

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
ELECTROTECHNIQUE
Option : Machines Electriques

Thème

Effet de la température sur les propriétés du
complexe huile/papier utilisé dans les
transformateurs de puissance

Préparé par :

AIT HAMOU Mariama
AKIL Hakima

Dirigé par :

Mme F. BITAM-MEGHERBI
Mr D. BELKACEMI

Université Mouloud Mammeri
Electro-Industries

Promotion 2011

Remerciements

Nous tenons à remercier notre promotrice Madame Ferroudja BITAM-MEGHERBI, Maître de conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, qui a été d'un grand apport dans l'établissement de ce travail. Son orientation et ses conseils nous ont été très précieux.

Nous tenons à remercier notre Promoteur au niveau d'Electro-Industries, Monsieur Djamel BELKACEMI, Chef de département technique, pour nous avoir proposé le sujet et pour direction de la partie expérimentale.

Nous remercions également le personnel d'Electro-industrie d'Azazga , en général et en particulier ceux du laboratoire en l'occurrence , Monsieur Mourad MOUSSOUNI et Monsieur Farhat BELABES , pour leur aide et leur disponibilité durant notre stage au sein de l'usine.

On tient aussi à remercier Melle Amel NAIT DJOUDI ingénieure d'étude unité transformateurs pour son aide, sa disponibilité et sa gentillesse.

Nos remerciements les plus chaleureux vont également à nos familles pour leur compréhension et leur soutien incessant.

Nos derniers remerciements vont aux membres de jury qui nous feront l'honneur de juger notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ *Mon cher papa pour son amour et son soutien tout le long de mon parcours.*
- ✓ *Ma très chère maman pour son amour, son affection et sa tendresse.*
- ✓ *Mon frère unique Mouhend Amokraue à qui je souhaite une longue vie pleine de réussite.*
- ✓ *Mon bien aimé, mon cher époux Makhlouf qui n'a jamais cessé de m'apporter son soutien et à qui je témoigne amour et respect.*
- ✓ *Ma grand-mère Thaamarast à qui je souhaite une longue vie.*
- ✓ *Mes sœurs : Dalila, Djamila, Tounsia et Nouara en leurs souhaitant la réussite dans la vie.*
- ✓ *Mes beaux frères : Adlane et Arezki.*
- ✓ *Ma petite nièce Clarisse-Sarah.*
- ✓ *Mon petit neveu Mendasse.*
- ✓ *Ma belle mère.*
- ✓ *Mes cousines et cousins.*
- ✓ *Toute ma famille Akil.*
- ✓ *Toute ma belle famille Hammouchene.*

- ✓ *Ma copine Doudou et son époux Nadir.*
- ✓ *Mon binôme Mariama et toute sa famille.*
- ✓ *Tous mes amis(es).*
- ✓ *Toute la promotion 2011.*
- ✓ *Tous ceux qui auront le plaisir de lire ce mémoire.*

Dédicaces

C'est avec une grande joie et un réel plaisir que je dédie ce modeste mémoire, fruit de mes études, en exprimant ma profonde reconnaissance à tous mes proches tout particulièrement :

*A mes très chers parents bien aimés **BOUKHALFA** et **DAHBA**, les meilleurs parents du monde pour leur amour et leur soutien concernant tout les choix que j'ai entrepris dans ma vie.*

*A mon très cher mari **HAMOU** et toute sa famille.*

*A mes très chers frères **KACI** et **SALEM***

*A mes très chères sœurs **DJOURA**, **SOURIA**, **NACMA**,
SABRINA et **SALWA***

*Mon binôme **Hakima** et toute sa famille.*

*Toute ma famille **Ait hamou***

*A mes très chers **AMIS***

*Toute la promotion **2011**.*

Tous ceux qui auront le plaisir de lire ce mémoire.

Sommaire

Introduction Générale	01
CHPITRE I : généralités sur les transformateurs	
I.1. Introduction	03
I.2. Définition	03
I.3. Principaux types de transformateurs.. ..	04
I.4. Constitution d'un transformateur	04
I.4.1. Partie active	04
I.4.1.a. Circuit magnétique	04
I.4.1.b. Les enroulements	05
I.4.2. Partie constructive	05
I.4.2.a. La cuve	06
I.4.2.b. Le couvercle.....	06
I.4.2.c. Les traversées	06
I.5. Le couplage des enroulements	06
I.6. l'isolement	07
I.6.1. l'isolement des conducteurs	07
I.6.2. l'isolement des bobines	07
I.7. Caractéristiques d'un transformateur	07
I.7.1. La puissance nominale	07
I.7.2 Le courant nominal	07
I.7.3. La tension nominale	07
I.7.4. La tension du court-circuit	08

I.7.5. Les pertes à vide	08
- Hystérésis	08
- courant de Foucault	08
I.8. Rapport de transformation	09
I.9. Principe de fonctionnement d'un transformateur	09
I-10 Défauts et contraintes dans le transformateur	10
I.10.1. Défauts	10
I.10.1.a. Défauts d'origine interne	10
➤ refroidissement	10
➤ d'isolement	11
I.10.1.b. Défauts d'origine externe	11
➤ surtensions	11
➤ manœuvre	11
➤ défauts	11
➤ surintensités	11
a. normales	11
b. les surcharges anormales	12

	Les	courts-
• circuits	12	
I.10.2. Les contraintes	12	
I.10.2.a. les contraintes diélectriques	12	
I.10.2.b. les contraintes électriques	12	
I.10.2.c. les contraintes électrodynamiques	12	
I.10.2.d. les contraintes mécaniques	12	
I.10.2.e. les contraintes électromagnétiques	13	
I.10.2.f. les contraintes chimiques	13	
I.11. Protection du transformateur	13	
I.11.1. Les relais	13	
I.11.2. les fusibles	13	
I.11.3. les disjoncteurs	13	
I.11.4. Les éclateurs	13	
I.11.5. Les parafoudres	14	
I.12. Indice horaire h du transformateur triphasé	14	

CHAPITRE II : présentation du papier presspahn et de l'imprégnant

I.1. Introduction	15
II.2. Composition du papier.....	15
a. La cellulose	15
b. L'hémicellulose	15
c. La lignine	16
II.3. Procédé de fabrication du papier.....	17
II.4. Définition et mesure du degré de polymérisation.....	17
II.5. Propriétés du papier non imprégné.....	18
II.5.1. Propriétés physiques du papier non imprégné	19

a. Epaisseur	19
b. Masse volumique et perméabilité à l'air	19
c. Hygroscopicité du papier non imprégné	19
II.5.2. Propriétés mécaniques du papier non imprégné.....	20
a.	La
résistance à la traction	20
b.	R
résistance au déchirement	20
c.	R
résistance au pliage.....	20
d. Résistance à l'éclatement	20
II.5.3. Propriétés diélectriques du papier non imprégné	21
a.	Pe
mittivité relative.....	21
b.	Fa
cteur de dissipation diélectrique	21
c.	Ri
gidité diélectrique	22
II.5.4. Propriétés thermiques du papier non imprégné	22
a. La conductibilité thermique	23

b. La stabilité thermique	23
II.6. Dégradation du papier non imprégné	23
II.7. Imprégnant	24
II.7.1. Présentation de l'huile isolante	24
II.7.2. Rôle des huiles isolantes	24
II.7.3. Choix de l'huile.....	25
II.7.4. Fabrication de l'huile.....	25
II.7.5. Propriétés de l'huile minérale isolante	25
II.7.5.1. Les propriétés physiques	25
II.7.5.2. Propriétés chimiques	26
II.7.5.3. Propriétés électriques	26
II.8. Dégradation de l'huile	26
II.9. Papier imprégné	27
II.10. Propriétés du Papier imprégné	27
II.10.1. Hygroscopicité du papier imprégné	27
II.10.2. Propriétés diélectriques du papier imprégné	27
a.	Pe
mittivité relative et facteur de dissipation diélectrique	27
b.	Ri
gidité diélectrique.....	28
II.11. Vieillessement du papier imprégné	28
II.11.1. Vieillessement électrique	29

II.11.2. Vieillissement thermique	29
---	----

CHAPITRE III : contrainte diélectriques des matériaux isolants

III.1 Définition.....	30
III.2. Les différents types de matériaux.....	30
III.2.1. Les matériaux polaires.....	30
III.2.2. Les matériaux apolaires	31
III.3. Les différents types de polarisation.....	31
III.3.1. Polarisation électronique.....	32
III.3.2. Polarisation ionique.....	33
III.3.3. Polarisation par orientation et polarisation inter faciale.....	34
III.4. Mécanismes de claquage dans les isolants solides	34
III.4.1. Claquage diélectrique intrinsèque	35
III.4.2. Claquage électromécanique	35
III.4.3. Claquage par avalanche	35
III.4.4. Claquage thermique	36
III.4.5. Claquage par arborescences	36
III.5. Influence de plusieurs paramètres sur la rigidité diélectrique.....	37

CHAPITRE IV : étude expérimentale

IV.1. Introduction	38
IV.2. Préparation des échantillons de papier.....	38
IV.3. Séchage des échantillons	39
IV.4. Description du dispositif expérimental.....	41
IV.5. Déroulement des essais.....	43

IV.6. Résultats expérimentaux.....	44
IV.6.1. Caractéristiques courant-tension	44
IV.6.1.1. Température : 23.6 °C.....	44
IV.6.1.2. Température : 50 °C.....	46
IV.6.1.3. Température : 60 °C.....	48
IV.6.1.4. Température : 70 °C.....	49
IV.6.1.5. Température : 80 °C.....	51
IV.6.1.6. Température : 90 °C.....	52
IV.6.1.7. Température : 95 °C.....	54
IV.6.2. Effet de la température.....	56
VI.6.3. Discussion et interprétation des résultats.....	61
Conclusion générale.....	63

Introduction

Notre quotidien est marqué par l'utilisation indispensable de l'énergie électrique qui, depuis longtemps, a connu des évolutions et développements qui ont diversifié ses sources et manières de production. Cette dernière est conduite des centrales de production aux divers utilisateurs par des réseaux de distribution. L'un transporte de grandes puissances sur de longues distances, l'autre répartit cette puissance sous des tensions inférieures telle la tension nécessaire pour l'usage domestique [1], ce transfert s'effectue grâce aux transformateurs.

Pendant le fonctionnement d'un transformateur, de la chaleur s'accumule à la fois dans le noyau et les enroulements. Cette chaleur représente les «pertes» d'un transformateur et ces pertes augmentent de façon exponentielle à mesure que la charge dans le transformateur augmente. Il est donc essentiel de dissiper cette chaleur, surtout dans les conditions de charge plus élevée. A défaut de le faire, il s'ensuivra un vieillissement prématuré du transformateur, notamment une détérioration de l'isolation papier/huile à l'intérieur du transformateur et, finalement, la défaillance du transformateur lui-même [2].

Le complexe papier/huile offre une bonne isolation au transformateur vu les caractéristiques diélectriques du papier et de l'huile pour transformateur. Ces caractéristiques se trouvent améliorées suite à l'association de ces deux éléments.

Le présent travail consiste à étudier l'effet de la température sur les propriétés du complexe huile/papier utilisé dans les transformateurs de puissance. A fin de mener à bien notre étude, nous avons structuré le mémoire en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente des généralités sur les transformateurs.

Le second chapitre est consacré à la présentation du papier presspahn utilisé dans l'isolation des transformateurs de puissance et de l'huile minérale utilisée pour leur remplissage.

Le troisième chapitre illustre les contraintes diélectriques que peuvent subir les matériaux isolants.

Le quatrième chapitre est réservé aux essais expérimentaux réalisés au niveau de la firme Electro-Industries.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos résultats. Nous y donnerons également quelques perspectives ouvertes par ce travail.

Chapitre 1

Généralités sur les transformateurs

I.1. Introduction

L'énergie électrique produite par les centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires est rarement utilisée sur le même site de production. Il y a donc nécessité de transporter cette énergie vers les centres urbains ou les sites industriels. Le transformateur par ses différentes facettes d'utilisation rend possible ce transport.

L'invention du transformateur est due à L. Goulard (1850-1888) et remonte à 1884. Aujourd'hui, il constitue l'élément le plus important des systèmes d'appareils de puissance car c'est la base du transport de l'énergie électrique.

I.2. Définition

Selon la définition tirée du vocabulaire électrotechnique international, le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courants variables en un ou plusieurs systèmes de courants variables d'intensité et de tensions généralement différentes mais de même fréquence. La figure I-1 représente un transformateur triphasé.



Figure I.1. : Schéma d'un transformateur triphasé.

I.3. Principaux types de transformateurs

Selon la puissance distribuée par le transformateur et son mode de fonctionnement, on distingue les différents types suivant :

- Transformateurs de distribution : ils présentent une large gamme de puissance.
- Transformateur spéciaux : ils englobent les transformateurs d'essai et les transformateurs de mesure d'intensité et de tension.

I.4. Constitution d'un transformateur

Le transformateur présente deux parties essentielles :

- Partie active : elle est constituée par le circuit magnétique et les enroulements primaire et secondaire, elle peut être en monophasé ou en triphasé.
- Partie constructive : elle est constituée de la cuve, du couvercle et des traversées.

I.4.1. Partie active

Les composantes actives du transformateur assurent la conversion du courant. En matière de conception électromagnétique des appareils de grandes puissances, on rencontre principalement les technologies suivantes [3].

- Pour le circuit magnétique : les transformateurs sont à colonne ou cuirassés.
- Pour les enroulements : les bobinages sont en couches concentriques ou galettes (empilés) en cuivre, isolés au papier et/ou vernis.

I.4.1.a. Circuit magnétique

Le circuit magnétique est un assemblage de tôles ferromagnétiques d'épaisseur moyenne de quelques dixièmes de millimètre (0.3 - 0.4 mm) disposées dans un même plan parallèlement et perpendiculairement les unes aux autres et isolées sur les deux faces par une couche très mince appelée carlite à base de phosphate[4]. La figure I-2 représente le schéma d'un circuit magnétique.



Figure I.2. : Schéma du circuit magnétique.

Le circuit magnétique comporte deux noyaux réunis par des traverses. Sa fonction principale est de canaliser le flux magnétique produit par l'enroulement primaire pour qu'il y ait un trajet minimal et un facteur de couplage maximal avec l'enroulement secondaire.

Pour une meilleure efficacité, la tôle du circuit magnétique doit être :

- Fabriquée en matériau ferromagnétique à haute perméabilité pour une transformation suffisamment efficace de l'énergie électrique.
- Isolée pour diminuer les courants de Foucault.
- A grains orientés pour avoir une perméabilité plus élevée dans la direction du flux.

I.4.1.b. Les enroulements

Les deux enroulements sont composés de bobines et répartis chacun sur les deux noyaux. L'enroulement primaire est l'enroulement connecté au générateur de courant alternatif par contre l'enroulement secondaire est celui qui fournit de l'énergie au réseau. Les deux enroulements ont en général des nombres de spires différents. Celui qui en possède le moins est appelée enroulement basse tension (BT), l'autre est l'enroulement Haute Tension (HT).

Selon les conditions d'emploi et l'installation de l'appareil, l'enroulement haute tension peut être le primaire ou le secondaire.

Pour des raisons économiques, les enroulements doivent satisfaire plusieurs conditions :

- L'enroulement doit être économique en tenant compte du prix du cuivre et du rendement du transformateur.
- Les résistances des enroulements doivent être suffisamment faibles pour réduire les pertes d'énergie qui se dégagent sous forme calorifique.
- L'enroulement doit être isolé avec un isolant résistant à l'élévation de la température liée aux court-circuit et aux surtensions lors du fonctionnement.

I.4.2. Partie constructive

Le transformateur comprend, en plus de la partie active, une série d'éléments mécaniques qu'on appelle pièces constructives, destinées à l'isolation électrique entre les enroulements, à la fixation et au refroidissement de la partie active qui se compose de :

I.4.2.a. La cuve

En plus de son rôle de réservoir au liquide diélectrique, la cuve assure le maintien mécanique du circuit magnétique et des enroulements. Elle permet également l'évacuation de la chaleur du fait qu'elle contient un isolant liquide ayant aussi le rôle d'un réfrigérant, l'huile minérale est plus utilisée. La cuve est faite en tôle d'acier.

I.4.2.b. Le couvercle

Le rôle du couvercle est d'assurer la fermeture de la cuve, par ailleurs, il sert de support aux accessoires tels que les traversées, les appareils de surveillance (relais de Buchholz, thermomètre) Le couvercle est fait en tôle d'acier.

I.4.2.c. Les traversées

Les enroulements sont reliés aux circuits extérieurs à travers les traversées qui permettent le passage des conducteurs à travers le couvercle. Ce sont des tubes isolants en porcelaine fixés sur le couvercle.

Leurs formes et leurs dimensions sont très variées, elles sont fonction de la tension, la puissance et l'utilisation du transformateur.

Les traversées sont faites en porcelaine, cuivre, alliage de métaux, isolants ou en résine pour certains types de transformateurs, exemple des enbrochables.

I.5. Le couplage des enroulements

Les bobines de chaque enroulement doivent être connectées entre elles afin de constituer un groupe de connexion. Il existe trois modes de connexions : l'étoile (Y), le triangle (D) et le zig-zag(Z).

