

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

# Mémoire de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master

En Electrotechnique

Thème

---

**Influence de la température sur la rigidité diélectrique du papier  
pressahn sous tension continue positive**

---

**Présenté par :**  
Mr LEZAMI Amar

**Encadrés par :**  
Mr HERZINE Md/Sghir

Mr MADJI Fares

Soutenu le 8 juillet 2019 devant le jury composé de

Président	M <sup>f</sup> ZABBOJ Youcef	Professeur	U. A/Mira Bejaia.
Examineur	M <sup>m</sup> MEDJAHED Sakina	Maître de conf. B	U. A/Mira Bejaia.
Encadreur	M <sup>f</sup> HERZINE Md/Sghir	Maître de conf. B	U. A/Mira Bejaia.

Année Universitaire : 2018/2019

# *Remerciements*

*Nous tenons à remercier Dieu, le tout puissant, de nous avoir donné la santé et la Volonté pour compléter ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudee et nos vifs remerciements à notre Promoteur, M<sup>r</sup> Herzinr Md/segbir pour sa disponibilité et de nous avoir fait profiter de ses qualités aussi bien sur le plan scientifique que sur le plan professionnel. Un grand merci pour son sérieux, sa patience et son aide.*

*Nos sincères remerciements au président de jury et l'examineur pour avoir accepté de corriger et juger notre travail.*

*Nos remerciements vont également à la secrétaire du d'département Electrotechnique Biba.*

*Que toute personne qui, d'une manière ou d'une autre, nos a encouragé et aidé à l'aboutissement de ce modeste travail, trouve ici l'expression de mos sincères reconnaissances.*

*Je dédie ce mémoire*

*A mes très chers parents, tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. C'est à travers vos encouragements que j'ai opté pour cette noble profession, et c'est à travers vos critiques que je me suis réalisée. J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi. Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour.*

*A mes chers frères, sœurs.*

*A mon ange qui m'a toujours donner force et courage pour continuer mes études.*

*A mes copains de chambre et de résidence et de mon parcours universitaire.*

*A mes collègues et athlètes de club Jeunesse Sportive Ait Weghlis.*

*A mes collègues de la ligue Bejaia d'athlétisme.*

*A mes collègues de la ligue Bejaia de Badminton.*

*A mes collègues de comité du village Sidi Hadj Hessaienne.*

*A mon meilleur ami amar et toute sa famille.*

*MADJI fares*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents, tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. C'est à travers vos encouragements que j'ai opté pour cette noble profession, et c'est à travers vos critiques que je me suis réalisée. J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi. Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour.*

*A mes frères*

*A ma sœur et ses enfants*

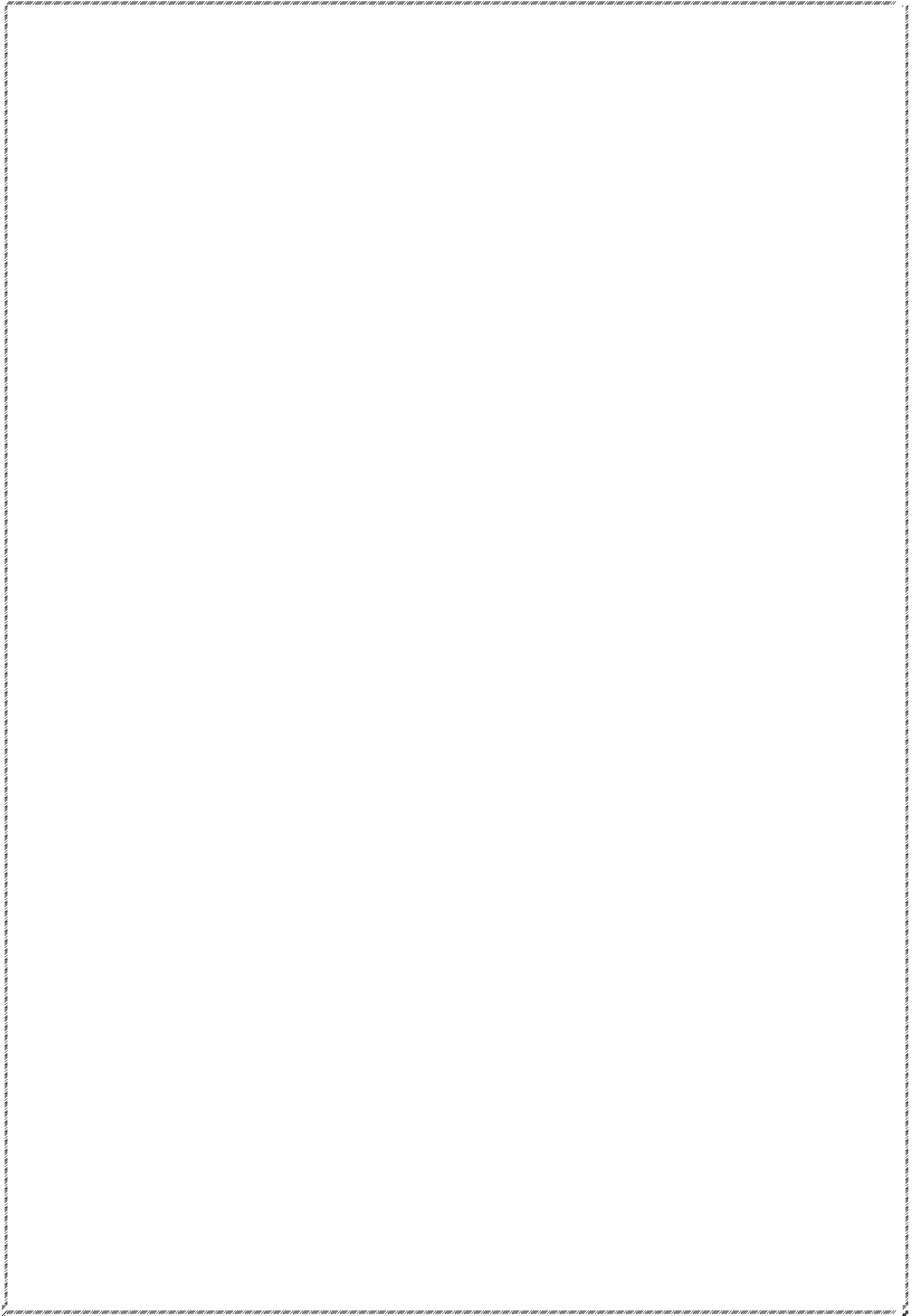
*A mes cousines*

*A tous mes amis sur tout, Azzedine, Didin, Nacer, Tyeb, Beza, Simou, Bilouche, Kader, Mohand, Lamine, Thiziri, Badoura, Hania*

*A tous le groupe réseaux électriques sur tout mes frères Hocine, Noureddine, Saadi, Sofiane*

*A mon cher ami fares et toute sa famille*

*LEZAMI Amar*



<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : Polymères et Papier Presspahn</b>	
I.A. Les polymères .....	3
I.A.1.Introduction .....	3
I.A.2.Historique .....	3
I.A.3. Définition .....	4
I.A.4.classification des polymères.....	4
I.A.4.1.Selon l'origine .....	4
I.A.4.2.Selon leur nature chimique.....	5
I.A.4.3. Selon leur domaine d'application .....	5
I.A.4.4.Selon leurs comportements thermiques.....	5
I.A.5. Polymérisation .....	6
I.A.5.1. Types de polymérisation .....	6
I.A.5.2. Technique de polymérisation .....	6
I.A.5.2.1. La polymérisation en masse.....	7
I.A.5.2.2. La polymérisation en solution.....	7
I.A.5.2.3.La polymérisation en suspension.....	7
I.A.5.2.4.Polymérisation en émulsion.....	7
I.A.5.2.5.Polymérisation en phase gazeuse.....	7
I.A.5.3.Comparaison des diverses méthodes de polymérisation .....	8
I.A.5.3.1Polymérisation en solution .....	8
I.A.5.3.2.Polymérisation en suspension.....	8
I. A.5.3.3.Polymérisation en émulsion.....	8
I.5.3.5. Polymérisation en masse.....	8
I.A.5.4.Degré de polymérisation $DP_n$ (indice de polymérisation).....	9
I.A.6. Domaines d'application des polymères .....	9
I.A.7. Conclusion .....	10

I.B. Papier presspahn.....	11
I.B.1 Présentation du papier presspahn .....	11
I.B.2. Les papiers presspahn utilisés en électrotechnique .....	11
I.B.3. Composition du papier presspahn .....	12
I.B.3.1. Structure chimique.....	12
1. La cellulose.....	12
2. Hémicellulose :.....	13
3. Lignine :.....	13
3. Lignine :.....	12
I.B.4. Caractéristiques du papier presspahn .....	14
I.B.5.1. Matière première.....	15
I.B.5.2. Processus de fabrication .....	15
I.B.6. Propriétés du papier.....	16
I.B.6.1. Propriétés physiques .....	16
I.B.6.1.1. Epaisseur .....	16
I.B.6.1.2. Masse volumique et perméabilité à l'air .....	16
I.B.6.1.3. Hygroscopicité .....	16
I.6.2. Propriétés mécaniques.....	17
I.B.6.2.1 Résistance au déchirement .....	17
I.B.6.2.2 Résistance à la traction.....	17
I.B.6.3. Propriétés diélectriques du papier non imprégné .....	17
I.B.6.3.1. La permittivité et le facteur de pertes diélectriques .....	19
I.B.6.3.2. La résistivité transversale.....	20
I.B.6.3.3. Facteur de qualité.....	20
I.B.6.3.4. Rigidité diélectrique.....	21
I.B.6.4. Propriétés thermiques du papier .....	21
I.B.6.4.1. La conductibilité thermique .....	22

I.B.6.4.2. Stabilité thermique .....	22
I.B.7. Séchage du papier.....	22
I.B.8. Imprégnant .....	22
I.B.8.1. Caractéristiques du papier imprégné .....	23
I.B.8.1.1. Hygroscopie du papier imprégné .....	23
I.B.8.1.2. Propriétés diélectriques du papier imprégné.....	23
I.B.9. Conclusion.....	24

## **CHAPITRE II : vieillissement thermique des isolants**

II. 1 Historique .....	25
II.2 Introduction .....	25
II.3. Types de vieillissement .....	26
II.3.1. Vieillissement physique .....	27
II.3.1.1. Vieillissement physique avec transfert de masse .....	27
II.3.1.2. Vieillissement physique sans transfert de masse.....	28
II.3.2 Vieillissement électrique des câbles .....	28
II.3.3. Vieillissement chimique.....	29
II.3.4. Vieillissement thermique .....	30
II.3.4.1. Endurance thermique.....	31
II.3.4.2. Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides .....	32
II.3.4.3. Choix des températures de vieillissement .....	34
II.3.4.4. Durée de vie .....	34
II.3.4.5 Vitesse de dégradation .....	34
II.4 Conséquences du vieillissement .....	35
II.5 Conclusion .....	35

## **CHAPITRE III : Modèle statistique de Weibull**

III.1. Introduction .....	36
---------------------------	----



III.2. Utilisation de la loi de Weibull pour modéliser les données de fiabilité.....	36
III. 3. Modèle statistique de Weibull .....	36
III.3.1. Base du modèle.....	36
III.3.2. Loi de Weibull .....	37
III.3.3. Modèle de Weibull à deux paramètres .....	37
III.3.4. Modèle de Weibull à trois paramètres .....	37
III.4. Signification des paramètres de Weibull.....	38
III.4.1. Paramètre de forme $\alpha$ .....	38
III.4.2. Paramètre de localisation $X_S$ .....	38
III.4.3. Paramètre d'échelle $X_0$ .....	38
III.5. Avantages de la loi de Weibull .....	39
III.6. Application du modèle de Weibull à l'étude de la tenue diélectrique des isolants solides .....	39
III.6.1. Tenue diélectrique à long terme .....	40
III.6.2. Tenue diélectrique à court terme .....	40
III.7. Diagramme de Weibull .....	41
III.8. CONCLUSION .....	41

## **PARTIE EXPERIMENTALE**

IV. Déroulement de la partie pratique .....	42
IV.1 Préparation des échantillons.....	42
VI.1.1 Vieillessement.....	42
III.1.2 Découpage de papier .....	42
III.1.3 Séchage du papier.....	43
III.1.4 Conditionnement .....	43
IV.1.5 Imprégnant.....	44
IV.2 Essais.....	45
III.2.1 schéma électrique .....	45

## *Table de matières*

---

III.2.2. Mesure de la rigidité diélectrique .....	45
III.2.3. Mesure de L'épaisseur .....	48
IV.3 Résultats obtenus.....	49
IV.3.1 Analyse statistique.....	49
IV.3.2. Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement .....	57
IV.3.3. Extrapolation des valeurs de la rigidité diélectrique .....	57
VI.3.4. Courbe de durée de vie .....	59
VI.4 Interprétation.....	59
VI.5 Discussions .....	60
<b>Introduction générale.....</b>	<b>61</b>

## Liste des figures

---

Figure I. 1:Modèle schématique de la synthèse d'un polymère. ....	4
Figure I. 2 : Papier presspahn. ....	11
Figure I. 3: Structure chimique de la cellulose.....	12
Figure I. 4 : Exemple d'hémicellulose. ....	13
Figure I. 5: structure chimique de la lignine. ....	13
Figure I. 6 : Circuit électrique équivalent série. ....	17
Figure I. 7: Diagramme de Fresnel des tensions d'un circuit série. ....	18
Figure I. 8 : Circuit équivalent parallèle. ....	18
Figure I. 9: Diagramme de Fresnel des courants d'un circuit équivalent parallèle.....	18
Figure I. 10: Influence de la température et du taux d'humidité sur la permittivité relative du papier [8]. ....	24
Figure I. 11: Influence de la température et du taux d'humidité sur le facteur de dissipation diélectrique du papier presspahn imprégné [8]. ....	24
Figure II. 1: schématisation des phénomènes de transfert de masse. ....	27
Figure II. 2 : Variation de la contrainte en fonction du temps de vieillissement. ....	32
Figure II. 3: Variation de P en fonction du temps de vieillissement pour différents température T. ....	33
Figure II. 4 : Variation de log(t) en fonction de l'inverse de la température absolue T.....	33
Figure IV. 1 :Enchantions de papier.....	42
Figure IV. 2:Etuve à air ventilée. ....	43
Figure IV. 3:Gel de la silicone .....	43
Figure IV. 4:Dessiccateur.....	44
Figure IV. 5:Imprégné le papier dans l'huile .....	44
Figure IV. 6: Schéma électrique.....	45
Figure IV. 7:Générateur de tension .....	46
Figure IV. 8: Transformateur .....	46
Figure IV. 9: Voltmètre de crête MU11. ....	47
Figure IV. 10: Système d'électrode. ....	47
Figure IV. 11: Système de dispositif. ....	47
Figure IV. 12: Canal de perforation. ....	47
Figure IV. 13: Un palmer de type TGL15048/I. ....	48
Figure IV. 14: Diagramme de Weibull à deux paramètres avant le vieillissement.....	50

Figure IV. 15: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 650 h à 100°C.....	50
Figure IV. 16 : Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 900 h à 100°C.....	51
Figure IV. 17: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 1500 h à 100°C.....	51
Figure IV. 18: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 400 h à 120°C.....	51
Figure IV. 19 : Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 600 h à 120°C.....	52
Figure IV. 20: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 1000 h à 120°C.....	52
Figure IV. 21: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 300 h à 140°C.....	52
Figure IV. 22: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 600 h à 140°C.....	53
Figure IV. 23: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 900 h à 140°C.....	53
Figure IV. 24: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 240 h à 160°C.....	53
Figure IV. 25: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 360 h à 160°C.....	54
Figure IV. 26: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 600 h à 160°C.....	54
Figure IV. 27: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 710 h à 160°C.....	54
Figure IV. 28: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 50 h à 180°C.....	55
Figure IV. 29: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 100 h à 180°C.....	55
Figure IV. 30: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 200 h à 180°C.....	55

## Liste des figures

---

Figure IV. 31: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 250 h à 180°C.....	56
Figure IV. 32: Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 290 h à 180°C.....	56
Figure IV. 33 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement ..	57
Figure IV. 34 : extrapolation des valeur de la rigidité d'électrique a tes temps de vieillissement élevés.....	58
Figure IV. 35 : variation de Log(t) en fonction de l'inverse de la température absolue T.....	59

## *Liste des tableaux*

---

Tableau I. 1 : Constitutions des papiers utilisés dans le domaine de L'industrie électrotechnique [6].....	13
Tableau I. 2 : Caractéristiques du papier presspahn [12].....	13
Tableau II. 1 : Liste de quelques facteurs d'influence importants et de modes de Fonctionnement relatifs à l'isolation de Matériels électriques (CEI 505). . . . .	26
Tableau II. 2 : Classification des isolants en fonction de la température. ....	30

**Chapitre 01**

$C_S$  : Capacité monté en série

$C_P$  : Capacité monté en parallèle

$d$ : Epaisseur de l'échantillon

$DP_n$  : Degré de polymérisation

$I$  : Le courant

$I_C$  : Courant de la capacité

$I_R$  : Courant de la résistance

$M$  : La masse molaire du polymère

$M_0$  : La masse molaire du monomère

$Q_S$  : Facteur de qualité pour le cas série

$Q_P$  : Facteur de qualité pour le cas parallèle

$R_t$  : La résistance transversale

$R_S$  : Résistance monté en série

$R_P$  : Résistance monté en parallèle

$S$  : Surface d'électrode

$U$  : Tensions

$U_C$  : Tensions d'une capacité

$U_R$  : Tensions d'une résistance

$Z_C$  : Impédance d'une capacité

$\epsilon_0$  : La permittivité à vide avec  $\epsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}$  F/m

$\epsilon_r$  : Permittivité relative

$\epsilon'$  : Constante diélectrique

$\varepsilon''$  : L'indice de pertes

$\rho_t$  : La résistivité transversale

$\omega$  : Pulsation

$\omega_0$  : Pulsation

$\sigma$  : La rigidité du milieu

## **Chapitre 02**

A : constante caractéristique du matériau

R : constante des gaz parfait

T : température absolue

E : Energie d'activation du phénomène.

## **Chapitre 03**

a : paramètre de dispersion en temps ;

b : paramètre de dispersion en champs ;

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

G : champ électrique appliqué ;

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

N : nombre des échantillons testés

t : temps

P : probabilité de rupture

$P_n$  : L'indice de probabilité

P : probabilité de rupture

P(X) : probabilité de rupture ;

V : vitesse de montée de la rampe du champ électrique ;

X : variable aléatoire ;

$X_0$  : paramètre d'échelle ;

$X_s$  : paramètre de localisation



$\alpha$  : Paramètre de forme.

Chapitre 04

U : tension de claquage

$d_{moy}$ : Épaisseur moyenne

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

N : nombre total d'échantillons testés.

MU11 : Voltmètre de crête

A et B : constantes ;

$B = E/R$ ;

T : température absolue [K];

E : énergie d'activation [J/mol] ;

R : constante des gaz parfaits ( $R = 8.314 \text{ J/mol.K}$ ).

### **Abréviation**

(PE) : polyéthylène

(PVC) : polychlorure de vinyle

(PS) : polystyrène

(PET) : polyéthylène téréphtalate

(PP) : Polypropylène

(PSP) : Papiers presspahn

°C : degré Celsius

HT : haut tension

(UV) : ultra-violet

Max : maximum

CEI : commission Electrotechnique Internationale

SG1 : générateur de tension

## *Liste des symboles et abréviations*

---

AC : Alternatif courant (courant alternatif)

DC : Direct courant (courant continu)

Hz : Hertz

h : heure

s : second

mm<sup>3</sup> : Millimètre cube

mm<sup>2</sup> : Millimètre carrée

mm : Millimètre

cm<sup>3</sup> : Centimètre cube

cm<sup>2</sup> : Centimètre carrée

cm : Centimètre

µm : Micron mètre

mV: Méga volts

kV : kilo volts

g : Gramme

kg: Kilo gramme

s : Secondes

Ln : Logarithme népérienne

kΩ : Kilo Ohm

*Introduction*

*générale*

## **Introduction**

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

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

Dans le premier chapitre nous avons présenté deux parties, la première est consacrée à des généralités sur les polymères, à savoir la définition polymère, classification polymère, type de polymérisation et domaines d'application. Dans la deuxième partie, sont présentées des généralités sur le papier presspahn, à savoir la composition chimique, ces propriétés, élaboration et domaines d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit le vieillissement thermique des isolants solide.

