.

On peut noter que le matériau possède une durée de vie assez grande pour un fonctionnement sous tension continue de polarité positive.

7. Discussion et essai d'interprétation :

Les figures V.106 (a, b, c) montrent la complexité du phénomène de la dégradation. Il est clair aussi d'après ces figures que l'élévation en température accélère les processus de vieillissement.

Pour toutes les températures, un changement de couleur est observé, pour le cas de la température 190°C, on remarque que malgré le changement de couleur sous champ alternatif et continu de polarité négative, la tension de claquage augmente dans la première période de vieillissement, ce qui peut être expliqué par l'amélioration des propriétés du polyester-imide sous l'effet de réticulation du diélectrique. Quant aux pics, ils sont attribués à la relaxation des dipôles.

Pour les températures 210 et 230°C, on remarque la diminution de la tension de claquage, ce qui est probablement dû aux ruptures de chaînes du matériau suivies par un départ des molécules volatiles libérées.

Le noircissement des éprouvettes obtenu dans le vieillissement à 250°C peut expliquer que la dégradation thermique du polyester-imide est caractérisée par un changement irréversible de la structure qui est dû à l'apparition d'un produit thermostable justifiant le changement de couleur à la fin de la dégradation.

L'allure des courbes présentant les variations de la tension de claquage en fonction du temps de vieillissement illustre que le processus de vieillissement se fait par une réaction chimique.

Au cours de cette étude, deux mécanismes importants de la dégradation sont mis en évidence, l'un est celui de thermolyse, l'autre est la thermo-dégradation. Les agents responsables de ces divers phénomènes sont l'oxygène et la chaleur.

Aymonino dans son étude a montré que la présence d'oxygène est défavorable à la stabilité thermique, mais quelque soit le milieu réactionnel, les premiers produits de la dégradation sont les mêmes et ils sont issus de la fonction ester [1].

Il a aussi démontré que les produits de dégradation en milieu inerte ne sont pas les mêmes que ceux présents dans un milieu oxydant [1]. Dans ce dernier, l'effet combiné de la chaleur et de l'oxygène conduit à la dégradation totale de l'isolant après formation de la couche oxydée en surface et des réactions de dépolymérisation qui peuvent prendre naissance même en l'absence d'oxygène dans l'air.

La courbe d'endurance thermique est une droite, ce qui indique que la dégradation thermique est gouvernée par une réaction chimique du premier ordre.

Le calcul des valeurs de l'énergie d'activation et de l'indice de température a permis de constater que la nature du champ appliqué influence sur la valeur de l'énergie d'activation du phénomène, ainsi que sur la valeur de l'indice de température (durée de vie) du matériau.

Le matériau possède une durée de vie assez grande dans le cas de fonctionnement sous champ continu de polarité positive.

- [1] Fabrice. Aymonino « Contribution à l'étude du comportement des systèmes d'isolation des machines tournantes à courant alternatif fonctionnant sous très hautes températures (200-400°C) ». Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, décembre 2008.
- [2] M. Nedjar. « Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long terme des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension », Thèse de doctorat d'état es sciences physique, université de Tizi- Ouzou, Juin 2003.
- [3] H-G. Elias and F. Vohwinkel. « New commercial polymers 2 », Gordon and breach science publisher. New York. 1986.
- [4] M. P. Stevens. « Polymers chemistry, an introduction », New York, Oxford University Press, 1999.
- [5] M. Sukumar, D. Sajal. « Synthesis and properties of polyesterimide and their isomers ». Journal of applied polymer science, Vol. 26, PP. 957– 978, 1981.
- [6] H. Li, Y. Luo, X.L. Tang, and S. j. Li. « Studies on phase separation of polyesterimide modified epoxy resins. I. Synthesis and properties of organo -soluble polyesterimides ». Journal of Macromolecul. Sci – pur application. Chem., A 39(8), PP. 815 – 824, 2002.
- [7] P. Koechlin, « Emaux isolants (fils émaillés) », Techniques de l'ingénieur, Traité de Génie Electrique, D 2630, 1990.
- [8] C. Oudet. « Polymères, structure et propriétés : introduction », Edition Masson, Paris, 1994.
- [9] Norme DIN 53483, Mars 1990.
- [10] C. Menguy, « Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides ».Techniques de l'ingénieur. D2II 2310, 2005.
- [11] Norme DIN 53481, mars 1974.
- [12] M.F. Ashby, D. R. H. Jones. « Matériaux, microstructures et mise en œuvre». Edition Dunod , Septembre 1991.
- [13] Norme DIN 53482, mai 1983.
- [14] B. Fallou. « Comportements spécifiques des matériaux isolants solides soumis à diverses contraintes (chaleur, champ électrique, radiations), résumé des connaissances actuelles et normalisation ». RGE N°10, PP. 756-767, octobre 1985.
- [15] J. Verdu . « Comportement à long terme ». Techniques de l'ingénieur, Traité de Génie Electrique, A3150, 1975.
- [16] IEC60 216, «Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials. Part 1: General guidelines for aging procedures and evaluation of test results », fifth issue, 2000.