Le choix du couplage dépend de l'utilisation du transformateur. Dans le cas où il est utilisé pour la distribution, on doit satisfaire les conditions suivantes :

- Présence de fil neutre coté BT ;
- Présence de fil neutre coté HT ;
- Adoption de couplages différents pour les deux enroulements.

I.6. l'isolement

Les enroulements étant soumis à des tensions électriques, il faut les isoler pour assurer leur bon fonctionnement et la sécurité des utilisateurs.

I.6.1. l'isolement des conducteurs

L'isolement des spires est réalisé avec du vernis ou du papier ou les deux en même temps.

I.6.2. l'isolement des bobines

L'isolement des bobines basses tension du circuit magnétique est réalisé par un tube isolant en presspahn.

I.7. Caractéristiques d'un transformateur

Un transformateur est caractérisé par :

I.7.1. La puissance nominale

C'est la valeur conventionnelle de la puissance apparente. Elle peut être utilisée lors du fonctionnement en régime normal. Elle s'exprime en VA.

$$S = UI \quad (I.1)$$

U : la tension nominale [V].

I : le courant nominal [A].

I.7.2. Le courant nominal

C'est la valeur du courant pour laquelle seront définies et garanties les caractéristiques dues à la charge (les pertes dues à la charge, U_{CC}).

I.7.3. La tension nominale

C'est la valeur de la tension pour laquelle seront définies et garanties les caractéristiques à vide du transformateur (courant à vide, pertes à vide).

I.7.4. La tension du court-circuit

C'est la tension réduite qu'il faut appliquer au primaire lorsque le secondaire est en court-circuit pour que le courant nominal circule au primaire.

I.7.5. Les pertes à vide

Lors du fonctionnement à vide, la puissance absorbée par le transformateur est pratiquement dépensée pour compenser les pertes dans le fer car les pertes dans le cuivre sont généralement inférieures ou égales à 2% de la puissance totale consommée.

On distingue les pertes par courant de Foucault et les pertes par Hystérésis.

- les pertes par Hystérésis

Pour chaque cycle complet de courant, le circuit absorbe une énergie mesurée par la surface de la boucle d'Hystérésis. En alternatif et pour un matériau donné, la formule de calcul des pertes est donnée par :

$$P_H = C_H \cdot B_m^2 \cdot f \quad [\text{w/kg}] \quad (\text{I.2})$$

C_H : coefficient d'Hystérésis.

B_m : valeur maximal de l'induction magnétique.

f : fréquence d'alimentation.

- Les pertes par courant de Foucault

Dans le transformateur, les courants de Foucault prennent naissance dans le matériau magnétique conducteur. Pour limiter l'amplitude de ces courants et les pertes associées, le circuit magnétique est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles disposées parallèlement aux lignes d'induction.

Ces pertes sont données par la relation suivante :

$$P_F = C_F \cdot e^2 \cdot B_m^2 \cdot f^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (\text{I.3})$$

C_F : coefficient dépendant de la résistivité électrique du matériau.

e : épaisseur élémentaire des tôles.

B_m : valeur maximale de l'induction.

f : fréquence de la tension d'alimentation.

I.8. Rapport de transformation

C'est le rapport de la tension simple nominale primaire et de la tension simple secondaire à vide.

Le tableau suivant récapitule les rapports de transformation pour les différents couplages :

couplages	Rapport de transformation
Yy	N_2/N_1
Dy	$\sqrt{3} N_2/N_1$
Zy	$2 N_2/\sqrt{3} N_1$
Yd	$N_2/\sqrt{3} N_1$
Dd	N_2/N_1

Zd	$2 N_2/3 N_1$
Yz	$\sqrt{3} N_2/2 N_1$
Dz	$3 N_2/N_1$
Zz	N_2/N_1

I.9. Principe de fonctionnement d'un transformateur

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle au nombre de spires que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire [6].

Le fonctionnement du transformateur est tributaire des conditions climatiques et géographiques, comme la température ambiante et l'altitude.

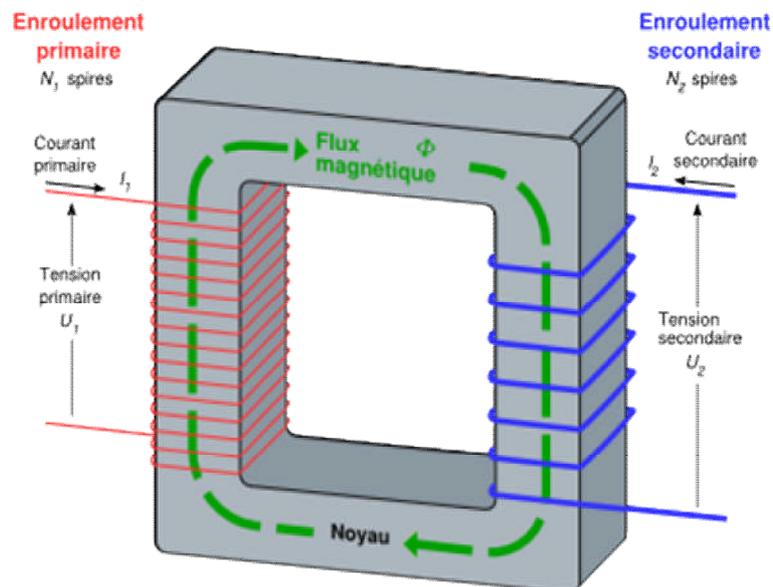


Figure I.3. : Représentation du flux dans le circuit magnétique.

I.10. Défauts et contraintes dans le transformateur

I.10.1. Défauts

Comme toutes les machines électriques, le transformateur est le siège d'un certain nombre d'incidents qui sont dus en général à l'apparition de défauts. Ces derniers apparaissent lors des conditions anormales de fonctionnement du transformateur.

I.10.1.a. Défauts d'origine interne

Parmi les défauts d'origine interne rencontrés dans le transformateur, on distingue :

➤ Défaut de refroidissement

Il se produit lorsque la température de la cuve augmente, ce qui entraîne une augmentation de la température de l'huile et des enroulements. La chaleur dégagée peut alors provoquer la fusion des enroulements.

➤ Défaut d'isolement

Un défaut d'isolement provoque un amorçage entre les spires d'un même enroulement ou bien entre les tôles du circuit magnétique. Cet amorçage peut donner naissance à des courants importants entrant dans la gamme des surcharges ou des courts-circuits.

I.10.1.b. Défauts d'origine externe

Parmi les principaux défauts d'origine externe rencontrés dans les transformateurs, on peut citer :

➤ Les surtensions

Ce sont les surtensions résultantes de phénomènes atmosphériques transmis par les lignes aériennes, ainsi que les manœuvres de couplage effectuées sur les réseaux. L'apparition d'une différence de potentiel supérieure à la tension de service peut avoir deux origines :

- **Surtensions de manœuvre**

Elles sont dues aux perturbations qui surviennent dans le circuit au moment de la manœuvre d'appareils de coupure et qui provoquent par induction une variation rapide et momentanée de la tension.

- **Surtensions de défauts**

Elles sont essentiellement produites par un défaut d'isolement, une décharge atmosphérique telle que l'effet de la foudre, les contraintes diélectriques qui en résultent sont toujours élevées et dangereuses pour la bonne conservation des isolants.

- **Les surintensités**

Une surintensité désigne toute intensité de courant supérieure à celle du courant admissible dans les conducteurs. Les surintensités peuvent être la conséquence soit :

- **De la surcharge des appareils d'utilisation** : on distingue deux types de surcharges :
 - a. **les surcharges normales**

Elles sont passagères et s'éliminent souvent d'elles mêmes.

- b. les surcharges anormales**

Les surcharges anormales sont dues à des défauts ou à une augmentation de la puissance absorbée par l'appareil d'utilisation. Les intensités des courants de surcharge sont peu élevées mais leur passage prolongé peut provoquer un échauffement anormal des conducteurs.

- **Les courts-circuits**

Les courts-circuits soumettent le transformateur à des courants de 10 à 20 fois le courant nominal. Ils sont dus à des défauts entre conducteurs conduisant le courant dans deux sens opposés. Ils peuvent entraîner la fusion des conducteurs et provoquer des dégâts comme des incendies [3].

I .10.2. Les contraintes

Les contraintes posent des problèmes divers dans la réalisation des transformateurs, elles peuvent être classées en plusieurs catégories :

I.10.2.a. les contraintes diélectriques

Les contraintes diélectriques sont définies par l amorçage entre enroulements ou entre partie sous tension et entre pièce active et masse.

I.10.2.b. les contraintes électriques

Les contraintes électriques sont les surtensions et les surintensités.

I.10.2.c. les contraintes électrodynamiques

Les contraintes électrodynamiques sont dues aux efforts des court-circuits internes ou externes. On peut les réduire par un choix approprié de la nature et de la disposition des conducteurs.

I.10.2.d. les contraintes mécaniques

Les contraintes mécaniques provoquent des déformations de matériels.

I.10.2.e. les contraintes électromagnétiques

Les contraintes électromagnétiques sont dues aux courants de Foucault induits dans le circuit magnétique, les pièces de serrage et la cuve.

I.10.2.f. les contraintes chimiques

Les contraintes chimiques résultent de l'action conjuguée de la corrosion et de l'oxydation sur les parois du transformateur.

I.11. Protection du transformateur

Parmi les éléments de protection du transformateur, on peu citer :

I.11.1. Les relais

Le relais est un appareil sensible aux variations de grandeurs issues du réseau ou de l'élément à protéger. Son rôle est de surveiller les différentes grandeurs : tension, courant, fréquence, température et pression.

I.11.2. les fusibles

Le fusible est un appareil de protection possédant un excellent pouvoir de coupure. Il a le rôle de coupure automatique du circuit dans lequel il est inséré.

I.11.3. les disjoncteurs

Le disjoncteur est un appareil mécanique de connexion. Lors des conditions prédéterminées tel que les courants de surcharge ou de court-circuit, le disjoncteur est capable d'interrompre des courants élevés.

Il est considéré comme un interrupteur maintenu fermé par un système de verrouillage qui se déclenche automatiquement dans le cas d'un défaut.

I.11.4. Les éclateurs

L'éclateur est un dispositif de limitation des surtensions comportant un intervalle d'éclatement d'air libre entre une électrode sous tension et une autre reliée à la terre. Les éclateurs sont montés sur des traversées de transformateur.

I.11.5. Les parafoudres

Le parafoudre est un appareil installé dans le réseau électrique destiné à écouler une onde de courant.

I.12. Indice horaire h du transformateur triphasé

Les conditions de couplage des enroulements primaires et secondaires d'un transformateur triphasé ont aussi pour effet d'introduire un déphasage entre les tensions primaires et secondaires.

En pratique, le déphasage θ obtenu est toujours un multiple entier de 30° .

$\theta =$ retard d'une tension BT sur son homologue HT.

L'indice horaire h est donné par l'expression ci-dessous.

$$h = \theta / 30^\circ \quad (\text{I.4})$$

Chapitre 2

***Présentation du papier presspahn et
de l'imprégnant***

II.1. Introduction

Jusqu'à la première guerre mondiale, les isolants industriels sont élaborés essentiellement à partir des produits naturels. Comme meilleur exemple nous avons, le papier qui est obtenu à partir du bois, du coton, des conifères, et des dérivés de chanvre de manille.

Le papier est un isolant bon marché, en plus sa structure organique bien définie, lui permet de s'imprégner facilement. L'imprégnant associé au papier est le plus souvent une huile minérale qui améliore ses propriétés diélectriques.

Etant donné la grande étendue du domaine d'application du papier, nous en rencontrons une grande variété de qualité obtenue selon divers processus de fabrication. Celles-ci permettent de répondre au mieux aux contraintes imposées par la mise en œuvre et la tenue en service des isolations auxquelles elles sont destinées.

Le papier est le meilleur matériau pour recouvrir les conducteurs à haute tension. Il est utilisé principalement pour l'isolation des câbles de puissance, des condensateurs et des transformateurs.

II.2. Composition du papier

Le papier est constitué de 90% de cellulose, 6 à 7% d'hémicellulose et 3 à 4% de lignine. Nous allons décrire ci-après la constitution de ces trois éléments [7].

a. La cellulose

C'est le principal constituant du papier qui se présente sous la forme de longues chaînes (100 nm environ), qui sont la répétition d'un nombre plus au moins important d'anneaux de glucose (de l'ordre du millier).

b. L'hémicellulose

Elle est composée de chaînes du même type que celles de la cellulose mais plus courtes et ramifiées, ce qui lui confère une structure amorphe (non cristalline).

c. La lignine

On ne connaît pas encore sa composition exacte, elle possède une structure amorphe et c'est elle qui, dans le bois, soude les fibres entre elles.

La composition des divers types de papier utilisés dans l'industrie électrique est donnée sur le tableau II.1 [8].

Tableau 1 : Composition des divers types de papier utilisés dans l'industrie électrique.

Constituants	Papier Kraft pour câble %	Papier 100% Manille %	Papier coton %	Papier Kraft pour condensateurs
Cellulose	88.3	78.6	95	91
Hémicellulose	2.9	11.4	0.5	1.5
Lignine	4.3	8.9	0.9	2.3
Cendre	0.5	0.7	0.1	0.1

Tenure en sulfate	0.02	-	0.1	0.01
Tenure en chlorure	0.02	-	0.1	0.01
Autres impuretés	3.96	0.4	3.3	5.08

II.3. Procédé de fabrication du papier

Les progrès apportés à la fabrication du papier ont permis d'obtenir des papiers très purs qui peuvent être substitués au papier fabriqué à partir du coton utilisé initialement dans les condensateurs.

Les papiers presspahn ou bien les cartons comprimés sont fabriqués à partir de 100% de la pâte de bois au sulfate, purifiée. Ils sont constitués de plusieurs couches de feuilles minces, moulées, calandrées ou pressées à chaud.

La fabrication du papier passe par plusieurs phases dont certaines permettent de donner aux papiers les propriétés qui améliorent sa tenue dans les applications industrielles, en procédant par :

- La dissociation des structures cellulosiques cimentées par la lignine et la séparation des fibres en état individuel. Pour la fabrication du papier Kraft à partir du bois, cette transformation se fait essentiellement par un procédé chimique qui permet d'éliminer la lignine et l'hémicellulose, on obtient ainsi la pâte à papier.
- Un traitement de la pâte au cours duquel les fibres sont plus au moins rompues. Selon la masse volumique que l'on veut donner au papier.

La fabrication de la feuille de papier, elle-même, menée dans des conditions dont dépendent également l'uniformité de la surface et la perméabilité à l'air du papier [7].

II.4. Définition et mesure du degré de polymérisation

La polymérisation est une réaction chimique dans laquelle certaines molécules simples peuvent s'unir de façon à former une grosse molécule, contenant plusieurs fois la molécule initiale. On dit alors que la nouvelle substance ainsi formée est un polymère de la première molécule. La figure II.1 montre la structure moléculaire de la cellulose.

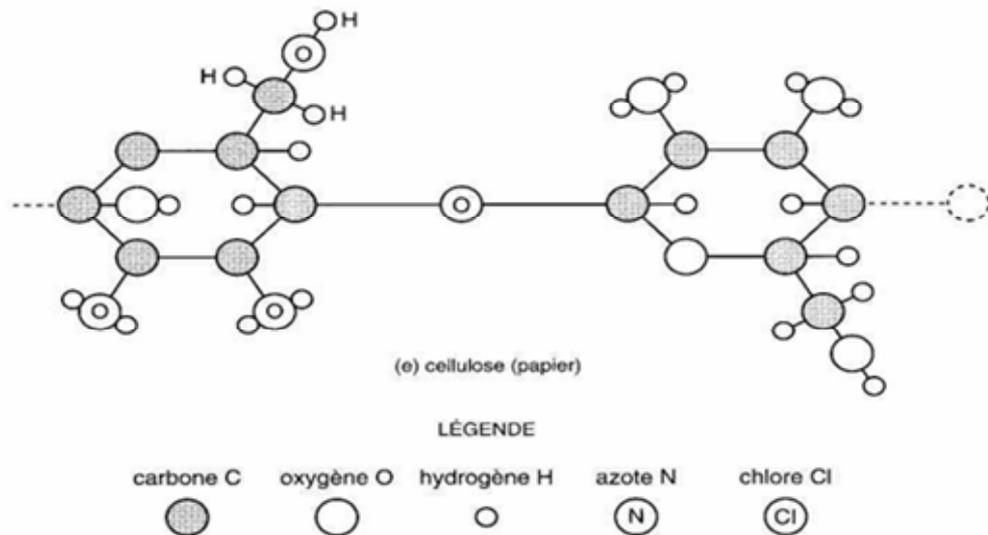


Figure II.1. Représentation de la molécule de cellulose [9].

La mesure du degré de polymérisation s'effectue sur le nombre de monomères glucoses $C_6H_8O_5$ dans la molécule de cellulose. Cette mesure permet de vérifier que les chaînes de cellulose n'ont pas été dégradées lors de la fabrication du papier.

Le degré de polymérisation moyen en viscosité DP_V , se détermine à partir de la mesure de la viscosité intrinsèque d'une solution de papier dans la cupri-éthylène diamine [10].