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

Enfin 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.

*Chapitre 01 :*

*Polymères et*

*Papier presspahn*

## **I.A. Les polymères**

### **I.A.1.Introduction**

Les polymères naturels ont été parmi les premiers matériaux utilisés par l'homme : bois et fibres végétales, cuir, tendons d'animaux, laine, etc. La notion de macromolécule n'est apparue que tardivement dans l'histoire de la chimie [1].

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets ménagers de la vie courante, dans lesquels ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Ils sont présents dans de nombreux domaines industriels. Suivant la température, les propriétés diélectriques des polymères varient. De plus, comme ils sont métastables, il y a donc une évolution de leur comportement en fonction du temps. Cette évolution peut être simulée en utilisant les méthodes de modélisation moléculaires. La dynamique moléculaire s'applique aussi bien à l'étude structurale des molécules qu'à des systèmes en interaction de grande taille. La dynamique moléculaire trouve désormais de nombreuses applications : biologie, biochimie, chimie organique, physique des particules, physique de l'état solide, sciences des matériaux, mécanique [1].

Pour l'utilisation correcte de ces matériaux il est essentiel de connaître leurs avantages et inconvénients. L'objectif de cette partie est d'éclairer simplement la chimie macromoléculaire et son apport avantageux notre science [1].

### **I.A.2.Historique**

L'étude des polymères appartient à une science qui a pris son essor dans les années 1940 car pendant la guerre, il est apparu nécessaire de fabriquer certains matériaux qui manquaient. Avant 1940, il y avait déjà eu des sursauts. Les premiers soubresauts de la chimie des polymères sont apparus dès les années 1900.

A cette époque, on distinguait deux catégories molécules organiques :

1- Les cristaalloïdes. 2- Les colloïdes.

- Les cristaalloïdes sont des composés organiques cristallisables, de température de fusion et de masses molaires définies ;
- Les colloïdes sont des molécules visqueuses, ne cristallisant pas et ayant des températures de fusion aléatoire.

En 1925, Staudinger identifie que les colloïdes sont une association de plus de 100 000 atomes de carbones reliés entre eux par des liaisons covalentes. Au début des années 1950, Carothers et Flory démontrent l'existence d'édifices covalents de masse molaire supérieure à 100 000 g/mol existent. Ce sera le fondement de la théorie des polymères. Dès cette époque, on a établi la notion de polymères [2].

### I.A.3. Définition

Le mot polymère représente une molécule dont la masse moléculaire est assez élevée habituellement organique ou semi-organique. Une macromolécule formée d'une longue chaîne qui contient différents monomères attachés avec des liens covalents. [3]

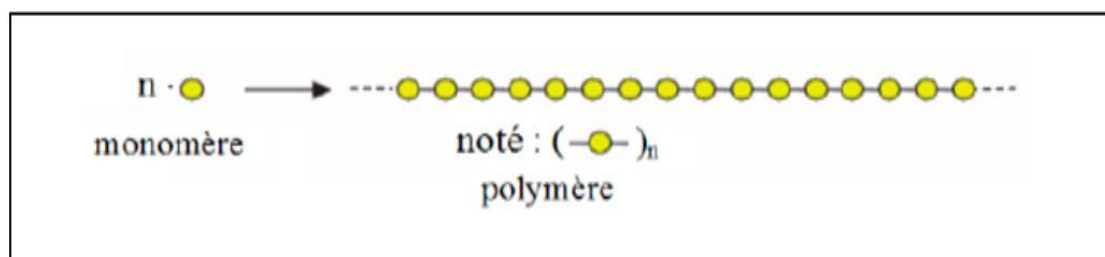


Figure I. 1:Modèle schématique de la synthèse d'un polymère.

### I.A.4. Classification des polymères

Les modes de classification sont nombreux, ils peuvent être classés suivant divers critères. Les plus importants sont :

#### I.A.4.1. Selon l'origine

On a reconnu trois caractères :

- **Polymères naturels** : sont l'originel de quelques matériaux exploités par l'homme dont on trouve : fibre de bois et de végétaux, laine, tendons d'animaux, acide nucléiques, protéines, polysaccharides (cellulose et chitine), caoutchouc naturel ou latex, lignine, etc.
- **Polymères synthétiques** : les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels et les monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature, tels comme le polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC), polystyrène(PS), polyéthylène téréphtalate (PET).
- **Les polymères artificiels** :

Ils sont conclus d'après la modification chimique d'un polymère naturel d'origine Végétale comme (cellulose) ou bien animale comme (la caséine du lait).



### **I.A.4.2.Selon leur nature chimique**

On a signalé trois groupes :

- **Les polymères minéraux** : Ils sont constitués soit de chaînes renfermant un seul corps simple : diamant, graphite, phosphore, soufre... Ou de chaînes renfermant plusieurs hétéroatomes : (silicates acides poly phosphoriques, chlorure de polyphosphonitrile).
- **Polymères organiques** : C'est la classe la plus riche comme : les polydiènes, les polyacryliques, les polyamides, les polyvinyles.
- **Polymères mixtes** : ils ont une caractéristique profitable, dont une bonne résistance thermique entre (300°C\_350°C).

### **1.4.3. Selon leur domaine d'application**

On les a classés en trois groupes importants :

- **Les polymères de grande diffusion** : l'intensité de la fabrication et l'exportation sont élevés contrairement à leurs prix, qui sont onéreux. Exemple : le Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP), Polystyrène (PS), Polychlorure de vinyle (PVC).
- **Les polymères techniques** : les ont des caractéristiques qui leur permettent de se substituer, de plus en plus, aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques...) on de nombreuses application comme les polyamides, les polyacétales...fond partie de cette famille.
- **Les polymères spéciaux** : c'est cette catégorie qui contient les polymères conducteurs, photos-actifs thermostables, adhésifs.

### **I.A.4.4.Selon leur comportement thermique**

Les propriétés des polymères permettent des usages très variés, on les regroupe dans quatre familles :

- **Les thermoplastiques** : Ils se ramollissent par simple chauffage par exemple le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS).
- **Les thermodurcissables** : leur réaction à la température irréversible, car si on a passé les bornes d'une température donnée cela peut causer des dommages sur la matière. dans toutes les manières, la réticulation se réalise sous l'effet de la chaleur ou de catalyseurs et cela se produit à une température ambiante ou élevée comme sur les résines polyesters, phénoliques, polyuréthanes ou les résines à base de formaldéhyde.

- **L'élastomère** : il est un polymère qui supporte différemment par ses propriétés élastiques acquises après réticulation et la possibilité de tenir des déformations importantes avant rupture. Les élastomères se différencient des thermodurcissables par leur propriété élastique caoutchouteuse, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contraintes mécaniques.
- **L'élastomère thermoplastique** : il est un polymère linéaire ou ramifié présentant des propriétés d'élasticité caoutchouteuse d'un élastomère et la facilité de mise en œuvre d'un thermoplastique.

### **I.A.5. Polymérisation**

Est une réaction synthétique qui convertit des monomères similaires ou différents en polymère, et aussi un mécanisme chimique dans lequel les réactifs, les monomères, sont chimiquement regroupés, donnant naissance à une molécule de poids important, nommée macromolécule tridimensionnelle.

#### **I.A.5.1. Types de polymérisation**

Elles sont divisées en deux étapes :

- **Polymérisation en chaîne** : c'est une agone de chaîne active qui est effectuée. Les monomères s'associent sans réaction d'élimination simultanée. C'est le procédé le plus utilisé dans l'industrie. on peut les répartir en polymérisations radicalaires, cationiques, anioniques et en chaîne de coordination, comme le polyéthylène, le polypropylène et le polystyrène qui sont des exemples de polymères obtenus par ce type de polymérisation.
- **Polymérisation par condensation** : les monomères s'accordent avec élimination simultanée d'atomes ou de groupes d'atomes et cela pendant la polycondensation.

#### **I.A.5.2. Technique de polymérisation**

Chaque composé chimique, même un polymère, exige des conditions approuvées par des résultats satisfaisants et réussir les produits souhaités. Les techniques de polymérisation peuvent être réparties en cinq types principaux : en masse, solution, suspension, émulsion, en phase gazeuse.

##### **I.A.5.2.1. polymérisation en masse**

Est considérablement appliquée dans la fabrication des polymères de condensation où les réactions légèrement exothermiques. La polymérisation en masse de monomères vinyliques est plus difficile. Les réactions sont hautement exothermiques, à vitesse qui dépend

fortement de la température. Ce n'est pas tout, car aussi le problème de transfert de chaleur dû à l'augmentation de la viscosité au début de la réaction, cela conduit à la difficulté du contrôle et à une tendance à l'hétérogénéité de la taille des molécules formées [4].

### **I.A.5.2.2. polymérisation en solution**

La polymérisation en solution est effectuée cette fois en présence d'un solvant du polymère, un solvant qui agit à la fois sur les réactifs et sur le polymère. Cette méthode, comparée à la polymérisation en masse, provoque le ralentissement de la réaction en raison de l'effet diluant du solvant ; le contrôle de la température est favorisé, car la viscosité du milieu est relativement faible et les conditions de polymérisation uniformisées [5].

### **I.A.5.2.3.La polymérisation en suspension**

Cette technique est largement pratiquée pour la polyaddition, ce qui donne un polymère ayant une taille de particules supérieure à celle obtenue par émulsion et est préférée dans la fabrication de polymères industriels comme le polystyrène expansible, ou encore pour celle du polychlorure de vinyle (PVC) [5].

### **I.A.5.2.4.Polymérisation en émulsion**

Comme la polymérisation en suspension, elle se fait en milieu aqueux, mais selon un mécanisme différent, dans un réacteur vertical à forte agitation. La polymérisation contient deux phases liquides non miscibles, une phase aqueuse continue et une phase discontinue non aqueuse constituée d'un monomère et d'un polymère. Les systèmes d'émulsion permettent au polymère de masse moléculaire plus élevée d'être produit à des vitesses plus élevées que les systèmes en masse ou en suspension [4].

### **I.A.5.2.5.Polymérisation en phase gazeuse**

Cette technique de polymérisation est employée pour la polyaddition de monomères gazeux avec des amorces de coordination à haute efficacité, maintenus sous forme de particules dans un lit fluidifié, continu. Les techniques de traitement des gaz et des boues sont principalement utilisées pour la production de polyoléfines.

### **I.A.5.3.Comparaison des diverses méthodes de polymérisation**

Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients :

#### **I.A.5.3.1. Polymérisation en solution**

✓ **Avantage :**

↳ Contrôle aisé du dégagement thermique

✓ **Inconvénients :**

- ↳ Difficulté pour débarrasser totalement le polymère du solvant résiduel.
- ↳ Équipement complexe et onéreux pour la récupération et la purification du solvant.
- ↳ Réaction relativement lente.

**I.A.5.3.2.Polymérisation en suspension**

✓ **Avantage :**

- ↳ Récupération facile de polymères ;
- ↳ Contrôle aisé des dégagements thermique.

✓ **Inconvénients**

- ↳ Contrôle critique de l'agitation ;
- ↳ Réaction relativement lente ;
- ↳ Contamination du polymère.

**I. A.5.3.3.Polymérisation en émulsion**

✓ **Avantage :**

- ↳ Polymérisation rapide, conduisant à des polymères de degré de polymérisation élevé ;
- ↳ Contrôle aisé du dégagement thermique
- ↳ Souplesse du procédé en copolymérisation.

✓ **Inconvénients :**

- ↳ Contamination du polymère par l'émulsifiant et l'agent de coagulation, d'où une coloration variable du polymère et une limitation des domaines d'applications.

**I.5.3.5. Polymérisation en masse**

✓ **Avantage :**

- ↳ Polymère contenant un minimum d'impuretés résiduelles.

✓ **Inconvénients :**

- ↳ Difficulté de contrôle des échanges de chaleur ;
- ↳ Difficulté de contrôle du degré de polymérisation et distribution large des masses molaires moyennes pour les fortes conversions.

### **I.A.5.4. Degré de polymérisation $DP_n$ (indice de polymérisation)**

La polymérisation des monomères ne conduit pas forcément à un produit unique, c'est-à-dire que la valeur de « n » n'est pas connue a priori. Ainsi la masse molaire d'un polymère n'est pas unique et elle dépend de la valeur de « n ». Pour rendre compte de cette dispersion de masse molaire moléculaire, on définit le nombre moyen de motifs par chaîne qu'on appelle degré de polymérisation : soit M la masse molaire du polymère et  $M_0$  la masse molaire du monomère, alors le degré de polymérisation est :

$$DP_n = \frac{M}{M_0} \quad (\text{I. A. 1})$$

### **I.A.6. Domaines d'application des polymères**

Les polymères sont appliqués dans tous les domaines de notre vie quotidienne. On peut en citer différents secteurs, tels que : vêtements, textiles naturels et synthétiques, fibres, mousses isolantes, vernis, colles, seaux, vaisselles :

- Industrie électrique et électronique (gainage de câbles, transformateurs, façades de téléviseurs, boîtiers) ;
- Médecine et santé : Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie ;
- Bâtiments- travaux publics (peintures, isolation, revêtements de sol) ;
- Domaine agriculture (arrosage, serres, bâches) ;
- Domaine alimentaire (bouteilles, pots de yaourt) et aussi dans les moyens de transport comme l'automobile (habillage intérieur, réservoirs d'essences).

### **I.A.7. Conclusion**

C'est avec l'instruction de mécanisme de la chimie des polymères et des travaux polymères qui permettent de choisir les matériaux convenables pour chaque utilisation. L'intense effort de recherche effectuée dans le domaine des matériaux organiques et singulièrement dans l'élaboration de nouveaux polymères fonctionnalisés pour des applications en optique ou optoélectronique a ouvert des perspectives nouvelles déterminantes.

En effet, les avancées obtenues ces dix dernières années ne confinent plus les dispositifs optiques organiques comme matériaux peu adaptés à des applications industrielles.

Plus important encore, des percées suffisamment significatives ont été réalisées pour bouleverser des domaines jusqu'à présent bien dominés par les inorganiques.

En particulier, la synthèse de molécules organiques permettant la fabrication de fils polymères dopés possédant des coefficients électro-optiques découplés dix fois supérieurs de celui du niobate de lithium, n'est plus une chimère, et permet d'envisager l'évènement des transmissions à très haut débit.

Pour conclure, nous dirais que les polymères présentent une spécialité de la chimie entière.

## **I.B. Papier presspahn**

### **I.B.1 Présentation du papier presspahn**

Papiers et cartons sont des isolants solides qui sont utilisés dans l'isolation du bobinage de haute tension et entre couches de transformateurs et les câbles électriques. Nous nous intéressons dans ce chapitre au papier presspahn utilisé pour isolation des parties conductrices [6].

Dès le début du XX siècle, ils étaient déjà largement utilisés dans l'industrie électrique. Des produits suffisamment élaborés étaient disponibles : papier parchemin, papier à base de coton, de lin, de chanvre ou même d'amiante, cartons comprimés dénommés presspahn, matériaux constitués d'une fibre vulcanisée [7].

A partir de 1920, les papiers et cartons kraft, fabriqués à partir d'une pâte de bois par le procédé des sulfates, vont s'imposer sans éliminer d'autres produits comme le papier « manille » à base de chanvre. Actuellement les papiers sont largement utilisés dans l'industrie électrique [7].



**Figure I. 2 :** Papier presspahn.

### **I.B.2. Papiers presspahn utilisés en électrotechnique**

Généralement, en électrotechnique, on utilise :

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

Ce dernier est l'un des papiers les plus utilisés dans l'industrie électrique

### I.B.3. Composition du papier presspahn

Le papier est composé de trois constituants principaux: cellulose, l'hémicellulose et la lignine qui sont d'origine végétale : bois, alfa, coton, lin, chanvre, chiffons, etc.

#### I.B.3.1. Structure chimique

##### 1. La cellulose

Le papier est composé d'une chaîne longue d'anneaux de glucose de 4000 à 5000 en moyenne, plus précisément d'anhydroglucopyranoses, reliés entre eux par des liaisons  $\beta$ -1,4. Les extrémités d'une chaîne de cellulose sont de deux natures différentes : l'une est réductrice, l'autre ne l'est pas [8].

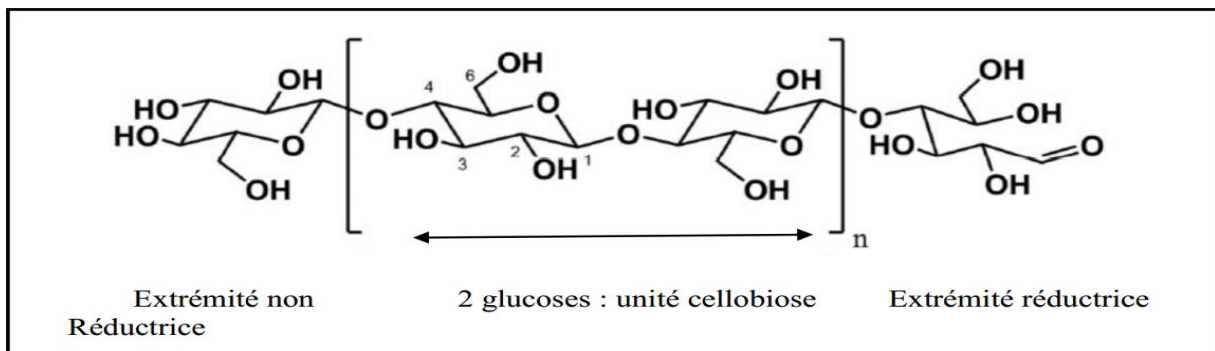


Figure I. 3: Structure chimique de la cellulose.

- **Structure physique de la cellulose** : la présence de ces liaisons confère aux chaînes de cellulose une forme linéaire qui leur permet de composer une structure compacte et ordonnée à chaîne plane. L'association de plusieurs dizaines, voire de centaines de chaînes de cellulose, liées entre elles par des liaisons hydrogène constitue les microfibrilles. On distingue dans ces dernières, des régions cristallines où les molécules sont parfaitement parallèles, et des régions plus désordonnées dites amorphes. Les parties amorphes, plus accessibles aux solvants, elles sont facilement gonflables et déformables. En revanche, les zones cristallines sont stables et résistent mieux à la pénétration de solvants ou de réactifs. Oscillant entre 50% et 90%, le degré de cristallinité dépend de la source de cellulose [9].
- **Propriétés physico-chimiques** : la cellulose possède un caractère polaire dû à la présence de ses nombreux groupements hydroxyles. Elle n'a d'affinité qu'avec les liquides polaires. Les groupements réactifs de la cellulose sont les trois groupements « alcool » des unités anhydroglucoses. Les fonctions (-OH) sont plus accessibles dans les zones amorphes. Les



zones cristallines sont difficilement accessibles : elles réagissent peu ou pas du tout en milieu aqueux non alcalin.

## 2. Hémicellulose

Les hémicelluloses sont constituées par une chaîne de glucose plus restreint que celle de la cellulose, ce qui leur confère une solubilité dans les solutions alcalines (KOH 15%)[6].

