REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

THEME

Effet du Vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du polyméthacrylate de méthyle (PMMA)

Proposé et dirigé par :

M[r] : M. NEDJAR

Etudié par :

M[elle] : AZZI Nadia

M[elle] : BOUKSIL Malika

Promotion:2007/2008

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Monsieur M. NEDJAR pour sa disponibilité, ses précieux conseils et sa bienveillance q'il n'a cessé de prodiguer à notre égard.

D'autre part, nos vifs remerciements au personnel du Laboratoire du Recherche Geomatériaux, Environnement, Aménagement (L. G .E .A) qui nous ont aidé à effectuer notre stage pratique en particulier Monsieur O. BOUDLLAL.

Notre gratitude va à l'adresse de notre co-promoteur Monsieur M. S. HERZINE pour sa constante disponibilité et le soutien qu'il nous a apporté pour mener à bien ce travail.

Nous remercions également: Monsieur A. DICHE (U.M.M.T.O), Monsieur K. GHEDAMSI (U.A.M.B), Monsieur M. BOUDJEDAIMI (G.M).

Que Monsieur le président et Messieurs les membres de jury trouvent ici l'expression de respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui, de prés ou de loin, nous ont aidé à réaliser ce travail.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....01

Chapitre I: Présentation du polyméthacrylate de méthyle

1. Généralités 02
1.1. Définition de la matière plastique 02
a. polycondensation 02
b. polymérisation.....02
1.2. Classification des matières plastiques 02
a. Les thermoplastiques.....02
b. Les thermodurcissables 03
c. Les élastomères.....03
1.3. Les polymères 03
1.3.1. Définition 03
1.3.2. Historique des polymères 04
1.3.3. Structure des polymères 04
a. polymères linéaires 04
b. polymères ramifiés.....04
c. Polymères tridimensionnels 04
1.3.4. Caractéristiques des polymères.....05
1.3.5. Comportement mécanique et thermique des polymères 05
2. Description générale du polyméthacrylate de méthyle 06
2.1. Procédé de fabrication 06
2.1.1. Production du monomère 06
2.1.2. Production du polyméthacrylate de méthyle.....07
3. Propriétés du polyméthacrylate de méthyle.....09
3.1. Propriétés physiques du PMMA.....09
3.2. Propriétés mécaniques du PMMA 09
3.3. Propriétés électriques 09
3.4. Propriétés thermiques.....10
3.5. Propriétés chimiques 10
3.6. Propriétés optiques 10
3.7. Propriétés acoustiques.....10
3.8. Propriétés de mise en œuvre 10
4. Recyclage 11
5. Utilisation de PMMA 11
6. Les avantages et les inconvénients du plexiglas.....12
6.1. Avantages.....12

6.2. Inconvénients 12

Chapitre II: Rupture diélectrique des isolants solides

1. Isolant électrique 13
2. Grandeurs caractéristiques des milieux diélectriques 13
2.1. Rigidité diélectrique 13
a. La rigidité intrinsèque 13
b. La rigidité pratique 13
2.1.1. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique 14
a. Tension appliquée 14
b. Epaisseur et homogénéité de l'éprouvette 14
c. La température 14
d. Caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant. 14
e. Qualité du matériau 15
2.2. Permittivité diélectrique 15
2.3. Angle de pertes 15
3. Mécanismes de claquages 15
3.1. Claquage électronique 16
3.2. Claquage thermique 16
3.3. Claquage électromécanique 17
3.4. Claquage pratique 17
4. Décharges partielles 18
4.1. Décharges superficielles 18
4.2. Décharges transversales 18
5. arborescences 19
5.1. Arbre électrique 19
5.1.1. Phase d'incubation 19
5.1.2. Phase de propagation 20
5.1.3. Phase d'avalanche 20
6. Rupture diélectrique 20
6.1. Rupture dans les polymères 21
6.1.1. Rupture à court terme 21
a. Effet de la tension et du système d'électrodes 22
b. Effet de la température 22
c. Effet de l'épaisseur de l'isolant 22
6.1.2. Rupture à long terme 23
6.2. Pertes dans les isolants 25

Chapitre III: Modèle statistique de Weibull et son application à la rupture diélectrique des isolants solides

1. Modèle statistique de Weibull 26
1.1. Base et origine du modèle.....26
1.2. Modèle à deux paramètres. 27
1.3. Modèle à trois paramètres.....27
1.4. Signification des paramètres.....28
a. Paramètre de forme 28
b. Paramètre d'échelle.....28
c. Paramètre de localisation 30
2. Application du modèle de Weibull à la rupture des isolants solides 30
3. Diagramme de Weibull 32

Chapitre IV : Etude expérimentale

1. Echantillons.....33
2. Dispositif expérimentaux 33
2.1. Mesure de la rigidité diélectrique.....33
2.2. Dispositif de mesure des épaisseurs 36
2.3. Vieillissement 36
3. Déroulement des essais 37
3.1. Conditionnement des échantillons 37
3.2. Essais de rigidité diélectrique.....37
4. Résultats et discussion 39
4.1. Analyse statistique 39
4.2. Variation de la rigidité diélectrique en fonction de temps de vieillissement.....45
4.3. Variation de champ de seuil de rupture en fonction du temps de vieillissement 45
4.4. Evolution du facture de forme en fonction du temps de vieillissement.....46
4.5. Dégradation du matériau 47

Conclusion générale.....48
Bibliographie.....

Introduction

Les polymères sont principalement des matériaux synthétiques de commodité utilisés dans les applications les plus diverses de la vie quotidienne: transport d'énergie électrique, isolation d'appareils électriques, fabrication de condensateurs et certaines applications de pointe dans le secteur de l'aéronautique,…etc.

Les isolants peuvent être soumis à plusieurs contraintes: thermiques, électriques, radiations, humidité. Malgré leur performance sous l'action de ces contraintes, ces matériaux diélectriques se dégradent progressivement en fonction du temps d'application. Les concepteurs du matériel et d'appareillage haute tension sont confrontés au problème de fiabilité et de durée de vie de ces matériaux. Ces derniers subissent une détérioration progressive de leurs caractéristiques mettant en jeu leur bon fonctionnement et la soumettant à un risque de rupture prématurée.

Parmi les plus sévères contraintes en service, nous pouvons citer la contrainte thermique qui peut conduire à la réduction de la durée de vie suite à vieillissement du matériau. Le vieillissement thermique peut provoquer aussi la modification de sa structure, de ses propriétés diélectriques et mécaniques.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier l'effet du vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du polyméthacrylate de méthyle (PMMA), connu sous le nom commercial de plexiglas. Cette étude comprend deux parties: une partie bibliographique et une autre réservée aux résultats expérimentaux.

Dans le premier chapitre, nous présentons le polyméthacrylate de méthyle: formulation, propriétés physiques, chimiques, mécaniques, utilisations,…etc.

Le deuxième chapitre est consacré à la rupture diélectrique des isolants solides: mécanismes de claquage, tenue diélectrique à court et à long termes.

Dans le troisième chapitre, nous exposons le modèle statistique de Weibull et son application à l'étude de la rupture diélectrique des isolants solides.

Le quatrième chapitre est réservé aux essais réalisés: description du dispositif expérimental, méthode d'essai et résultats obtenus.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Présentation du polyméthacrylate de méthyle

1. Généralités

1.1. Définition de la matière plastique

Techniquement, c'est une matière susceptible d'acquérir une déformation permanante sous l'action de contraintes convenables, contrairement à la déformation élastique qui est seulement transitoire. Une matière plastique est un mélange contenant une matière de base qui est susceptible d'être moulée ou qui a été moulée [1]. La matière de base est, en général, un mélange de macromolécules ou hauts polymères organiques ou semi organiques à caractère résineux, résultant le plus souvent d'une réaction naturelle ou artificielle de polycondensation ou polymérisation.

a. Polycondensation

C'est une réaction qui a lieu sans amorçage entre les molécules de base différentes. Elle est plus lente et donne un résidu (souvent de l'eau). Le résultat est un polycondensat présent souvent sous forme d'un réseau tridimensionnel autrement dit un thermodurcissable.

b. Polymérisation

C'est une opération qui consiste à associer plusieurs molécules identiques par l'ouverture de la double liaison carbone-carbone du produit de départ (monomère) sous l'influence de la chaleur et de la pression en présence d'un catalyseur (oxygène). Généralement on obtient des polymères sous forme d'un réseau linéaire qui sont des thermoplastiques.

1.2. Classification des matières plastiques

Les matières plastiques sont classées comme suit [2]:

a. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit. Comme cette transformation est réversible, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires, reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de chaleur ou d'une forte contrainte. La température d'utilisation est inférieure à 100°C. Les macromolécules peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes.

b. Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de très fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes [4].

c. Les élastomères

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques.

Différentes formulations permettent de produire des caoutchoucs de synthèse en vue d'utilisations spécifiques. Les élastomères sont employés dans la fabrication des coussins, de certains isolants, de semelles de chaussures ou de pneus.

1.3. Les polymères

1.3.1. Définition

Les polymères sont des substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de base [3]. Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finales (polymères) est le degré de polymérisation. Si ce degré de polymérisation est élevé, on parle de hauts polymères. Lorsqu'il est faible, le composé est un oligomère. Les homopolymères ne sont constitués que d'un seul type de monomère dont le motif se répète dans la molécule, les copolymères sont constitués de plusieurs types de monomères.

Certains composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose ou la lignine du bois, la chitine, ainsi que le latex et les résines naturelles, sont des polymères, ainsi que nombreux matériaux synthétiques, comme les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs. Des composés tels

que le verre, les silicates ou le graphite, peuvent être considérés, au sens large, comme des polymères.

1.3.2. Historique des polymères

La notion de macromolécule n'est apparue que tardivement dans l'histoire de la chimie. Bien qu'intuitif par Wilhelmy Eduardo Weber au début du XIX^{e} siècle, de nombreux chercheurs ne voient là que des agrégats ou micelles. Il faut attendre les années 1920-1930 pour que l'idée de macromolécule soit bien acceptée, notamment grâce aux travaux d'Hermann Staudinger [3]. Le développement industriel consécutif de la science macromoléculaire a été accéléré ensuite par la seconde guerre mondiale. Les Etats-Unis d'Amérique ont été coupés lors de leur entrée en guerre de leur approvisionnement en caoutchouc naturel en provenance d'Asie du Sud-Est. Ils ont alors dû lancer un immense programme de recherche visant à trouver des substituts de synthèse.

1.3.3. Structure des polymères

Les structures des polymères sont [3]:

a. Polymères linéaires

Les molécules des polymères linéaires sont formées de longues chaînes de monomères reliés les uns à la suite des autres par des liaisons chimiques. Dans certains cas, les monomères sont, en outre, organisés régulièrement dans l'espace, et le composé obtenu est partiellement cristallisé : on dit qu'il est semi-cristallin. Le polyéthylène (PE), de formule $CH_3(CH_2)_nCH_3$, où n dépend des conditions de préparation (n peut atteindre plusieurs centaines de milliers), l'alcool polyvinylique et le chlorure de polyvinyle (PVC) sont des exemples types.

b. Polymères ramifiés

Dans les polymères ramifiés, certaines chaînes latérales sont liées à la chaîne principale. Les ramifications peuvent être dues à des impuretés ou à la présence de monomères ayant plusieurs groupes réactifs. Les polymères formés de monomères présentant des ramifications comme le polystyrène et le polypropylène ne sont pas considérés comme des polymères ramifiés.

c. Polymères tridimensionnels

Dans les polymères tridimensionnels, plusieurs chaînes principales sont reliées à des chaînes latérales au niveau de «nœud». Avec un faible degré de co-liaisons latérales, un réseau lâche est obtenu et le polymère reste essentiellement bidimensionnel. Dans les

polymères tridimensionnels lamellaires, la cohésion reste faible dans certaines directions de l'espace. Certains de ces composés peuvent se trouver sous forme de cristaux liquides, de liants pour les colles, peintures ou vernis.

Avec des degrés élevés de co-liaisons latérales, on obtient une structure fortement tridimensionnelle. Parmi ces derniers composés, on peut citer les produits fibreux, les élastomères, les matières plastiques et les thermoplastiques, les résines, certains revêtements de surface. Par exemple, dans le caoutchouc vulcanisé, les liaisons latérales sont formées par des atomes de soufre. Les plastiques thermostables (comme l'ébonite ou les résines thermodurcissables) sont des exemples de polymères tridimensionnels, leur structure est tellement rigide que, par chauffage, ils se décomposent, ou brûlent, mais ne se ramollissent pas.

D'une façon générale, en jouant sur le degré de polymérisation, la composition chimique des monomères et les transformations thermiques, on peut obtenir toute une gamme de produits depuis l'état presque liquide à l'état de solide semi-cristallin.

1.3.4. Caractéristiques des polymères

Un polymère donné n'est pas un corps pur, mais un mélange de macromolécules de différentes tailles et de compositions variées si l'on a plusieurs monomères différents. Ainsi, pour caractériser un polymère, on utilise des données statistiques: composition chimique moyenne, masse moléculaire moyenne, degré de polymérisation, structure (amorphe ou semi-cristallin), indice de polydispersité (dispersion en masse autour de la masse moyenne).Ces caractéristiques des polymères sont présentés comme suit [4]:

1.3.5. Comportement mécanique et thermique des polymères

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent fortement de la température [4]. A basse température, la plupart des polymères présentent un état vitreux: ils sont rigides. Lorsque la température augmente, ils passent par un état de transition: pour une plage de températures spécifiques du polymère, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit. Cette plage de température est appelée température de transition vitreuse, notée T_g.

Pour une température élevée, le polymère passe par un plateau caoutchoutique: son comportement est visco-élastique. A cet état, les forces de Vander Waals et la réticulation entre chaînes servent de force de rappel lorsque l'on déforme le matériau (élasticité). Enfin, lorsque l'on élève la température des polymères peu réticulés, on peut assister à une phase d'écoulement visqueux, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce dernier comportement est utilisé pour mettre en forme les matières plastiques, certains polymères présentent également un point de fusion, supérieur à T_g.

- Les polymères étant utilisés la plupart du temps à température ambiante, on dit qu'ils sont élastomères si leur température de transition vitreuse est inférieure à la température ambiante (comportement caoutchoutique), ils sont plastomères (comportement rigide) dans d'autres cas [4].
- Les propriétés mécaniques des polymères sont étudiées en rhéologie.

Ils existe une très grande gamme de polymères dans l'industrie de la plasturgie et nous portons notre étude sur le polyméthacrylate de méthyle.