II.5. Propriétés du papier non imprégné

Les propriétés du papier sont choisies pour répondre aux contraintes imposées par la mise en œuvre et la tenue en service de l'isolation à laquelle elles sont destinées. Parmi les principales caractéristiques du papier non imprégné, on citera :

- Les propriétés physiques ;
- Les propriétés mécaniques ;
- Les propriétés diélectriques ;
- Les propriétés thermiques.

II.5.1. Propriétés physiques du papier non imprégné

a. Epaisseur

Cette propriété peut varier d'un papier à l'autre selon l'application à laquelle il est destiné. Les papiers utilisés dans les condensateurs ont les plus faibles épaisseurs (5 à 25 μm environ) [7]. Une meilleure tenue diélectrique est obtenue on superposant plusieurs couches d'un papier très fin plutôt qu'en utilisant une seule couche d'un papier plus

épais. Les papiers de guipage des conducteurs constituant les enroulements des transformateurs sont encore assez fins et ne dépassent pas 75 μm [7] par contre les papiers des câbles ou entre couches des transformateurs sont plus épais (75 à 200 μm).

Certaines qualités de papiers sont traitées mécaniquement pour se présenter sous un état crêpé, afin d'assurer l'isolation en des points difficiles à isoler de par leur géométrie notamment dans les transformateurs.

b. Masse volumique et perméabilité à l'air

Le papier non imprégné se présente sous la forme d'une association de cellulose et d'air. La masse volumique varie d'une qualité de papier à une autre, et dépend de son procédé de fabrication.

La masse volumique de la cellulose proprement dite est de 1,4 g/cm^3 , celle du papier des condensateurs varie entre 1,1 et 1,3 g/cm^3 . La masse volumique des papiers de câbles est plus faible et varie de 0,7 à 1 g/cm^3 [10].

c. Hygroscopicité du papier non imprégné

Le caractère polaire de la cellulose est responsable de l'hygroscopicité élevée du papier. Une partie de l'eau contenue dans le papier est fixée aux groupements hydroxyle (OH) de la cellulose par des liaisons hydrogène.

Si le papier est assez humide, une partie de l'eau pénètre dans les capillaires, d'autant plus facilement que le papier est plus humide. En équilibre avec une atmosphère à température et humidité contrôlées, la teneur en eau du papier dépend de la pression partielle de vapeur d'eau.

Le papier se contracte en séchant et les constructeurs doivent prendre cela en compte. La résistance à la traction augmente avec l'humidité pour atteindre une valeur

optimale quand le taux d'humidité est de 5% environ. Au-delà elle peut décroître de plus de 30%.

Une teneur élevée en eau du papier est enfin incompatible avec de bonnes propriétés électriques, de plus l'eau est un agent d'accélération du vieillissement du papier. Pour y remédier on modifie chimiquement la chaîne de cellulose.

II.5.2. Propriétés mécaniques du papier non imprégné

Les principales propriétés requises du papier non imprégné sont la résistance à la traction et au déchirement, ainsi que la résistance au pliage et pour certains usages spéciaux, une résistance à l'écoulement.

a. La résistance à la traction

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

b. Résistance au déchirement

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

c. Résistance au pliage

La résistance au pliage est le nombre de doubles plis que peut supporter une bande de papier, sous tension constante, avant de se rompre.

d. Résistance à l'éclatement

L'indice d'éclatement, qui permet d'évaluer la résistance à l'éclatement du papier, est égal au quotient de la pression hydraulique (exprimée en millibars) exercée sur une éprouvette de papier par l'intermédiaire d'une membrane en caoutchouc, dans des conditions normalisées à l'instant de l'éclatement, par la masse volumique du papier (en grammes par mètre carré).

II.5.3. Propriétés diélectriques du papier non imprégné

Pour pouvoir comparer deux papiers de qualités différentes, il faut que les conditions de mesure de la permittivité relative et le facteur de dissipation diélectrique soient parfaitement définis.

a. Permittivité relative

Sous de faibles contraintes électriques, le papier non imprégné peut être considéré, par le biais de sa constitution comme une association en série de deux condensateurs dont les diélectriques sont la cellulose et l'air. La permittivité relative dépend de la masse volumique du papier et décroît quand cette dernière diminue. La permittivité relative de la cellulose pure est de 6,5 à une fréquence de 1000 Hz alors que celle du papier peut varier de 1,7 à 3,2 quand la masse volumique varie de 0,6 à 1,2 g/cm³.

b. Facteur de dissipation diélectrique

Le facteur de dissipation diélectrique dépend de la masse volumique du papier et décroît avec la diminution de cette dernière. La présence des groupements hydroxyyles dans la cellulose provoque l'apparition d'une bande d'absorption diélectrique, localisée à basse température, mais ayant une influence sensible sur les pertes diélectriques du papier

non imprégné à la température ambiante. C'est pour cette raison qu'on observe une augmentation des pertes du papier non imprégné vers les plus faibles températures. Cette augmentation est d'autant plus sensible que le papier contient plus d'hémicellulose qui favorise l'absorption diélectrique d'origine polaire, à cause de sa structure amorphe. Pour un papier pur, comme un papier de condensateur, le phénomène d'accumulation de charges aux interfaces cellulose-air provient de la conductivité de la cellulose ; il ne peut être observé qu'aux basses fréquences (environ 10^{-4} Hz à 100°C). Mais, dans un papier comportant encore des impuretés ioniques provenant du bois lui-même ou absorbées pendant la fabrication du papier, la présence de ces impuretés provoquera, déjà à la fréquence de 50 Hz une augmentation des pertes vers les plus hautes températures.

c. Rigidité diélectrique

Le papier non imprégné possède une rigidité diélectrique médiocre légèrement supérieure à celle d'un film d'air de la même épaisseur. Cette caractéristique n'a une signification que si elle est déterminée sur un papier à l'état imprégné.

Les papiers à l'état non imprégné font l'objet d'un certain nombre de contrôles ayant pour but d'en détecter les points faibles en particulier la présence d'inclusions conductrices susceptibles de réduire la tenue diélectrique du papier une fois qu'il sera à l'état imprégné.

Le papier non imprégné peut contenir des inclusions microscopiques qui peuvent être observées et identifiées à l'aide d'un microscope électronique à balayage. De telles inclusions favorisent le claquage entre les électrodes quand la tension augmente principalement dans les zones de faible épaisseur.

II.5.4. Propriétés thermiques du papier non imprégné

L'une des contraintes les plus importantes auxquelles sont soumis les matériaux isolants dans les matériels électriques est celle qui résulte des échauffements des parties actives. L'effet de la contrainte thermique revêt deux aspects :

- Le premier concerne le comportement instantané des isolants aux températures élevées.
- Le second est relatif à la dégradation qui s'opère progressivement au cours du temps et affecte leur comportement à long terme.

Parmi ces propriétés on peut citer :

a. La conductibilité thermique

La conductibilité thermique du papier non imprégné limite plus ou moins l'élévation de la température de l'isolation dont dépendent à court terme les risques de claquage et à plus long terme le vieillissement de l'isolation.

b. La stabilité thermique

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

II.6. Dégradation du papier non imprégné

Les phénomènes intervenant dans la dégradation du papier sous l'action de l'oxygène et l'humidité sont les suivants :

- Une ouverture des anneaux de glucose et la scission des chaînes moléculaires, ce qui se traduit par une diminution du degré de polymérisation et provoque la perte des qualités mécaniques.
- L'apparition de produits gazeux de décomposition du papier, dont principalement les monoxydes et dioxydes de carbone et l'eau.
- L'apparition des fonctions réductrices aldéhyde et cétone aux extrémités des chaînes ou tout au long des chaînes d'où une augmentation de l'indice de cuivre. Cet indice étant déterminé par réaction de la liqueur de Fehling sur la cellulose.

II.7. Imprégnant

Le choix de l'imprégnant est important, car les caractéristique de l'isolation dépendent de cet imprégnant. Ces caractéristiques sont des pertes diélectriques faibles et une permittivité relative élevée.

Parmi ces imprégnant on citera : les huiles minérales, les diélectriques chlorés, les huiles de synthèse et enfin les huiles d'origine végétale.

II.7.1. Présentation de l'huile isolante

L'emploi d'une huile minérale en tant que moyen de refroidissement et d'isolation n'est pas nouveau du fait qu'elle est utilisée depuis plus d'un siècle. Aujourd'hui l'huile

minérale est toujours utilisée comme isolant parce qu'elle offre non seulement le meilleur compromis prix performance, mais également un haut niveau de compatibilité avec les autres matériaux utilisés dans les transformateurs, c'est pourquoi d'autres fluides plus coûteux tels que les huiles silicones et certains types d'esters sont réservés à des applications pour lesquelles leurs caractéristiques spécifiques peuvent justifier un prix plus élevé.

Les huiles minérales isolantes sont les diélectriques les plus répandus dans l'isolation des équipements électriques en particulier dans les transformateurs de haute et moyenne tension. Elles sont obtenues à partir des fractions lourdes issues de la distillation fractionnée sous vide du pétrole brut. Ces distillats appelés huiles de base serviront de matière première pour la fabrication des différentes huiles qui seront choisies selon les caractéristiques que l'on veut leur conférer [11].

II.7.2. Rôle des huiles isolantes

L'huile isolante minérale joue le rôle d'isolant entre les différentes parties actives des transformateurs : isolation entre conducteurs sous tension, isolation entre enroulements de basse et haute tension, isolation entre enroulement et cuve. Le rôle principal des huiles est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer les propriétés diélectriques. Elle joue aussi le rôle de refroidisseur en captant la chaleur dissipée par les éléments actifs pour la restituer à une source froide [12].

II.7.3. Choix de l'huile

Pour assurer une longue durée de vie d'une huile isolante en service (c'est-à-dire en termes de coût /performance), l'étape la plus importante est la sélection d'une huile qui possède les propriétés requises pour l'équipement exigeant des types d'huile différents. Ainsi par exemple, un transformateur haute tension pour forte charge requiert une meilleure huile qu'un transformateur basse tension pour faible charge. En principe, le fabricant de l'équipement en question signale le type de l'huile à utiliser, puisque l'huile

doit être considérée comme un élément essentiel de l'équipement et non pas comme un additif quelconque versé dans le transformateur.

II.7.4. Fabrication de l'huile

La distillation du pétrole brut donne des huiles qui doivent être raffinées pour les débarrasser de tous les composés ; l'huile obtenue est un mélange de carbures d'hydrogène dont les propriétés varient suivant l'origine, la nature et la proportion des composants, le degré de raffinage ; d'où possibilité de choisir la qualité d'huile correspondant à l'emploi désiré [13].

II.7.5. Propriétés de l'huile minérale isolante [14]

II.7.5.1. Les propriétés physiques

- Couleur jaune et claire.
- Densité variable de 0,85 à 0,95.
- Viscosité variable suivant la composition de l'huile et sa pureté.
- Chaleur massique à 50°C : 0,4 à 0,5 kcal /kg.
- Conduction thermique de 3 à 4 10^{-2} cal/ms.
- Coefficient de dilatation 7 à 8 10^4 .
- Point d'éclair (température d'inflammation des vapeurs d'huile) doit être supérieur à 155°C.
- L'huile absorbe l'humidité de l'air.
- Point de congélation variable suivant la composition de l'huile et sa pureté, il doit être inférieur à -30°C.

- Point de feu (température de combustion continue) doit être supérieur à 165°C.

II.7.5.2. Propriétés chimiques

L'huile minérale doit avoir une acidité minérale nulle et organique très faible. L'huile s'oxyde au contact de l'air et sous l'effet de la température. Il y a formation de produits acides et de boue qui se dépose. On évite l'oxydation par réduction de la surface en contact avec l'air (conservation d'huile de transformateurs).

II.7.5.3. Propriétés électriques

L'huile pure est un excellent isolant, sa rigidité diélectrique peut atteindre 90 à 100 kV/mm. Mais la présence d'impuretés, d'humidité et de produits acides la diminue considérablement. Le constant diélectrique de l'huile est de 2 à 2,2 ; sa résistivité est de 5 à $10 \cdot 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$.

II.8. Dégradation de l'huile

La constitution chimique très complexe de l'huile minérale rend très difficile l'explication des mécanismes qui régissent les réactions d'oxydation en son sein. Le vieillissement de l'huile et son altération en service est dû à l'oxydation de certains constituants par l'action de l'oxygène et de la température activée par des facteurs extérieurs comme l'eau, les métaux dissous, les dioxydes de carbone et autres facteurs.

Les conséquences de l'oxydation sur l'isolation sont :

- Augmentation des pertes diélectriques et de la conductivité ;
- Mauvaise évacuation de la chaleur ;
- Corrosion des pièces métalliques ;

- Une dégradation plus rapide de l'isolation cellulosique.

II.9. Papier imprégné

Nous avons présenté les différentes propriétés du papier et de l'imprégnant (l'huile minérale). Dans ce qui suit, nous allons examiner les principales modifications apportées à ces propriétés en particulier les propriétés électriques lorsque le papier est imprégné dans l'huile minérale (Borak 22). Les propriétés diélectriques dépendent de l'imprégnant mais aussi dans une certaine mesure, de la qualité du papier et de sa masse volumique.

II.10. Propriétés du Papier imprégné

II.10.1. Hygroscopicité du papier imprégné

L'huile et l'air ambiant ont, à l'équilibre et s'ils sont à la même température, des teneurs en eau sensiblement égales. Le papier imprégné et immergé dans l'huile s'humidifiera donc comme s'il était à l'air, quand le système papier /huile est exposé à une atmosphère humide. Toutefois, l'évolution de l'humidité de chacun des constituants est relativement complexe, quand il y a échange d'humidité entre air et huile d'une part et huile et papier d'autre part.

II.10.2. Propriétés diélectriques du papier imprégné

Les propriétés diélectriques du papier imprégné dépendent de l'imprégnant et aussi de la qualité du papier et sa masse volumique.

a. Permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique

Le papier imprégné peut, comme à l'état non imprégné, être considéré comme une association en série de la cellulose et de l'imprégnant

Le facteur de dissipation diélectrique et la permittivité dépendront étroitement de la masse volumique du papier.

b. Rigidité diélectrique

La présence d'un imprégnant est responsable de l'amélioration notable de la rigidité diélectrique du papier à l'état imprégné. Cette caractéristique dépend non seulement du papier lui-même, mais aussi des conditions dans lesquelles elle est déterminée. La rupture diélectrique débute principalement par des décharges au niveau de l'imprégnant conduisant à la rupture totale de l'isolation, dès l'apparition de la première décharge et cela quand la tension appliquée est continue ou sous forme d'impulsions.

En alternatif, les premières décharges apparaissent à une tension inférieure à la tension à laquelle il y a rupture de l'isolation. Cette tension de rupture est plus faible que les tensions de rupture relevées en continu ou en tension impulsionnelle.

La présence de vacuoles à l'intérieur d'une isolation est susceptible de diminuer sa tenue diélectrique, quelle que soit la forme de la tension appliquée, en favorisant l'amorçage de la rupture dans l'imprégnant qui peut conduire à la rupture diélectrique de l'ensemble de l'isolation.

Dans tout les cas il est important de réduire le nombre de vacuoles et leurs dimensions. C'est pourquoi pour l'isolation des câbles, on choisit un papier moins épais

et un recouvrement de façon à réduire autant que possible le nombre de dé joints surtout dans la direction radiale du champ. Pour les condensateurs où la contrainte diélectrique imposée à l'isolation, est plus élevée que dans un câble, les papiers sont choisis très minces, en raison non seulement de l'augmentation des caractéristiques propres du papier, mais également pour éliminer, grâce à un empilement d'un plus grand nombre de feuilles, les risques des chemins conducteurs dans l'isolation.

II.11. Vieillessement du papier imprégné

Le papier fait l'objet d'un vieillissement important lorsqu'il est soumis à l'effet de la température. Cela se traduit par une diminution de ses caractéristiques, en particulier des caractéristiques mécaniques. Le vieillissement thermique du papier imprégné est pris en considération surtout si l'imprégnant est l'huile. L'oxygène, quand il est présent, a une influence particulièrement importante, étant donné son action sur cet imprégnant. L'application d'un champ électrique est susceptible de provoquer également la dégradation d'une isolation de papier imprégné sous certaines conditions, où l'effet combiné de la température n'est pas toujours exclu. La dégradation du papier imprégné est alors prise en considération sous un aspect nouveau.

II.11.1. Vieillessement électrique

Il est difficile de distinguer l'effet du champ électrique de celui de la température sur la tenue en service d'une isolation. Toutefois l'effet des décharges partielles sur le papier imprégné est mieux connu. Lorsque les décharges partielles apparaissent dans une isolation en papier imprégné, on les reconnaît par la formation des gaz de décomposition de l'huile et du papier. Ces gaz sont surtout de l'hydrogène, du méthane et des hydrocarbures légers en C_2 et C_3 saturés et non saturés. La décomposition du papier provoque en outre la formation de mono oxyde et dioxyde de carbone. Les quantités de gaz formées lors de la décomposition du papier imprégné, dépendent de la charge

apparente des décharges partielles et de leur localisation. Des résultats expérimentaux montrent que si les décharges partielles sont de faible amplitude, il se forme principalement de l'hydrogène et en plus faibles quantités du méthane et du dioxyde de carbone. Lorsque la décharge est grande il apparait des produits gazeux non saturés comme l'acétylène. En tenant compte de l'ensemble des résultats précédents, l'analyse des gaz produits par une isolation permet d'avoir une idée sur la nature de la contrainte et le type du matériau affecté.

