

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique

Mémoire de Magister en électrotechnique

Option : Entraînements Electriques

Présenté par :

Slimani ferhat

Thème

Vieillessement hydrothermique du papier presspahn

Devant le jury composé de :

Mr. HADDAD Salah, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Président
Mr. NEDJAR Mohammed, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Rapporteur
Mr. MEGHERBI Mohammed, Professeur	Université de Tizi-Ouzou, Examineur
Mr. MOUDOUD Mustapha, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examineur
Mr. BOUTORA Youcef, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examineur

Soutenu le :

Je remercie tout d'abord Monsieur Rachid CHAIBI, Professeur à l'UMMTO, directeur du LGE de m'avoir accueilli dans le laboratoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers mon directeur de mémoire, Monsieur Mohammed NEDJAR, Professeur à l'UMMTO, aussi bien pour son aide précieuse que pour ses qualités humaines. Malgré les nombreuses sollicitations, il m'a toujours consacré le temps nécessaire pour être guidé efficacement. Avec sa grande rigueur scientifique et ses remarques toujours utiles, j'ai beaucoup appris en travaillant avec lui.

Je remercie très vivement Mr. Salah HADDAD professeur à l'UMMTO, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur, Mr. Mohammed MEGHERBI Professeur à l'UMMTO, pour avoir accepté de participer à ce jury.

Je remercie très vivement Mr. Mustapha MOUDOUD Maître de Conférences A à l'UMMTO pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être membre de ce jury.

Mes très vifs remerciements vont à l'égard de Mr. Youcef BOUTORA Maître de Conférences A à l'UMMTO pour avoir accepté de juger ce travail.

J'exprime également mes sincères remerciements au personnel de la bibliothèque de la faculté du génie électrique et de l'informatique de l'UMMTO pour leur serviabilité.

Je remercie les secrétaires du LGE autant pour leur soutien logistique que pour leur gentillesse.

Je suis très reconnaissant à Mr. Ali CHAÏBI, responsable du département contrôle et qualité à l'entreprise CABEL qui m'a accordé l'avis favorable pour réaliser la partie expérimentale de ce travail.

Je tiens à exprimer mes sentiments de gratitude à Mr. Mahdi IDRI, chef de service contrôle et qualité, cadre technique à l'entreprise CABEL de Gué de Constantine de m'avoir accepté au sein du laboratoire contrôle et qualité. Ainsi que ces collègues de travail, en l'occurrence, Hamid SENA et Hakim Lagoug.

Je remercie vivement tout le personnel du laboratoire du Laboratoire de Physique de l'entreprise Electro-industries d'Azazga à leur tête Mr. Ferhat BELABBAS pour leur accueil. Ainsi que ces collègues de travail, en l'occurrence, D.DJIDJA, E.CHEKIR, H.ABDELLAOUI

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille : Mes parents, mes frères, et tous mes proches et amis, qui m'ont accompagné, aidé, soutenu et encouragé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Sommaire

Introduction.....	1
Chapitre 1 : papier presspahn	
I. Généralités sur les polymères	3
I.1. Définition d'un polymère	3
I.2. Polymérisation.....	3
II. Description du papier.....	3
II.1. Composition et structure chimique	3
II.2. Procédé de fabrication du papier.....	5
II.2.1. Matière première	5
II.2.2. Processus de fabrication	5
III. Descriptifs normatifs des papiers	5
III.1. Grammage	5
III.2. Teneur en humidité.....	6
III.3. Absorption d'huile (méthode de Cobb).....	6
III.4. Stabilité thermique.....	6
IV. Propriétés des papiers.....	6
IV.1. Propriétés physiques.....	6
IV.2. Propriétés électriques	7
IV.2.1. Permittivité relative.....	7
IV.3. Propriétés mécaniques	8
IV.3.1. Résistance à la traction	8
IV.3.2. Résistance au déchirement.....	8
IV.3.3. Résistance à l'éclatement.....	8
IV.3.4. Résistance au pliage.....	8
IV.4. Propriétés thermiques	8
IV.4.1. Conductibilité thermique	9
IV.4.2. Stabilité thermique.....	9
V. Séchage du papier.....	9
VI. Imprégnation du papier	9
VI.1. Huiles isolantes pour transformateurs	10
VI.1.1. Fonctions des huiles isolantes.....	10
VI.1.2. Structure de base d'une huile minérale isolante	10
VI.1.2.1. Structure paraffine.....	10

VI.1.2.2. Structure naphtéique	10
VI.1.2.3. Structure aromatique	10
VI.2. Propriétés des huiles isolantes	11
VI.2.1. Propriétés physiques	11
VI.2.2. Propriétés chimiques.....	11
VI.2.3. Propriétés électriques.....	11
VI.2.4. Propriétés complémentaires.....	11
VII. Le papier imprégné	12
VII.1. Propriétés mécaniques.....	12
VII.2. Propriétés diélectriques	12
VII.3. Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique.....	12
VIII. Vieillessement du complexe huile papier.....	14
Chapitre 2 : Vieillessement hydrothermique des isolants solides.	
I. Vieillessement physique des polymères	15
I.1. Vieillessement physique avec transfert de masse	15
I.1.1. Aspects généraux	15
I.1.2. Pénétration de solvant.....	16
I.1.3. Conséquences physiques de l'absorption d'un solvant	17
a- Plastification.....	17
b- Gonflement	17
I.1.4. Perte d'adjuvants	17
I.2. Vieillessement physique sans transfert de masse.....	18
I.2.1. Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif	18
I.2.2. Dilatation différentielle.....	18
I.2.3. Modification de la morphologie	18
II. Vieillessement hydrolytique des polymères.....	18
II.1. Humidité	19
a-Humidité relative	19
b-Rapport de mélange	19
II.2. Réactions d'hydrolyse.....	19
II.2.1. Mécanismes	19
a-Groupe ester	20

b-Groupe amide.....	20
c-Groupe imide.....	20
II.2.2. Caractéristiques	20
II.3. Méthodes de simulation d'un vieillissement hydrolytique	21
II.3.1. Essai en autoclave	21
II.3.2. Essai en immersion.....	22
II.3.3. Essai en étuve	22
III. Vieillissement thermique des polymères.....	22
III.1. Endurance thermique	22
III.1.1. Principe	22
III.1.2. Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides.....	24
III.1.3. Choix des températures de vieillissement.....	26
IV. Vieillissement hydrothermique des polymères	26
I. Utilisation de la loi de Weibull pour modéliser les données de fiabilité	27
Chapitre 3 : Modèle statistique de Weibull	
II. Modèle statistique de Weibull	27
II.1. Base du modèle	27
II.2. Loi de Weibull	28
II.2.1. Modèle de Weibull à deux paramètres	28
II.2.2. Modèle de Weibull à trois paramètres.....	28
III. Signification des paramètres de Weibull.....	29
III.1. Paramètre de forme α	29
III.2. Paramètre de localisation X_s	29
III.3. Paramètre d'échelle X_0	29
IV. Application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides	30
IV.1. Tenue diélectrique à long terme	30
IV.2. Tenue diélectrique à court terme.....	31
Chapitre 4 : Résultats et discussion	
I. Techniques expérimentales	32
I.1. Vieillissement	32
I.2. Echantillons.....	33
I.3. Conditionnement des éprouvettes	35

I.4. Essais de claquage.....	35
I.5. Mesure du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité et de la résistivité transversale	36
I.6. Mesure des propriétés mécaniques	37
II. Analyse statistique	38
III. Résultats et discussion.....	38
III.1. Variation des propriétés électriques en fonction du temps de vieillissement	38
III.1.1. Rigidité diélectrique	38
III.1.1.1. Diagrammes de Weibull à 2 paramètres.....	38
III.1.1.2. Evolution de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement	42
III.1.1.3. Facteur de pertes diélectriques.....	43
III.1.1.4. Permittivité	43
III.1.1.5. Résistivité transversale	44
III.2. Variation des propriétés mécaniques en fonction du temps de vieillissement	45
III.2.1. Allongement à la rupture	45
III.2.2. Résistance à la traction	45
III.3. Variation du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité et de la résistivité transversale en fonction de la température avant le vieillissement.....	46
III.3.1. Facteur de pertes diélectriques	46
III.3.2. Permittivité	47
III.3.3. Résistivité transversale	48
III.4. Discussion.....	49
Conclusion générale.....	50
Bibliographie.....	51

Introduction générale

De nos jours, les polymères sont bien connus pour être de bons isolants électriques et l'importante considération dont ils jouissent auprès des industriels et de la communauté scientifique en est la preuve. En effet, les transformations chimiques que ces matériaux peuvent subir au cours de leur exploitation dans le domaine de la haute tension et sous l'effet de diverses contraintes climatiques (température, humidité,...etc) sont des événements scientifiques et techniques particulièrement pertinents.

La fabrication de transformateurs de puissance haute tension ou moyenne tension nécessite des quantités importantes de papier et d'huile isolante. Ces quantités sont proportionnelles à la puissance assignée d'un transformateur et à sa tension de service.

Les transformateurs contiennent deux types de matériaux isolants majoritaires: l'huile minérale et des matériaux ligno-cellulosiques. Parmi ces derniers figurent les papiers de guipage qui entourent les fils de cuivre de bobinages et des écrans en cartons permettant le support mécanique de ces bobinages et l'isolation électrique entre les différentes phases du transformateur. Les cartons présents dans ces dispositifs ont plusieurs fonctions. Ils sont employés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement. De par leur nature diélectrique, les cartons isolent électriquement les bobinages entre eux. De plus, leur porosité leur permet d'être imprégnés par le liquide isolant et caloporteur qui circule dans le transformateur.

La durée de vie d'un transformateur en service est déterminée essentiellement par son système d'isolation. Durant leur exploitation, les transformateurs sont exposés à diverses contraintes : mécanique, thermique, électrique, chimique et environnementales. Ces dernières feront l'objet de notre étude réalisée sur ce manuscrit. Parmi ces contraintes environnementales figurent la température et l'humidité qui sont généralement les plus destructrices pour les isolants.

Notre présent travail traite l'effet combiné des deux contraintes, à savoir l'humidité et la température sur le papier presspahn imprégné, utilisé comme isolant dans les transformateurs. Ce travail traite l'effet du vieillissement hydrothermique sur les propriétés du complexe papier-huile : facteur des pertes diélectriques, permittivité électrique, résistivité transversale, rigidité diélectrique, allongement à la rupture et résistance à la traction. Les essais de vieillissement ont été réalisés au niveau du Laboratoire de Génie Electrique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Quant aux expériences de claquage électrique et d'essai de traction, elles ont été effectuées au Laboratoire de Physique de l'entreprise Electro-industries sise à Azazga. Le reste des essais diélectriques, à savoir la mesure du facteur de dissipation diélectrique, la permittivité et la résistivité transversale a été réalisé au niveau du Laboratoire Contrôle et Qualité de l'entreprise Câbleries électriques d'Alger sise à Gué de Constantine.

Le présent manuscrit est divisé en deux grandes parties, la première comprenant trois chapitres 1,2 et 3 consacrée à une recherche bibliographique. Une deuxième partie présentée dans le chapitre 4 consacrée à l'étude expérimentale, résultats et discussion.

Dans le premier chapitre sont présentées des généralités sur le papier presspahn, à savoir la composition chimique, élaboration et domaines d'utilisation.

Le deuxième chapitre est consacré au vieillissement hydrothermique des isolants solides. Dans ce chapitre, sont détaillés les vieillissements hydrolytique et thermique,

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

Le quatrième et dernier chapitre décrit les techniques expérimentales qui ont fait l'objet de notre étude, notamment la réalisation des éprouvettes, le vieillissement des échantillons, essais de claquage, de traction, du facteur de dissipation, de la permittivité et de la résistivité transversale en fonction de la température.

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

Chapitre 1 : Papier presspahn

De parts ses qualités, le papier représente un matériau de choix pour les isolations électriques. Avec un prix de revient très compétitif, il présente également des propriétés électriques et mécaniques remarquables [1]. Sa structure cellulosique poreuse le prédispose à une imprégnation aisée et son association avec un imprégnant liquide lui confère des propriétés isolantes encore plus intéressantes [2].

Dès le début du 20^{ème} siècle, les papiers sont largement utilisés dans l'industrie électrique ; des produits très élaborés sont disponibles : papier parchemin ; papier à base de coton, de lin, de chanvre ou même d'amiante ; cartons comprimés dénommés presspahn ou pressboard (en anglais). Pour imprégner ces isolants solides, les huiles végétales, la paraffine, les huiles de résine ont cédé rapidement la place aux huiles minérales irremplaçables en haute tension [3].

Dans ce chapitre, nous allons exposer le papier presspahn utilisé dans l'isolation des transformateurs de haute tension.

I. Généralités sur les polymères

I.1. Définition d'un polymère

Plusieurs définitions ont été données aux polymères dont la plus acceptée est celle d'un système formé par un ensemble de macromolécules, c'est-à-dire d'entités moléculaires de grande dimension, issues de l'assemblage covalent d'un grand nombre d'unités répétitives appelés monomères. Le nombre d'unités monomères constitutives d'une chaîne de polymère est appelé degré de polymérisation (DP). Ces matériaux ne présentent pas d'ordre à longue distance, leur structure oscille entre un état amorphe totalement désordonné et un état plus cristallin.

I.2. Polymérisation

C'est la réaction qui permet la transformation d'un monomère en un polymère, et lorsqu'on a affaire à plusieurs monomères de différents types, cette réaction s'appelle copolymérisation. Il existe plusieurs types de polymérisation, on peut citer les deux cas les plus importants qui sont :

- a- Polymérisation en chaîne : les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée. C'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie : le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène sont des exemples de polymère obtenus par ce type de polymérisation.
- b- Polymérisation par condensation : au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes : les polyamides et certains polyuréthanes sont des exemples typiques de polymères obtenus par ce type de polymérisation.

II. Description du papier

II.1. Composition et structure chimique

Le papier est constitué par trois composants essentiels qui sont : la cellulose ; l'hémicellulose et la lignine.

La cellulose est d'origine végétale, c'est une substance organique naturelle très répandue dans la nature. Cette substance présente l'avantage de combiner entre d'excellentes propriétés électriques et de remarquables performances mécaniques [4]. On l'extrait généralement du bois, lin, coton, chanvre...etc. Elle est formée d'une chaîne plus au moins longue d'anneaux de glucose de l'ordre du millier, généralement de 4000 à 5000 en moyenne, dont le motif répétitif est le cellobiose présenté à la figure I.1 [5].

La molécule de cellulose est linéaire. Elle est caractérisée par un degré de polymérisation moyen, la mesure de ce dernier se fait par la méthode viscosimétrique. La richesse en groupement hydrogène explique le fait que la cellulose soit très hygrophile malgré son insolubilité dans l'eau.

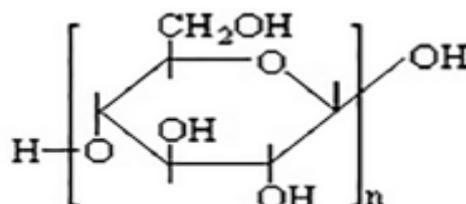


Figure I.1 : Motif élémentaire de cellobiose [6].

Les héli-celluloses sont des polysaccharides ayant un degré de polymérisation de l'ordre de 100 à 200 et une structure physique amorphe. Leur structure est constituée par une chaîne de glucose beaucoup plus courte que celle de la cellulose, ce qui leur confère une solubilité dans les solutions alcalines. Les lignines sont des substances non cellulosiques, elles servent de liant aux fibres de cellulose et permettent d'enrichir la pâte en cellulose α , c'est-à-dire à degré de polymérisation élevé. La composition, de divers types de papiers utilisés dans l'industrie électrique sont exposés dans le tableau I.1.

Constituants	Papier Kraft pour câbles (%)	Papier 100 % Manille	Papier coton (%)	Papier Kraft pour condensateur (%)
α -cellulose	88,3	78,6	95	91
Hémicellulose	2,9	11,4	0,5	1,5
Lignine	4,3	8,9	0,9	2,3
Cendre	0,5	0,7	0,1	0,1
Teneur en sulfate	0,02	-	0,1	0,01
Teneur en chlorure	0,02	-	0,1	0,01
Autres impuretés	3,96	0,4	3,3	5,08

Tableau I.1 : Composition de divers types de papier utilisés dans l'industrie électrique [3].

II.2. Procédé de fabrication du papier

II.2.1. Matière première

La matière première est une pâte de bois, obtenue à partir des résineux (pins, sapins suédois ou canadiens) par le procédé au sulfate, avec laquelle on peut fabriquer une feuille de papier dont les pertes diélectriques sont réduites.

II.2.2. Processus de fabrication

Pour la fabrication du papier, il faut d'abord commencer par la préparation de la pâte de bois. Le bois contient de la lignine qui joue le rôle de colle naturelle permettant l'assemblage des fibres de cellulose entre elles. Ce qui rend le bois très robuste. La première étape consiste à enlever cette lignine. Pour cela, il faut procéder par deux actions :

- Par actions mécanique (broyage) : en utilisant une machine permettant de broyer le bois, donc casser sa robustesse. Cette action permet l'obtention d'une pâte constituée d'un mélange de fibres de cellulose, d'hemi-cellulose et de lignine.
- Par actions chimiques (utilisations de produits chimiques) : les produits généralement utilisés sont la soude bisulfite, du sulfate...etc. Ces produits vont réagir avec la lignine afin de la détruire et avoir des fibres de cellulose en suspension dans l'eau.