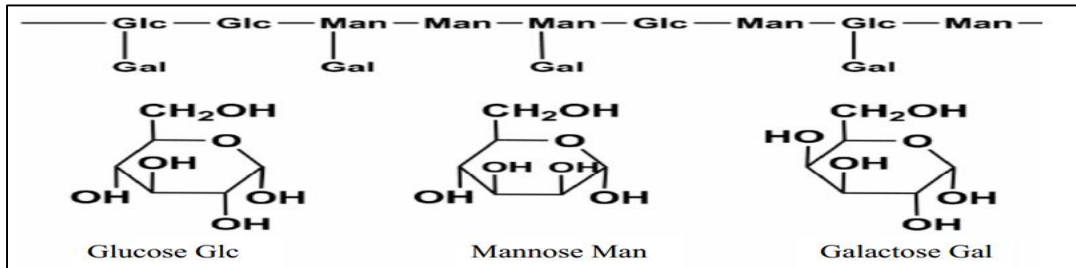


Figure I. 4 : Exemple d'hémicellulose.

## 3. Lignine

Les lignines sont des polymères tridimensionnels irréguliers constitués de motifs phenylpropane. Ils jouent un rôle de ciment. La lignine résiduelle dans la pâte après traitement est difficile à éliminer (inaccessibilité physique, liaisons lignines-hydrate de carbone) sans provoquer de coupures dans les chaînes de cellulose et par conséquent une dépolymérisation importante de la cellulose[10].

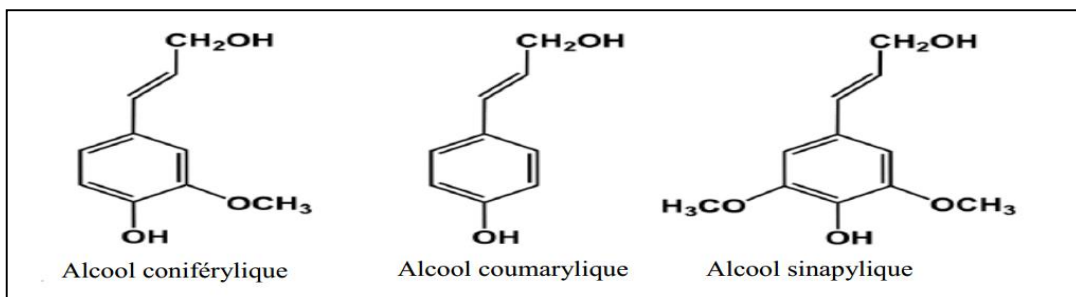


Figure I. 5: structure chimique de la lignine.

**Tableau I. 1** : Constitutions des papiers utilisés dans le domaine de L'industrie électrotechnique [6].

<b>Papier Constituants</b>	<b>Papier kraft pour câbles</b>	<b>Papier 100 % manille</b>	<b>Papier coton</b>
<b><math>\alpha</math>-cellulose</b>	88.3	78.8	95
<b>Hémicellulose</b>	2.9	11.4	0.5
<b>Lignine</b>	4.3	8.9	0.9
<b>Cendre</b>	0.5	0.7	0.1
<b>Teneur en Sulfate</b>	0.02	-	0.1
<b>Teneur en Chlorure</b>	0.02	-	0.1
<b>Autres impuretés</b>	3.96	0.4	3.3

#### **I.B.4. Caractéristiques du papier presspahn**

Le papier presspahn a une très bonne résistance mécanique et d'excellentes propriétés diélectriques [11]. Le tableau I.2 donne quelques caractéristiques du papier presspahn dans différentes conditions d'essai.

**Tableau I. 2** : Caractéristiques du papier presspahn [12].

<b>Caractéristiques</b>	<b>Conditions d'essai</b>	<b>Valeur moyenne</b>
<b>Masse volumique</b>	Teneur en eau 6%	1,22 g/cm <sup>3</sup>
<b>Epaisseur</b>	-	1 à 8 mm
<b>Résistance à la traction (sens machine)</b>	Teneur en eau <1% Séché et imprégné d'huile	1300 kg/cm <sup>2</sup> 1130 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Résistance à la flexion (sens machine)</b>	Teneur en eau <1% Séché et imprégné d'huile	1260 kg/cm <sup>2</sup> 1220 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Absorption d'huile</b>	90 °C, 0,1 Torr	16%
<b>Teneur en cendre</b>	-	0,33%
<b>Permittivité (<math>\epsilon_r</math>)</b>	20 °C	4,4
	100 °C	4,9
<b>Tan <math>\delta</math> (carton imprégné d'huile)</b>	20 °C	0,38%
	100 °C	4,9%

<b>Résistivité (carton imprégné d'huile)</b>	Epaisseur 1 à 5 mm	$3.10^{15} \Omega.cm$
	Epaisseur 6 à 12 mm	$8.10^{15}\Omega.cm$
<b>Rigidité diélectrique dans l'huile, 1mm, 50 Hz, sphère : <math>\Phi=25</math> mm</b>	Epaisseur 1 mm	37 kV
	Epaisseur 3 mm	85 Kv
<b>Tension de tenue au choc dans l'huile 1/50, sphère : <math>\Phi=25</math> mm</b>	Epaisseur 1 mm	92 Kv
	Epaisseur 3 mm	210 kV
<b>Tenue au cheminement dans l'huile (champ uniforme)</b>	1 mm, 50 Hz	60 kV/cm
	1/50 $\mu$ sec	150 kV/cm

### **I.B.5.Procédé de fabrication du papier**

#### **I.B.5.1. Matière première**

Elle est une pâte de bois, obtenue à partir de résineux (pins, sapins suédois ou canadiens) par le procédé au sulfate, avec laquelle on peut fabriquer une feuille de papier dont les pertes diélectriques sont minimales [8].

#### **I.B.5.2. Processus de fabrication**

Pour fabriquer ce papier, on commence d'abord par préparer la pâte de bois. Elle est d'une grande teneur en lignine, ce qui permet assemblage et cohésion des fibres de cellulose entre elles.

La première étape : extraire la lignine, ce que passe par deux actions :

- ✓ Broyage (action mécanique) à l'aide d'une machine qui permet de casser la robustesse du bois, à la fin de cette action on obtient une pâte constituée d'un mélange de fibres de celluloses, et d'hémicellulose et de lignine.
- ✓ Par action chimique « utilisation de produits chimiques » ou l'on emploie généralement de la soude bisulfite, du sulfate, etc. La lignine va réagir avec ces produits pour obtenir des fibres de cellulose en suspension dans l'eau. Ces derniers vont subir un traitement spécial après obtention des fibres afin de les obtenir selon la masse volumique désirée. La feuille ne peut être formée qu'après encollage et apprêt, ensuite elle est égouttée, essorée, séchée au maximum afin d'éliminer l'eau.

### **I.B.6. Propriétés du papier**

Les propriétés du papier conditionnent fortement la mise en œuvre ainsi que la tenue en service de l'isolation à laquelle il est destiné. Ces propriétés soient profondément modifiées quand le papier se trouve imprégné. Parmi les principales caractéristiques du papier, on peut citer les propriétés physiques, mécaniques, diélectriques et thermiques.

#### **I.B.6.1. Propriétés physiques**

Les propriétés physiques du papier sont sensiblement conditionnées par sa teneur en eau, elle-même dépendante de l'humidité de l'atmosphère ambiante [6].

##### **I.B.6.1.1. Epaisseur**

Des papiers à épaisseurs variant entre 5 et 30 mm ont été utilisés dans l'industrie des condensateurs. Les constructeurs disposent de papiers d'épaisseurs plus importantes (30 à 170 $\mu\text{m}$ ) [8]. Quand il faut réaliser l'isolation des câbles dans les enroulements du transformateur, on utilise de fins papier de guipage des conducteurs qui ne dépassent pas 75  $\mu\text{m}$  [6]. Dans les transformateurs, les couches sont séparées par un papier à l'épaisseur variable entre 0.1 à 1 mm. 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.

##### **I.B.6.1.2. Masse volumique et perméabilité à l'air**

La masse volumique diffère d'un type de papier à l'autre, selon son procédé de fabrication. La masse volumique du papier du condensateur est comprise entre 1,1 et 1,3  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Celle de la cellulose proprement dite est de 1,4  $\text{g}/\text{cm}^3$  [8]. Pour le papier destiné à la construction des transformateurs de puissance et des câbles électriques, elle varie de 0,85 à 1,25  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Si le papier imprégné devait assurer une bonne tenue au choc de la foudre, la masse volumique et la perméabilité à l'air seront alors des caractéristiques décisives.

##### **I.B.6.1.3. 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 hydroxyles (-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, le 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 de papier [10].

### **I.6.2. Propriétés mécaniques**

Lors de la mise en œuvre des papiers ou des cartons comprimés, les principales propriétés mécaniques à prendre en compte sont la résistance à la traction et au déchirement, la résistance au pliage, et pour certains usages, la compressibilité [13]. Les papiers de condensateurs et les papiers utilisés pour le guipage des conducteurs sont, en général, de faible épaisseur. En régime de court-circuit, on peut avoir des pressions de 100 N/mm<sup>2</sup> dans un transformateur de puissance. Les enroulements doivent résister aux efforts radiaux et axiaux. Lors de la fabrication, il est nécessaire d'appliquer une compression radiale. La stabilisation des matériaux est obtenue par mises sous pression effectuées sur une longue période [11].

#### **I.B.6.2.1 Résistance au déchirement**

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

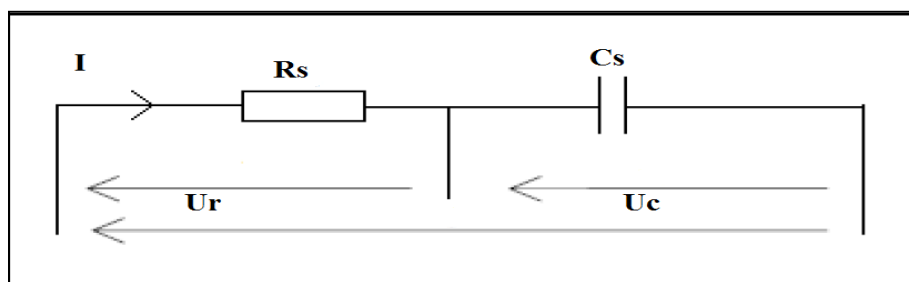
#### **I.B.6.2.2 Résistance à la traction**

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

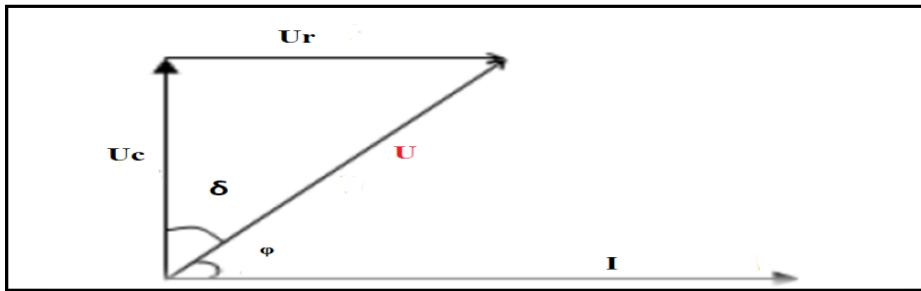
#### **I.B.6.3. Propriétés diélectriques du papier non imprégné**

Chaque élément isolant soumis à un champ électrique alternatif est traversé par des courants de conduction et d'absorption. Le diélectrique réel est figuré par les schémas d'équivalence suivants :

**a) Circuit électrique équivalent série :**



**Figure I. 6 :** Circuit électrique équivalent en série.



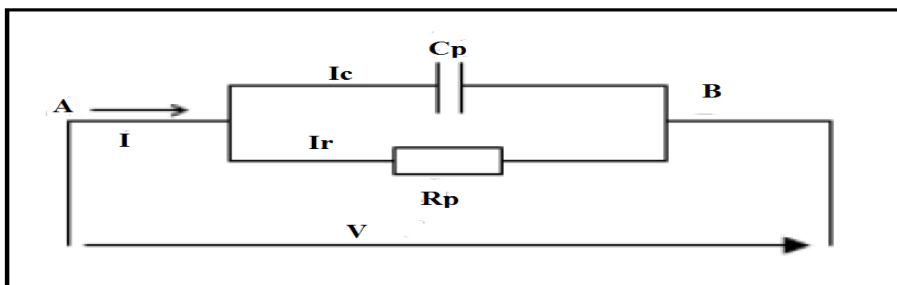
**Figure I. 7:** Diagramme de Fresnel des tensions d'un circuit en série.

$$U_C = \frac{1}{C_S \omega} I \quad (\text{I. B. 1})$$

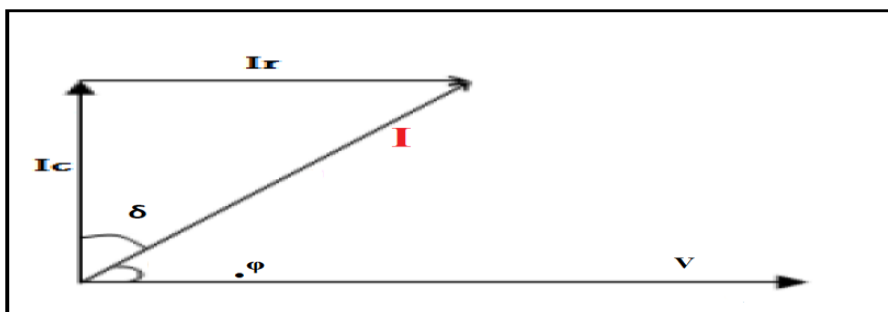
$$U_R = R_S I \quad (\text{I. B. 2})$$

$$\tan \delta = \frac{U_R}{U_C} = R_S C_S \omega \quad (\text{I. B. 4})$$

**b) Circuit électrique équivalent en parallèle :**



**Figure I. 8 :** Circuit équivalent en parallèle.



**Figure I. 9:** Diagramme de Fresnel des courants d'un circuit équivalent en parallèle.

$$I_R = \frac{U}{R_P} \quad (\text{I. B. 4})$$

$$I_C = \frac{U}{Z_C} = U \omega C_P \quad (\text{I. B. 5})$$

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{C_P R_P \omega} \quad (\text{I. B. 6})$$

### **I.B.6.3.1. Permittivité et facteur de pertes diélectriques**

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

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{I. B. 7})$$

$$\epsilon_r^*(\omega) = \epsilon'(\omega) + i. \epsilon''(\omega) \quad (\text{I. B. 8})$$

La permittivité relative d'un papier peut varier de 1,7 à 3,2 quand la masse volumique varie de 0,6 à 1,2 g/cm<sup>3</sup> [13].

$$\text{tg } \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (\text{I. B. 9})$$

Avec constante diélectrique  $\epsilon'$  :

$$\epsilon' = \frac{C_P d}{\epsilon_0 S} \quad (\text{I. B. 10})$$

Avec :

$C_P$  : Capacité parallèle ;

$d$ : Epaisseur de l'échantillon ;

$\epsilon_0$ : La permittivité à vide avec  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m ;

$S$ : Surface d'électrode.

L'indice de pertes  $\varepsilon''$  :

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta \quad (\text{I. B. 10})$$

La permittivité et le facteur de pertes diélectriques du papier ont été particulièrement étudiés en vue d'élaborer des méthodes de mesure permettant de déterminer la teneur en eau du papier au-cours du séchage [11].

En effet, la plupart des diélectriques n'étant pas parfaits, il existe toujours, en plus ou moins grand nombre, des charges libres provenant de mécanismes microscopiques liés notamment à la présence d'impuretés ou de défauts à l'origine d'un courant fuyant. Ce courant de fuite est lié à la conductivité statique, donc à la partie imaginaire  $\varepsilon''$  de la permittivité.

La conductivité de la cellulose est effectivement susceptible de provoquer une accumulation de charges aux interfaces cellulose-air. Pour papier pur, ce phénomène ne peut être observé qu'aux basses fréquences de l'ordre de  $10^{-4}$  Hz à  $100^\circ\text{C}$  [2]. La présence des impuretés ioniques provenant du bois ou absorbées pendant la fabrication du papier, ainsi que la présence d'humidité dans le papier provoquent, à la fréquence de 50 Hz, une aggravation des pertes vers les hautes températures [6].

#### **I.B.6.3.2. Résistivité transversale**

La résistivité transversale est déterminée telle que celle d'un conducteur par la relation :

$$\rho_t = \frac{R_t S}{d} \quad (\text{I. B. 11})$$

$$R_t = \frac{U}{I} \quad (\text{I. B. 12})$$

$R_t$  : Résistance transversale

Cette dernière est influencée par deux facteurs (humidité et température).

#### **I.B.6.3.3. Facteur de qualité**

Les pertes dans un circuit annoncent le facteur de qualité, et le plus dominant inclut moins de pertes.

- ✓ Pour le circuit série, le facteur de qualité donne :



$$Q_s = \frac{1}{\omega_0 R C} \quad (\text{I. B. 13})$$

✓ Le facteur de qualité, pour le cas parallèle, est :

$$Q_p = \omega_0 R C \quad (\text{I. B. 14})$$

#### **I.B.6.3.4. Rigidité diélectrique**

C'est la valeur maximale que peut atteindre le champ électrique en un milieu isolant (diélectrique) avant l'apparition d'étincelles. Elle s'exprime en (V/m) dans l'air normal, elle vaut 32 kV/cm, dans le mica " 140 kV/cm, dans le papier " 40 à 100 kV/cm et dans le titanate de baryum " 1760 kV/cm. Dans un condensateur, il faut veiller à ne pas atteindre cette valeur, sans quoi sera détruit le composant. La rigidité du milieu est définie par l'équation suivante [4].

$$\sigma = \frac{U_c}{d} \quad (\text{I. B. 15})$$

Avec :

d : épaisseur de l'isolant placé entre électrodes planes d'essai auxquelles est appliquée la tension  $U_c$ .

Les papiers font l'objet d'un certain nombre de contrôles ayant pour but de détecter des points faibles, en particulier la présence d'inclusions conductrices susceptibles de réduire la tenue diélectrique du papier quand il sera à l'état mouillé [13,14].

La rigidité diélectrique du papier non imprégné peut être considéré comme médiocre, elle est à peine supérieure à celle d'un film d'air de même épaisseur, elle est de l'ordre de 50kV/cm pour le papier presspahn et de 30 kV/cm environ pour l'air à 50 Hz. Cette rigidité s'améliore considérablement lorsque le papier est imprégné [15].

#### **I.B.6.4. Propriétés thermiques du papier**

Les propriétés thermiques du papier sont des paramètres absolument essentiels pour tenir une meilleure attitude en service d'une isolation.

L'une des contraintes thermiques à laquelle sont soumis les matériaux isolants utilisés en électricité est l'échauffement des parties actives. Cet effet concerne, à court terme le comportement instantané de l'isolant aux températures élevées. Ce sont entre autre le

claquage thermique, et à long terme, la dégradation de l'isolant qui s'opère progressivement à mesure de son vieillissement. Parmi ces propriétés, il est impératif de citer [2].

### **I.B.6.4.1. Conductibilité thermique**

Cette propriété aide à mesurer l'élévation de la température de l'isolation, empêche le claquage thermique et atténue le vieillissement de l'isolation.

### **I.B.6.4.2. Stabilité thermique**

Une des propriétés les plus considérables. Il est important de la prendre comme un intermédiaire lors du séchage et du traitement sous vide avant imprégnation. Le fait marquant que l'Oxygène et l'humidité sont des facteurs d'accélération du vieillissement du papier [6].

### **I.B.7. Séchage du papier**

Cette procédure permet de séparer un liquide d'un solide, d'un semi-solide, voire d'un liquide par évaporation. Le but du séchage du papier est de briser les liaisons existantes entre l'eau et la cellulose.

Les conditions de séchage varient d'un matériel à l'autre, en raison notamment du taux d'humidité souhaité à la fin du traitement, qui est généralement très faible, l'ordre de 0,1% dans le cas des condensateurs et des câbles, et qu'il atteint 0,5% environ pour un transformateur.