2. Description générale du polyméthacrylate de méthyle

Le PMMA a été inventé par Bradel à la fin du XVIII^{e} siècle. Le polyméthacrylate de méthyle (souvent abrégé en PMMA, de l'anglais **P**oly **M**ethyl **M**eth**A**crylate) est un thermoplastique transparent à structure amorphe dont le monomère est le méthacrylate de méthyle (MAM**)**. Ce polymère est plus connu sous son nom commercial de **plexiglas** (nom déposé) mais aussi sous les noms de plastique acrylique, Perspex, Limacryl, Vitroflex, Altuglas…etc. [5].

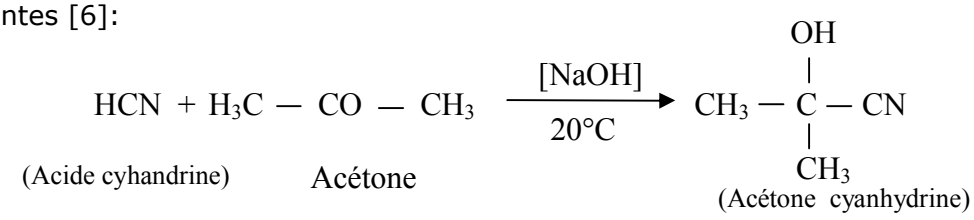
2.1. Procédé de fabrication

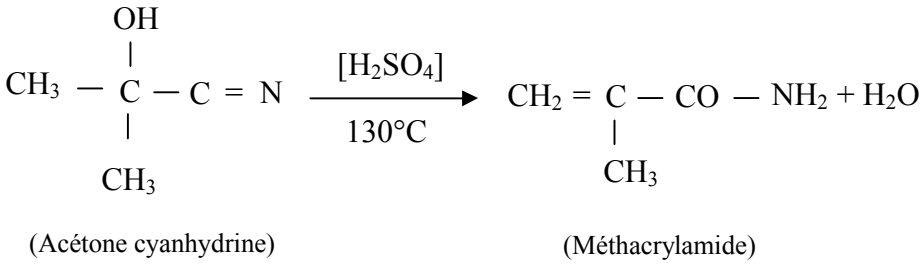
Le polyméthacrylate de méthyle est le produit de polymérisation du méthacrylate de méthyle [6].

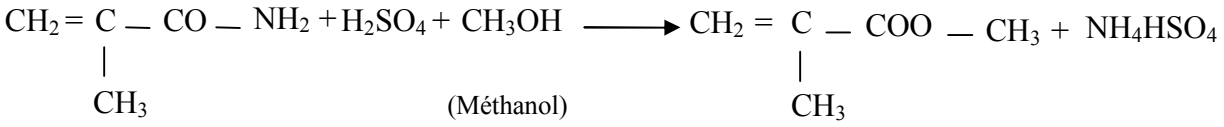
2.1.1. Production du monomère

Le méthacrylate de méthyle, ou MAM, est un liquide à température ordinaire qui bout au voisinage de 100°C. C'est un produit peu toxique, le seuil olfactif de détection est voisin de 0,3 ppm (parties par million), les vapeurs peuvent être irritantes pour les yeux et les voies respiratoires et tout contact avec la peau doit être évité [6].

Le principe du procédé de production du méthacrylate de méthyle repose sur les réactions suivantes [6]:



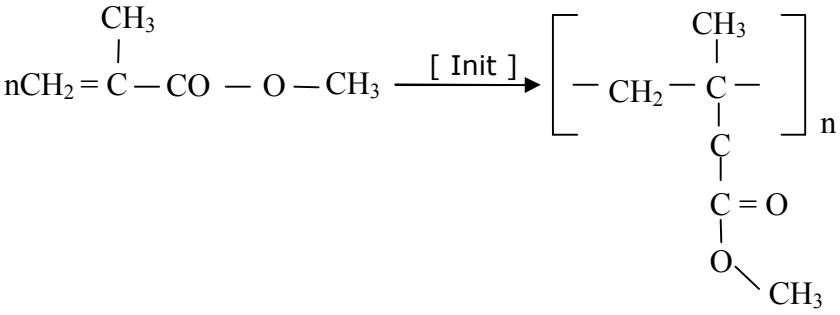




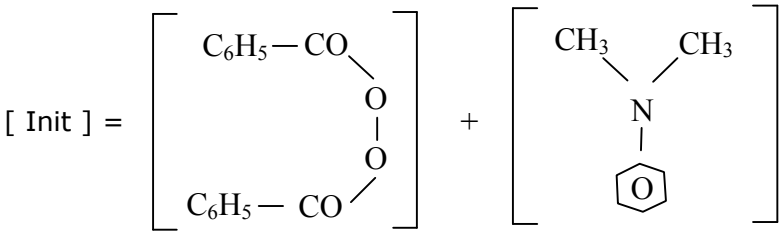
Méthacrylate de méthyle

2.1.2. Production du polyméthacrylate de méthyle

Le méthacrylate de méthyle sert essentiellement à produire le polyméthacrylate de méthyle (PMMA). La réaction de polymérisation est une polymérisation radicalaire amorcée par radicaux libres formés dans le milieu à partir de composés tels que le peroxyde de benzoyle dont la décomposition peut être accélérée par la présence de certains réducteurs tels que le N, N diméthylaniline [6], on a:



(polyméthacrylate de méthyle)



Peroxyde de benzolyne N.N diméthylaniline

Cette polymérisation se fait selon trois procédés classiques [7]:

- **Procédé en coulée**

Entre deux plaques de verre servant de moule on polymérise le monomère avec catalyseur en étuve. On obtient ainsi des plaques (2 m × 3 m) de 1 mm à 20 mm d'épaisseur,

d'excellentes qualités de surface (celle de verre), sans orientation (isotrope) et de qualités optiques parfaites [8].

- **Procédé en masse**

La polymérisation se fait généralement en masse pour obtenir des joncs, des tubes, des plaques, des blocs, à partir d'un sirop déjà prépolymérisé à 60°-70°C en présence de peroxydes [9]. Ces plaques sont polymérisées dans un moule à parois lisses, constitué de deux plaques de verre tremper qui leur donne un aspect de surface brillant.

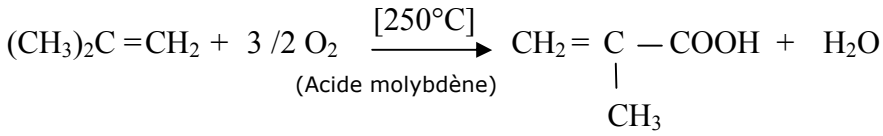
- **Procédé en suspension**

On utilise des amorceurs (tels que les peroxydes) générant des radicaux. On obtient une poudre blanche (particules de 300 à 800 µm) de faible masse molaire (40 à 80 $g.mol^{-1}$) prête à être moulée [8].

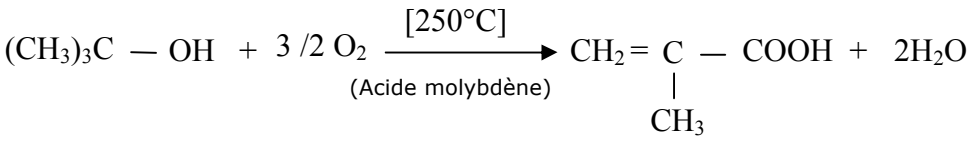
❖ **Autres procédés de productions**

- **Procédé concurrent**

Un procédé concurrent de production du méthacrylate de méthyle a été mis au point et est exploité au Japon par différentes firmes. La matière première de départ est soit l'isobutène, soit l'alcool tertiobutylique, on a [6]:

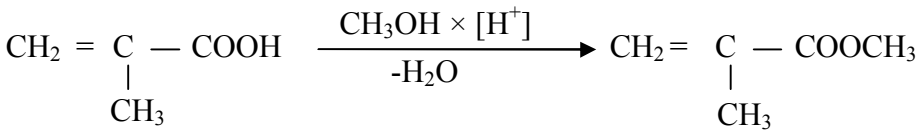


(Isobutène) (Acide méthacrylique)



Alcool tertiobutylique (Acide méthacrylique)

L'acide méthacrylique est transformé en méthacrylate de méthyle (MAM) par estérification par le méthanol en présence de l'acide sulfurique suivant la réaction [6]:



(Méthacrylate de méthyle)

Le méthacrylate de méthyle est ensuite polymérisé pour obtenir le plexiglas (PMMA) [6].

3. Propriétés du polyméthacrylate de méthyle

3.1. Propriétés physiques du PMMA

- Le PMMA est surtout connu pour ses propriétés optiques exceptionnelles. Ce polymère amorphe est d'une transparence remarquable, dans le visible 380 à 780 nm, l'absorption de lumière n'atteint que 50% pour une épaisseur de 3 mm [8].
- Le PMMA peut aisément se colorer y compris dans des teintes fumées pour vitrage [8].
- Le PMMA est hygroscopique: l'absorption d'eau en 24 h atteint 0,25% [8].
- Le PMMA a une densité de [9]:
  - ✓ 1,195 à 0°C
  - ✓ 1,190 à 20°C
  - ✓ 1,188 à 25°C
- Le PMMA a d'excellentes résistances aux agents atmosphériques [5].

3.2. Propriétés mécaniques du PMMA

- Le PMMA est un polymère amorphe dont la température de transition vitreuse varie de 110 à 135°C selon les produits, c'est à dire qu'à température ambiante il sera dur, rigide, cassant avec faible allongement [8].
- Fluage: son fluage est assez limité. Au-delà de contraintes critiques, le PMMA est sujet au fendillement (crazing). Ce phénomène est même accentué en présence d'agents agressifs (alcools, essences…) [8].
- Choc: la résistance au choc est relativement faible et le polymère est cassant [6].
- Dureté: le PMMA se raye et les entretiens répétés peuvent altérer la qualité de surface mais inversement il se polit très facilement [8].
- Son module d'élasticité en traction est de 7,7 à 13 Gpa [11].
- Sa contrainte de rupture en traction est de 65 à 77 Mpa [11].
- Son module de flexion est de 2,28 à 3,32 Gpa [11].
- Sa contrainte du rupture en flexion 84 à 110 Mpa [11].
- Excellente tenue aux ultra-violets d'où une bonne résistance au vieillissement [12].

3.3. Propriétés électriques

- Le PMMA est électrostatique, ce qui peut nuire à sa présentation (attraction de poussière), on peut pallier cet inconvénient en utilisant le PMMA avec des produits antistatiques qui migrent en surface et le recouvre d'une couche conductrice [8].
- La résistance à l'arc est excellente [10].

- La résistance transversale est de 10^{15} Ω.cm [10].
- Permittivité relative à 50 Hz: 3,3 à 3,9 [13].
- Le facteur de dissipation diélectrique (tanδ) à 50 Hz: 0,04 à 0,05 [13].

3.4. Propriétés thermiques

- Le PMMA est combustible et brûle lentement sans fumée excessive [8].
- La température maximale d'utilisation est faible < 80°C [8].
- La température de fusion est de 210 à 240°C [8].
- La température de transition vitreuse est 110 à 135°C [8].
- La température de résistance continue est de 85°C [8].
- La conductivité thermique: 0,19 W/ m.K [6].
- Le cœfficient de dilatation thermique: 0,7-0,8.10^{-4} K^{-1} [8].

3.5. Propriétés chimiques

- Le PMMA est insipide et sans odeur et reconnu pour ses qualités alimentaires [8].
- Jusqu'à 60°C, le PMMA résiste assez bien aux acides organiques et minéraux dilués ainsi qu'aux solutions alcalines diluées mais il est attaqué par les produits courants comme: l'acétone, l'alcool, le pétrole, le phénol, le carburant d'avion, le méthanol à 30%,...etc. [8].
- Le PMMA peut être exposé à l'extérieur sans problème [10].
- Les résistances aux intempéries sont très bonnes [10].

3.6. Propriétés optiques

- L'angle de réflexion totale sur une surface intérieure est de 41 à 42°C, ce qui permet la réalisation de «conducteurs» de lumière, fibres optiques [8].
- Son indice de réfraction (pour λ=587,7 nm hélium) est de 1,491 ce qui en fait un matériau adapté à la fabrication optique [8].
- La transparence: 92% de lumière transmise pour une épaisseur de 3 mm [10].

3.7. Propriétés acoustiques

La vitesse de propagation du son dans le PMMA est: 2,85.10^{5} cm/s [9].

3.8. Propriétés de mise en œuvre

Coulée: La polymérisation se fait entre des plaques de 3 m × 2 m au plus. On obtient des plaques d'épaisseurs comprises entre 1 mm et 20 mm [10].

Injection: Compte tenue de la viscosité élevée du PMMA, les températures sont de l'ordre de 250-300°C. Les pressions atteignent 1500 bars. L'injection multicolore par transfert dans plusieurs moules est aisée [10].
Extrusion: Elle permet d'obtenir des plaques, des feuilles, des tubes, des joncs [10].
Thermoformage: Après réchauffe préalable (140°C à 160°C) de plaques coulées ou extrudées, le PMMA se thermoforme aisément au-dessus de la température de transition vitreuse. Le PMMA, une fois transformé, se façonne facilement [10].
Soudage: Le PMMA se soude par soudage haute fréquence, gaz chaud et ultrasons [10].
Collage: Il s'effectue soit avec des solvants exemples : solvants chlorés, chloroforme, soit avec des colles dissoutes dans des solvants, soit avec des colles polymérisables [10].
Usinage: L'usinage du PMMA est facile à condition d'éviter les chocs et surffauffes [8].

4. Recyclage

Le PMMA peut être fondu puis remoulé, mais c'est surtout par dépolymérisation qu'on peut le recycler facilement par chauffage. Le PMMA redonne son monomère de départ: le MAM celui-ci peut alors être réutilisé pour une nouvelle polymérisation.

5. Utilisation de PMMA

Le PMMA est utilisé dans de multiples domaines allant des loisirs au bâtiment et à l'aéronautique. Ses principales utilisations sont les suivantes [10]:

Les applications industrielles: Cadrans, hublots et capots de machines à laver, chaînes hi-fi, portes de fours à micro-ondes, les écrans de contrôle industriel, les synoptiques de contrôle du trafic routier et ferroviaire .
L'ameublement et décoration: Salons, tables, ébénisterie, escaliers, mobiliers hospitaliers, couveuses.
Le sanitaire: Baignoires, bacs à douche, lavabos (pièces thermoformées et colorées).
Le bâtiment concernant tout particulièrement:

- Les parties transparentes des immeubles modernes (garde-corps de balcon, pare-soleil, brise vent).
- L'éclairage: dômes, couples, voûtes, survitrage.
- La réalisation de toitures, vérandas, parois de locaux industriels, pour lesquels on utilise le PMMA extrudé.