- [17] D. W. Van Krevelen « Properties of polymers: their correlation with chemical structure», Elsevier, Amsterdam, 1990.
- [18] J. Verdu , « Matériaux polymères, relations, structure-propriétés », cours ENSAM, Paris, 1992.
- [19] B. Fallou, «Caractéristiques des isolants solides. Méthode de mesure, valeurs et signification ». Techniques de l'ingénieur, A3151, 1980.
- [20] J. Verdu, «Vieillissement des plastiques». AFNOR Technique. Edition Eyrolles, Paris.1984.
- [21] J.C. Patterson- Jones, «The mechanism of the thermal degradation of aromatic amine cured glycidyl ether type epoxy resins». J . Appl. Poly. Sci, 19, pp. 1539-1547, 1975.
- [22] T.K.Tsotsis, «Thermo-oxydative ageing of composite materials». J. Comp. Mat, 29 (3), pp. 410-422, 1995.
- [23] N. Pccirelli et M.E.R. Shanahan, «Thermal ageing of a supported epoxy-imide adhesive». Polymer, 41, pp. 4077-4087, 2000.
- [24] M. Nedjar, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés du PVC utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension », Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou,1991.
- [25] N. Rose, « Etude de la dégradation thermique et du comportement au feu de résines époxydes utilisées dans l'aéronautique», Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologie de Lille.1995.
- [26] G.F. Tudgey, «The effects of oxydative and hygrothermal ageing on carbon fibre composites comprising hygrophobically enhanced epoxy matrices», Ph D, University of Surrey, UK.1998.
- [27] M. Lazzari and O. Chiantore, «Thermal ageing of paraloid acrylic protective polymers». Polymer, N° 41, pp. 6447-6455. 2000.
- [28] V.M. Montsinger, «Loading transformers by temperature». AIEE Trans, Vol.67, pp 113-122, 1948.
- [29] G.C. Montanari, G. Mazanti, L. Simoni, «Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades». IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.9, N° 5, pp 730-745, october 2002.
- [30] T.W.Dakin, «Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon". AIEE Trans, Vol.67, pp 113-122, 1948.
- [31] T.W.Dakin, «Electrical insulation deterioration». Electrotechnology, pp. 123-130, 1960.
- [32] B. Fallou, P. Belloc, « Etude de l'endurance des matériaux à l'action de la température et des rayonnements», RGE , N°3, pp. 217-224, mars 1971.