II.11.2. Vieillessement thermique

En absence de l'oxygène, les lois qui régissent le vieillissement thermique d'une isolation en papier imprégné sont assez simples pour permette une estimation de sa durée de vie en fonction de la température susceptible d'être en service. Ces lois ont été établies à partir de l'évolution du facteur de dégradation du papier en fonction de la durée de vieillissement.

Chapitre 3

***Contrainte diélectriques des
matériaux isolants***

III.1. Définition

Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée allant de 10^8 à $10^{16} \Omega m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres. Un isolant est caractérisé par ses propriétés électriques, mécaniques, chimiques et thermiques. Un bon isolant ne devrait pas laisser passer de courant lorsqu'il est soumis à une tension continue. Autrement dit, sa résistance en courant continu doit être infiniment grande. Cependant, en pratique, un courant de fuite très faible circule dans tous les matériaux isolants utilisés en haute tension. Le courant passant à travers un isolant en haute tension continue est également constant et est appelé courant résiduel. En Haute tension alternative, n'importe quel matériau isolant laisserait passer un courant capacitif.

Les isolants sont utilisés pour :

- Assurer une séparation électrique entre des conducteurs portés à des potentiels différents afin de diriger l'écoulement du courant dans les conducteurs désirés, ceci sert à la protection des personnes et des équipements ;
- Supporter les éléments d'un réseau électrique et les isoler les uns par rapport aux autres et par rapport à la terre ;
- Remplir les fonctions de diélectrique dans un condensateur [15].

III.2. Les différents types de matériaux

III.2.1. Les matériaux polaires

Dans ces matériaux, des dipôles existent du fait des différences d'électronégativité des atomes constituant les molécules. Ces dipôles sont, en l'absence de toute excitation, orientés de façon aléatoire à cause de l'agitation thermique. La polarisation macroscopique est par conséquent nulle dans un tel cas. Sous l'effet d'un champ électrique, ces dipôles sont soumis à un couple qui tend à les orienter dans la direction du champ. Les forces qui agissent sur les dipôles et tendant à les orienter sont contrariées par l'agitation thermique. C'est cet effet de l'agitation thermique qui fait que pour ces matériaux la tangente de l'angle de pertes ainsi que la permittivité dépendent fortement de la température [16].

III.2.2. Les matériaux apolaires

Ce sont des matériaux dont les molécules ne peuvent pas être assimilées à des dipôles permanents dès lors que leurs barycentres de charges positives et négatives coïncident parfaitement. Si on les soumet à l'action d'un champ électrique, les barycentres des charges positives et négatives ne vont plus coïncider et chaque atome ou molécule voit son nuage électrique déformé et peut être assimilé à un dipôle.

Les matériaux apolaires sont caractérisés par un facteur de dissipation diélectrique faible variant peu en fonction de la fréquence et de la température puisque les électrons sont peu sensibles à la température et que la fréquence propre des oscillateurs harmoniques qu'ils constituent se trouve dans la bande des radiations lumineuses [16].

III.3 Les différents types de polarisation

Lorsqu'un diélectrique est soumis à un champ électrique, sa polarisation sera le résultat de diverses contributions. Ces différentes contributions sont dues à des polarisations dites électronique, ionique, par orientation ou inter-faciale. Les représentations schématiques de ces différents types de polarisation sont rassemblées sur la figure III.1.

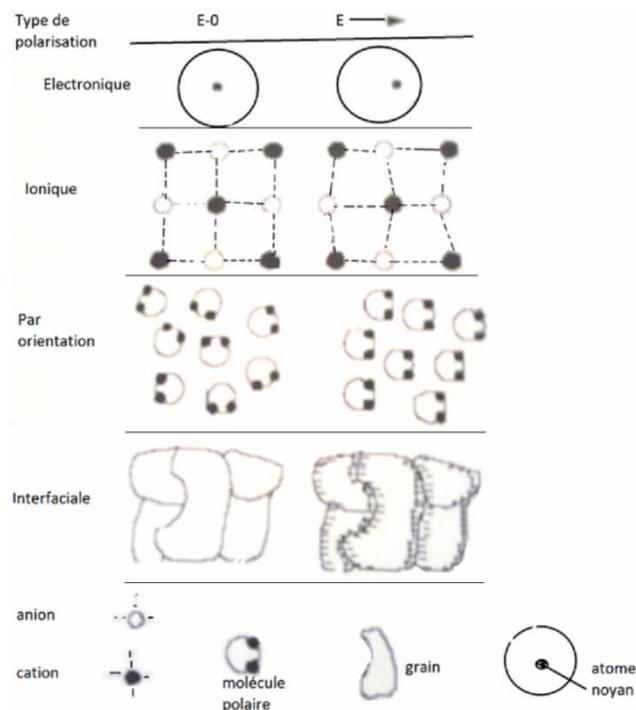


Figure III.1. : Illustration des différents mécanismes de polarisation.

Dans un diélectrique polarisé, on peut penser également qu'il existe un champ électrique local E_l . Ce champ induit, au niveau de chaque molécule, un moment dipolaire :

$$\vec{P} = \alpha \vec{E}_l \quad (\text{III. 1})$$

Où la constante α représente la polarisabilité de la molécule.

La polarisation est reliée au nombre de molécules N par unité de volume par la relation :

$$\vec{P} = N \vec{p} = N \alpha \vec{E}_l \quad (\text{III. 2})$$

Ainsi, soumis sous l'action d'un champ électrique, les matériaux vont se polariser selon les mécanismes suivants :

III.3.1 Polarisation électronique

Du fait que toute matière est constituée d'atomes et d'électrons gravitant autour, ce type de polarisation va se manifester avec toute substance soumise à un champ électrique. Elle résulte du déplacement des orbites électroniques externes par rapport au noyau de l'atome. La polarisation électronique n'est pas sensible aux fréquences utilisées dans l'électrotechnique, dès lors que ce phénomène est rapide en s'établissant en des temps de l'ordre de 10^{-15} secondes [8]. La polarisation électronique est également élastique et les dipôles induits disparaissent quand le champ est supprimé.

La polarisation électronique est régie par la formule suivante :

$$\vec{P}_e = N \alpha_e \vec{E}_l \quad (\text{III. 3})$$

α_e : facteur de polarisation électronique, constante dépendant du rayon de l'atome r tel que :

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_0 r^3$$

N : le nombre d'atomes par unité de volume ;

\vec{E}_l :

le champ local.

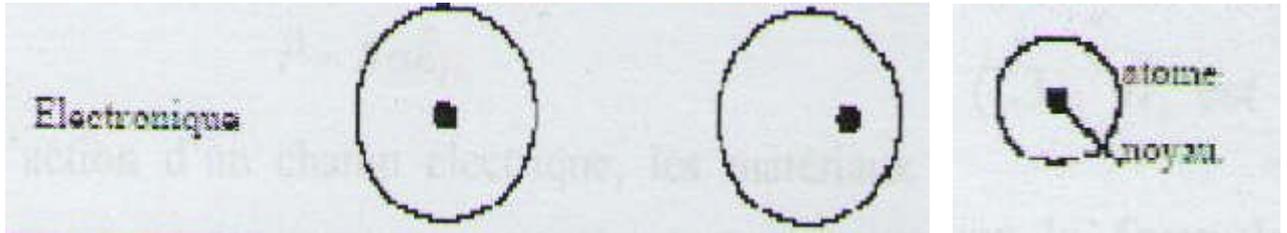


Figure III.2. : Polarisation électronique

III.3.2 Polarisation ionique

La polarisation ionique résulte du déplacement relatif des ions dans les structures cristallines présentant des liaisons ioniques. Les électrons de valence parcourent les orbites partagées avec d'autres atomes. Dans ce cas, la polarisation se manifeste sous la forme d'un déplacement des atomes de charge positive dans la direction du champ électrique et du déplacement des atomes de charge négative en sens contraire. Cette polarisation est caractérisée par des constantes de temps de l'ordre de 10^{-13} à 10^{-12} secondes [17].

La polarisation ionique est décrite par l'équation suivante :

$$\vec{P}_i = N \alpha_i \vec{E}_l \quad (\text{III. 4})$$

Où :

α_i : facteur de polarisation ionique.

La polarisation ionique, appelée aussi polarisation par déformation, n'est pas affectée par la température. Dans le domaine des fréquences industrielles, la polarisation ionique ne peut donner lieu à des pertes diélectriques appréciables, ce qui est d'autant plus vrai pour la polarisation électronique citée plus haut.

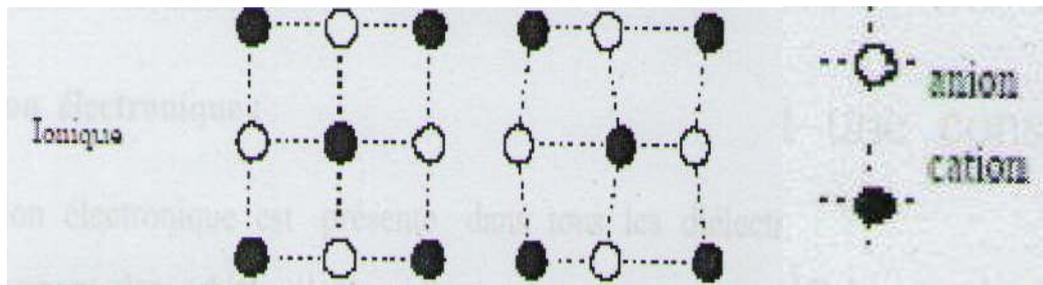


Figure III.3. : Polarisation ionique

III.3.3 Polarisation par orientation et polarisation inter faciale

La polarisation par orientation (ou dipolaire) et la polarisation inter faciale (ou polarisation par charge spatiale) sont caractérisées par des constantes de temps assez élevées pour leur établissement et pour leur disparition.

La polarisation dipolaire ou d'orientation est liée à l'orientation des molécules dipolaires sous l'action du champ électrique ; cette dernière dépend de la température. Elle apparaît dans les liquides, les gaz et les corps amorphes très visqueux.

La polarisation inter faciale résulte des accumulations locales dues à l'ensemble de phénomènes de migration sous l'effet d'un champ électrique. Elles ont donc tendance à se concentrer autour des défauts tels que les impuretés, les lacunes, les joints de grains,...etc [18].

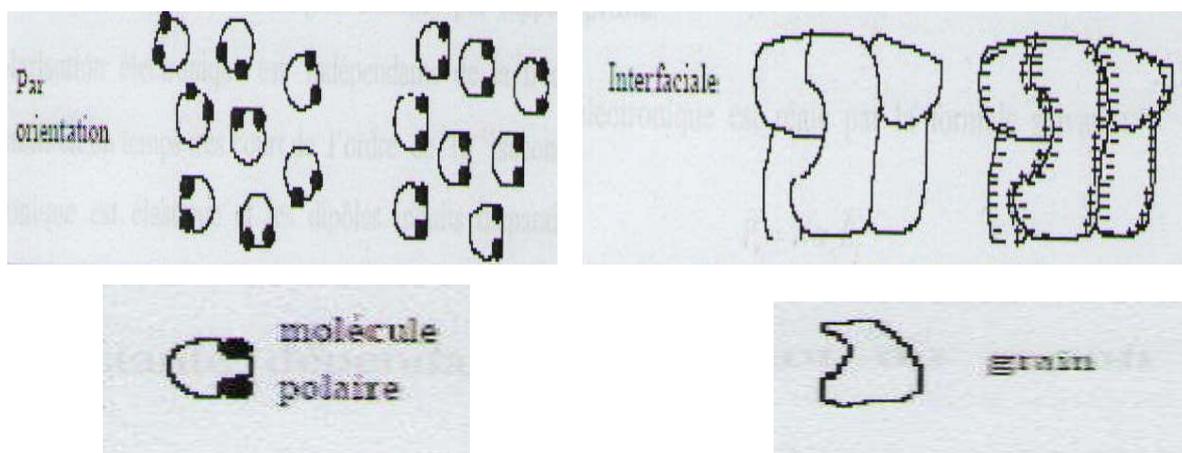


Figure III.4. : Polarisation par orientation et polarisation inter faciale.

III.4. Mécanismes de claquage dans les isolants solides

On appelle claquage, la perte subite de la propriété isolante d'un diélectrique soumis à un champ électrique.

Le mécanisme selon lequel se produit la rupture diélectrique dans un isolant solide dépend du temps d'application de la tension.

III.4.1 Claquage diélectrique intrinsèque

Quand la contrainte diélectrique appliquée à l'isolant solide atteint, en un temps très court, une limite supérieure appelée contrainte diélectrique intrinsèque, on a alors une rupture intrinsèque. Cette dernière a lieu pour des temps d'application de la tension de l'ordre de 10^{-8} s, c'est pourquoi elle est considérée comme étant de nature électronique.

Les contraintes électriques entraînant la rupture diélectrique intrinsèque sont supérieures à 10^6 V/cm. La contrainte intrinsèque est considérée atteinte lorsque les électrons du solide acquièrent suffisamment d'énergie de la part du champ électrique appliqué pour traverser la barrière d'énergie et passer ainsi de la bande de valence à la bande de conduction.

III.4.2. Claquage électromécanique

Des substances pouvant supporté des déformations appréciables sans rupture peuvent se rompre quand les forces de compression électrostatiques appliquées sur le matériau dépassent sa rigidité mécanique. Ces forces de compression apparaissent par attraction entre les charges électriques qui apparaissent quand la tension est appliquée.

III.4.3. Claquage par avalanche

Dans certaines conditions contrôlées dans les champs uniformes seulement avec les électrodes incorporées dans l'isolant, le claquage peut être accompli après le passage d'une avalanche simple, semblable à l'avalanche dans les gaz. Quelques fois le libre parcours moyen peut être assez long pour que l'énergie cinétique acquise excède l'énergie d'ionisation qui se termine par la libération d'un électron. Le processus se répète et peut mener à la formation d'une avalanche électronique semblable à celle qui se manifeste dans les gaz. Le claquage se produit si l'avalanche dépasse une certaine taille critique. Le concept est semblable à la théorie de claquage de streamer développée par Reather, meek et loeb pour les gaz.

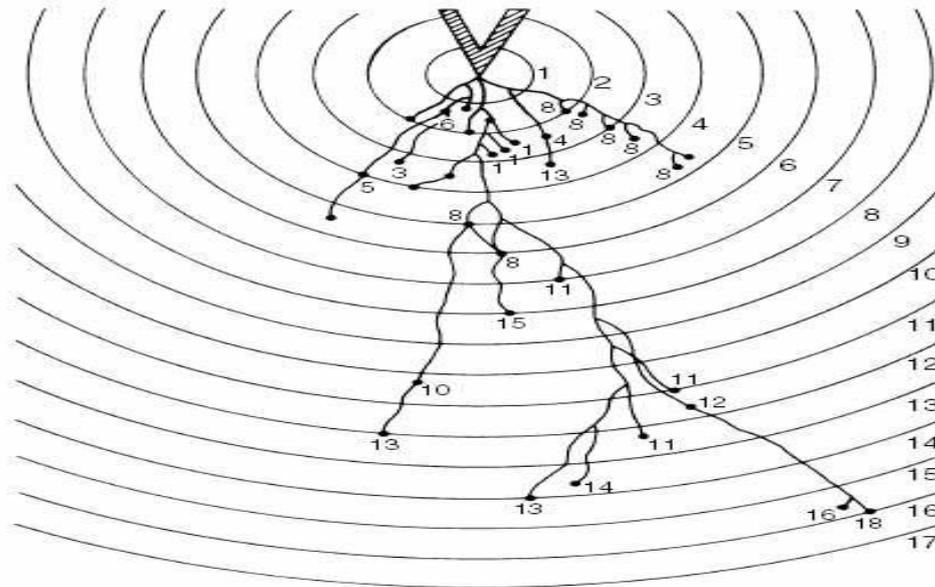
III.4.4 Claquage thermique

Les pertes diélectriques de polarisation et de conduction provoquent un dégagement de chaleur dans l'isolant. Tant que la quantité de chaleur ainsi produite est supérieure à celle que peut évacuer l'isolant, la température augmente. Avec elle, la conductivité augmente entraînant un accroissement de la chaleur produite par effet Joule. La chaleur dégagée par les pertes diélectriques de polarisation augmente, ou au contraire diminue selon que l'on se trouve à gauche ou à droite du pic du facteur de pertes diélectriques $\text{tg}\delta$. Si l'amélioration des conditions de refroidissement, résultant de l'élévation de température de l'isolation par rapport au milieu ambiant, ne vient pas arrêter l'augmentation de la température, ou si la température à laquelle se produit cet arrêt est trop élevée, un claquage que l'on appelle claquage thermique se produit. Le fait que la rigidité diélectrique décroît quand la température augmente favorise l'appariation du claquage thermique. Par fois celui-ci est précédé d'une décomposition chimique ou la fusion de l'isolant [18].

III.4.5. Claquage par arborescences

En général, le claquage des isolants solides n'est pas accompli par la formation d'un seul canal de décharge, mais prend une forme en arbre comme montré sur la figure

5



III.

suivantes, ce qui peut être aisément démontré dans un laboratoire en appliquant une tension impulsionnelle entre les électrodes pointe-plan avec la pointe introduite dans un isolant transparent tel le plexiglas. Le temps requis pour ce type de décharge sous une tension alternative varie de quelques secondes à quelques minutes [15].