Les loisirs: articles de publicité: enseignes, présentoirs, affiches…
L'optique et l'électronique: Les fibres optiques (l'automobile, aviation, l'informatique, les connections industrielles). En optique, le PMMA est utilisé pour les lentilles, les épiscopes…
L'électrotechnique: pour des applications telles que les condensateurs, enrobage de composants, supports divers.

La médecine: il a une bonne comptabilité avec le tissu humain:

- Chirurgies cosmétiques pour réduire de manières permanentes des rides.
- Objectifs intraoculaires de rechange dans l'œil: verre de contact, lentilles.

L'aéronautique: utilisé dans les verrières, hublots, capots d'avions.

6. Les avantages et les inconvénients du plexiglas

6.1. Avantages

Les avantages du plexiglas sont [8]:

- Transparence exceptionnelle,
- Bonne tenue aux ultra-violets,
- Surface brillante,
- Thermoformage aisé,
- Possibilité de coulée,
- Facile à coller,
- Excellentes propriétés optiques,
- Bonne résistance aux chocs.

6.2. Inconvénients

Les inconvénients du plexiglas sont [8]:

- Cassant, fragile, rayable,
- Faible tenue en température limitée (80°C),
- Résistance chimique très moyenne,
- Fendillement sous charge possible,
- Faible résistance aux hydrocarbures et aux solvants,
- Inflammabilité,
- Attraction de poussières.

1. Isolant électrique

C'est une substance qui a une conductivité suffisamment faible pour être utilisée afin de séparer des pièces conductrices portées à des potentiels différents. Un matériau diélectrique (isolant électrique) possède peu de charges libres, elles sont piégées. Contrairement à un matériau conducteur où les charges sont nombreuses et libres de se déplacer sous l'action d'un champ électrique.

2. Grandeurs caractéristiques des milieux diélectriques

2.1. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage ou perforation diélectrique rendant impossible une nouvelle application de la tension. En pratique, la rigidité diélectrique est 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'il ne provoque en aucun point le renforcement du champ [14]. Suivant les positions relatives des électrodes et des facteurs comme la température, la présence d'humidité ou de contaminants, la géométrie, le volume d'Isolant,…etc., on distingue [15]:

a. La rigidité intrinsèque

Pour approcher la rigidité diélectrique d'un matériau, il est important de travailler en champ électrique le plus uniforme possible tout en évitant les effets de bords, de réduire le nombre de défauts présents dans le volume du matériau soumis au champ et d'éviter tout défaut aux interfaces, électrodes-matériau. De telles conditions sont très difficiles à réaliser. La rigidité diélectrique obtenue pour les meilleurs polymères est comprise entre 500 et 1000 kV/mm [15].

b. La rigidité pratique

La rigidité diélectrique pratique est généralement obtenue en appliquant la procédure décrite dans la norme CEI 243 [15]. Cette norme comporte trois parties qui sont à appliquer respectivement selon que l'on s'intéresse à la rigidité en tension alternative, en tension continue, ou en onde de choc, comme elle décrit deux grandes familles de méthodes d'essais, selon que le champ électrique est appliqué perpendiculairement à la surface (ou aux strates) du matériau (on parle alors de rigidité diélectrique transversalle) ou parallèlement à cette surface (rigidité diélectrique longitudinale).

- **Rigidité diélectrique transversale**

Le champ électrique est appliqué perpendiculairement à la surface du matériau [15]. La norme précitée décrit les différents types d'électrodes à choisir selon que l'on veut essayer des matériaux en plaques, en films, en tubes, à couleur,…etc.

- **Rigidité diélectrique longitudinale**

Le champ électrique en tension continue est appliqué parallèlement à la surface du matériau, elle est obtenue entre deux électrodes situées sur une même surface de l'isolant [15].

2.1.1. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique

a. Tension appliquée

La rigidité diélectrique en tension continue est souvent proche de celle en tension alternative (valeur efficace) multipliée par $\sqrt{2}$ **.** On remarque que le rapport entre la rigidité diélectrique en onde de choc de foudre (1,2/50 µs) et celle mesurée en tension continue est de l'ordre de 2. On constate expérimentalement que l'augmentation de la vitesse d'application de la tension augmente la tension de claquage [14].

b. Epaisseur et homogénéité de l'éprouvette

L'augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette réduit la valeur de la rigidité diélectrique. On constate alors que la tension de claquage est proportionnelle à l'épaisseur. Il est donc indispensable de donner, avec toute valeur de rigidité diélectrique, l'épaisseur des éprouvettes d'essai [14].

c. La température

La température a pour effet, lorsqu'on l'augmente, de réduire la rigidité diélectrique. Cela a différentes origines telles que l'augmentation de la conduction, l'obtention d'un claquage thermique, voire le claquage électromécanique [14].

d. Caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant

Ces caractéristiques interviennent par le biais des décharges superficielles qui peuvent se produire dans ce milieu, et en particulier dans l'air, et réduisent la tension de claquage. La permittivité et la résistivité du milieu ambiant ont également une très grande influence en modifiant la répartition du champ électrique. Une augmentation de la permittivité et/ou une diminution de la résistivité du milieu ambiant augmentent généralement la tension de claquage de l'éprouvette [14].

e. Qualité du matériau

La présence d'impuretés, d'humidité, d'air ou de gaz dans l'isolant diminue fortement la rigidité diélectrique [16].

2.2. Permittivité diélectrique

Dans le cas (purement théorique) d'un diélectrique parfait, la permittivité ε_r se définit comme le rapport entre la capacité C_x d'un système d'électrodes immergées dans le diélectrique et la capacité C_v de la même configuration d'électrode dans le vide $\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_v}$.

Il s'agit d'un nombre sans dimension. La permittivité absolue est le produit de la permittivité relative ε_r par la constante diélectrique du vide :

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \qquad \text{(II.1)}$$

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

La permittivité relative du vide est égale à 1, celle des gaz est très proche mais très légèrement supérieure à 1 (1,00053 pour l'air) et celle des diélectriques utilisés en pratique est comprise entre 2 et plusieurs milliers [17].

2.3. Angle de pertes

Le facteur de dissipation diélectrique est égal au quotient $\frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'}$, qui est également appelé tangente de l'angle de pertes ou $\tan\delta$, δ est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte. Le produit $\varepsilon_r' \tan\delta = \varepsilon_r''$ est appelé indice de pertes car il caractérise l'énergie dissipée dans le diélectrique.

3. Mécanismes de claquage

On appelle claquage, la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique [18]. Les mécanismes responsables des claquages permettent de classer ces dernières en quatre catégories: le claquage électronique, le claquage thermique, le claquage électromécanique et le claquage pratique.

3.1. Claquage électronique

Le claquage est produit par des électrons présents dans le matériau dont l'origine peut être soit l'injection cathodique par effet tunnel, soit l'ionisation stimulée par l'effet Poole-Frenkel, ou encore les rayons cosmiques. La distribution d'énergie de ces électrons augmente avec le champ appliqué, et à partir d'une valeur critique de ce champ (rigidité diélectrique), des électrons sont produits en nombre suffisant pour entraîner la destruction du réseau appelée claquage [14].

3.2. Claquage thermique

Lorsque l'on applique un champ électrique à un matériau isolant, on sait qu'un courant (généralement très faible) circule entre les électrodes. La circulation de ce courant, dans le matériau, a pour conséquence un transfert d'énergie qui échauffe le matériau. Cet échauffement doit être compensé par les pertes thermiques par conduction dans le matériau pour que l'équilibre soit conservé. L'équilibre entre la dissipation thermique et l'énergie prise au champ est décrit par l'équation différentielle suivante [14]:

$$\sigma E^2 = C_v \cdot \rho \cdot \frac{dT}{dt} - div\left(\lambda \overrightarrow{gradT}\right) \qquad \text{(II.2)}$$

avec:

C_v : Capacité thermique massique à volume constant (J/kg°C).

σ : masse volumique (kg/m^3).

T : température (°C).

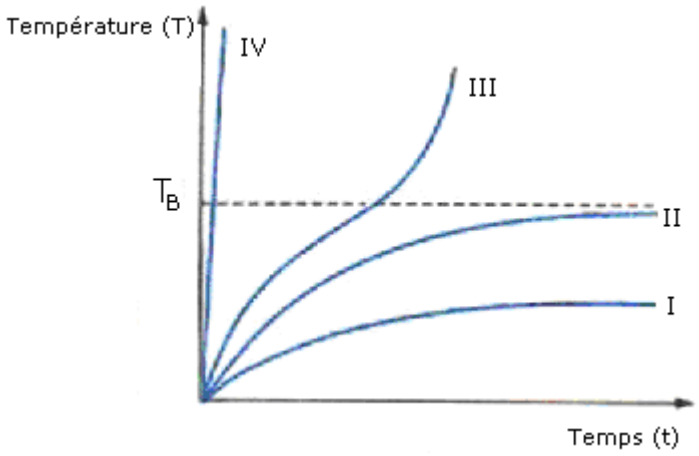
ρ : Résistivité électrique $\left(\Omega \cdot cm\right)$.

E : champ électrique (A/m).

λ : Conductivité thermique (W/m°C).

t : temps (s).

La figure II.1 représente les solutions de cette équation pour différentes valeurs du champ électrique E.



I	pas de claquage
II	claquage thermique pour t⟶ ∞
III	claquage thermique dans un temps fini
IV	claquage thermique en impulsion
T_B	température pour laquelle le claquage se produit après un temps fini

Figure II.1: Représentation schématique des conditions de stabilité pour le claquage thermique [14].

3.3. Claquage électromécanique

La théorie de ce type de claquage est due à Stark et Garton [14]. Elle prend en compte l'effort électrostatique qui tend à rapprocher deux électrodes entre lesquelles est appliquée une différence de potentiel. Cet effort comprime l'isolant solide placé entre les deux électrodes. Le claquage survient lorsque cet effort de compression dépasse la résistance mécanique du matériau qui dépend de son module d'Young.

3.4. Claquage pratique

Dans la pratique, le claquage diélectrique des isolants solides survient le plus souvent à des valeurs de champ électrique très inférieures à celles prévues par les théories précédentes. La raison en est que le claquage se produit toujours au point le plus faible du volume de l'isolation soumise au champ [14]. Ce point correspond généralement à la présence de défauts comme:

- Les inclusions gageuses.
- Les parties d'électrodes à faible rayon de courbure (bords ou pointes)
- Les inclusions solides.

Le claquage peut également se produire à partir de:

- Décharges partielles ou décharges superficielles.
- Arborescences électriques ou électrochimiques.

4. Décharges partielles

On appelle décharge partielle, toute décharge électrique dont le trajet se développe sur une partie seulement de l'intervalle isolant séparant les conducteurs. Elle se manifeste de façon localisée au sein même du diélectrique, au voisinage des électrodes, à l'intérieur de petites bulles gazeuses emprisonnées dans la structure isolante ou au voisinage de discontinuités où le champ est très inhomogène [19]. La figure II.2 montre quelques exemples de lieux où peuvent se produire les décharges partielles. Le courant véhiculé par les décharges partielles ne représente généralement qu'une petite fraction du courant de déplacement [19].

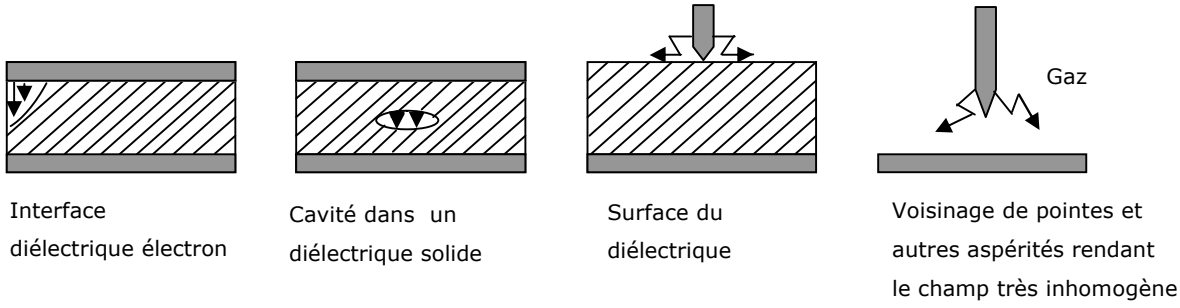


Figure II.2: Quelques exemples de lieux où peuvent se produire des décharges partielles [19].

Elles représentent l'origine la plus importante des dégradations subies par les matériaux diélectriques dans une isolation soumise à une haute tension. On peut distinguer deux types principaux de décharges auxquelles sont soumis les matériaux dans les isolants en service [15].

4.1. Décharges superficielles : elles prennent naissance entre le conducteur et l'isolant. Le champ électrique donnant lieu à cette décharge a sa composante principale tangentielle à la surface du matériau.

4.2. Décharges transversales : elles se situent soit dans une zone en contact avec un conducteur, soit au sein même de l'isolant. La décharge est essentiellement imputable à la surface libre de l'isolant solide. Divers facteurs influencent sur l'apparition des décharges partielles, d'une part, la permittivité relative des isolants solides étant toujours plus élevée (2 à 6) que celle des gaz ($\varepsilon_r = 1$). D'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse que celle des isolants solides (environ 10 fois moins). Ces deux facteurs font apparaître les vacuoles dans les isolants solides pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui entraîneraient la perforation du diélectrique [20].

Pour détecter les décharges partielles, on peut mentionner les méthodes acoustiques et optiques, utilisant généralement des microphones et des oscilloscopes. Mais il y a des résultats expérimentaux dans lesquels le vieillissement s'est poursuivi en totalité en l'absence de décharges partielles [21].

Il existe une corrélation étroite entre la tension seuil d'apparition des décharges partielles et l'évolution des arborescences. A chaque forme d'arborescences correspond une allure distincte de l'évolution dans le temps de la tension seuil d'apparition de décharges partielles [21].

5. arborescences

Un phénomène indésirable affectant les isolants solides est le phénomène de dégradation par arborescences. Selon le fascicule de documentation FDC 26-204 (février 1986) l'arborescences consiste en un réseau de canaux tubulaires en forme d'arbre dans un matériau diélectrique solide, formé par un mécanisme de dégradation résultant de gradients de champ électrique élevé et non uniforme, ou de décharges partielles [22].

