REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

Faculté de Génie Electrique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique

Mémoire de Magister en Electrotechnique

Option : Entraînements Electriques

Présenté par :

ACHILI Djamal

Thème

Etude de l'endurance thermique du papier presspahn imprégné d'huile

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, Examinateur.
Mr. MOUDOUD Mustapha, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examinateur.
Mr. BOUTORA Youcef, Maître de Conférences A	Université de Tizi-Ouzou, Examinateur.

Soutenu le :

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout au fond du cœur Monsieur **M. Nedjar**, Professeur à L'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), tout d'abord de m'avoir encadré ensuite pour ces qualités humaines et pédagogiques inégalées.

Je suis profondément reconnaissant envers Monsieur **S. Haddad**, Professeur à l'UMMTO, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant d'être le président de jury de ma soutenance.

Je tiens à exprimer mes meilleurs sentiments de gratitude à Monsieur **M. Moudoud**, Maitre de Conférence A à l'UMMTO, **Y. Boutora**, Maitre de Conférence A à l'UMMTO et Monsieur **M. Megherbi**, Professeur à l'UMMTO en acceptant de juger ce travail et d'être les membres de jury.

Je désire aussi remercier chaleureusement Monsieur **F. Bellabes** chef de service de laboratoire de physique au sein de l'Entreprise Nationale d'Electro-Industries (ENEL) et ses collègues de travail, en l'occurrence, Monsieur **D. Djidja** et **E. Chekir** de m'avoir aidé à réaliser ce travail et leur sympathie exemplaire envers moi.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE……1
CHAPITRE I : ISOLANTS EN PAPIER
1 CONSTITUTION DU PAPIER ET CARTON.....2
1.1 Cellulose.....2
1.2 Hémicellulose dérivées du bois.....3
1.3 Lignines.....3
2 PAPIERS PRESSPAHN « KRAFT » 3
3 FABRICATION DU PAPIER 5
4 PROPRIETES DES PAPIERS ET CARTONS 5
4.1 Epaisseur 5
4.2 Masse volumique et perméabilité à l'air 6
4.3 Hygroscopicité 6
4.4 Propriétés mécaniques.....6
4.5 Propriétés diélectriques du papier non imprégné 6
4.5.1 Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique 6
4.5.2 Rigidité diélectrique du papier non imprégné 7
4.6 Propriétés thermiques du papier non imprégné.....7
4.6.1 Conductibilité thermique 7
4.6.2 Stabilité thermique.....7
5 IMPREGNANTS 8
5.1 Les huiles minérales.....8
5.1.1 Composition.....8
5.1.2 Caractéristiques des huiles minérales 9
5.1.3 Utilisations des huiles minérales 10
6 PAPIER ET CARTON IMPREGNES D'HUILE MINERALE 11
6.1 Propriétés électriques 11
6.1.1 Résistance et conductivité.....11
6.1.2 Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique 11
6.1.3 Rigidité diélectrique.....12
6.1.3.1 Rôle des décharges partielles…….....12
6.1.3.2 Influence de présence de vacuoles……..12
6.1.3.3 Influence de viscosité de l'imprégnant……12
6.1.3.4 Influence de l'eau……13
6.1.3.5 Tenue aux impulsions de tensions……..13
6.2 Hygroscopicité du papier imprégné…….13
6.3 Propriétés mécaniques.....13

7 CONCLUSION 14
CHAPITRE II: VIEILLISSEMENT THERMIQUE DES ISOLANTS SOLIDES
1 VIEILLISSEMENT THERMIQUE DES ISOLANTS SOLIDES.....15
1.1 Réactions chimiques.....15
1.1.1 Coupure de chaines statistiques du squelette macromoléculaire 15
1.1.2 Réactions de dépolymérisation 17
1.1.3 Réactions de réticulation.....17
1.1.4 Réactions au niveau de groupements latéraux.....18
1.1.5 Réactions d'oxydation 19
2 VIEILLISSEMENT DU PAPIER IMPREGNE D'HUILE MINERALE.....19
2.1 Dégradation par pyrolyse 20
2.2 Dégradation par hydrolyse 20
2.3 Dégradation par oxydation.....21
2.4 Dépolymérisation progressive.....21
3 VIEILLISSEMENT DE L'HUILE MINERALE.....22
3.1 Oxydation de l'huile minérale.....22
3.2 Vieillissement de l'huile minérale par l'humidité.....22
3.3 Vieillissement de l'huile minérale par décharges partielles.....23
3.4 Vieillissement de l'huile minérale par la température…….23
4 CONSEQUENCES DE VIEILLISSEMENT DE L'HUILE MINERALE.....23
5 VIEILLISSEMENT DU COMPLEXE PAPIER-HUILE 24
6 CONSEQUENCE DES DEGRADATIONS DU PAPIER IMPREGNE.....25
7 ENDURANCE THERMIQUE DU PAPIER PRESSPAHN IMPREGNE D'HUILE.....25
7.1 Travaux relatifs à l'endurance thermique des polymères 25
7.2 Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides 26
7.3 Indice de température.....26
7.4 Choix des caractéristiques mesurées et des critères de fin de vie 27
7.5 Durée de vie, modèle d'Arrhenius et vitesse de dégradation.....27
7.6 Endurance thermique du papier presspahn imprégné d'huile 28
7.6.1 Facteur de dégradation.....28
7.6.2 Vitesse de dégradation du papier imprégné.....29
7.6.3 Durée de vie du papier imprégné d'huile minérale 29
7.7 Lois de vieillissement du complexe papier-huile.....29
7.7.1 Loi de Montsinger.....29
7.7.2 Loi de Dakin.....30
8 CONCLUSION 30

CHAPITRE III : MODELE STATISTIQUE DE WEIBULL
1 MODELE STATISTIQUE DE WEIBULL 31
1.1 Bases du modèle.....31
1.2 Modèle à deux paramètres 32
1.3 Modèles à trois paramètres.....32
1.4 Signification des paramètres 32
1.4.1 Paramètre d'échelle 32
1.4.2 Paramètre de forme.....32
1.4.3 Paramètre de localisation.....33
1.5 Avantages de la loi de Weibull 33
1.6 Application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides..33
1.7 Tenue diélectrique à court terme.....33
2 LISSAGE LINEAIRE PAR LA METHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE ..34
2.1. Représentation à 2 paramètres……..….35
3 CONCLUSION 35
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION
1 TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....36
1.1 Vieillissement 36
1.2 Echantillons 36
1.3 Conditionnement des éprouvettes.....37
1.4 Essais de claquage 38
1.4.1 Rigidité diélectrique 40
2 ANALYSE STATISTIQUE.....40
3 RESULTATS ET DISCUSSION 41
3.1 Diagramme de Weibull à deux paramètres.....41
3.1.1 Avant vieillissement 41
3.1.2 Vieillissement à 130 °C.....41
3.1.3 Vieillissement à 140 °C.....44
3.1.4 Vieillissement à 150 °C.....47
3.2 Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps du vieillissement 50
3.3 Variation de facteur de forme en fonction du temps du vieillissement 51
4 DISCUSSION.....52
CONCLUSION GENERALE……...53
ANNEXE……..54
BIBLIOGRAPHIE……....60

INTRODUCTION GENERALE

Le papier imprégné d'huile est largement utilisé comme matériau isolant dans les transformateurs et câbles électriques de puissance, grâce à ces excellentes propriétés électriques et mécaniques. Durant le fonctionnement de ces équipements, le papier imprégné d'huile est le siège de diverses contraintes (électrique, mécanique, chimique, thermique, etc.) et l'isolant subit une dégradation irréversible.

Les transformateurs subissent des cycles thermiques continus au cours de leur fonctionnement, par conséquent, le papier se dégrade rapidement quand les échauffements sont plus importants et la contrainte thermique est combinée avec d'autres contraintes. La durée de vie de transformateurs est liée au vieillissement des papiers imprégnés d'huile. Il est donc important de connaitre les mécanismes de dégradation de l'isolant.

Le but de ce travail est d'étudier l'endurance thermique du complexe papier-huile dans différentes températures du fonctionnement des équipements électriques de puissance. Comme les essais sur de tels appareils (leur coût est très élevé et leur durée de vie est de l'ordre de plusieurs décennies) sont irréalisables, les essais au laboratoire sont préférables.

Nous nous sommes intéressés à l'évolution de la rigidité diélectrique du polymère en fonction du temps de vieillissement à différentes températures. La rupture diélectrique étant un phénomène aléatoire et une étude statistique des valeurs de champs de rupture est nécessaire. Pour cela, nous avons utilisé le modèle de Weibull à deux paramètres.

Le premier chapitre présente la composition chimique du papier presspahn imprégné d'huile minérale, mise en ouvre, fabrication, ses propriétés physiques, mécaniques, électriques, thermiques et chimiques.

Le second chapitre est consacré au vieillissement thermique du polymère. Le modèle de durée de vie et l'endurance thermique de l'isolant solide y sont aussi présentés.

Le troisième chapitre traite le modèle statistique de Weibull et son application à l'étude de la rupture diélectrique des isolants solides.

Le quatrième chapitre décrit les techniques expérimentales concernant la réalisation des échantillons, le dispositif expérimental, la méthode d'essai et les résultats obtenus. Une analyse statistique des tensions de claquage a été faite en utilisant le modèle statistique de Weibull à deux paramètres.

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

CHAPITRE I

ISOLANTS EN PAPIER

Les papiers et les cartons restent les matériaux de choix pour l'isolation des transformateurs HT et MT. L'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement des huiles minérales, leur confère une rigidité diélectrique remarquable. Par conséquent, il est intéressant de connaitre leurs caractéristiques. Ce chapitre est consacré à l'étude du papier presspahn imprégné d'hile minérale : formule chimique, caractéristiques physico-chimiques, utilisation, fabrication, etc.

1. CONSTITUTION DU PAPIER ET CARTON

Les papiers et cartons sont des matériaux isolants possédant des caractéristiques diélectriques excellentes. L'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement l'huile minérale leur confère une rigidité diélectrique remarquable. Le papier Kraft est l'un des papiers les plus utilisés dans l'industrie électrique. De part leur densité, la longueur et la diversité des fibres de cellulose qui les constituent, ces matériaux possèdent des caractéristiques mécaniques et électriques particulières [1]. Le papier utilisé dans la construction des transformateurs est constitué de 90 % de cellulose, 6 à 7 % d'hémicellulose et de 3 à 4 % de lignine [2].

1.1. Cellulose

La cellulose est le composé majoritaire des fibres lignocellulosiques dont la formule brute est composée d'une unité anhydroglucose, $C_6H_{10}O_5$. La structure chimique de la cellulose est constituée d'un enchaînement de glucoses, plus précisément d'anhydroglucopyranoses, reliés entre eux par des liaisons β-1,4. Les extrémités d'une chaîne de cellulose sont de deux natures différentes : l'une est réductrice, l'autre ne l'est pas (figure I.1) [3].

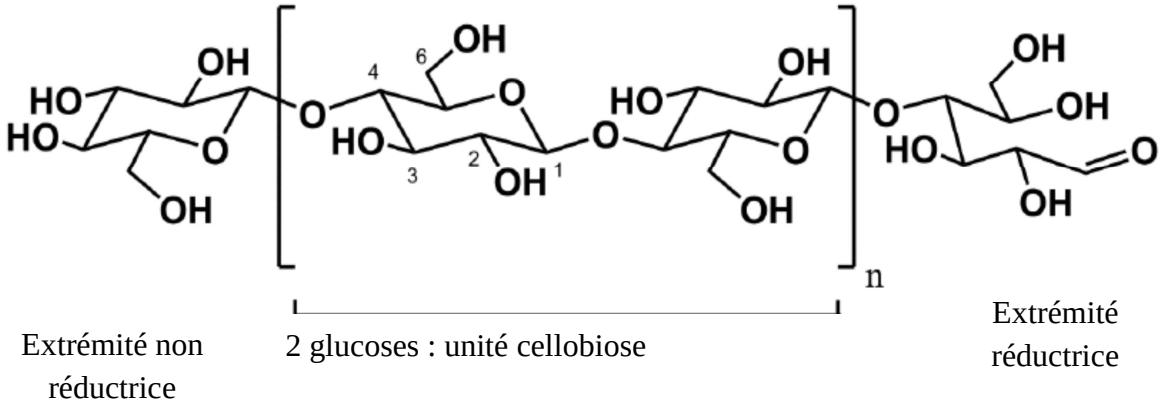


Figure I.1 : Structure chimique de la cellulose [3].

Dans le cas des fibres lignocellulosiques prevenant du bois, cet enchainement d'unités anhydroglucoses est généralement compris entre 300 et 1700 unités. Pour le coton par exemple, ce chiffre peut atteindre 10000 unités [3]. Les liaisons β-1,4 entre les glucoses confère à la cellulose une structure linéaire [3].

La cellulose assure la tenue mécanique du papier du fait des liaisons hydrogène existant entre brins de cellulose. La cellulose et par extension le papier peut être caractérisé par son degré de polymérisation moyen qui est le nombre moyen de motifs de glucose par chaine [4]. La

structure cristalline de la cellulose explique le caractère insoluble de celle-ci dans la plupart de solvants. Elle est également parsemée de zones amorphes. Ces zones, où l'espace inter-chaines est plus grand, sont des points d'accès privilégiés pour les solvants et les réactifs [3].

1.2. Hémicellulose dérivées du bois

Les hémicelluloses sont chimiquement proches de la cellulose. Il n'existe pas de structure générale des hémicelluloses. On peut cependant présenter leur structure comme étant des polymères d'hexoses et de pentoses et d'acides uroniques linéaires ou ramifiés dont le degré de polymérisation est compris entre 100 et 200 unités [3]. Les hémicelluloses sont étroitement liées à la cellulose. Leurs chaînes ramifiées expliquent le caractère non cristallin et hydrophile des hémicelluloses. La figure I.2 donne la structure d'hémicellulose.

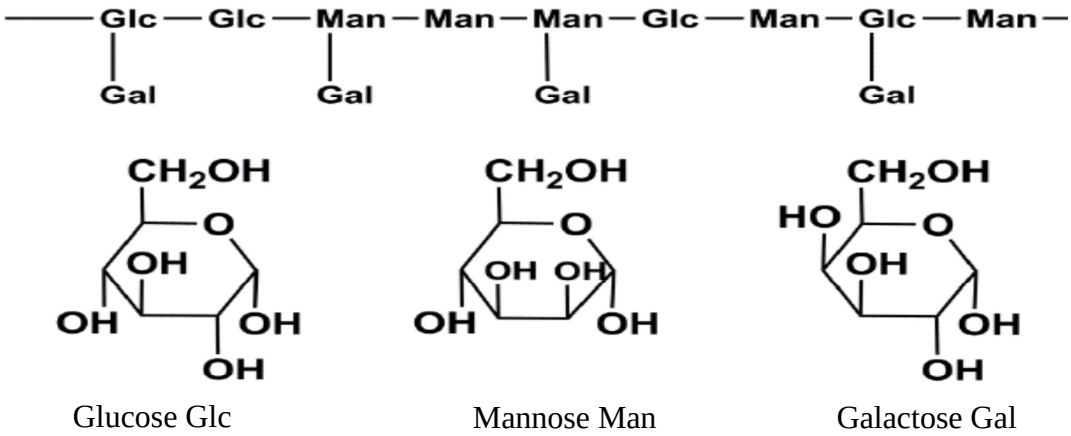


Figure I.2 : Exemple d'hémicellulose [3].

Il est quasiment impossible de donner une structure précise aux hémicelluloses, vu les combinaisons possibles entre motifs élémentaires [4]. Bien que ces polymères soient facilement hydrolysables, il est néanmoins très difficile de les éliminer totalement par le procédé Kraft [4]. Les hémicelluloses sont constituées d'enchaînements beaucoup plus courts que la cellulose, ce qui leur confère une solubilité dans les solutions alcalines (KOH 15%).

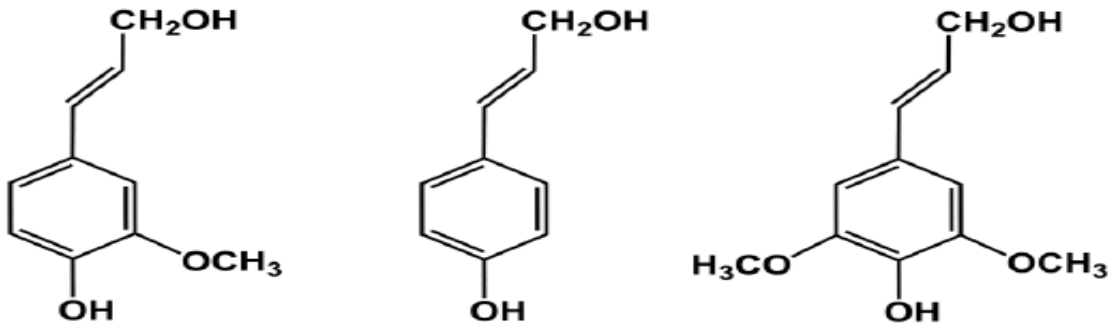
1.3. Lignines

Il est difficile de donner une définition aux lignines tant leurs structures sont variables. Cependant, d'un point de vue chimique, les lignines peuvent être définies comme un polymère à caractère aromatique, non polyosidique, insoluble dans l'acide sulfurique concentré à 72% [3]. Elles sont constituées d'unités phénylpropane dont les monomères les plus caractéristiques sont représentés à la figure I.3. Ces polymères très incrustés dans les polyosides ont un rôle de ciment. Il n'existe pas de méthode pour les extraire sans dégradation ; d'ailleurs si on les éliminait, alors les caractéristiques du papier seraient fortement dégradées [4].

2. PAPIERS PRESSPAHN « KRAFT »

Le papier presspahn ou carton comprimé (pressboard en anglais) est fabriqué à partir d'une pulpe de bois pure par le procédé Kraft (procédé au sulfate). A partir de feuilles minces sont

fabriqués des cartons dont l'épaisseur est de 0,1 à plusieurs mm. En moulant, calandrant ou pressant à chaud des feuilles humides de papiers, on obtient des cartons dont les masses volumiques sont comprises entre 0,9 et 1,25 kg/dm^3 [5].



Alcool coniférylique Alcool coumarylique Alcool sinapylique

Figure I.3 : Structure des monomères de lignine [3].

Caractéristiques	Conditions d'essai	Valeur moyenne
Masse volumique	Teneur en eau 6%	1,22 g/cm^3
Epaisseur		1 à 8 mm
Résistance à la traction (sens machine)	Teneur en eau <1% Séché et imprégné d'huile	1300 kg/cm^2 1130 kg/cm^2
Résistance à la flexion (sens machine)	Teneur en eau <1% Séché et imprégné d'huile	1260 kg/cm^2 1220 kg/cm^2
Absorption d'huile	90 °C-0,1 Torr	16%
Teneur en cendre		0,33%
Permittivité (ε_r)	20 °C 100 °C	4,4 4,9
Tanδ (carton imprégné d'huile)	20 °C 100 °C	0,38% 4,9%
Résistivité (carton imprégné d'huile)	Epaisseur 1 à 5 mm Epaisseur 6 à 12 mm	$3.10^{15}\Omega$.cm $8.10^{15}\Omega$.cm
Rigidité diélectrique dans l'huile, 1mm, 50 Hz, sphère : Φ=25 mm	Epaisseur 1 mm Epaisseur 3 mm	37 kV 85 kV

Tension de tenue au choc dans l'huile 1/50, sphère : Φ=25 mm	Epaisseur 1 mm Epaisseur 3 mm	92 kV 210 kV
Tenue au cheminement dans l'huile (champ uniforme)	1 mm, 50 Hz 1/50 µ sec	60 kV/cm 150 kV/cm

Tableau I.1 : Caractéristiques du papier presspahn [5].

Le papier presspahn a une très bonne résistance mécanique et d'excellentes propriétés diélectriques [6]. Le tableau I.1 donne quelques caractéristiques du papier presspahn dans différentes conditions d'essai.

3. FABRICATION DU PAPIER

La formation de feuille de papier est une opération délicate : elle dépend des liaisons qui s'établissent entre les fibrilles ; plus le raffinage est poussé, plus leur surface de contact augmente. Les feuilles ont une teneur en lignine et hémicelluloses faible afin d'obtenir des pertes diélectriques réduites à haute température. Néanmoins, il ne faut pas retirer de la pâte la totalité des matières non cellulosiques ; si l'on poussait trop ce traitement, les pertes augmentent à nouveau [5]. La mesure du degré de polymérisation permet de vérifier que les chaînes de cellulose n'ont pas été dégradées lors de fabrication du papier [4]. La fabrication de la feuille de papier est menée dans des conditions dont dépendront également l'uniformité de la surface et la perméabilité à l'air du papier. C'est au stade de la fabrication que sont obtenues les caractéristiques optimales désirées [4].

4. PROPRIETES DES PAPIERS ET CARTONS

Bien que ces propriétés soient profondément modifiées quand le papier se trouve imprégné, elles conditionnent néanmoins la mise en œuvre et la tenue en service de l'isolation à laquelle le papier est destiné [6]. Parmi les principales caractéristiques d'un papier ou d'un carton, on peut distinguer :

- L'épaisseur ;
- La masse volumique et la perméabilité à l'air;
- L'hygroscopicité ;
- Les propriétés mécaniques, diélectriques et thermiques.

4.1. Epaisseur

Dans l'industrie des condensateurs, on utilisait des papiers dont les épaisseurs varient entre 5 et 30 µm. Pour réaliser l'isolation des câbles, les constructeurs disposent des papiers d'épaisseurs plus importantes (30 à 170 µm) [5]. Les papiers de guipage des conducteurs, trouvés dans les enroulements de transformateurs sont assez fins ne dépassant pas 75 µm [6]. L'épaisseur du papier servant de séparation entre couches dans les transformateurs varie de 0,1 à

1 mm [7]. Une meilleure tenue diélectrique est obtenue, en effet, en superposant plusieurs couches d'un papier très fin plutôt qu'en utilisant une seule couche de papier plus épaisse [5,6].

4.2. Masse volumique et perméabilité à l'air

La masse volumique varie d'une qualité de papier à une autre, en fonction de son procédé de fabrication. La masse volumique de la cellulose proprement dite est de 1,4 g/cm^3. Celle d'un papier de condensateur est comprise entre 1,1 et 1,3 g/cm^3 [6]. Pour le papier destiné à la construction des transformateurs de puissance et des câbles électriques, elle varie de 0,85 à 1,25 g/cm^3 [7]. La masse volumique, de même que la perméabilité à l'air sont des caractéristiques importantes dans la mesure où le papier imprégné doit assurer une bonne tenue au choc de foudre [5].

4.3. Hygroscopicité

Le caractère polaire de la cellulose est responsable de l'hygroscopicité élevée du papier. De fait, une partie de cette eau est fixée aux groupements hydroxyle (OH) de la cellulose par des liaisons hydrogène tandis qu'une autre partie pénètre librement dans les capillaires, d'autant plus facilement que le papier est plus humide [6]. Les caractéristiques dimensionnelles d'un papier varient avec sa teneur en eau : un papier se contracte en séchant. De même la résistance à la traction augmente avec l'humidité pour atteindre une valeur optimale pour une teneur en eau de 5% environ. Une teneur élevée en eau réduit les propriétés diélectriques et accélère le vieillissement thermique d'un papier [5].

4.4. Propriétés mécaniques

On exige des papiers et cartons de bonnes propriétés mécaniques pendant la mise en œuvre aussi bien qu'en service à savoir la résistance à la traction et l'allongement à la rupture, la résistance à la flexion et à l'éclatement ; pour les cartons, la résistance à la compression est une caractéristique importante [5]. Les papiers de condensateurs et les papiers utilisés pour le guipage des conducteurs sont, en général, de faible épaisseur. Les conditions de fabrication imposées, pour obtenir une faible perméabilité à l'air, diminuent la résistance au déchirement, mais la résistance à la traction reste suffisante pendant les opérations de bobinage et de guipage. Les papiers de câbles ou ceux utilisés entre couches dans les transformateurs sont plus épais. Les conditions d'enroulement de ces papiers imposent des valeurs élevées de la résistance à la traction et de l'allongement à la rupture [6]. En régime de court-circuit, on peut avoir des pressions de l'ordre de 100 N/mm^2 dans un transformateur de puissance. Les enroulements doivent résister aux efforts radiaux et axiaux [5].

4.5. Propriétés diélectriques du papier non imprégné

4.5.1. Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique

Sous de faibles contraintes électriques, le papier non imprégné peut être considéré comme l'association en série de deux condensateurs dont les diélectriques sont respectivement la cellulose et l'air [5]. C'est pourquoi la permittivité relative et le facteur de dissipation

diélectrique dépendent de la masse volumique du papier, décroissant généralement en même temps qu'elle. La permittivité de la cellulose pure est environ de 6,5 à la fréquence de 1000 Hz alors que celle d'un papier pourra varier de 1,7 à 3,2 quand la masse volumique varie de 0,6 à 3,2 g/cm^3 [6]. L'association en série cellulose-air se traduit, aux températures élevées et aux basses fréquences, par l'apparition d'un phénomène de type Maxwell-Wagner [5].