Figure III.5. : Claquage d'un isolant solide (plexiglas) entre deux électrodes pointe-plan.

1. Influence de plusieurs paramètres sur la rigidité diélectrique

De nombreux phénomènes sont susceptibles d'altérer un diélectrique au cours du vieillissement provoquant en particulier la diminution de sa rigidité diélectrique. La tension appliquée influe en premier suivant sa fréquence et sa forme d'onde. La rigidité diélectrique diminue quand la fréquence augmente, par ailleurs elle est plus élevée pour les ondes de chocs. On constate expérimentalement que l'augmentation de la vitesse d'application de la tension augmente la tension de claquage. La température, dans la très large majorité des cas, a pour effet, lorsqu'on l'augmente, de réduire la rigidité diélectrique. Cela a différentes origines, telles que l'augmentation de la conduction, l'obtention d'un claquage thermique ou un claquage électromécanique [19].

Chapitre 4

Etude expérimentale

IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale réalisée au laboratoire de physique de la firme Electro-Industries d'Azazga. Les essais ont été réalisés dans le but d'étudier l'effet de la température sur le papier utilisé dans les transformateurs de puissance. L'étude a été menée sous différentes températures et plusieurs niveaux de tension. Le papier étudié a une épaisseur de 0.5 mm. Nous avons appliqué aux différents échantillons une tension alternative de fréquence 50 Hz. Les tensions appliquées sont : 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 et 15 kV.

IV.2. Préparation des échantillons de papier

Les éprouvettes ont été découpées en carrés de 110 mm de côté (figure IV.1) puis laissées à l'air libre du laboratoire à température ambiante de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ et de $50 \pm 5\%$ d'humidité relative pendant 24h conformément à la norme 60554-2 2010.



Figure IV.1. Eprouvettes de papier presspahn à l'air libre du laboratoire

IV.3. Séchage des échantillons

Après avoir conditionné les éprouvettes, un échantillon a été pesé à l'aide d'un dispositif pour les essais de perte de masse. Chaque éprouvette a une masse de 7,12 g. Le séchage a été effectué dans une étuve de séchage (figure IV.2) à $105 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 2h selon la norme CEI 60 554-2 2010.



Figure IV.2. Etuve de séchage.

Après séchage, les échantillons ont été pesés une nouvelle fois et chacun a une masse de 6,48g soit une différence de masse de 0,64g.

Les éprouvettes ont été conditionnées dans un dessiccateur (Figure IV.3) contenant du silicagel régénéré à neuf conformément à la norme CEI 60 554-2 2010 pendant 2h.

Les éprouvettes ont été mises de nouveau dans l'étuve de séchage pendant 20 mn environ dans le but de permettre une bonne absorption d'huile d'imprégnation.

Les éprouvettes ont été ensuite imprégnées dans de l'huile minérale destinée au remplissage des transformateurs dans une étuve sous vide (figure IV.4) sous une température de 100 °C. Il est à noter que l'huile d'imprégnation a subi un traitement selon la norme CEI 60475. Sa tension de claquage mesurée selon la norme CEI 60156 est de 74 kV.



Figure IV.3. Dessiccateur employé pour le conditionnement des éprouvettes.



Figure IV.4. Etuve d'imprégnation.

IV.4. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'une source de tension alternative et d'une étuve de séchage dans laquelle se trouve la cellule d'essai. C'est grâce à cette étuve

que nous faisons varier la température pendant nos essais. L'ensemble du dispositif expérimental est représenté sur la figure IV.5.



Figure IV.5. Représentation globale du dispositif expérimental.

La cellule d'essai est constituée d'un système d'électrodes pointe plan en cuivre plongé dans de l'huile pour transformateurs. Le plan a un diamètre de 6cm. La pointe est de forme conique. L'échantillon est placé entre la pointe et le plan tel que représenté sur la figure IV.6.

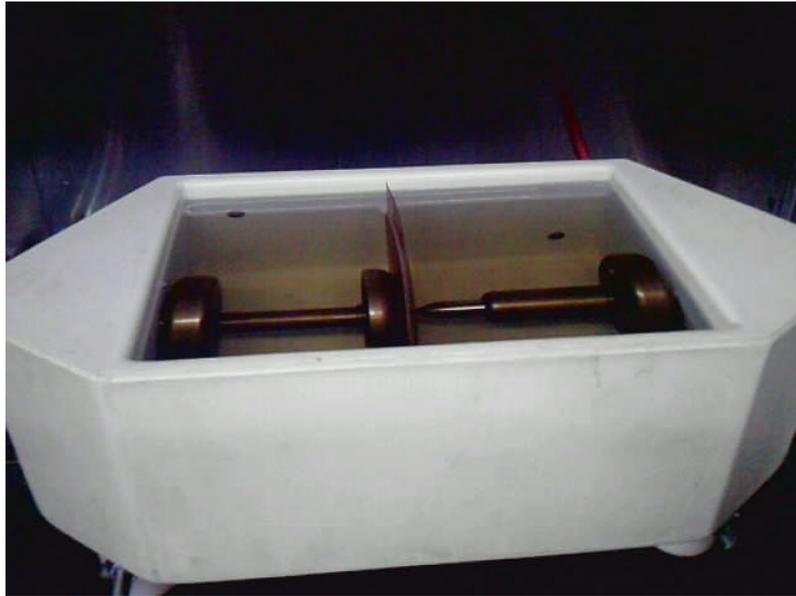


Figure IV.6. Cellule utilisé pour les essais.

La cellule d'essais se trouve dans l'étuve de séchage pendant tous nos essais, comme représentée sur la figure IV.7.

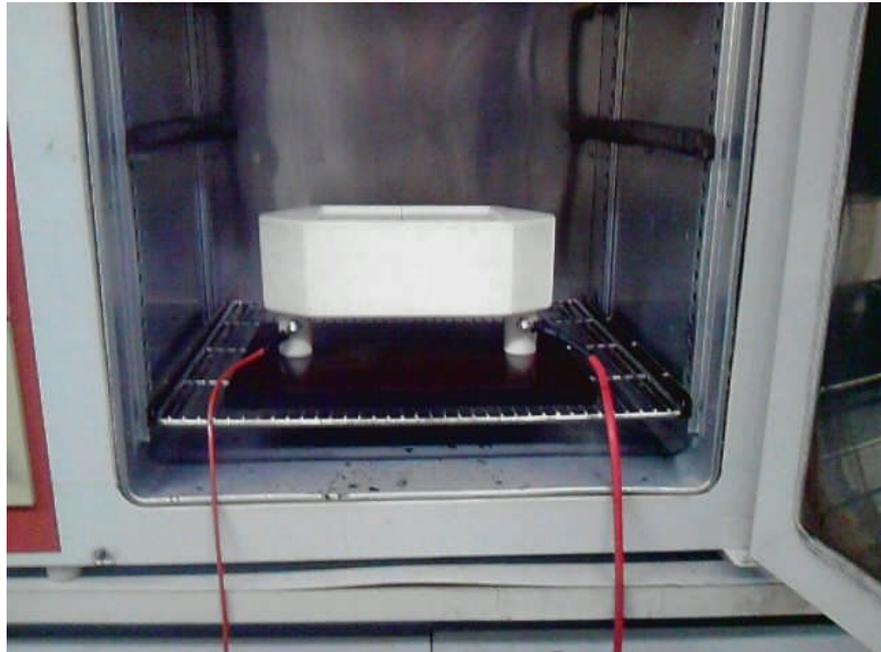


Figure IV.7. Cellule d'essai à l'intérieur de l'étuve de séchage.

La source de tension alternative nous permet de fixer le niveau de tension (en kV) et de relever le courant débité (en mA). Cette source est représentée sur la figure IV.8.



Figure IV.8. Source de tension alternative.

IV.5. Déroulement des essais

Une fois la température du système huile/papier fixée, nous faisons varier la tension de 1 à 15 kV et nous relevons pour chaque niveau de tension, la valeur du courant. Dans le but de vérifier la reproductibilité de nos essais, nous avons effectué trois essais pour chaque température. La température est mesurée avec un thermomètre muni d'une sonde comme représenté sur la figure IV.9. L'échantillon de papier est déplacé autour de la pointe en vue d'avoir trois positions différentes.

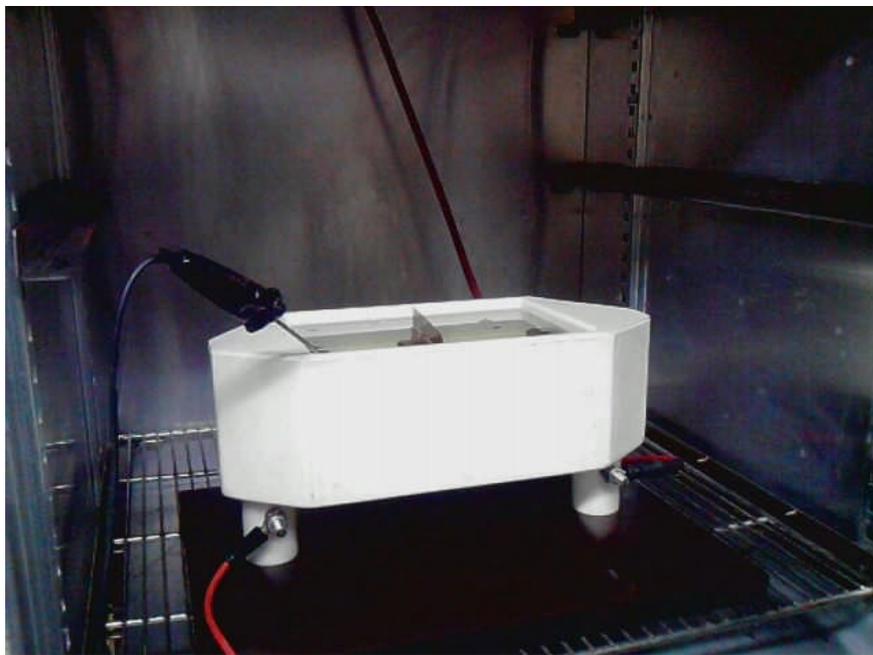


Figure IV.9. Système de mesure de la température du système papier/huile.

IV.6. Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux de nos divers essais sont représentés sur les figures qui vont suivre. Trois séries d'essais sont réalisées. Les essais de la première série sont effectués avec la pointe au centre de l'échantillon. Les séries 2 et 3 sont réalisées avec la pointe se trouvant sur le côté du carré constituant l'échantillon.

IV.6.1. Caractéristiques courant-tension

IV.6.1.1. Température : 23.6 °C

Les figures IV.10 à IV.12 représentent les courbes du courant traversant l'échantillon en fonction de la tension pour une température de 23.6 °C pour trois éprouvettes.

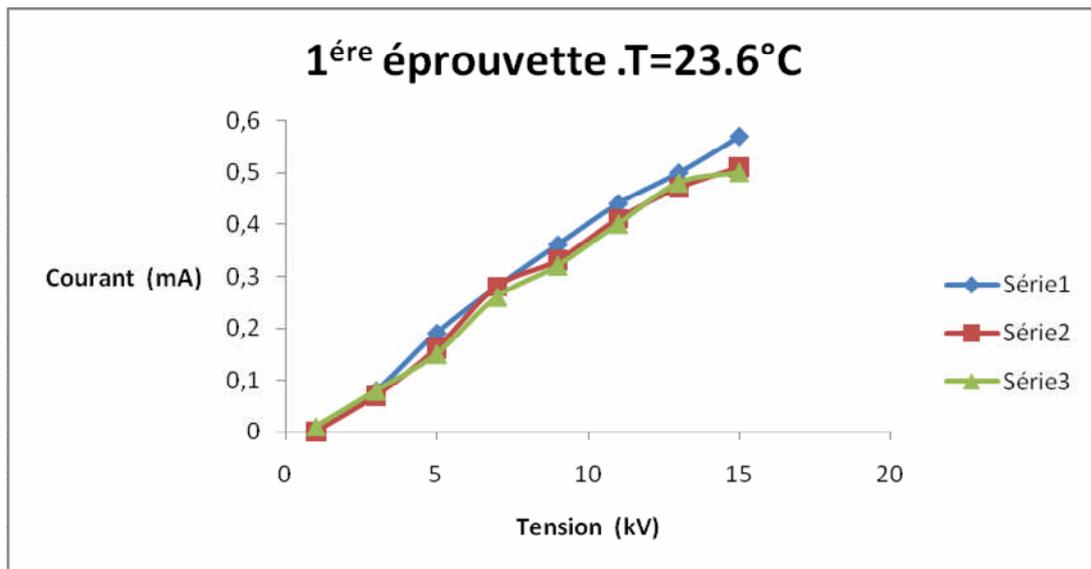


Figure IV.10. Caractéristiques courant-tension pour une température de 23.6 ± 3 °C.
(1^{ère} éprouvette)

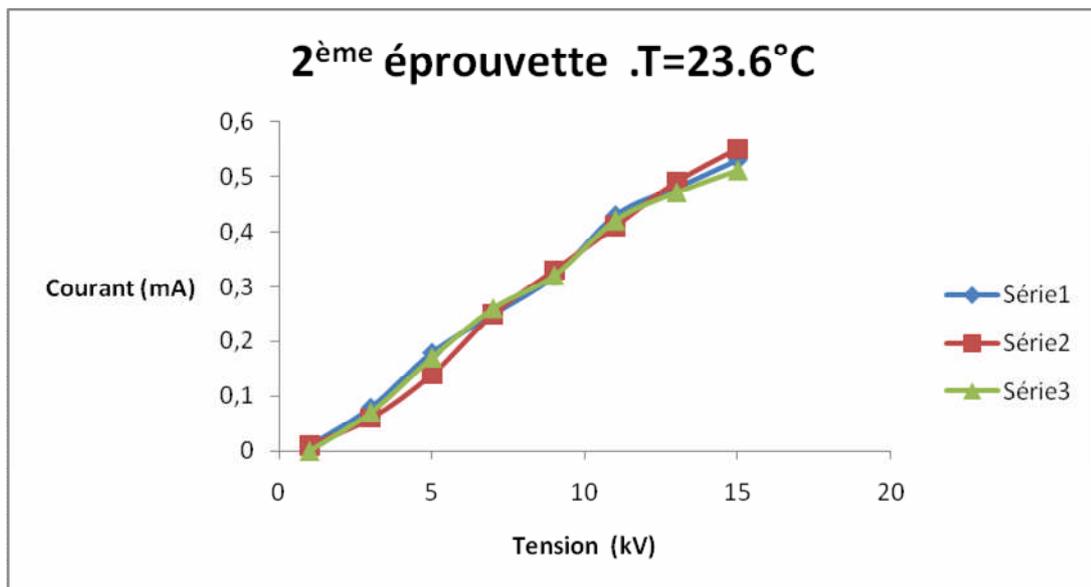


Figure IV.11. Caractéristiques courant-tension pour une température de 23.6 ± 3 °C.
(2^{ème} éprouvette).

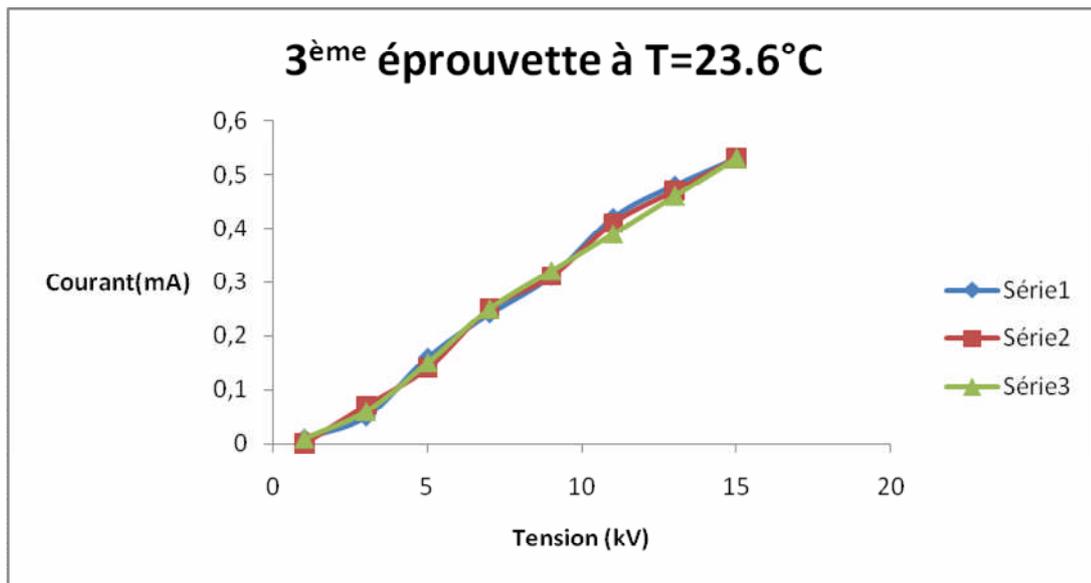


Figure IV.12. Caractéristiques courant-tension pour une température de 23.6 ± 3 °C.
(3^{ème} éprouvette).

Nous remarquons que quelle que soit la position de la pointe sur l'échantillon de papier, les courants sont du même ordre de grandeur.