Le champ par arborescences dans les polymères est connu depuis l'année 1951 alors que plusieurs études ont été consacrées à ce phénomène apparaissant dans les isolants synthétiques comme l'origine de dégradations localisées dans les isolants. Les claquages par arborescences sont assez peu nombreux, mais le phénomène est toujours considéré comme dangereux [22]. Les arbres s'initient habituellement à partir d'un point où il existe une concentration du champ électrique [23].

5.1. Arbre électrique

Un arbre électrique s'initie à partir d'un point de grande concentration de champ et se propage à l'intérieur du diélectrique sous forme de canaux carbonisés. A l'intérieur de ces canaux, une intense activité de décharges partielles a lieu et contribue à dégrader d'avantage le matériau. Cette dégradation est causée par la présence d'impuretés étrangères et de vacuoles [23]. Le phénomène d'arborescence électrique évolue en trois phases:

5.1.1. Phase d'incubation

Pour une pointe métallique, évidemment le champ électrique est beaucoup plus élevé au sommet de la pointe que prés du plan de terre. La formation d'une arborescence se fait à partir de pointes où le gradient électrique est élevé, soit provoqué par des décharges partielles non mesurables se développant dans des microcavités et produisent des trous acérés, soit à la pointe desquels le champ électrique est transféré ou bien par émission de champ en l'absence de décharges partielles [22].

5.1.2. Phase de propagation

Le développement des arborescences électriques est toujours accompagné de décharges partielles mesurables. On admet généralement que des décharges se produisent dans les canaux, rendant conducteur le gaz qui les rempli. Le champ électrique est reporté à leur pointe et provoque des claquages locaux qui les font progresser. Les canaux ont un diamètre de l'ordre du micro. Leur progression se fait généralement dans la direction du champ électrique. La vitesse de propagation est fonction de la pression des gaz dans les canaux formant l'arborescence et de la fréquence de la tension appliquée [24].

5.1.3. Phase d'avalanche

C'est la dernière phase conduisant au claquage de l'isolant. L'arborescence se propage de l'aiguille vers le plan opposé relié à la terre, suivant la direction du champ électrique, donc dans le plan de la contrainte de pression électrostatique qui représente l'ultime faiblesse mécanique provoquant l'augmentation de la vitesse de propagation des canaux d'arborescences. Le claquage est provoqué par la remontée d'un filament de l'électrode reliée à la terre vers l'électrode haute tension appelée canal de retour [25].

6. Rupture diélectrique

La rupture d'un diélectrique dépend du champ électrique appliqué à l'isolant, ainsi que de la distance inter-électrodes. Cette même rupture dépend aussi de la nature du matériau utilisé comme isolant et de la température à laquelle il est soumis.

Dans des conditions normales d'utilisation, le bon fonctionnement d'un isolant peu être perturbé par différents types de rupture. Le phénomène peut s'analyser à partir de l'allure dite, courbe en baignoire présentée à la figure II.3 qui traduit les variations du taux d'avarie en fonction du temps du risque de rupture d'un isolant solide.

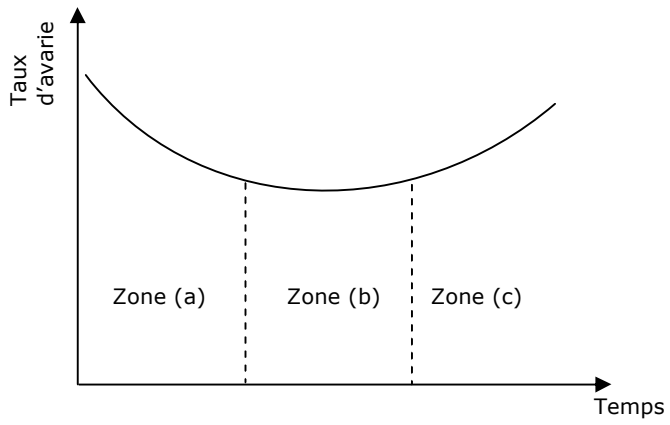


Figure II.3 : Allure de la caractéristique du risque de rupture d'une isolation solide au cours du temps [26].

- La zone a correspond aux accidents liés à des défauts extrinsèques dits de jeunesse qui surviennent juste après la mise sous tension.
- La zone b rend compte, dans le temps plus ou moins prolongé, de l'effet des défauts intrinsèques du matériau. Ces ruptures sont purement aléatoires.
- La zone c correspond au vieillissement réel du matériau qui voit de nouveaux défauts se générer sous l'action des contraintes qu'il subit.

6.1. Rupture dans les polymères

Contrairement à des isolants gazeux ou liquides la rupture des polymères a bien un caractère irréversible et conduit donc à la mise hors service définitive du système isolant. Dans des conditions normales d'utilisation, le bon fonctionnement d'un isolant peut être perturbé par différents types de rupture.

- La rupture est un phénomène aléatoire: pour les échantillons issus d'un même diélectrique présentant le même conditionnement expérimental, nous n'obtenons pas un champ de rupture unique, mais une distribution de valeurs [14].
  Le phénomène est bien décrit, au moins pour les solides, par les statistiques de Weibull. Le caractère statique s'explique par l'existence de fluctuations microscopiques locales dans le diélectrique [14].
- La rupture est un phénomène localisé qui se traduit par la formation de canaux qui se propage à travers le diélectrique. C'est la densité du diélectrique qui détermine si les chemins de rupture sont temporaires ou permanents [27].

6.1.1. Rupture à court terme

Lorsqu'un polymère est soumis à un champ électrique on constate expérimentalement que les temps de rupture restent inférieurs à la minute c'est la rupture à court terme [26].

Il existe deux groupes de théories dans le domaine de la rupture à court terme, à savoir la rupture électrique et la rupture thermique. Le stade ultime de tout mécanisme de rupture est un processus thermique. Ce sont les mécanismes initiateurs de rupture qui provoquent l'accroissement de la conductivité qui sont différents:

- Dans le cas de la rupture d'origine thermique, l'augmentation initiale de la conductivité est provoquée par une élévation locale de la température.
- Dans le cas de la rupture d'origine électrique, divers processus qui dépendent directement de la valeur du champ électrique sont à l'origine de l'augmentation de la conductivité.

Deux théories sont développées pour expliquer ce processus [26]:

- La théorie de la rupture intrinsèque ou électronique où l'équilibre énergétique électrons-phonons n'est plus respecté: une petite augmentation du champ électrique va très rapidement provoquer le claquage,
- La théorie de rupture par avalanche envisage le claquage comme conséquence d'une multiplication des porteurs créés par ionisation autour du point d'impact de la décharge [14].

La tenue diélectrique des polymères dépend de plusieurs facteurs [28]:

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

La tension de rupture dépend [28]:

- de la distance inter électrode.
- de la géométrie des électrodes qui détermine la configuration du champ électrique.
- de la forme de l'onde de tension, de la fréquence et de son mode d'application de la tension par palier ou rampe. Des essais effectués sur des échantillons de câbles ont montré que la tension de claquage est plus importante en continu qu'en alternatif.
- souvent du métal des électrodes.
- de l'état de surface des électrodes.

b. Effet de la température

L'allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique en courant continu pour des polymères non polaires, tel que le polyéthylène montre 3 régions (Figure II.4). On observe une décroissance de la rigidité diélectrique des basses températures vers les hautes températures [28].

c. Effet de l'épaisseur de l'isolant

Généralement le champ de claquage diminue quand l'épaisseur augmente. La rigidité diélectrique d'un matériau est liée à l'épaisseur e de l'isolant par la relation suivante [28]:

$$E = K \cdot e^{-n} \qquad \text{(II.3)}$$

où

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

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

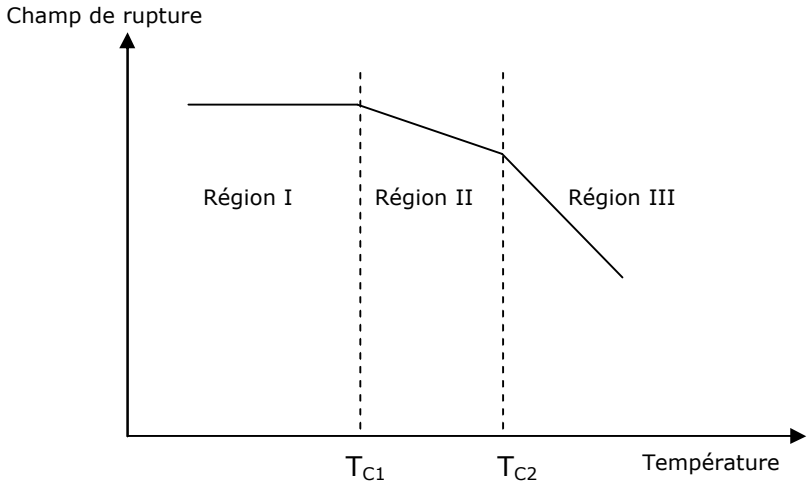


Figure II.4 : Allure générale de la dépendance en température de la rigidité diélectrique.

6.1.2. Rupture à long terme

Il est difficile de faire une distinction entre le claquage à court terme et le claquage à long terme. Il n'est pas aisé de définir cette frontière temporelle. Dans le cas de la rupture à long terme, on parle plutôt de vieillissement électrique du matériau. Le vieillissement d'un matériau est, en général, tout phénomène qui se traduit par une évolution lente et irréversible de ses propriétés avec le temps. Les mécanismes qui interviennent sont: l'oxydation, l'hydrolyse, la photoxydation,….. Ces mécanismes sont détaillés dans les ouvrages [24-29]. La rupture à long terme peut être différée dans le temps, de quelques secondes à quelques heures voire quelques années [26]. Le problème de la rupture se résumant à un transfert d'énergie entre le champ électrique et les porteurs de charge, une théorie de rupture à long terme doit expliquer comment sous un champ relativement faible, les porteurs peuvent gagner l'énergie de quelques électrons-volts nécessaire à la rupture des liaisons dans un isolant. Un modèle a été développé par Jonscher et Lacoste [30] qui s'applique aussi bien à la rupture aux temps courts qu'aux temps longs.

Les différentes étapes du processus sont [15]:

Stade 1

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

Stade 2

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

Stade 3

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

Stade 4

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

Stade 5

La rupture se fait selon un mécanisme de percolation entre les amas des défauts. Ce modèle présent l'évaluation de la rupture à travers les défauts initiaux.

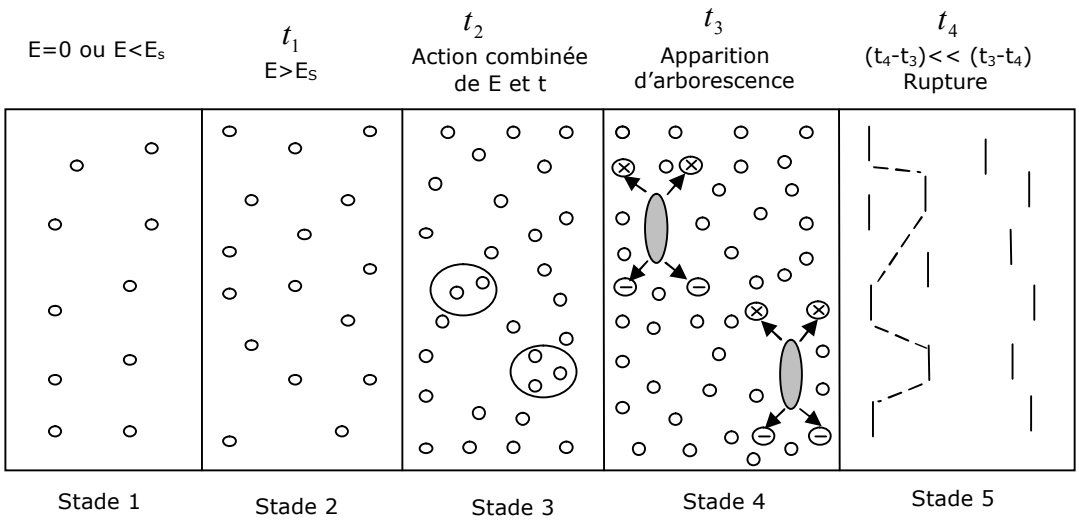


Figure II.5 : Modèle proposé par Jonsher et Lacoste intégrant une action comulative du champ et du temps [28].

6.2. Pertes dans les isolants

Les principales causes des pertes dans les isolants sont:

- **Les pertes par conductivité**

La résistance de l'isolant n'est pas infinie, il laisse donc circuler un courant faible, mais sensible. Le courant est d'origine électrique et dû aux électrons libres, il est, quelque fois, d'origine ionique.

- **Les pertes par hystérésis**

A la fréquence industrielle (50 Hz), les pertes par hystérésis sont les plus importantes par rapport aux autres pertes dans les isolants.

- **Les pertes par effluves**

La tension maximale appliquée à un isolant est choisie en fonction de sa résistance diélectrique, mais si de l'air se trouve enfermé dans l'isolant, cet air peut être le siège d'effluve. Le gradient de potentiel est inversement proportionnel à leur conductance diélectrique. La conductance diélectrique de l'air est égale à 1, inférieure à celle de l'isolant, il en résulte un échauffement supplémentaire et une dégradation de l'isolant, de l'ozone est produit par les effluves. Il faut donc supprimer toute trace d'air à l'intérieur de l'isolant [16]. Ces quelques contraintes doivent suffire à monter l'extraordinaire complexité des problèmes liés à la rigidité diélectrique et l'impossible quasi-totale de recourir à des modèles basés sur des théories fondamentales. Cela explique l'importance, en ce domaine, des méthodes de travail telles que l'analyse statistique pour l'étude des distributions de tension de claquage, le vieillissement accéléré pour l'approche des mécanismes de dégradation et le recours à des essais normalisées pour la comparaison des diélectriques [19].

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 [31].

La rupture étant un phénomène aléatoire et il est nécessaire de tester un grand nombre d'échantillons identiques. La rupture diélectrique des isolants solides sous contraintes de tension conduit à deux modèles qui sont: la loi de Laplacienne (normale) et la loi de Weibull. Dans ce qui va suivre, nous présentons sommairement le modèle statistique de Weibull et décrivons son application à l'étude de la rupture diélectrique des isolants solides.

1. Modèle statistique de Weibull

1.1. Base et origine du modèle

A l'origine, le modèle statistique de Weibull a été établi en mécanique. Il exprimait la probabilité de rupture d'une chaîne en fonction de la probabilité de rupture d'un maillon [32]. La rupture d'une chaîne se produit au niveau de son maillon le plus faible quelques soient les qualités des autres maillons [31]. Ainsi la probabilité de rupture P_n d'une chaîne de n maillons s'exprime en fonction de la probabilité P d'un seul de ces maillons de la façon suivante:

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

Le modèle statistique de Weibull ou la loi de chaîne s'écrit [32]:

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

avec:

$P(X)$: Probabilité de rupture.