Le temps de séchage dépend de la température, du type d'isolation ainsi que de la vitesse de circulation d'air dans l'étuve.

Dans l'industrie le séchage d'une isolation de transformateurs HT se fait, en présence d'air (pré séchage vers 90° - 100° C). Suivi par un traitement progressif sous vide s'étalant sur plusieurs jours, par contre en absence d'air, on peut augmenter la température jusqu'à 130° C.

Après séchage, l'huile minérale utilisée comme imprégnant remplace l'eau et les gaz qui étaient présents dans le papier, sans qu'il soit possible d'éliminer totalement les molécules d'eau les plus solidement fixées à sa structure.

Lorsque le papier contient 3 à 5% d'humidité, un échauffement à 80 ou 100° C peut conduire à un transfert d'eau dans l'huile [8].

## **I.B.8. L'imprégnant**

Les liquides isolants sont exploités 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. La visée véritable de l'imprégnation est de protéger l'isolation diélectrique de la cellulose contre les effets diélectriques de l'humidité absorbée et d'augmenter son BIL (Basic Impulse Level) [17].

### **I.B.8.1. Caractéristiques du papier imprégné**

Le papier presspahn sans imprégnation a une insensibilité diélectrique faible en raison des aspérités et des cavités d'air qu'il contient.

#### **I.B.8.1.1. Hygroscopie du papier imprégné**

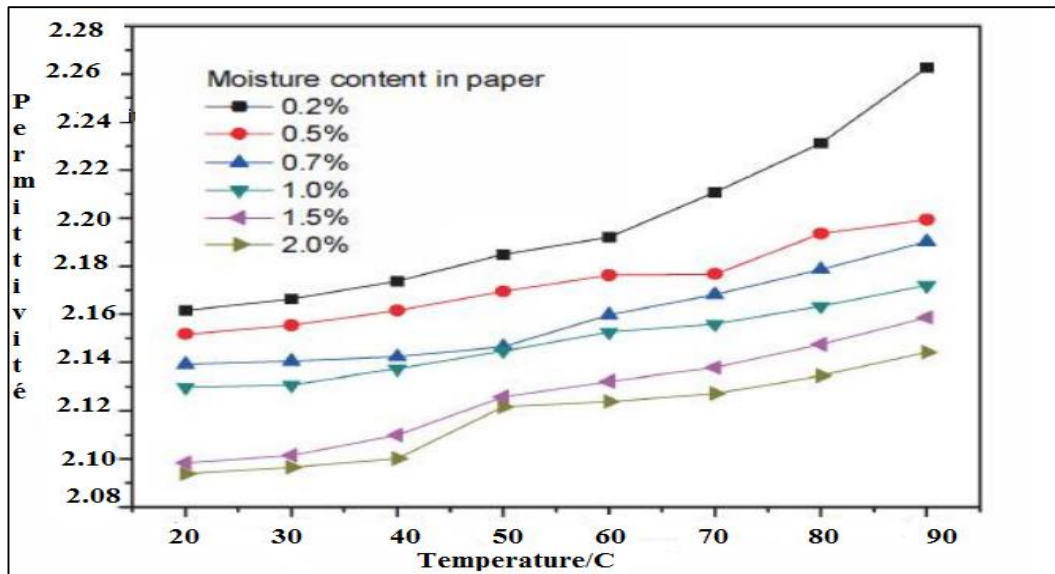
Le papier imprégné et immergé dans l'huile s'humidifiera tel qu'il était présenté dans l'air. Cependant, le développement de l'humidité de chacun des isolants est assez difficile quand il y'a échange d'humidité entre air et l'huile, d'une part et l'huile et papier, d'autre part [15].

#### **I.B.8.1.2. Propriétés diélectriques du papier imprégné**

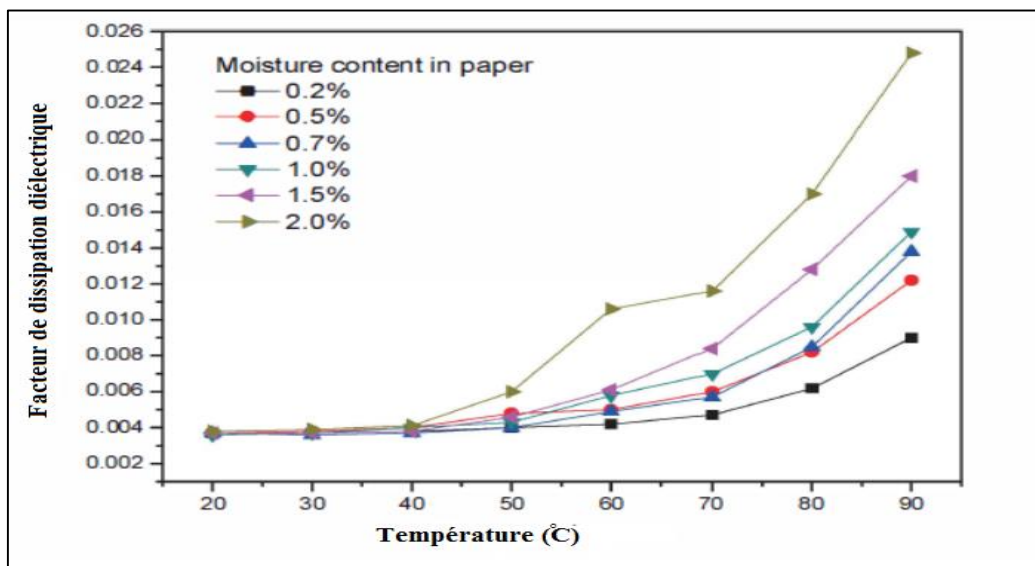
Les propriétés diélectriques du papier imprégné dépendent de l'imprégnant, mais encore, dans une certaine mesure, de la qualité du papier et de sa masse volumique. Les propriétés du papier que l'on doit prendre en considération sont sa permittivité relative, son facteur de dissipation diélectrique et sa rigidité diélectrique [6].

#### **I.B.8.1.3. Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique**

La permittivité relative et le facteur de dissipation diélectrique du papier imprégné se modifient aussi avec la température et la teneur en eau, ainsi qu'on peut le constater sur les figures « (I. 10) et (I. 11) » [6]. Ces courbes mettent en évidence l'influence de la température et du taux d'humidité sur la permittivité et le facteur de dissipation diélectrique.



**Figure I. 10:** Influence de la température et du taux d'humidité sur la permittivité relative du papier [8].



**Figure I. 11:** Influence de la température et du taux d'humidité sur le facteur de dissipation diélectrique du papier presspahn imprégné [8].

### **I.B.9.Conclusion**

Le papier presspahn est employé comme isolant entre spires et entre enroulements des transformateurs de haute et moyenne tension, utilisé comme cales de fermetures des moteurs, joints et pièces divers. Les propriétés du papier évaluent nettement la mise en œuvre ainsi que la tenue en service de l'isolation à laquelle il est destiné. Les principales propriétés sont les physiques, électriques, mécaniques et thermiques. Les propriétés diélectriques sont sensibles à par l'humidité et à la température.

*Chapitre 02 :*  
*Vieillissement*  
*thermique des*  
*isolants*

### **II.1. Historique**

On peut diviser l'histoire des isolants en 3 périodes :

- La première période commence avec la découverte des propriétés de l'ambre et s'achève à la fin du XVIème siècle. Elle intéresse les philosophes et les historiens
- En 1600, avec les travaux de W.GILBERT, s'ouvre une deuxième période riche en événement pendant laquelle l'histoire des isolants se confond avec celle de l'électricité. Les machines électriques, dont l'apparition se situe vers 1705, offre de nouvelles possibilités aux expérimentations, il est difficile de lui trouver une limite qui doit être placée au début du XIX siècle.
- Avec l'avènement de la télégraphie et de l'éclairage, débute une troisième période celle de l'utilisation d'une grande variété de matériaux élaborés à partir de produits naturels, végétaux ou minéraux.

Dès que la chimie se développe autour du charbon, la production des isolants synthétiques démarra. Actuellement les dérivés du pétrole s'imposent techniquement et économiquement sans toutefois avoir réussi à éliminer quelques produits naturels encore performants [18].

### **II.2. Introduction**

La contrainte diélectrique, qui impose l'emploi des matériaux isolants, n'est pas la seule qui doive être prise en considération dans l'étude d'une isolation. Dans tous les matériels, les isolants jouent le rôle d'un support mécanique des conducteurs et doivent donc transmettre les efforts électriques, normaux ou exceptionnels, qui s'exercent pendant le fonctionnement. En outre, ils ont à supporter, et souvent à transmettre par conduction au dispositif de réfrigération, la chaleur dégagée dans les différentes parties de l'appareil (conducteurs, circuits magnétiques et isolants).

A ces quatre catégories principales de contraintes (électrique, mécanique, chimique et thermique) s'ajouteront toujours d'autres influences spécifiques du matériel intéressé et de son environnement qui jouent un rôle important dans la tenue des isolations en service : action de l'humidité et de l'oxygène atmosphériques, action du rayonnement ultra-violet (UV) et des pollutions industrielles de toutes natures, actions des radiations nucléaires, action d'organismes vivants (bactéries, champignons, insectes, rats, etc.).

## ***Vieillessement thermique des isolants***

Toutes contraintes ou influences de l'environnement, qui agissent sur l'isolation d'un matériel pendant le service, sont dénommées facteurs d'influence (tableau 1.1) ; Il convient de bien distinguer que ces facteurs peuvent, selon leurs utilisations :

- faire vieillir ; on les appelle alors facteurs de vieillissement.
- rendre compte de l'état d'une isolation sans accroître son état de dégradation ; ils sont alors appelés facteurs de diagnostic [12].

**Tab II. 1 :** Facteurs d'influence et modes de fonctionnement relatifs à l'isolation de matériels électriques (CEI 505).

<p><b>Contraintes électriques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tensions de service</li> <li>- Surtensions (régime transitoire)</li> <li>- Décharges partielles</li> <li>- Cheminement</li> <li>- Décharges rampantes</li> </ul>	<p><b>Environnement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Air</li> <li>- Oxygène</li> <li>- Hydrogène</li> <li>- Azote</li> <li>- Gaz inertes</li> <li>- Hexafluorure de soufre</li> <li>- Pollutions industrielles</li> <li>- Rayonnement ultraviolet</li> <li>- Radiations nucléaires</li> <li>- Vide</li> <li>- Liquide isolants</li> <li>- Eaux</li> <li>- Humidité</li> </ul>
<p><b>Contraintes mécaniques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vibration électrodynamiques</li> <li>- Chocs électrodynamiques</li> <li>- Vibration mécanique</li> <li>- Flexion</li> <li>- Pression</li> </ul>	<p><b>Mode de fonctionnement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Continu</li> <li>- De courte durée</li> <li>- Intermittent</li> <li>- Intermittent avec démarrage et freinage électrique</li> <li>- Stockage et transport.</li> </ul>
<p><b>Contraintes thermiques</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Température maximale</li> <li>- Température ambiante basse</li> <li>- Température ambiante élevée</li> <li>- Gradient de température</li> <li>- Choc thermique</li> </ul>	

### **II.3. Types de vieillissement**

Les isolants, en général, se dégradent avec le temps, et ce phénomène on l'appelle le vieillissement des isolations. En effet, les causes de ce vieillissement sont des contraintes électriques, mécaniques, thermiques et celles du milieu ambiant. On distingue généralement quatre types de phénomènes de vieillissement : physique, chimique, électrique et thermique.

### **II.3.1. Vieillessement physique**

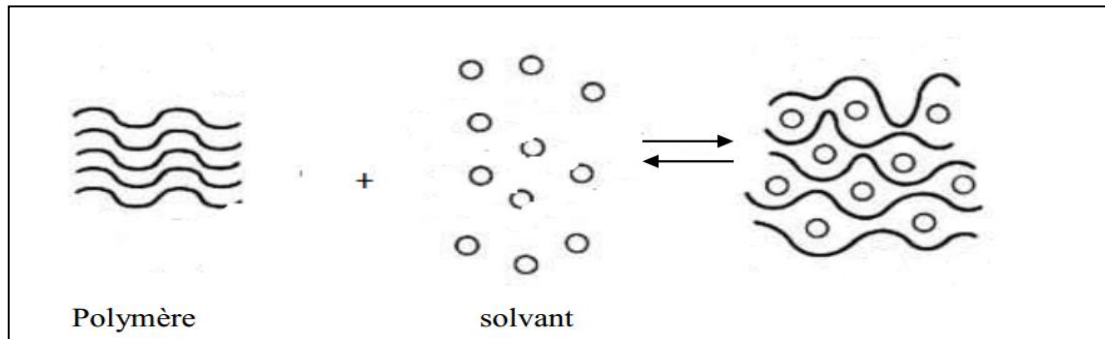
Le terme vieillissement physique renvoie aux processus conduisant à une altération irréversible des propriétés d'usage du matériau sans qu'il y ait modification chimique de la structure des macromolécules constituant le matériau. Le vieillissement physique peut résulter de :

- ✓ Modifications de la configuration spatiale des macromolécules (cristallisation) ;
- ✓ Phénomènes de surface (fissuration en milieu tensioactif) ;
- ✓ Phénomènes de transport (pénétration de solvants, migration d'adjuvants).

On distingue deux catégories décisives de phénomènes, selon qu'ils impliquent ou non un transfert de masse c'est-à-dire le transport de petites molécules du matériau vers l'environnement (perte d'adjuvants) ou vice versa (absorption de solvants).

#### **II.3.1.1. Vieillessement physique avec transfert de masse**

Les phénomènes de transfert de masse font essentiellement appel aux notions de solubilité, de diffusion et de plastification [8]. Ils peuvent être schématisés comme indiqué à la figure II.1 :



**Figure II. 1:** schématisation des phénomènes de transfert de masse.

##### **II.3.1.1.a. Pénétration de solvants**

La pénétration des solvants a pour conséquence le gonflement du polymère, mais aussi la plastification qui se traduit par une modification du comportement mécanique du matériau.

##### **II.3.1.1.b. Perte d'adjuvants**

La perte d'adjuvants résulte de la migration de ces derniers hors des matériaux. Dans tous les cas, la fuite de l'adjuvant se traduit par la perte des propriétés qu'il était censé apporter au polymère.



### **II.3.1.2. Vieillessement physique sans transfert de masse**

Des chocs thermiques risquent d'entraîner des ruptures mécaniques par dilatation différentielle (gradients de température dans l'épaisseur ou matériaux hétérogènes).

Un matériau peut se fissurer sous contrainte en présence d'un composé tensio-actif. Si le matériau est dans un état thermodynamique instable après sa mise en œuvre, il peut en résulter un vieillissement interne. Donc le processus physique lié au vieillissement vient du fait qu'il y a :

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

#### **II.3.1.2.1. Fissuration sous contrainte en milieu tensio-actif**

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

#### **II.3.1.2.2. Dilatation différentielle**

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

#### **II.3.1.2.3. Modification de la morphologie**

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

### **II.3.2 Vieillessement électrique des câbles**

La rigidité diélectrique des isolants polymères est naturellement limitée, comme celle de tout matériau. En outre la rigidité varie dans le temps et dépend des différents mécanismes possibles de dégradation des polymères sous le champ électrique. Aucun isolant ne résiste à un champ électrique de plus de  $10^3$  kV/mm [16]. Si un électron parvient à s'accrocher sur une molécule neutre, ce champ est suffisant pour ioniser le radical anion, puis accélérer l'électron, qui ionise des molécules et déclenche une rupture par avalanche. Ce processus intervient très rapidement, en  $10^{-9}$ –  $10^{-8}$ s dès que les conditions de claquage sont remplies (valeur de champ

électrique). Les mauvais isolants claquent en général par effet thermique. Le courant qui passe chauffe le matériau, ce qui augmente sa conductivité, donc le courant, etc. La rupture intervient par emballement thermique ce qui nécessite un temps intercalé entre  $10^{-8}$ –  $10^{-4}$ s.

Un bon matériau isolant électrique doit être peu résistant à la propagation des fissures. Dans ce cas, les forces électrostatiques peuvent provoquer la propagation d'une fissure jusqu'au moment où le champ provoque la rupture par avalanche (rupture électromécanique). Ces trois types de rupture diélectrique sont normalement absents dans des matériaux récents, car les pièces diélectriques sont calculées pour pouvoir supporter les champs et les efforts correspondants. En pratique, les défaillances proviennent du vieillissement du matériau sous l'action du champ électrique. Les décharges partielles sont une cause habituelle du vieillissement des isolants polymères en champ alternatif. Les arborescences électriques sont une manifestation analogue du vieillissement sous champ mais plus lente à s'établir. Ces deux processus n'interviennent qu'à champ élevé supérieur à 10kV/mm. Deux autres mécanismes interviennent pour expliquer, à long terme, les défaillances des isolants polymères : l'oxydation progressive du matériau et la diminution de la masse moléculaire des chaînes de polymère, ce qui augmente en général la conductivité ionique. En milieu humide, ou aqueux les champs électriques, même relativement faibles, provoqueront l'apparition d'arborescences humides qui croîtront jusqu'au claquage [16].

### **II.3.3. Vieillissement chimique**

Le vieillissement chimique se réfère à un changement irréversible de la composition suite à des réactions chimiques. Les processus chimiques les plus importants sont les réactions de post-réticulation et de coupure de chaînes. Les phénomènes de post-réticulation ou d'oxydation impliquent, respectivement, une augmentation ou une diminution de la densité de réticulation. Cette variation s'accompagne généralement d'une variation de  $T_g$  et d'un changement dramatique des propriétés d'aspects et mécaniques telles que le craquelage ou la perte des propriétés élastiques et la rupture. D'après Verdu, le vieillissement ne modifie pas tellement la forme des courbes de traction des polymères, mais joue un rôle important dans les propriétés de rupture et notamment, dans l'allongement et la rupture qui diminue catastrophiquement avec le temps du vieillissement [19].

### **II.3.4. Vieillissement thermique**

Dans le domaine de l'isolation électrique, la contrainte thermique constitue un facteur sévère de service pouvant affecter sérieusement les propriétés du matériau polymère en les dégradant et réduisant ainsi la durée de vie des câbles et appareils électrique. Il est donc indispensable de définir des températures maximales admissibles en service continue pour les divers matériaux isolants, de telle façon que les dégradations subies au cours de leur utilisation n'affectent pas leur performance à un haut degré. La prise en compte de la contrainte thermique lors de la conception d'un système d'isolation a pour objet de définir les matériaux devant supporter les températures de fonctionnement et qui se dégraderont le moins possibles au cours de leur utilisation [20].

**Tab II. 2:** Classification des isolants en fonction de la température.

<b>Classe</b>	<b>Matières isolantes</b>	<b>Classe</b>	<b>Matières isolantes</b>
<b>Y 90°C</b> max	coton, soie, papier et dérivés, fibre d'acétate, bois, polyéthylène, polystyrène, PVC, caoutchouc.	<b>F 150°C</b> max	Fibre de verre, Amiante
			Tissu de verre imprégnée, Amiante imprégnée. mica agglomère
<b>A 105°C</b> max	Isolants de classe Y imprégnés par un d'électrique liquide.	<b>H180°C</b> max	Stratifié ou tissu de fibre de verre, amiante stratifié
	Toile vernie, papier vernie		Tissu de fibres de verre et d'amiante imprégnée, Elastomère de silicone, fibre de polyamide
	bois Stratifié		fibres de verre
	Emaux aux résines polyamides, Résines polyesters, film d'acétate		Mica aggloméré.
<b>E 120°C</b> Max	Emaux aux résines polyvinyles, polyuréthane, époxyde		Tissu de verre ou d'amiante traité, Mica aggloméré.
			mica, porcelaine, céramique, verre quartz.