IV.6.1.2. Température : 50 °C

Les résultats expérimentaux pour une température de 50°C sont représentés sur les figures IV.13 à IV.15.

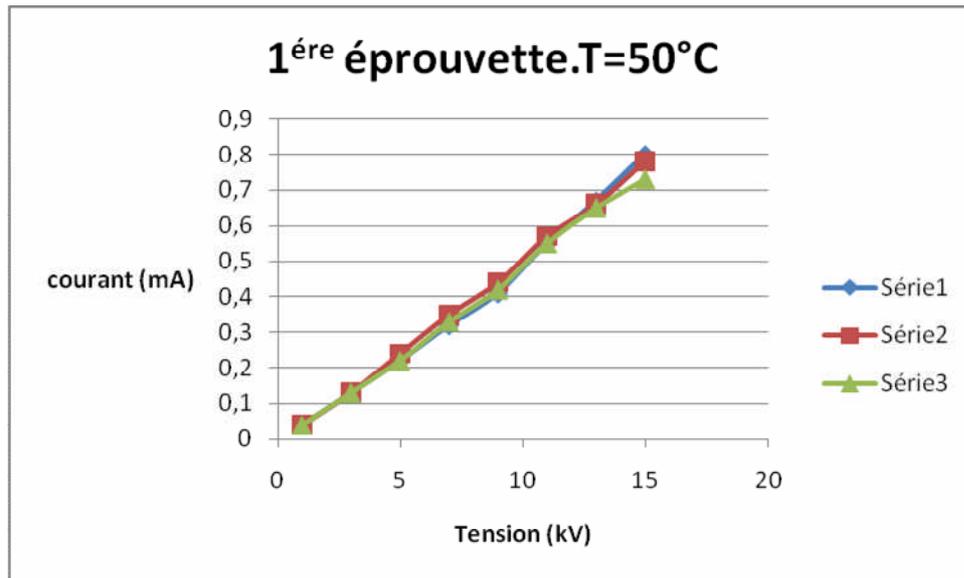


Figure IV.13. Caractéristiques courant-tension pour une température de 50 ± 3 °C.
(1^{ère} éprouvette).

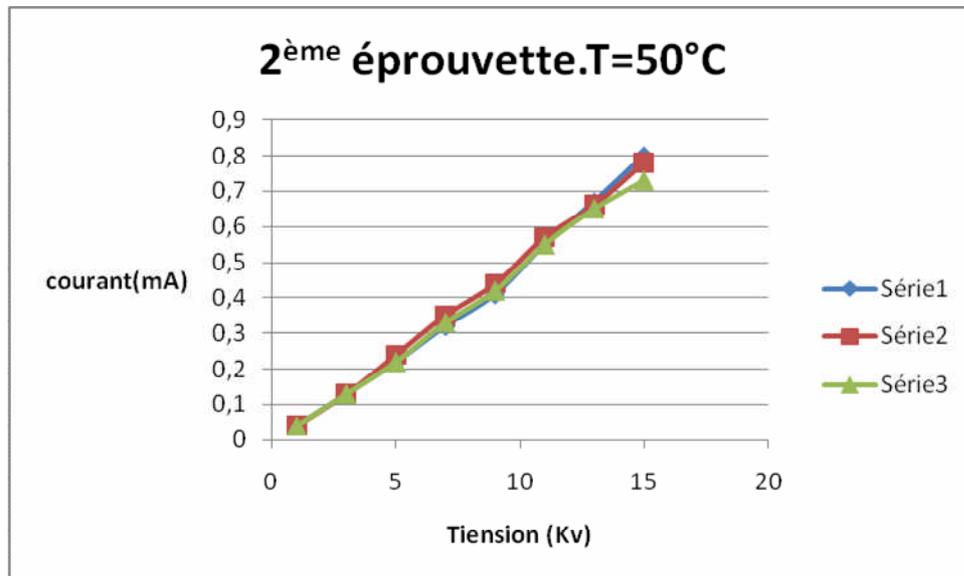


Figure IV.14. Caractéristiques courant-tension pour une température de 50 ± 3 °C.
(2^{ème} éprouvette).

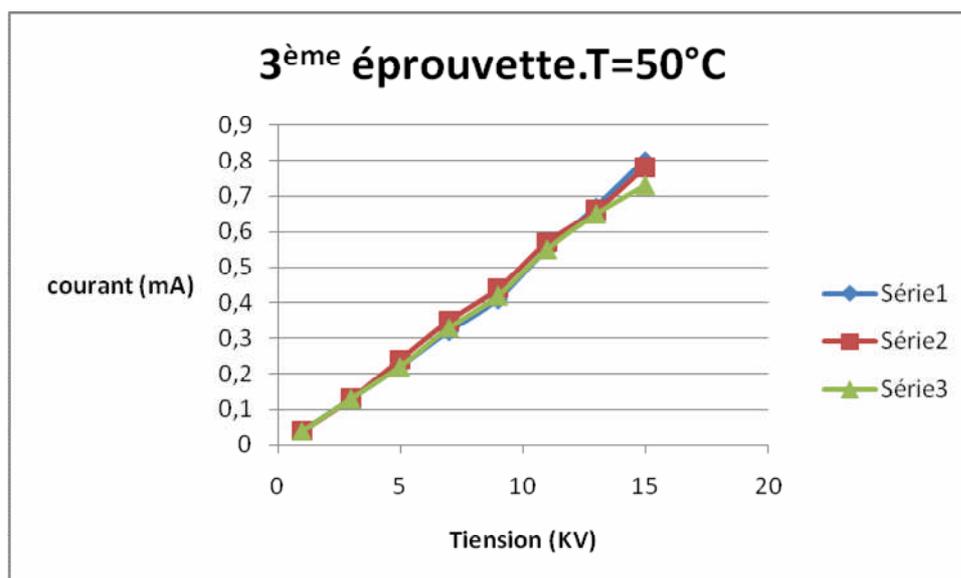


Figure IV.15. Caractéristiques courant-tension pour une température de 50 ± 3 °C.

(3^{ème} éprouvette).

IV.6.1.3. Température : 60 °C

Les résultats expérimentaux pour une température de 60°C sont représentés sur les figures IV.16 à IV.18.

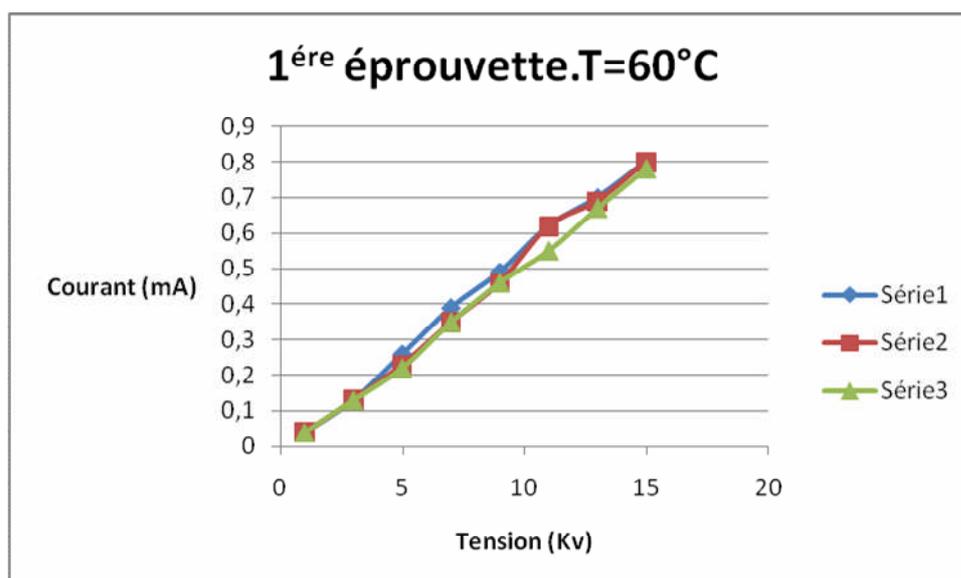


Figure IV.16. Caractéristiques courant-tension pour une température de 60 ± 3 °C.

(1^{ère} éprouvette).

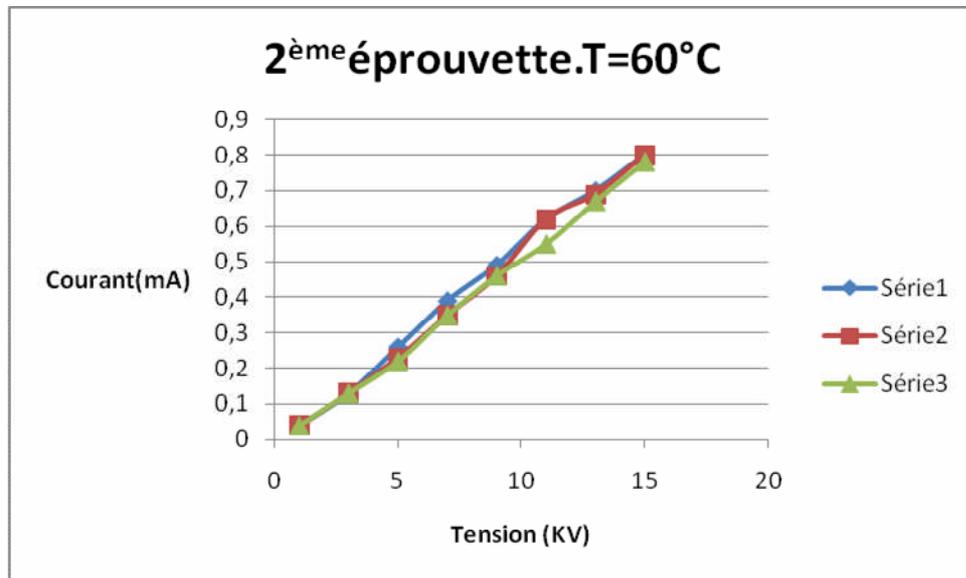


Figure IV.17. Caractéristiques courant-tension pour une température de 60 ± 3 °C.

(2^{ème} éprouvette).

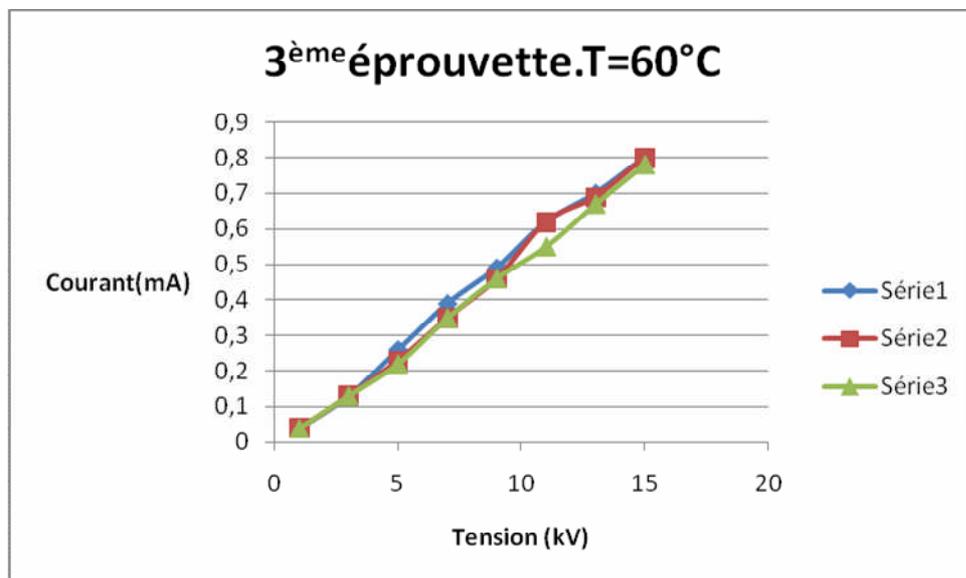


Figure IV.18. Caractéristiques courant-tension pour une température de 60 ± 3 °C.

(3^{ème} éprouvette).

IV.6.1.4. Température : 70 °C

Les résultats expérimentaux pour une température de 70°C sont représentés sur les figures IV.19 à IV.21.

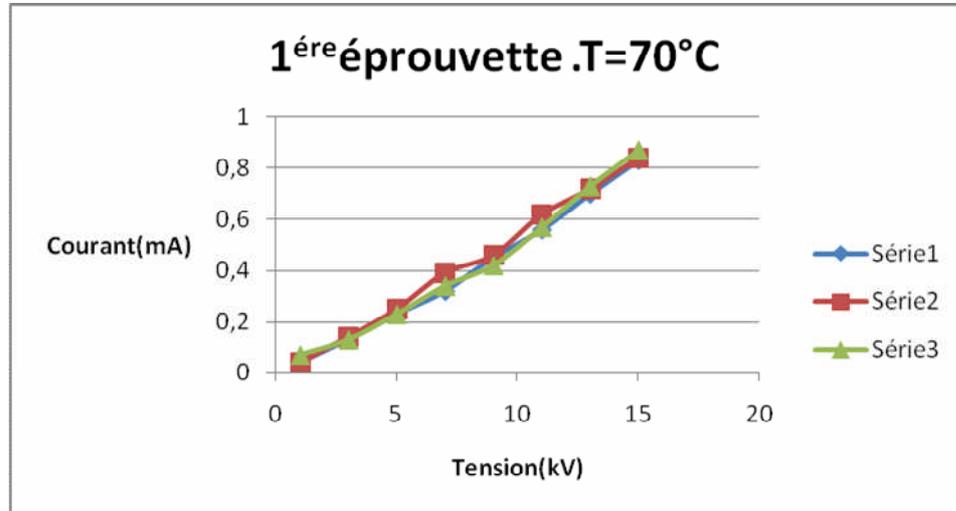


Figure IV.19. Caractéristiques courant-tension pour une température de $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
(1^{ère} éprouvette).

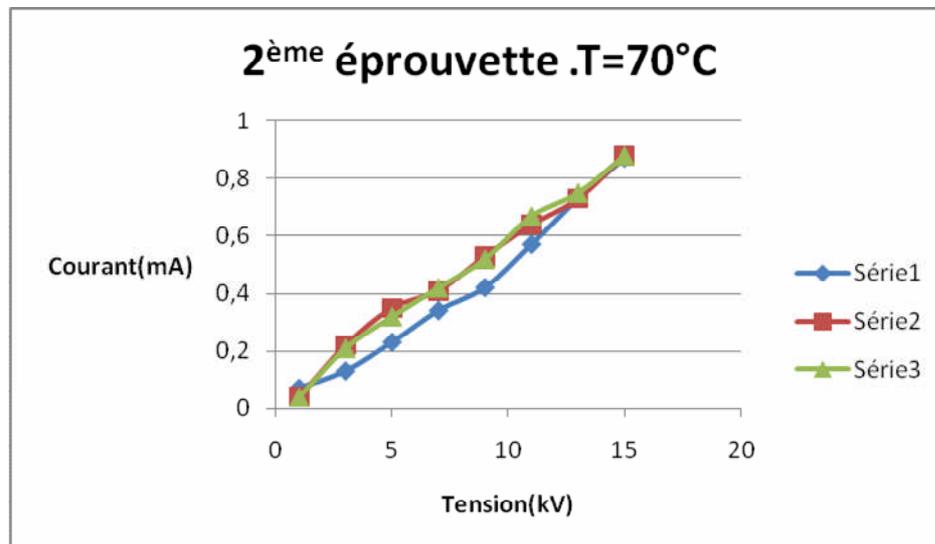


Figure IV.20. Caractéristiques courant-tension pour une température de $70 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
(2^{ème} éprouvette).

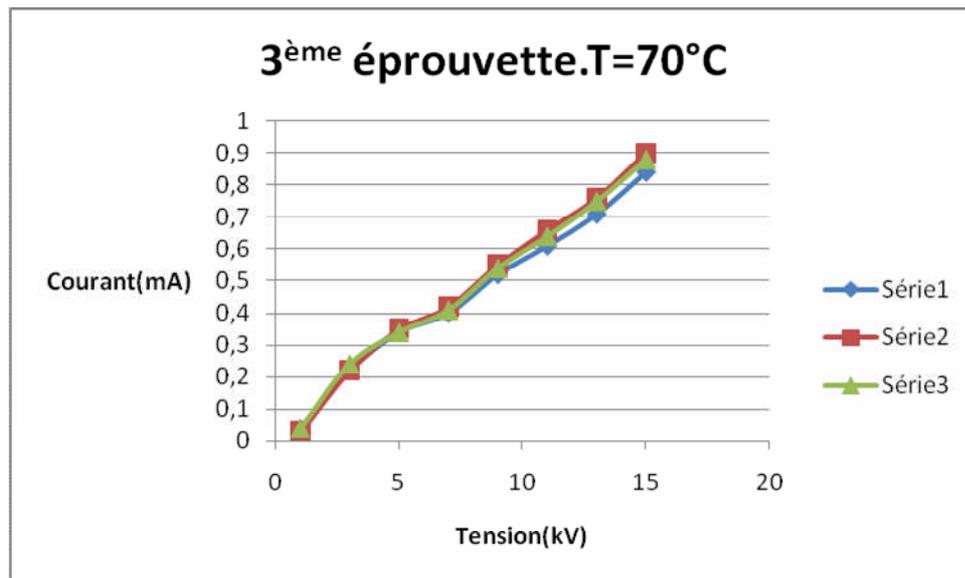


Figure IV.21. Caractéristiques courant-tension pour une température de 70 ± 3 °C.
(3^{ème} éprouvette).