X : variable aléatoire.

X_0 : paramètre d'échelle.

X_S : paramètre de localisation.

α : Paramètre de forme.

Suivant que la valeur de X_S est nulle ou non, on distingue deux cas suivants [33]:

1.2. Modèle à deux paramètres

C'est le cas où $X_S = 0$ par conséquent $P(X)$ s'annule pour $X = 0$, l'expression devient alors [34]:

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

ou sa forme linéaire:

$$\log \ln \frac{1}{1-P(X)} = \alpha \log X - \alpha \log X_0 \qquad \text{(III.4)}$$

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

1.3. Modèle à trois paramètres

Si la courbe correspondante à l'expression (III.1) n'est pas linéaire mais se traduit par une expression polynomiale, il faut avoir recours à la relation complète [27].

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

La relation linéaire est de la forme:

$$\log \ln \frac{1}{1-P(X)} = \alpha \log(X - X_S) - \alpha \log(X_0 - X_S) \qquad \text{(III.6)}$$

$$p\,(X \langle X_S) = 0$$

La grandeur X_S apparaît donc comme une valeur seuil au dessous de laquelle le phénomène régi par la variable X ne se produit pas, c'est-à-dire dans notre cas la probabilité de claquage est nulle.

1.4. Signification des paramètres

a. Paramètre de forme

L'expression linéaire (III.4) donne au paramètre α une signification majeure. C'est la pente de la caractéristique du modèle de Weibull dans sa représentation linéaire. Il est, par conséquent, l'image de la dispersion de la variable aléatoire [35].

- Si α est inférieur à 1, la probabilité de claquage diminue avec le temps, ceci correspond à une "mortalité infantile" des échantillons.
- Si $\alpha = 1$, la loi Weibull équivaut à une loi exponentielle, et la probabilité de claquage est indépendante du temps d'application de la tension.
- Si α >1, la probabilité de claquage augmente avec le temps, ce qui correspond à un vieillissement normal, c'est-à-dire à une fatigue initialement nulle et qui s'accentue avec le temps.

b. Paramètre d'échelle

Le paramètre d'échelle ou de position X_0 est destiné à définir une valeur centrale de la caractéristique de la population étudiée.

$$P(X) = 1 - \exp\left[-K\left(\frac{X}{X_0^{'}} \right)^{\alpha} \right] \qquad \text{(III.7)}$$

La valeur de X_0 correspond au maximum de densité de probabilité de la distribution:

$$f(X) = \frac{dP(X)}{dX} \qquad \text{(III.8)}$$

En posant dans l'expression (III.7):

$$X_0^{'} = K^{1/\alpha} . X_0$$

On obtient:

$$P(X) = 1 - \exp\left[-\frac{X^{\alpha}}{X_0^{\alpha}} \right] \qquad \text{(III.9)}$$

et

$$f(X) = \frac{dP(X)}{dX} = \frac{\alpha X^{(\alpha-1)}}{X_0^{\alpha}} \exp\left[-\frac{X^{\alpha}}{X_0^{\alpha}} \right] \qquad \text{(III.10)}$$

Pour trouver le maximum de $f(X)$, on annule sa dérivée, d'où l'équation:

$$\frac{df(X)}{dX} = 0$$

$$\left[\left(\frac{\alpha(\alpha-1)X^{(\alpha-2)}}{X_0^{\alpha}}\right) - \left(\frac{\alpha X^{(\alpha-1)}}{X_0^{\alpha}}\right)^{\alpha}\right] \exp\left[-\frac{X^{\alpha}}{X_0^{\alpha}}\right] = 0$$

Soit:

$$\frac{\alpha(\alpha-1)X^{(\alpha-2)}}{X_0^{\alpha}} = \left(\frac{\alpha X^{(\alpha-1)}}{X_0^{\alpha}}\right)^2$$

$$\alpha(\alpha-1)\cdot X^{(\alpha-2)} = \frac{\alpha^2 X^{(2\alpha-2)}}{X_0^{\alpha}}$$

Après transformation:

$$\frac{X}{X_0} = \left[\frac{\alpha-1}{\alpha}\right]^{1/\alpha}$$

Si α tend vers $+\infty$ la limite $\left(\frac{X}{X_0}\right) = 1$

On peut donc considérer que X_0 correspond à la valeur maximum de la densité de probabilité. On prend l'expression (III.4):

$$\log\ln\frac{1}{1-P(X)} = \alpha\log X - \alpha\log X_0$$

Pour $X = X_0$, on a:

$$\log\ln\frac{1}{1-P} = 0 \Rightarrow P = 1 - \frac{1}{e} = 63{,}2\ \% \qquad \text{(III.10)}$$

Dans le contexte expérimental, ces paramètres ont la signification suivante:

- Pour des essais sous champ constant, $X = t_0$ est valeur nominale du temps de rupture.
- Pour des essais sous rampe de tension, $X_0 = E_0$ est 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 maximum.

c. Paramètre de localisation

Introduire un paramètre de localisation consiste tout simplement à transiter les courbes de probabilité cumulée selon l'axe des abscisses. La formule de Weibull devient [27]:

$$P(X) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{X - X_S}{X_0 - X_S}\right)^{\alpha}\right] \qquad X > X_0 \qquad \text{(III.11)}$$

Mathématiquement, X_S relève un risque de défaillance nul pour des valeurs de X comprises entre 0 et X_S. La grandeur X_0 apparaît comme une valeur seuil en dessous de laquelle le phénomène régi par la variable X ne peut pas se produire.

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 [27]:

- 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.

La probabilité cumulée prend la forme suivante [26]:

$$P(E,t) = 1 - \exp\left(1 - CG_b t_a\right) \qquad \text{(III.12)}$$

avec:

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

E : champ électrique appliqué qui représente la contrainte.

a et b : exposants caractéristiques.

t : temps au bout duquel se produit le claquage.

La relation (III.12) peut se mettre sous la forme suivante [26]:

$$P(E;t,v) = 1 - \exp\left[\left(\frac{E}{E_0^{'}}\right)^{b}\left(\frac{t}{t_0^{'}}\right)^{a}\left(\frac{v}{v_0^{'}}\right)\right] \qquad \text{(III .13)}$$

avec:

$E_0^{'}$, $t_0^{'}$, $v_0^{'}$ sont les facteurs d'échelle correspondant respectivement à la contrainte E, à la durée t et au volume v de l'isolant étudié.

En posant $P(E,t) = p$ et en faisant les transformations nécessaires, l'équation (III.13) s'écrit comme suit:

$$\log\ln\frac{1}{1-p} = b\log E + a\log t + k^{'} \qquad \text{(III.14)}$$

En appliquant des contraintes d'amplitudes différents, mais pendant des durées égales à $\log t$ donne avec $k^{'}$ une nouvelle constante, $k^{"}$ telle que ($a\log t + k^{'} = k^{"}$)

L'équation (III.14) s'écrit comme suit:

$$\log\ln\frac{1}{1-p} = b\log E + k^{"} \qquad \text{(III.15)}$$

Dans le cas où le champ électrique est constant, l'équation (III.14) prend la forme suivante:

$$\log\ln\frac{1}{1-p} = a\log t + k^{'''} \qquad \text{(III.16)}$$

avec: $k^{'''} = b\log E + k^{'}$

En retranchant membre à membre (III.15) et (III.16) on aura:

$$\log E = \frac{a}{b}\log t + \left(\frac{k^{'''} - k^{"}}{b}\right) \qquad \text{(III.17)}$$

En posant: $\frac{a}{b}=\frac{1}{n}$ on aura:

$$\log E=\frac{1}{n(\log t)-1}+A \qquad \text{(III.18)}$$

L'équation de la droite de durée de vie en coordonnées bi-logarithmiques qui traduit la relation bien connue $G^{n}t=k$ dite de type puissance inverse, est aussi appelée caractéristique d'endurance électrique [27]. Le signe (-) de la relation (III.18) provient du fait que n est toujours positif, mais la pente $\frac{1}{n}$ des droites de durée de vie est négative.

3. Diagramme de Weibull

Théoriquement, il n'existe pas de méthode précise d'estimation du paramètre d'échelle $(X_0=E_0)$ et du paramètre de forme de la distribution de Weibull [36]. Cependant, il existe certaines méthodes empiriques qui consistent à classer les tensions par ordre croissant. En désignant par N le nombre d'échantillons testés et par i le rang de la valeur de claquage, la probabilité de rupture est donnée par [33]:

- Lorsque N est suffisamment grand:

$$P(i,N)=\frac{i}{N+1} \qquad \text{(III.19)}$$

- Lorsque N est faible de l'ordre de la dizaine ou moins:

$$P(i,N)=\left[\frac{0{,}69}{N}+(i-1)\left(\frac{1{,}38}{N(N-1)}\right)\right] \qquad \text{(III.20)}$$

CHAPITRE IV
Etude expérimentale

Dans le présent travail, nous nous sommes intéressés à l'effet du vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du polyméthacrylate de méthyle utilisé comme isolant dans les condensateurs et enrobages de composants. Les essais consistent, d'abord, à soumettre une population d'échantillons de polyméthacrylate de méthyle à un vieillissement thermique. Ensuite ces éprouvettes ont subi un essai de claquage sous une rampe de tension alternative de fréquence 50 Hz.

1. Echantillons

Les éprouvettes du PMMA (plexiglas), utilisées dans les essais, ont été découpées en carrés de 7,5 cm × 7,5 cm à partir de deux plaques de dimensions de 2 m × 1,4 m et d'épaisseur de 2 mm (Figure IV.1).

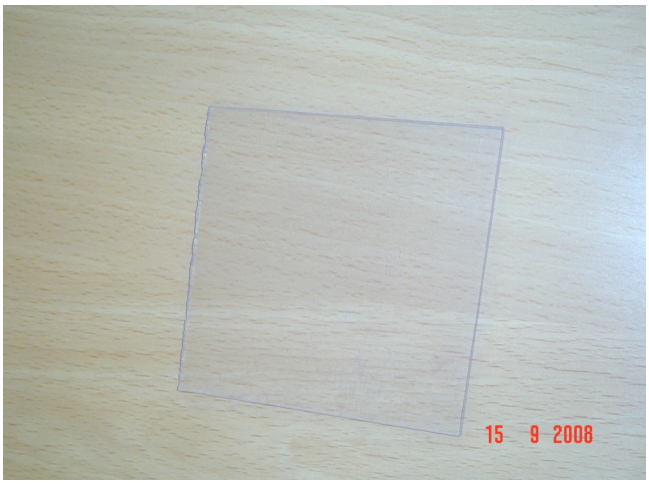


Figure IV.1: Eprouvette de PMMA.

2. Dispositifs expérimentaux

2.1. Mesure de la rigidité diélectrique

Pour la mesure de la tension de claquage nous avons utilisé un dispositif comprenant les éléments suivants (Figure IV.2):

- Un générateur de tension SG1 (Figure IV.3).
- Un transformateur HT pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour des essais en alternatif et de 0 à 135 kV pour les essais en continu (Figure IV.4).
- Un diviseur de tension capacitif (C_0 = 0,1 µF et C_u = 41,4 µF).
- Un voltmètre de crête (U_{cr}) AC/DC de type MU11, à affichage digital permettant la mesure, selon le montage électrique, des hautes tensions alternatives ou continues (Figure IV.5).
- Une résistance de protection R = 106 kΩ limitant le courant.

- Un système d'électrodes planes en cuivre ayant un diamètre de contact plan avec l'isolant de 2 cm (Figure IV.6).

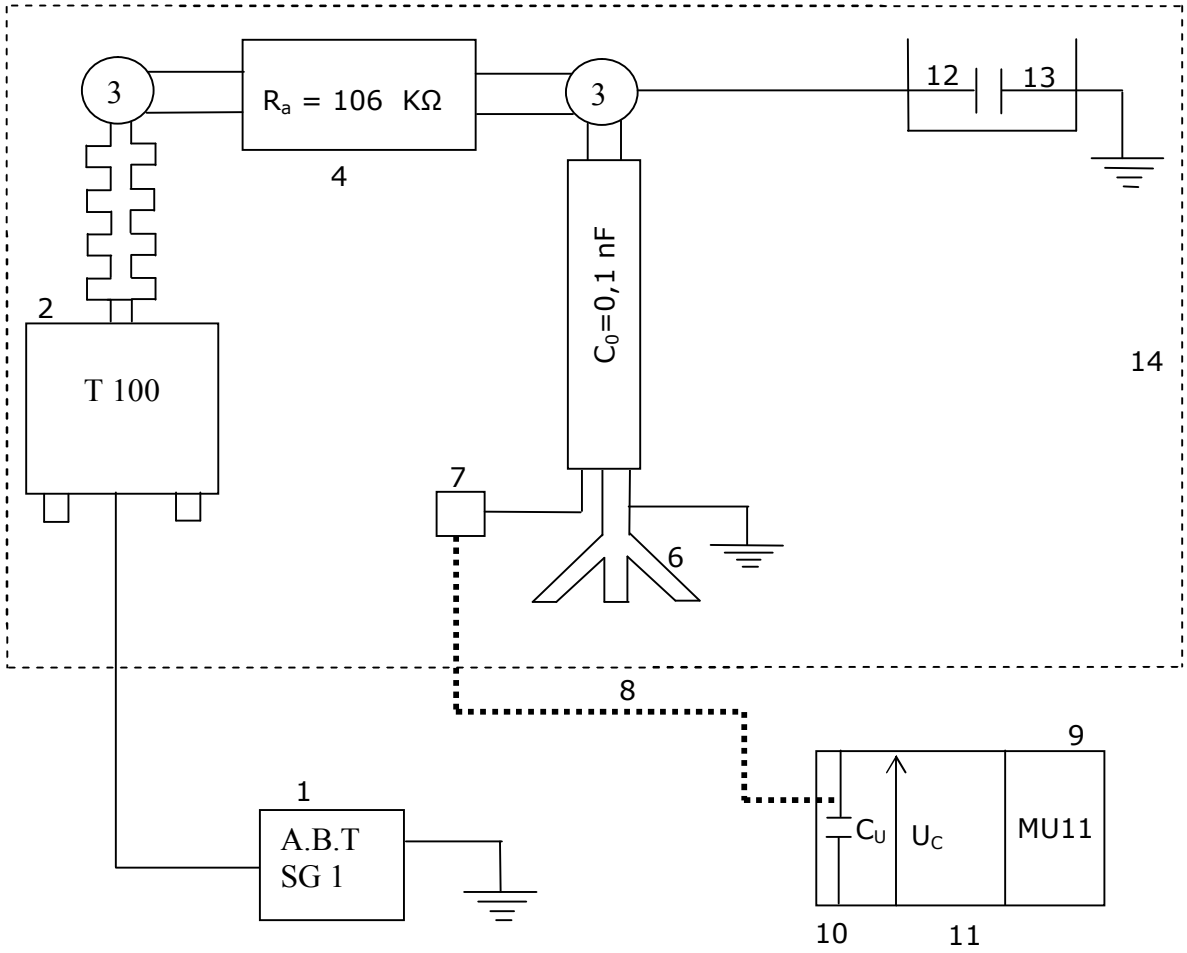


Figure IV.2: Schéma de l'installation d'essai utilisée.