	Résines moulées avec charge cellulosique stratifiés coton, papier.		
	Résines polyesters, Film de cellulose ou de polyéthylène.		
<b>B</b> 130°C max	Amiante, fibre de verre, émaux aux résines formol, polyvinyle		
	Tissu de verre imprégnée, Amiante imprégnée.		
	Mica aggloméré		
	Stratifié ou tissu de fibre de verre, Stratifié d'amiante.		

Le vieillissement des matériaux, dans leurs conditions réelles d'utilisation est caractérisé par des cinétiques de dégradation lentes. Le recours à des essais accélérés est donc une nécessité quantifier le vieillissement en laboratoire [12].

Le vieillissement thermique peut faire intervenir des phénomènes purement physiques (dégazage, migration de plastifiants, évolution de la morphologie) ou chimiques, parmi lesquels l'oxydation par l'oxygène atmosphérique, qui joue un rôle prépondérant. Ces phénomènes peuvent affecter la structure chimique du polymère, ou dans certains cas, concerner seulement les additifs (problèmes d'incompatibilité d'adjuvants) [21].

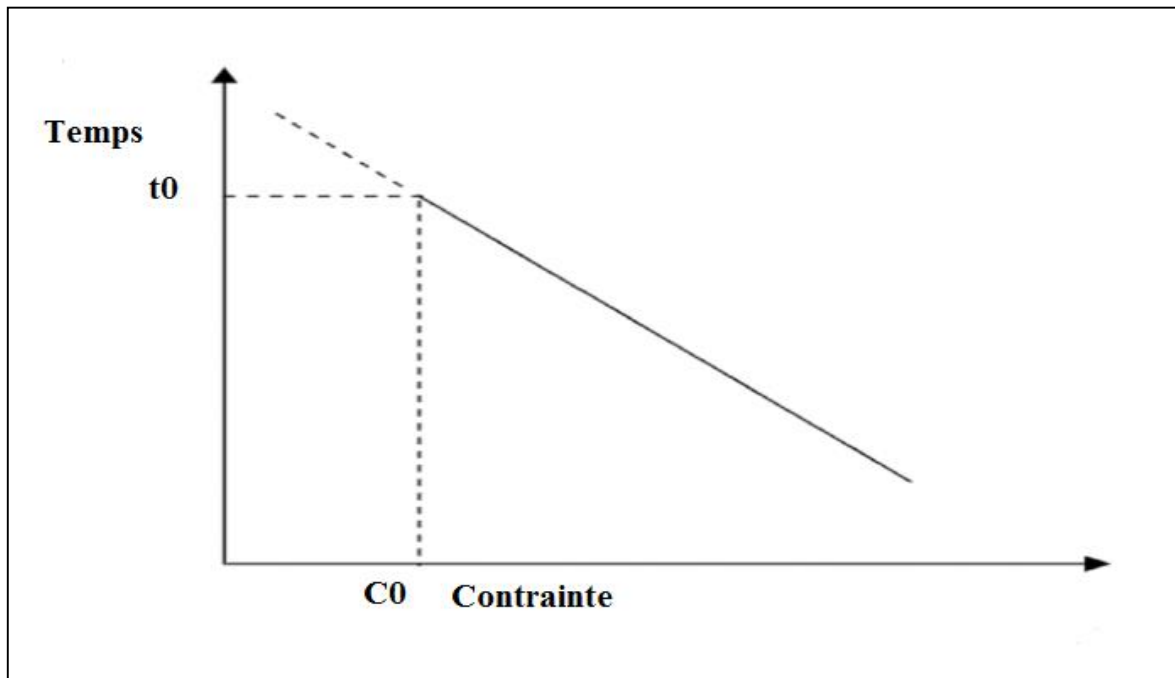
### **II.3.4.1. Endurance thermique**

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

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

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

La figure II.1 montre la variation de la durée d'un matériau en fonction de la contrainte appliquée



**Figure II. 2 :** Variation de la contrainte en fonction du temps de vieillissement.

### II.3.4.2. Principe de la détermination de l'endurance thermique des isolants solides

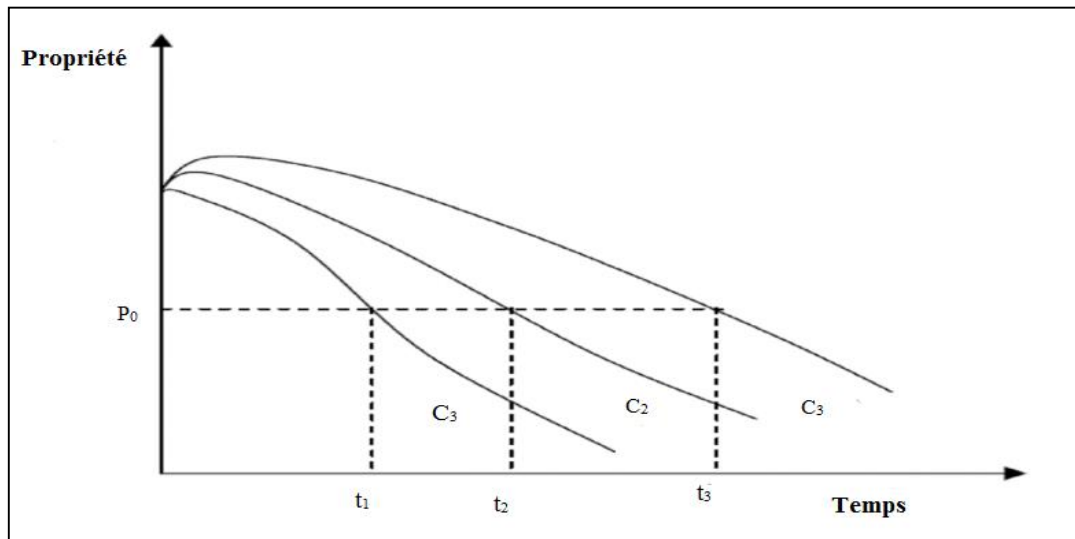
On détermine les variations d'une propriété d'un matériau en fonction du vieillissement pour différentes valeurs  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$  de la contrainte appliquée.

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

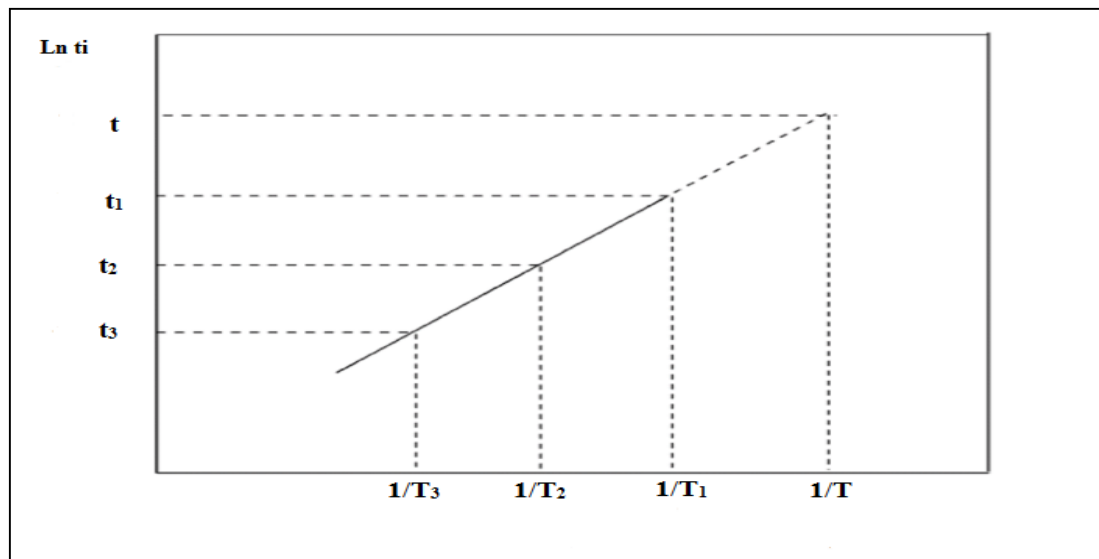
En ce qui concerne les essais du vieillissement thermique, on soumet le matériau à l'action prolongée de la chaleur, puis on détermine l'évolution d'une ou plusieurs de ses propriétés en fonction du temps, ce qui permet de tracer les caractéristiques  $P=f(t)$  représentée à la figure II.2.

Le choix d'une valeur limite de la propriété  $P_0$  permet de déterminer les temps pour lesquels cette limite est atteinte, soit la durée de vie et ceci pour plusieurs températures de

vieillessement. En répétant les essais, on arrivera à tracer la courbe d'endurance thermique  $t=f(T)$  (figure II. 3)



**Figure II. 3:** Variation de P en fonction du temps de vieillissement pour différents température T.



**Figure II. 4 :** Variation de  $\log(t)$  en fonction de l'inverse de la température absolue T

Généralement, on s'intéresse à l'indice de la température qui est, par définition, le nombre égal à la température exprimée en degré Celsius qui correspond sur le graphique de l'endurance thermique à un temps égale à 20 000 heures. Certains chercheurs ont obtenu des vieillissements très accélérés correspondant à un temps autour de 5000 heures.

### **II.3.4.3. Choix des températures de vieillissement**

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

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

### **II.3.4.4. Durée de vie**

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

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

$$\ln(t)=A+E/RT \quad (II.1)$$

Avec

A : constante caractéristique du matériau ;

R : constante des gaz parfait ;

T : température absolue ;

E : Energie d'activation du phénomène.

### **II.3.4.5 Vitesse de dégradation**

Les dégradations qui se produisent dans les matériaux isolants et affectent leurs caractéristiques ont pour origine principale les réactions chimiques. sera-il de toute logique de retrouver pour l'évolution de ces propriétés leurs lois analogues à celles qui régissent ces

relations chimiques. La loi (2) traduit de façon pratique la relation qui relie la vitesse  $V$  d'une propriété à la température absolue  $T$ .

$$\ln(V) = -A/T + B \quad (\text{II.2})$$

$A, B$  : constantes caractéristique du polymère.

### **II.4 Conséquences du vieillissement**

Le vieillissement, en général, a des conséquences sur les matériaux isolants, et alors ces isolants ne peuvent plus imposer leur isolation, on mentionne quelques conséquences :

- La résistance isolante diminue (pollution de surface, pénétration d'eau dans des solides, augmentation de la concentration d'humidité dans les huiles.) ;
- La capacité diminue et le facteur de pertes augmente (dans les isolations en couches : certaines couches ne sont plus isolantes.) ;
- L'indice de polarisation diminue ;
- La rigidité diélectrique diminue (apparition de pointes par corrosion, décollement entre l'isolant et les électrodes, bulles, etc.) ;
- Le taux partiel de la charge augmente ;
- Rétrécissement du matériau ;
- Perte de massique et changement de couleur.

### **II.5 Conclusion**

Cette partie a donné une description du vieillissement des isolants solides, ses contraintes électriques, mécaniques, thermiques, son mode de fonctionnement ainsi que ses types. Mais nous nous sommes intéressés qu'au vieillissement thermique et nous avons aussi donné quelques températures limites sur quelques types d'isolants. A la fin de cette partie, nous avons décrits les conséquences du vieillissement sur les matériaux isolants.





*Chapitre 03 :*

*Modèle statistique*

*Weibull*

### **III.1. Introduction**

Il existe différentes méthodes de traitement de la distribution des instants de survenue des pannes en fonction du temps. Ces méthodes ont pour but de déterminer le modèle mathématique qui pourrait représenter la distribution étudiée et d'en chiffrer les paramètres au moyen de papier à échelles fonctionnelles. Le modèle retenu dans le domaine de dégradation des matériaux est en général le modèle de Weibull.

Différents auteurs ont montré à travers le suivi de la probabilité cumulée de défaillance ou du taux de risque, comment déterminer les paramètres du modèle de Weibull.

### **III.2. Utilisation de la loi de Weibull pour modéliser les données de fiabilité**

La loi de Weibull est une probabilité à 3 paramètres, qui est très utilisée pour modéliser la durée de vie des produits en raison de sa grande flexibilité. Elle est caractérisée par sa densité de probabilité et sa fonction de répartition.

La loi de Weibull permet de modéliser les données asymétriques à droite, à gauche ou symétriques. Par conséquent, elle est utilisable pour évaluer la fiabilité dans de nombreux domaines, notamment ceux des tubes électroniques, des condensateurs, des roulements à billes, des relais et de la résistance des matériaux. Elle peut également modéliser une fonction de risque décroissante, croissante ou constante, ce qui permet de décrire toutes les phases de la durée de vie d'un objet. La distribution de Weibull est utilisée dans les ingénieries de la haute tension depuis plusieurs années, dans le but d'évaluer les résultats des études expérimentales où le temps de claquage ou la tension de claquage sont estimés [8].

### **III. 3. Modèle statistique de Weibull**

#### **III.3.1. Base du modèle**

Le modèle de Weibull permet de reproduire cette dispersion sans modéliser explicitement les défauts et apprécier la probabilité de rupture à partir des statistiques. Il explique aussi la probabilité de rupture d'une chaîne en fonction de la probabilité de rupture d'un maillon. Alors que la rupture d'une chaîne se produit au niveau de son maillon le plus faible quelles que soient les qualités des autres maillons. C'est pourquoi la probabilité de rupture  $P$  d'une chaîne de  $n$  maillons s'exprime en fonction de la probabilité de rupture  $P$  d'un seul de ces maillons de la façon suivante :

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

### III.3.2. Loi de Weibull

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

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

Avec :

$P(X)$  : Probabilité de rupture;

$X$  : Variable aléatoire;

$X_0$ : Paramètre d'échelle;

$X_S$  : Paramètre de localisation;

$\alpha$ : Paramètre de forme.

Selon la valeur du paramètre de localisation  $X_S$ , on distingue deux modèles :

### III.3.3. Modèle de Weibull à deux paramètres

C'est le cas où  $X_S = 0$ , ou le modèle de Weibull est dit à deux paramètres. Le formalisme de Weibull s'écrit comme suit [11] :

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

Ou sous sa forme linéaire suivante :

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

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

### III.3.4. Modèle de Weibull 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 [11].

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

Ou sous sa forme linéaire suivante :

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

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

### **III.4. Signification des paramètres de Weibull**

#### **III.4.1. Paramètre de forme $\alpha$**

C'est un nombre sans dimension. Il définit l'allure des courbes de distribution de Weibull [22]. Il est par conséquent, l'image de la dispersion de la variable aléatoire. Plus  $\alpha$  est grand, moins les valeurs sont dispersées. D'après Oudin et al, on a [23] :

Si  $\alpha < 1$  ; la probabilité de claquage décroît avec le temps d'application de la tension, ce qui correspond à une « moralité infantile » des échantillons qu'on appelle « défauts de jeunesse » [24].

Si  $\alpha = 0$  ; la probabilité de claquage est indépendante du temps d'application de la tension. La loi de Weibull correspond à la loi de Poisson (loi exponentielle) [22].

Si  $\alpha > 1$  : la probabilité de claquage augmente avec le temps, ce qui correspond à un vieillissement normal, c'est-à-dire à une fatigue initialement nulle qui s'accroît avec le temps [24].

Pour les essais en rampe de tension sous vitesse de montée constante, on a :  $4 < \alpha < 9$  dans le cas du polyster-imide [25].

#### **III.4.2. Paramètre de localisation $X_S$**

La variable  $X_S$  apparaît comme un seuil en dessous duquel le vieillissement se trouve considérablement ralenti, la durée de vie du matériau tendra alors à l'infini. La valeur du seuil est forcément inférieure à la plus faible valeur trouvée expérimentalement  $P(X < X_S) = 0$  [25]. Le paramètre de localisation  $X_S$  correspond à une simple translation des courbes de probabilité cumulée selon l'axe des abscisses.

#### **III.4.3. Paramètre d'échelle $X_0$**

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

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

Pour  $X = X_0$ , on a :

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

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

Dans la pratique, on distingue

Pour des essais sous champ constant (à long terme),  $X_0 = t_0$  la valeur nominale du temps de rupture.

Pour des essais sous rampe de tension (à court terme),  $X_0 = G_0$  la valeur nominale du champ de rupture.

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

### **III.5. Avantages de la loi de Weibull**

Après une étude comparative entre la loi de Weibull et la loi log-normale, Oudin a montré [25] 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 [11].

### **III.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 certaines hypothèses. On considère que le phénomène de claquage est caractérisé par une variable aléatoire à deux dimensions dont l'une est le temps «  $t$  » au bout duquel se produit la rupture de l'isolant. L'autre gradient de potentiel  $G$  qui a provoqué cette rupture.

Le claquage est localisé dans un petit volume du diélectrique. La rupture d'un élément microscopique entraîne la rupture du système isolant sur toute son épaisseur. Une base de la théorie statistique de Weibull est présentée par Dissado [27].

### III.6.1. Tenue diélectrique à long terme

Dans le cas du vieillissement électrique à long terme, le matériau est soumis à un champ électrique  $G$  constant. Le temps de rupture  $t$  est une variable aléatoire. La probabilité de claquage sous champ constant s'écrit [22] :

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

Avec :

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

$G$  : champ électrique appliqué ;

$a$  : paramètre de dispersion en temps ;

$b$  : paramètre de dispersion en champs ;

$t$  : temps du claquage.

Avec  $n = \frac{b}{a}$  le coefficient d'endurance électrique.

### III.6.2. Tenue diélectrique à court terme

Dans le cas du vieillissement électrique à court terme, le matériau est soumis à une rampe de champ électrique de vitesse de montée  $V$  [8]

On écrira :

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

Avec :

$G$  : champ électrique de rupture appliquée ;

$V$  : vitesse de montée de la rampe du champ électrique ;

$t$  : temps de montée de la rampe du champ électrique.

En remplaçant  $t$  par sa valeur dans l'expression (III. 9), on obtiendra l'expression de la probabilité de claquage suivante :

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

### III.7. Diagramme de Weibull

Cette méthode consiste à classer les valeurs de  $X_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ . ( $N$  étant le nombre total d'échantillons testés) par ordre croissant. La probabilité de rupture  $i$   $P$ , donnée par la méthode des rangs moyens, pour  $N$  grand est [27] :

$$P(i) = \frac{i}{N + 1} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$i$  : rang des valeurs de  $X$  après classement par ordre croissant

$N$  : nombre des échantillons testés

Si  $N < 20$ , on utilise la méthode des rangs médians qui est donnée par la formule suivante [27] :

$$P(i, N) = \left[ \frac{0,69}{N} + (i - 1) \left( \frac{1}{(N - 1)} - \frac{1,38}{N(N - 1)} \right) \right] \quad (4.13)$$

Les résultats sont présentés dans un système d'axes, donnant  $\text{Log Ln} (1/ (1 - P))$  en fonction de  $\text{Log} X$ . Le graphe est une droite de pente  $\alpha$ . Dans le cas expérimental, la représentation n'est pas toujours linéaire. En effet, un lissage numérique est indispensable pour avoir un tracé objectif des graphes. Le lissage des points expérimentaux peut être approché par des polynômes de degré 1, 2 ou 3 [27].

### III.8. 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.

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

En raison de sa flexibilité, la loi de Weibull reste très utile pour modéliser la fiabilité d'équipements divers à partir d'un retour d'expérience.





*Partie*

*expérimentale*

## **IV. Déroulement de la partie pratique**

Le but de ce chapitre est d'étudier l'effet du vieillissement thermique sur la rigidité diélectrique du papier presspahn sous tension continue positive. Une analyse statistique des valeurs obtenues de la rigidité diélectrique a été faite en suivant le modèle de Weibull à deux paramètres décrit au chapitre III. Les essais ont été réalisés à l'laboratoire Génie électrique de haute tension de l'université de Bejaia.

### **IV.1 Préparation des échantillons**

#### **VI.1.1 Vieillissement**

Nous avons mis le papier (30 sur 26 cm), dans un four sous des différentes températures (100°C, 120°C, 140°C, 160°C, 180°C), pendant des différentes durées (50h, 100h, 150h,....1000h, 2000h, 4000h) pour chaque température.