IV.6.1.5. Température : 80 °C

Les résultats expérimentaux pour une température de 80°C sont représentés sur les figures IV.22 à IV.24.

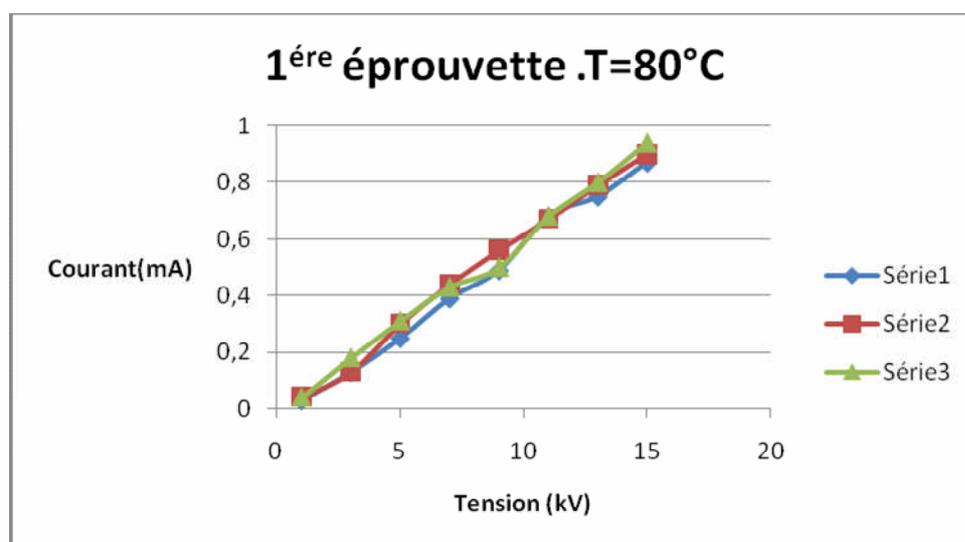


Figure IV.22. Caractéristiques courant-tension pour une température de 80 ± 3 °C.

(1^{ère} éprouvette).

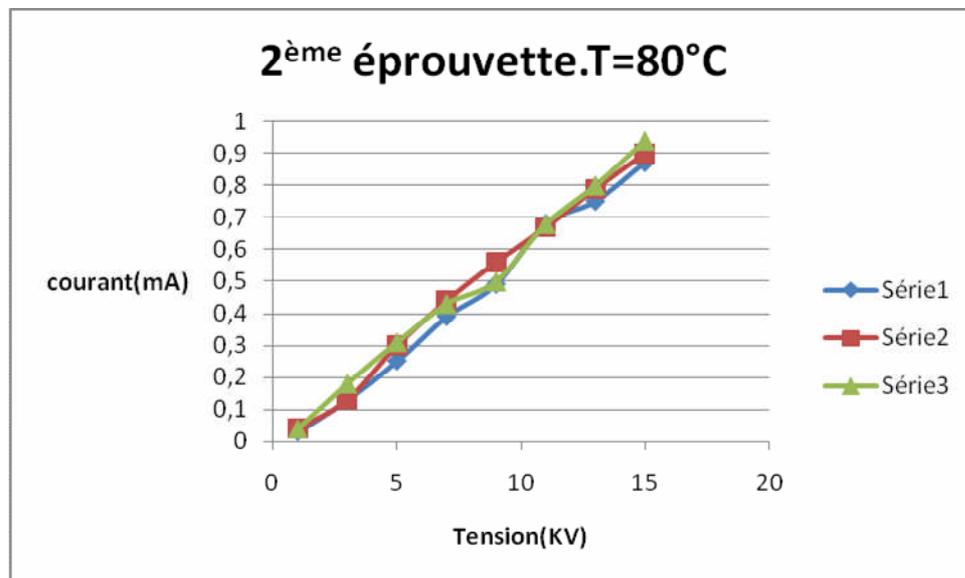


Figure IV.23. Caractéristiques courant-tension pour une température de 80 ± 3 °C.

(2^{ème} éprouvette).

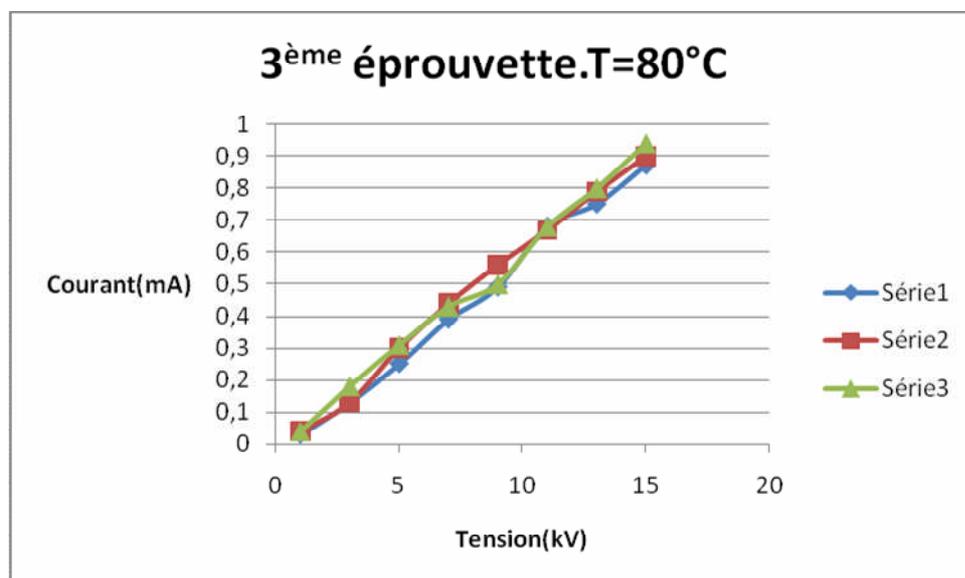


Figure IV.24. Caractéristiques courant-tension pour une température de 80 ± 3 °C.

(3^{ème} éprouvette).

IV.6.1.6. Température : 90 °C

Les résultats expérimentaux pour une température de 90°C sont représentés sur les figures IV.25.à IV.27.

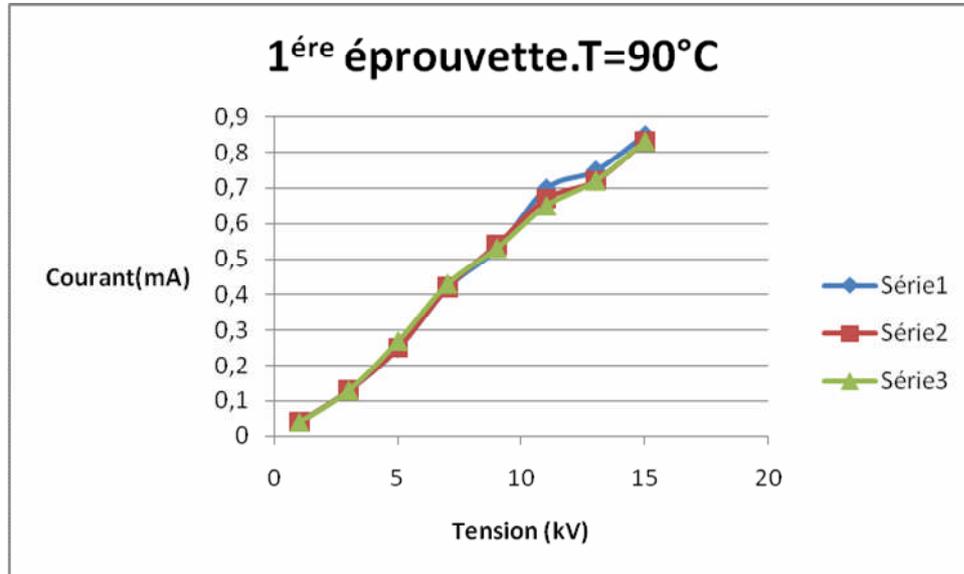


Figure IV.25. Caractéristiques courant-tension pour une température de $90 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
(1^{ère} éprouvette).

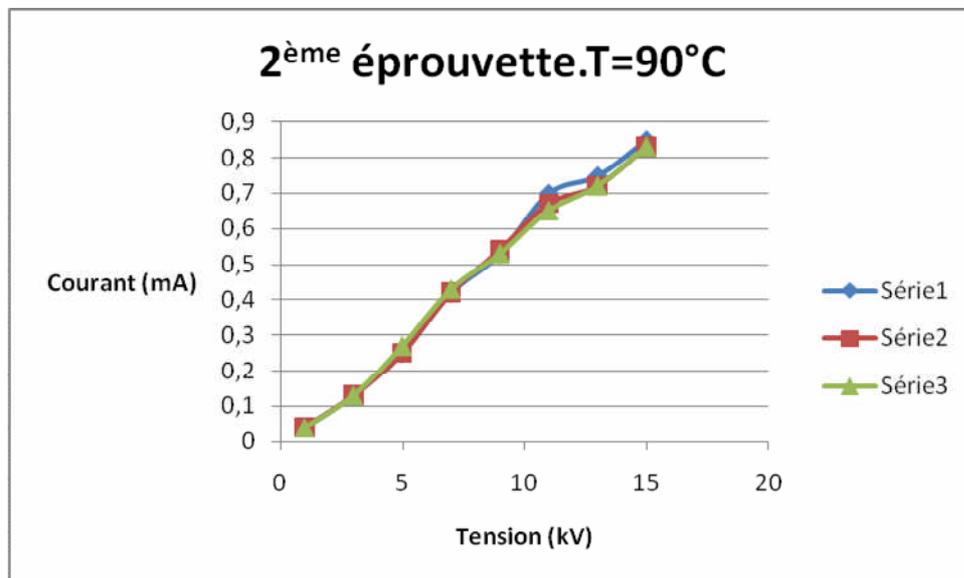


Figure IV.26. Caractéristiques courant-tension pour une température de $90 \pm 3^{\circ}\text{C}$.
(2^{ème} éprouvette).

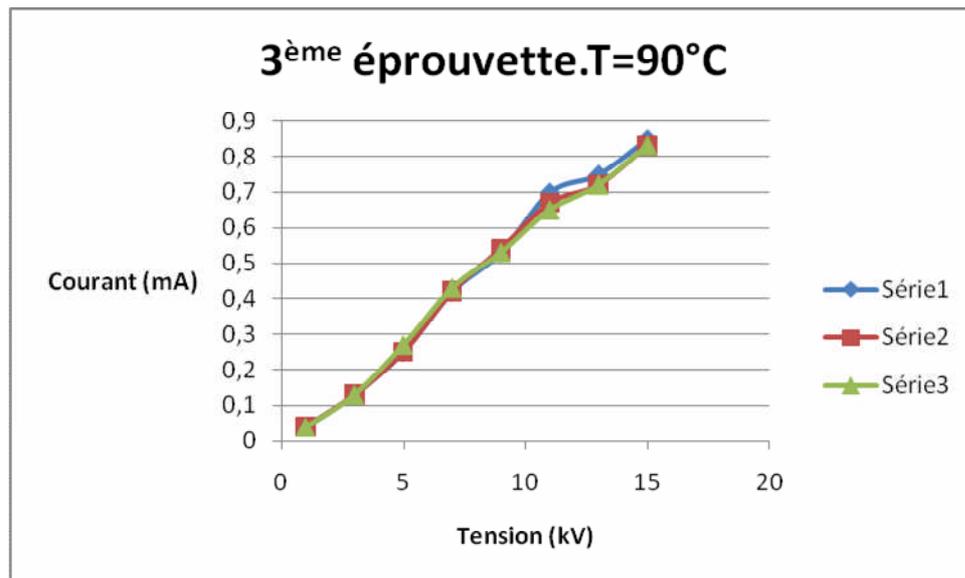


Figure IV.27. Caractéristiques courant-tension pour une température de 90 ± 3 °C.
(3^{ème} éprouvette).

IV.6.1.7. Température : 95 °C

Les résultats expérimentaux pour une température de 95°C sont représentés sur les figures IV.28 à IV.30.

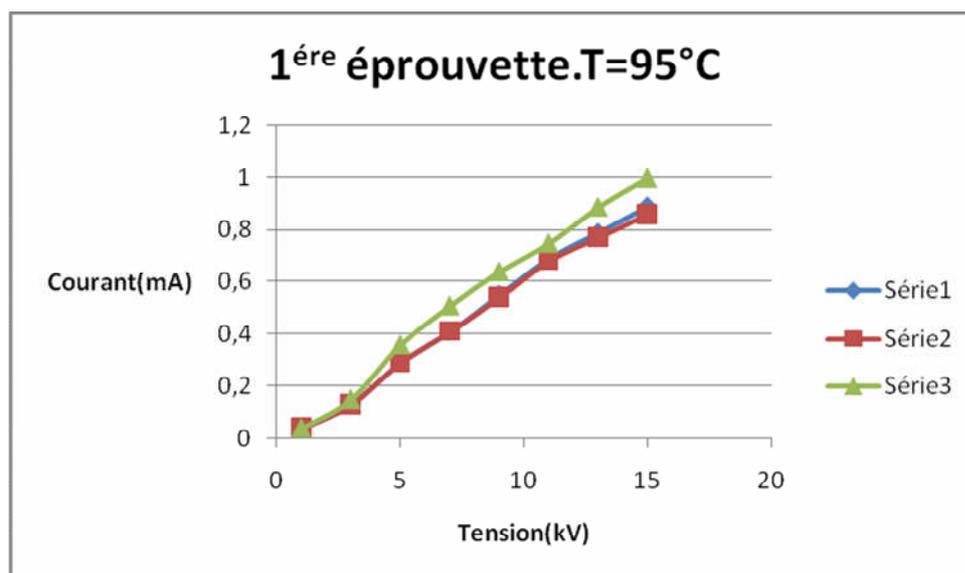


Figure IV.28. Caractéristiques courant-tension pour une température de 95 ± 3 °C.

(1^{ère} éprouvette).

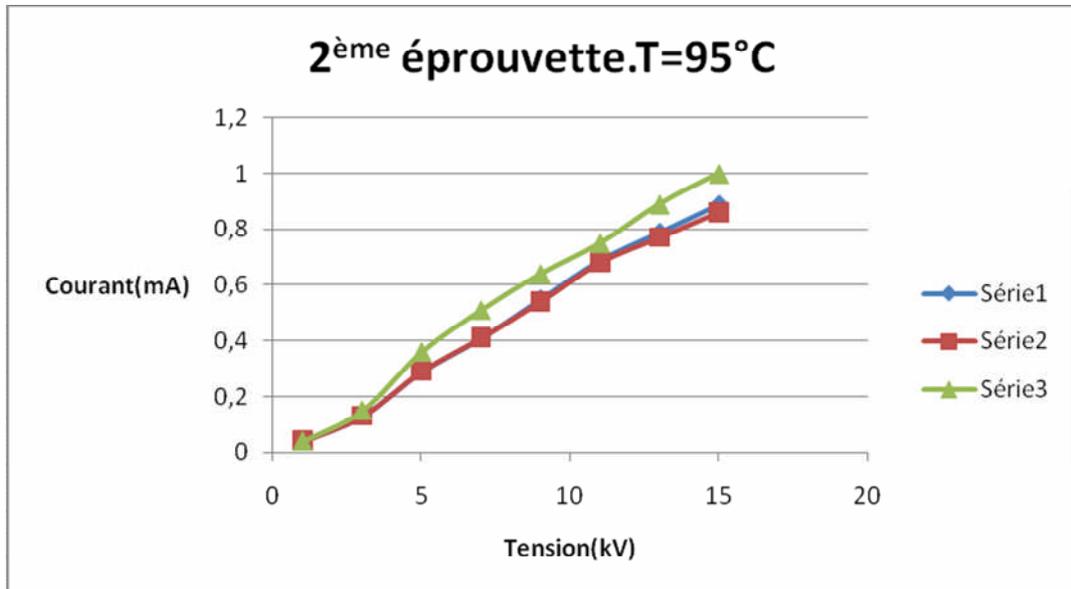


Figure IV.29. Caractéristiques courant-tension pour une température de 95 ± 3 °C.

(2^{ème} éprouvette).

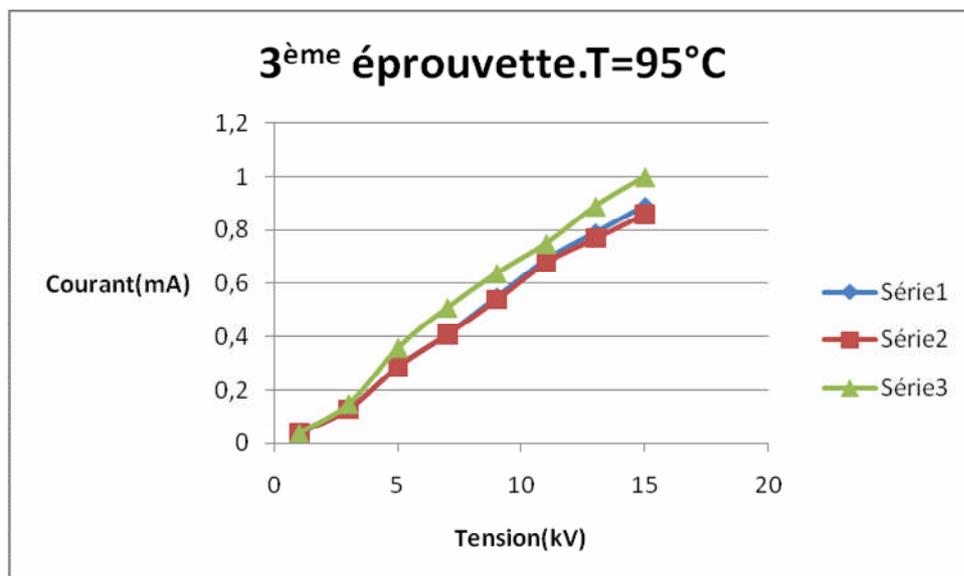


Figure IV.30. Caractéristiques courant-tension pour une température de 95 ± 3 °C.