4.5.2. Rigidité diélectrique du papier non imprégné

Le papier non imprégné a, du fait de sa constitution, une rigidité diélectrique médiocre qui est à peine supérieure à celle d'un film d'air de la même épaisseur. Cette caractéristique n'a une signification que si elle est déterminée sur un papier imprégné [8]. Les propriétés diélectriques du papier non imprégné sont présentées au tableau I.2.

Propriété diélectrique	Valeur
Tangente delta	0,003 à 0,004
Rigidité diélectrique	90 kV/cm
Permittivité relative	5 à 6 (*)
Permittivité relative	1,5 à 3,5 (**)
Conductivité	10^{-15}à 10^{-1} Ω^{-1}.cm

Tableau I.2 : Propriétés diélectriques du papier non imprégné [8].

(*) Mesure à 20 °C à humidité ambiante ;

(**) Mesure du papier sec.

4.6. Propriétés thermiques du papier non imprégné

Les propriétés thermiques du papier sont un facteur important du bon fonctionnement en service d'une isolation. Elles sont à prendre en considération, au même titre que les propriétés diélectriques, quand le papier est imprégné. Néanmoins, les propriétés du papier non imprégné les conditionnent dans une grande mesure [6].

4.6.1. Conductibilité thermique

La conductibilité thermique limite plus au moins l'élévation de température de l'isolation dont dépendent, à court terme, les risques de claquage thermique et, à plus long terme, le vieillissement de l'isolation [6].

4.6.2. Stabilité thermique

C'est une propriété importante dont l'effet se fait sentir à long terme. Dans ce cas, l'imprégnant joue un 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 de vieillissement du

papier. La stabilité thermique est un facteur qu'il faut prendre en considération lors du séchage et d'un traitement sous vide d'une isolation avant l'imprégnation, afin d'éviter une dégradation éventuelle du papier lors de ce traitement [6].

5. IMPREGNANTS

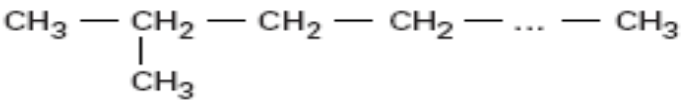
Les liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolations solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques très divers : transformateurs, réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prises, etc. [9]. La fonction d'isolation électrique est souvent assurée en association avec des isolants solides ; ce sont des isolations imprégnées. Par conséquent, les liquides doivent être compatibles avec les isolations solides (papier, carton, polymères) mais également avec les matériaux de construction (métaux, plastiques) [10]. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation (la rigidité diélectrique des liquides est très nettement supérieure à celle des gaz). Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage comme dans le cas des transformateurs, par exemple [11]. Les liquides sont également utilisés pour leur pouvoir extincteurs d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et, dans certains cas, pour améliorer la résistance au feu (transformateurs de distribution) [11]. Enfin, ils servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique [12]. Le choix de l'imprégnant est important puisque de lui dépendent les caractéristiques de l'isolation, c'est-à-dire principalement une bonne tenue à la tension, des pertes diélectriques faibles et pour certaines applications, une permittivité relative élevée [6].

5.1. Les huiles minérales

5.1.1. Composition

Les huiles minérales sont obtenues par le raffinage des bruts pétroliers. Ce sont des mélanges complexes (plusieurs milliers de molécules différentes) d'hydrocarbures, de composés soufrés, oxygénés, azotés, et de traces de composés organométalliques [13].

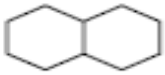
La composition d'une huile minérale est généralement définie par sa teneur en carbone paraffinique (C_p), en carbone naphténique (C_n), et en carbone aromatique (C_a), (figure I.4). (C_p) et (C_n) ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement). La présence d'aromatiques améliore la résistance à l'oxydation (plus faibles formations de boues), les propriétés de gassing et la rigidité en impulsion [11]. Suivant le brut d'origine, on différencie les huiles naphténiques des huiles paraffiniques (tableau I.3).



Paraffiniques (ou alcanes) C_nH_{2n+2}

Naphtènes (ou cyclanes) non condensés C_nH_{2n}

Aromatiques C_nH_n



Naphtène condensés

Figure I.4 : Différents types d'hydrocarbures [18].

Types d'hydrocarbures	Type de brut pétrolier		
	Paraffinique	Mixte	Naphténique
Paraffinique	60	40	20
Naphténique	25	40	65
Aromatique	15	20	15

Tableau I.3 : Compositions typiques des bruts pétroliers [11].

Les huiles minérales contiennent également un faible pourcentage d'hydrocarbures qui comprennent dans leur structure d'autres éléments comme l'azote, le souffre et l'oxygène. Dans la plupart des cas, ces éléments appelés hétéroatomes, sont liés aux structures aromatiques et on peut y trouver par exemple pyridine (C_5H_5N) ou de phénol (C_6H_5OH) [14].

5.1.2. Caractéristiques des huiles minérales

Les spécifications des huiles minérales à usage électrique sont définies dans la publication CEI 60296 [15] (tableau I.4).

Application	Transformateurs et appareillage de connexion		
	Classe I	Classe II	Classe III
Masse volumique : à 20 °C (kg/dcm^3)		≤0,895	
Viscosité cinématique : ν à 40 °C (mm^2/s)	≤16,5	≤11,0	≤3,5
Viscosité cinématique : ν à -15 °C (mm^2/s)	<800		
Viscosité cinématique : ν à -30 °C (mm^2/s)		<1800	

Viscosité cinématique : ν à -40 °C (mm^2/s)			<150
Point d'éclair en coupe fermée (°C)	≥140	≥130	≥95
Point d'écoulement (°C)	≤-30	≤-45	≤-60
Stabilité à l'oxydation • Indice d'acide (mg KOH/g) • Dépôt en masse (%)	 ≤0,40 ≤0,10		
Tension de claquage à 50 Hz (kV) • Huile non traitée • Huile traitée	 ≥30 ≥50		
Tan δ à 90 °C, 40/60 Hz	≤0,005		
Gassing-absorption (mm^3/min)			

Tableau I.4 : Classes et spécifications des huiles minérales selon la norme CEI 60296 [15].

Les huiles pour transformateurs de classe II sont les plus répondues. Les huiles de classe I sont, en général, de base paraffinique et sont utilisées dans les pays où la température ne descend jamais très bas. Les huiles de classe III sont peu répondues et toujours naphténiques [11]. Une huile minérale a une permittivité relative de l'ordre de 2 et un facteur de dissipation diélectrique égal à quelques 10^{-4} à 20 °C et à 50 Hz. Sa rigidité diélectrique peut atteindre 70 kV/mm (valeur efficace). Les valeurs de crête de tensions de claquage au choc de foudre positif varient peu d'une huile minérale à l'autre (70 à 100 kV) alors que, en choc négatif, l'influence du raffinage est marquée (110 à 240 kV) [16]. Toutefois, ces valeurs impliquent que l'huile soit sèche et exempte de toutes impuretés et, de plus dégazée [6]. Un des avantages de l'huile minérale et particulièrement des huiles naphténiques, réside dans le fait qu'elles ont une faible viscosité (le point d'écoulement des huiles minérales est en général inférieur à -30 °C [13]). Ceci permet une bonne évacuation de la chaleur et un démarrage à froid correct, mais aussi une bonne imprégnation des isolants cellulosiques. L'un des inconvénients des huiles minérales est leur inflammabilité. En effet, ces huiles possèdent un point d'éclair relativement bas (entre 140 et 150 °C). Ceci pose alors un problème pour les appareils installés près de la population tels que les transformateurs de distribution [17].

5.1.3. Utilisations des huiles minérales

Compte tenu de leur large disponibilité et de leur coût, les huiles minérales sont utilisées dans pratiquement tous les types de matériels électriques. Environ 90 % de la production de

l'huile minérale est utilisée dans les transformateurs. Les huiles sont également employées dans les diviseurs capacitifs, les traversées, les changeurs de prises, les disjoncteurs et les câbles [13].

6. PAPIER ET CARTON IMPREGNES D'HUILE MINERALE

Après avoir décrit les propriétés respectives du papier et d'imprégnant, les principales modifications apportées à ces propriétés, quand les deux constituants sont en présence, seront étudiées. Ces modifications ont une grande influence sur le comportement d'une isolation face aux contraintes électriques ou thermiques auxquelles cette isolation peut être soumise.

6.1. Propriétés électriques

6.1.1. Résistance et conductivité

La conduction ionique est prépondérante dans un papier ou carton imprégné d'huile soumis à une tension continue ; elle dépend de l'eau fixée sur les molécules de cellulose ; l'eau peut également favoriser la dissolution des impuretés ioniques présentes dans le papier et dans l'huile minérale [5].

La répartition des contraintes électriques sur le carton et sur l'huile minérale dépend de leurs résistances volumiques R_C et R_H respectivement ; pour un carton imprégné d'huile, on a la relation suivante :

$$\frac{E_H}{E_C} = \frac{R_H}{R_C} \qquad \text{(I.1)}$$

avec :

E_H : contrainte électrique sur l'huile ;

E_H : contrainte électrique sur le papier.

A 25 °C, le rapport des résistances volumiques est voisin de 0,05. Par contre sous un champ alternatif, la répartition des contraintes électriques dépend des permittivités relatives ε_c et ε_h des cartons et des huiles respectivement ; dans ce cas [5]:

$$\frac{E_H}{E_C} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_h} \qquad \text{(I.2)}$$

Le rapport des permittivités atteint 1,7 à 2 [5].

6.1.2. Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique

Le papier imprégné peut être considéré comme une association en série de la cellulose et de l'imprégnant. Ces caractéristiques (permittivité et facteur de dissipation diélectrique) dépendront étroitement de la masse volumique du papier [6]. Une réduction de la masse volumique conduit, en général, à une diminution importante des pertes diélectriques du papier imprégné. Les pertes diélectriques des papiers et cartons imprégnés dépendent de nombreux facteurs : humidité, nature de la pate à papier, traitement chimique et raffinage de celle-ci,

densité du papier, pureté de l'eau utilisée lors de fabrication du papier, contamination du papier et de l'imprégnant [5].

La permittivité relative varie avec la densité du papier et avec la permittivité relative de liquide d'imprégnation. La permittivité et le facteur de dissipation diélectrique du papier imprégné varient également avec sa teneur en eau. Celle-ci a, en particulier, une influence non négligeable sur la variation de ces caractéristiques avec la température [6].

6.1.3. Rigidité diélectrique

La présence d'un imprégnant est responsable de l'amélioration notable de la rigidité diélectrique d'un papier à l'état imprégné [6]. La rigidité diélectrique des papiers imprégnés dépend de nombreux facteurs : densité, épaisseur, impuretés (ions reparties dans le volume, points conducteurs, eau, etc.) [5]. La rigidité diélectrique décroit lorsqu'on augmente l'épaisseur et la densité [5]. Elle dépend également des conditions dans lesquelles elle est déterminée, en particulier, la géométrie de l'éprouvette et aux modalités d'application de la tension [6].

6.1.3.1. Rôle de décharges partielles

La rupture diélectrique doit débuter par des décharges au niveau de l'imprégnant, conduisant à la rupture totale de l'isolation dès l'apparition de la première décharge, quand la forme appliquée est continue ou sous forme d'impulsion. Par contre, en courant alternatif, les premières décharges apparaissent généralement à une tension inférieure à la tension pour laquelle il y a rupture. Les premières décharges apparaissent dans une isolation convenablement séchée et dégazée, sous un champ électrique relativement élevé, de 35 à 45 kV/mm en valeur efficace [6]. L'augmentation de la densité de papier a pour effet de transférer une plus grande fraction de la contrainte électrique sur l'huile. La nature de l'imprégnant influe également : plus sa permittivité se rapproche de celle de papier, mieux seront réparties les contraintes électriques sur l'isolation [5].

6.1.3.2. Influence de présence de vacuoles

La présence de vacuoles à l'intérieur d'une isolation est susceptible de diminuer sa tenue diélectrique, quelle que soit la forme sous laquelle est appliquée la tension, en favorisant l'amorçage de la rupture dans l'imprégnant qui conduit, sous certaines conditions à la rupture diélectrique. Dans tous les cas, il est important de réduire le nombre de vacuoles et leurs dimensions. Pour les condensateurs où le champ électrique imposé à l'isolation peut être plus élevé que dans un câble, les papiers sont choisis très minces, pour éliminer, grâce à un empilement d'un plus grand nombre de feuilles, les risques de chemins conducteurs dans l'isolation [6].

6.1.3.3. Influence de viscosité de l'imprégnant

Une viscosité élevée augmente généralement la rigidité diélectrique [6]. Cette influence de la viscosité de l'imprégnant se traduit encore par un effet de la température. Une augmentation

de cette dernière provoque une diminution de la viscosité et, de ce fait, une réduction de la rigidité diélectrique [6].

6.1.3.4. Influence de l'eau

Les caractéristiques diélectriques d'un papier imprégné sec ne sont pas affectées jusqu'à 90 °C. La présence d'eau à des teneurs dépassant 4,5 %, dans des papiers imprégnés d'huile minérale qui sont soumis à des contraintes électriques bien supérieures, soit 90 kV/cm au lieu de 10 kV/cm provoque un phénomène de dégradation à partir de 65 °C. Pour des champs supérieurs à 100 kV/cm, l'électrolyse de l'eau, contenue dans des papiers séchés et imprégnés à l'huile minérale, provoque la formation de bulles gazeuses qui deviennent le siège des décharges partielles [5].

6.1.3.5. Tenue aux impulsions de tensions

Quand un matériel est soumis à des surtensions de manœuvre ou de choc d'origine atmosphérique, la rigidité diélectrique d'un papier imprégné, dans ces conditions d'application de la tension, augmente en général avec la masse volumique et l'imperméabilité à l'air du papier [6].

6.2. Hygroscopicité du papier imprégné

Le papier imprégné et immergé dans l'huile s'humidifiera comme s'il était à l'air, quand le système papier-huile est exposé à une atmosphère humide. L'évolution de l'humidité quand il y a échange de celle-ci entre l'air et l'huile obéit à la loi suivante [6] :

$$dE = vS(h_m - h)dt \qquad \text{(I.3)}$$

avec :

dE : quantité d'eau qui pénètre dans l'huile pendant un temps dt ;

S : surface de séparation air-huile ;

h_m et h : sont respectivement, teneurs en eau de l'huile à l'équilibre et à l'instant considéré.

La vitesse d'échange d'humidité entre papier et l'huile est fonction de taux d'humidité du papier. Si le papier est sec, cette vitesse est faible. Elle devient beaucoup plus élevée dès que le papier devient plus humide, vers un taux d'humidité de 1 à 2 % [6].

6.3. Propriétés mécaniques

La rigidité mécanique diminue de moitié de sa valeur initiale à la température de 150 °C en 60 h de vieillissement accéléré [18]. Les caractéristiques chimiques du papier imprégné influent fortement sur la diminution des caractéristiques mécaniques. La présence de dérivés furaniques et les liaisons chimiques CO dans l'huile après vieillissement est, en effet, corrélée avec la rigidité mécanique [18].

7. CONCLUSION

Le papier presspahn sans imprégnation a une rigidité diélectrique médiocre à cause des aspérités et des cavités d'air qu'il contient. L'huile minérale a une rigidité diélectrique très élevée. Il est donc important d'imprégner le papier Kraft par l'huile isolante pour améliorer ses caractéristiques électriques pour supporter les contraintes sévères auxquelles l'isolation est soumise.

CHAPITRE II

VIEILLISSEMENT THERMIQUE DES ISOLANTS SOLIDES

La température est une contrainte sévère pour l'isolation en service. Les isolants subissent une dégradation continue quand ils sont soumis à une contrainte thermique combinée avec d'autres contraintes (mécanique et électrique). Pour cela la connaissance de mécanismes de dégradation des isolants solides est impérative pour estimer leur durée de vie et améliorer leur fiabilité en service. Dans ce chapitre, le vieillissement thermique des isolants solides a été étudié.

1. VIEILLISSEMENT THERMIQUE DES ISOLANTS SOLIDES

Le vieillissement thermique est une évolution lente et irréversible de la structure, de la composition et de la morphologie des matériaux, liée à leur exposition à des températures plus au moins élevées [19]. Il peut résulter de la superposition de mécanismes physiques et chimiques parmi lesquels l'oxydation par le dioxygène atmosphérique joue souvent un rôle prépondérant. Les processus chimiques conduisent à un changement de la structure chimique du matériau et les processus physiques amènent progressivement le polymère vers un équilibre thermodynamique [20]. Dans le domaine de l'isolation électrique, la contrainte thermique constitue une contrainte sévère de service pouvant affecter sérieusement les propriétés du matériau polymère et réduisant ainsi la durée de vie de câbles électriques et transformateurs.

1.2. Réactions chimiques

En général, les réactions chimiques induites par des dégradations chimiques sont les suivantes [21] :

- Réactions de coupures statistiques du squelette macromoléculaire ;
- Réactions de dépolymérisation ;
- Réactions de réticulation ;
- Réactions au niveau des groupements latéraux ;
- Réactions d'oxydation.

Ces réactions peuvent intervenir simultanément au cours de vieillissement [21].

1.2.1. Coupure de chaines statistiques du squelette macromoléculaire

Les coupures de chaînes se produisent sur des sites distribués de manière aléatoire dans le réseau macromoléculaire. Divers mécanismes chimiques peuvent être la cause de coupure statistique des chaînes (la thermolyse, l'hydrolyse, etc.) [22]. Il est généralement admis que la dégradation d'un polymère commence toujours par la rupture de liaison (scission primaire). Cette coupure résulte d'un apport d'énergie chimique, mécanique, photochimique ou thermique à la macromolécule ; lorsque cette énergie est concentrée sur une liaison et qu'elle est supérieure à l'énergie de liaison, la rupture est effective [23,24]. Le mécanisme de coupure de chaînes statistiques dans les polymères fait intervenir la stabilité thermique. En effet, il existe une corrélation entre l'énergie de dissociation des liaisons et la stabilité thermique des polymères (la stabilité est déterminée par la liaison la plus faible) ; l'énergie de la liaison la plus faible détermine donc dans une large mesure la stabilité globale du polymère.

Sur le plan de la structure, ces coupures de chaînes provoquent une diminution de la masse moléculaire moyenne dans le cas des polymères linéaires et une diminution du taux de réticulation dans le cas de polymères tridimensionnels (densité en pont du réseau). Les propriétés physiques telles que les propriétés optiques, élastiques et thermiques sont très peu affectées par les coupures de chaînes statistiques. Cependant, les coupures de chaines affectent considérablement les propriétés mécaniques car elles sont responsables de fragilisation du matériau [25]. On sait que la continuité des liaisons covalentes sur de grandes longueurs de chaîne confère aux polymères leur statut de matériaux industriels. La rupture de cette continuité va, bien sûr, se traduire par une détérioration des propriétés mécaniques [26]. La dégradation par coupures statistiques des chaînes macromoléculaires conduit à une diminution de densité de réticulation et donc de la température de transition vitreuse [26]. La figure II.1 représente les processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaires dans le cas de polymères linéaires et tridimensionnels. La figure II.2 donne les différents types de mécanismes chimiques conduisant à des coupures statistiques de chaînes.

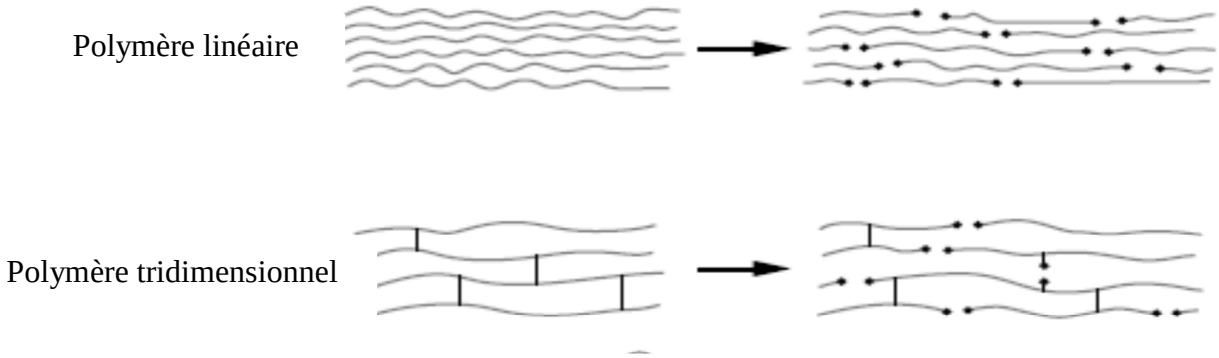
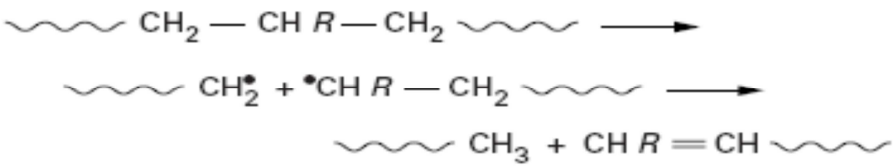
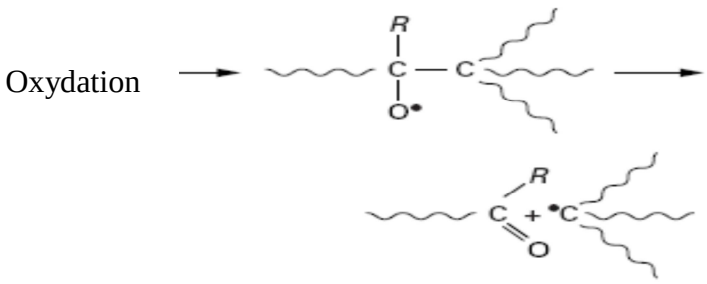


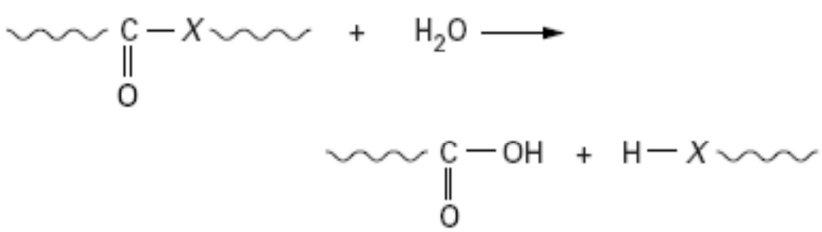
Figure II.1 : Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaires [41].



a) Thermolyse d'une liaison de la chaine, suivie d'une dismutation

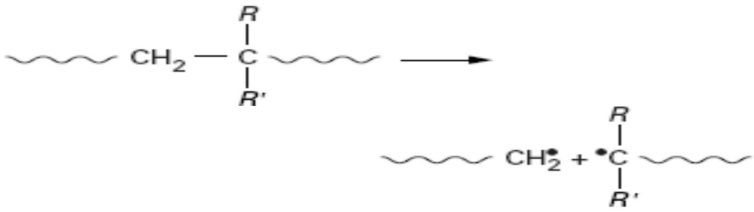


b) Coupure β d'un radical alkoxyle



avec X=0 (polyesters) ou NH (polyamides) par exemple

c) Hydrolyse d'un polycondensat



d) Radiolyse d'un polymère à carbone quaternaire

Figures II.2. Différents types de mécanismes chimiques conduisant à des coupures statistiques de chaîne [26].

1.2.2. Réactions de dépolymérisation

Les réactions de dépolymérisation sont comme leur nom l'indique, l'inverse des réactions de polymérisation. Elles font donc intervenir une élimination séquentielle de molécules de monomères, à partir d'un site particulièrement instable préexistant (par exemple extrémité de chaîne), ou résultant d'une coupure statistique [26]. Elles se produisent de façon plus au moins importante dans les divers types de dégradation. Un acte de dépolymérisation conduit à l'élimination d'un fragment moléculaire (monomère) et à une diminution très faible et très rapide de la masse moléculaire. Les réactions peuvent prendre naissance même en l'absence d'oxygène. L'évaporation des produits de scissions de plus bas poids moléculaires a pour double conséquence : d'une part une perte de masse du matériau, d'autre part la formation de produits volatils, susceptible d'être à l'origine de bulles gazeuses, elles-mêmes responsables de décharges partielles dans les isolations à haute tension [27].

1.2.3. Réactions de réticulation

Le processus de réticulation est caractérisé par la formation de ponts covalents entre les segments de chaînes voisines qui réduit la souplesse de l'isolant et son aptitude à l'allongement, ce qui a pour effet de le rendre cassant [28]. Pour le polyéthylène, par exemple, on observe une augmentation faible mais significative de l'allongement à la rupture [26]. La figure II.3 donne la représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel. La figure II. 4 schématise les mécanismes de réticulations liées au vieillissement.