Après l'obtention des fibres en suspension de l'eau, ces dernières vont subir un traitement spécial afin de les obtenir selon la masse volumique désirée. Après encollage et apprêt, la feuille peut être formée, ensuite on élimine l'eau par égouttage, essorage et séchage entre rouleaux chauffés.

Les papiers généralement utilisés en électrotechnique sont [7] :

- Le papier Kraft, de grande résistance, à base de pâte de bois ;
- Le papier Manille, à base de fibres de chanvre ;
- Le papier chiffon, à base de fibres de coton et de lin ;
- Le papier Japon, à base de fibres de mûrier de Japon.

III. Descriptifs normatifs des papiers

Les papiers cellulosiques à usage électrique sont traités dans la norme standard internationale CEI 554 [8] et la norme européenne EN 60 641[9]. Ces normes se réfèrent aux publications ISO et donnent un bref aperçu de la méthode utilisée. Il est entendu que cet aperçu ne remplit d'autre objet que celui de servir de point de repère et que seule la publication ISO proprement dite contient tous les détails nécessaires. Nous citerons dans ce chapitre certains aspects liés aux essais du papier.

III.1. Grammage

Le grammage sera mesuré selon la méthode décrite dans la norme ISO 536 [10]. L'essai sera effectué sur trois éprouvettes conditionnées, une détermination étant faite sur chacune des

trois éprouvettes. La masse sera déterminée à 0,5 % près sur des éprouvettes d'au moins 500 cm². La valeur médiane est prise comme résultat.

III.2. Teneur en humidité

La teneur en humidité du papier à l'état de réception sera mesurée conformément à la méthode décrite dans la recommandation ISO/R 287 [11]. Le résultat sera exprimé en pourcentage d'humidité par rapport à la masse initiale.

III.3. Absorption d'huile (méthode de Cobb)

Dans cet essai, de l'huile est mise en contact avec une surface connue d'une liasse de papier. Après un laps de temps déterminé, le papier est séparé de l'huile, la feuille supérieure de la liasse, en contact direct avec l'huile est époncée. L'augmentation de la masse de la liasse par absorption est établie par pesage direct. Cet essai dérive du test d'absorption d'eau exposé dans la norme ISO 535 [12].

III.4. Stabilité thermique

Les propriétés thermiques du papier sont un facteur important du bon comportement en service de l'isolation. Elles sont à prendre en considération, au même titre que les propriétés diélectriques, quand le papier est à l'état imprégné. Parmi ces propriétés, on doit citer la conductibilité thermique qui limite l'élévation de température de l'isolation. L'autre propriété importante est la stabilité thermique, un facteur qu'il faut prendre en considération lors du séchage et le traitement sous vide avant imprégnation. Pour la stabilité thermique il est à noter que l'oxygène et l'humidité sont des facteurs d'accélération du vieillissement du papier.

Les essais réalisés avant et après vieillissement seront précédés d'un conditionnement, réalisé à partir de papier préalablement séché. La période de vieillissement et la température sont spécifiées selon la norme CEI 60554-3 [13-15].

IV. Propriétés des papiers

Les papiers dont la structure peut être considérée comme convenable doivent présenter les particularités suivantes :

- Une grande pureté (pas de corps durs, ni de particules métalliques ou charbonneuses).
- Une régularité d'épaisseur.
- Une grande résistance mécanique.

IV.1. Propriétés physiques

Le papier est une matière légère avec une masse volumique de 0,8 à 1,4 g/cm³ suivant le taux d'humidité. Le papier est très hygroscopique, il absorbe la vapeur d'air. Sa teneur en eau dépend de l'état hygrométrique de l'air et de la température. La teneur moyenne en eau d'un papier non séché est voisine de 7 % en masse. L'hygroscopicité élevée du papier découle du caractère fortement polaire de la cellulose. Une partie de l'eau se fixe aux groupements hydroxyles (OH) de la cellulose et l'autre partie pénètre dans les capillaires par absorption classique, conduisant ainsi

à une réduction de ses propriétés électriques et mécaniques [16]. Le séchage s'effectue par élévation de température, à 110°C environ, sous vide ou dans un courant d'air sec. Le papier est un mauvais conducteur de la chaleur, c'est donc un bon isolant thermique.

L'épaisseur du papier varie selon l'application à laquelle il est destiné. On peut trouver des papiers de très faibles épaisseurs (entre 5 et 30 μm). Pour la réalisation des isolations des câbles, des papiers d'épaisseurs un peu plus importantes sont utilisés (30 à 170 μm). Dans les transformateurs, les papiers de guilage des conducteurs trouvés dans les enroulements sont assez fins, ne dépassant pas 75 μm . Par contre des papiers plus épais sont utilisés entre couches de transformateurs [17].

IV.2. Propriétés électriques

IV.2.1. Permittivité relative

La permittivité relative ou constante diélectrique ϵ_r d'un isolant est le rapport de la capacité C_x d'un condensateur dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement et exclusivement rempli de l'isolant en question, à la capacité C_0 de la même disposition d'électrodes dans le vide:

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{I.1})$$

La valeur de la permittivité relative du papier dépend de sa masse volumique. On a vu précédemment que la masse volumique de la cellulose est de l'ordre de 1,4 g/cm^3 . La permittivité relative d'un papier peut varier entre 1,7 et 3,2 quand la masse volumique varie entre 0,6 et 1,2 g/cm^3 [18].

IV.2.2. Rigidité diélectrique

Le papier étant un produit hétérogène, ses caractéristiques sont mal définies ; par ailleurs, le papier est souvent utilisé imprégné et rarement à l'état sec. La rigidité diélectrique du papier sec varie avec l'épaisseur et elle est meilleure pour les papiers minces. Il est donc avantageux d'utiliser plusieurs feuilles minces superposées plutôt qu'un papier épais. Les épaisseurs peuvent varier de 75 à 200 μm . Les propriétés électriques du papier presspahn dépendent étroitement de la température et de la quantité d'eau contenue dans la cellulose [19]. La conductibilité électrique est très variable suivant la densité, la température et le degré d'humidité. La constante diélectrique est de 6 environ pour du papier bien sec. Les pertes diélectriques (tangente delta) sont très sensibles à l'humidité, à la température et à la fréquence du courant.

La rigidité diélectrique d'un matériau est la valeur maximale du champ électrique qu'on peut lui appliquer sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage ou perforation diélectrique rendant impossible une nouvelle application de la tension. Le claquage est précédé d'une augmentation importante du courant circulant dans le matériau avec des conséquences thermiques destructives : fusion, évaporation, décomposition, carbonisation...etc [14].

La rigidité diélectrique γ d'un milieu isolant, se trouvant entre les armatures d'un condensateur, représente la valeur maximale du champ (v/m) que peut supporter ce milieu avant le déclenchement d'un arc électrique. La valeur maximale de la tension appliquée aux bornes du condensateur est appelée tension de claquage U_c du condensateur. La rigidité du milieu isolant est définie d'après la relation suivante :

$$\gamma = \frac{U_c}{d} \quad (\text{I.2})$$

d : l'épaisseur de l'isolant placé entre les armatures du condensateur (m).

IV.3. Propriétés mécaniques

Les principales caractéristiques à prendre en compte lors de la mise en œuvre ou en service des papiers, sont les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction et à l'éclatement ainsi que la résistance au déchirement et au pliage [20].

IV.3.1. Résistance à la traction

Elle est caractérisée par la longueur à la rupture qui est la longueur que devrait avoir une bande de papier de largeur uniforme pour que, suspendue par l'une de ses extrémités, elle se rompe sous son propre poids.

IV.3.2. Résistance au déchirement

Elle est définie comme étant la force moyenne exercée pour poursuivre le déchirement amorcé par une entaille initiale dans une éprouvette généralement constituée d'une liasse de feuille de papier.

IV.3.3. Résistance à l'éclatement

Elle est évaluée par son indice qui est égal au quotient de la pression hydraulique exprimée en millibars, exercée sur une éprouvette par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc à l'instant de l'éclatement, par la masse du papier en gramme par mètre carré.

IV.3.4. Résistance au pliage

On mesure, au moyen d'un dispositif normalisé, le nombre de double pliage que peut supporter une bande de papier, sous tension constante, avant de se rompre.

IV.4. Propriétés thermiques

L'échauffement des parties actives des matériels électriques engendrent des contraintes très importantes pour les matériaux isolants de ces matériels. Cependant, les propriétés thermiques sont un facteur très important pour le bon fonctionnement en service d'une isolation électrique. Parmi ces propriétés, on peut en citer quelques-unes :

IV.4.1. Conductibilité thermique

La conduction thermique qui limite plus au moins l'élévation de la température de l'isolation dont dépend, à court terme, les risques de claquage thermique et à plus long terme le vieillissement de l'isolation.

IV.4.2. Stabilité thermique

L'effet se fait sentir à long terme. Dans ce cas, l'imprégnant joue un grand rôle dans la mesure où il a une influence sur certains paramètres tels que l'oxygène et l'humidité qui sont des facteurs importants d'accélération du vieillissement du papier. Cette dernière est prise en considération même lors du séchage du matériau afin d'éviter toute dégradation au cours de ce traitement.

V. Séchage du papier

Les molécules d'eau adhèrent fortement aux chaînes de cellulose. Pour pouvoir briser les liaisons existantes entre l'eau et la cellulose, il faut maintenir les papiers sous vide et à haute températures (130 à 170° C) pendant plusieurs heures. Lorsque la teneur en humidité du papier ou d'un carton est très élevée (> 11%), les molécules d'eau peuvent se condenser et former des « clusters » dans les microvides de la feuille. Après séchage, l'huile minérale utilisée comme imprégnant remplace l'eau et les gaz qui étaient présents dans le papier, sans qu'il soit possible d'éliminer totalement les molécules d'eau les plus solidement fixées dans sa structure.

Le séchage d'une isolation de transformateurs HT peut s'effectuer, dans une première phase, en présence d'air (préséchage vers 90° - 100° C), suivie par un traitement progressif sous vide s'étalant sur plusieurs jours ; en opérant en absence d'air, on peut augmenter la température jusqu'à 130°C ; sous vide on peut sécher des cartons jusqu'à 120° C.

Dans l'industrie des transformateurs HT, on s'efforce de maintenir les teneurs en eau dans le papier et dans l'huile minérale à des valeurs ne dépassant pas respectivement 0.5 % et 20 ppm. Pour des papiers contenant 3 à 5 % d'humidité, un échauffement jusqu'à 80-100° C peut conduire un transfert notable d'eau dans l'huile.

Avec un papier à condensateur d'épaisseur de 15,5 µm , on peut vérifier que le séchage sous vide, effectué à différentes températures, n'affecte pas les caractéristiques physico-chimiques jusqu'à 120° C et le facteur de pertes diélectriques jusqu'à 130° C [3].

VI. Imprégnation du papier

Pour imprégner les isolants solides, les huiles végétales (lin, coton), la paraffine, les huiles de résine ont cédé rapidement la place aux huiles minérales irremplaçables en haute tension. Le papier isolant, quand on l'imprègne avec l'huile, acquiert des propriétés électriques et mécaniques remarquables [21].

VI.1. Huiles isolantes pour transformateurs

L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût [22]. Cette huile est obtenue à partir des fractions lourdes issues de la distillation fractionnée sous vide du pétrole brut. Ces distillats appelés huiles de base serviront de matière première pour la fabrication des différents huiles qui seront choisies selon les propriétés et les caractéristiques recherchées.

VI.1.1. Fonctions des huiles isolantes

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations celluloseuses ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. La fonction de ces huiles peut être répartie en deux fonctions essentielles :

- Fonction diélectrique : dans ce cas l'huile joue le rôle d'isolant entre les parties actives des transformateurs notamment entre conducteurs sous tension, isolation entre enroulements basse et haute tension et isolation entre enroulement et cuve. L'huile permet aussi d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer les propriétés diélectriques [23].
- Fonction de transfert de chaleur : bien que son rendement soit exceptionnellement élevé, un transformateur ne peut échapper, à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur nécessitant ainsi le refroidissement de l'appareil. L'huile permet de capter la chaleur dissipée par les éléments actifs pour la restituer à une source froide.

VI.1.2. Structure de base d'une huile minérale isolante

Avant de pouvoir aborder la question du raffinage des huiles isolantes, il est nécessaire d'avoir quelques connaissances relatives à la chimie des huiles. Une huile minérale isolante est principalement composée de carbone et d'hydrogène sous forme de molécules présentant des structures diverses [24].

VI.1.2.1. Structure paraffine

Ce groupe de molécules peut être soit linéaire, soit ramifié. Les molécules de ce type ont un faible pouvoir solvant pour l'eau et les produits d'oxydation. Les molécules paraffiniques ont une stabilité thermique plus faible relativement aux huiles de type différent.

VI.1.2.2. Structure naphténique

Les molécules de ce groupe sont également connues sous le nom de cyclo-alcanes. Ces huiles présentent d'excellentes propriétés à basse température et un meilleur pouvoir solvant. On trouve 5, 6 ou 7 carbones dans la structure du cycle, mais les cycles à 6 carbones prédominent.

VI.1.2.3. Structure aromatique

Toutes les huiles diélectriques contiennent des molécules aromatiques, on trouve :

-Les composés mono-aromatiques qui présentent généralement de bonnes propriétés électriques tout en étant capables d'absorber les gaz. Ils sont relativement stables à l'oxydation.

-Les composés poly-aromatiques PAC : ceux-ci sont produits au cours du processus de raffinage de l'huile comme ils peuvent être des composants naturels de celle-ci.

VI.2. Propriétés des huiles isolantes

VI.2.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques d'une huile qui peuvent intéresser l'ingénieur en charge de l'exploitation d'un transformateur sont :

- La viscosité ;
- La densité ;
- L'aspect ;
- Le point d'écoulement ;
- La tension inter faciale ;
- Le point d'éclair.

VI.2.2. Propriétés chimiques

Concernant les propriétés chimiques de l'huile, celles qui intéressent le plus l'exploitant de transformateurs sont :

- Sa stabilité vis-à-vis de l'oxydation ;
- Sa teneur en inhibiteur de l'oxydation ;
- Sa teneur en soufre corrosif ;
- Sa teneur en eau.

VI.2.3. Propriétés électriques

Pour les propriétés électriques, celles qui nous intéressent le plus sont :

- la rigidité diélectrique ;
- le facteur de pertes diélectriques.

L'huile pure est un excellent isolant, sa rigidité diélectrique peut atteindre 90 à 100 kV/mm . Mais la présence d'impuretés, d'humidité et de produits acides la diminue considérablement. Sa constante diélectrique est de 2 à 2,2, sa résistivité est de 5 à $10^{15} \Omega.cm$ et l'angle de pertes diélectriques est très faible.

VI.2.4. Propriétés complémentaires

En plus de ces propriétés, il en existe d'autres dites complémentaires que nous pouvons citer, puisqu'elles caractérisent les huiles minérales. Ces propriétés se rapportent à :

- La tenue aux chocs de foudre ;
- La tendance à la charge électrostatique ;
- La propriété de gassing ;
- Le taux de structure aromatique ;
- Le taux de structure polycyclique ;
- Les propriétés de solubilité.

VII. Le papier imprégné

Le papier imprégné d'huile est un matériau diélectrique courant, utilisé largement dans les transformateurs de puissance [25]. Après avoir fait une présentation individuelle des propriétés du papier et de l'imprégnant (huile minérale), nous allons examiner les différentes modifications apportées à ces propriétés une fois que les deux isolants sont combinés (papier imprégné).

VII.1. Propriétés mécaniques

Le papier non imprégné comme la plupart des matériaux constitués de fibres, a une structure poreuse, ce qui leur donne une forme irrégulière. Cette structure affecte totalement le comportement mécanique du papier. L'imprégnation de ces pores avec de l'huile, permet d'améliorer considérablement le comportement mécanique du papier en lui donnant beaucoup plus de rigidité mécanique [26].

VII.2. Propriétés diélectriques

Les propriétés diélectriques du papier imprégné dépendent de l'imprégnant, mais aussi, dans une certaine mesure, de la qualité du papier et de sa masse volumique. Dans ces diverses applications, les propriétés du papier imprégné que l'on doit prendre en considération sont sa permittivité relative, son facteur de dissipation diélectrique et sa rigidité diélectrique. Ces propriétés sont fonction d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels nous pouvons citer la température.

VII.3. Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique

Le papier imprégné peut être considéré comme étant l'association en série de la cellulose et de l'imprégnant. Sa permittivité relative et son facteur de pertes diélectriques dépendent étroitement de sa masse volumique, dans la mesure où, la réduction de cette dernière conduit en général à la diminution des pertes diélectriques du papier imprégné.

La permittivité relative et le facteur de dissipation diélectrique du papier imprégné varient aussi avec la température et sa teneur en eau, comme on peut le constater sur la figure VII.1 et VII.2 [27]. Ces courbes mettent en évidence l'influence de la température et du taux d'humidité sur la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique.