1. Alimentation basse tension.
2. Transformateur T 100.
3. Nœud de liaison de forme sphérique.
4. Résistance d'amortissement R_a.
5. Capacité haute tension C_0.
6. Support d'élément.
7. Boite de connexion.
8. Câble coaxial.
9. Voltmètre de crête MU11.
10. Partie de mesure basse tension AC.
11. Partie de mesure basse tension DC.
12. Electrode mise sous haute tension.
13. Electrode mise à la terre.
14. Grille de protection.

Figure IV.3: Appareil de commande SG1.

Figure IV.4: Transformateur HT 100.

Figure IV.5: Voltmètre de crête MU11.

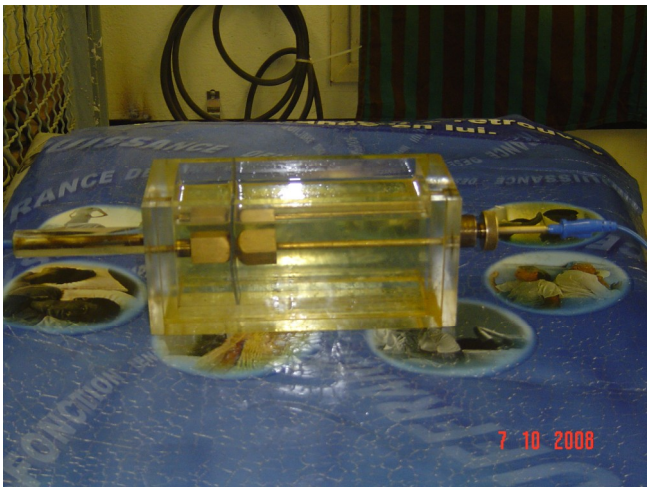


Figure IV.6: Ensemble système d'électrodes avec cellule de mesure.

2.2. Dispositif de mesure des épaisseurs

Pour mesurer l'épaisseur des échantillons nous avons utilisé un palmer de type TGL15048/I présenté à la figure IV.7. La précision de l'appareil est de 10^{-2} mm.

Figure IV.7: Palmer.

2.3. Vieillissement

Après avoir découpé et nettoyé les échantillons, ces derniers ont été soumis à un vieillissement thermique dans une étuve à air ventilée (figure IV.8), à la température de 100°C. Des prélèvements d'échantillons ont été effectués après chaque semaine de vieillissement (168 h).

Figure IV.8: Etuve de vieillissement thermique.

3. Déroulement des essais

3.1. Conditionnement des échantillons

Avant les essais, les éprouvettes ont été nettoyées puis conditionnées pendant au moins 24 h dans un dessiccateur (figure IV.9) contenant du gel de silicone conformément aux recommandations de la norme DIN 53.481/VDE 03035 [37].

Figure IV.9: Dessiccateur avec échantillons au cours de conditionnement.

3.2. Essais de rigidité diélectrique

Les essais consistent à placer l'éprouvette de PMMA entre deux électrodes et à lui appliquer une rampe de tension de 2,2 kV/s jusqu'au claquage. L'ensemble a été immergé dans une huile minérale (BORAK 22) afin d'éviter les contournements. Comme il a été dit que la rupture est un phénomène aléatoire, il s'avère indispensable de soumettre

une population importante d'échantillons au claquage pour chaque temps de vieillissement. Dans notre cas, ce lot est de 50 échantillons.

Après le conditionnement, l'éprouvette est retirée du dessiccateur pour être insérée entre les deux électrodes (Figure IV.6). L'écrou a été serré sur la tige mobile qui exerce une pression sur l'éprouvette assurant le contact parfait électrode-isolant. Ensuite la porte de la grille de protection a été fermée. Puis l'appareil de commande SG1 a été mis en service après l'avoir mis sous mode automatique et avoir fixé la vitesse de montée de la rampe.

Des phénomènes acoustiques et lumineux ont été constatés avec l'augmentation de la tension appliquée. Au départ, nous avons observé des décharges superficielles qui éclairent le milieu, puis des crépitements suivis de bruits d'abeilles et enfin un bruit sourd caractérisant le claquage. La valeur de la tension de claquage est affichée et mémorisée pendant 5 secondes par le voltmètre de crête.

Après rupture nous retirons l'échantillon de la cellule et nous repérons le point noir (Figure IV.11), dû à la carbonisation du matériau caractérisant le lieu du claquage. S'il n'y a pas de trace de claquage sur l'échantillon, c'est qu'il y a eu contournement. Dans ce cas, il est nécessaire de remuer l'huile pour dissiper les particules de carbonisation entreposées aux alentours des électrodes. Si plusieurs contournements successifs ont eu lieu, c'est qu'il y a suffisamment de particules de carbone accumulées dans l'huile formant un canal conducteur favorisant le contournement. Pour remédier à ce problème, nous changeons l'huile isolante.

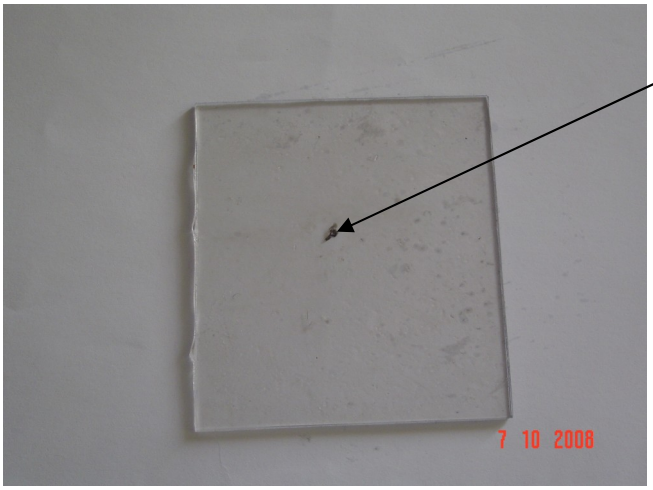


Figure IV.11: Eprouvette perforée.

La mesure de l'épaisseur est effectuée en trois points aux alentours du canal de perforation avec le palmer présenté à la figure IV.7. L'épaisseur retenue a été calculée comme la moyenne arithmétique des trois mesures. Cette opération a été effectuée pour

toutes les éprouvettes testées de différents temps de vieillissement. Les valeurs de la rigidité diélectrique ont été analysées statistiquement en utilisant le modèle de Weibull.

4. Résultats et discussion

4.1. Analyse statistique

La rigidité diélectrique est donnée par la formule suivante:

$$E = \frac{U}{d} \qquad \text{(IV.1)}$$

avec:

U : tension de claquage (kV).

d : épaisseur de l'échantillon (mm).

La probabilité de rupture a été calculée en utilisant la relation suivante [27]:

$$P(i,N) = \frac{i}{N+1} \qquad \text{(IV.2)}$$

avec:

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

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

Les diagrammes de Weibull à 2 paramètres donnant $LogLn\left(\frac{1}{1-P}\right)$ en fonction de $LogV$ sont présentés dans les figures IV.12 – IV.22 pour les différents temps de vieillissement.

Le lissage des points expérimentaux a été effectué en utilisant la méthode des moindres carrés. Le tracé des diagrammes conduit à un polynôme du deuxième ou du troisième degré. Dans ce cas, la recherche du seuil de rupture est justifiée statistiquement.

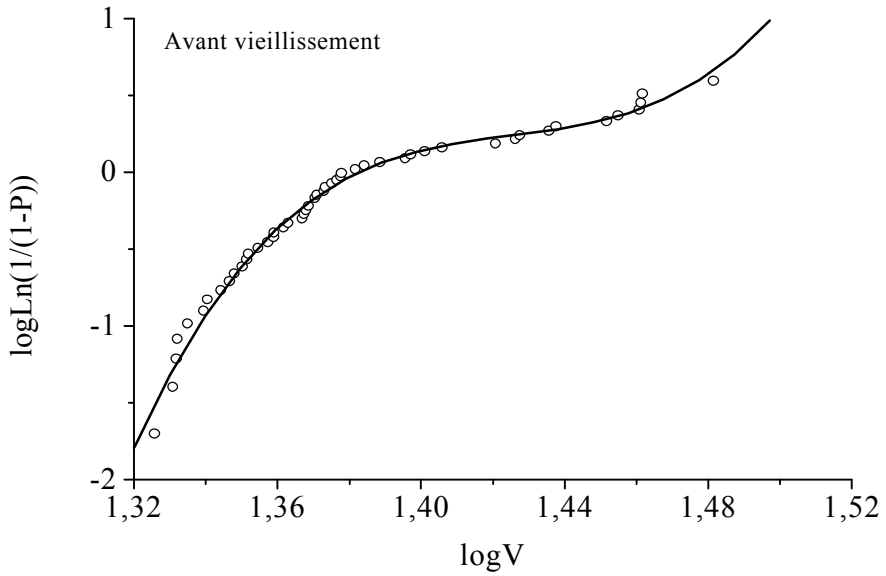


Figure IV.12: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique avant vieillissement.

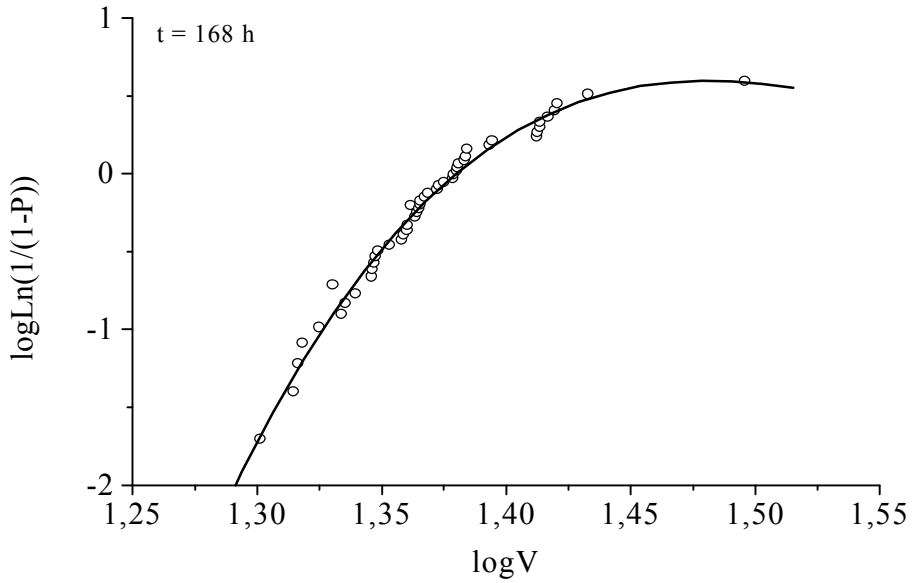


Figure IV.13: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 168 h.

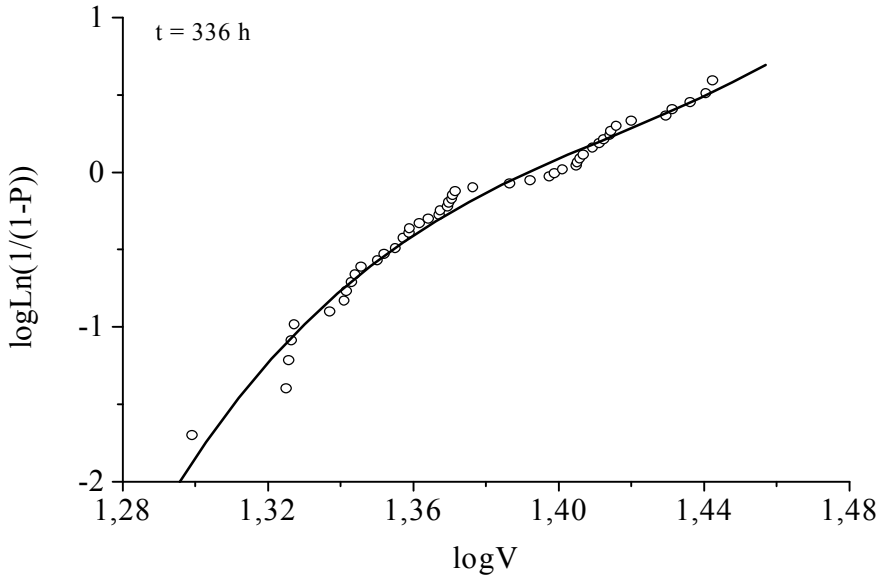


Figure IV.14: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 336 h.

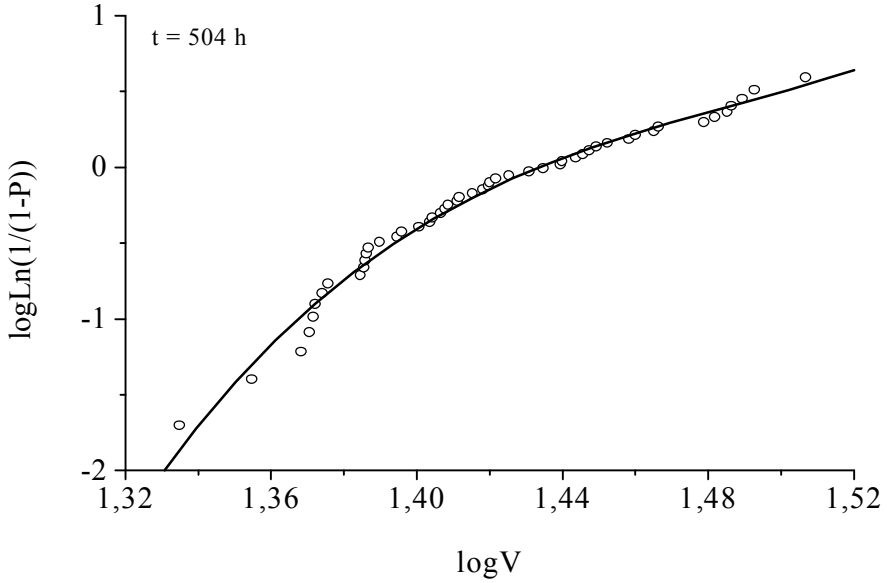


Figure IV.15: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 504 h.