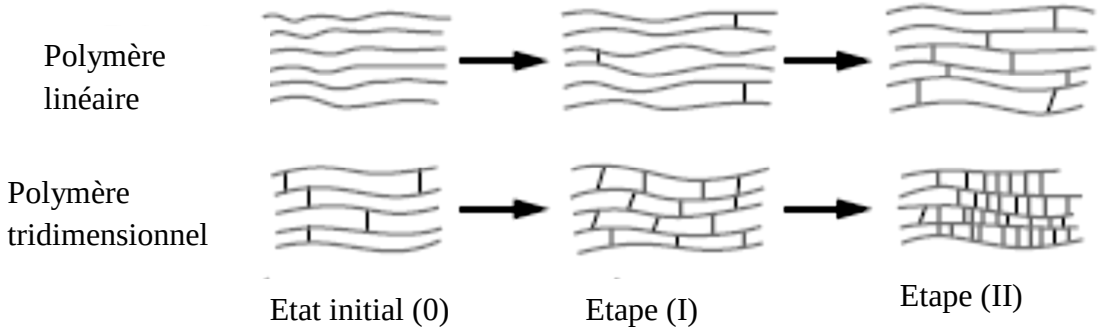
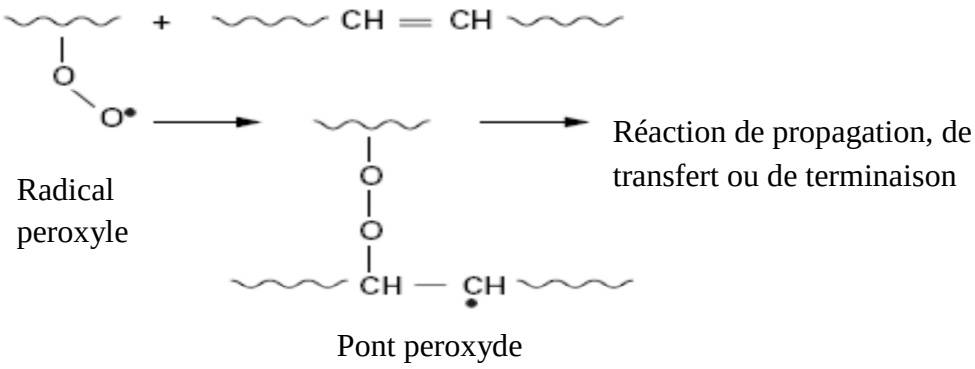


Figure II.3 Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel [26].

a) Réticulation par voie radiochimique



b) Oxydation de polymères composant des doubles liaisons dans la chaîne

Figure II.4. Mécanismes de réticulations liées au vieillissement [26].

Dans le cas des polymères, la réticulation se traduit par une augmentation de la concentration en nœuds de réseau. Elle s'accompagne d'une diminution du taux de gonflement et une augmentation de la température de transition vitreuse [25]. Les propriétés physiques du matériau sont peu affectées. Concernant les propriétés mécaniques, la réticulation conduit à une augmentation du module d'élasticité, de la contrainte à la rupture et de la température de ramollissement. Dans le cas de polymères initialement linéaires, une réticulation modérée peut également conduire à une augmentation de l'allongement à la rupture. Dans le cas réel de vieillissement, la réticulation est pratiquement toujours accompagnée de coupure de chaines [25].

1.2.4. Réactions au niveau de groupements latéraux

Les réactions de coupure de chaînes ou de réticulation modifient le squelette covalent des macromolécules et, à ce titre, ont une influence sur les propriétés mécaniques. Il existe une grande variété de processus chimiques intervenant sur les groupements latéraux sans coupure de chaines, ni réticulation, et donc sans effet sur les propriétés mécaniques, mais risquant d'affecter

d'autres propriétés des polymères, essentiellement les propriétés électriques et optiques [26]. Les réactions au niveau des groupements latéraux sont, généralement, accompagnées par une diminution de la résistance superficielle et de la rigidité diélectrique. Certains processus chimiques se traduisent par la formation d'espèces ayant des bandes d'absorption totalement ou partiellement situées dans le spectre visible (400 à 800 nm). Dans ce cas, les matériaux vont apparaître plus ou moins colorés, comme c'est le cas du PVC [26].

1.2.5. Réactions d'oxydation

L'oxydation se produit essentiellement dans la phase amorphe du polymère et elle conduit à [29] :

- Des coupures le long de la chaîne polymère qui réduisent la masse moléculaire du polymère (les chaînes deviennent plus courtes) et généralement de petites chaines volatiles si elles se produisent près des extrémités de chaines, mais aussi parfois, des ramifications voire une réticulation du polymère;
- Une modification des groupes latéraux de la chaine polymère, en particulier :
    - ✓ Des doubles liaisons susceptibles de réagir avec les radicaux et, ainsi de contribuer à la réticulation ;
    - ✓ Des produits d'oxydation : acides carboxyliques, cétones, aldéhydes, esters, etc.

La nature chimique des polymères et celle des agressions qu'ils subissent (thermique, photo ou radiochimique) font qu'ils sont le siège de processus radicalaires (production de radicaux libres) or, il est admis que les radicaux libres réagissent très rapidement avec l'oxygène [25]. Ils vont donc être à l'origine d'une réaction radicalaire en chaine plus au moins complexe suivant la nature chimique de la matrice polymère (homopolymère ou copolymère, saturé ou insaturé), mais aussi suivant la nature chimique des additifs et leur nombre (antioxydants, charges inertes ou réactives) [30].

Dans un polymère donné, ce sont les énergies de dissociation des liaisons C-H les plus faibles qui déterminent le site d'attaque préférentiel de l'oxydation [26]. Les éléments formés par ce type de vieillissement sont des groupes oxygénés : ester (O-C=O), éther (C-O-C) ou peroxyde (C-O-O-C) dans le cas d'une combinaison et/ou alcool (C-OH) ou acide dans le cas d'une dismutation. Pour toutes les utilisations dans lesquelles les isolants se trouvent en présence d'air, un processus d'oxydation lent, ayant pour conséquences la formation de produits acides qui augmentent la conductivité électrique, ainsi que la coupure des chaines qui est responsable d'une diminution de la charge de rupture [27].

2. VIEILLISSEMENT DU PAPIER IMPREGNE D'HUILE MINERALE

Les principaux agents susceptibles de dégrader la cellulose et les hémicelluloses sont l'eau (par hydrolyse) et l'oxygène (par oxydation) [31,32]. Par ailleurs, la cellulose se dégrade spontanément sous l'effet de la température (par pyrolyse au-delà de 300 °C) [33]. Il est difficile de distinguer la part propre à chaque mécanisme réactionnel car même à haute température le

papier n'est pas complètement exempte d'eau (d'où une synergie éventuelle) [4]. Nous résumons à la figure II.5 les divers mécanismes invoqués, la température y jouant systématiquement un rôle accélérateur. Ces trois réactions entrainent la rupture des macromolécules de la cellulose et réduisent le degré de polymérisation moyen.

2.1. Dégradation par pyrolyse

La pyrolyse est le mécanisme de décomposition de la cellulose (rupture de liaisons chimiques sous l'effet de la chaleur avec production de CO, CO_2, H_2O et H_2 principalement ; ce phénomène n'affecte sensiblement les qualités mécaniques qu'au-dessus de 150 °C [34].

Dans le cas de la cellulose, certains mécanismes de pyrolyse sont exothermiques : ils produisent de la chaleur et entretiennent ainsi la pyrolyse elle-même. Par ailleurs la pyrolyse peut s'accompagner d'une dilatation ou, au contraire, d'une contraction volumique locale. Ces phénomènes entrainent des contraintes mécaniques qui déforment l'isolation et contribuent à en dégrader les caractéristiques électriques [35]. La décomposition thermique de la cellulose conduit à la formation de bulles de gaz [36] dans le système d'isolation électrique. Compte tenu de leur très faible rigidité diélectrique par rapport à l'huile ou la cellulose, leur accumulation sous forme de bulles à des endroits où les contraintes diélectriques sont particulièrement élevées peut entraîner le claquage de l'isolation [36].

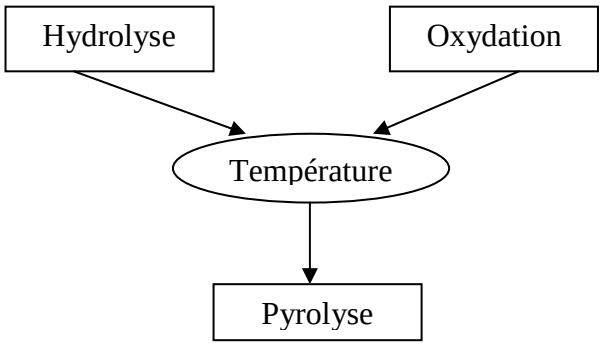


Figure II.5. Mécanisme de dégradation du papier [4].

2.2. Dégradation par hydrolyse

L'hydrolyse détruit les ponts d'oxygène qui se combinent avec des molécules d'eau, mais sans formation de sous-produits gazeux [35]. L'eau formée par pyrolyse et oxydation contribue à augmenter l'hydrolyse [5]. L'action de l'eau sur le papier se résume en coupure des liaisons glycosidiques conduisant ainsi à une diminution du degré de polymérisation. Si l'hydrolyse concerne des bouts de chaines cellulosiques, alors le sucre majoritairement formé est le D-glucose. D'autres sucres en C_5 et C_6 ont été signalés lors de l'hydrolyse de la cellulose [37] mais ces molécules pourraient être attribuées soit aux chaines hémicellulosiques soit à l'interaction de tels sucres (défauts locaux) dans la chaine cellulosique. Les sucres précédemment cités peuvent, par déshydratation acide, se transformer en dérivés furaniques [4].

La tenue mécanique du papier au contact de l'huile vieilli dans des tubes scellés remplis de nitrogène du papier est réduite de moitié quand la teneur en eau est augmentée de 100% [38].

La durée de vie du papier est réduite de moitié par rapport à sa valeur initiale quand la teneur en eau est doublée [39]. L'eau est la plus dangereuse des sous produits pour l'isolation parce que c'est un liquide conducteur. Quand l'eau remplit les aspérités du papier, il y crée une grande conductivité mais aussi augmente l'ionisation dans cette région [40]. La rigidité diélectrique du papier est ainsi diminuée.

2.3. Dégradation par oxydation

L'oxydation s'attaque spécialement aux ponts d'oxygène, ce qui dépolymérise la cellulose en produisant divers sous-produits, y compris les mêmes que la pyrolyse [35]. Ainsi les réactions d'oxydation et d'hydrolyse ne sont pas indépendantes l'une de l'autre [41]. L'oxydation totale de la cellulose produit de l'eau et du dioxyde de carbone [40]. La dégradation par oxydation de la cellulose n'est pas facilement dissociée de la dégradation par le seul effet de la température ; en effet la température est un paramètre très souvent présent lors du constat de dégradation de la cellulose (défaut thermique local ou généralisé touchant le papier). Le papier vieilli dans des cellules d'essais ouvertes au contact de l'air se dégrade 2,5 fois plus vite que celui vieilli dans des cellules remplies de nitrogène ou sous vide [40]. Le vieillissement du papier dans des cellules fermées est 40 à 50 fois moins vite que dans un transformateur ouvert [42].

2.4. Dépolymérisation progressive

Un papier de transformateur, à température normale, se dégrade principalement par hydrolyse et ce d'autant plus vite que le milieu (liquide diélectrique) est acide. On arrive ainsi à dépolymériser progressivement le papier alors que les concentrations de produits caractéristiques, tels que les dérivés furaniques, restent faibles. Un papier de transformateur soumis à une température très élevée subit une dégradation plus rapide (effet conjugué de la température, de l'hydrolyse, voire de l'oxydation), accompagnée par la formation de produits caractéristiques tels que les dérivés furaniques, à des concentrations nettement plus importantes [4].

L'état de vieillissement de la cellulose est essentiellement caractérisé par son degré de polymérisation [35]. Ce dernier se détermine par une mesure de viscosité d'une solution de papier dans le cupri-éthyle-diamine [5]. Si DP_0 est le degré de polymérisation à l'origine et DP le degré de polymérisation après dégradation, le nombre moyen η de scissions par chaine est [31]:

$$\eta = (DP_0/DP) - 1 \qquad \text{(II.1)}$$

La valeur initiale de DP_0 est de l'ordre de 1100 à 1300 [31]. Le degré de polymérisation peut décroitre au cours de vieillissement jusqu'à des valeurs très basses, 200 à 100 par exemple. Les caractéristiques mécaniques du papier en particulier la charge de rupture et la résistance à la compression diminuent avec la diminution de DP [5]. Les pertes diélectriques augmentent, mais la rigidité diélectrique ne commence à décroitre rapidement qu'en dessous d'un DP de 100 environ [5].

3. VIEILLISSEMENT DE L'HUILE MINERALE

Les principaux agents susceptibles de dégrader les huiles isolantes sont l'oxygène et l'humidité. L'oxygène se présente sous forme dissoute dans l'huile et l'humidité est présente dans le papier (même après séchage, il reste de l'humidité, supérieure à 0,2% en masse). L'oxygène et l'humidité conduisent respectivement à la dégradation de l'huile par oxydation et hydrolyse [17]. Le phénomène d'oxydation s'amplifie par la présence de catalyseurs et d'accélérateurs [43] dont les principaux éléments sont : l'humidité, les matériaux de construction d'appareils électriques, la chaleur, les vibrations et les efforts électriques.

3.1. Oxydation de l'huile minérale

L'oxydation de l'huile minérale résulte principalement de l'action de l'oxygène moléculaire et de la température en présence des matériaux de construction des appareils (cuivre, fer, cellulose, etc.). L'oxydation constitue le facteur prédominant dans le vieillissement des huiles minérales. On désigne ainsi un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissoute [44]. Il se forme tout d'abord des produits de réactions solubles (composés carbonyles, carboxyles) puis par polymérisation, des produits, qui sont plus au moins solubles, les dépôts étant appelés bous d'oxydation [11].

L'oxydation des huiles minérales croit avec la température et la concentration en oxygène. La vitesse de réaction double approximativement tous les 8 à 10 °C, à partir de 60 °C [11].

3.2. Vieillissement de l'huile minérale par l'humidité

Le phénomène par lequel les huiles isolantes sont dégradées par l'eau est l'hydrolyse. La quantité de l'humidité dans la cellulose varie entre 0,5 et 3% de la masse totale, même après séchage [45]. Suite à une élévation de la température, elle est drainée en dehors du papier qui constitue l'isolant solide, vers l'huile du transformateur. Elle est aussi un des produits de composition de la cellulose [45] et peut également pénétrer en prévenance de l'atmosphère du fait que les transformateurs de puissance sont souvent respirants [46]. Les propriétés diélectriques de l'huile sont fortement affectées par son humidité. La conductivité n'est affectée que pour des teneurs en eau supérieurs à la saturation. Par contre, la rigidité diélectrique diminue fortement lorsque l'humidité relative dépasse 50% [11]. La solubilité de l'eau dans l'huile est donnée en mg/kg ou ppm. Elle dépend de l'état de l'huile, de la température et de type d'huile. La variation de solubilité de l'eau dans l'huile est exprimée par la relation suivante [47] :

$$W_s = W_{oil} e^{(-\frac{B}{T})} \qquad \text{(II.2)}$$

où :

W_s : solubilité de l'eau dans l'huile (mg/kg ou ppm) ;

T : température absolue de l'huile (K) ;

W_{oil} et B : constantes propres au liquide.

Plus la température augmente et plus la solubilité de l'eau dans l'huile est importante. Cette variation de la solubilité avec la température peut se révéler comme problématique. En effet, lorsque l'appareil est chaud, l'eau peut se dissoudre en plus grande quantité et lorsque l'appareil refroidit, la solubilité de l'eau diminuant à nouveau peut laisser apparaitre de l'eau libre.

3.3. Vieillissement de l'huile minérale par décharges partielles

Sous l'effet du champ électrique et des inhomogénéités locales (gaz, humidité, particules), il peut se former des micro-décharges qui décomposent l'huile en générant des gaz [17]. Les décharges partielles sont, en général, localisées et leur énergie, comparativement à celle d'un arc électrique, est faible. La persistance des décharges partielles entraine cependant une dégradation locale progressive de la partie solide de l'isolation imprégnée, qui vieillit alors rapidement [11]. Les décharges partielles conduisent à la formation de gaz (hydrogène essentiellement et hydrocarbures légers) [11].

3.4. Vieillissement de l'huile minérale par la température

On parle souvent de stabilité thermique pour définir le comportement du produit à température élevée, en faisant abstraction de toute autre contrainte telle que l'oxydation, l'hydrolyse ou les décharges partielles. L'effet de la température sur le vieillissement d'une huile est souvent défini comme la pyrolyse. Dans les conditions normales d'utilisation des transformateurs (température située entre 80 et 100 °C), la stabilité des liquides isolants existants est largement suffisante. La température agit donc principalement comme catalyseur et non comme déclencheur. Cependant, il peut y avoir des points chauds dans certaines parties du transformateur qui dégradent l'huile [11].

L'oxygène joue un rôle prépondérant dans la décomposition thermique des huiles, pour les températures de 175 à 235 °C. Les gaz obtenus sont l'oxygène, les hydrocarbures légers et les oxydes de carbone CO et CO_2 [48].

4. CONSEQUENCES DE VIEILLISSEMENT DE L'HUILE MINERALE

Les conséquences de vieillissement de l'huile minérale sont [11, 17] :

- Une augmentation des pertes diélectriques ;
- Une augmentation de la viscosité liée aux boues d'oxydation, d'où une diminution de la capacité à évacuer la chaleur ;
- Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis de la cellulose et des parties métalliques, liée à la formation d'acides carboxyliques et l'augmentation d'acidité ;
- Une augmentation de la teneur en eau liée à l'oxydation.

5. VIEILLISSEMENT DU COMPLEXE PAPIER-HUILE

Les phénomènes de vieillissement thermique de chaque composant restent essentiellement les mêmes, mais on constate en particulier que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement du papier soit par leur action propre, soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile ; par exemple la vitesse de dégradation du papier peut être 10 fois plus rapide dans l'huile que dans un diélectrique chloré qui ne s'oxyde pas [31].

Les phénomènes de vieillissement suivent une même cinétique jusque vers 120-130 °C ; au-delà la dégradation est plus rapide [31]. On admet d'ailleurs que la température du point chaud ne doit pas dépasser 140 °C car outre l'augmentation de la vitesse de dégradation, des bulles d'air et de vapeur d'eau risquent de se former [5]. Les produits de composition du papier et de l'huile sont en partie identiques ; il est très difficile de les attribuer à l'un ou l'autre des composants. On constate cependant que la quantité globale de CO et de CO_2 est corrélée avec le vieillissement du système [5].

D'une manière générale, les phénomènes suivants sont observés dans la dégradation thermique du papier imprégné d'huile minérale :

- ✓ Pour un papier imprégné neuf, la valeur de DP varie entre 1000 et 1200 [49]. L'exposition de l'isolation à une température continue conduit à la rupture des chaines de la cellulose et ainsi la valeur de DP diminue [49].
- ✓ La dégradation de la cellulose amène à la formation de l'eau, acides et gaz dans l'huile [50]. Par ailleurs, les composés furaniques et alcools peuvent être trouvés comme sous produits de décomposition [51]. Ces sous produits augmente la conductivité et le facteur de dissipation électrique de l'isolation qui, finalement, augmente le niveau du vieillissement thermique [52]. La figure II.6 présente la dépendance entre l'augmentation de tan δ, mesuré entre 0,7 et 6,1 kV/mm, pour un échantillon du papier imprégné d'huile de 0,148 mm d'épaisseur, en fonction du temps du vieillissement thermique à la température de 110 °C [53].

Par exemple, après un vieillissement en cellule de 7 jours à 140 °C, le DP du papier est de 200, les pertes diélectriques de l'huile sont de l'ordre de 0,01 et la rigidité diélectrique du papier a décru de 25 % seulement [54]. Dans d'autres essais, des vieillissements réalisés dans des cellules en présence d'air produisant une réduction de 50% de la charge de rupture du papier, conduisant à des indices d'acidité de l'huile ne dépassant pas 0,18 mg KOH/g, la résistivité restant supérieure à 10^{12} Ω.cm [55]. Dans des transformateurs désaffectés ou réparés après 20 à 30 ans de service, des DP de l'ordre de 200 ou même 100 ont été mesurés, la teneur en eau du papier variant de 1,6 à 4,7 %. Dans des appareils ayant 10 ans de service et un taux d'humidité de l'huile de moins de 10 ppm, la décroissance du DP du papier s'est révélée être inférieure à 10 % [55].

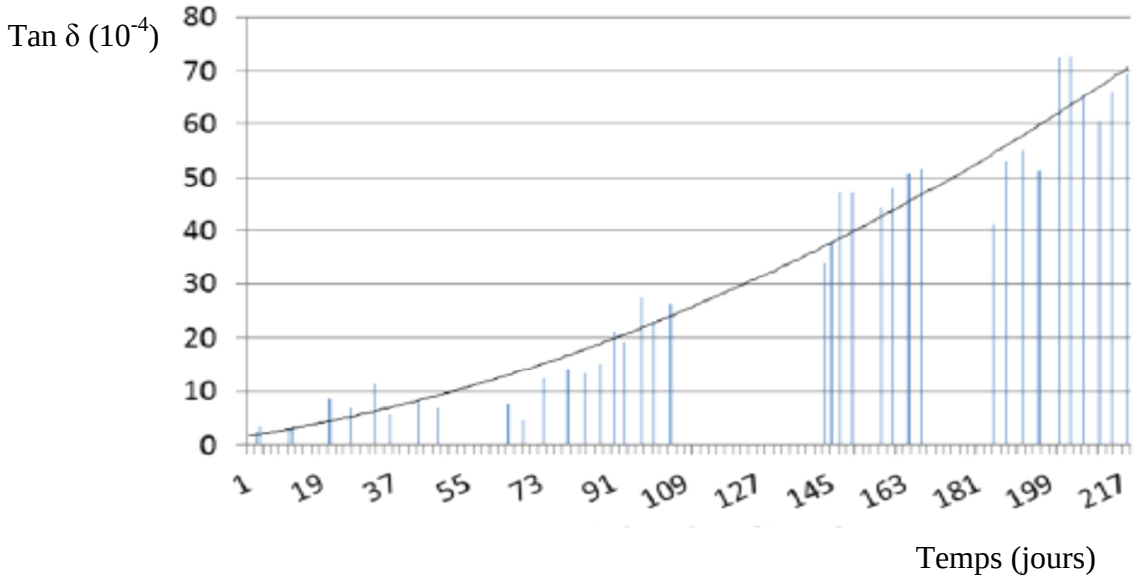


Figure II.6. Augmentation de tan δ en fonction du temps de vieillissement à 110 C [53].

6. CONSEQUENCE DES DEGRADATIONS DU PAPIER IMPREGNE

Différents paramètres caractéristiques du comportement électrique d'un isolant traduisent un vieillissement du matériau [31] :

- La résistance d'isolement diminue (pollution de surface, pénétration d'eau dans les solides, augmentation de la concentration d'humidité dans les huiles) ;
- La capacité diminue et le facteur de pertes diélectriques augmente ;
- L'indice de polarisation diminue (le courant de conduction devient prépondérant par rapport au courant d'absorption) ;
- La rigidité diélectrique diminue (apparition de pointes par corrosion, décollement entre l'isolant et les électrodes, bulles, etc.);
- Le taux de décharges partielles augmente (la taille des cavités augmente).

7. ENDURANCE THERMIQUE DU PAPIER PRESSPAHN IMPREGNE D'HUILE

7.1. Travaux relatifs à l'endurance thermique des polymères

L'effet de la température sur les isolants électriques a été examiné en 1930, puisque Montsinger [56] avait présenté une règle empirique qui stipule que le doublement de la durée de vie pour un abaissement de 10 °C de la température du papier imprégné d'huile utilisé dans les transformateurs. Dakin [57] formule une loi 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. Dans les années 1970, de nombreux travaux plus significatifs ont été réalisés pour l'étude de l'endurance thermique des diélectriques [58-61]. Au fil des années, plusieurs méthodes dites conventionnelles, fondées sur la loi d'Arrhenius, relatives aux vitesses de réactions chimiques ont été développées et publiées dans la CEI 216 [62]. Montanari a exploité ces méthodes conventionnelles pour étudier l'endurance thermique des isolants utilisés dans les câbles haute tension [63].

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

Le principe de cette méthode est le suivant : on soumet les matériaux à l'action prolongée de la température, puis on détermine l'évolution d'une ou plusieurs propriétés P en fonction du temps d'exposition, ce qui permet de tracer la courbe des variations P=f(t) (figure II.7) [28]. Le choix d'une valeur limite de la propriété P_0 permet de déterminer les temps pour lesquels cette limite est atteinte ou durée de vie et ceci pour plusieurs températures de vieillissement. En répétant les essais à diverses températures, il est possible de tracer une courbe de durée de vie t=f(t) (figure II.8).

7.3. Indice de température

Généralement, on s'intéresse à l'indice de température qui est, par définition, le nombre égal à la température exprimée en degrés Celsius qui correspond sur le graphique d'endurance thermique à un temps donné normalement égal à 20000 h [64]. Certains chercheurs prennent ce temps égal à 25000 et même 40000 h [65,66]. Par extrapolation, on déduit de la courbe d'endurance thermique la température T correspondant à une durée de vie conventionnelle servant de référence D. Cette température est appelée « Indice de Température IT » du matériau considéré. En choisissant successivement comme propriété, une caractéristique mécanique et une caractéristique électrique, on pourra définir un indice mécanique et un indice électrique. Il appartiendra ensuite aux utilisateurs de ces matériaux de choisir, en fonction de leur problème particulier, des matériaux ayant des indices situés dans la gamme de températures qui leur convient [27,28]. Les matériaux isolants solides sont classés suivant leur indice de température.