#### **III.1.2 Découpage de papier**

Pour préparer les échantillons, nous avons pris le papier (30 sur 26 cm) de différentes températures et périodes de vieillissement, nous les avons coupés en carrés de 7 sur 6.5 cm (Figure IV.1).



**Figure IV. 1** : Échantillons de papier.

### III.1.3 Séchage du papier

Pour sécher le papier de l'humidité, nous l'avons mis dans une étuve à air ventilée de modèle 400 de dimensions 400 mm x 400 mm, pendant 24 heures à une température de 80 degrés. L'étuve est représentée à la figure IV.3 ci-après.



**Figure IV. 2:** Etuve à air ventilée.

### III.1.4 Conditionnement

Après avoir séché le papier, nous l'avons retiré de l'étuve à air ventilée pour le mettre dans le dessiccateur qui contient le gel de silicone (figure IV.3), il absorbera le reste d'humidité pour garder le papier sec, représenté dans la figure IV.4.



**Figure IV. 3:** Gel de la silicone



**Figure IV. 4:** Dessiccateur

#### **IV.1.5 Imprégnant**

Avant chaque série d'essai, nous avons baigné les carrés de papier dans l'huile minérale (Borak 22) pendant 10 minutes pour en extraire l'air existant dans les échantillons tel que représenté dans la figure IV.5.



**Figure IV. 5:** Imprégné le papier dans l'huile

## IV.2 Essais

### III.2.1 schéma électrique

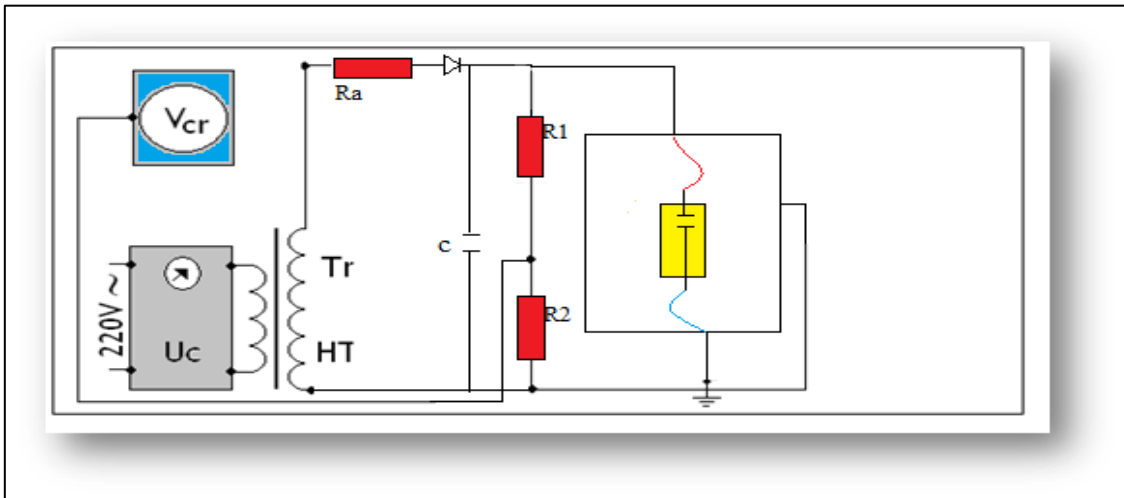


Figure IV. 6: Schéma électrique

### III.2.2. Mesure de la rigidité diélectrique

Pour la mesure de la tension de claquage nous avons utilisé un dispositif comprenant les éléments suivants :

- Un générateur de tension SG1 (figure IV.7),
- Un transformateur HT (100) pouvant délivrer une tension allant de 0 à 100 kV pour essais en alternatif, et de 0 à 135 kV pour essais en continu (figure IV.8) ;
- Un diviseur de tension résistif ;
- Un voltmètre de crête ( $U_{cr}$ ) AC/DC, de type MU11, à affichage digital permettant la mesure, selon le montage électrique des hautes tensions alternatives ou continues (figure IV.9) ;
- Une capacité de lissage  $C = 10 \mu F$ .
- Une résistance de protection  $R_a = 106 \text{ k}\Omega$  limitant le courant.
- Un système d'électrodes, (figure IV.10).
  - ❖ Dispositif des électrodes : plan-plan,
  - ❖ Forme de l'électrode de haut diamètre de l'électrode haute tension.

Les essais consistent à placer l'éprouvette de papier presspahn entre deux électrodes et lui appliquer une rampe de tension de vitesse constante jusqu'au claquage. L'ensemble est immergé dans une huile minérale (Borak 22) afin d'éviter les contournements. Le dispositif est représenté dans la (figure IV.11).



Pour les essais de claquage, nous avons utilisé le générateur de tension SG1 (figure IV.7). Le générateur est alimenté en mode manuel. Avec l'accroissement de la tension, nous observons, au départ, des décharges superficielles qui se développent à la surface du papier, puis des crépitements et enfin un bruit sourd qui caractérise le claquage. La valeur de la tension est directement lue sur l'afficheur du voltmètre de crête MU11 (figure IV. 9)



**Figure IV. 7:** Générateur de tension



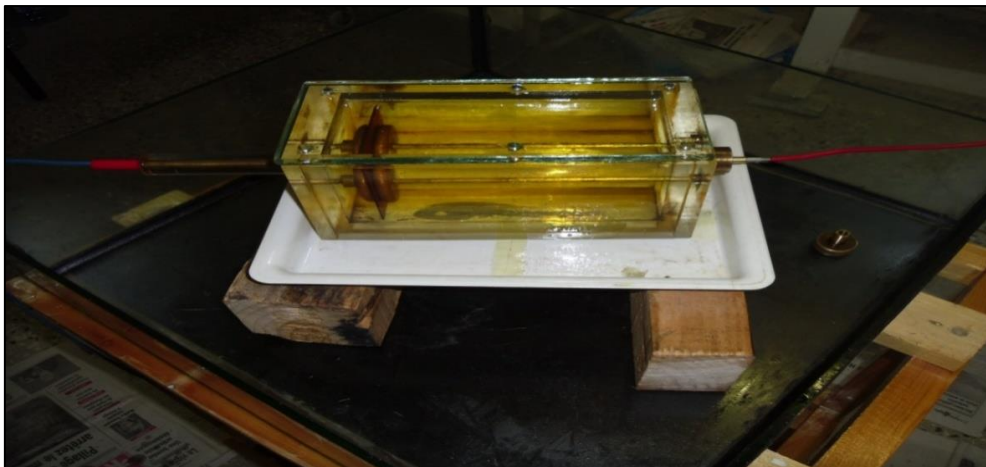
**Figure IV. 8:** Transformateur



**Figure IV. 9:** Voltmètre de crête MU11.



**Figure IV. 10:** Système d'électrode.



**Figure IV. 11:** Système de dispositif.



### III.2.3. Mesure de L'épaisseur

Après rupture (figure IV.12), l'échantillon est retiré de la cellule et le point de claquage repéré. La mesure de l'épaisseur est effectuée en trois points autour du canal de perforation avec le palmer présenté à la figure IV.13 L'épaisseur retenue a été calculée comme la moyenne arithmétique des trois mesures effectuées.



**Figure IV. 12:** Canal de perforation.



**Figure IV. 13:** Un palmer de type TGL15048/I.

### **IV.3 Résultats obtenus**

#### **IV.3.1 Analyse statistique**

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). Le claquage signifie la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique sous l'effet d'un champ déterminé par la formule suivante :

$$E = \frac{U}{d_{moy}} \text{ (kV/mm)}$$

Avec :

U : tension de claquage (kV)

$d_{moy}$  : Épaisseur moyenne calculé aux alentours de point de claquage de l'échantillon (mm).

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

$$P(i,N) = \frac{i}{N+1}$$

Avec :

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

N : nombre total d'échantillons testés.

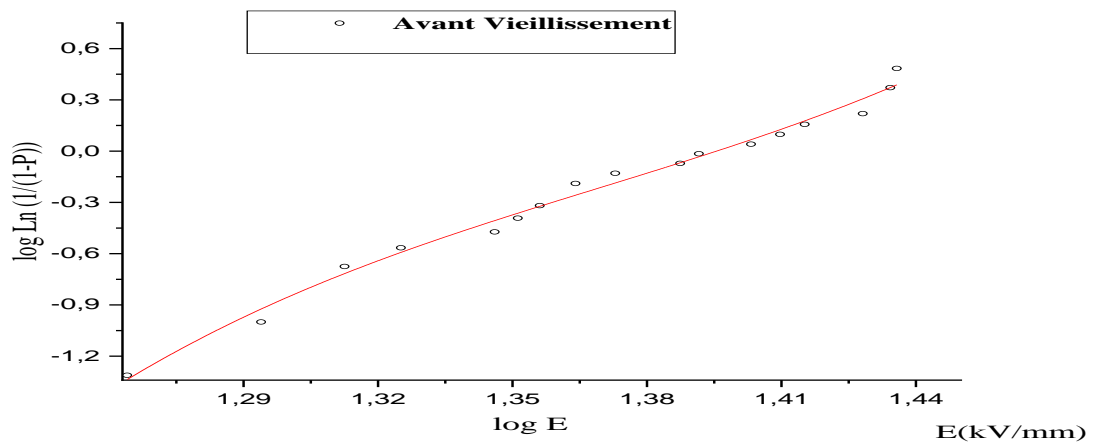
Les graphiques de Weibull à 2 paramètres donnant  $\log \ln(1/(1-P))$  en fonction de  $\log E$  sont présentés aux figures :

- figure IV.14 avant le vieillissement
- figures IV.15 à IV.17 pour le vieillissement à 100°C ;
- figures IV.18 à IV.20 pour le vieillissement à 120°C ;
- figures IV.21 a IV.23 pour le vieillissement à 140°C ;
- figures IV.24 à IV.27 pour le vieillissement à 160°C ;

- figures IV.28 à IV.32 pour le vieillissement à 180°C .

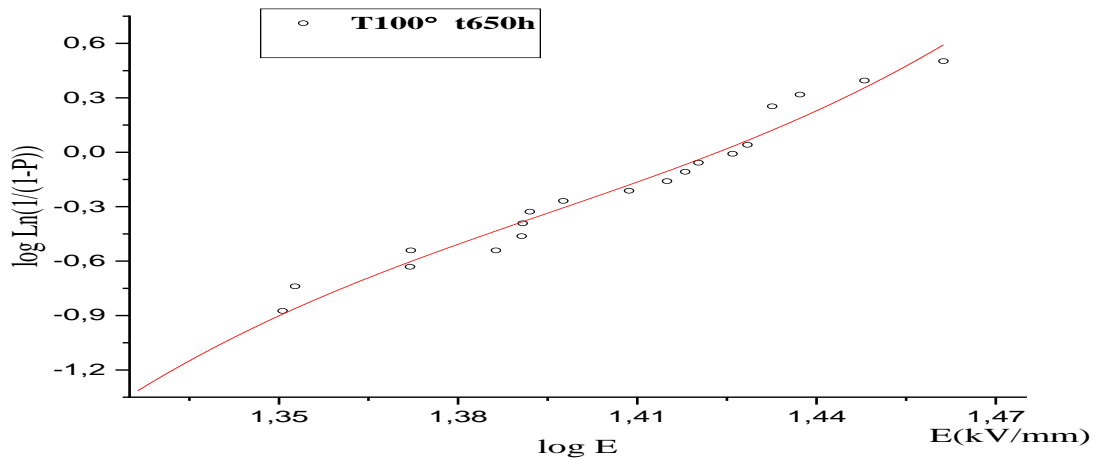
Dans la plupart des cas, l'approximation des courbes a été faite à l'aide d'un polynôme de 2 ou 3 selon la valeur du coefficient de corrélation.

Nous avons déterminé les valeurs nominales du champ de rupture qui correspondent à une probabilité de 63,2% et  $\text{Log Ln} \frac{1}{1-P} = 0$ .



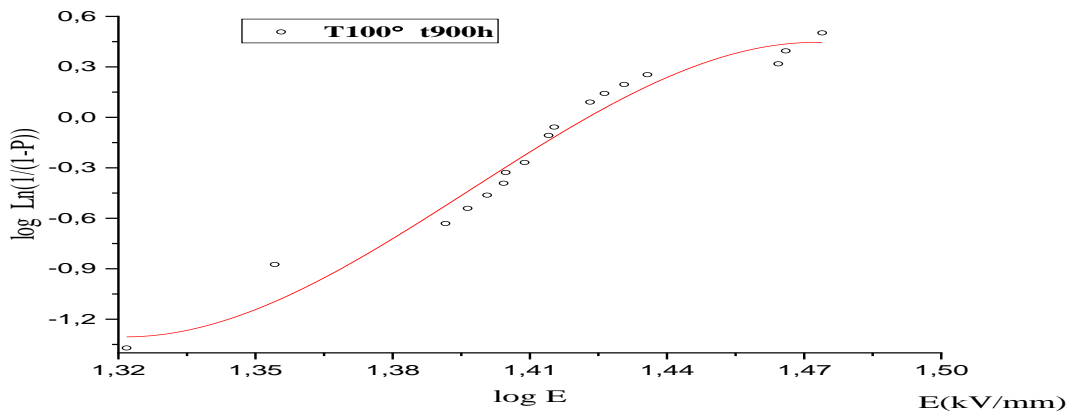
**Figure IV.14:** Diagramme de Weibull à deux paramètres avant le vieillissement.

$E_0 = 24,88\text{kV/mm}$ .

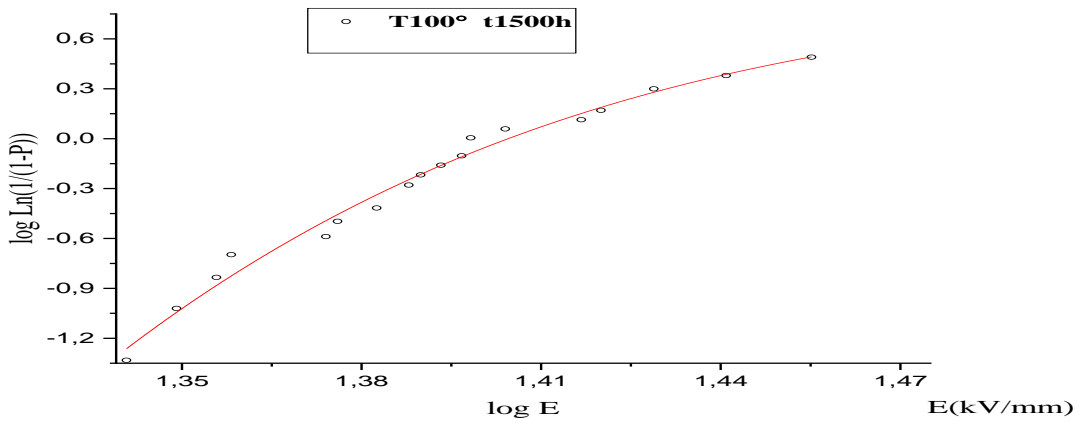


**Figure IV.15:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 650 h à 100°C.

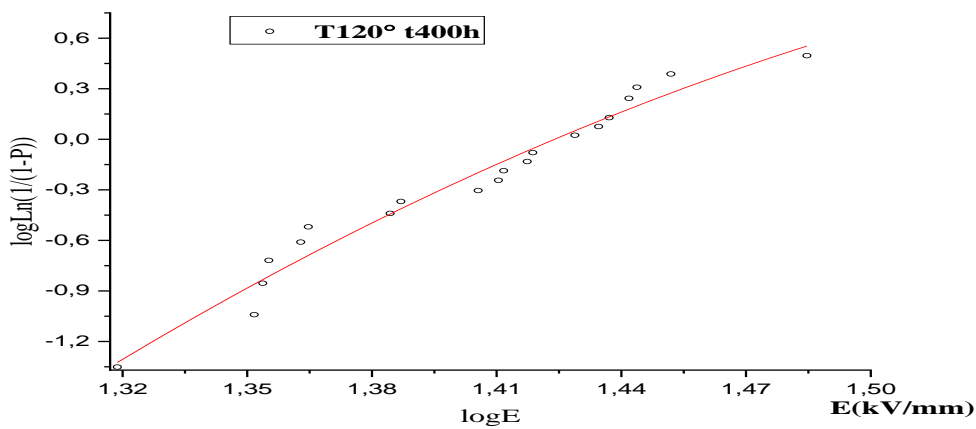
$E_0 = 26,57\text{kV/mm}$ .



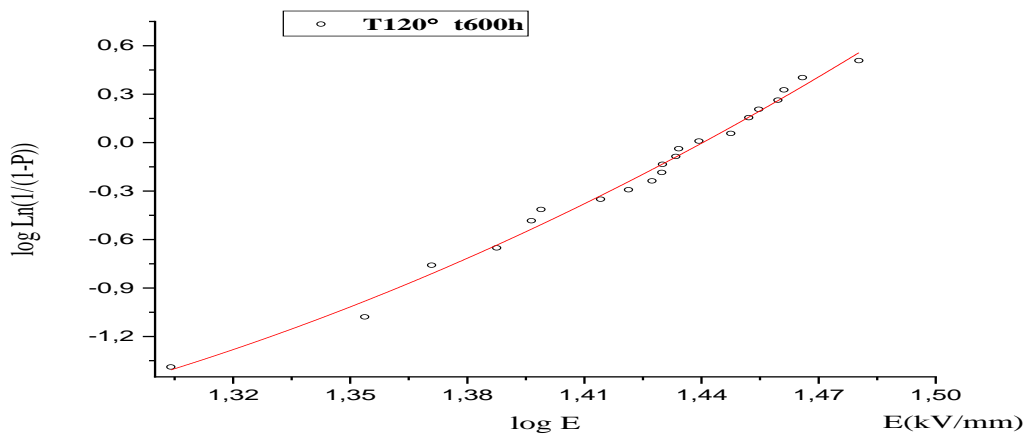
**Figure IV.16:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 900 h à 100°C.  
 $E_0 = 26,48\text{kV/mm}$



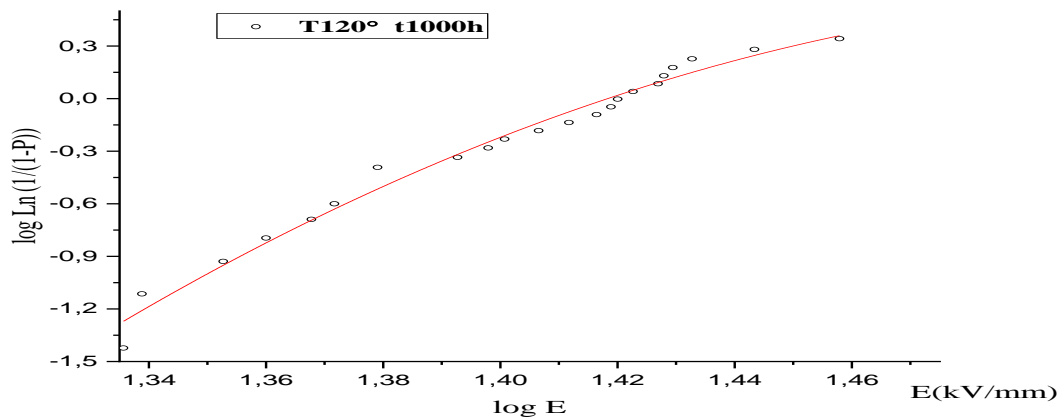
**Figure IV.17:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 1500 h à 100°C.  
 $E_0 = 25,35\text{kV/mm}$



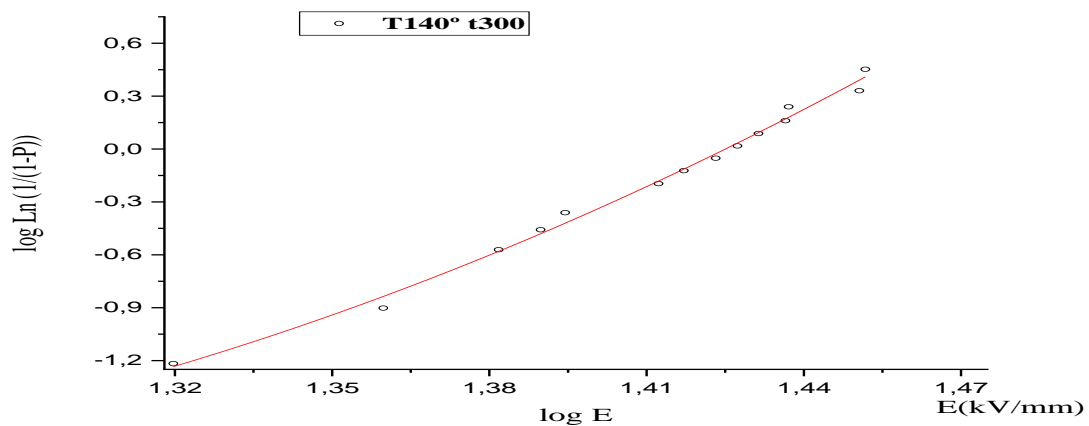
**Figure IV.18:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 400 h à 120°C.  
 $E_0 = 26,6\text{kV/mm}$



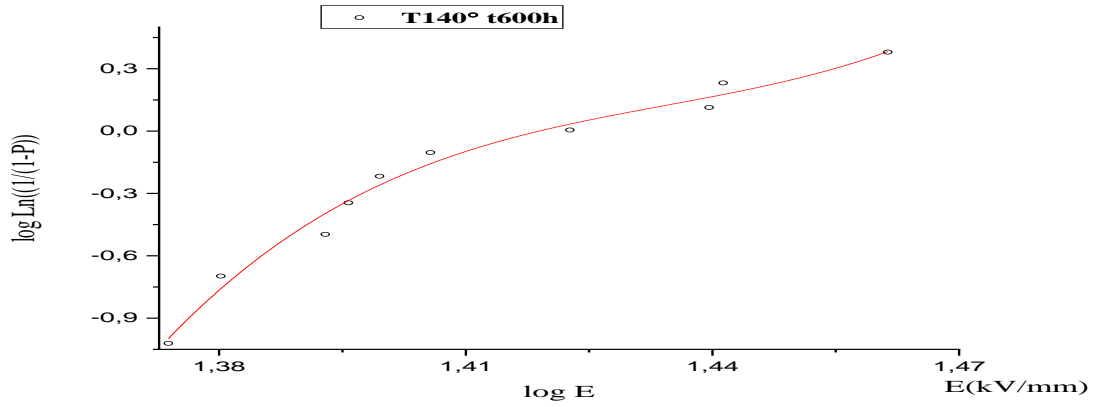
**Figure IV.19:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 600 h à 120°C.  
 $E_0 = 27,54\text{kV/mm}$ .