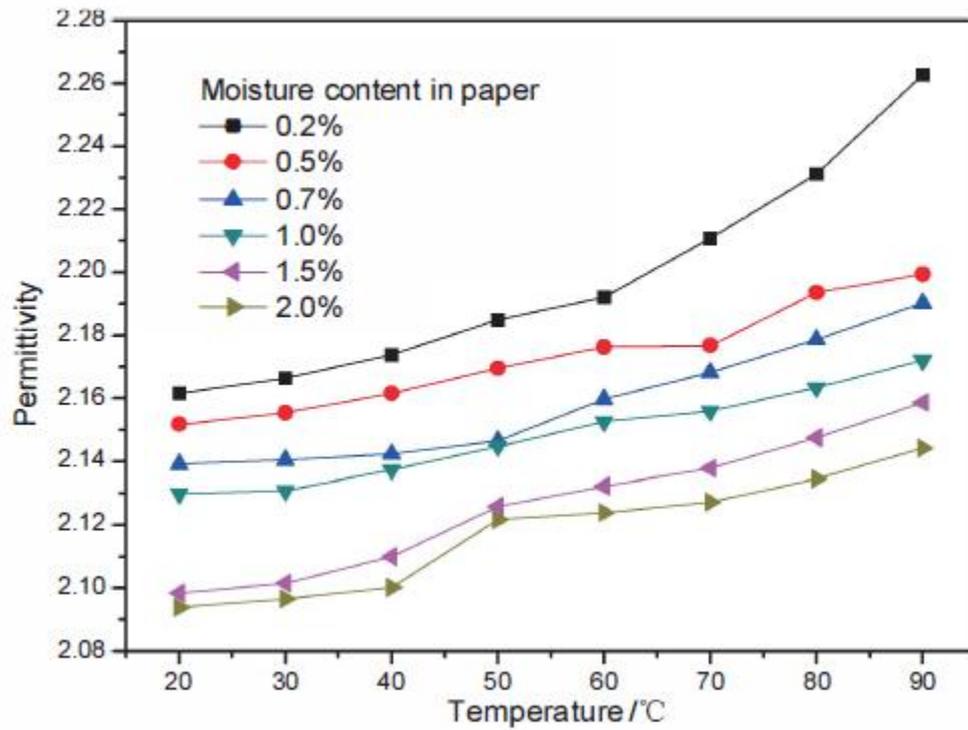


Figure I.2 : Influence de la température et le taux d’humidité sur la permittivité relative du papier presspahn imprégné [27].

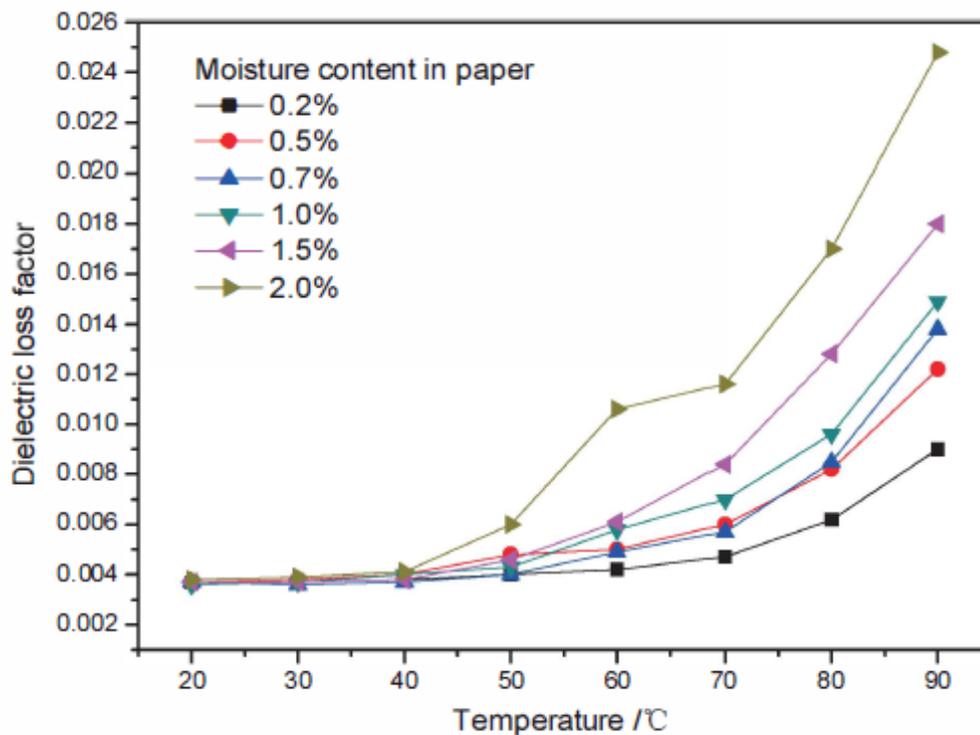


Figure I.3 : Influence la température et le taux d’humidité sur le facteur de dissipation diélectrique du papier presspahn imprégné [27].

VIII. Vieillissement du complexe huile papier

Les principaux agents, présents dans le transformateur, susceptibles de dégrader la cellulose et les hémicelluloses, sont l'eau (par hydrolyse), l'oxygène (par oxydation). Par ailleurs la cellulose se dégrade spontanément sous l'effet de la température (par pyrolyse) au-delà de 300°C.

L'huile imprégnant le papier joue au départ un rôle d'écran ; en effet son caractère apolaire oblige l'eau à rester majoritairement dans le papier. De la même façon, certains produits de dégradation du papier (à caractère polaire) ne peuvent pas se solubiliser dans l'huile. Si cette dernière s'oxyde au cours des années, l'acidité et certains autres produits d'oxydation pourront jouer un rôle actif dans la dégradation du papier.

Chapitre 2 : Vieillissement hydrothermique des isolants solides

d'affinité pour la majorité des solvants car les interactions polymère-polymère sont plus fortes que la majorité des liaisons solvant qu'il pourrait établir.

- Si la pénétration du solvant dans le polymère entraîne la rupture des liaisons secondaires entre macromolécules, la cohésion mécanique que celle-ci assurait tend à disparaître, le matériau devient alors déformable, d'où le principe de la plastification [25]. Cette dernière est délibérément recherchée pour transformer un matériau rigide en un matériau souple.

I.1.2. Pénétration de solvant

La pénétration des solvants au sein d'un matériau se fait selon les lois de la diffusion qui peuvent prendre des expressions diverses (Fick, Langmuir,...) et parfois complexes si le diffusant modifie la perméabilité de la matrice au fur et à mesure de sa pénétration (plastification, réactions chimiques). Les principaux types de comportement observable sont résumés sur les courbes de la figure II.2 :

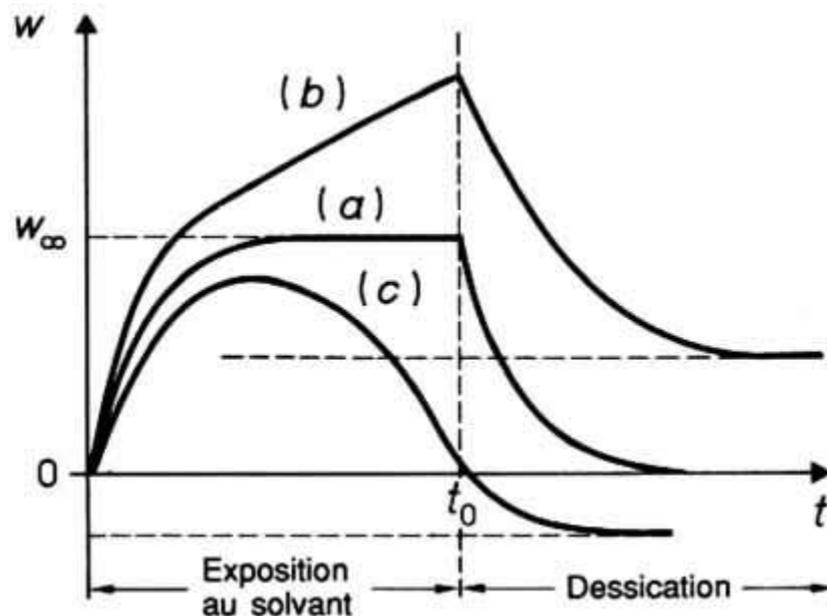


Figure II.2 : Courbes d'absorption ($t < t_0$) et de désorption ($t > t_0$) [26].

On distingue les cas suivants :

- La courbe (a) représente l'interaction physique pure, elle est réversible après dessiccation du moins du point de vue gravimétrique et en considérant un polymère initialement insoluble dans le milieu considéré.
- La courbe (b) correspond à la réaction chimique conduisant à une augmentation de la masse sèche, c'est l'exemple de la réaction d'hydrolyse.
- La courbe (c) représente la réaction chimique conduisant à une diminution de la masse sèche du polymère, après une certaine durée de vieillissement. On peut attribuer ce cas de figure à des dégradations physiques ou chimiques ou à une hydrolyse du matériau. Des groupements chimiques peuvent être arrachés des chaînes du polymère et être évacués dans le solvant, ce qui explique une perte de matière et une baisse de la masse globale.

I.1.3. Conséquences physiques de l'absorption d'un solvant

a- Plastification

On distingue néanmoins la plastification interne qui résulte d'une modification des chaînes elles-mêmes, et la plastification externe, ou il s'agit d'un simple mélange [27].

D'après J.Verdu [26], toute modification de la structure ou de la composition d'un polymère est due à la plastification de celui-ci. La plastification se traduit par une diminution du module d'élasticité et de la contrainte à la rupture ainsi qu'une augmentation de l'allongement à la rupture et une diminution de la température de transition vitreuse. L'exemple typique est celui des polyamides en atmosphère humide. C'est le cas de polyamide PA 6-6 sec, où sa contrainte en traction dépasse 80 MPa et l'allongement à la rupture est d'environ 50 % à 25°C. Pour le polymère saturé en eau, la contrainte au seuil est inférieure à 40 MPa et l'allongement à la rupture dépasse 300 % [25].

b- Gonflement

La pénétration d'un solvant dans polymère peut être schématisée comme indiqué sur la figure II.3. Le processus peut atteindre l'équilibre au stade (1) correspondant à une faible teneur en eau ou au stade (2) où la pénétration du solvant est très forte. Le phénomène peut aller jusqu'à la dissolution du polymère dans le solvant comme l'indique la figure II.3 (stade (3)). En pratique, un gonflement, même limité, peut provoquer des problèmes d'instabilité dimensionnelle et éventuellement, développer des contraintes internes.

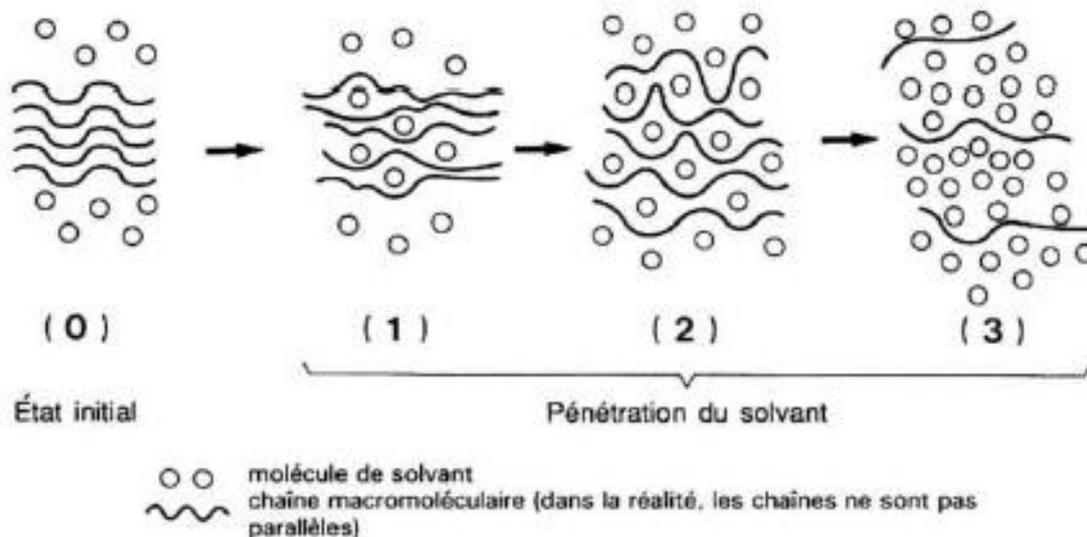


Figure II.3 : Schématisation de la pénétration d'un solvant dans un polymère [26].

I.1.4. Perte d'adjuvants

Les polymères contiennent souvent des substances organiques de faible masse moléculaire. Des substances peuvent, sous l'effet de la température, migrer plus ou moins lentement hors du matériau. La perte de plastifiants, par migration, peut concerner des quantités relativement importantes, donc affecter de façon non négligeable les propriétés (notamment mécaniques) du matériau. La vitesse de migration d'un plastifiant est en raison inverse de sa

tension de vapeur, qui est, elle-même, liée dans une certaine mesure à la masse moléculaire [23]. Dans le cas de stabilisants, c'est la stabilité chimique qui diminuera. Plusieurs mécanismes sont responsables de la migration des adjuvants, nous pouvons citer, à titre d'exemple, l'évaporation et l'extraction qui sont les plus réponsus [23, 26].

I.2. Vieillessement physique sans transfert de masse

Des chocs thermiques peuvent entraîner des ruptures mécaniques induites par dilatation différentielle (gradients de température dans l'épaisseur ou matériaux hétérogènes) ; un matériau peut se fissurer sous contrainte en présence d'un composé tensio-actif. Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement interne. Donc le processus physique lié au vieillissement vient du fait qu'il y a [3] :

- Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif ;
- Dilatation différentielle ;
- Evolution des matériaux sous l'effet de leur instabilité propre.

I.2.1. Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif

Les polymères sont le siège de fissurations dans les zones les plus contraintes selon la qualité des polymères. Ce phénomène est dû aux forces de tensions superficielles à l'interface polymère-liquide.

I.2.2. Dilatation différentielle

Lors de brusques variations de températures (chocs thermiques) dans un isolant organique, un gradient de température s'instaure dans l'épaisseur du matériau, d'où une dilatation différentielle apparaît.

I.2.3. Modification de la morphologie

Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la compacité du réseau macromoléculaire, c'est-à-dire par une réduction du volume libre (volume disponible pour le mouvement de segments de macromolécule). La masse volumique augmente, le coefficient de dilatation diminue et le facteur de pertes diélectriques diminue aussi [26].

II. Vieillessement hydrolytique des polymères

Il est généralement admis, que la dégradation des polymères est accélérée par la présence d'humidité [28]. Le vieillissement hydrique correspond à la modification de propriétés en présence d'humidité. Kamal et saxon [29] ont mené un travail qui a démontré que l'eau peut avoir trois types d'effets, le premier, qui nous intéresse beaucoup d'ailleurs, est un effet chimique qui consiste à l'hydrolyse du lien des esters et celui des amides. La présence d'eau dans les polymères se traduit par des modifications macroscopiques et une diminution des propriétés mécaniques

II.1. Humidité

a- Humidité relative

On appelle pression de vapeur saturante $P_s(T)$, la valeur maximale que peut atteindre la pression partielle P_v de la vapeur d'eau à la température T, une partie de cette vapeur se condense (apparition d'eau liquide). L'humidité relative s'exprime en pourcentage par la relation suivante :

$$HR(\%) = \frac{P_v}{P_s(T)} 100 \quad (\text{II.1})$$

L'humidité relative ne donne pas directement la quantité de vapeur d'eau dans l'air mais seulement un rapport entre l'état de l'air considéré et celui de l'air saturé à la même pression et température.

b- Rapport de mélange

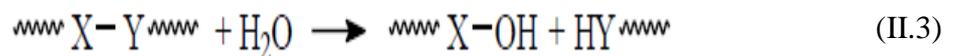
Il exprime le rapport des masses M_{eau} de vapeur d'air et $M_{eau\ sec}$ d'air sec à température constante. Cette grandeur noté r et exprimé en g/kg, est la référence en humidité. Elle exprime l'humidité absolue, on a :

$$r = \frac{M_{eau}}{M_{eau\ sec}} \quad (\text{II.2})$$

II.2. Réactions d'hydrolyse

Les systèmes d'isolations doivent résister aux conditions atmosphériques, notamment la température et l'humidité. Sous ces conditions, beaucoup de polymères se dégradent à cause de l'effet de l'hydrolyse [30]. Cette réaction conduit à la coupure de chaînes entre nœuds de réticulation et ainsi à la création de fragments de chaînes macromoléculaires se trouvant libres dans le réseau et pouvant diffuser vers le milieu extérieur.