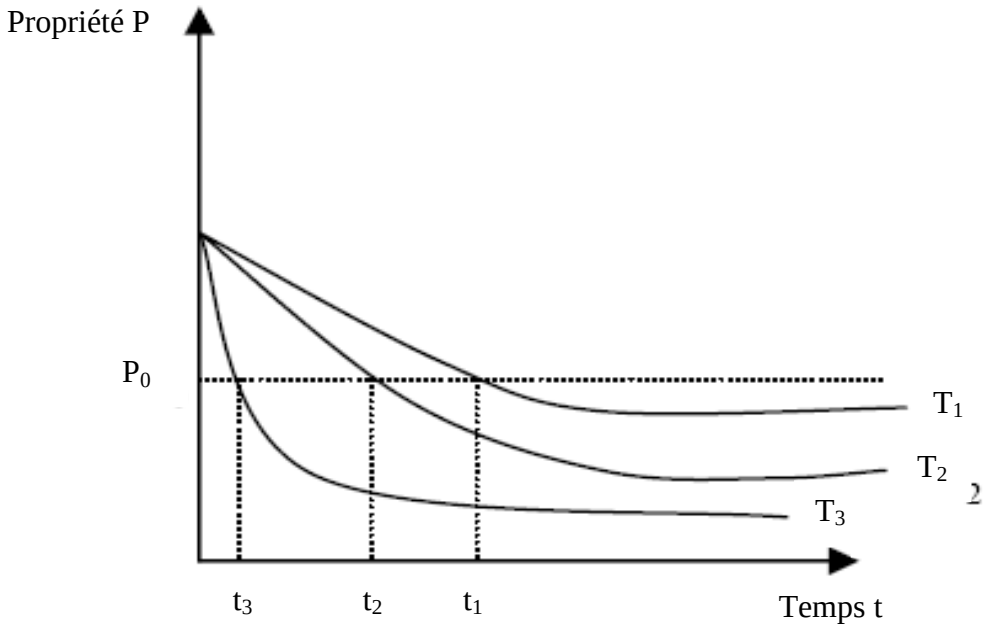


Figure II.7. Variation de la propriété P en fonction du temps de vieillissement pour différentes températures [28].

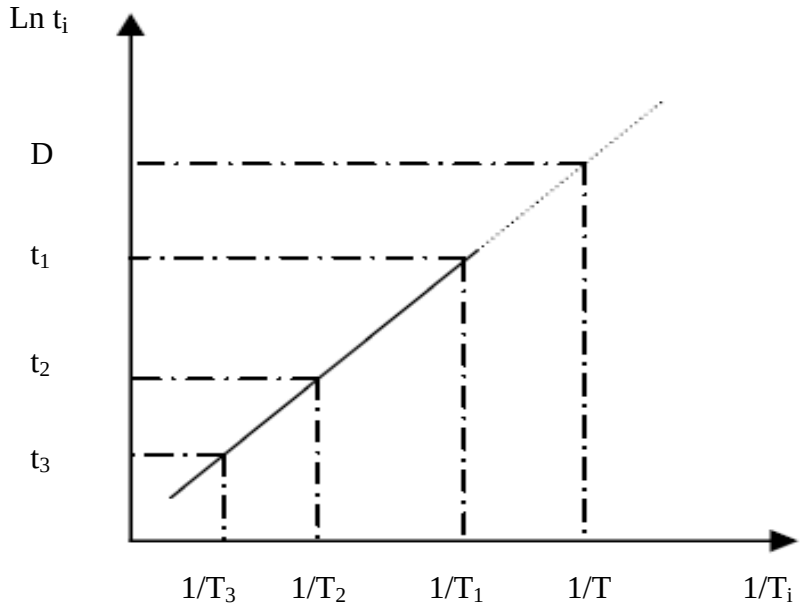


Figure II.8. Variation du logarithme de la durée de vie des polymères en fonction de l'inverse de la température [28].

7.4. Choix des caractéristiques mesurées et des critères de fin de vie

Généralement, on choisit une caractéristique électrique (tension de claquage, résistance d'isolement par exemple) et une caractéristique mécanique (contrainte de rupture en flexion, allongement à la rupture en traction, etc.). On peut éventuellement associer une caractéristique physique, reflétant de plus près le mécanisme même de dégradation (perte de masse par exemple) [28]. Le critère de fin de vie est déterminé pour chaque propriété comme étant la limite inférieure de cette caractéristique, au-delà de laquelle, le matériau n'est plus apte à remplir l'emploi auquel il est destiné, dans le matériel où il sera utilisé [27].

La publication CEI 216-1 [65] donne deux façons de définir le critère de dégradation, toutes les deux étant également valables :

- ✓ Par le pourcentage d'augmentation ou de diminution de la valeur initialement mesurée pour la propriété qui est généralement 50% de la valeur initiale de la propriété mécanique ou électrique. Pour la perte de masse, le critère peut être choisi égale à 3% de la valeur initiale ;
- ✓ Par une valeur fixe de la propriété. Cette valeur peut être choisie en fonction des exigences normales en service.

7.5. Durée de vie, modèle d'Arrhenius et vitesse de dégradation

La durée de vie est le temps nécessaire pour qu'une propriété techniquement importante atteigne une valeur limite tel que le matériel puisse fonctionner de façon satisfaisante [67]. La vitesse de la réaction chimique représentant le phénomène de dégradation des polymères varie avec la température de vieillissement. L'expression de cette vitesse a été établie par Arrhenius ; elle est donnée par la relation suivante [67] :

$$V = V_0 \exp(-\frac{E}{KT}) \qquad \text{(II.3)}$$

avec :

E : énergie d'activation du phénomène, en J/mole ;

K : constante de Boltzmann des gaz parfaits (8,314 J/mole. K) ;

V_0 : constante ;

T : température absolue, en K.

La durée de vie t d'un matériel isolant solide en fonction de la température de vieillissement selon le modèle d'Arrhenius est donnée par [68] :

$$\ln t = A + \frac{E}{RT} \qquad \text{(II.4)}$$

où :

A : constante caractéristique du matériau ;

R : constante des gaz parfaits ;

T : température absolue ;

E : énergie d'activation du phénomène.

Lorsqu'un processus unique gouverne la dégradation en vertu de la loi d'Arrhenius, le graphique d'endurance thermique ou la courbe de durée de vie est une droite sur un diagramme où sont portés en ordonnées le logarithme du temps et en abscisses l'inverse de la température. Dans certains cas, cette caractéristique peut avoir une cassure [69]. D'une manière générale, on peut admettre pour le matériel des durées de vie de 25 à 30 ans pour une utilisation annuelle de 2000 à 7500 h environ. Pour du matériel plus petit, des durées de vie de 20000 à 100000 h sont probablement plus réalistes [70].

7.6. Endurance thermique du papier presspahn imprégné d'huile

7.6.1. Facteur de dégradation

L'évolution du facteur de dégradation η du papier qui est égal au nombre de ruptures produites en moyenne par chaîne comportant initialement 1000 motifs élémentaires, en fonction de la durée de vieillissement est donnée par l'équation [6] :

$$\eta - \eta_0 = k_n t \qquad \text{(II.5)}$$

avec :

η_0 : ordonnée à l'origine ;

k_n : pente de la droite, représentant statiquement le nombre moyen de scissions qui se produisent dans une chaine par jour et, par conséquent la vitesse de dégradation ;

t : temps de vieillissement en jours.

7.6.2. Vitesse de dégradation du papier imprégné

La vitesse de dégradation augmente avec la température de vieillissement. La dégradation du papier imprégné est régie par la loi d'Arrhenius qui s'écrit [6] **:**

$$\log k_{\eta} = -\frac{E}{RT} + K \qquad \text{(II.6)}$$

avec :

E : énergie d'activation de la réaction de dégradation considérée ;

K : constante ;

R : constante des gaz parfaits.

Aux températures comprises entre 100 et 130 °C, cette énergie d'activation est de l'ordre de 85 KJ/mole.

7.6.3. Durée de vie du papier imprégné d'huile minérale

La température de vieillissement T et le temps t nécessaires pour atteindre un état de dégradation caractérisé par un certain facteur η sont liés par la relation suivante [6] :

$$\log t = \frac{E}{RT} + \log(\eta - \eta_0) + K \qquad \text{(II.7)}$$

Cette relation permet au constructeur d'estimer directement les durées de vie en fonction des températures susceptibles d'être atteintes localement dans une isolation.

7.7. Lois de vieillissement du complexe papier-huile

Plusieurs lois permettent d'évaluer le vieillissement du complexe papier-huile en fonction de la température.

7.7.1. Loi de Montsinger

La loi de Montsinger est de la forme [5] :

$$L = C \exp[\frac{-\ln 2}{\Delta\theta}\theta] \qquad \text{(II.8)}$$

avec :

L : durée de vie ;

θ : la température en °C ;

Δθ : l'écart de température correspondant au doublement ou à la réduction de moitié de la durée de vie, il est égal à 6 °C ;

C : constante.

7.7.2. Loi de Dakin

Si on prend comme paramètre caractéristique du vieillissement un facteur de dégradation η et η_f une valeur limite, la durée de vie L a pour expression [5] :

$$\log L = (\eta_f - \eta_0) - A\log(e) + \frac{[B\log(e)]}{T}$$

$$\log L = a + (\frac{b}{T}) \qquad \text{(II.9)}$$

avec :

η_0 : l'ordonnée à l'origine résultant de la période initiale ;

A, B, a, b: constantes ;

e = 2,718.

8. CONCLUSION

Le vieillissement thermique et du papier presspahn et de l'huile restent essentiellement les mêmes, mais on constate en particulier que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement du papier soit par leur action propre, soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile [5]. L'oxydation et l'hydrolyse sont de mécanismes de dégradation les plus prépondérants. L'eau accélère fortement le vieillissement, car elle se fixe principalement dans le papier. Par contre l'effet de l'air n'est pas toujours mis en évidence, car l'oxygène réagit surtout avec l'huile [5].

CHAPITRE III

MODELE STATISTIQUE DE WEIBULL

La rupture est un phénomène aléatoire : pour des échantillons placés dans des conditions expérimentales identiques, on n'obtient pas une valeur unique du champ de rupture mais une distribution de valeurs. Il est donc nécessaire de tester un grand nombre d'échantillons identiques. Ce caractère statistique pourrait s'expliquer par l'existence d'hétérogénéités (ou de défauts) microscopiques locaux dans le matériau diélectrique. Pour cela, il est nécessaire de mener une analyse statistique sur la dispersion des tensions de rupture afin d'en déduire éventuellement des lois de vieillissement. Par conséquent une étude statistique sur la dispersion des tensions de rupture est indispensable, dont nous présentons le modèle statistique de Weibull.

1. MODELE STATISTIQUE DE WEIBULL

La fiabilité d'un système ou d'un composant est la probabilité conditionnelle à un âge donné de remplir sa fonction, à l'intérieur des limites de performances spécifiées pour la période de temps et sous des contraintes aux conditions de fonctionnement [71].

Les principales lois statistiques utilisées en fiabilité sont les lois : exponentielle, de Weibull, de Gumbell, de valeurs extrêmes, normale et log-normale [72,73]. Dans le cas des isolants solides, les distributions de Weibull et log-normale sont les plus utilisées [74].

1.1. Bases du modèle

A l'origine, le modèle statistique de Weibull a été établi en mécanique. Il exprimait la probabilité de rupture d'une chaine en fonction de la probabilité de rupture d'un maillon [75]. La rupture d'une chaine 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 chaine de n maillons s'exprime en fonction de la probabilité P d'un seul de ces maillons de façon suivante :

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

Le modèle statistique de Weibull ou loi de chaîne s'écrit [75] :

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

avec :

P(X) : probabil ité de rupture ;

X : variable aléatoire ;

X_0 : paramètre d'échelle ;

X_s : paramètre de localisation ;

α: paramètre de forme.

Une description détaillée de cette méthode peut être trouvée dans les ouvrages de référence [72, 73, 76]. Il s'agit d'une bonne image de ce qui se passe dans un isolant solide où un claquage local entraîne la rupture de l'ensemble du diélectrique.

1.2. Modèle à deux paramètres

Dans ce cas X_s=0, le modèle de Weibull est dit à deux paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit [77] :

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

ou encore sous sa forme linéaire :

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

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

1.3. Modèles à trois paramètres

C'est le cas où $X_s \neq 0$. Introduire un paramètre de localisation consiste tout simplement à translater les courbes de probabilité cumulée selon l'axe des abscisses. Le modèle de Weibull devient [77] :

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

ou encore sous sa forme linéaire :

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

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

1.4. Signification des paramètres

1.4.1. Paramètre d'échelle

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

Pour $X=X_0$, $\log\ln\frac{1}{1-P(X)} = 0$ et on obtient $P = 1 - \frac{1}{e} = 63{,}2\ \%$.

1.4.2. Paramètre de forme

C'est un nombre sans dimension. C'est la pente de la caractéristique du modèle de Weibull dans sa représentation linéaire. Il est, par conséquent, l'image de dispersion de la variable aléatoire. Plus α est grand, moins les valeurs sont dispersées [78]. D'après Oudin et al. [79] :

- Si α <1, on a une « mortalité infantile » des échantillons qu'on appelle « défauts de jeunesse » ;
- Si α=1, la loi de Weibull correspond à la loi de Poisson ;

- Si $\alpha>1$, on a un vieillissement normale, c'est-à-dire une fatigue initialement nulle qui s'accentue avec le temps.

En général, dans le cas des polymères et pour les distributions en temps (essais à champ constant), on a : $0,5< \alpha<3$ [72].

1.4.3. Paramètre de localisation

La variable X_s apparait comme un seuil en dessous duquel le vieillissement se trouve considérablement ralenti, la durée de vie du matériau tend alors vers l'infini, c'est à dire $P(X< X_s)=0$. La valeur de seuil est forcément inférieure à la plus faible valeur trouvée expérimentalement. La recherche de seuil peut se faire en utilisant la méthode des moindres carrés ou la méthode de maximum de vraisemblance. Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la détermination du seuil de rupture diélectrique des isolants solides [80-82].

1.5. Avantages de la loi de Weibull

Après une étude comparative entre la loi de Weibull et la loi log-normale, Oudin a montré [79] que :

- ✓ Pour des probabilités faibles, l'hypothèse de la loi de Weibull correspond à des probabilités plus fortes et par conséquent plus pessimiste que l'hypothèse Laplacienne. On peut considérer que cette prévision plus pessimiste apporte plus de sécurité ;
- ✓ Le modèle de Weibull permet de retrouver la durée de vie donnée par la méthode de puissance inverse.

1.6. 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 2 dimensions dont l'une est le temps t au bout duquel se produit la rupture de l'isolant et l'autre le gradient de potentiel G qui a provoqué cette rupture ;
- Le claquage est localisé dans un petit volume de diélectrique. La rupture d'un élément microscopique entraine la rupture du système isolant sur toute son épaisseur.

Une base de la théorie statistique de la rupture diélectrique est présentée par Dissado [83].

1.7. Tenue diélectrique à long terme

La probabilité de claquage sous champ constant s'écrit [79] :

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

avec :

G : champ électrique appliqué ;

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

t : temps au bout duquel se produit le claquage ;

a : paramètre de dispersion en temps ;

b : paramètre de dispersion en champ.

avec n=b/a est le coefficient d'endurance électrique.

La relation (III.7) se met souvent sous la forme explicite [79] :

$$P(G,t,v) = 1 - \exp[-(\frac{G}{G_0})^b(\frac{t}{t_0})^a(\frac{V}{V_0})] \qquad \text{(III.8)}$$

où : G_0, t_0, et V_0 sont les valeurs d'échelle respectivement à la constante G, à la durée t, et au volume V, de l'isolant étudié.

1.8. Tenue diélectrique à court terme

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

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

avec :

G : champ électrique de rupture appliqué ;

V : vitesse de montée de rampe du champ électrique ;

t: temps au bout duquel se produit le claquage.

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

$$P(G) = 1 - \exp(-C\frac{G^{a+b}}{V^a}) \qquad \text{(III.10)}$$

Le modèle statistique est utilisé pour l'évaluation de la tenue diélectrique des isolants solides sous rampe de tension à vitesse de montée constante [78].

2. LISSAGE LINEAIRE PAR LA METHODE DU MAXIMUM DE VRAISEMBLANCE

L'application de cette méthode pour l'estimation des paramètres de la loi de Weibull à 2 paramètres a été faite par Cohen [84]. On définit la fonction de vraisemblance L par :

$$L = \prod_{i=1}^{N} f(G_i) = \prod_{i=1}^{N} \frac{dP(G_i)}{dG} \qquad \text{(III.11)}$$

Elle correspond à la probabilité d'avoir les valeurs de G_i, i de 1 à N, dans le même échantillon par application de la règle du produit des probabilités puisque les G_i sont indépendants.

2.1. Représentation à deux paramètres

La fonction de distribution est donnée par l'expression suivante [84] :

$$f(G_i) = \frac{\alpha}{G_0}\left(\frac{G_i}{G_0}\right)^{\alpha-1} \exp - \left(\frac{G_i}{G_0}\right)^{\alpha} \qquad \text{(III.12)}$$

On cherche le maximum de la fonction de vraisemblance par rapport aux variables qui sont directement les paramètres de Weibull :

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \text{ et } \frac{\partial L}{\partial G_0} = 0.$$

La résolution du système d'équations conduit aux valeurs de α et de G_0.

3. CONCLUSION

La tenue diélectrique des isolants solides est souvent caractérisée par une forte dispersion au niveau des tensions de claquage. Une approche statistique du phénomène s'impose afin d'exploiter rationnellement des résultats répartis de façon aléatoire. Dans le domaine de la rupture diélectrique des isolants solides, le modèle statistique de Weibull est le plus utilisé. Cet outil mathématique permet de tirer des renseignements à caractère fondamental de la forme des courbes de dispersion (facteur de forme, champ de seuil). Pour le lissage des points expérimentaux et la détermination de facteurs de forme et d'échelle, la méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée.

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

Le but de ce chapitre est d'étudier l'effet du vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du papier presspahn imprégné d'huile utilisé dans les transformateurs de haute tension. Une analyse statistique des valeurs obtenues de la rigidité diélectrique a été faite en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres qui a été décrit dans le chapitre III. Les essais ont été réalisés à l'Entreprise Nationale Electro - Industries (ENEL) d'Azazga.

1. TECHNIQUES EXPERIMENTALES

1.1. Vieillissement

A partir de feuilles de papier de presspahn de 2 m x 1,2 m et 1 mm d'épaisseur, de classe C (105 °C) des plaques de 20 cm x 20 cm ont été découpées et séchées dans une étuve à air ventilée à 100 °C. Ces plaques ont été, d'abord, imprégnées avec une huile isolante connue sous le nom commerciale « BORAK 22» à la température de 100 °C. La figure IV.1 montre une plaque de polymère avant vieillissement. Ensuite, elles ont été soumises à un vieillissement thermique dans des étuves à air ventilée réglées à plusieurs températures : 130 °C, 140 °C et 150 °C (figure IV.2). Le vieillissement a été réalisé jusqu'à la dégradation du matériau.

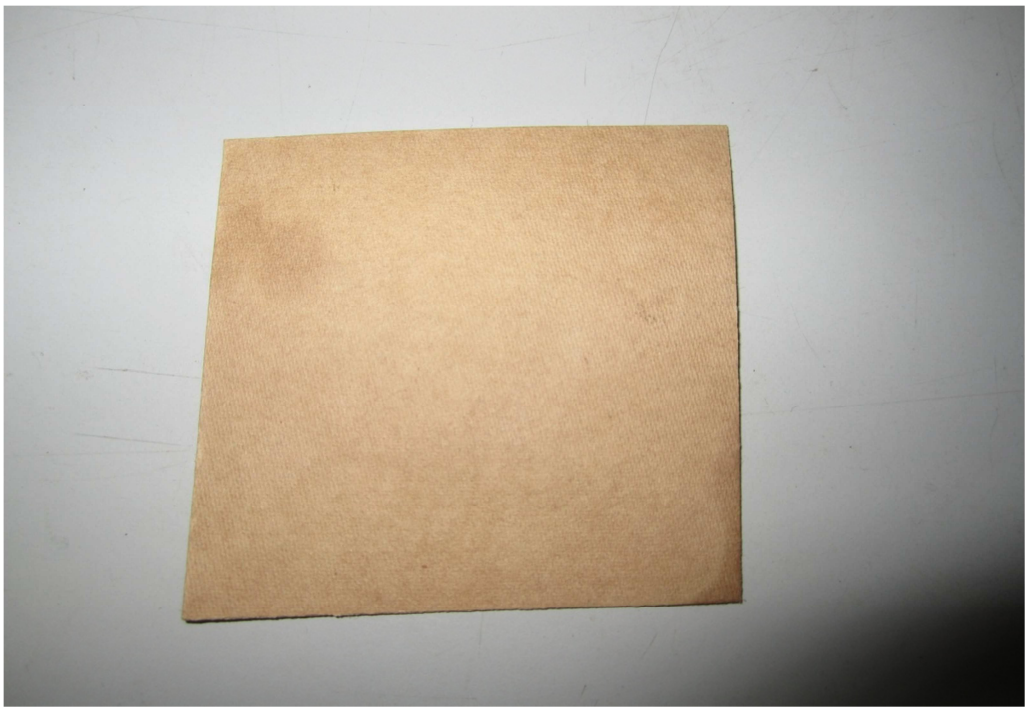


Figure IV-1 : Plaque du papier presspahn avant vieillissement thermique.

1.2. Echantillons

Des plaques du polymère ont été prélevées après des intervalles de temps de 500 h. Ces plaques ont été découpées en éprouvettes de forme carrée de 5,5 cm de coté. (Figure IV.3), Comme nous l'avons dit auparavant, la rupture est un phénomène aléatoire. Par conséquent, pour chaque point de mesure (prélèvement), le nombre d'échantillons soumis aux essais de claquage est de 50.

Figure IV.2 : Etuve à air ventilée utilisée pour les essais de vieillissement thermique.

Figure IV.3 : Échantillon de papier presspahn imprégné d'huile vieilli à 130 °C pendant 3000 h.

1.3. 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.4 montre des échantillons en cours de conditionnement dans le dessiccateur rempli de gel de silicone régénéré à neuf.

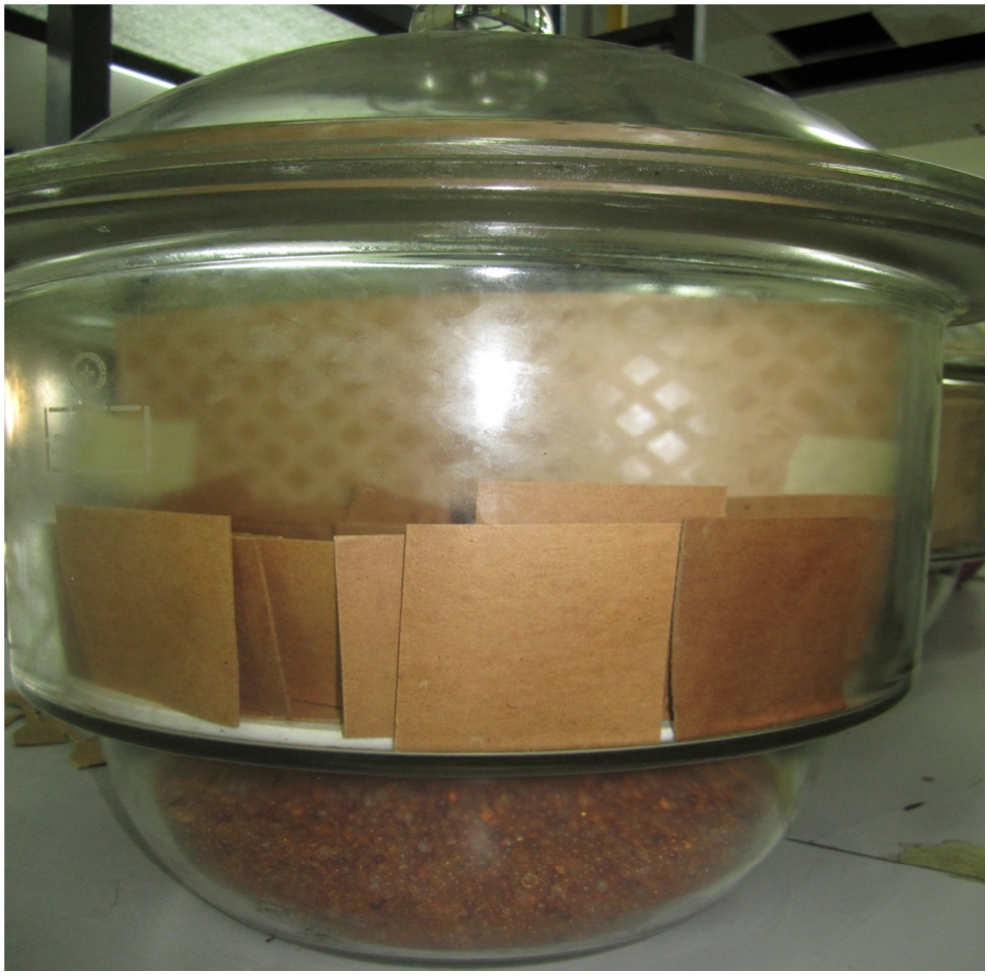


Figure IV.4 : Echantillons de papier en cours de conditionnement dans le dessiccateur.