- [33] G.C. Montanari, «An investigation on the thermal endurance of EPR cable models». IEEE Trans. EI, Vol 25, N° 6, pp 1046-1055. december 1990.
- [34] J.-P.Trotignon, J.Verdu, A. Dbraczynski, M. Piperau, « Matières plastiques, structures, propriétés, mise en oeuvre, normalisation». Editions Nathan/VUEF, Paris, 2002.
- [35] G. Stevens, B. Fallou, A. Day, « Méthodes complémentaires aux essais d'endurance thermique des matériaux isolants». Rapport N15-05, CIGRE, 1982.
- [36] L. Deschamps, C. Caillot, M. Paris, J. Perret, « L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles haute tension et très haute tension », RGE, N° 5, pp 343-359, mai 1983.
- [37] L. Simoni, «Aging theory of engineering materials». Altra Frequenza, Volume XLII, N°10, october 1973, pp. 501-509.
- [38] CEI 216-1, « Méthodes générales pour la détermination des propriétés d'endurance thermique, des indices de température et des profils d'endurance thermique». Edition 1974.
- [39] C. Marais, X. Colin, J.P. Favre et H. Levadoux, « Relation entre perte de masse d'un composite et thermo-oxydation de la resine : approches locales et globales », Proceedings 11th J. Nat. Comp, pp 227-234, 1998.
- [40] E.A.Turi, « Thermal characterisation of polymeric materials, 2nd Ed», Ed Acad. Press, San Diego, 1997.
- [41] I. Bazovski , « Fiabilité, théorie et pratique de la sûreté de fonctionnement », Edition Dunod, 1996.
- [42] S. Khelil , «Caractérisation du papier Presspahn utilisé dans l'isolation des transformateurs de haute tension», Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, octobre 2004.
- [43] S. Aivazian, I. Enukov, L. Méchalkine, « Elément de modélisation et traitement primaire des données», Editions mir, Moscou, 1986.
- [44] W. Weibull, «A Statistical distribution function of wide applicability », Journal of Applied mechanics, Vol.18, pp. 293-297, 1951.
- [45] F. Bournane, M. Bournane, M. Nedjar, A. Beroual, «Apport de la loi de Weibull à la compréhension de la rupture diélectrique des isolants solides », 4ème conférence nationale de la haute tension, Ghardaia, 16 et 17 Janvier 2002.
- [46] C. Chauvet and C. Laurent, «Weibull statistics in short term dielectric breakdown of thin polyethylene films», IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol 28, N° 1, February 1993.

- [47] A. Darhaoui, « Caractérisation de la tenue diélectrique des polyéthylènes sous champ alternatif à 50 Hz », Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse 1985.
- [48] A. Pollard et C. Rivoire, « Fiabilité et statistique prévisionnelles - la méthode de Weibull », Edition Eyrolles, Paris, 1971.
- [49] J.M. Oudin, Y. Reyrolle, H. Thevenon, « Théorie statistique du claquage électrique », RGE, N°4, pp. 430- 436, 1968.
- [50] N. Khalèche, A. Boubakeur, A. Ouabdessalam et C. Laurent, « Application de la loi de Weibull aux phénomènes de Vieillissement et à l'évolution de la durée de vie du polychlorure de Vinyle », 2ème CEA94, Alger, novembre 1994.
- [51] R. Lacoste, E. Loudghiri et J. Meric, « Sur la notion de gradient de seuil dans le phénomène de la rupture diélectrique des isolants solides soumis à des rampes de tension », R.G.E, N°10, pp. 769-775, octobre 1985.
- [52] C. Chauvet, « Mise au point d'une méthodologie pour des essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des isolants synthétiques de câbles haute tension », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, juin 1992.
- [53] R. Elsobhi, « Modélisation de la rupture diélectrique des isolants solides sous les effets thermiques et mécaniques combinés », Thèse de Doctorat, Génie Electrique, Toulouse, 1994.
- [54] Norme CEI 60 851-2 « Fil de bobinage, méthodes d'essai. Partie 2 : Détermination des dimensions », février 1998.
- [55] Norme CEI 60 317-0-1, « Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage. Partie 0 : Prescriptions générales, section, fil de section circulaire en cuivre émaillé », juin 2000.
- [56] Norme CEI 60 851-3, « Fil de bobinage, méthodes d'essai. Partie 3 : Propriétés mécaniques », février 1998.
- [57] Norme CEI 60 851-5, « Fil de bobinage, méthodes d'essai. Partie 5: Propriétés électriques », février 1998.
- [58] DIN 53481/VDE0303, « Specification for electrical tests of insulating materials, breakdown voltage, and electric strength », 02 november 1974.