Les polymères absorbent une quantité plus ou moins importante d'eau en fonction de leur structure et en particulier de la polarité de leur motif monomère. Dans certains cas, le polymère ne se contente pas de fixer les molécules d'eau, il réagit plus ou moins rapidement avec elles. La réaction d'hydrolyse peut être schématisée comme suit [31] :

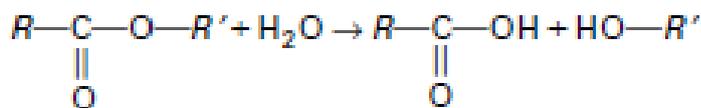


Roggendorf et Schnettler [32] ont réalisé un travail qui a démontré que la réaction d'hydrolyse est très accélérée par les hautes températures. Suivant l'équation d'Arrhénius, la constante de la réaction K augmente exponentiellement avec la température T [33] :

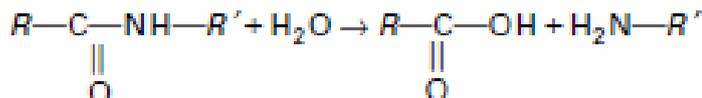
$$k = \alpha \cdot \exp \left(-\frac{E}{R \cdot T} \right) \quad (\text{II.4})$$

II.2.1. Mécanismes

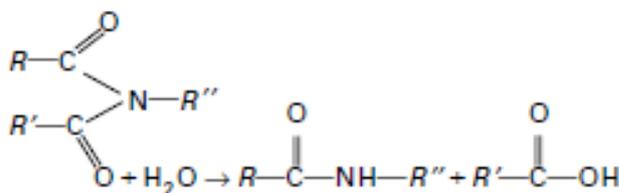
Il existe trois mécanismes qui font intervenir les groupes suivants [31] :

a- Groupe ester

Ce groupe peut se trouver dans les polyesters linéaires, les polyesters tridimensionnels, les polyuréthanes par des anhydrides.

b- Groupe amide

On le trouve dans les polyamides et les poly(amides-imides).

c- Groupe imide

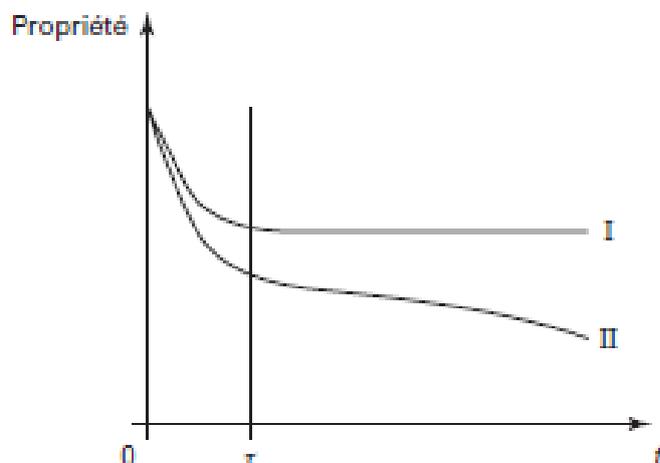
On le trouve dans les polyimides et les poly(amides-imides).

II.2.2. Caractéristiques

Les phénomènes d'hydrolyse ont un certain nombre de caractéristiques communes [31] :

- Ils sont généralement très lents à température ambiante, la vitesse de l'acte chimique élémentaire étant elle-même faible et le processus étant souvent contrôlé par la diffusion de l'eau dans le matériau. Dans ce cas, les effets de l'hydrolyse se manifestent à long terme (plusieurs mois voire plusieurs années).
- Les effets de l'hydrolyse se superposent aux effets physiques de l'absorption d'eau. Ces derniers effets seuls sont réversibles. En effet, dans le cas où le matériau n'est pas endommagé, on observe une stabilisation lorsque celui-ci est parvenu à saturation. Comme l'indique la figure II.4, lorsque $t < \tau$, (période initiale), les phénomènes physiques prédominent et lorsque $t > \tau$, le processus se stabilise. D'après la courbe (II) de la figure II.4, contrairement aux effets physiques, les effets de l'hydrolyse d'un polymère sont irréversibles et ils entraînent la disparition de la stabilisation ($t > \tau$).
- L'hydrolyse est une réaction activée par une élévation de la température, elle devient très rapide aux températures de mise en œuvre du polymère, d'où la nécessité d'une dessiccation des poudres et granulés avant la mise en œuvre.

- d) L'hydrolyse est une réaction susceptible d'être catalysée par des agents chimiques divers, tels que les ions H^+ , OH^- , métaux de transition,..., d'où l'importance du milieu réactionnel sur le vieillissement.



pour $t < \tau$ (période initiale) : prédominance des effets physiques (plastification)

pour $t > \tau$ (long terme) : stabilité ou prédominance des effets chimiques

courbe I : interactions physiques polymère-eau seulement

courbe II : interactions physiques + hydrolyse

Figure II.4 : Evolution d'une propriété (par exemple mécanique) d'un polymère hydrophile en fonction du temps d'exposition au milieu humide [31].

II.3. Méthodes de simulation d'un vieillissement hydrolytique

Plusieurs méthodes d'essais ont été proposées pour caractériser le vieillissement hydrolytique des polymères, celui-ci peut être physique par absorption d'eau ou bien par hydrolyse (rupture de chaînes). Parmi ces méthodes proposées, on peut citer :

- Essai en autoclave ;
- Essai en étuve ;
- Essai en immersion.

II.3.1. Essai en autoclave

Proposé par Vondracek [34], cette méthode consiste à utiliser des échantillons circulaires ayant 1,25 cm d'épaisseur et 5,7 cm de diamètre, sous les conditions suivantes :

- Température : $118^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$,
- Pression : $1,8 \pm 0,4$ bars,
- L'autoclave doit être purgé 30 minutes avant l'exposition du matériau au vieillissement.

Ces essais permettent l'obtention d'une dégradation intense en quelques jours. En effet, l'auteur a constaté une chute des résistances en traction très considérables avant que la dureté atteigne 75 % de sa valeur initiale.

II.3.2. Essai en immersion

La méthode d'immersion dans l'eau est normalisée par la norme française NF 51-166 [25]. Cette dernière exige que la composition de l'eau doit être contrôlée (eau déminéralisée) et la température recommandée est de $23^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ et 100°C . Cette méthode constitue un moyen relativement simple et rapide pour l'étude des dégradations hydrolytiques. Son principal inconvénient est qu'elle ne tient pas compte de l'effet de l'hygrométrie relative.

II.3.3. Essai en étuve

Cette méthode est utilisée pour caractériser une évolution à long terme, éventuellement plusieurs années de vieillissement naturel. Les résultats peuvent être exploités pour réaliser un modèle prévisionnel de durée de vie à 2 paramètres qui sont la température et l'humidité relative.

La norme française NFT 51 162 [35], préconise l'utilisation des conditions suivantes :

- Hygrométrie relative : $93\% \pm 2-3\%$ HR ;
- Température : 40°C , 55°C et 70°C , régulée à $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

III. Vieillessement thermique des polymères

Le vieillissement thermique des polymères est essentiellement causé par l'accélération des réactions chimiques provoquée par l'élévation de la température [36]. La durée de vie (t) est donnée par l'équation d'Arrhenius [37] :

$$t = A \exp(E/T) \quad (\text{II.5})$$

avec :

A : constante ;

E : énergie d'activation de la réaction (kcal/mole) ;

T : température absolue (K).

III.1. Endurance thermique

L'effet de la température sur les isolants solides a été examinée 1930, puisque Montsinger 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 d'un transformateur [38]. En 1948, T.W. Dakin formule une expression de la durée de vie des isolants soumis à la contrainte thermique qui est fondée sur la cinétique des réactions chimiques représentant les phénomènes élémentaires prédominants de la dégradation.

III.1.1. Principe

La caractérisation du vieillissement ou de la stabilité à long terme doit permettre de répondre à l'une des questions simples suivantes :

- Pendant quel temps t peut-on maintenir un matériau (ou une isolation) sous la contrainte C_0 ?
- Si l'on désire une durée de maintien ou de vie donnée t_0 . Quelle contrainte maximale C sera autorisée ?

Pour y répondre, il suffit de connaître la relation contrainte temps $C = f(t)$ (figure II.5).

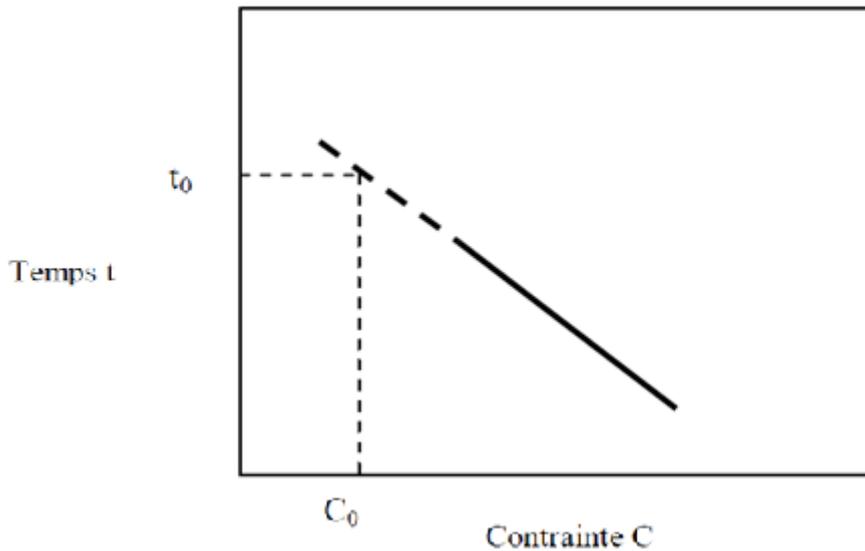


Figure II.5 : Variation de la contrainte en fonction du temps de vieillissement [38].

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.6 représente les variations de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la contrainte C .

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 bien mécanique comme l'allongement à la rupture, ... etc.

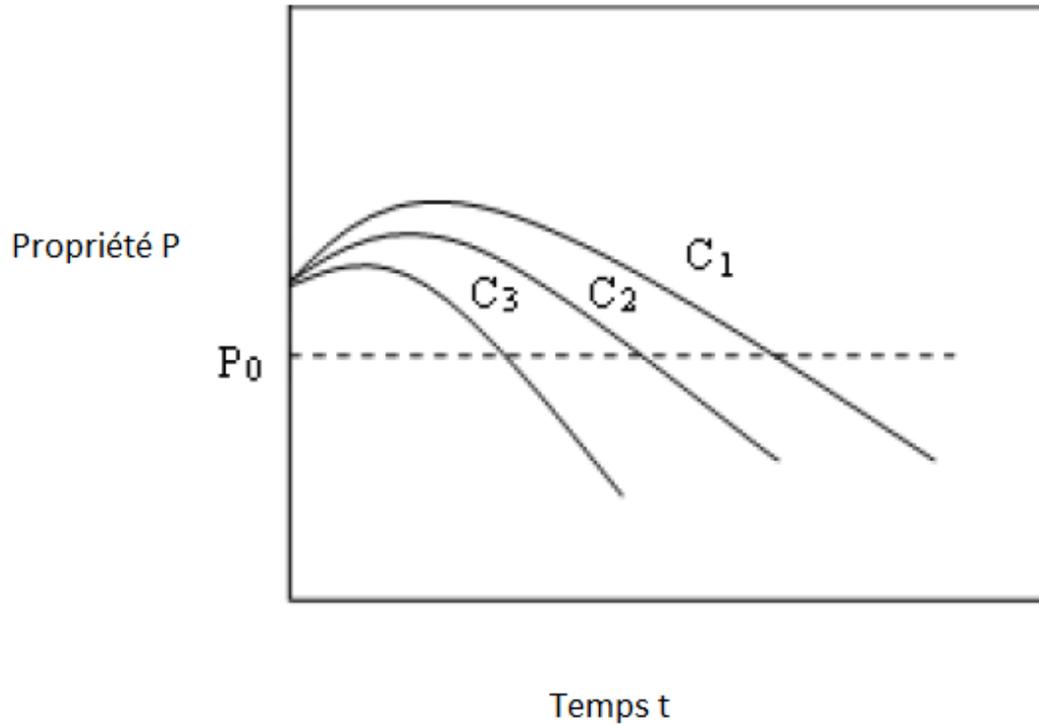


Figure II.6 : Variation de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la contrainte C [38].

III.1.2. 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 $P=f(t)$ [39]. La figure II.7 représente les variations de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la température [38].

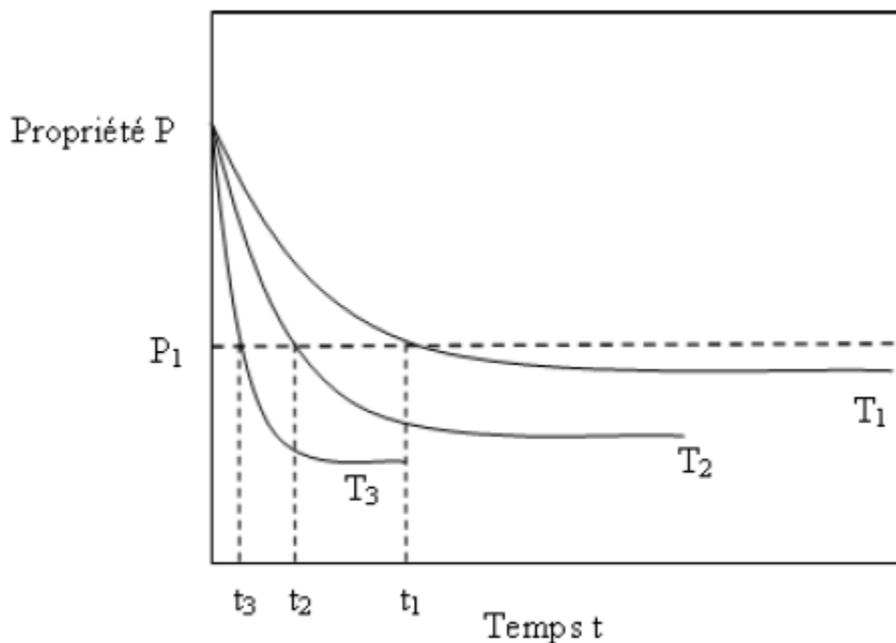


Figure II.7 : Variations de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes valeurs de la température [38].

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 sur la figure II.8 [38, 39].

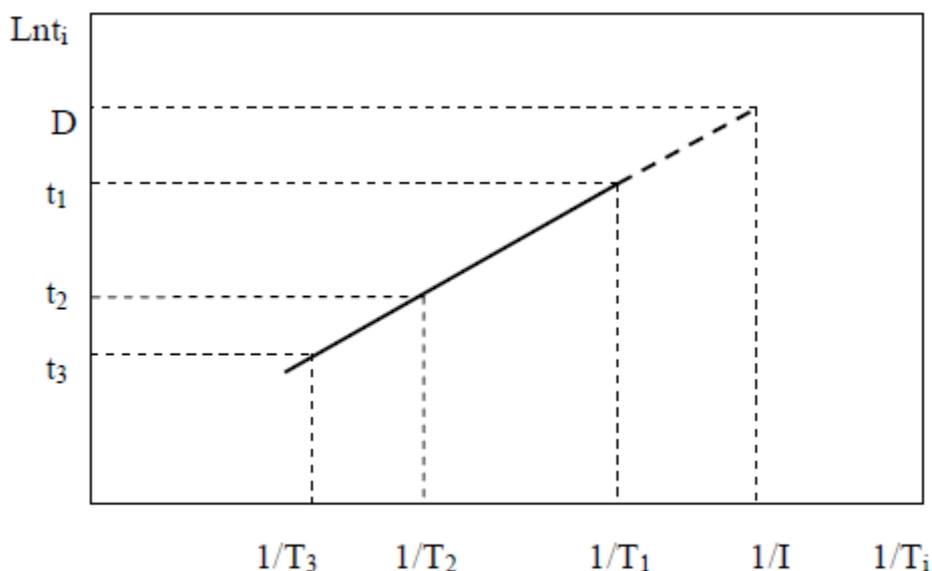


Figure II.8 : Variations du logarithme de la durée de vie des polymères en fonction de l'inverse de la température absolue [38, 39].

Par extrapolation, on déduit de cette courbe, la température T correspondant à une durée de vie conventionnelle servant de référence D . Cette température sert à calculer l'indice de

température (IT) du matériau considéré. L'indice de température (IT) est, par définition, le nombre égal à la température en degré Celsius qui correspond sur le graphique de l'endurance thermique à un temps normalement égal à 20000 heures.

III.1.3. Choix des températures de vieillissement

La norme CEI 216-1 [40] décrit les conditions générales dans lesquelles sont effectués les essais d'endurance thermique des matériaux isolants. On retiendra pour le choix des températures de vieillissement, qu'elles sont au nombre de trois au minimum, différant chacune de la plus voisine de 20 °C et tel que le critère de dégradation soit atteint [38] :

- 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.

IV. Vieillissement hydrothermique des polymères

D'après ce qu'on a vu précédemment dans ce chapitre, il en découle que la température et l'eau (humidité), sont deux facteurs environnementaux très influents sur la dégradation des isolations des matériels électriques. Le vieillissement des polymères causé par la combinaison de ces facteurs est nommé vieillissement hydrothermique. Pour les polymères et composites, la présence d'eau est considérée comme étant un facteur principal de vieillissement et plus particulièrement pour les matrices hydrolysables de type ester ou amide.

Douar et al [41], ont mené une étude qui a démontré que lors du vieillissement hydrothermique, l'absorption de l'humidité, est la principale raison de la chute de la tension de claquage du polyamide. Dans d'autres travaux scientifiques [42], un vieillissement hydrothermique (RH = 80% et T = 80°C) a été mené sur une résine époxyde à base de bisphénol A (DGEBA) initialement chargée (60% en poids de la résine) avec des micro-particules de silice (200 µm) traitée au vinyl-silane. Les résultats obtenus sur la tension de claquage ont montré que celle-ci était réduite par un facteur de 10 après 74 jours de vieillissement hydrothermique.

Des travaux de recherche ont montré que la dégradation de polymères soumis à un vieillissement hydrothermique conduit à :

- Des modifications physiques différentes : le vieillissement provoque une augmentation de la masse des éprouvettes, un changement de couleur et une variation de la structure.
- Des modifications dans les propriétés mécaniques : diminution de l'allongement à la rupture initiale et croissance de la résistance à la traction.
- Une augmentation des pertes diélectriques.