1.4. Essais de claquage

L'essai consiste à soumettre l'échantillon considéré à une rampe de tension de vitesse 1 kV/s jusqu'au claquage. Après perforation, l'épaisseur de l'éprouvette a été mesurée au point de perforation. La rigidité diélectrique a été calculée comme le rapport de la tension de rupture et de l'épaisseur du matériau au point de perforation. La tension a été délivrée par un générateur de haute tension présenté à la figure IV.5. Il comprend une cellule d'essai munie d'une paire d'électrodes planes en laiton d'un diamètre de 6 mm remplie de l'huile minérale « Borak 22 » pour éviter tout contournement (figure IV.6).

Les caractéristiques de ce générateur sont les suivantes :

- tension d'alimentation : 100-130/ 200-240 V, 50/60 Hz ;
- vitesse de montée : 0,5-5 kV/s ;
- plage de mesure de tension numérique 0-100 kV (valeur efficace) avec une précision de ± 1 kV ;
- temps de coupure maximum : 4 ms ;
- le bac comprend deux électrodes de diamètre 6 mm ; sa capacité est de 0,4 l.

Figure IV.5. : Générateur de haute tension utilisé dans les essais de claquage.

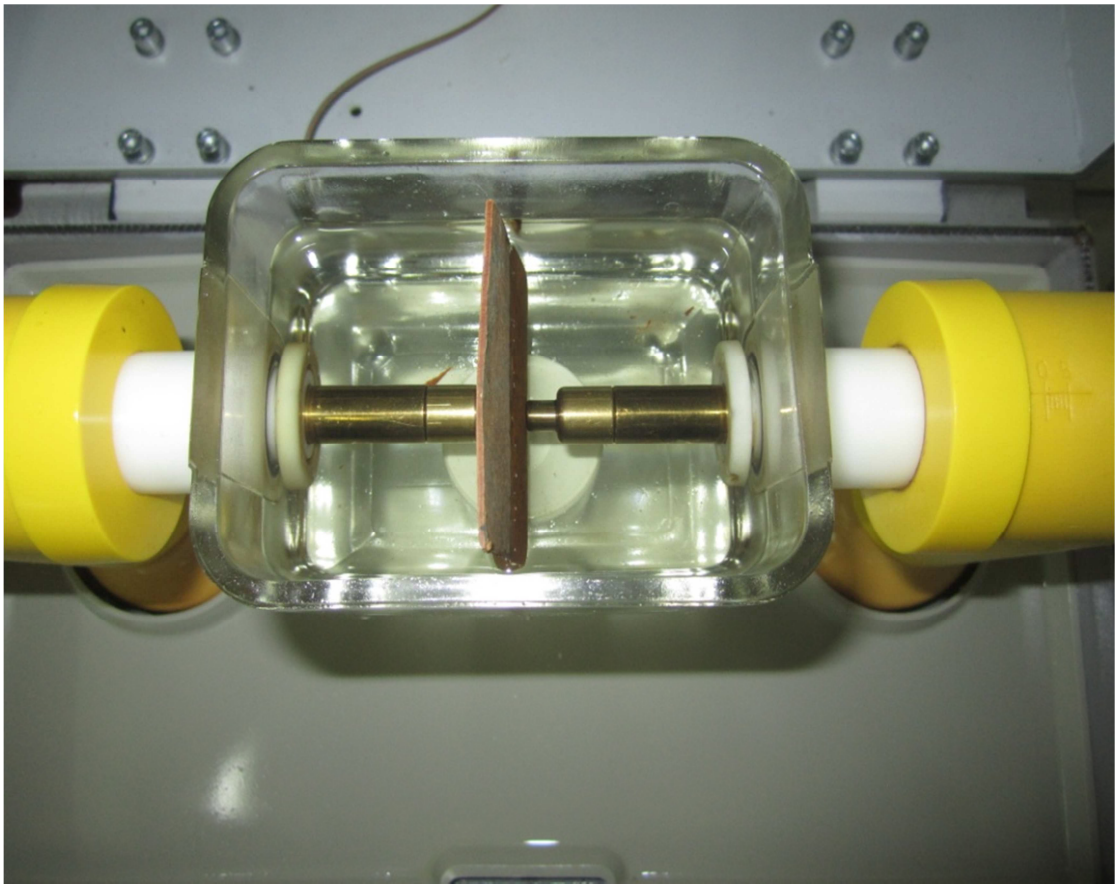


Figure IV.6 : Cellule d’essai de claquage avec échantillon du papier presspahn.

1.4.1. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique est donnée par la formule suivante :

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

avec :

U : tension de claquage donnée (kV) ;

d : épaisseur de l'échantillon (mm).

2. ANALYSE STATISTIQUE

La probabilité de rupture pour une distribution de Weibull est donnée par la relation suivante [85] :

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

avec:

P(X): probabilité de défaillance ;

X: variable aléatoire, 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 :

$$X_i = \log X_i \qquad \text{(IV.3)}$$

$$Y_i = \log\left(\ln\frac{1}{1-P_i}\right) \qquad \text{(IV.4)}$$

La probabilité est calculée à partir de la relation [86]:

$$P(i) = \frac{i}{N+1}100\% \qquad \text{(IV.5)}$$

avec:

N: nombre d'échantillons testés, dans notre cas 50 ;

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

Le lissage des points expérimentaux a été effectué en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. Les valeurs du facteur d'échelle (valeur nominale de la rigidité diélectrique pour P = 63,2%) et le facteur de forme ont été déterminés à partir des diagrammes de Weibull.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Diagramme de Weibull à deux paramètres

3.1.1. Avant vieillissement

Le diagramme de Weibull à 2 paramètres de la rigidité diélectrique avant vieillissement est exposé à la figure IV.7.

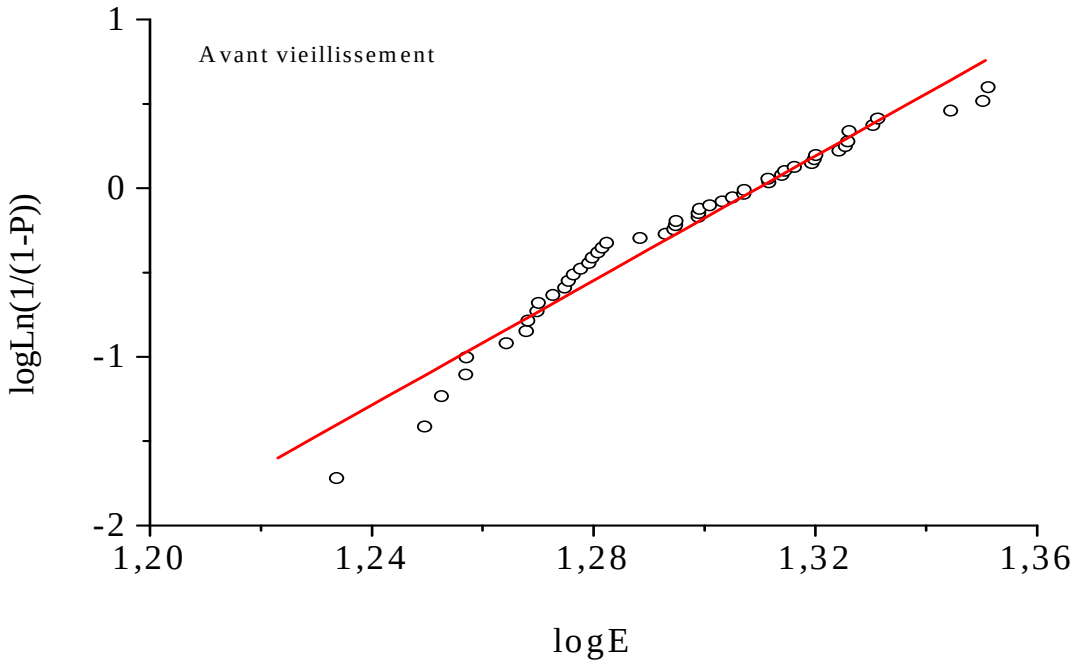


Figure IV.7 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique avant vieillissement.

3.1.2. Vieillissement à 130 °C

Les diagrammes de Weibull de la rigidité diélectrique après un vieillissement à 130 °C sont exposés aux figures IV.8-IV.13.

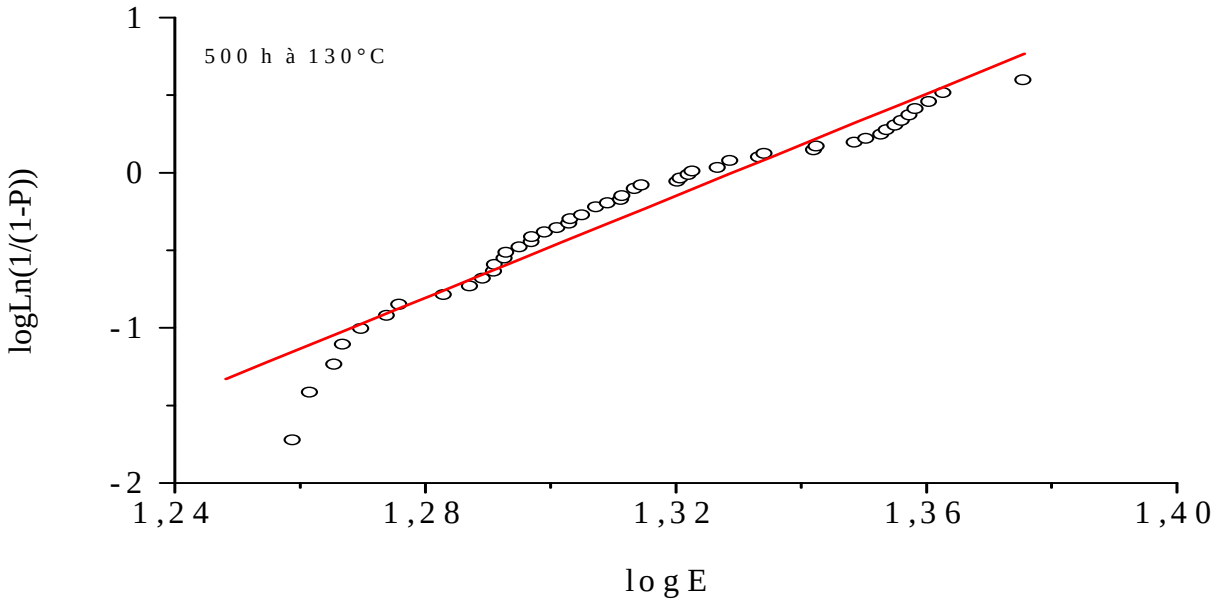


Figure IV.8 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 500 h de vieillissement à 130 °C.

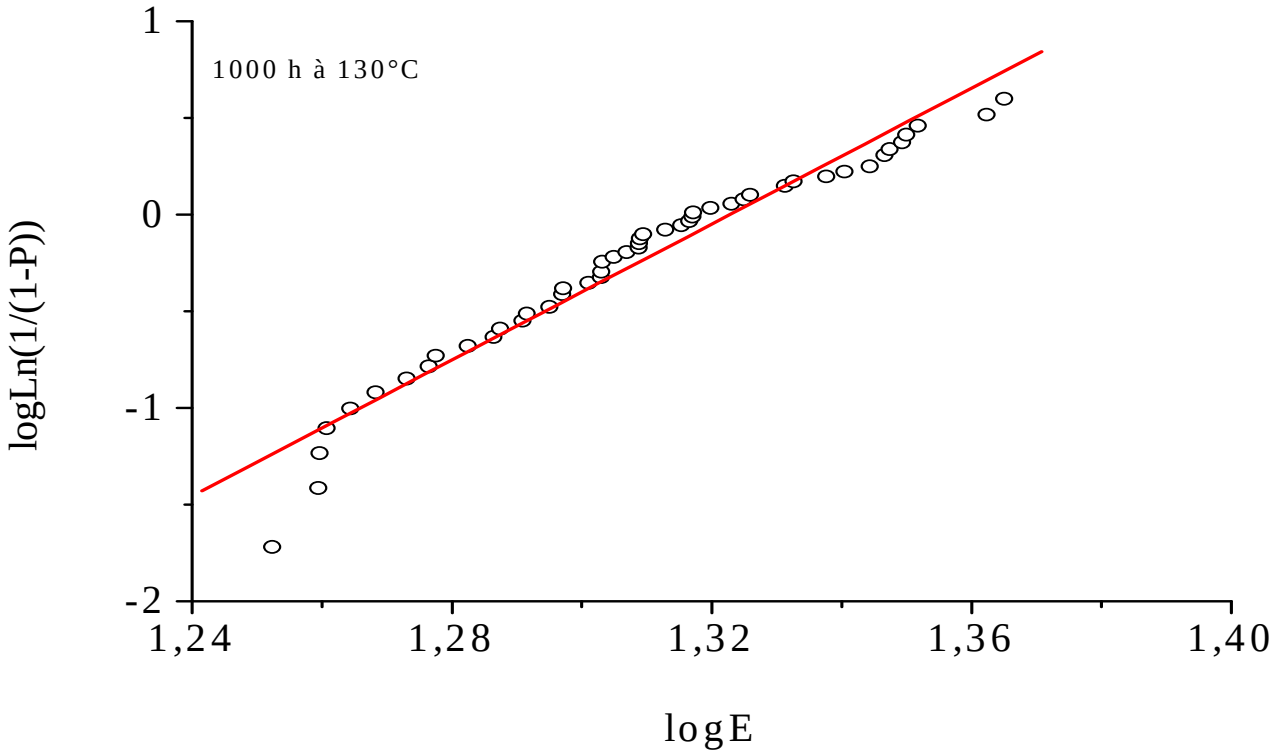


Figure IV.9 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 1000h de vieillissement à 130 °C.

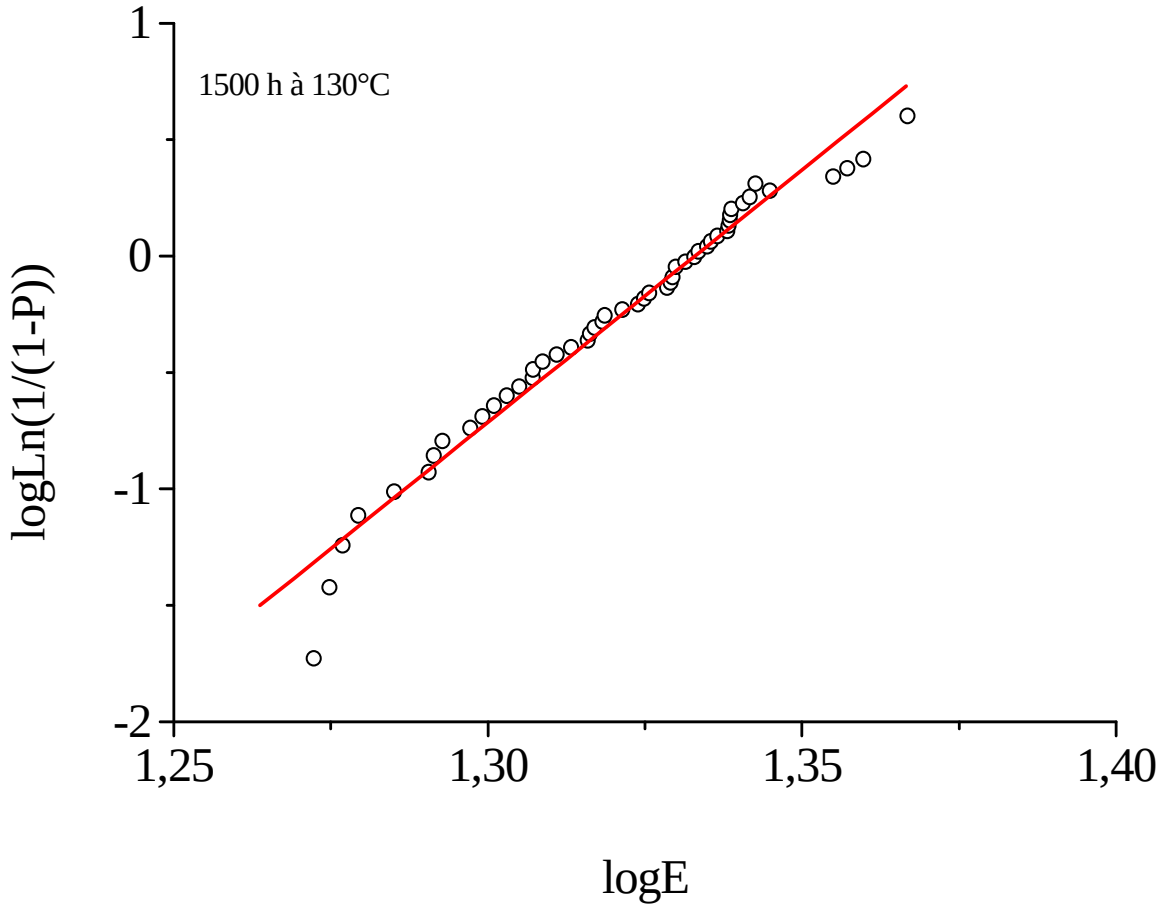


Figure IV.10 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 1500 h de vieillissement à 130 °C.

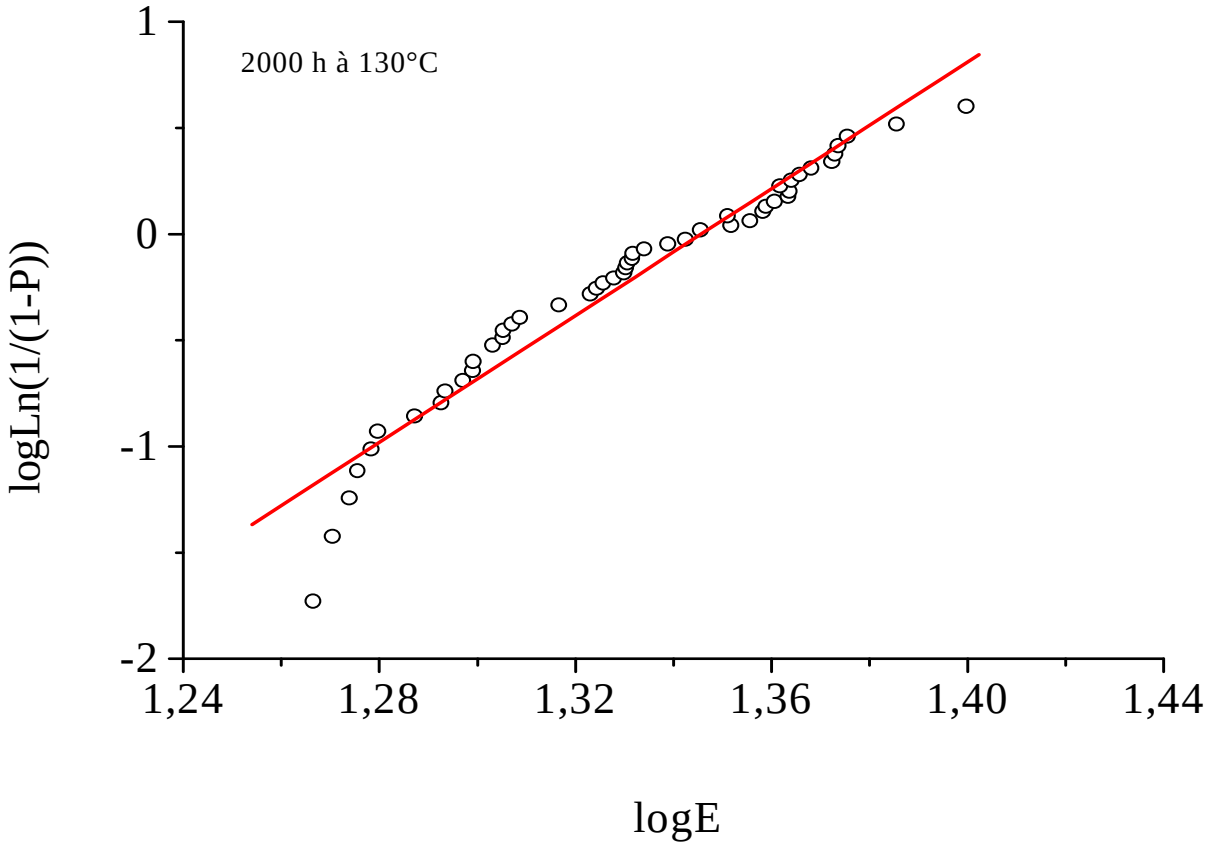


Figure IV.11 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 2000 h de vieillissement à 130 °C.

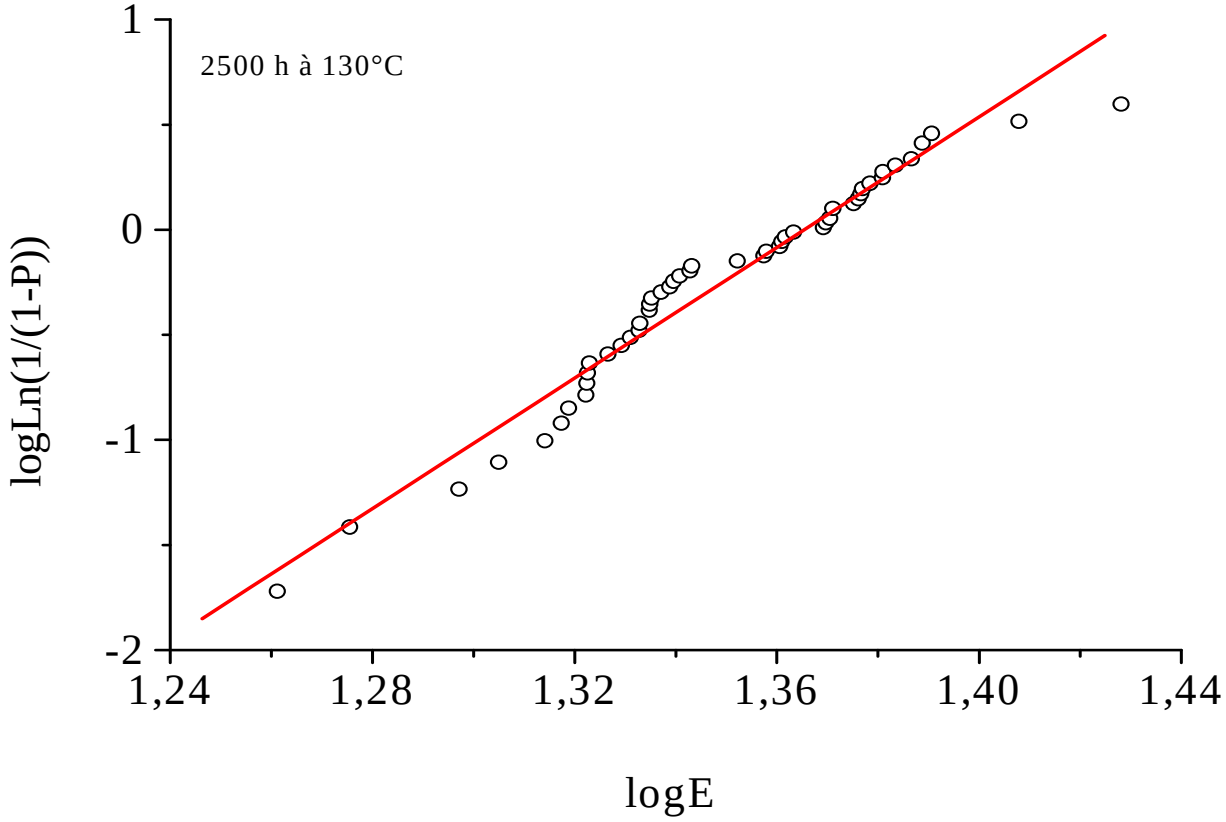


Figure IV.12 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 2500 h de vieillissement à 130 °C.