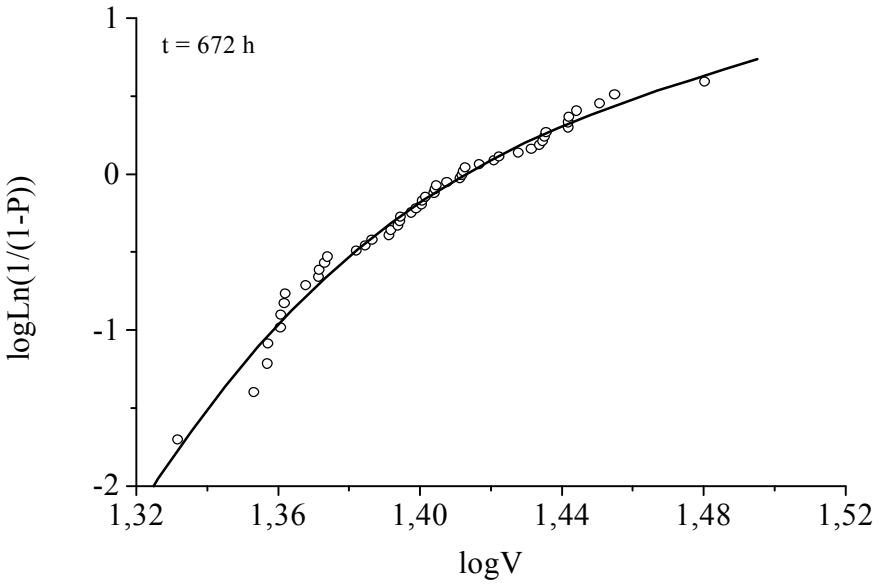


Figure IV.16: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 672 h.

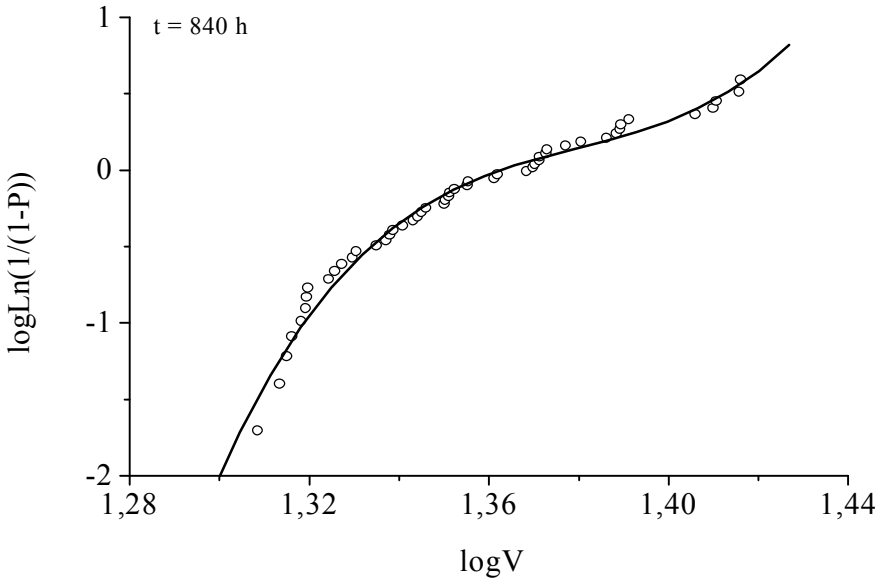


Figure IV.17: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 840 h.

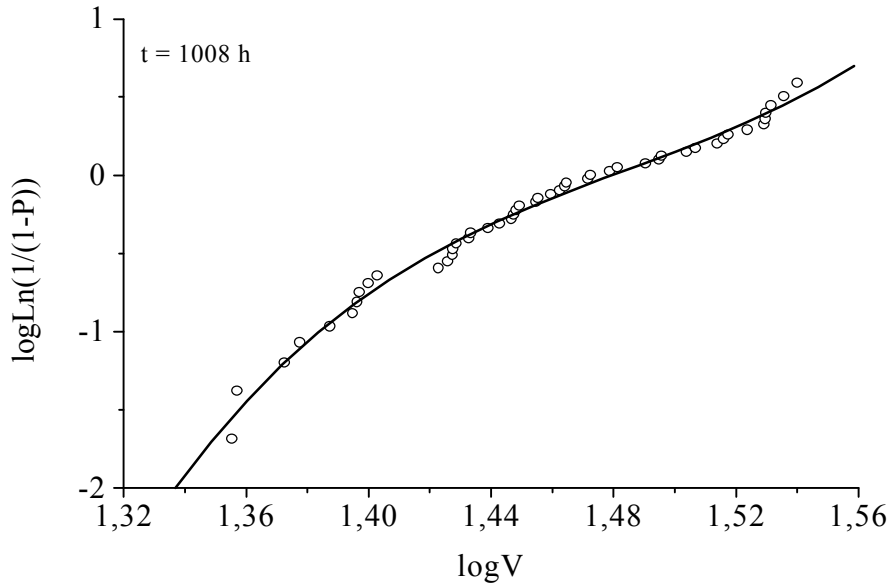


Figure IV.18: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 1008 h.

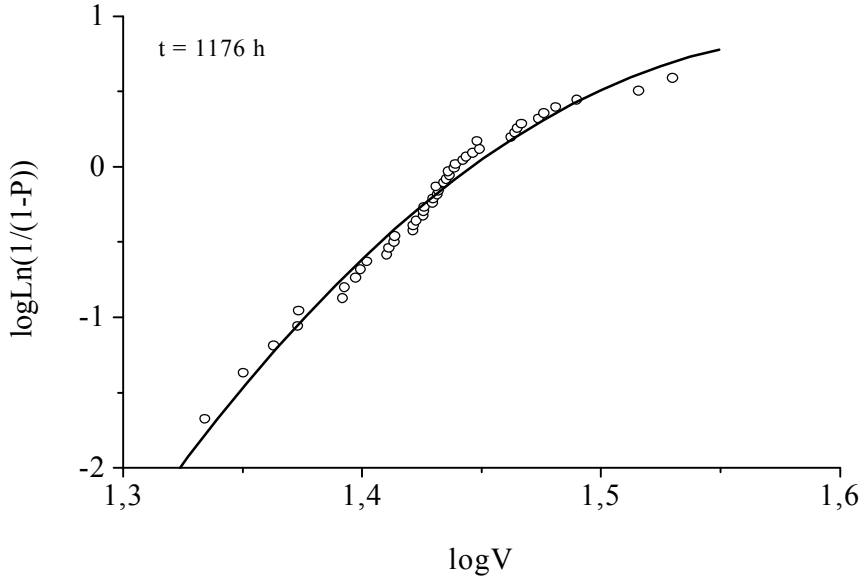


Figure IV.19: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 1176 h.

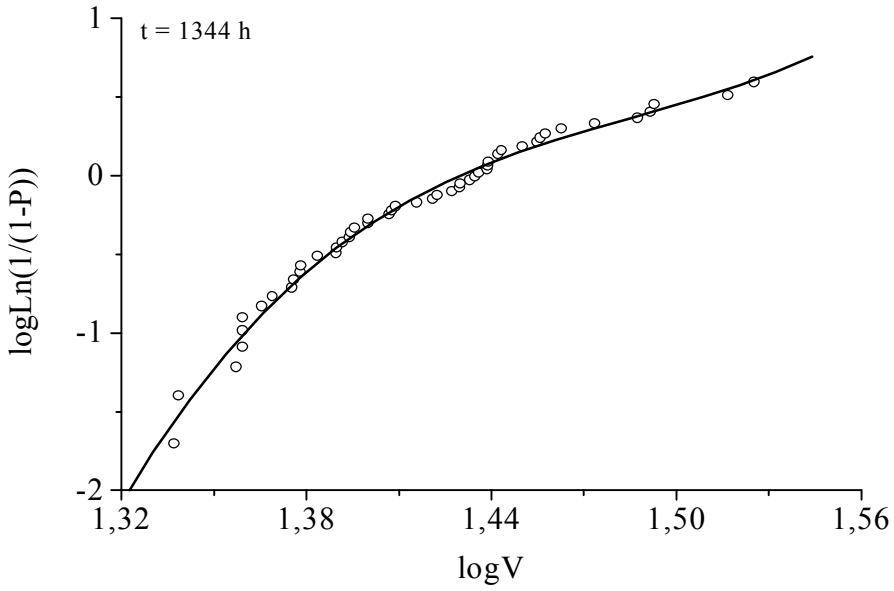


Figure IV.20: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 1344 h.

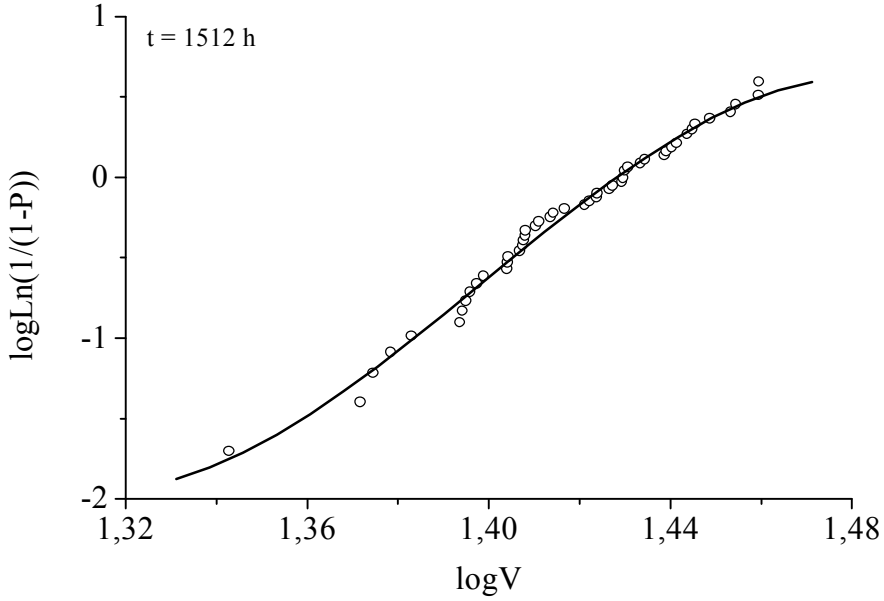


Figure IV.21: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 1512 h.

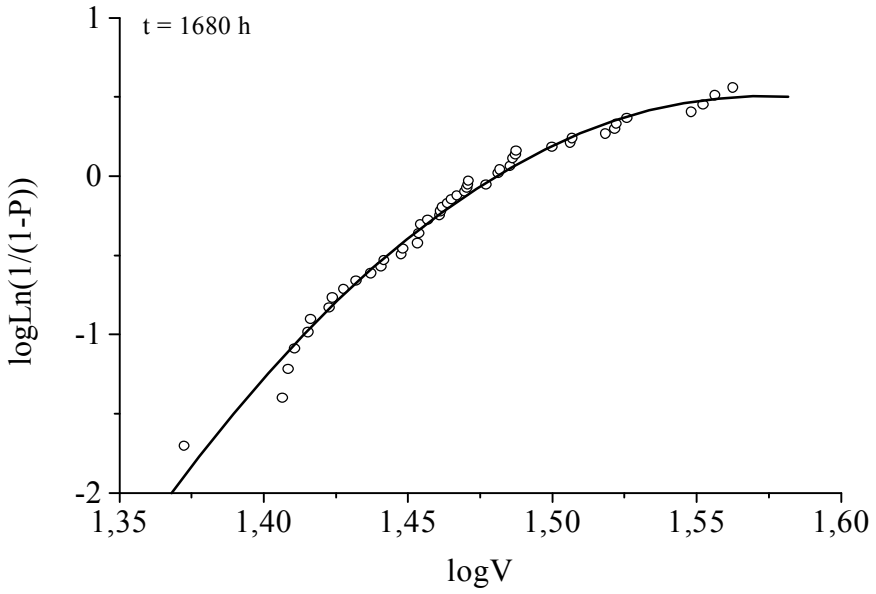


Figure IV.22: Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique pour un temps de vieillissement de 1680 h.

Les courbes IV.12 à IV.22 montrent que le tracé de $LogLn\left(\frac{1}{1-P}\right)$ en fonction de $LogV$ n'est pas linéaire. Ceci est dû, probablement à l'existence d'un seuil de rupture. Le calcul de la valeur seuil V_s peut se faire en utilisant la méthode des moindres carrés. La présence de ce seuil nous renseigne sur la dimension des défauts.

4.2. Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement

En exploitant les valeurs du champ de rupture obtenu d'après les distributions de Weibull, nous avons représenté la courbe donnant la dépendance de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement (figure IV.23). Cette courbe montre l'existence de 2 pics correspondant à des temps de vieillissement de 550 et 1035 h. Ces pics sont attribués à la relaxation des dipôles présents dans le matériau. La variation de la rigidité diélectrique a atteint 34%.

4.3. Variation de champ de seuil de rupture en fonction du temps de vieillissement

La recherche du champ de seuil de rupture a été faite en utilisant aussi la méthode des moindres carrés. La figure IV.24 illustre l'évolution du seuil de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement. Pour tous les temps de vieillissement, le seuil de claquage existe. La caractéristique présente 3 pics correspondant à des temps de

vieillissement de 550, 982 et 1312 h. Le seuil nous renseigne sur les dimensions des défauts existant dans la structure de l'isolant ou créés pendant le phénomène de vieillissement.