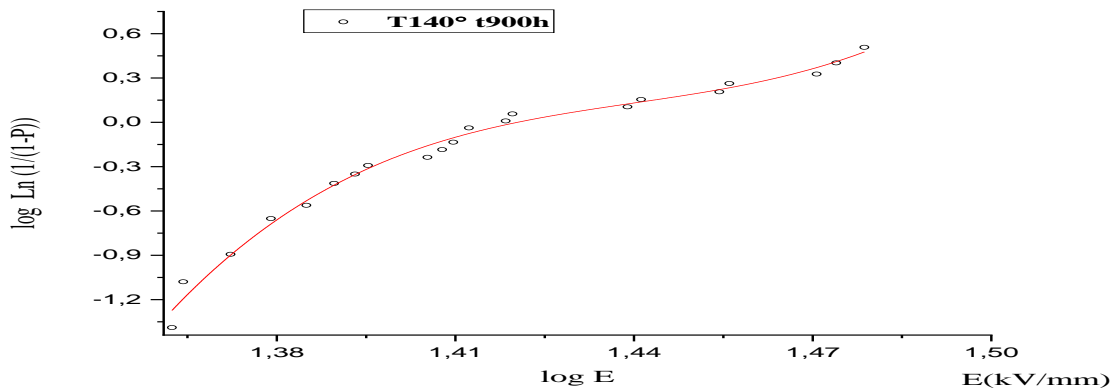
**Figure IV.20:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 1000 h à 120°C.  
 $E_0 = 26,28\text{kV/mm}$ .



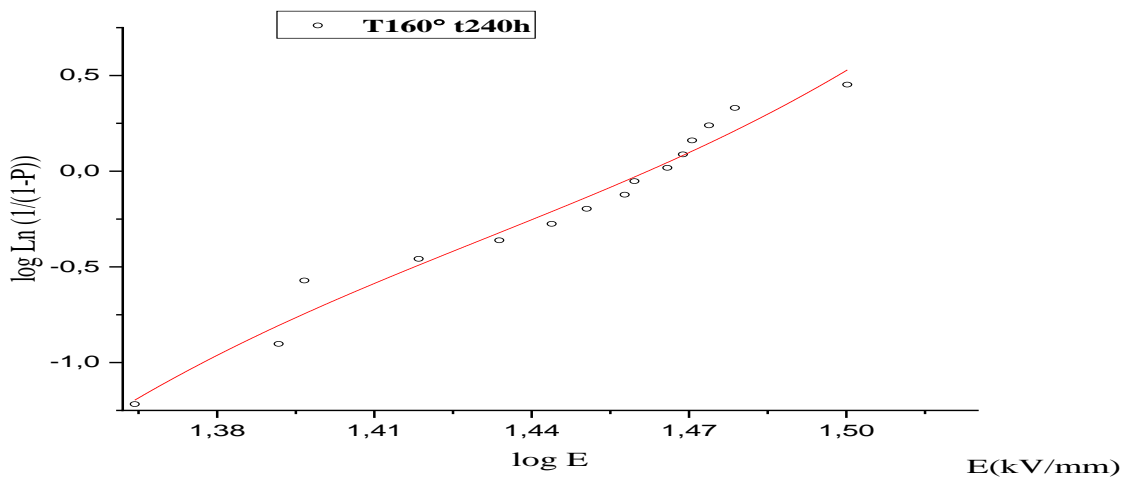
**Figure IV.21:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 300 h à 140°C.  
 $E_0 = 26,48\text{ kV/mm}$ .



**Figure IV.22:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 600 h à 140°C.  
 $E_0 = 28 \text{ kV/mm}$ .



**Figure IV.23:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 900 h à 140°C.  
 $E_0 = 26,29 \text{ kV/mm}$ .



**Figure IV.24 :** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 240 h à 160°C.  
 $E_0 = 28,93 \text{ kV/mm}$ .

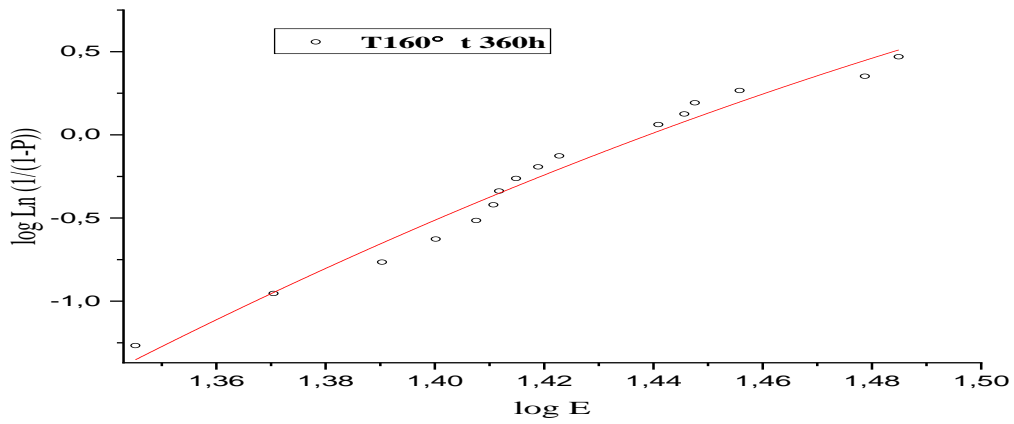


Figure IV.25 : Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 360 h à 160°C.

$E_0 = 27,4 \text{ kV/mm}$ .

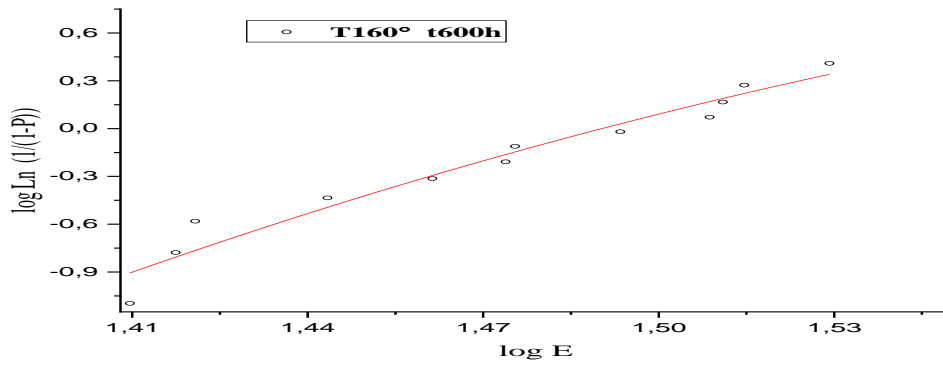


Figure IV.26 : Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 600 h à 160°C.

$E_0 = 30,85 \text{ kV/mm}$ .

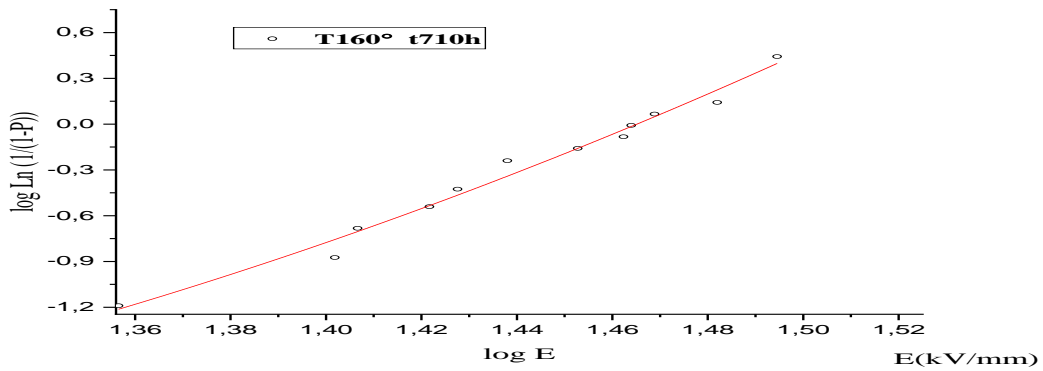
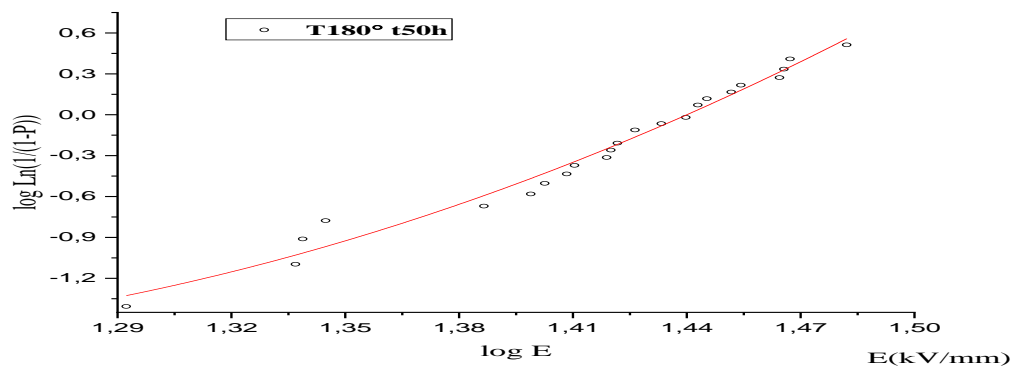
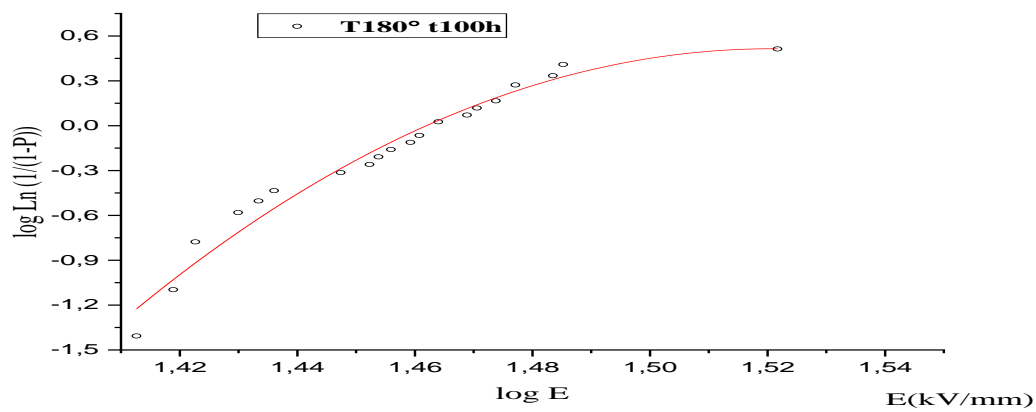


Figure IV.27 : Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 710 h à 160°C.

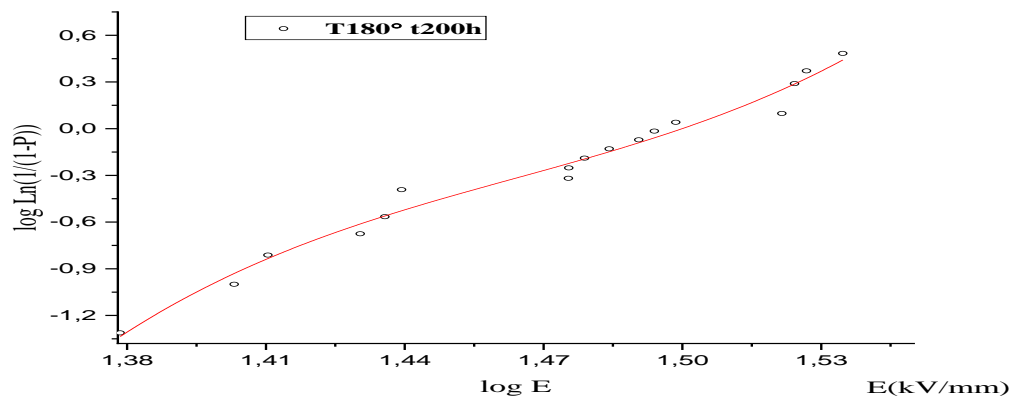
$E_0 = 29,05 \text{ kV/mm}$ .



**Figure IV. 28:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 50 h à 180°C.  
 $E_0 = 27,54$  kV/mm.

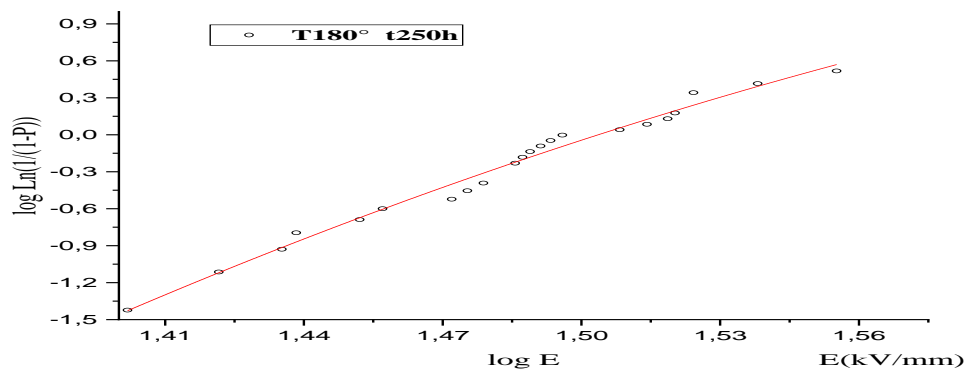


**Figure IV. 29:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 100 h à 180°C.  
 $E = 28,92$  kV/mm.

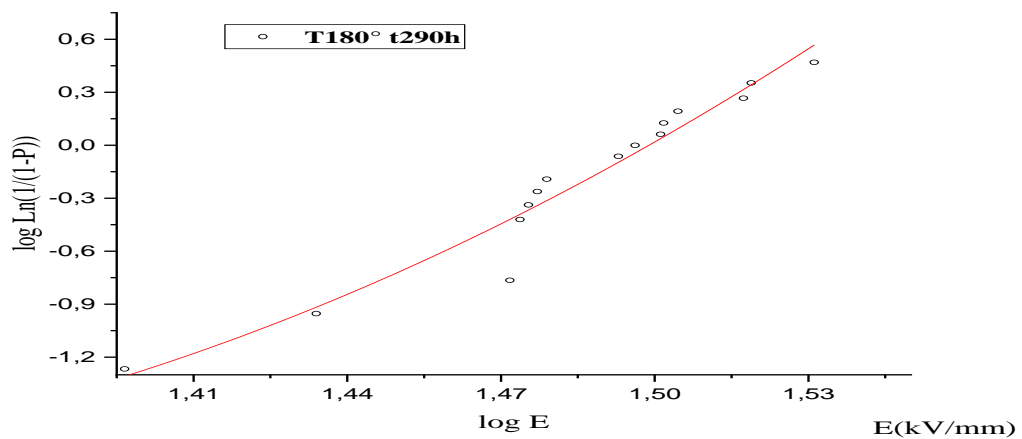


**Figure IV. 30:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 200 h à 180°C.  
 $E_0 = 31,7$  kV/mm.





**Figure IV. 31:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 250 h à 180°C.  
 $E_0 = 31,73$  kV/mm.



**Figure IV. 32:** Diagramme de Weibull à deux paramètres après un vieillissement de 290 h à 180°C.  
 $E_0 = 31,5$  kV/mm.

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

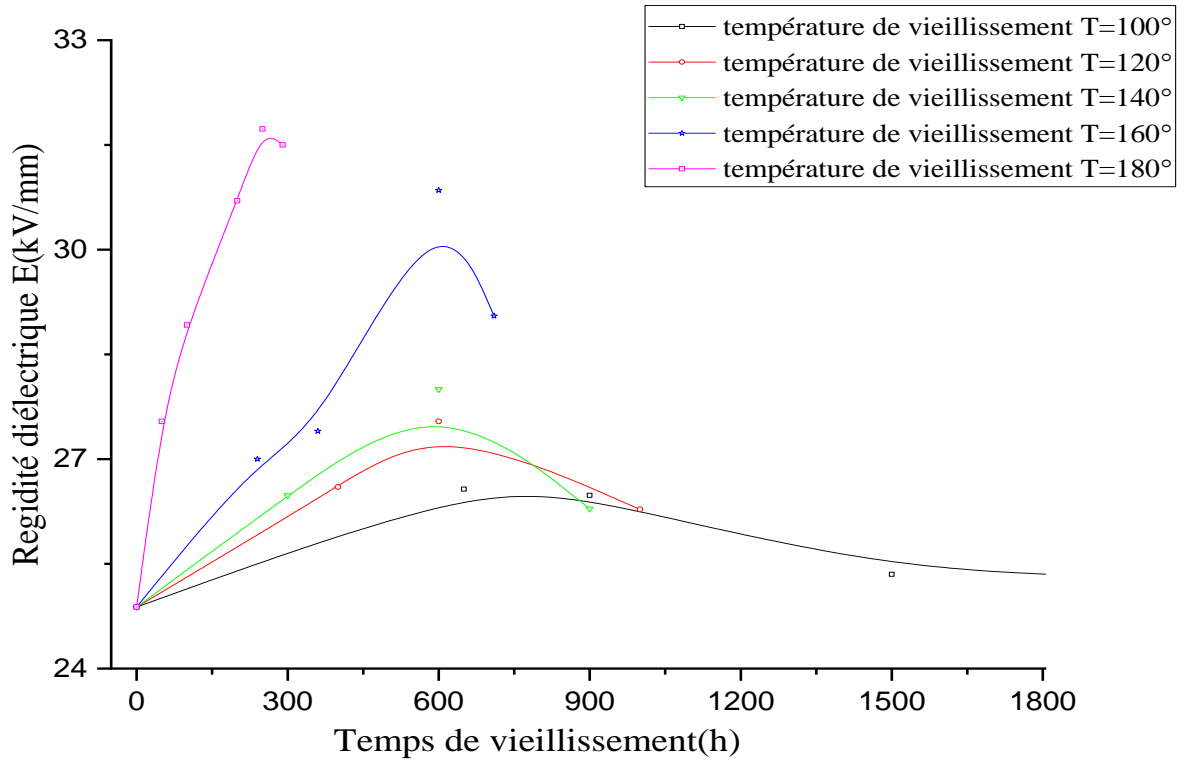


Figure IV. 33 : Variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement.