Chapitre 3 : Modèle statistique de Weibull

La fiabilité est l'une des plus importantes caractéristiques déterminant la qualité de produits. Dans le but d'augmenter la compétitivité des produits sur le marché, il est nécessaire de connaître les performances au préalable pour estimer et améliorer la fiabilité [45].

La rupture d'un matériau, même s'il est macroscopiquement homogène, se produit rarement à une même valeur de contrainte ou de déformation. On observe toujours une dispersion autour d'une valeur moyenne. Cette dispersion qui a un caractère aléatoire est plus importante au niveau des matériaux hétérogènes. Elle est fonction du degré d'hétérogénéité de la microstructure (ou des défauts), de l'échelle d'observation ainsi que du mode de sollicitation.

Plusieurs modèles sont développés pour prédire la probabilité de rupture des structures en service. Certains d'entre eux prennent en compte l'état local du matériau (contrainte critique, facteur d'intensité des contraintes, ou bien l'énergie de rupture local). Ils constituent les critères de rupture locale. D'autres modèles sont, par ailleurs, basés sur une approche globale de la rupture et considèrent la structure à l'échelle macroscopique (maillon le plus faible, seuil d'endommagement, critère de fissure de Griffith). Ce sont des modèles phénoménologiques [46].

Dans notre étude, seule l'approche globale de la rupture est présentée. Cette rupture est modélisée par le modèle de Weibull, qui constitue d'ailleurs l'approche mathématique la plus adaptée pour prédire la durée de vie des matériaux isolants solides

I. Utilisation de la loi de Weibull pour modéliser les données de fiabilité

La loi de Weibull est la loi la plus couramment utilisée pour modéliser les données de fiabilité. Cette loi permet d'évaluer la fiabilité d'un produit dans diverses applications. Elle peut également modéliser une fonction de risque décroissante, croissante ou constante, ce qui permet ainsi de décrire toutes les phases de la durée de vie d'un produit.

La distribution de Weibull a été utilisée dans les ingénieries de la haute tension depuis plusieurs années, dans le but d'évaluer les résultats des études expérimentales où le temps de claquage ou la tension de claquage sont estimés [47-51].

II. Modèle statistique de Weibull

II.1. Base du modèle

Le modèle de Weibull permet d'estimer la probabilité de rupture à partir des statistiques des résultats d'essai [53]. 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 [54]. La rupture d'une chaîne se produit au niveau de son maillon le plus faible quelles que soient les qualités des autres maillons. Ainsi la probabilité de rupture P_n d'une chaîne de n maillons s'exprime en fonction de la probabilité de rupture P d'un seul de ces maillons de la façon suivante :

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

II.2. Loi de Weibull

La distribution de Weibull peut s'écrire dans sa forme générale [55] :

$$P(X) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{X - X_s}{X_0}\right)^\alpha\right] & X_s < X < +\infty \\ 0 & X < X_s \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

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 [56] :

II.2.1. Modèle de Weibull à deux paramètres

C'est le cas où $X_s = 0$, le modèle de Weibull est dit à deux paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit comme suit [57] :

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

ou sous sa forme linéaire suivante :

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

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

II.2.2. Modèle de Weibull à trois paramètres

C'est le cas où $X_s \neq 0$. Introduire un paramètre de localisation consiste tout simplement à traduire les courbes de probabilité cumulée selon l'axe des abscisses. Le modèle de Weibull devient [58] :

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

ou sous sa forme linéaire suivante :

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

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 une droite de pente α .

III. Signification des paramètres de Weibull

III.1. Paramètre de forme α

C'est un nombre sans dimension. Il définit l'allure des courbes de distribution de Weibull [59]. Il est par conséquent, l'image de la dispersion de la variable aléatoire. Plus α est grand, moins les valeurs sont dispersées. D'après Oudin et al, on a [60] :

- Si $\alpha < 1$: la probabilité de claquage décroît avec le temps d'application de la tension, ce qui correspond à une « mortalité infantile » des échantillons qu'on appelle « défauts de jeunesse » [61].
- Si $\alpha = 0$: la probabilité de claquage est indépendante du temps d'application de la tension. La loi de Weibull correspond à la loi de Poisson (loi exponentielle) [59].
- Si $\alpha > 1$: la probabilité de claquage augmente avec le temps, ce qui correspond à un vieillissement normal, c'est-à-dire à une fatigue initialement nulle qui s'accroît avec le temps [61].

Pour les essais en rampe de tension sous vitesse de montée constante, on a : $4 < \alpha < 9$ dans le cas du polyester-imide [62].

III.2. Paramètre de localisation X_s

La variable X_s apparaît comme un seuil en dessous duquel le vieillissement se trouve considérablement ralenti, la durée de vie du matériau tend vers l'infini. La valeur du seuil est forcément inférieure à la plus faible valeur trouvée expérimentalement $P(X < X_s) = 0$ [63]. Le paramètre de localisation X_s correspond à une simple translation des courbes de probabilité cumulée selon l'axe des abscisses.

III.3. Paramètre d'échelle X_0

Il est destiné à définir une valeur centrale caractéristique de la population étudiée. Ce paramètre correspond à une densité de probabilité maximale. Prenons l'expression (III.4) :

$$\text{LogLn} \frac{1}{1 - P(X)} = \alpha \text{Log} X - \alpha \text{Log} X_0 \quad (\text{III.7})$$

Pour $X = X_0$, on a :

$$\text{LogLn} \frac{1}{1 - P(X)} = 0 \quad (\text{III.8})$$

D'où : $P = 1 - \frac{1}{e} = 0,632$, ce qui signifie : $P = 63,2\%$.

Dans la pratique, on distingue :

- Pour des essais sous champ constant (à long terme), $X_0 = t_0$ est la valeur nominale du temps de rupture ;
- Pour des essais sous rampe de tension (à court terme), $X_0 = G_0$ est la valeur nominale du champ de rupture.

Dans les deux cas t_0 et G_0 sont caractérisés par une probabilité de rupture de 63,2% correspondant à une densité maximale.

IV. Application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides

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

- On considère que le phénomène de claquage est caractérisé par une variable aléatoire à deux dimensions : le temps t au bout duquel se produit la rupture de l'isolant et le gradient du potentiel G qui a provoqué cette rupture ;
- Le claquage est localisé dans un petit volume du diélectrique. La rupture d'un élément microscopique provoque la rupture du système isolant sur toute son épaisseur.

Une base de la théorie statistique de la rupture diélectrique a été présentée par L.A Dissado [64].

IV.1. Tenue diélectrique à long terme

Dans le cas du vieillissement électrique à long terme, le matériau est soumis à un champ électrique G constant. Le temps de rupture t est une variable aléatoire. La probabilité de claquage sous champ constant s'écrit [60] :

$$P(G, t) = 1 - \exp(-C t^a G^b) \quad (\text{III.9})$$

avec :

- C : constante dépendant de la géométrie de l'échantillon ;
- G : champ électrique appliqué ;
- a : paramètre de dispersion en temps ;
- b : paramètre de dispersion en champs ;
- t : temps au bout duquel se produit le claquage.

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

IV.2. Tenue diélectrique à court terme

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

$$G = V \cdot t \quad (\text{III.10})$$

avec :

- G : champ électrique de rupture appliqué ;
- V : vitesse de montée de la rampe du champ électrique ;
- t : temps de montée de la rampe du champ électrique.

En remplaçant t par sa valeur dans l'expression (III.12), on obtient l'expression de la probabilité de claquage suivante :

$$P(G) = 1 - \exp \left[- C \left[\frac{G^{a+b}}{V^a} \right] \right] \quad (\text{III.11})$$

Le modèle statistique de weibull est utilisé pour l'évaluation de la tenue diélectrique des isolants solides sous rampe de tension à vitesse de montée constante [56, 62, 65, 66].

Chapitre 4 : Résultats et discussion

Le but de ce chapitre est d'étudier l'influence du vieillissement hydrothermique sur les propriétés électriques (rigidité diélectrique, facteur de pertes diélectriques, permittivité et résistivité transversale) et mécaniques (allongement à la rupture et résistance à la traction) du papier presspahn imprégné d'huile. Dans le cas de la rigidité diélectrique, une analyse statistique des valeurs obtenues a été faite en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres qui est décrit dans le chapitre III. Les essais de rupture diélectrique et mécaniques ont été réalisés à l'ENEL d'Azazga, tandis que les tests de mesure du facteur de dissipation, de la permittivité et de la résistance d'isolement ont été effectués à l'entreprise CABEL d'Alger sise à Gué de Constantine.

I. Techniques expérimentales

I.1. Vieillissement

A partir de feuilles de papier de presspahn de 2 m x 1,2 m et 1 mm d'épaisseur, des plaques de 20 cm x 20 cm ont été découpées et séchées dans une étuve chauffée à la température de 100°C. Ces plaques ont été, d'abord, imprégnées avec une huile isolante « BORAK » à la température de 100°C. Ensuite, elles ont été soumises à un vieillissement hydrothermique à la température de 100°C. Ces plaques ont été immergées dans un récipient contenant de l'eau. L'ensemble a été introduit dans une étuve à air ventilée réglée à une température de 100°C (Figure IV.1). L'eau a été renouvelée toutes les 24 h. Le temps de vieillissement a atteint 3000 h.



Figure IV.1 : Etuve de vieillissement.

I.2. Echantillons

Des plaques du polymère ont été prélevées tous les 500 h et séchées dans une étuve à air ventilée réglée à 100°C afin d'éliminer l'eau restante. Ces plaques ont été découpées en :

- Eprouvettes de forme carrée de 5,5 cm de côté pour les essais de rupture diélectrique (Figure IV.2),
- Eprouvettes circulaires de 8 cm de diamètre pour la mesure du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité et de la résistivité transversale (Figure IV.3)
- Eprouvettes en forme d'haltère de longueur 11.5 cm pour les mesures de l'allongement à la rupture et de la résistance à la traction (Figure IV.4)

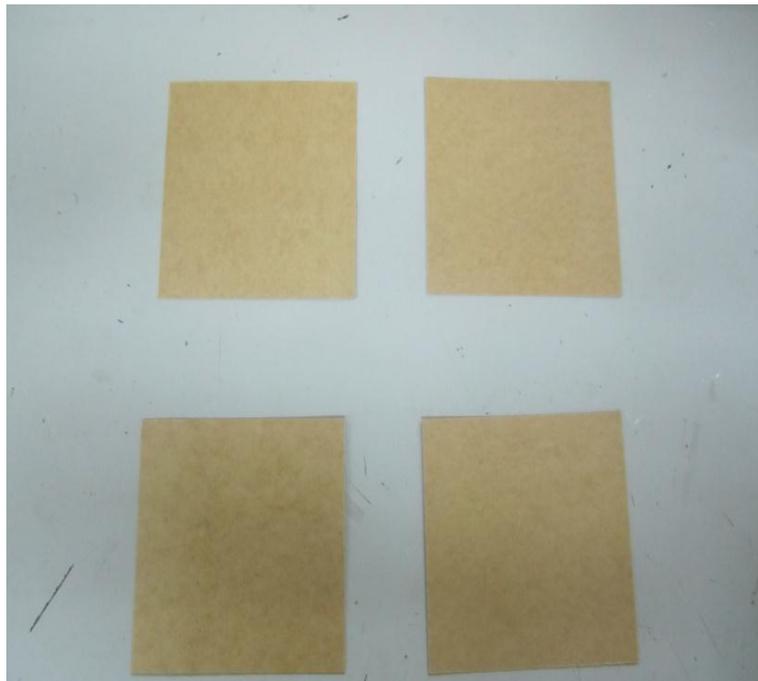


Figure IV.2 : Eprouvettes de forme carrée utilisées pour les essais de claquage.

Comme nous l'avons cité auparavant, la rupture qu'elle soit mécanique ou diélectrique est un phénomène aléatoire. Par conséquent, pour chaque point de mesure (prélèvement), le nombre d'échantillons soumis aux essais de claquage et ceux de traction est de 50.



Figure IV.3 : Eprouvette de forme circulaire pour les tests de mesure du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité et de la résistance 'isolement.



Figure IV.4 : Eprouvette sous forme d'haltère utilisée pour les essais de traction.

I.3. Conditionnement des éprouvettes

Avant les tests de mesure, les éprouvettes ont été conditionnées dans un dessiccateur pendant au moins 24 h afin d'éliminer toute présence d'humidité. La figure IV.5 montre des échantillons en cours de conditionnement.



Figure IV.5 : Conditionnement des échantillons.

I.4. Essais de claquage

L'échantillon est placé entre deux électrodes planes fixées dans une cellule en verre remplie d'huile isolante. Cette huile permet d'éviter les contournements. Après plusieurs claquages, l'huile a été remplacée.

L'essai consiste à soumettre l'échantillon considéré à une rampe de tension de vitesse 1 kV/s jusqu'au claquage. Après rupture, l'épaisseur de l'éprouvette a été mesurée au point de perforation. La tension a été délivrée par un générateur de haute tension présenté à la figure IV.6. Les expériences ont été effectuées à la température ambiante.



Figure IV.6 : Générateur de haute tension

I.5. Mesure du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité et de la résistivité transversale

Les expériences consistent à mesurer le facteur de pertes diélectriques, la permittivité et la résistivité transversale du papier presspahn en fonction de la température avant et après vieillissement. La température a été varié de l'ambiante à 160°C. Le facteur de dissipation et la constante diélectrique ont été mesurés avec un pont de Schering (Figure IV.7) sous une tension de 2 kV, alternative de fréquence 50 Hz. Cet appareil est équipé de résistances chauffantes permettant d'augmenter la température. La résistance d'isolement a été mesurée à l'aide d'un mégohmmètre sous une tension continue de 220 V. Ce mégohmmètre est incorporé à l'intérieur du pont de Schering.



Figure IV.7 : Pont de Schering.

I.6. Mesure des propriétés mécaniques

Les essais de traction ont été réalisés, à la température ambiante, avec un dynamomètre à une vitesse de 15 mm/min. L'allongement à la rupture et la force de traction ont été mesurés. La résistance à la traction a été calculée comme le rapport de la force et de la section de l'éprouvette de la partie soumise à la sollicitation. La figure IV.8 montre le dynamomètre utilisé pour nos tests de traction.



Figure IV.8 : Machine de traction.

II. Analyse statistique

La probabilité de rupture pour une distribution de Weibull est donnée par la relation suivante [67] :

$$P(x) = 1 - \exp \left[\frac{-x}{x_o} \right]^\alpha \quad (\text{IV.1})$$

avec:

$P(x)$: probabilité de défaillance

x : variable aléatoire qui représente, dans notre cas, la rigidité diélectrique .

x_o : paramètre d'échelle, pour $x = x_o$ on a : $P = 63,2\%$.

α : paramètre de forme

Le tracé des valeurs expérimentales doit être une droite dans le système de coordonnées :

$$X = \log x \quad (\text{IV.2})$$

$$Y = \log \left(\ln \frac{1}{1-P} \right) \quad (\text{IV.3})$$

La probabilité est calculée à partir de la relation suivante [68]:

$$P(i) = \frac{i}{N+1} 100\% \quad (\text{IV.4})$$

avec:

N : nombre d'échantillons testés,

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

III. Résultats et discussion

III.1. Variation des propriétés électriques en fonction du temps de vieillissement

III.1.1. Rigidité diélectrique

III.1.1.1. Diagrammes de Weibull à 2 paramètres

Les figures IV.9 - IV.15 représentent les diagrammes de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique. Le lissage des points expérimentaux est effectué en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Comme on peut le constater, dans la plupart des cas, les distributions des points expérimentaux sont plus dispersées pour les points à faible probabilité.

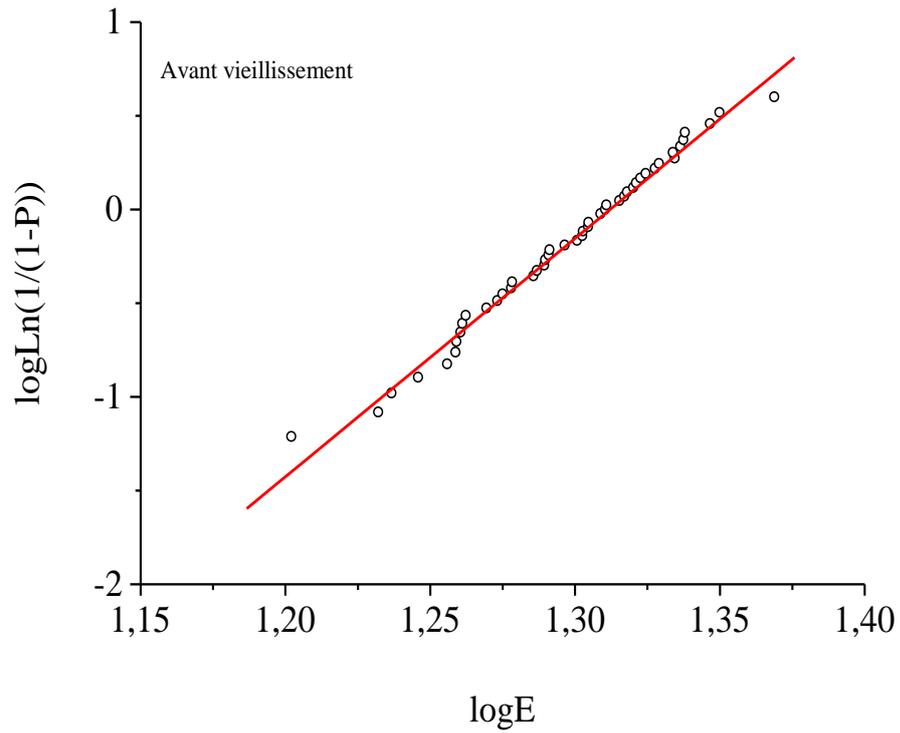


Figure IV.9 : Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique avant vieillissement.