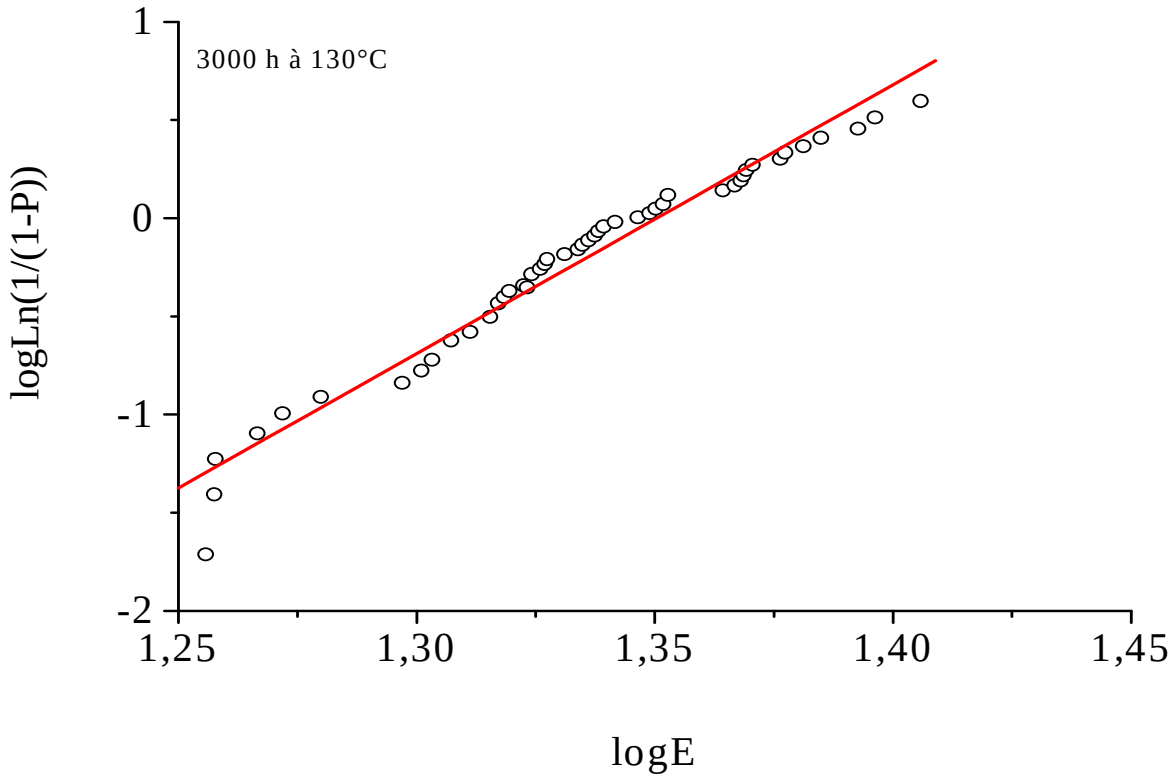


Figure IV.13 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 3500 h de vieillissement à 130 °C.

3.1.3. Vieillissement à 140 °C

Les diagrammes de Weibull de la rigidité diélectrique après un vieillissement à 140 °C sont exposés aux figures IV.14-IV.119.

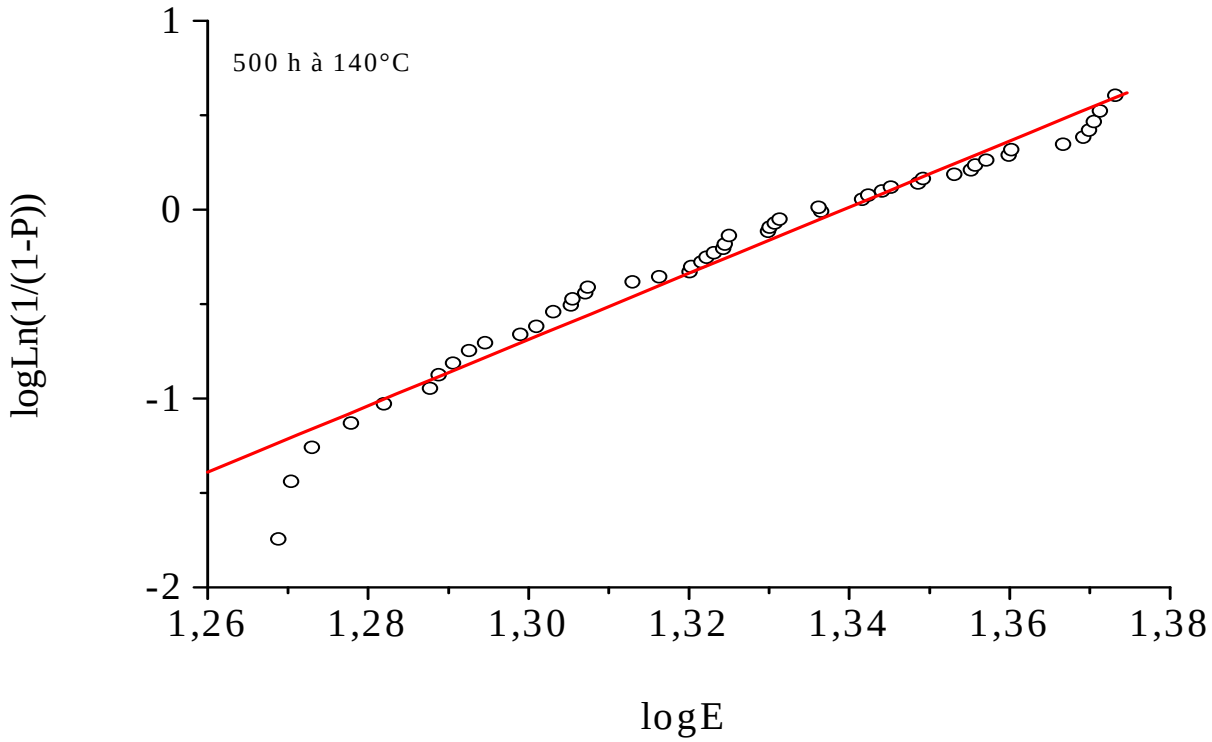


Figure IV.14 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 500 h de vieillissement à 140 °C.

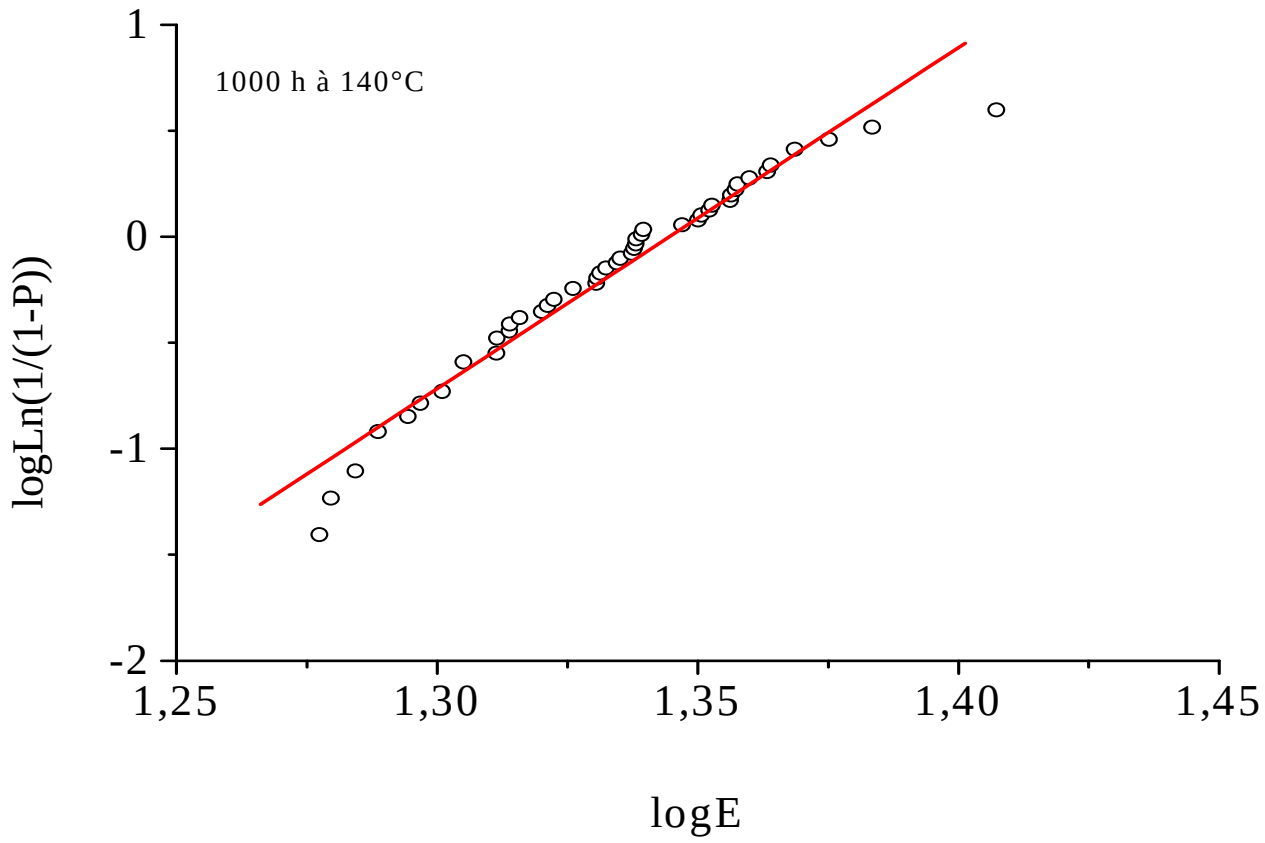


Figure IV.15 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 1000 h de vieillissement à 140 °C.

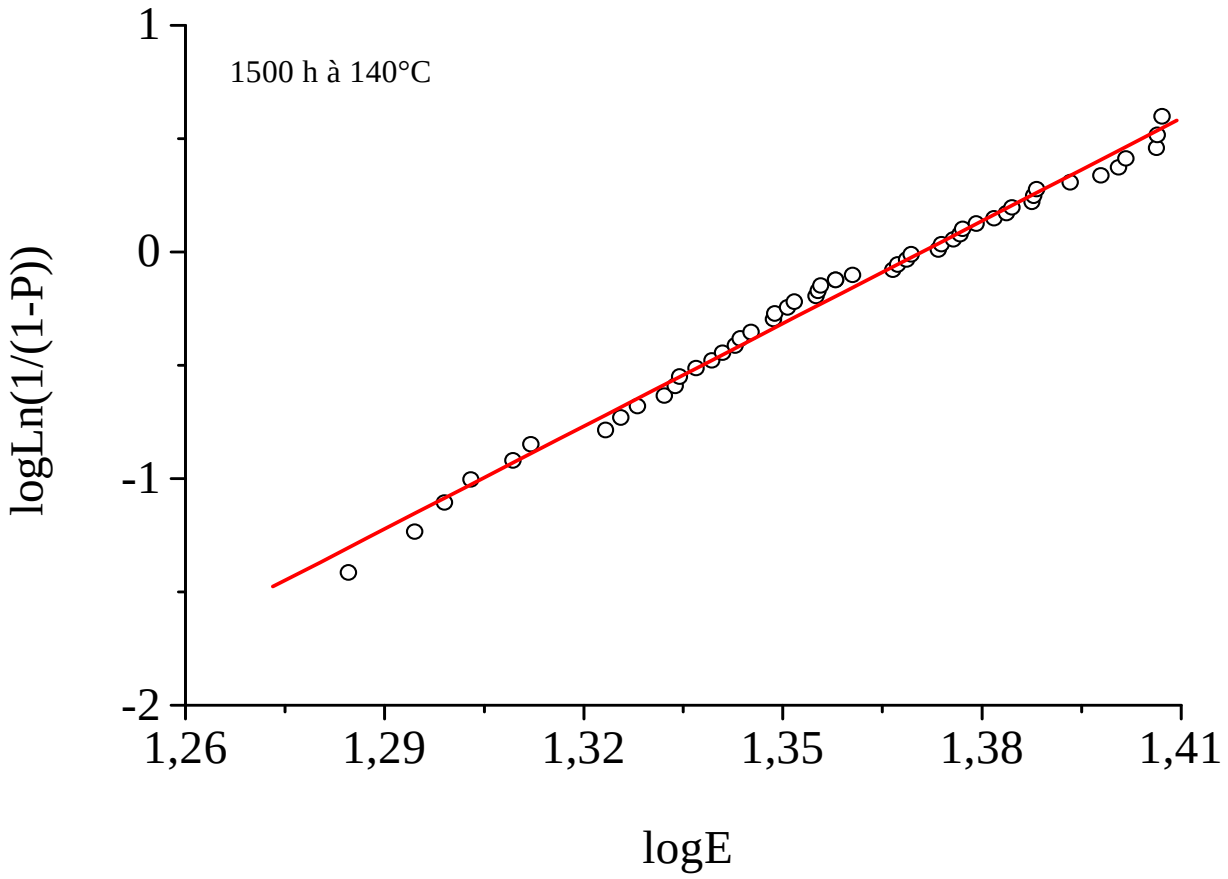


Figure IV.16 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 1500 h de vieillissement à 140 °C.

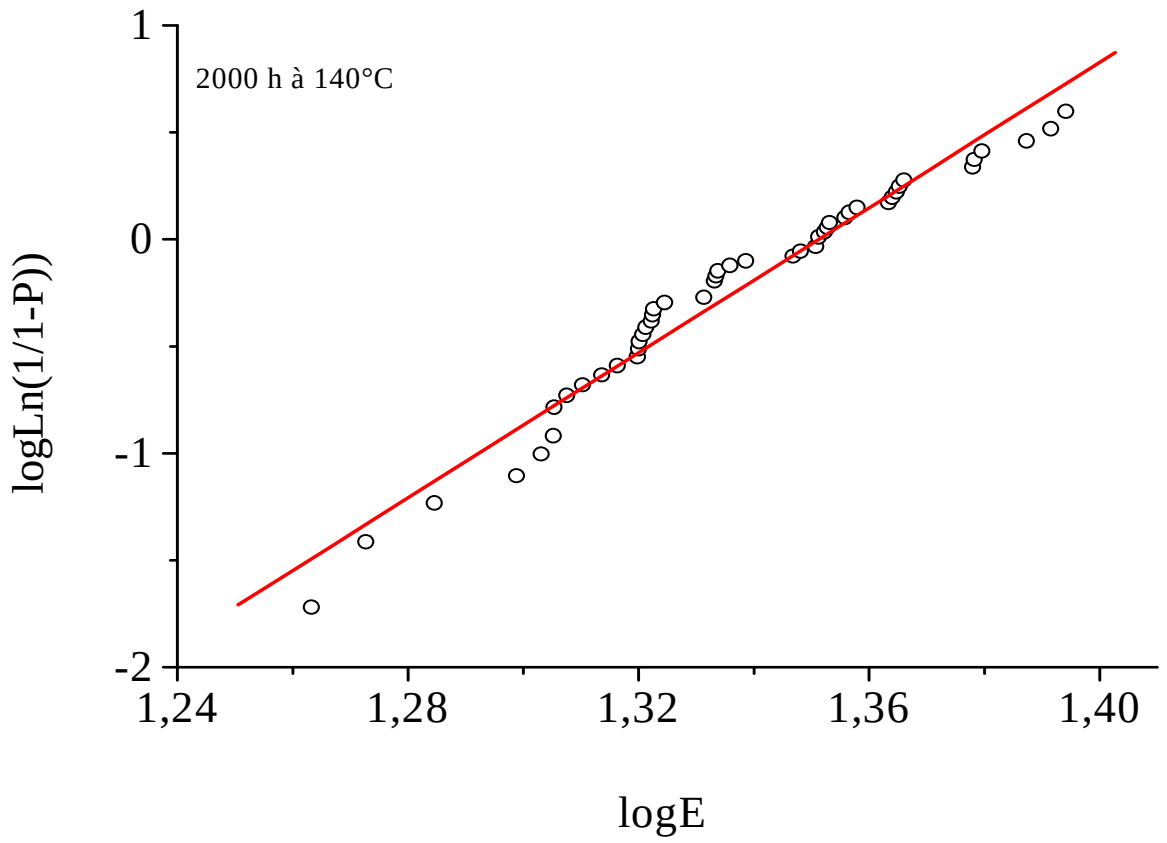


Figure IV.17 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 2000 h de vieillissement à 140 °C.

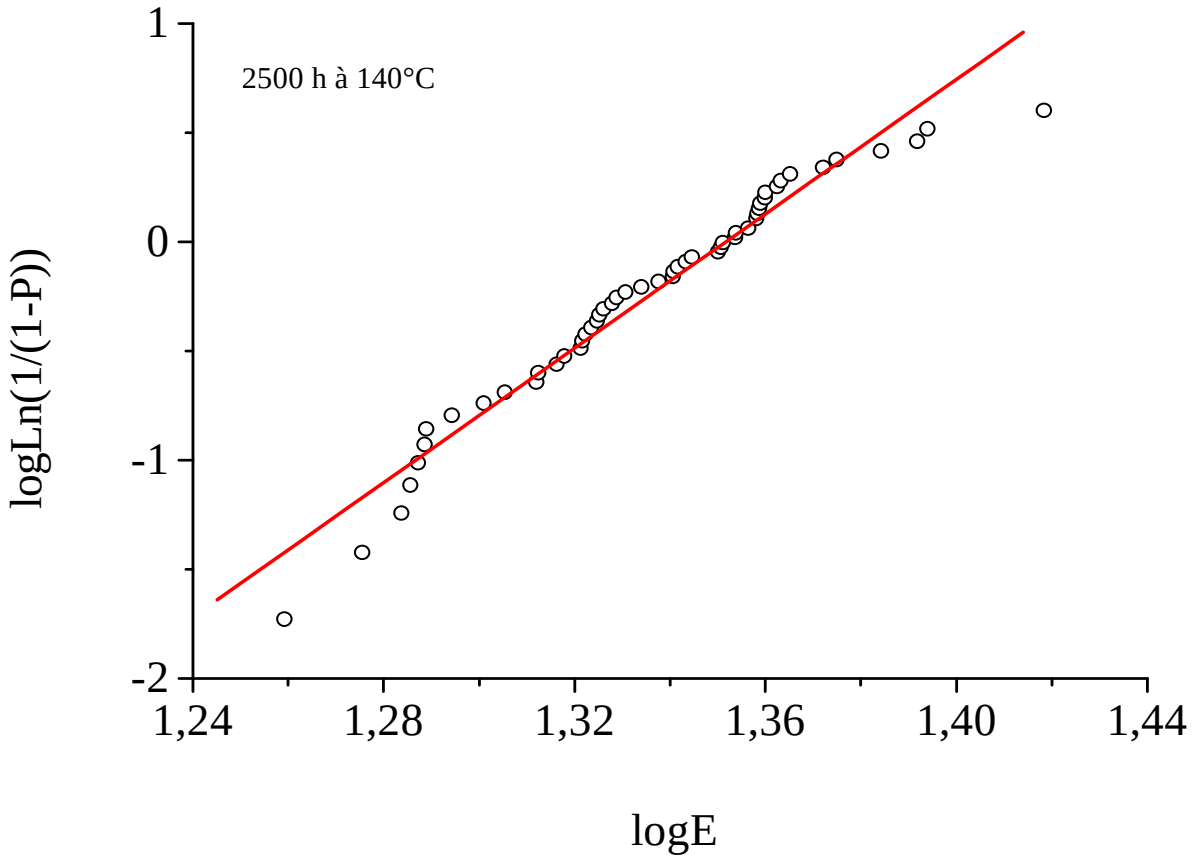


Figure IV.18 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 2500 h de vieillissement thermique à 140 °C.

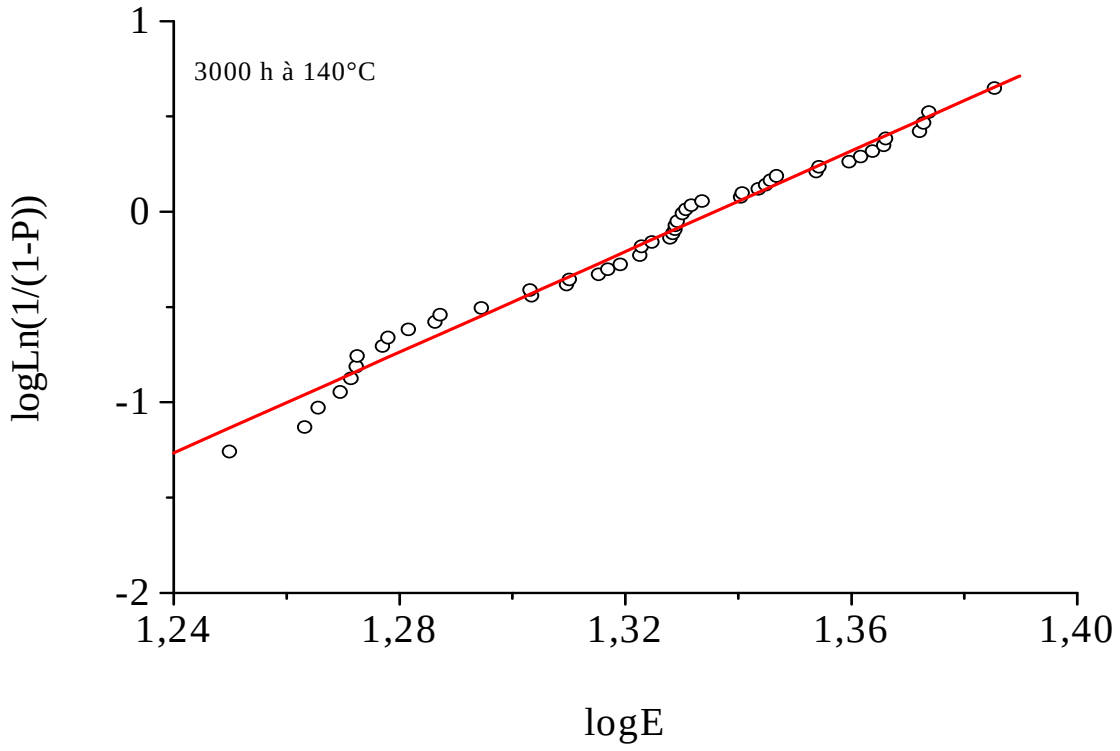


Figure IV.19 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 3000 h de vieillissement à 140 °C.

3.1.4. Vieillissement à 150 °C

Les diagrammes de Weibull de la rigidité diélectrique après un vieillissement à 150 °C sont exposés aux figures IV.20-IV.24.

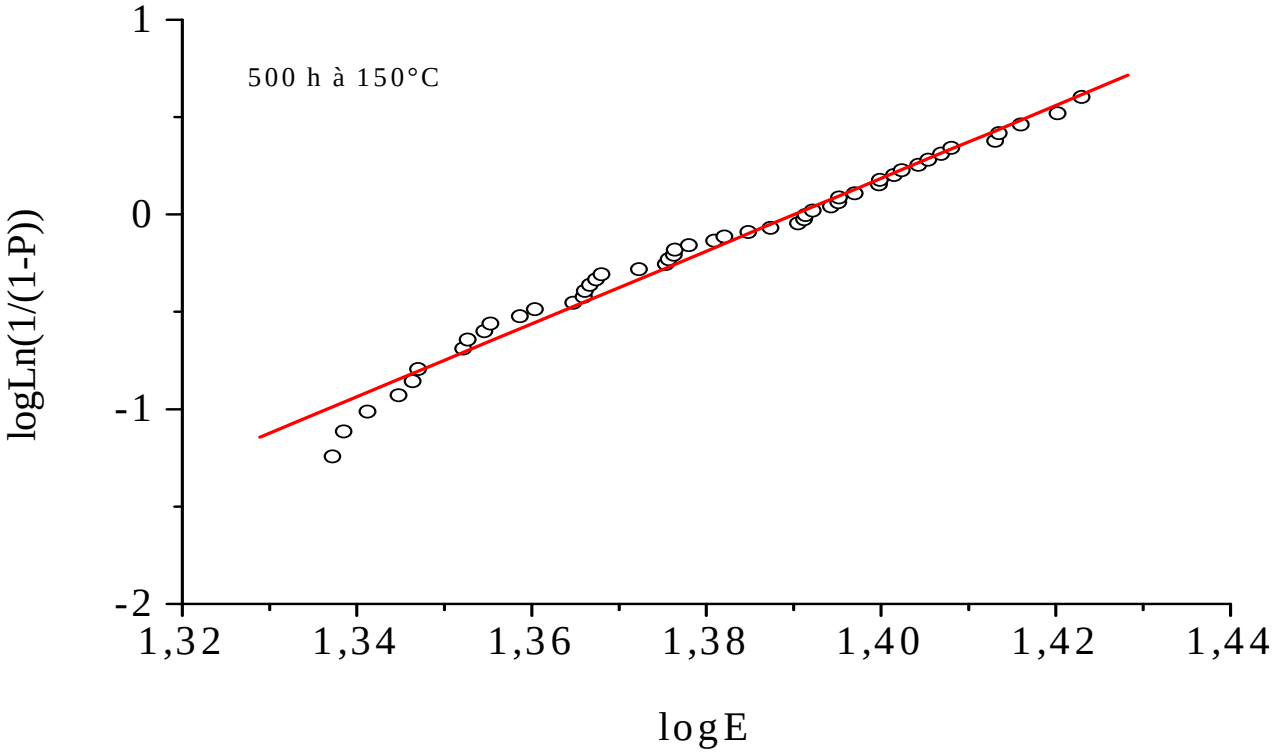


Figure IV.20 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 500 h de vieillissement à 150 °C.