IV.3.3. Extrapolation des valeurs de la rigidité diélectrique

Les courbes de variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps de vieillissement présentées dans la figure IV.33 permettent de déterminer les durées de vie du papier presspahn pour une diminution de 50% de la valeur initiale de la propriété considérée après extrapolation pour les différentes températures (figure IV.34).

Les résultats sont présentés à la figure IV.35 où est reportée la variation de la durée de vie de l'isolant en fonction de l'inverse de la température absolue.

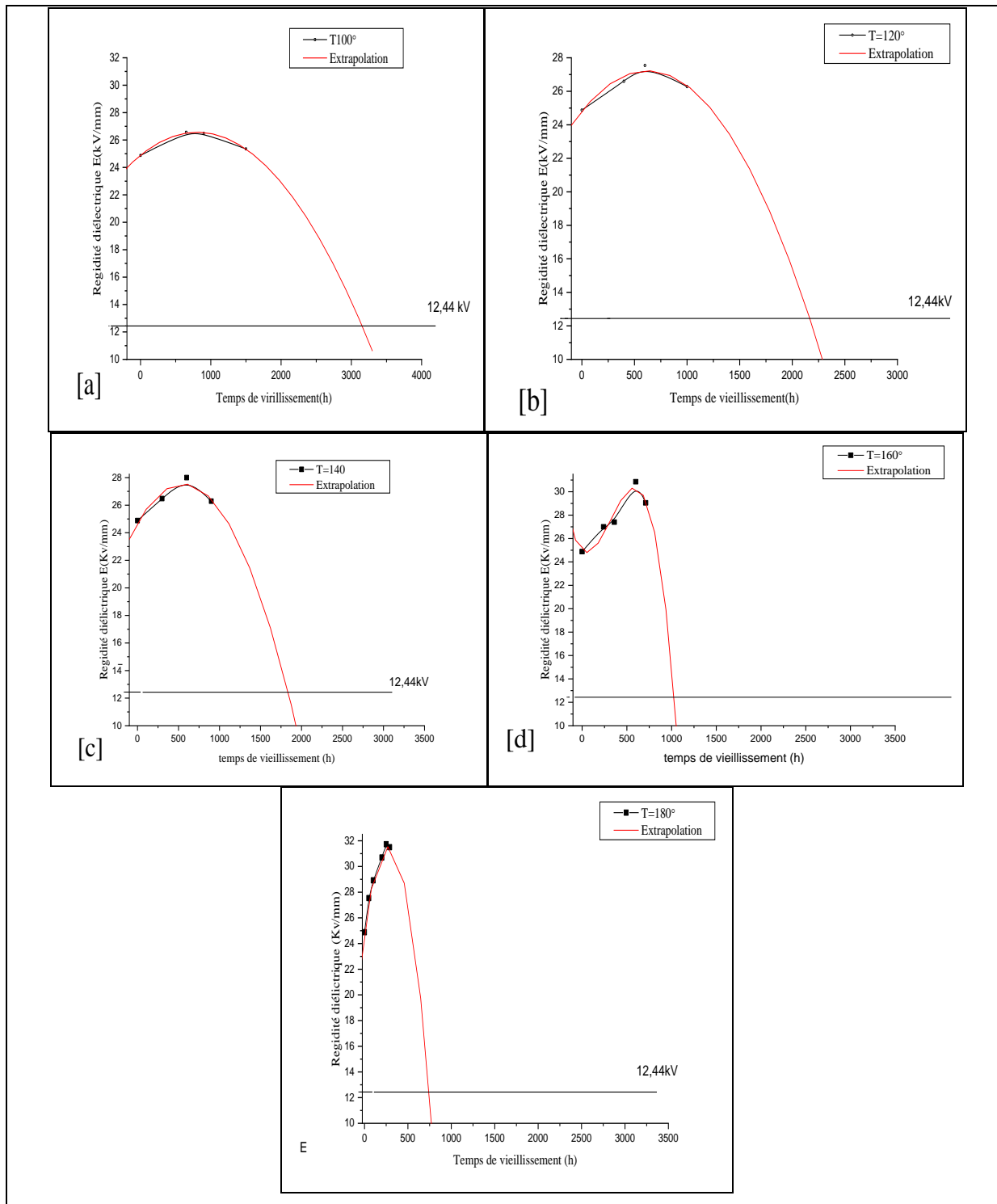


Figure IV. 34 : extrapolation des valeurs de la rigidité d'électrique à tes temps de vieillissement élevés.

### VI.3.4. Courbe de durée de vie

En exploitant les résultats de la figure IV.34, nous déterminons le graphique d'endurance thermique. La courbe obtenue est représentée dans la figure IV.35. Cette courbe est une droite croissante qui vérifie la loi d'Arrhenius. La durée de vie d'un matériau isolant sous l'effet de la température est donnée par la relation suivante [16].

$$t = A \exp \frac{B}{T}$$

Avec :

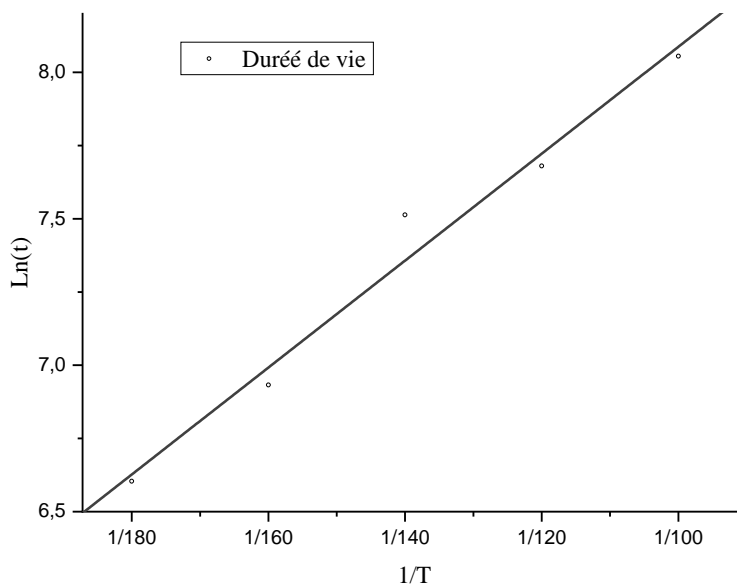
A et B : constantes ;

$B = E/R$ ;

T : température absolue [K];

E : énergie d'activation [J/mol];

R : constante des gaz parfaits ( $R = 8.314 \text{ J/mol.K}$ ).



**Figure IV. 35** : variation de Log(t) en fonction de l'inverse de la température absolue T.

## **VI.4 Interprétation**

En exploitant les diagrammes de Weibull à 2 paramètres précédents, nous avons déterminé les valeurs nominales de la rigidité diélectrique ( $\log \text{Ln}(1/(1-P)) = 0$ ). La figure IV.34 représente la variation de la rigidité diélectrique en fonction du temps du vieillissement.

- A 100°C la valeur de la rigidité diélectrique augmente lentement et atteint un maximum de 26.57Kv/mm à 650h en suite cette valeur diminue à 25.35Kv/mm. après l'extrapolation (Figure.VI.34) on trouve que pour cette température de vieillissement la rigidité diminue à 12.44kv/mm (1/2 de la valeur nominale) à 3125 qui correspond à la durée de vie moyenne de ce papier à cette température.
- A 120°C la valeur de la rigidité diélectrique augmente jusqu'aux 27.54kV/mm à 600h, puis cette dernière commence à diminuer à 26.28kv/mm à 1000h. Après l'extrapolation (Figure.VI.34) on trouve que pour cette température de vieillissement la rigidité diminue à 12.44kv/mm (1/2 de la valeur nominale) à 2166 qui correspond à la durée de vie moyenne de ce papier à cette température.
- A 140°C la courbe montre une augmentation de la rigidité diélectrique aux premières heures de vieillissement passe par un maximum de 28kV/mm à 600h. à partir de là, la rigidité diélectrique commence à diminuer à 26.29kV/mm à 900h. après l'extrapolation (Figure.VI.34) on trouve que pour cette température de vieillissement la rigidité diminue à 12.44kv/mm (1/2 de la valeur nominale) à 1832h qui correspond à la durée de vie moyenne de ce papier à cette température.
- A 160°C on assiste à une augmentation de la rigidité diélectrique aux premières heures de vieillissement jusqu'aux 30.85 Kv/mm à 600h puis en suite cette valeur commence à diminuer. Après l'extrapolation (Figure.VI.34) on trouve que pour cette température de vieillissement la rigidité diminue à 12.44kv/mm (1/2 de la valeur nominale) à 1025 qui correspond à la durée de vie moyenne de ce papier à cette température.
- Pour un vieillissement à 180°C, le champ de rupture croît rapidement en fonction du Temps. Après 250 h d'exposition à la chaleur, la valeur du champ de rupture est de 31,73 kV/mm. En effet à partir de 290h de vieillissement la rigidité diélectrique commence à diminuer rapidement. Après (Figure.VI.34) l'extrapolation on trouve que pour cette température de vieillissement la rigidité diminue à 12.44kv/mm (1/2 de la valeur nominale) à 738 qui correspond à la durée de vie moyenne de ce papier à cette température.

- Augmentation des pics de rigidité électrique avec l'augmentation de la température de vieillissement
- Diminution du temps d'obtention du pic de rigidité avec l'augmentation de la température de vieillissement.

### **VI.5 Discussions**

- Pour toutes les températures, la tension de claquage augmente dans la première période de vieillissement, ce qui peut être expliqué par l'amélioration des propriétés papier (diffusion de l'huile à l'intérieur du matériau) suivi d'un phénomène de réticulation du diélectrique
- la diminution de la tension de claquage, qui peut être attribuée à une rupture de chaîne de la cellulose.
- la dégradation thermique du polymère est caractérisée par un changement irréversible de la structure qui est dû à l'apparition d'un produit thermostable justifiant le changement de couleur à la fin de la dégradation.
- Au cours de cette étude, deux mécanismes importants de la dégradation sont mis en évidence, l'un est celui de thermolyse, l'autre est la thermo-dégradation. Les agents responsables de ces divers phénomènes sont l'oxygène et la chaleur.
- Des études ont montré que la présence d'oxygène est défavorable à la stabilité thermique, mais quel que soit le milieu réactionnel, les premiers produits de la dégradation sont les mêmes et ils sont issus de la fonction ester [27].
- Il a aussi démontré que les produits de dégradation en milieu inerte ne sont pas les mêmes que ceux présents dans un milieu oxydant [27]. Dans ce dernier, l'effet combiné de la chaleur et de l'oxygène conduit à la dégradation totale de l'isolant après formation de la couche oxydée en surface et des réactions de dépolymérisation qui peuvent prendre naissance même en l'absence d'oxygène dans l'air.
- La courbe d'endurance thermique (Figure VI.35) est une droite, ce qui indique que la dégradation thermique est gouvernée par une réaction chimique du premier ordre.
- La dégradation du papier est caractérisée par un changement de couleur de jaune au marron ainsi qu'un dégagement d'un gaz. dans le cas du vieillissement à 180°C, nous avons même observé un effritement des éprouvettes.



*Conclusion*

*générale*



### **Conclusion Générale**

Le travail présenté, dans ce mémoire, s'inscrit dans le cadre de l'étude de vieillissement thermique des isolants polymères. Cette étude concerne l'étude de la rigidité diélectrique sous tension continue positive du papier presspahn soumis à un vieillissement thermique. L'évolution de la tension de claquage du matériau diélectrique en fonction de temps de vieillissement thermique a été étudiée.

Nous sommes intéressés dans ce travail à la rigidité électrique de papier presspahn. La rigidité électrique est une caractéristique importante symbolisant les isolants en matière de qualité électrique. Le papier presspahn est un polymère qu'on trouve dans le différent domaines d'application en génie électrique, surtout dans les transformateurs à cause de leur excellente propriété physico-chimique. Les propriétés de ce papier se dégradent au cours de son utilisation. Ce phénomène est appelé vieillissement, dont on peut citer : thermique, mécanique, électrique, chimique etc.

Le claquage n'a jamais causé par un champ électrique seul mais par un effort combinatoire entre ce dernier et d'autres phénomènes d'origine thermique, mécanique, chimique, ... qui entrent dans la dégradation du matériau. Le champ de claquage est un phénomène aléatoire. Des échantillons identiques de dimension et différents de leur classe de vieillissement placés dans les mêmes conditions ne fournissent pas une seule valeur de tension de rupture, mais une distribution de valeur, d'où la nécessité d'une analyse statistique appropriée au traitement des données engendrées par ce phénomène.

Les valeurs obtenues de la tension de claquage ont été analysées statistiquement en utilisant le modèle Weibull à deux paramètres. La méthode de Weibull reste la meilleure pour sa capacité à aller chercher un seul de claquage si il y'a lieu.

Ce travail nous a permis de constater ce qui suit :

La courbe de la rigidité diélectrique en fonction de la température et du temps de vieillissement montre la présence de pics attribués 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.

Le temps de passage du phénomène d'amélioration des propriétés du matériau à sa dégradation diminue avec l'augmentation de la température.

La première période de vieillissement est considérée comme une amélioration du matériau dû à son séchage. A partir d'un certain temps d'exposition à la chaleur, les liaisons

de la composition chimique du polymère deviennent plus fragiles, ainsi le papier entre dans la phase de dégradation.

La courbe de durée de vie du matériau est une droite traduisant le processus de dégradation qui est gouvernée par une seule réaction chimique.

Ce travail a pour but de comprendre l'influence de la température sur la rigidité diélectrique du papier presspahn en prenant en compte les contraintes d'utilisation mais aussi de mener un traitement statistique sur les valeurs de champ de rupture mesuré.

Enfin, et en perspective il est judicieux de compléter ce travail par des analyses chimiques sur le papier presspahn afin de mieux comprendre les différentes transformations à l'échelle moléculaire du papier.

- [1] **EMEN Elloumi**, Caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymère, mémoire magister, université du Québec, octobre 2016.
- [2] **B.MEZADI, O.GUEZNANE**, Influence de la température sur les propriétés diélectriques du papier presspahn, mémoire master en énergie renouvelables, université de A/Mira Bejaia, Algérie, 2017/2018.
- [3] **NEDJMA Samira**, Effet du désencrage et du traitement de surface sur les propriétés physicomécanique et thermique des composites pvc / fibre de papier journal, mémoire de magister, université de Bejaia, 2010.
- [4] **GUEMAZ Nora**, réparation et étude de la stabilité thermique des polyuréthanes, mémoire de magister, université de Sétif, 2012.
- [4] **Michel FONTANILLE, Jean-Pierre VAIRON**, polymérisation, article A3040-2, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites.
- [6] **M S.Herzine**, Etude du vieillissement thermique du papier presspahn en utilisant le modèle statistique de weibull, mémoire de magister, université de Bejaia ,2006.
- [7]**F.Hellal, A.Oulagha** ,Application de quelques méthodes statiques pour la détermination de la rigidité diélectrique , mémoire de master en électrotechnique, université de A/Mira Bejaia, Algérie, 2013/2014
- [8] **SLIMANI Ferhat**, Etude du Vieillissement hydro thermique du papier presspahn, mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2007.
- [9] **Mme Talhi Mama EP. Bouri**, Contribution à l'étude du phénomène d'électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance, thèse université Oran 2018
- [10]**Janvier Sylvestre N'CHO** , DEVELOPPEMENT DE NOUVELLES METHODES DE DIAGNOSTIC ET DE REGENERATION DES HUILES POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE, thèse de doctorant , L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON,2011.
- [11] **ACHILI Djamal**, Etude de l'endurance thermique du papier presspahn. Imprégné d'huile, mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2018.
- [12]**R.Fournié**, Les isolants en électrotechnique : Essais mécanismes de dégradation applications industrielles, Editions Eyrolles, 1990
- [13] **M, Hamouimeche Kaissa**, Etude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan, mémoire de Magister en électrotechnique , université de Tizi-Ouzou, 2005.
- [14] **B. Bouvier**, “ Papier et papier imprégné“, Technique de l'Ingénieur, D280, Paris 1983
- [15] **F. Bitam-Megherbi**, Etude d'une isolation combinée huile/papier isolant : Approche non destructive, Thèse de Doctorat d'Etat en Electrotechnique. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Décembre2007.

- [16] **L. Boukezzi**. Influence du mode du vieillissement thermique sur les propriétés du polyéthylène réticulé chimiquement utilisé dans l'isolation des câbles de haute tension. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [18] **M.Stolidi**, Matériaux en électrotechnique , IUFM AIX-MARSEILLE, Préparation CAPET et PLP2 électrotechnique, 2006
- [17] **Amidou Betie**, Impacts de la qualité du système d'isolation sur la condition et l'efficacité des transformateurs de puissance, thèse de Doctorat, université de QUÉBEC, 2015
- [19]**Mouna BEN HASSINE**, Modélisation du vieillissement thermique et mécanique d'une protection externe en EPDM de jonctions rétractables à froid, thèse pour obtenir le grade de docteur, Ecole nationale supérieure d'arts et métiers -ENSAM,paris 2013.
- [20]**CHAOUICHE FARID**, vieillissement thermique d'une isolation à base de polyamide imide et de polyester-imide utilisé dans la machine électrique, université tizi -ouzou ,2015
- [21] **J. Verdu**. Vieillissement des plastiques. Editions Eyrolle, Paris, 1984.
- [22] **F. Bournane**, M. Bournane, M. Nedjar, A. Beroual, “ Apport de la loi de Weibull à la Compréhension de la rupture diélectrique des isolants solides“, 4ème conférence nationale de la haute tension, Ghardaïa, 16 et 17 Janvier 2002.
- [23] **Commission Electrotechnique Internationale**, comité d'étude N° 63, “ Systèmes d'isolation, évaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique, procédure d'évaluation basée sur des distributions de valeurs extrêmes, septembre 1989.
- [24] **A. Polard, C. Rivoire**, “ Fiabilité et statistiques prévisionnelles : la méthode de Weibull, Éditions Eyrolles, 1971.
- [25] **J.M. Oudin**, Y.Reyrolle, H.Thévenon, Théorie statistique du claquage électrique, RGE N°4, pp.430-436, 1968.
- [26] **M. Nedjar**, “ Evaluation de la tenue diélectrique à court terme et à long terme des polymèresutilisés dans les dispositifs haute tension, Thèse de doctorat d'etat, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2003.
- [27]**Nadia bouaziz**, Effet du vieillissement thermique sur la tenue diélectrique du polyester-imide utilisé dans les machines électriques, mémoire de Magister en électrotechnique Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou,2012