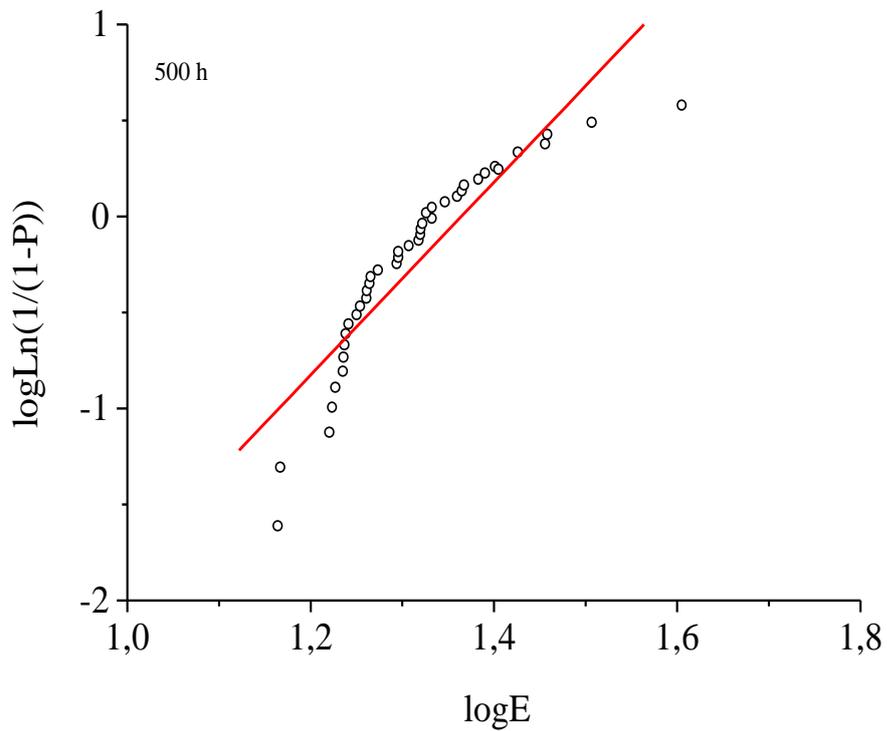


Figure IV.10 : Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique après un vieillissement de 500 h.

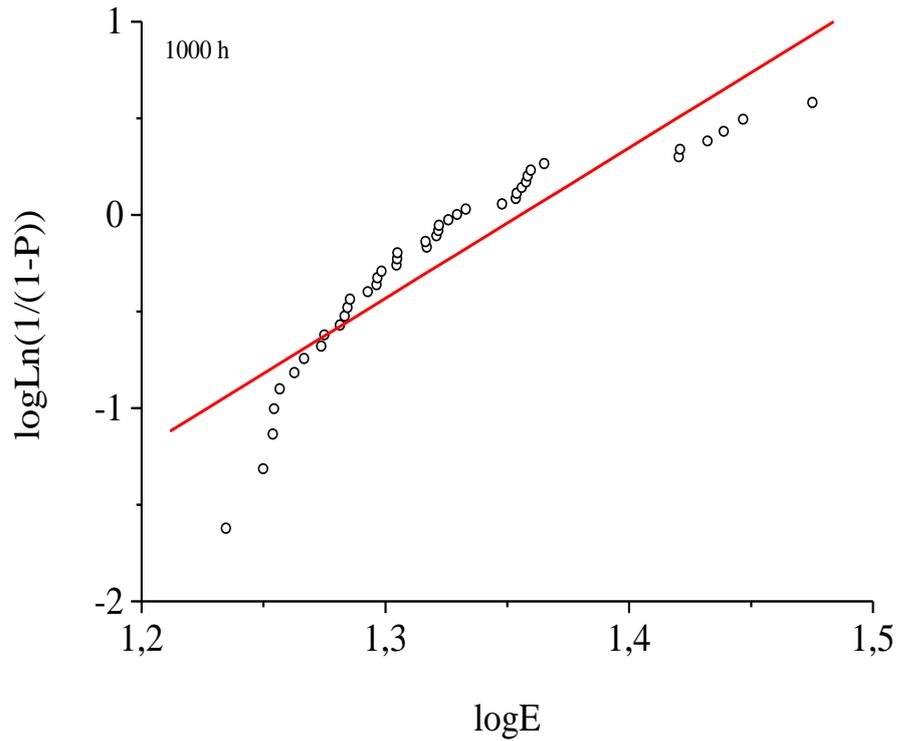


Figure IV.11 : Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique après un vieillissement de 1000 h.

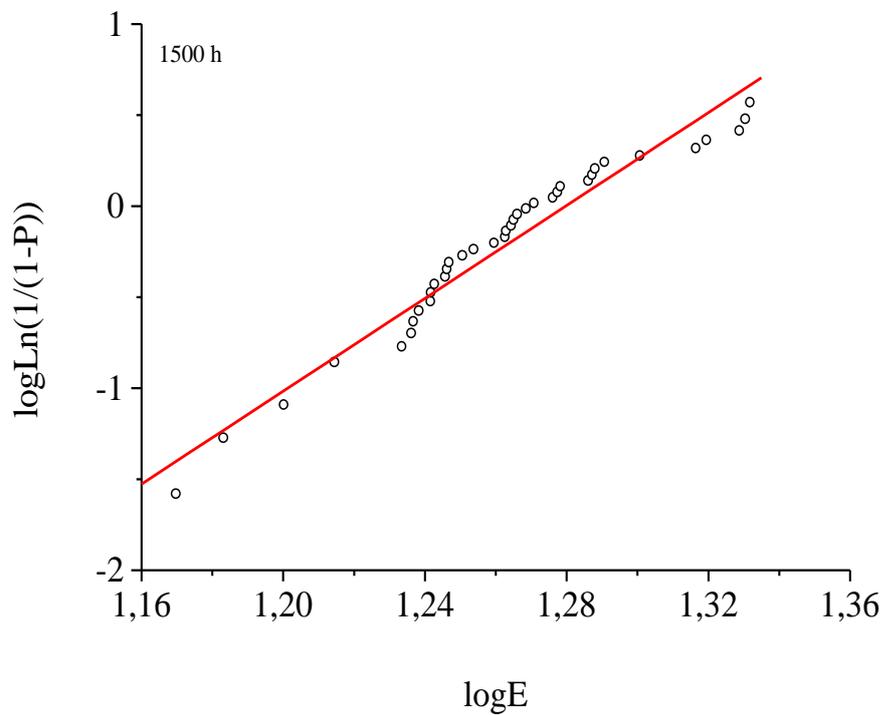


Figure IV.12 : Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique après un vieillissement de 1500 h.

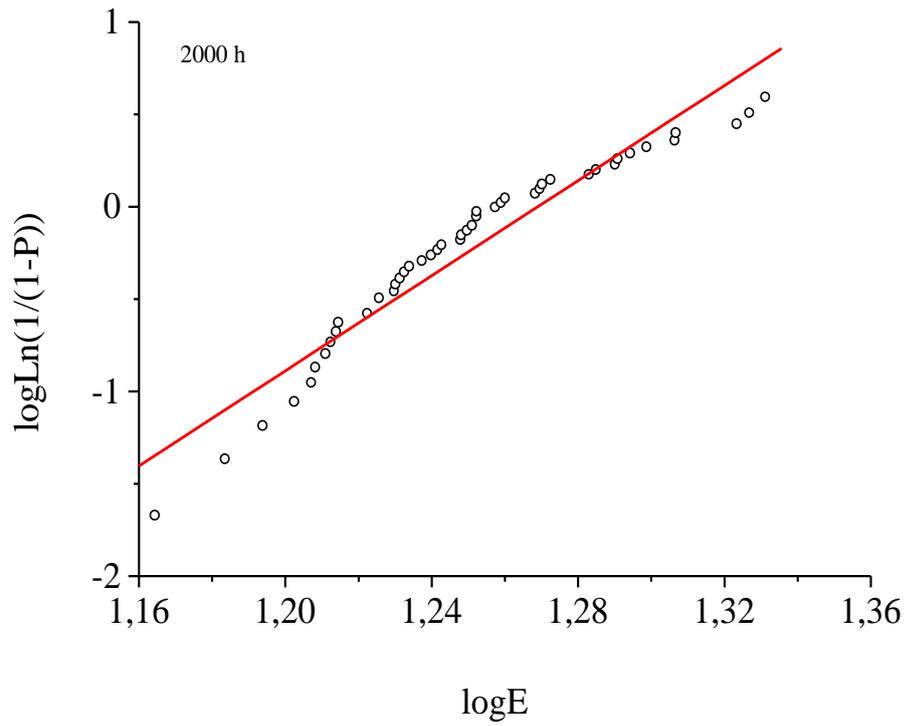


Figure IV.13 : Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique après un vieillissement de 2000 h.

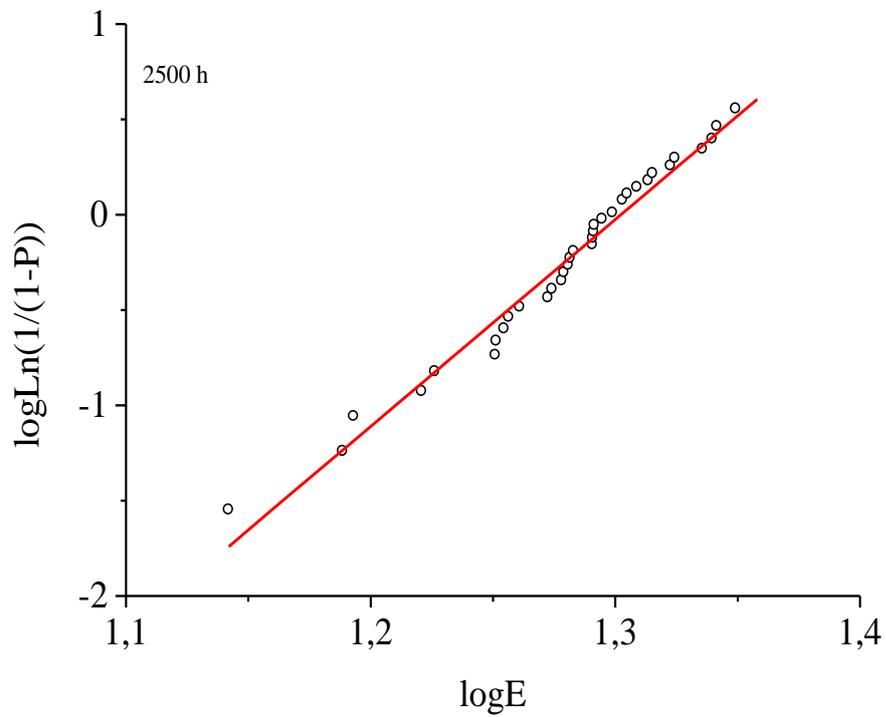


Figure IV.14 : Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique après un vieillissement de 2500 h.

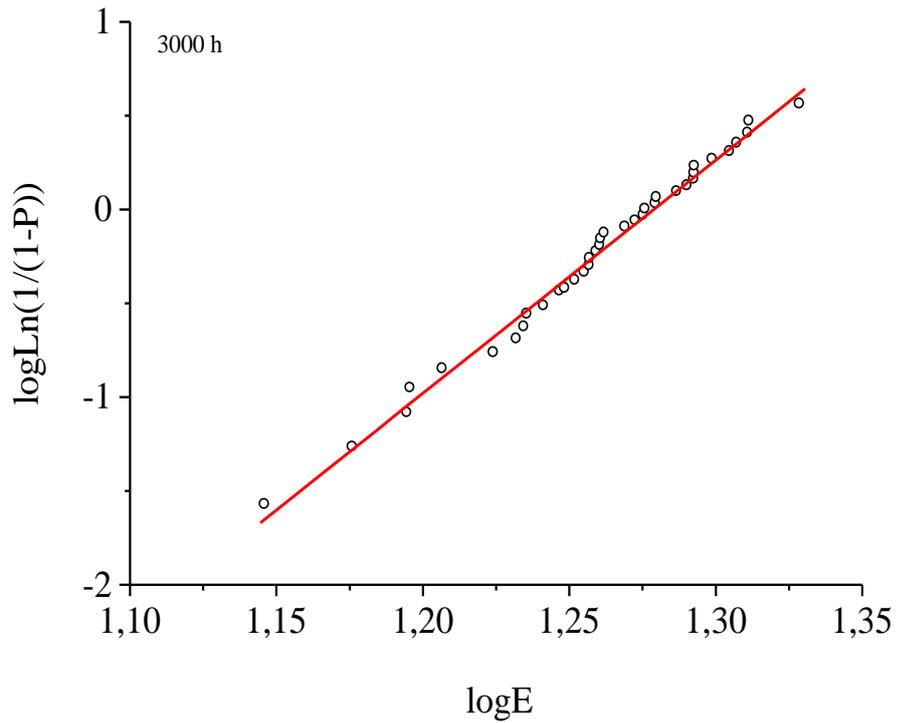


Figure IV.15 : Diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique après un vieillissement de 3000 h.

III.1.1.2. Evolution de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement

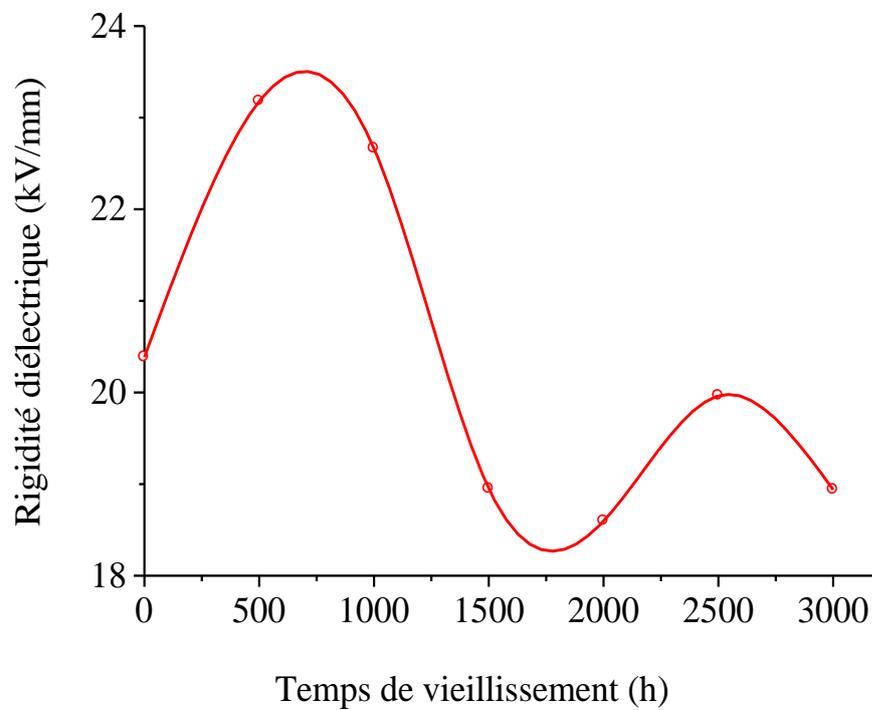


Figure IV.16 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement.

En exploitant les diagrammes de Weibull précédents, nous avons déterminé les valeurs nominales de la rigidité diélectrique ($\log\text{Ln}(1/(1-P)) = 0$). La figure IV.16 représente la variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps du vieillissement. Au début du vieillissement, la rigidité diélectrique augmente de 20,39 kV/mm et atteint un maximum de 23,47 kV/mm après 690 h puis diminue rapidement jusqu'à un minimum de 18,26 kV/mm à 1790 h. Au-delà de ce temps, la rigidité diélectrique croît de nouveau à 19,95 kV/mm puis diminue à 18,94 kV/mm correspondant à un temps de vieillissement de 3000 h.

III.1.1.3. Facteur de pertes diélectriques

La figure IV.17 montre la variation du facteur de pertes diélectriques ($\text{tg}\delta$) en fonction du temps de vieillissement à la température de 100°C. Au début du vieillissement, le facteur de pertes augmente de 4,1 à 6,0 correspondant à un temps de 1000 h. Au-delà de ce temps, $\text{tg}\delta$ diminue rapidement jusqu'à 1,25 pour un temps de 3000 h.