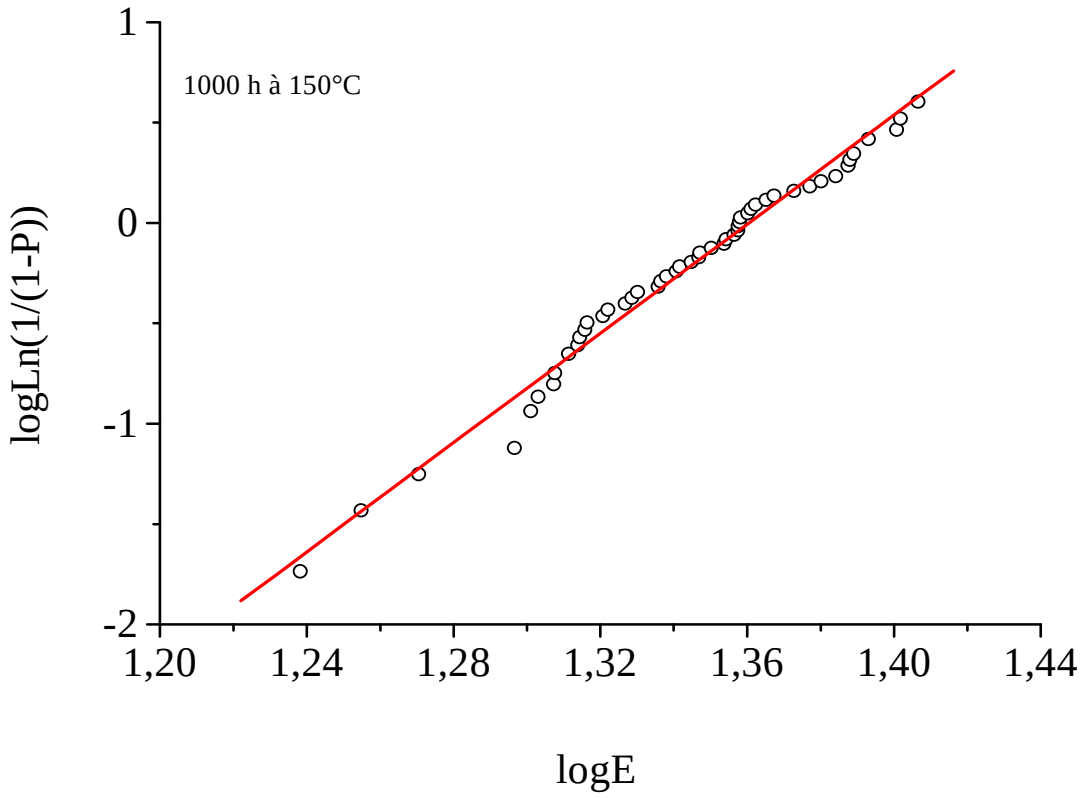


Figure IV.21 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 1000 h de vieillissement à 150 °C.

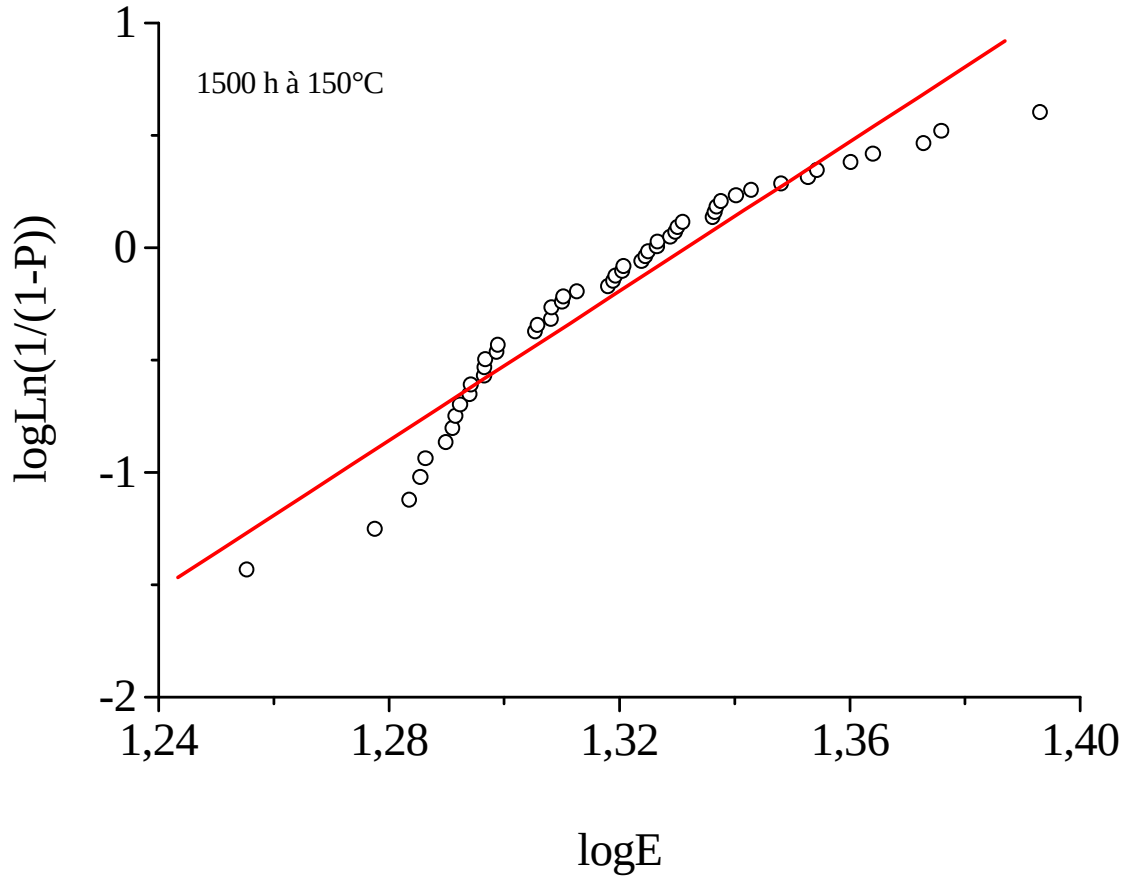


Figure IV.22 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 1500 h de vieillissement à 150 °C.

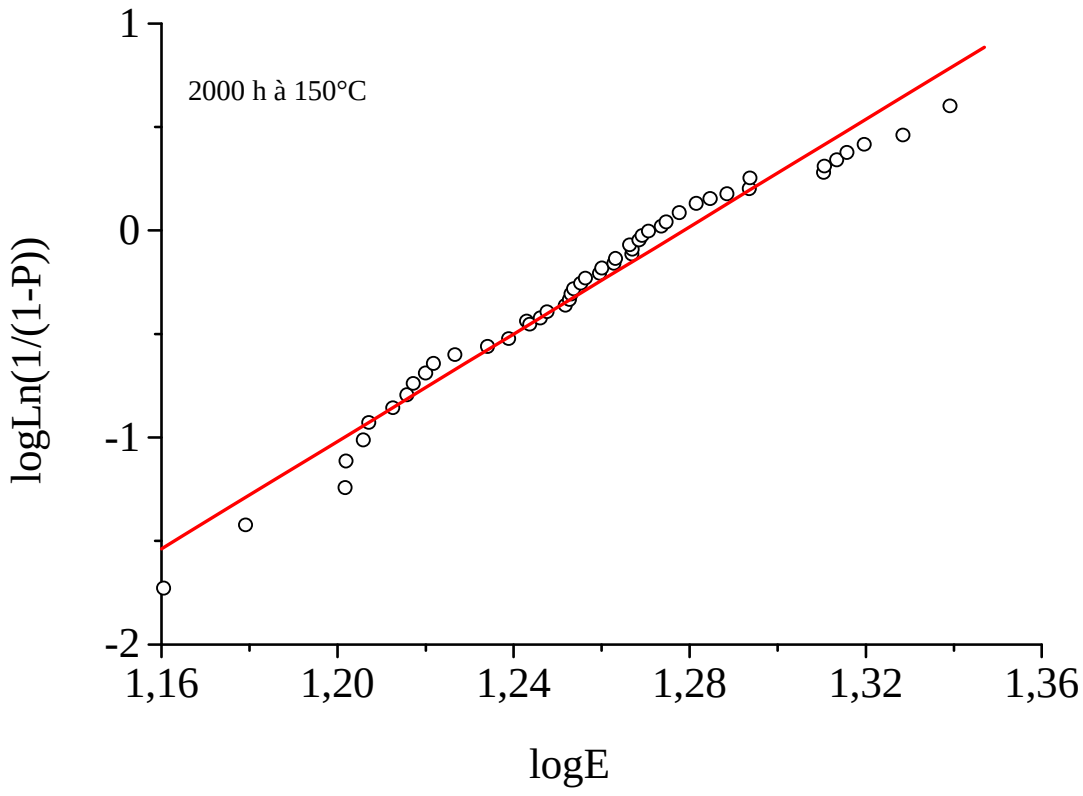


Figure IV.23 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 2000 h de vieillissement à 150 °C.

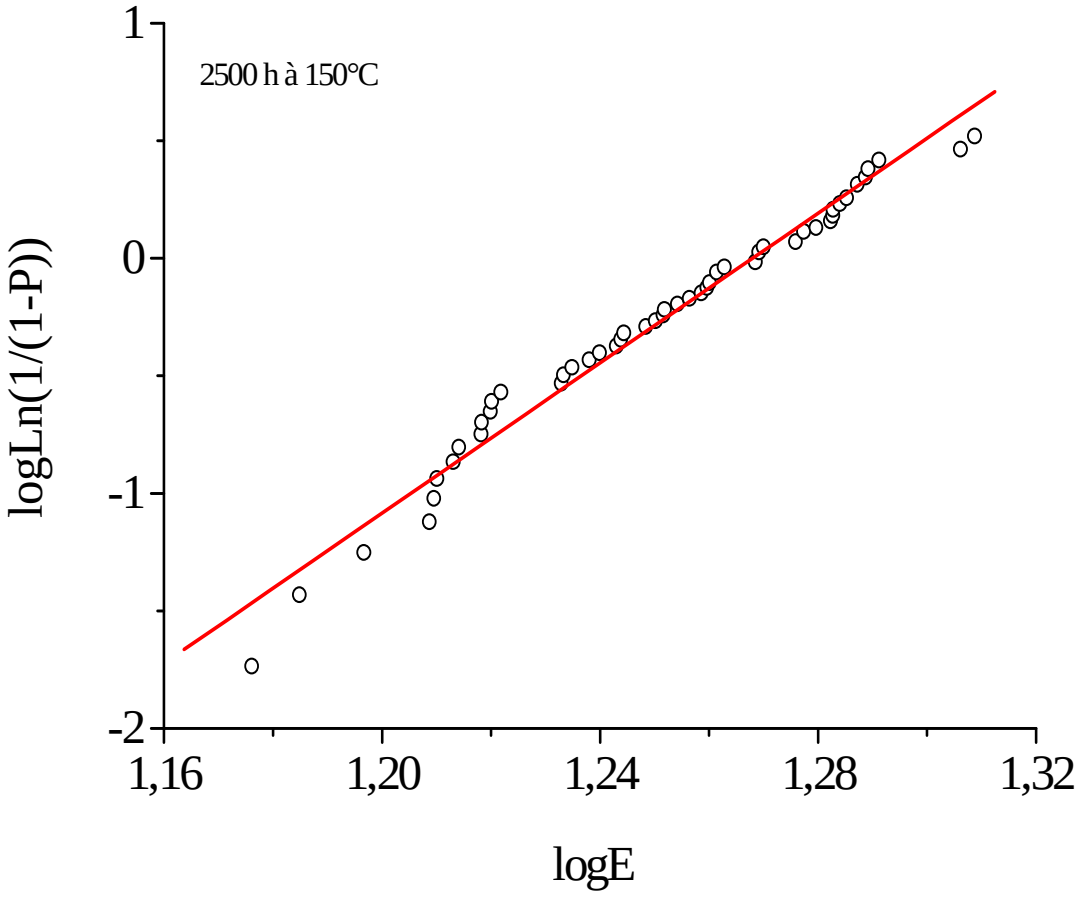


Figure IV.24 : Diagramme de Weibull à deux paramètres de la rigidité diélectrique après 2500 h de vieillissement à 150 °C.

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

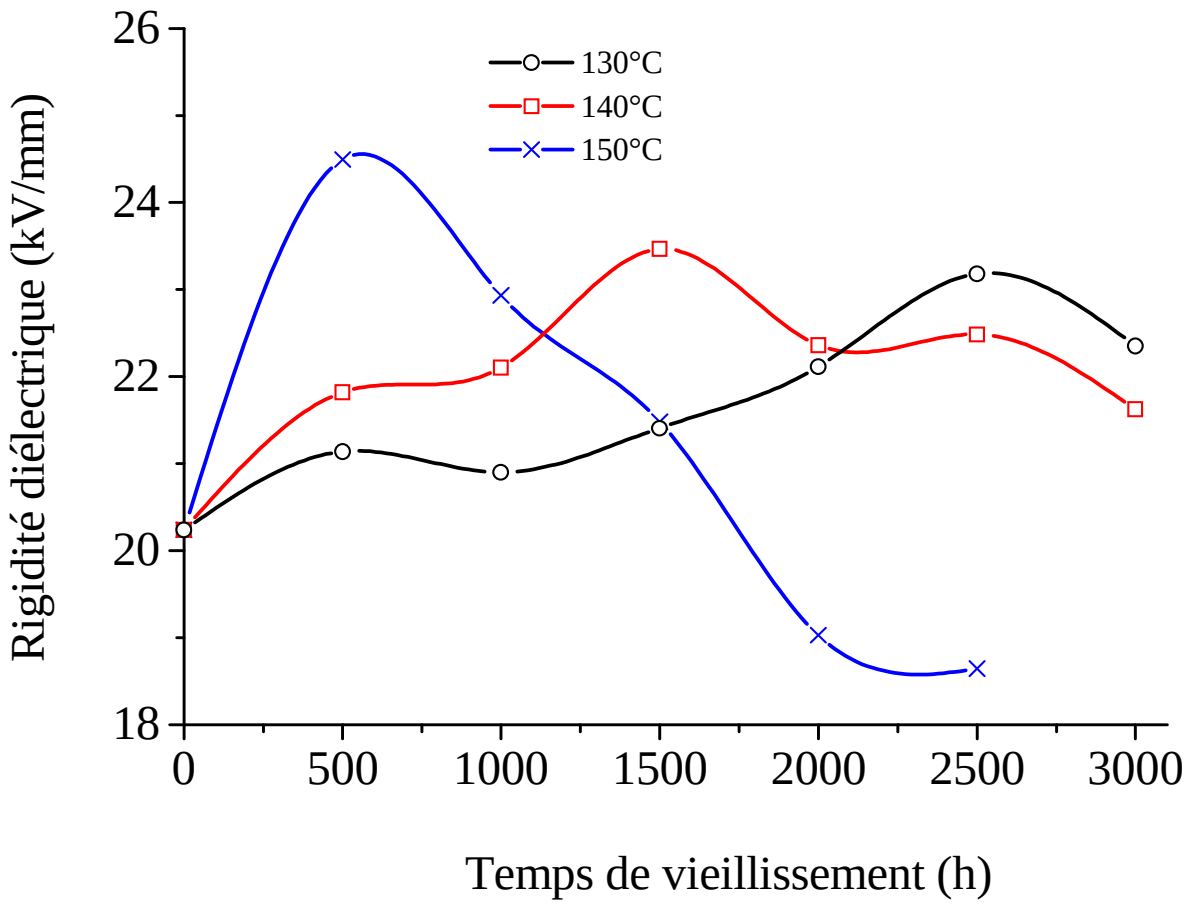


Figure IV.25 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement à différentes températures.

En exploitant les diagrammes de Weibull, nous avons déterminé le paramètre d'échelle et le facteur de forme.

La figure donne l'évolution de la rigidité diélectrique nominale (P = 63,2%) du polymère en fonction du temps de vieillissement (t). Ces variations peuvent être résumées comme suit :

- A 130 °C, E croit de 20,24 kV/mm à 23,19 kV/mm pour t = 2563 h puis diminue lentement à 22,35 kV/mm pour un temps de vieillissement de 3000 h. La variation maximale est de 14,58%.
- A 140 °C, E augmente de 20,24 kV/mm et atteint un maximum de 23,47 kV/mm pour t = 1500 h puis diminue lentement jusqu'à 21,62 kV/mm pour un temps de vieillissement de 3000 h. La variation maximale est de 15,96%.
- A 150 °C, E augmente rapidement de 20,24 kV/mm jusqu'à maximum très accentué de 24,52 kV/mm puis diminue rapidement jusqu'à 18,64 kV/mm pour t = 2500 h. La variation maximale est de 21,15%.

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

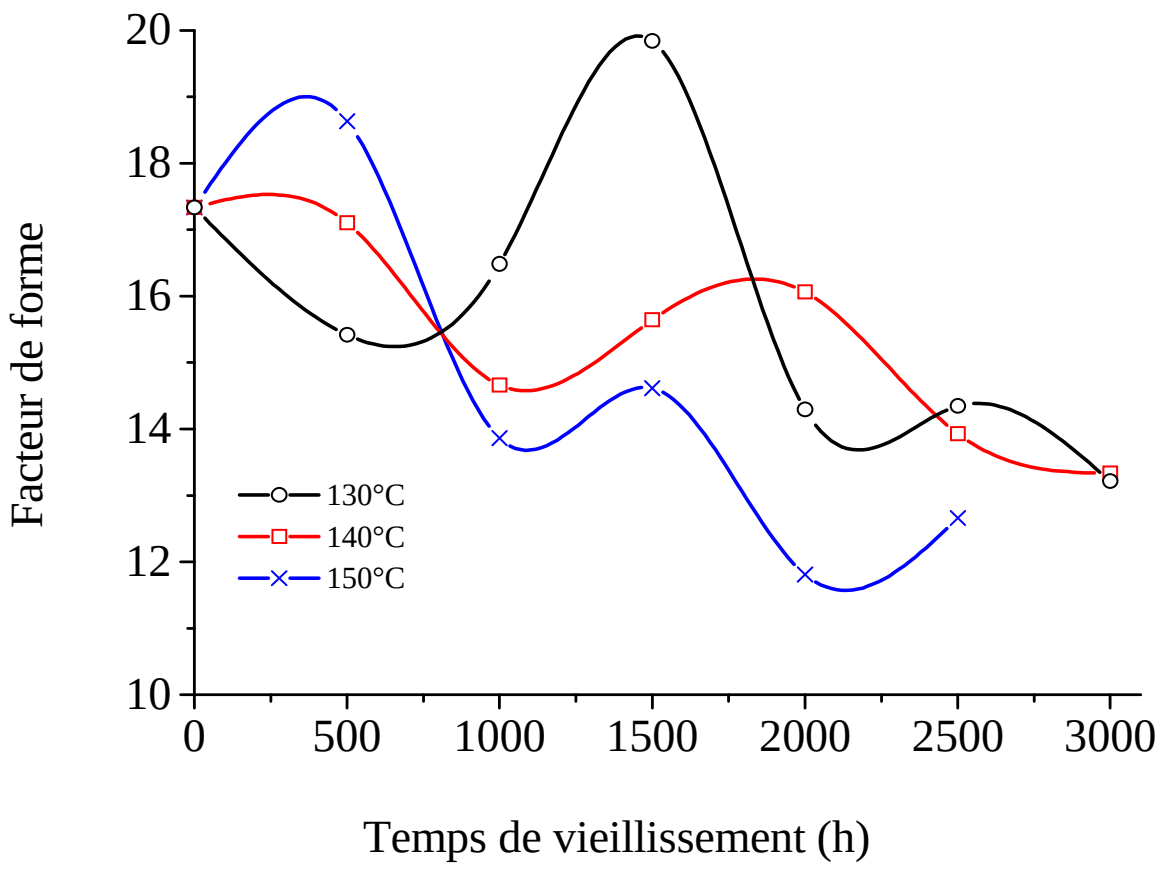


Figure IV.26 : Variation du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement à différentes.

La figure présente la variation du facteur de forme (α) en fonction du temps de vieillissement. Ces variations peuvent être décrites comme suit :

- A 130 °C, α diminue de 17,33 à 15,2 correspondant à un temps de vieillissement de 700 h puis augmente rapidement et atteint un maximum très prononcé de 19,79 pour t = 1440 h. Ensuite α diminue rapidement jusqu'à 13,68 pour t = 2194 h. Au-delà de ce temps, le facteur de forme augmente à 14,14 puis diminue jusqu'à 13,2 après un temps de vieillissement de 3000 h.

- A 140 °C, α diminue de 17,33 à 14,54 correspondant à t = 1100 h puis augmente jusqu'à 16,20 pour t = 1880 h. Ensuite le facteur de forme diminue rapidement jusqu'à 13,21 après un temps de vieillissement de 3000 h.

- A 150 °C, α augmente de 17,33 à 19,00 à t=380 h puis diminue rapidement jusqu'à 13,64 pour un temps de vieillissement de 1080 h. Ensuite α augmente jusqu'à 14,61 puis diminue à 11,51 et augmente de nouveau à 12,66 après 2500 h.

4. DISCUSSION

- Pour toutes les températures de vieillissement, le polymère a changé de couleur en passant du jaune au marron. Aux temps lents de vieillissement, nous avons constaté un effritement des éprouvettes et un dégagement gazeux.

- La caractéristique donnant l'évolution de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement pour les différentes températures montre la présence de plusieurs pics attribués à la relaxation de dipôles à l'intérieur du polymère.

- L'augmentation de la rigidité diélectrique est attribuée à une réticulation du matériau tandis que la diminution est due à rupture des chaînes moléculaires.

- La courbe du facteur de forme en fonction du temps de vieillissement montre aussi des pics attribués à des défauts existant dans le volume du matériau ou créés durant le vieillissement.

- Nous constations que les diagrammes de Weibull sont plus dispersés pour les faibles probabilités.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail s'inscrit dans le cadre du vieillissement des polymères utilisés dans les systèmes d'isolation. Cette étude concerne l'étude de la rigidité diélectrique du papier presspahn imprégné d'huile soumis à un vieillissement thermique. Les valeurs de la rigidité ont été analysées statistiquement en utilisant le modèle de Weibull à deux paramètres.

Le lissage des points expérimentaux des diagrammes de Weibull a été effectué en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. En général, la distribution des points est plus dispersée pour les faibles probabilités.

Les éprouvettes testées montrent un changement de couleur du jaune au marron caractérisant la dégradation du matériau. Après des temps prolongés d'exposition au vieillissement, nous avons même observé un effritement des échantillons.

La courbe de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement montre la présence de plusieurs pics attribués à la relaxation des dipôles au sein du polymère. L'augmentation de la rigidité diélectrique est due à une réticulation du matériau tandis que la diminution est une conséquence de la rupture de chaînes moléculaires.

La courbe représentant le facteur de forme en fonction du temps de vieillissement présente des pics attribués à des défauts existant dans le volume du matériau ou créés durant le vieillissement.

Comme perspectives, ce travail peut être complété par une étude physico-chimique : infrarouge, DSC et ATG.

ANNEXE

1. PAPIER PRESSPAHN

1.1. Procédé kraft

Le procédé kraft (aussi connu comme kraft pulping ou processus de sulfate) est un processus de conversion du bois en pâte à papier, qui se compose presque uniquement de fibres de cellulose, le composant principal du papier. Le procédé kraft implique le traitement des copeaux de bois avec un mélange chaud d'eau, d'hydroxyde de sodium, et de sulfure de sodium, connu sous l'appellation « liqueur blanche », qui brise les fibres du bois, séparant la lignine et l'hémicellulose de la cellulose. Cette technique comprend plusieurs étapes, à la fois mécaniques et chimiques. C'est la méthode la plus employée pour la production de papier

1.2. Polyosidique

Les polysaccharides (parfois appelés glycanes, polyosides, ou glucides complexes) sont des polymères constitués de plusieurs oses liés entre eux par des liaisons osidiques. Les polyosides les plus répandus du règne végétal sont la cellulose et l'amidon, tous deux polymères du glucose. Une ose (ou monosaccharide) est le monomère des glucides Une liaison osidique est une liaison chimique covalente.

1.3. Acide sulfurique

L'acide sulfurique, appelé jadis huile de vitriol ou vitriol fumant, est un composé chimique de formule H_2SO_4. L'acide sulfurique est un produit industriel de première importance, qui est utilisé dans de très nombreuses applications, notamment dans les batteries au plomb pour les voitures, le traitement des minerais, la fabrication des engrais, le raffinage du pétrole, le traitement des eaux usées et les synthèses chimiques.

1.4. Résistance à la traction

On caractérise généralement cette propriété par la longueur à la rupture qui est la longueur que devrait avoir une bande de papier de longueur uniforme, pou que, suspendue par l'une de ses extrémités, elle se rompe sous son propre poids.

1.5. Résistance au déchirement

Elle caractérise la difficulté à déchirer un papier de type donné réalisé avec un grammage (masse en mètre carré) de 100 g par m^2.

1.6. Résistance à la flexion

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une plaque, elle tend à rapprocher deux points diamétralement opposés sous l'action d'une contrainte mécanique.

1.7. Résistance à l'éclatement

La résistance à l'éclatement est égale au quotient de la pression hydraulique, exprimée en millibars, exercée sur une éprouvette de papier par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc, à l'instant de l'éclatement, par la masse du papier en grammes par mètre carré ($g.m^{-2}$).

1.8. Tan δ

Tan δ est le facteur de perte diélectrique. L'angle δ, défaut de quadrature entre tension et courant, dépend de la permittivité, de la résistivité et de processus de polarisation.

1.9. Résistivité

La résistivité, mesurée en continu peut apporter de précieuse informations sur l'éventuelle présence porteurs de charges, conséquence de dégradation par décharges partielles ou échauffements localisés.