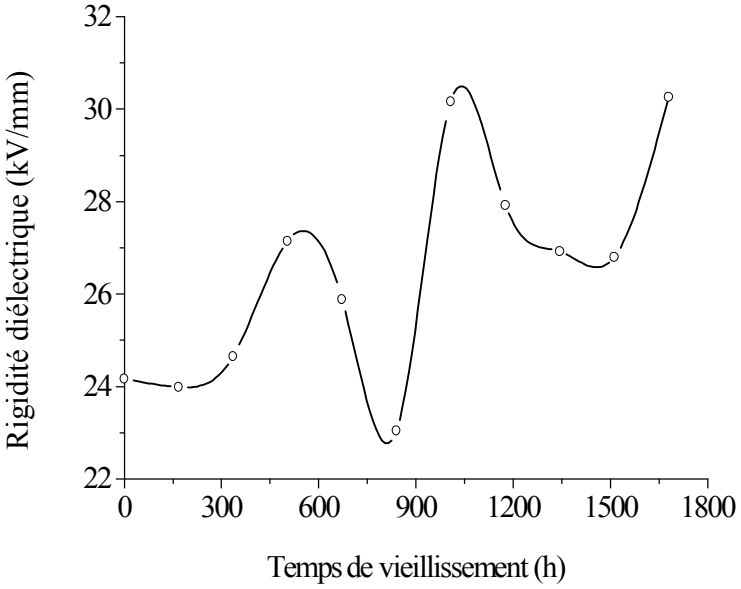


Figure IV.23: Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement.

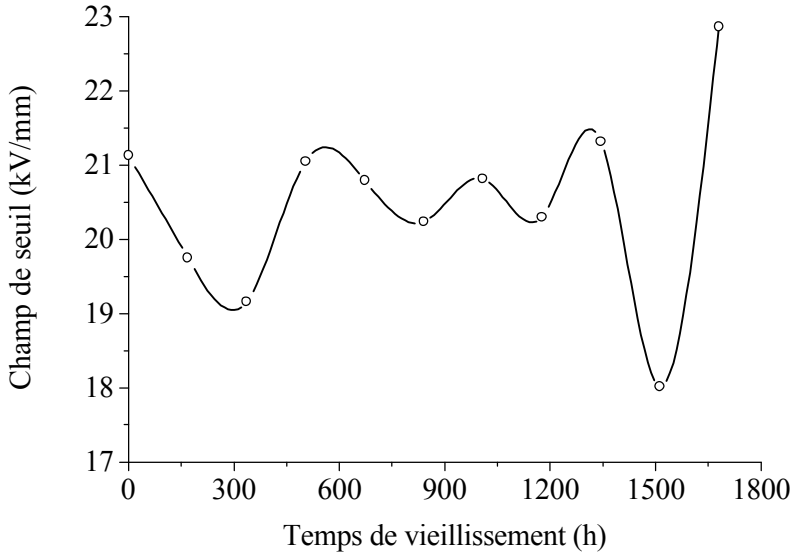


Figure IV.24: Variation du seuil de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement.

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

La figure IV.25 présente l'évolution du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement. Comme on peut le remarquer la caractéristique montre 4 pics aux temps de vieillissement de 330, 648, 1111 et 1527 h.

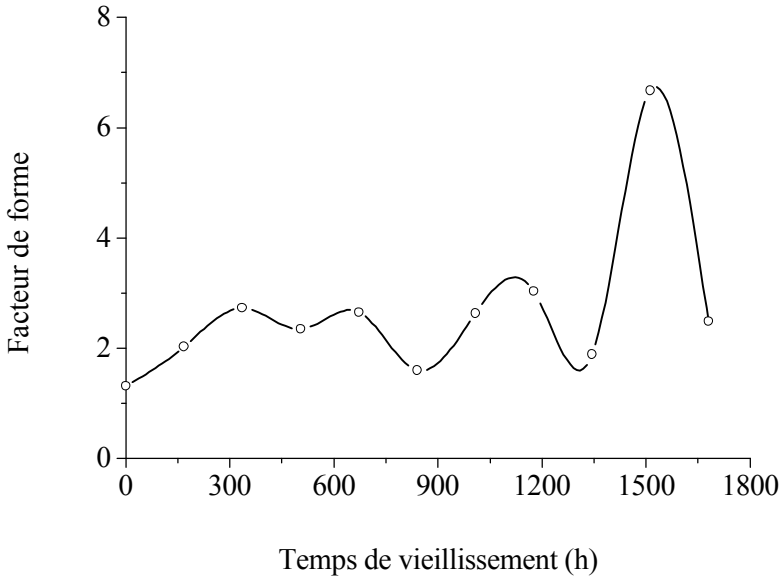


Figure IV.25: Variation du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement.

4.3. Dégradation du matériau

Nous avons observé un changement de couleur de l'isolant qui est passé du transparent au marron clair à partir de la deuxième semaine de vieillissement (Figure IV.26).

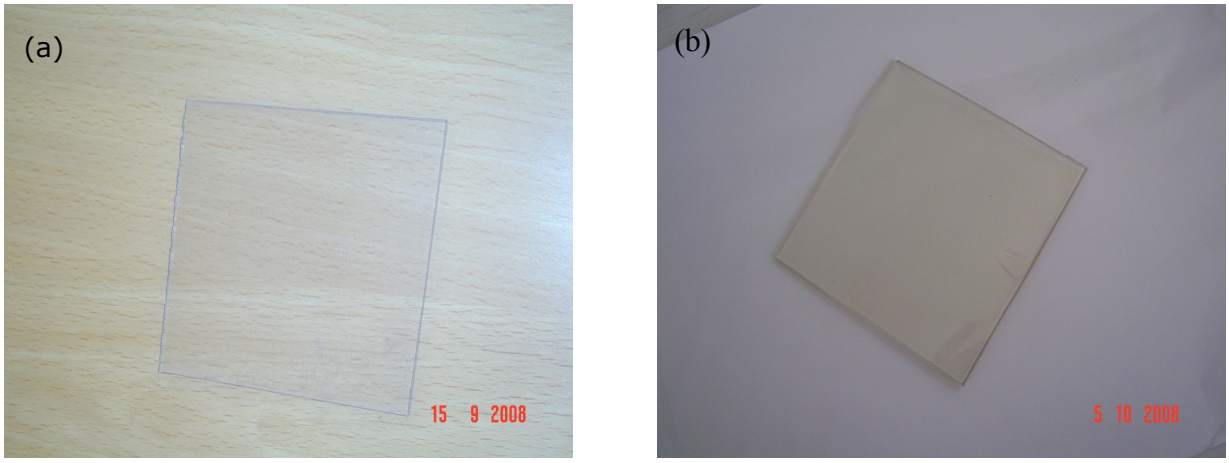
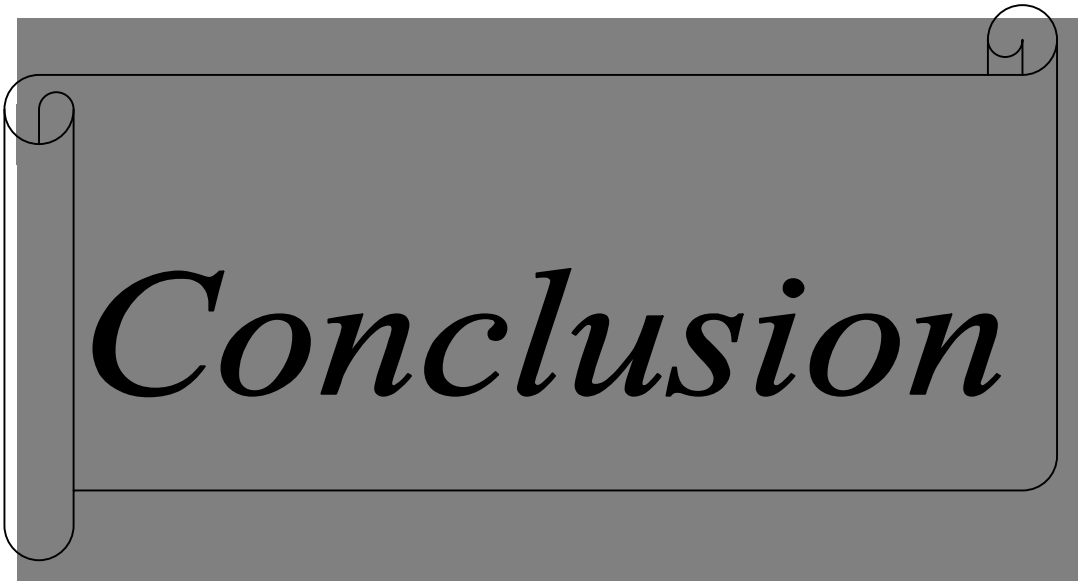


Figure IV.26: Eprouvettes de PMMA.
(a) Avant vieillissement.
(b) Après deux semaines de vieillissement.


Conclusion

Conclusion

Le travail présenté dans ce mémoire s'insère dans l'étude du vieillissement thermique des isolants solides. L'étude montre que les diagrammes de Weibull à 2 paramètres correspondant aux différents temps de vieillissement conduisent à des polynômes du deuxième ou du troisième degré. Le lissage des points expérimentaux a été faite en utilisant la méthode des moindres carrés. Le calcul du seuil de rupture existe pour les différents temps de vieillissement. La courbe donnant l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement présente 2 pics attribués à la relaxation des dipôles présents au sein de l'isolant. Cette variation a atteint 34%. De même, la caractéristique donnant le champ de seuil de rupture en fonction du temps d'exposition à la chaleur présente aussi des pics. Ce phénomène nous renseigne sur les dimensions des défauts existant dans le matériau ou créés au cours du vieillissement. La variation du facteur de forme des graphiques de Weibull montre que la dispersion des données varie d'une distribution à une autre. Cette étude peut être poursuivie à des temps de vieillissement plus importants afin de déduire la durée de vie du polymère.

Bibliographie

Bibliographie

[1] J. Lignon, R. Maillebuau, «Définition d'une matière plastique», Etude de matériau II matériau non ferreux, 1977.

[2] C. Oudet, «Polymères», Structure et propriétés, Editions Masson, 1994.

[3] M. Reghe, «Les plastiques», polymères, transformation et application, 2ème édition, 1991.

[4] Encyclopédie ENCARTA, Microsoft 1998.

[5] O. BOURNANE, «Contribution à l'étude de la conduction électrique dans le PMMA», Mémoire d'ingénieur, Tizi-Ouzou, 2005.

[6] R. Perrin, J. P. Scharef, «Chimie industrielle », TI, Editions Masson 1995.

[7] F. Pardos; «Traité de plastiques et composites», Techniques de l'Ingénieur ; AM 3350, Editions Michel Chatain, 1996.

[8] J. P. Trotignon, J. Verdu, A. Dobraczynski, M. Piperaud, «Précis de matières plastiques», 5ème Edition AFNOR,1994.

[9] Encyclopédie des sciences industrielles, Tome III. Mécanique, généralités, applications, Librairie Aristide de Quillet, 1974.

[10] M. Carrega, «Matériaux polymères», Editions Dunod, Juin 2000.

[11] J .P. Trotignon, J. Verdu, M. Piperaud, A. Dobrazynski, «Précis de matières plastiques» (structure–propriétés mise en œuvre et normalisation) ,2ème édition Nathan, 1982.

[12] M. Reyne, «Les plastiques» Que sais je ? Presses Universitaires de France. 1ère édition, 1998.

[13] J. C Dubois, «Traité plastiques et composites», Techniques de l'Ingénieur, AM3 140, Editions Michel Chatin, 1996.

[14] C. Menguy, «Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solide» Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie électrique, D2II2310, 2005.

[15] C. Menguy, «Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides», Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie électrique, D2 2130, 1997.

[16] H. Boyer, M. Norbart, R. Philippe, «Construction du matériel électrique». Mitsui & CO- LTD. Tokyo, Japan, 1991.

[17] M. Labrosse, «Plastiques, Essais normalisés», Techniques de l'ingénieur, AM4 A3530, 1997.

[18] R. Cœlho, B. Aladenize, «Les diélectriques», Editions Hermès, Traité des Nouvelles Technologies, Séries matériaux, 1996.

[19] J. C. Anderson, «Diélectriques». Editions Dunod, Paris, 1996.

[20] M. Aguet et M. Lanauvici, «Traité d'électricité» EPFL, Vol XXII, Haute tension, Editions Géorgie, Ch-Saint-Saphorin, 1982.

[21] N. Rouha, A. Medjoub, Y. Zefouni et N. Youdjou, «Etude de la corrélation entre tension seuil d'apparition des décharges partielles et d'évolution des arborescences électriques», COMAEI 98, Béjaia, Décembre 1998.

[22] M . A. Handala, «Contribution à l'étude de propagation des arborescences électriques dans L' EPDM». Thèse de Magister. ENP Alger, 1982.

[23] E. David, «Système d'isolation inter réseaux», Thèse de Doctorat Ecole Polytechnique de Montréal, 1996.

[24] R. Fournié, «Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanismes de dégradation, applications industrielles», Editions Eyrolles, 1991.

[25] M. Nemamcha, «Haute tension et matériaux diélectriques » 2ème conférence nationale sur la haute tension, Tizi-Ouzou, Novembre, 1997.

[26] C. Laurent, «Rupture diélectrique dans les polymères», R.G.E, N°10, pp. 745, 755, octobre 1985.

[27] C. Chauvet, «Mise au point d'une méthodologie sur des essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des câbles H.T», Thèse de doctorat, Toulouse 1992.

[28] M. Nedjar, «Evaluation de la tenue diélectrique à court et à long termes des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension» Thèse de Doctorat d'Etat ès sciences physiques, Tizi-Ouzou, 2003.

[29] K. D. Wolter, J.F. Johnson, J. Tanaka, «Polymer Degradation and its Measurement», Chapitre 5, Engineering dielectrics, Vol.II.A, Electrical properties of solid insulation material: Measurement techniques, Editor R. Bartnikas, pp.313-439, 1987.

[30] A. K. Jonscher, R. Lacoste, «On a cumulative model of dielectric breakdown in solids», IEEE Trans. On Elect. Insul., Vol.EI-19, N°6, pp. 567-577, December, 1984.

[31] I. Bazovski, «Fiabilité, théorie et pratique de la sûreté de fonctionnement », éditions Dunod, 1996.

[32] W. Weibull, «A statistical distribution function of wide applicability», Journal of Applied Mechanics, Vol.18, pp.293-297, 1951.

[33] A. Darhouani, «Caractérisation de la tenue diélectrique des polyéthylènes sous champ alternatif à 50 Hz», Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1985.

[34] Commission Electrothechnique Intenationale CEI 216, Comité d'étude N°63, «Systèmes d'isolation: évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes», Septembre 1989.

[35] 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 CEA 94, Alger, Novembre 1994.

[36] L. Deschamps, C. Caillot, M. Paris et J. Perret, «L'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolations des câbles haute tension et très haute tension», R.G.E, N°5, pp.343-360, 1983.

[37] DIN53481/VDE303, « Specification for electrical tests of insulating materials, breakdown voltage, electric strength », 02 November 1974.