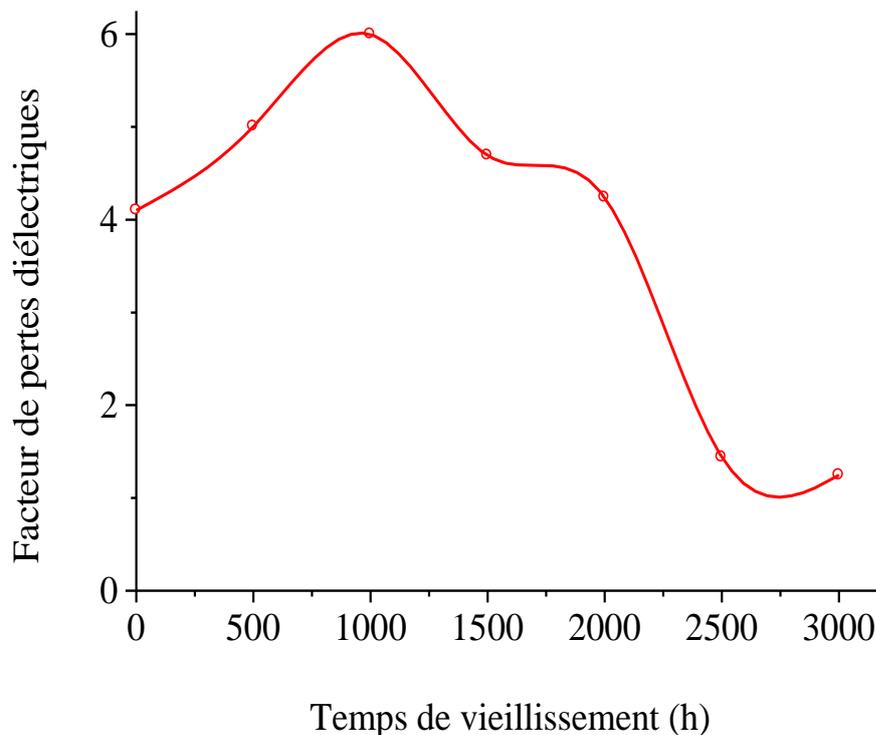


Figure IV.17 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction du temps de vieillissement.

III.1.1.4. Permittivité

La figure IV.18 présente l'évolution de la permittivité relative du matériau (ϵ_r) en fonction du temps de vieillissement à la température de 100°C. Durant la période allant jusqu'à 1000 h, ϵ_r diminue de 13,36 jusqu'à 10,13. Ensuite, la permittivité augmente à 10,91 pour un temps de 1760 h. Ensuite, ϵ_r diminue rapidement jusqu'à 6,78 pour un temps de vieillissement de 3000 h.

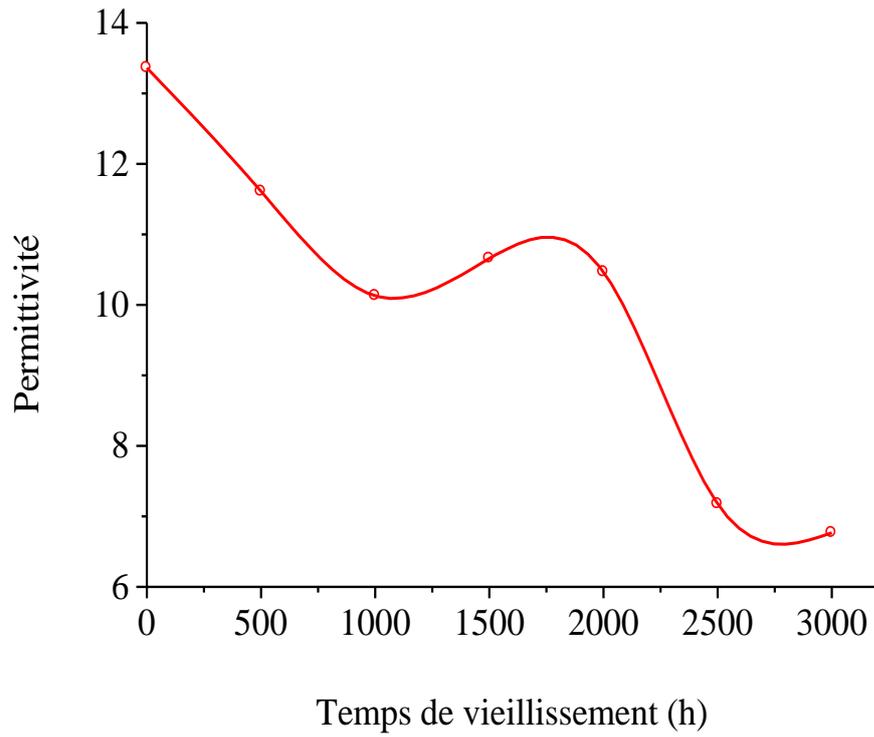


Figure IV.18 : Variation de la permittivité en fonction du temps de vieillissement.

III.1.1.5. Résistivité transversale

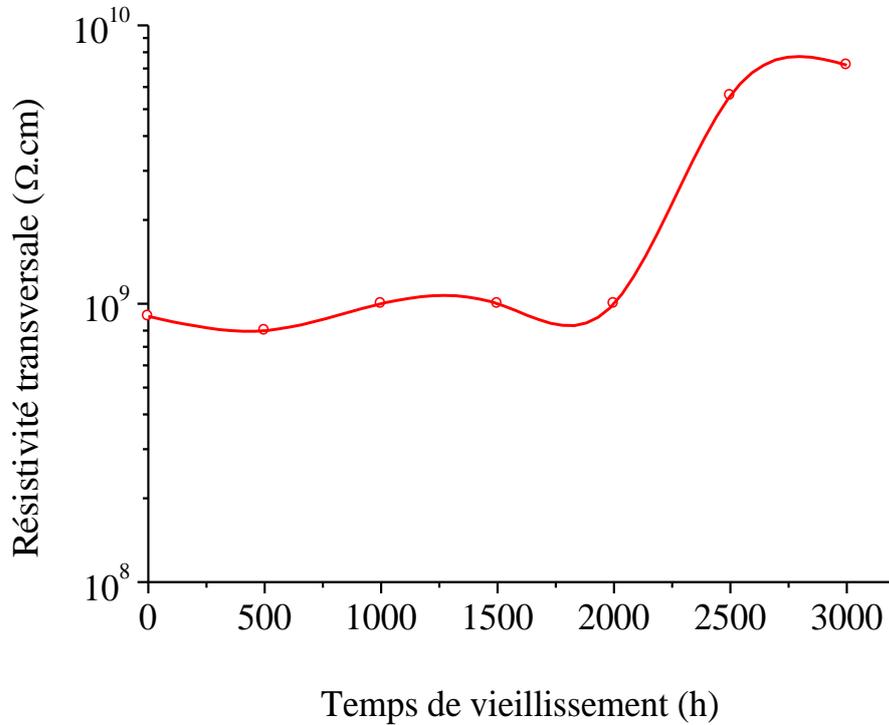


Figure IV. 19 : Variation de la résistivité transversale en fonction du temps de vieillissement.

La variation de la résistivité transversale en fonction du temps de vieillissement à 100°C est exposée à la figure IV.19. Pendant une période allant jusqu'à 2000 h, la résistivité transversale est pratiquement constante, sa valeur se stabilise aux environs de $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$. Puis, elle augmente et atteint un maximum de $7,2 \cdot 10^9$ pour un temps de 3000 h.

III.2. Variation des propriétés mécaniques en fonction du temps de vieillissement

III.2.1. Allongement à la rupture

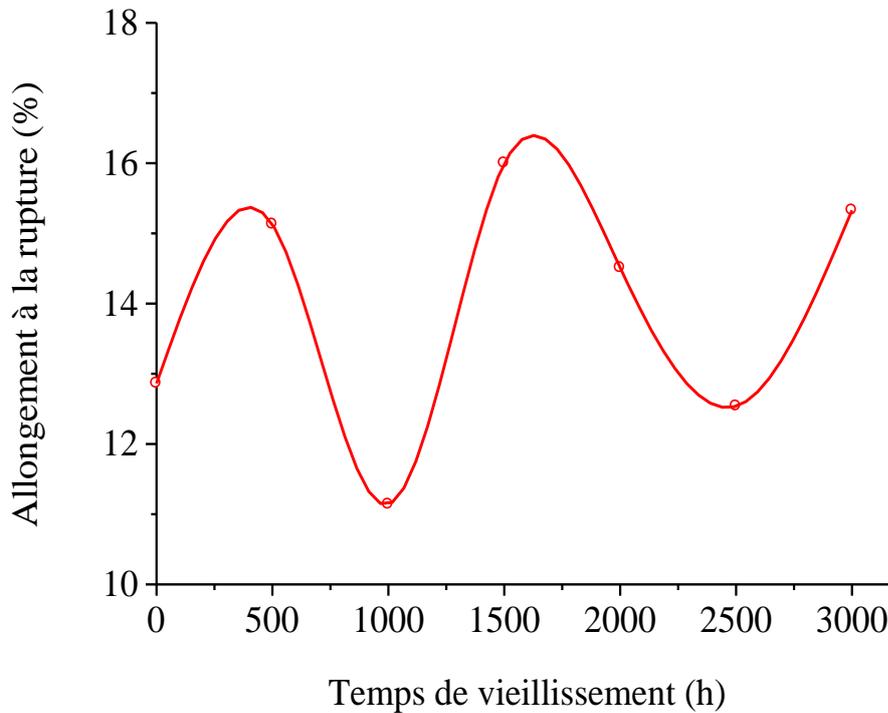


Figure IV.20 : Variation de l'allongement à la rupture en fonction du temps de vieillissement.

La variation de l'allongement à la rupture en fonction du temps de vieillissement est exposée à la figure IV.20. Comme on peut le constater, la caractéristique présente deux pics de valeurs 15,3% et 16,35 % après respectivement 400 h et 1615 h. Après le deuxième pic, l'allongement à la rupture augmente de 12,52 % à 15,32% après 3000 h de vieillissement.

III.2.2. Résistance à la traction

La figure IV.21 montre l'évolution de la résistance à la traction en fonction du temps de vieillissement. Pendant les 1000 h premières de vieillissement, la résistance à la traction diminue rapidement de $69,28 \text{ N/mm}^2$ à $43,88 \text{ N/mm}^2$. Ensuite, elle augmente jusqu'à $50,89 \text{ N/mm}^2$ puis diminue de nouveau à $43,77 \text{ N/mm}^2$ correspondant à 2488 h. Au-delà de ce temps, la résistance à la traction augmente à $50,64 \text{ N/mm}^2$ après un vieillissement de 3000 h.

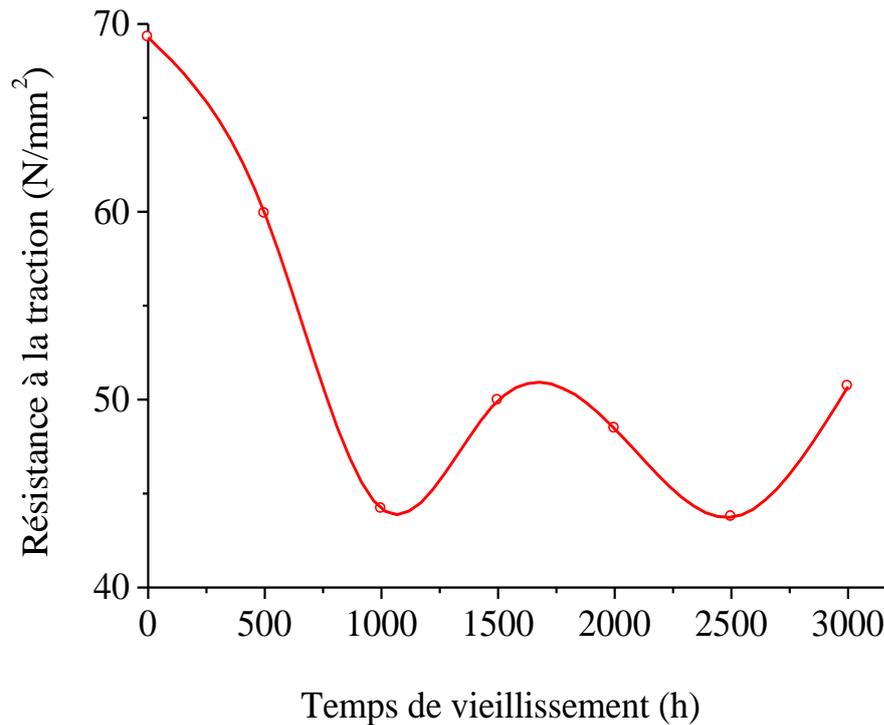


Figure IV.21 : Variation de la résistance à la traction en fonction du temps de vieillissement.

III.3. Variation du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité et de la résistivité transversale en fonction de la température avant le vieillissement

III.3.1. Facteur de pertes diélectriques

La figure IV.22 présente la variation du facteur de pertes diélectriques ($\text{tg}\alpha$) en fonction de la température. Avant vieillissement, $\text{tg}\alpha$ augmente de 0,16 et atteint un maximum très accentué de 5,36 à 120°C puis diminue rapidement à 2,32 correspondant à une température de 160°C. Après 3000 h de vieillissement, $\text{tg}\alpha$ augmente de 0,054 jusqu'à un maximum de 1,58 à 120°C ensuite diminue à 0,596 pour une température de 160°C.

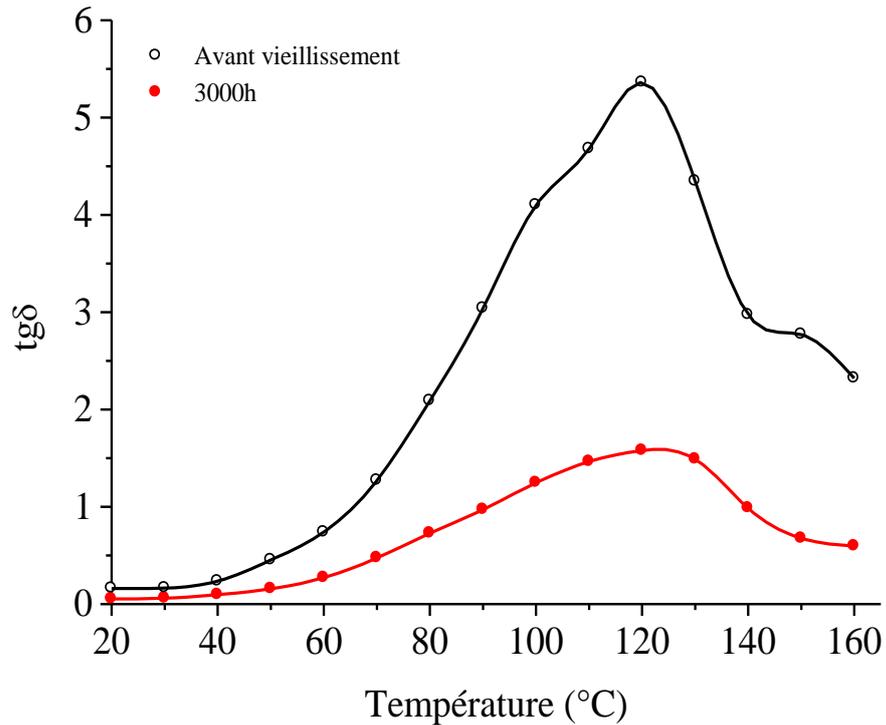


Figure IV.22 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température avant et après vieillissement.

III.3.2. Permittivité

La figure IV.23 montre l'évolution de la permittivité (ϵ_r) en fonction de la température. Nous remarquons que cette caractéristique a la même allure que celle du facteur de pertes diélectriques. Avant vieillissement, la permittivité augmente rapidement de 4,1 à 15,5 correspondant à une température de 120°C, puis décroît à 9,82 à 160°C. Le maximum est très net. Après un vieillissement de 3000 h, ϵ_r augmente de 2,86 à 7,72 pour une température de 120°C puis diminue jusqu'à 4,92 à 160°C.

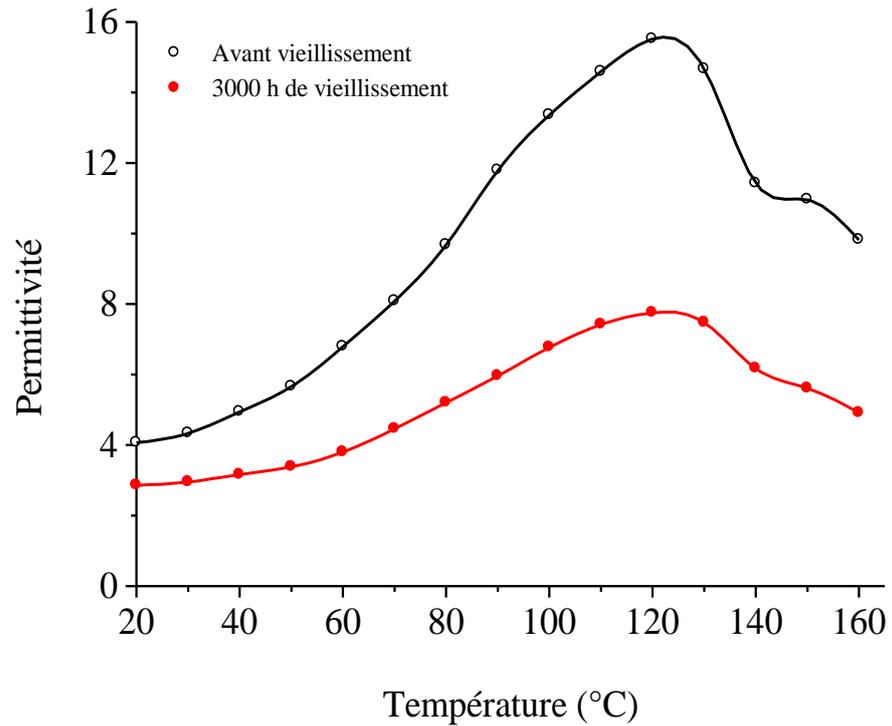


Figure IV.23 : Variation de la constante diélectrique en fonction de la température avant et après vieillissement.