1.10. Phénomènes Maxwell-Wagner

L'effet Maxwell-Wagner est la relaxation associée à un empilage de deux ou plusieurs feuilles de matériaux diélectriques de natures différentes.

1.11. Sens machine

Sens axial par rapport à l'axe des fibres d'une feuille du papier.

1.12. MT

Moyenne Tension.

1.13. HT

Haute Tension.

2. HUILE MINERALE

2.1. Traversées

Une traversée isolée (Bushing en anglais) est un composant électrique proche d'un isolateur servant à faire passer un ou plusieurs conducteurs à travers une paroi, telle qu'un mur ou une cuve en isolant le ou les conducteurs de cette paroi. On les retrouve également sur les transformateurs et les postes de transformateurs pour isoler les conducteurs entre eux.

2.2. Commutateurs

Les commutateurs sont des appareils destinés à couper, à rétablir, à inverser le sens du courant électrique, ainsi qu'à le distribuer dans différents circuits.

2.3. Dérivés furaniques

Sa composition chimique est $C_5H_4O_2$ ou C_4H_3OCHO.

Exemples de dérivés furaniques : Furfural, 2-Furaldehyde et Furan-2-carbaldehyde.

2.4. Permittivité

La permittivité est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule.

2.5. Indice d'acidité

L'acidité s'exprime par l'indice de neutralisation, ou nombre de milligrammes de potasse alcoolique pour neutraliser un gramme d'huile ; il s'exprime par mg KOH/g.

2.6. Gassing

Un certain dégagement gazeux (gassing) se produit toujours dans une huile diélectrique lorsqu'elle est exposée à des décharges partielles. Ce phénomène est dû au fait que certaines molécules atteignent un niveau énergétique tellement élevé que des fragments (CH_4, H_2) se détachent de ces molécules.

2.7. Point d'éclair

Le point d'éclair d'une huile minérale caractérise la température au-delà de laquelle le liquide peut spontanément s'enflammer, sa valeur doit être spécifiée pour des raisons de sécurité.

2.8. Viscosité

La viscosité d'une huile est un paramètre important puisque régissant le refroidissement d'un transformateur par convection. Plus la viscosité est faible, plus l'écoulement est facile, meilleur et plus efficace le refroidissement du transformateur.

2.9. Point d'écoulement

Le point d'écoulement est également un paramètre important dans le choix d'un liquide destiné à évacuer les calories. Il est défini comme la température maximale au-dessus de laquelle le liquide ne coule pas.

2.10. Conductivité

Un liquide, pour être isolant électrique, doit conduire le moins possible l'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité doit donc être la plus faible possible.

3. VIEILLISSEMENT THERMIQUE DES ISOLANTS SOLIDES

3.1. Dismuation

La dismutation est une réaction dans laquelle une espèce chimique joue à la fois le rôle d'oxydant et de réducteur. Ce qui signifie qu'un atome ou groupe fonctionnel, initialement présent à un seul

degré d'oxydation, se trouvera, après la réaction, sous forme de deux espèces, l'une oxydée, l'autre réduite

Exemple : Le dichlore réagit avec l'ion hydroxyde pour former l'ion chlorure, l'ion chlorate et de l'eau selon la réaction :

$$Cl_2 + 6\ HO^- \rightarrow 5\ Cl^- + ClO_3^- + 3\ H_2O$$

3.2. Polymère à carbone caténaire

La caténation est l'aptitude d'un élément chimique à former une longue structure semblable à une chaîne par le biais d'une série de liaisons covalentes. La caténation se produit le plus aisément avec le carbone, qui forme des liaisons covalentes avec d'autres atomes de carbone.

3.3. Température de transition vitreuse

En termes de propriétés physiques, la température de transition vitreuse T_v,(T_g en anglais) d'une matière est souvent décrite comme représentant l'intervalle de température à travers laquelle la matière passe d'un état caoutchouteux à un état vitreux, solide (rigide).

3.4. Polycondensats

Le polymère résultant de la polycondensation est appelé polycondensat. La polycondensation est une polymérisation par étape.

3.5. Radical alkoxyle

RO• où R est une chaîne.

3.6. Polymérisation

La polymérisation désigne la réaction chimique ou le procédé par lequel des petites molécules (par exemple des hydrocarbures de deux à dix atomes de carbone) réagissent entre elles pour former des molécules de masses molaires plus élevées. Les molécules initiales peuvent être des monomères ou des copolymères ; la synthèse conduit à des polymères.

3.7. Module d'élasticité

Souvent appelé « module élastique »), le module d’élasticité est une grandeur intrinsèque d'un matériau, définie par le rapport de la contrainte à la déformation élastique provoquée par cette contrainte. La déformation est exprimée comme une grandeur sans dimension. L'unité pratique souvent usitée du module est le MPa.

3.8. Allongement à la rupture

L’allongement à la rupture ou allongement pour cent noté A% est une caractéristique sans dimension des matériaux. Elle définit la capacité d’un matériau à s’allonger avant de rompre lorsqu’il est sollicité en traction. A% se détermine par un essai de traction.

3.9. PVC

Polychlorure de Vinyle.

3.10. Acide carboxyle

Le terme acide carboxylique désigne une molécule comprenant un groupement carboxyle (–C(O) OH). Ce sont des acides et leurs bases conjuguées sont appelées ions carboxylates.

3.11. Cétone

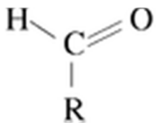
Une cétone est un composé organique, faisant partie de la famille des composés carbonylés, dont l'un des carbones porte un groupement carbonyle. Une cétone contient donc la séquence R^1-CO-R^2 où R^1 et R^2 sont des chaînes carbonées, et pas de simples atomes d'hydrogène liés au carbone central porteur de la fonction carbonyle.

3.12. Composés carbonylés

Un composé carbonylé est un composé organique comportant une double liaison entre un atome de carbone et un atome d'oxygène, l'atome de carbone étant lié communément à des atomes d'hydrogène ou de carbone.

3.13. Aldéhyde

Un aldéhyde est un composé organique, faisant partie de la famille des composés carbonylés, dont l'un des atomes de carbone primaire (relié au plus à 1 atome de carbone) de la chaîne carbonée porte un groupement carbonyle. Un aldéhyde contient donc la séquence :



R représente une chaîne carbonée.

3.14. Homopolymère et copolymère

Un homopolymère est un polymère issu d'une seule espèce de monomère. Tous les motifs de répétition d'un homopolymère sont de même nature chimique. Ce terme s'oppose à copolymère qui est au contraire un polymère issu d'au moins deux monomères différents, appelés comonomères ; il contient au moins deux types de motifs de répétition.

3.15. Degré de polymérisation

Le degré de polymérisation (DP) définit la longueur d'une chaîne polymère. DP est le nombre d'unités monomères (unités répétitives) constitutives de cette chaîne. Le degré de polymérisation est directement proportionnel à la masse molaire du polymère.

3.16. Cupri-éthyle-diamine

La Cupri-éthyle-diamine est une solution dont la formule chimique est $C_4H_{16}CuN_4^{+2}$. Elle utilisée pour dissoudre la cellulose et mesurer son degré de polymérisation.

3.17. Catlyseurs

La catalyse (du grec ancien Katalysis, détacher) se réfère à l'accélération ou réorientation de la cinétique de réaction au moyen d'un catalyseur, et dans certains cas à la sélectivité pour diriger la réaction dans un sens privilégié (réaction concurrente, production d'un produit plutôt qu'un autre).

3.17. Humidité relative

On appelle humidité relative, le rapport entre la teneur en eau et sa solubilité. La solubilité, qui représente la teneur à saturation, dépend de la température : plus la température est élevée, plus la solubilité est grande.

3.18. ppm

Parties par million en masse et en pour cent.

3.19. Résistance d'isolement

Un circuit isolé électriquement possède donc une résistance infinie au passage du courant. Techniquement, une résistance infinie peut se matérialiser par une distance entre deux matériaux conducteurs qui ne sont pas reliés. Lorsque cette résistance diminue, le passage du courant est autorisé, et l'isolement est rompu: on parle alors de continuité, le contraire de l'isolement. S'il y a continuité, il y a donc un défaut d'isolement.

3.20. Courant d'absorption

Le courant d'absorption, correspond à l'apport d'énergie nécessaire aux molécules de l'isolant pour se réorienter sous l'effet du champ électrique appliqué.

BIBLIOGRAPHIE

[1] J.S. N'CH, *Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et régénération des huiles pour transformateurs de puissance*, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Centrale de Lyon, 2011.

[2] P. VERMA, M. ROY, A. VERMA, V. BHANOT, O.P. PANDEY, *Assessment of degradation of transformer insulation paper by SEM and X-RD techniques*, IEEE International Conference of Solid Dielectrics, July 5-6, 2004.

[3] P-H. ELCHINGER, *Réticulation de fibres lignocellulosiques et d'amidon : Vers de nouveaux matériaux pour l'industrie papetière*, Thèse de Doctorat en cotutelle, Université de Limoges et Université du Québec à Trois-Rivières, 2013.

[4] J. VERGNE, R. GROB, P. LE GUENEC, P. DHIBA, *le vieillissement du papier dans les transformateurs de puissance*, REPERE (REE), N° 2, pp. 75-83, 1995.

[5] R. FOURNIE, *Les isolants en électrotechnique : Essais, mécanismes de dégradation, applications industrielles*, Editions Eyrolles, Paris, 1990.

[6] B. BOUVIER, *Papier et papier imprégné*, Techniques de l'Ingénieur, D 280, 1977.

[7] CEI 60641-1, *Carton comprimé et papier comprimé à usages électriques. Partie 1: Définitions et prescriptions générales*, 2004.

[8] H. PROVENCHER, *Analyse de la réponse diélectrique du complexe papier-huile dans les transformateurs de puissance*, mémoire de Maitrise en Génie Electrique, Université du Québec, 2008.

[9] N. BERGER, M. RANDOU, G.OTTMANN, P. J. VUARCHEX, *Revue des isolants liquides, ELECTRA (F)*, N°. 171, pp. 32-57, 1997.

[10] A. DENAT, *Caractéristiques des diélectriques liquides*, Techniques de l'Ingénieur, K 714, 2008.

[11] N. BERGER, *Liquides isolants en électrotechnique-Présentation générale*, Techniques de l'Ingénieur, D 2470, 2002.

[12] A. BEROUAL, C. PERRIER, J-L. BESSEDE, *Les huiles isolantes pour transformateurs, Chapitre 1, pp.15-48, dans « Matériaux diélectriques pour le génie électrique 2 : Applications spécifiques »*, Edition Lavoisier, Paris, 2007.

[13] N. BERGER, *Liquides isolants en électrotechnique : Caractéristiques des produits*, Techniques de l'Ingénieur, D 2471, 2002.

[14] Transformer oil handbook, Copyright Nynas Naphtenics AB, Sweden, 2004.

[15] CEI 60296, *Fluides pour applications électrotechnique-Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion*, 2003.

[16] J. PERRET, *Study on dielectric breakdown of insulating mineral oils under impulse voltages*, IEEE Trans. on Elec. Insulation, EI-16, N°. 4, pp. 339-345, 1981.

[17] C. PERRIER, *Etudes des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance : Recherche d'un mélange optimal*, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Centrale de Lyon, 2005.

[18] J.H. KIM, D.K. PARK, S.O. HAN, *Estimation for degradation characteristics of cellulose paper used in oil-filled transformer and analysis for correlationship using statistical treatment*, Conference on Precision Electromagnetic Measurments (CPEM), pp. 692-693, 2010.

[19] J-P. TROTIGNON, J. VERDU, A. DOBRACZYNSKI, M. PIPERAUD, *Précis de matières plastiques-Structure, propriétés, mise en œuvre, normalisation*, éditions Nathan, Paris, 2006.

[20] Y.G. HSUAN, R.M. KOERNER, *Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes*, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 124 (6): pp. 532-541, 1998.

[21] E. RICHAUD, J. VERDU, *Vieillissement chimique des polymères-mécanismes de dégradation, Techniques de l'Ingénieur*, AM 3151,2011.

[22] J. VERDU, *Vieillissement chimique*, Techniques de l'Ingénieur, A 3151, 1990.

[23] J.P. MERCIER, E. MARECHAL, *Chimie des polymères : Synthèse, réaction, dégradation*, éditions Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1988.

[24] M. FONTANILLE, Y. GNANOU, *Chimie et physico-chimie des polymères*, édition Dunod, Paris, 2002.

[25] J. VERDU, *Vieillissement des plastiques*, éditions Eyrolles, Paris, 1984.

[26] J. VERDU, *Vieillissement chimique des plastiques : Aspects généraux*, Techniques de l'Ingénieur, AM 3151, 2002.

[27] C. MENGUY, *Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides*, Techniques de l'Ingénieur, D 2310, 1997.

[28] B. FALLOU, *Caractéristiques des isolants solides : Méthodes de mesure, valeurs et signification*, Technique de l'Ingénieur, D 214 et D 215, 1980.

[29] F.H. WINWLOW, C.J. ALOISIO, W.L. HAWKINS, W. MATREYEK, S. MATSUOKA, *Oxidative crystallization of polythene*, Chemistry & Industry (London), 1963.

[30] I. MKACHER, *Vieillissement thermique des gaines PE et PVC de câbles électriques*, Thèse de Doctorat en sciences des matières de l'Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris Tech, 2012.

[31] B. FALLOU, *Synthèse des travaux effectués au LCIE sur le complexe papier-huile*, Revue Générale d'Electricité (RGE), Vol.79, pp. 645-661, 1970.

[32] J. UNSWORTH, F. MITCHEL, *Degradation of electrical insulation paper monitored with high performance liquid chromatography*, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.25, N°.4, pp. 737-746, 1990

[33] F. SHAFIZADEH, A.G.W. BRADBURY, *Thermal degradation of cellulose in air and nitrogen at low temperatures*, Journal of Applied Polymer Science, Vol.23, N°. 5, pp. 1431-1442, 1979.

[34] W. LAMPE, E. SPICAR, *The oxygen free transformer, reducing aging by continuous degassing*, CIGRE paper 12-06, 1976.

[35] M. DUVAL, *A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, N°.3, pp.8-17, 2002.

[36] W.J. McNutt, T.O. ROUSE, G.H. Kaufmann, *mathematical modeling of bubble evolution in transformers*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104 (2), pp .447-487, 1985.

[37] J. VERGNE, *Etude de vieillissement physico-chimique du complexe papier-huile dans les transformateurs électriques*, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 1992.

[38] F.M. CLARK, *Factors affecting the mechanical deterioration of cellulose insulation, AIEE Transactions*, Vol.60, N°.7, pp. 778-783, 1941

[39] M.J. FABRE, A. PICHON, *Deterioration processes and products of paper in oil*, CIGRE Paper 137, Paris 15-June 1960.

[40] P. GRANEAU, *Underground power transmission*, A Wiley-Interscience Publication, Canada, 1979.

[41] Moser, H.P. *Part II. Aging of Insulating Materials*, Transformerboard, Special Print of Scientia Electrica, translated by W. Heidemann, EHVWeidmann Lim., pp. 12-15, 1979.

[42] W. LAMPE, E. SPICAR, *Influence of different stress factors on the dielectric and mechanical strength of oil-cellulose insulation*, CIGRE Paper 15-05, 1978.

[43] M. J. HEATHCOTE, *A practical technology of the power transformer*, The J&P Transformer Book, ed. Newnes, New York, 1998.

[44] V. PRABHASHANKAR, DJ BADKAS, *mechanism of oxidation of transformers oils*, J. of Inst. Of Petr., Vol.47, N°.450, pp.201-212, 1961.

[45] M. WEBB, *Water in oils*, IEE Colloquium on an Engineering Review of Liquid Insulation, pp. 2/1–2/6, 1997.

[46] V. WASSERBERG, H. BORSI, E. GOCKENBACH, *A novel system for the prolongation of the lifetime of power transformers by reduced oxidation and aging*, Conference record of the ISEI, Indianapolis, pp. 233-236, 2004.

[47] CEI 60422 (Ed.3), *Guide de maintenance et de surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques*, 2004.

[48] A. SHENK, *Surveillance continue des transformateurs de puissance par réseaux de neurones auto-organisés*, Thèse de Doctorat ès Sciences Techniques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2001.

[49] T.V. OOMEN, *Moisture equilibrium in paper-oil systems*, Proceedings of the Electrical/Electronic Insulation Conference, Chicago, IL, pp. 162-166, 1983.

[50] B. LENNON, *Dielectric relaxation analysis to assess the integrity of high-voltage DC cables of the Mass Impregnated Type*, Master's Thesis, Delft University of Technology, 2009.

[51] J. SANS,K.M. BILGIN,J.J. KELLY, *Large-scale survey of furanic compounds in operating transformers and implications for estimating service life*, Conference Record of the 1998 International Symposium on Electrical Insulation,Vol.2, pp. 543-553, 1998.

[52] L. CHMURA, D.V.D. BOORN, P.H.F. MORSHUIS, J.J. SMIT, *Life curves for new and thermally aged oil-impregnated paper insulation*, IEEE 2013 Electrical Insulation Conference, Ontario, 2 to 5 June 2013, pp. 45-48.

[53] L. CHMURA, HUIFEI JIN, P. CICHECKI. ;J.J. SMIT .E. GULSKI ,F.D. VRIES ,*Use of dissipation factor for life consumption assessment and future life modeling of oil-filled high-voltage power cables*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.28, N°.1, pp. 27-37, 2012.

[54] D. H. SHROFF , A. W. STANNETT, *A review of paper aging in power transformers, Generation, Transmission and Distribution*, IEE Proceedings C, Vol.132, pp. 312-319, 1985

[55] W.A. FESSLER, F.S. NICHOLS, T.O. ROUSE, *Tube aging and oxidation of naphthenic and paraffinic transformer oils*, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Philadelphia, pp. 265–274, 1978.

[56] V.M. MONTSINGER, *Loading transformers by temperature*, AIEE Transactions, Vol.49, pp. 776-792, 1930.

[57] T.W. DAKIN, *Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon, AIEE Transactions*, Vol.67, pp. 113-122, 1948.

[58] P. BELLOC, B. FALLOU, *Etude de vieillissement thermique des matériaux utilisés dans la construction des câbles électriques*, RGE N°.1, pp. 243-246, 1970.

[59] B. FALLOU, P. BELLOC, *Etude de l'endurance des matériaux à l'action de la température et des rayonnements*, RGE N°.3, pp. 217-224, 1971.

[60] E. MORIAME, *l'endurance thermique des isolants et systèmes d'isolation-Incidence dans la construction des matériels, Indice de température, Contrôle de vieillissement thermique de différents matériaux isolants*, RGE N°.7/8, pp. 445-451, 1974.

[61] E. MORIAME, *l'endurance thermique des isolants et systèmes d'isolation-Incidence dans la construction des matériels*, Nouvelles règles pour la détermination de l'endurance thermique des matériaux, RGE N°.7/8, pp. 452-466, 1976.

[62] IEC 216, *Guide for the determination of thermal endurance properties of electrical insulating materials*, Part 1, 1990.

[63] G.C. MONTANARI, *Thermal aging of EPR cables*, International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 320-324, Beijing, September 1988.

[64] R. FOURNIE, *Essais d'évaluation et méthodes de diagnostic pour estimer la durée de vie et détecter les défaillances des matériels électriques*, Bulletin de la direction des études et recherches EDF, Série B, N°.4, pp. 45-59, 1988.

[65] K.M. MATHES, Thermal *aging of electrical insulation-Technology and stardization*, IEEE International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, pp. 299-307, 1985.

[66] R.A. DIXON, *Thermal aging predictions from an Arrhenius plot with only data point*, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.EI-15, pp. 331-334, 1980.

[67] J. VERDU, *Comportement à long terme*, Techniques de l'Ingénieur, A 3150, A9 I, 1980.

[68] L. DESCHAMPS, C. CAILLOT, M. PARIS, J. PERRET, *l'utilisation des matériaux synthétiques pour l'isolation des câbles HT et THT*, RGE N°.5, pp. 343-360, 1983.

[69] R.A SELLERS, *Rapport General Electric Company*, Major Appliance Laboratory, 1976.

[70] J. CARLIER, *L'endurance thermique des isolants et systèmes d'isolation-Indice dans la construction des matériels, Classification thermique des systèmes d'isolation des machines électriques de grande puissance*, RGE tome 83, N°.7/8, pp. 467-469, 1974.

[71] I. BASOVSKI, *Fiabilité, théorie et pratique de la sureté de fonctionnement*, édition Dunod, 1966.

[72] L.A. DISSADO, J.C. FOTHERGILL, *Electrical degradation and breakdown in polymers*, in G.C. STEVENS, Ed. Peter Perigrinus Ltd 1992, London, 1962.

[73] A. POLARD, C. RIVOIRE, *Fiabilité et statistique prévisionnelle : la méthode de Weibull*, éditions Eyrolles, 1971.

[74] *IEEE guide for the statistical analysis of electrical insulation voltage endurance data*, ANSI/IEEE Std. 930, 1987.

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

[76] W.D. WILKENS, *Statistical methods for the evaluation of electrical insulating systems, chapter 7, Engineering dielectrics*, Vol. II-B, Electrical properties of solid insulating materials-measurement techniques, editor R. BARTKINAS, pp. 491-529, 1987.

[77] Commission Electrotechnique Internationale, Comité d'étude N°.63, Systèmes d'isolation : *Evaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électriques, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes*, 1989.

[78] C. CHAUVET, *Mise au point d'une méthodologie pour les essais de rupture à court terme en vue de la caractérisation des isolants synthétiques*, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1992.

[79] J.M. OUDIN, Y. REYROLLE, H. THEVENON, *Théorie statistique du claquage électrique*, RGE N°.4, pp. 430-436, 1968.

[80] R. LACOSTE, E. LOUDGHIRI, J. MERIC, *Sur la notion du gradient de seuil dans le phénomène de rupture diélectrique des isolants solides soumis à des rampes de tension*, RGE, 10/85, pp. 769-775, 1985.

[81] C. LAURENT, C. MAYOUX, *Comportement à long terme des isolants solides: vers la prévision des seuils de dégradation*, RGE, N°.8, pp. 30-36, 1990

[82] C. CHAUVET, C. LAURENT, *Weibull statistic in short-term dielectric Insul*., Vol.28, N°.1, pp. 18-29, 1993.

[83] L.A. DISSADO, *Theoretical basis of the dielectric breakdown*, J. Phys. D: phys., Vol.23, 1990, pp. 1582-1591.

[84] A.C. Cohen, *maximum likelihood estimation in the Weibull distribution based on complete and censored samples*, Technometrics, Vol. 7, N°.4, pp. 579-588, 1965.

[85] G.C. Stone, R.G. van Heeswijk, *Parameter for the Weibull distribution*, IEEE Trans. Electr Insul, Vol. EI-12, No. 4, pp. 253-261, 1977

[86] IEEE Guide for the Statistical of Electrical Insulation Voltage Endurance Data, ANSI/ IEEE Std. 930, 1987.

RESUME

L'isolation de papier presspahn imprégné d'huile minérale a été souvent employée dans les transformateurs de puissance depuis longtemps en raison de ses bonnes performances. Le papier se dégrade sous les contraintes combinées, thermiques, électriques et chimiques lors de fonctionnement de ces appareils réduisant ses résistances mécanique et électrique. Cette dégradation dans le temps de ces propriétés jusqu'à la rupture est appelée "phénomènes de vieillissement". La durée de vie des transformateurs est limitée à la détérioration de leur isolation solide qui est également influencée par la présence de défauts introduits lors de la mise en œuvre et de la fabrication du polymère.

Dans ce travail, le vieillissement thermique du papier imprégné a été étudié en utilisant l'analyse statistique de Weibull. La courbe de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement montre la présence de plusieurs pics attribués à la relaxation des dipôles au sein du polymère. L'augmentation de la rigidité diélectrique est due à la réticulation du matériau tandis que la diminution est une conséquence de la rupture des chaînes moléculaires. La courbe représentant le facteur de forme en fonction du temps de vieillissement montre des pics attribués aux défauts existant dans le volume du matériau ou créés lors du vieillissement thermique.

Mots clés : papier presspahn, vieillissement thermique, rigidité diélectrique.

ABSTRACT

Oil-paper insulation has been widely used in power transformers for quite a long time because of its good performance. The paper degrades under the combined stresses of thermal, electrical, and chemical stresses during routine operations reducing the mechanical and electrical strength. This degradation in time of the electrical properties up to the breakdown of materials is called “aging phenomena”. The life of transformers is limited to the deterioration of its solid insulation which is also influenced by the presence of defects introduced during the implementation and when manufacturing of the polymer.

In this work, the thermal aging of impregnated paper has been investigated using Weibull statistical analysis. The curve of the dielectric strength as a function of aging time shows the presence of several peaks attributed to the relaxation of the dipoles within the polymer. The increase in dielectric strength is due to cross linking of the material while the decrease is a consequence of the breaking of molecular chains. The curve representing the form factor as a function of the aging time has peaks attributed to defects existing in the volume of the material or created during thermal aging.

Keywords: impregnated pressboard paper, thermal aging, dielectric strength.