III.3.3. Résistivité transversale

La figure IV.24 montre l'évolution de la résistivité transversale (ρ_t) en fonction de la température. Avant vieillissement, ρ_t diminue de $6,9 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ à $6,97 \cdot 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ correspondant à une température de 110°C puis augmente à $2,53 \cdot 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ à 160°C . Après 3000 h de vieillissement, ρ_t diminue de $1,4 \cdot 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ à $6,3 \cdot 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ pour une température de 110°C , puis augmente jusqu'à $3,03 \cdot 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ correspondant à 160°C .

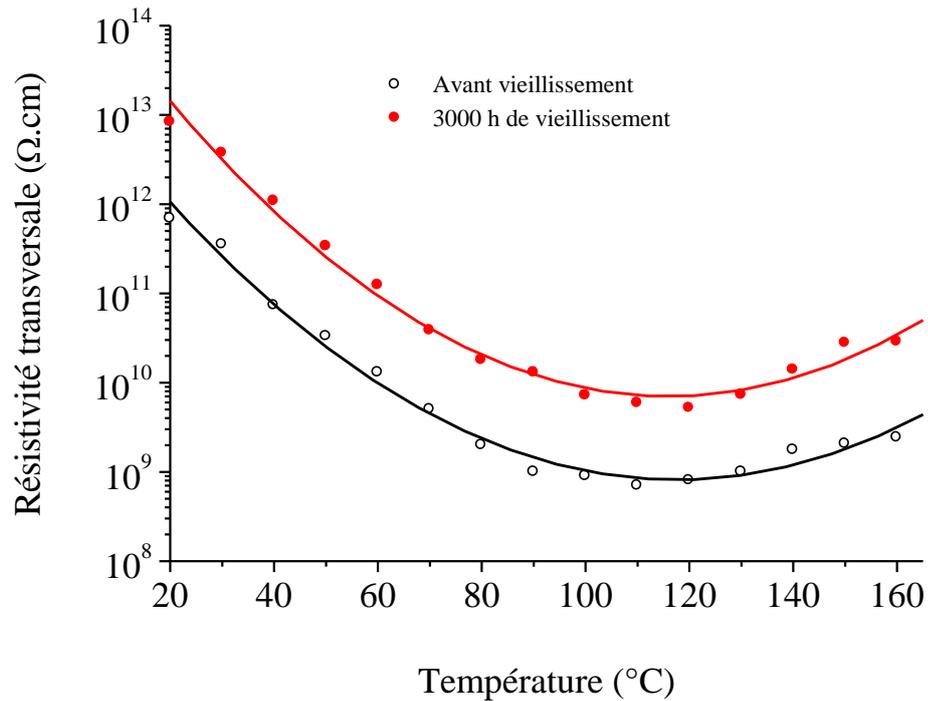


Figure IV.24 : Variation de la résistivité transversale en fonction de la température avant et après vieillissement.

III.4. Discussion

D'après nos résultats, il ressort les points suivants :

- Les diagrammes de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique conduisent à une dispersion plus grande des points expérimentaux à faible probabilité de rupture.
- La courbe donnant la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement présentent deux pics attribués à la relaxation des dipôles au sein du complexe papier presspahn – huile isolante BORAK 22. Nous remarquons une diminution de la rigidité diélectrique.
- Après 3000 h de vieillissement, on assiste à une diminution du facteur de pertes diélectriques, de la permittivité et une augmentation de la résistivité transversale.
- La caractéristique du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température présente un pic à 120°C avant et après le vieillissement. Notons que les valeurs du facteur de pertes diélectriques sont plus faibles après vieillissement. Il en est de même pour les caractéristiques donnant l'évolution de la permittivité en fonction du temps de vieillissement.
- La caractéristique de l'allongement à la rupture présente deux pics attribués à la relaxation du complexe papier - huile. On assiste à une diminution de la résistance à la traction.
- La dégradation s'est caractérisée par un dégagement de gaz, un changement de couleur et un gonflement en certains points des échantillons.

Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la dégradation de matériaux isolants soumis à un vieillissement hydrothermique. Le vieillissement a été réalisé jusqu'à 3000 h. L'étude montre une variation des propriétés électriques : rigidité diélectrique, facteur de pertes diélectriques, permittivité et résistivité transversale. L'étude statistique de Weibull de la rigidité diélectrique conduit à des graphes dont les distributions sont, dans la plupart des cas, plus dispersés pour les faibles probabilités. On assiste à une diminution de la rigidité diélectrique, du facteur de pertes diélectriques et de la permittivité. Tandis que la résistivité transversale augmente pour des temps de vieillissement avoisinant 2000h. Concernant les propriétés mécaniques, la résistance à la traction diminue tandis que la caractéristique de l'allongement à la rupture montre une variation irrégulière avec la présence de deux pics très prononcés. Le facteur de pertes diélectriques, la permittivité et la résistivité transversale dépendent de la température. Le facteur de pertes diélectrique et la permittivité sont maximaux à 120°C. La courbe de la résistivité transversale passe par un minimum à 110°C. Le vieillissement conduit à un dégagement de gaz. Un changement de couleur du jaune au marron ainsi qu'un gonflement en certains points des éprouvettes ont été observés.

Comme perspectives, nous envisageons de compléter ce travail par des analyses physico-chimiques telles que : spectroscopie infrarouge (FTIR), analyse antalgique différentielle (DSC), analyse thermogravimétrique (ATG) et microscope électronique à balayage (MEB).

Bibliographie

-
- [1] M.C. Lessard, L.V. Nifterik, M. Massé, J.F. Penneau, R. Grob, “ Thermal aging study of insulating papers used in power transformers“, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.854-859, October 20-23,1996.
- [2] M. Nikoloski, “ The velocity of drying of the already impregnated oil-papers insulation“, IEEE Proceedings of the 5thInternational Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp.484-487, Séoul, Korea, May 25-30, 1997.
- [3] Robert Fournié, “ Les isolants en électrotechnique, essais, mécanismes, applications industrielles“, edition Eyrolles, 1990.
- [4] O. Girlanda, D.D. Tjahjanto, S. Östlund, K.Wei, L.E. Schmidt, “ Characterisation and modelling of the mechanical properties of pressboard“, IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.563-566, 2013.
- [5] R. Heller, R. Esnault, C. Lance, “Physiologie végétale Développement“, edition Masson, Paris, 1995.
- [6] Chang Liu, Wei Zhang, Man Xu, “ A study of aging property of pressboard in gas insulator transformer“, IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), Vol 2, pp.772-775, 2016.
- [7] Norme CEI-2, “ Spécification pour le carton comprimé à usage électrique“, Méthodes d’essai, Juin 1996.
- [8] Norme CEI 554, “Specifications pour papiers cellulosiques à usages électriques“, Première édition, 1997.
- [9] Norme EN 60 641, “Spécifications pour le carton comprimé et le papier comprimé à usages électriques“, Deuxième partie, 1996.
- [10] Norme ISO 536, “Papier et carton « Détermination du grammage »“, 2012.
- [11] Norme ISO/R287, “Papier et carton « Détermination de la teneur en humidité d’un lot, méthode à l’étuve »“, 2009.
- [12] Norme ISO 535, “ Papier et carton « Détermination de l’absorption d’eau, méthode de Cobb »“, 2014
- [13] C. Boidson, M. Carballeira, P. Guuinic, L. Latil, J. Poitlevin, “ Le conditionnement sur site des transformateurs, son contrôle et son impact sur la tenue diélectrique“, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, pp.1-8, 28 Aout -3 Septembre, 1994.
- [14] C. Menguy, “Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides“, Techniques de l’ingénieur, D2 310, Paris, 1997.

- [15] I. Gussenbauer, “ Examen de la répartition d’humidité dans des modèles de transformateurs au moyen des mesures diélectriques“, Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques, pp.1-5, Session 1980.
- [16] D.W. Auckland, K. Chandraker, Z. Shkanti, B.R. Varlow, “ Degradation of oil-paper systems due to the electrical field enhanced absorption of water“, IEEE 7th International Conference on Dielectric Materials Measurement and Applications, Conference Publication N° 430, pp.197-200, 23-26 September 1996.
- [17] B. Bouvier, “ Papier et papier imprégné“, Technique de l’Ingénieur, D280, Paris 1983.
- [18] F. Pratomosiwi, N. Pattanadech, B. Wieser, M. Muhr, “ Dielectric properties measurements of oil immersed pressboard“, IEEE International Conference on condition Monitoring and Diagnosis, pp.60-63, Bali, Indonesia, Septembre 2012.
- [19] Wanquan Li, Changyin Gao, “ Mechanisms and testing of moisture content measurement of transformers pressboard“, IEEE 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, pp.352-356, 2009.
- [20] Norme Européenne NF EN 60641-2, Indice C 26-131-2, “ Spécification pour le carton comprimé et le papier comprimé à usage électrique“, Novembre 1994.
- [21] M. Ghaffarian Niasar, N. Taylor, H. Edin, “ Dielectric frequency response of oil impregnated paper : the effect of partial discharges compared to other influences“, IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation, Vol .23, No.3, pp.1769-1777, 2016.
- [22] T.O. Rouse, “ Mineral insulating oil in transformers“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.14, N°3, pp.6-16, May/June 1998.
- [23] N. Berger, “ Liquides isolants en électrotechnique présentation générales“, Techniques de l’Ingénieur, D2 470, Paris, Mai 2002.
- [24] M. Dubois, “ Matériaux d’électrotechnique“, IGEE-403, 2006.
- [25] Miao Hao, Yuan Zhou, George Chen, “ Space charge behavior in thick oil-impregnated pressboard under HVDC stresses“, IEEE International Conference on solid Dielectrics, pp.397-400, Bologna, Italy, June 30-July 4 , 2013.

- [26] Orhando Girland, Kun Wei, “ Static and quasi-static behavior of dry and oil-impregnated pressboard“, IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), pp.105-108, Montréal, QC, Canada, 19-22 June 2016.
- [27] Wang Jue, Liu Xuezhong, He Ping, Zhang Jianjun, “ Study on dielectric properties of oil-impregnated paper and epoxy/fiberglass composite during DC accelerated aging“, IEEE Conference Publication, Proceedings of 2011 International Conference on Electrical Insulating Materials (ISEIM), pp.213-216, 2011.
- [28] J. Verdu, “Comportement à long terme, traité de génie électrique“, Techniques de l’ingénieur, A3150, 1975.
- [29] Youping Tu, Jingjing Chen, Shaohe Wang, Wei Wang, “ Moisture migration in oil-impregnated film insulation under thermal ageing“, IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.23, No.2, pp.1135-1141, April 2016.
- [30] J. Verdu, “ Vieillissement des plastiques“, Edition AFNOR, Technique ISSN 0297-6714, Paris, 1984.
- [31] J. Verdu, “Vieillissement physiques des plastiques“, Techniques de l’ingénieur, A3150, 1990.
- [32] H-H. Kausch, N. Heymans, C.J. Plummer, P. Decroly, “Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physiques”, Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [33] M. Nedjar, Y. Mecheri, A. Lamure, M. Aufray, C. Drouet, “ Effect of moisture on breakdown voltage of polyesterimide used in electrical machines“, IEEE Annual Report Conference On Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.1-4, 2010.
- [34] M.R. Kamal, R. Saxon, “ Recent developments in the analysis and prediction of the weather ability of plastics“, Applied polymer symposia, pp.1-28, 1967.
- [35] C. Roggendorf, M. Kessler, S. Schulte, A. Schnettler, “ Accelerated test procedures for hydrothermal aging“, IEEE Conference Record of the International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), pp.1-5 , 2010.
- [36] J. Verdu, “Action de l’eau sur les plastiques“, Techniques de l’ingénieur, A3165.
- [37] C. Roggendorf, A. Schnettler, “ Accelerated hydrothermal aging of epoxy resin based syntactic foams with polymeric microspheres“, IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.19, No.3, pp.973-980, June 2012.

- [38] O.Tebbi, F.Guerin, B. Dumon, “ Comparative study of accelerated testing models, applications in mechanics“, IEEE International Conf. Syst., Man., and cybernetics, Tucson, pp.2099-2104, 2001.
- [39] C.H. Vandrecek, “Hydrolytic stability of some epoxy and arethane insulation compounds“, 31 th SPE Montreal, pp.413-417, 1983.
- [40] NFT 51-162, “plastiques, méthodes d’exposition à la chaleur humide“, Octobre 1980.
- [41] Nursal Can, F. Aras, V.A. Alekperov, A. Altindal, “ Investigation on aging mechanism of polyster under combined stresses“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.32, No.4, pp.38-42, July/August, 2016.
- [42] F. Aras, V.A. Alekperov, N. Can, H. Kirkici, “ Aging of 154 KV under-ground power cable insulation under combined thermal electrical stresses“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.23, pp.25-33, 2007.
- [43] 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.
- [44] B. Fallou, “Caractéristiques des isolants solides. Méthodes de mesure, valeurs et significations“, Techniques de l’ingénieur, A3151, 1980.
- [45] CEI 216-1, Méthodes générales pour la détermination des propriétés d’endurance thermique, des indices de température et des profils d’endurance thermique, 1974.
- [46] M.A. Douar , A. Bérroual, X. Souche, “ Comparative study of AC breakdown Voltage for various polymers : Influence of electrodes shape, thermal and hydrothermal ageing“, IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), pp.1-4, 2014.
- [47] P. Rain, E. Brun, C. Guollermin, S. Rowe, “ Hydrothermal aging of filled epoxy resin: Measurment of the insulation properties and qualitative models“, IEEE International Conference on solid Dielectrics (ICSD), pp.1-4, Potsdam (Germany), 2010.
- [48] Shanshan Lv, Zhanwen Niu, Zhen He, Liang Qu, “ Estimation of lower percentiles under Weibull distribution“, The first IEEE International Conference on Reliability Systems Engineering (2015 ICRSE), pp.1-5, 2015.

- [49] M.O. Mairagouna, “ Approche probabiliste du comportement mécanique des composites thermoplastiques assemblés par soudage laser“, Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Novembre 2012.
- [50] C. Laurent, C. Chauvet, J. Berdala, “ The significance of the Weibull threshold in short-term breakdown statistics“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, pp.160-162, 1994.
- [51] F. Mosinski, J. Wodzinski, L. Sikorski, et al. , “ Electrical strength of paper-oil insulation subjected to composite voltages“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, pp.615-623, 1994.
- [52] K. Giese, “ Electrical strength of pressboard components for transformer insulation“, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.12, pp.29-33, 1996.
- [53] H. Hirose, “ Maximum likelihood parameter estimation in the extended Weibull distribution and its application to breakdown voltage estimation“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.9, pp.525-536, 2002.
- [54] Y.E. Wu, J. Sune, W. Lai, “ On the Weibull shape factor of intrinsic breakdown of dielectric films and its accurate experimental determination-part II: experimental results and the effects of stress conditions“, IEEE Transactions on Electronic Devices, Vol.49, pp.2141-2150, 2002.
- [55] W. Weibull, “ A statistical theory of the strength of materials“, Royal Swedish institute for engineering research, 1939.
- [56] J. Lamon, “ Mécanique de la rupture fragile et de l’endommagement, approches statistiques et probabilistes, Lavoisier, pp.53-63, septembre 2007.
- [57] C. Chauvet, C. Laurent, “ Weibull statistics in short term dielectric breakdown of thin polyethylene films“, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.28, N°1, February 1993.
- [58] C. Chauvet, “ Mise au point d’une méthodologie pour les essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des isolants synthétiques des câbles haute tension“, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Juillet 1992.
- [59] 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.
- [60] Commission Electrotechnique Internationale, comité d’étude N° 63, “ Systèmes d’isolation, évaluation de l’endurance électrique des systèmes d’isolation électrique, procédure d’évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes, septembre 1989.
- [61] A. Polard, C. Rivoire, “ Fiabilité et statistiques prévisionnelles : la méthode de Weibull, éditions Eyrolles, 1971.

-
- [62] J.M. Oudin, Y.Reyrolle, H.Thévenon, Théorie statistique du claquage électrique, RGE N°4, pp.430-436, 1968.
- [63] R. Lacoste, E. Loudghiri, 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, RGE N°10, pp.769-775, Octobre 1985.
- [64] M. Nedjar, “ Evaluation de la tenue diélectrique à court terme et à long terme des polymères utilisés dans les dispositifs haute tension, Thèse de doctorat d’état, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2003.
- [65] C. Simon, “ Champs de seuil et fiabilité des câbles haute tension“, Journées d’études internationales sur les câbles d’énergie à isolant synthétique (JICABLE), pp.226-232, 1987.
- [66] L.A. Dissado, “ Theoretical basis for the statistics of dielectric breakdown“, J.Phys.D,Phys , Vol.23,pp.1582-1591, 1990.
- [67] M. Nedjar, Y. Sadaoui, S. Rezgui, F. Namani, “Statistique de Weibull dans l’étude de la tenue diélectrique du polyster-imide sous champ alternatif, Algerian Jouranl of Technology, Série B-Numero spécial, pp.64-67, 2009.
- [68] G.C. Stone, R.G. Van Heeswijk, “Parameter for the Weibull distribution”, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-12, No. 4, pp.253-261, 1997.
- [69] “IEEE Guide for the Statistical of Electrical Insulation Voltage Endurance Data“, ANSI/IEEE Std. 930, 1987.