(3^{ème} éprouvette).

IV.6.2. Effet de la température

Pour bien apprécier l'effet de la température sur le comportement du complexe huile/papier, nous avons tracé les courbes des courants traversant les différents échantillons en fonction de la température pour les niveaux de tension appliqués. Ces courbes sont représentées sur les figures IV.31 à IV.38.

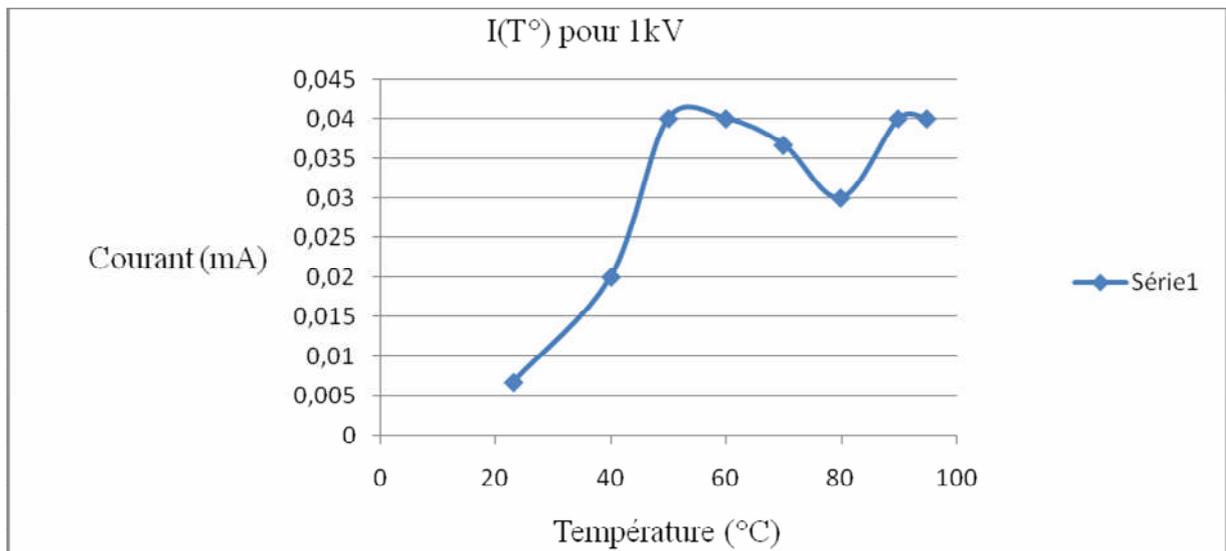


Figure IV.31. Courant en fonction de la température pour une tension de 1 kV.

La caractéristique courant-température pour la tension de 1 kV nous montre une augmentation de la valeur du courant traversant les différents échantillons de 0.0067mA à 0.04 mA dans l'intervalle 23°C à 60°C puis une diminution jusqu'à 80°C qui correspond à un courant de 0.03mA, au delà de 80°C le courant augmente à nouveau jusqu'à la valeur de 0.04 mA.

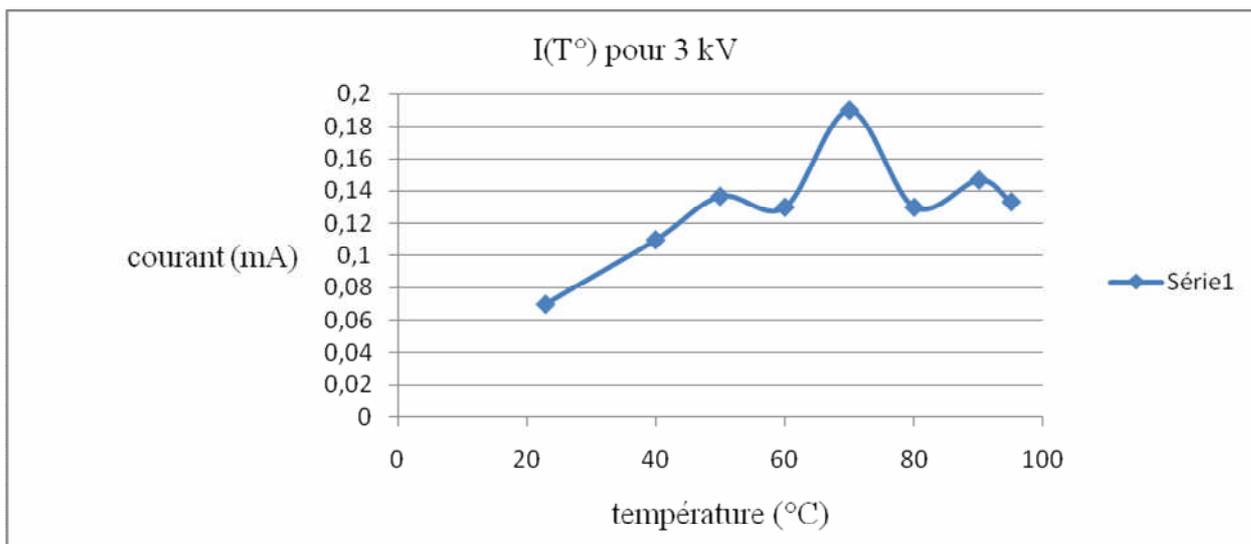


Figure IV.32. Courant en fonction de la température pour une tension de 3 kV.

Pour une tension de 3kV, le courant traversant les échantillons augmente de 0.07 mA jusqu'à 0.19 mA dans la plage de variation de température allant de 23°C à 50°C puis une diminution jusqu'à 80°C. une légère augmentation du courant apparaît entre 80 et 90°C.

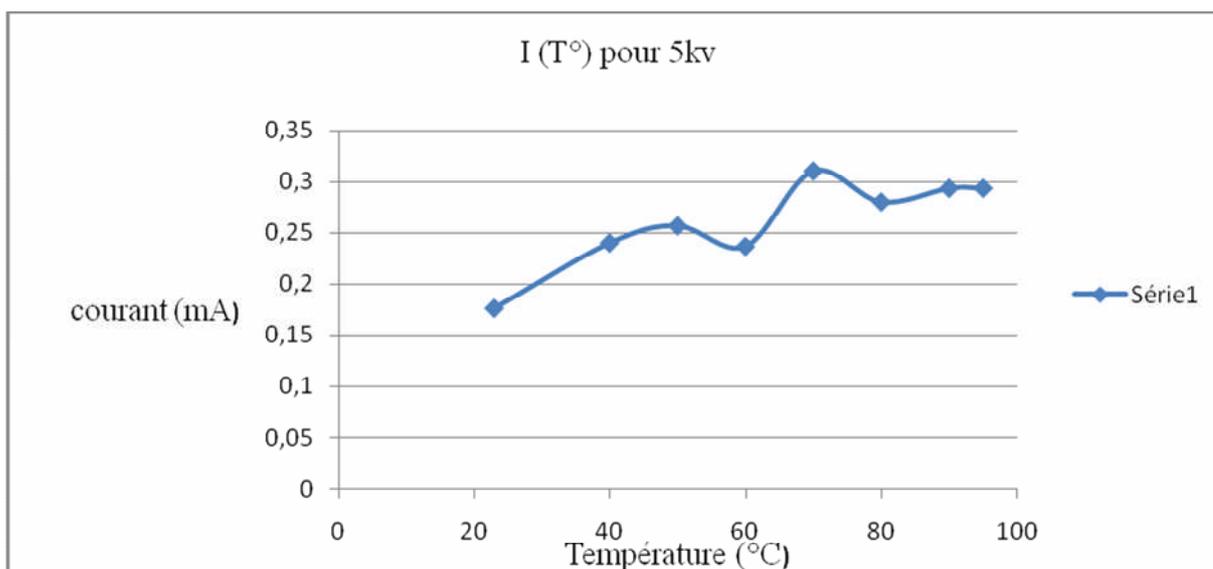


Figure IV.33. Courant en fonction de la température pour une tension de 5 kV.

La courbe courant-température correspondant à la tension de 5kV illustre une augmentation du courant traversant l'éprouvette de 0.17 mA à la température de 23°C à 0.31 mA à 70°C. Au delà de 70°C le courant se stabilise à 0.29 mA.

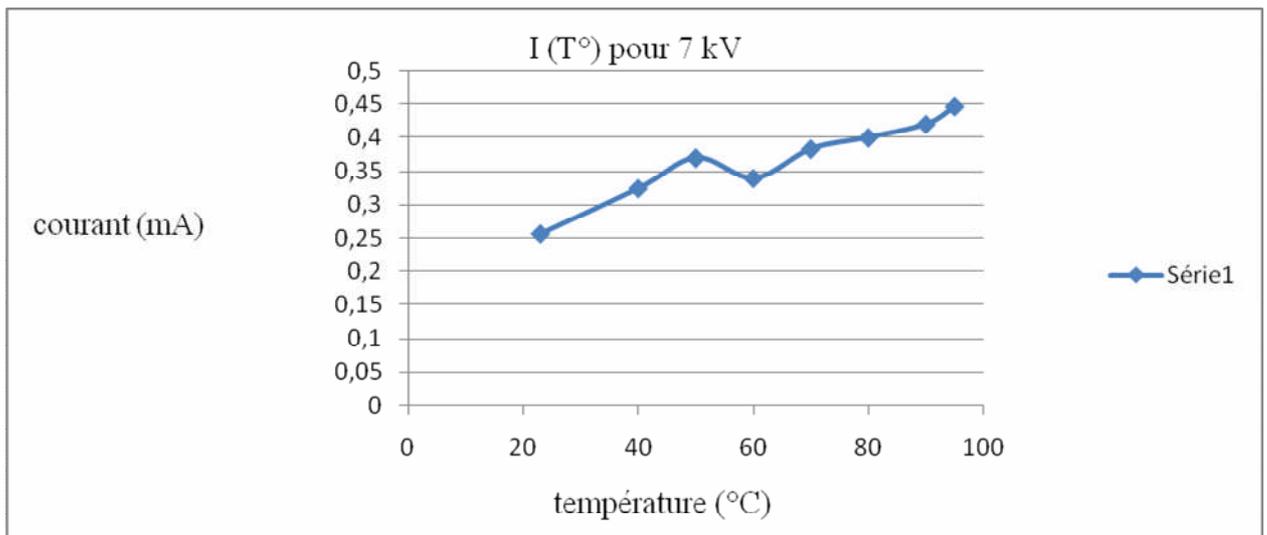


Figure IV.34. Courant en fonction de la température pour une tension de 7 kV.

A la tension de 7kV, le courant à une valeur de 0.25mA à la température ambiante puis atteint 0.37mA 0.50°C, une légère diminution apparaît à 60°C mais le courant augmente à nouveau jusqu'à 0.45mA .

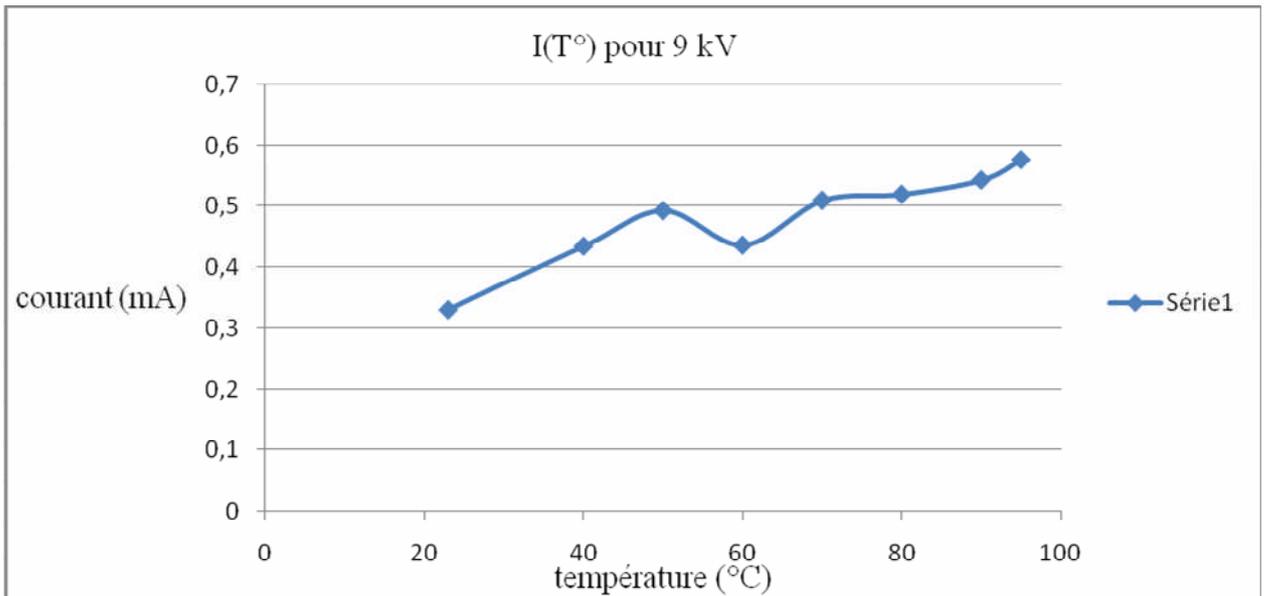


Figure IV.35. Courant en fonction de la température pour une tension de 9 kV.

La caractéristique courant-température nous donne la variation du courant qui traverse les échantillons allant de 0.33 à 0.57mA entre la température ambiante qui est de 23°C et la température de 95°C, notons une diminution à 60°C.

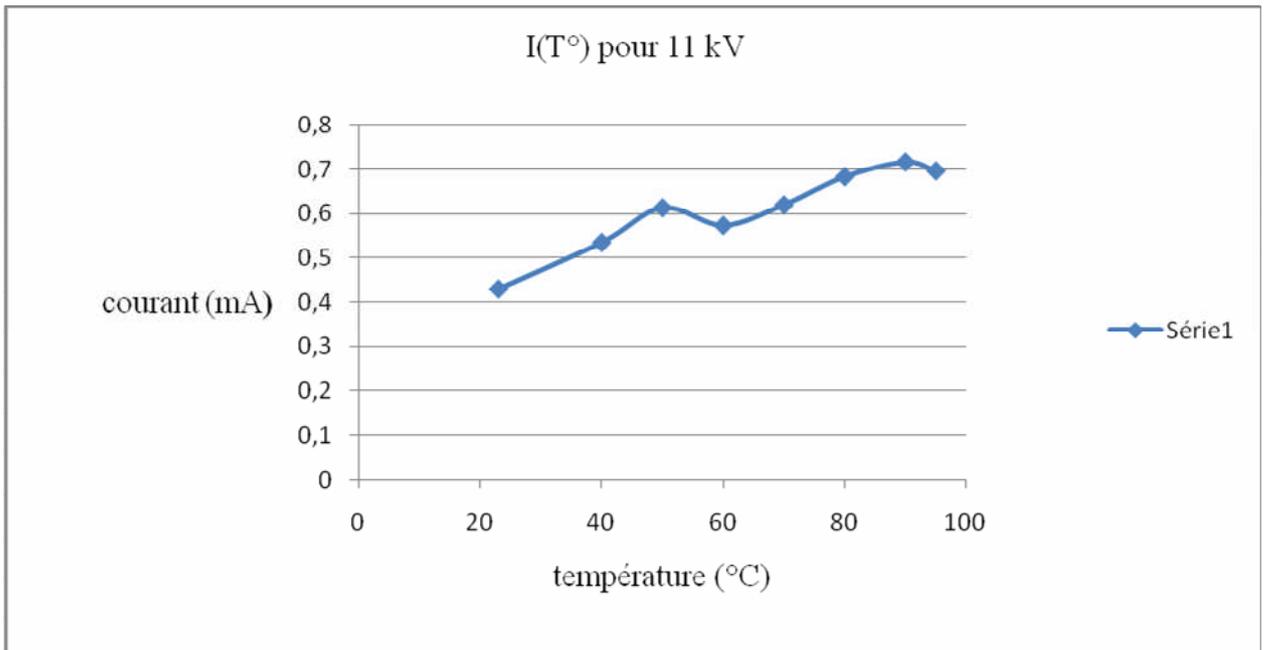


Figure IV.36. Courant en fonction de la température pour une tension de 11 kV.

La courbe donnant la variation du courant en fonction de la température pour la tension de 11kV nous montre une augmentation du courant traversant les éprouvettes de 0.43mA à 0.69mA entre la température ambiante et la température de 95°C.

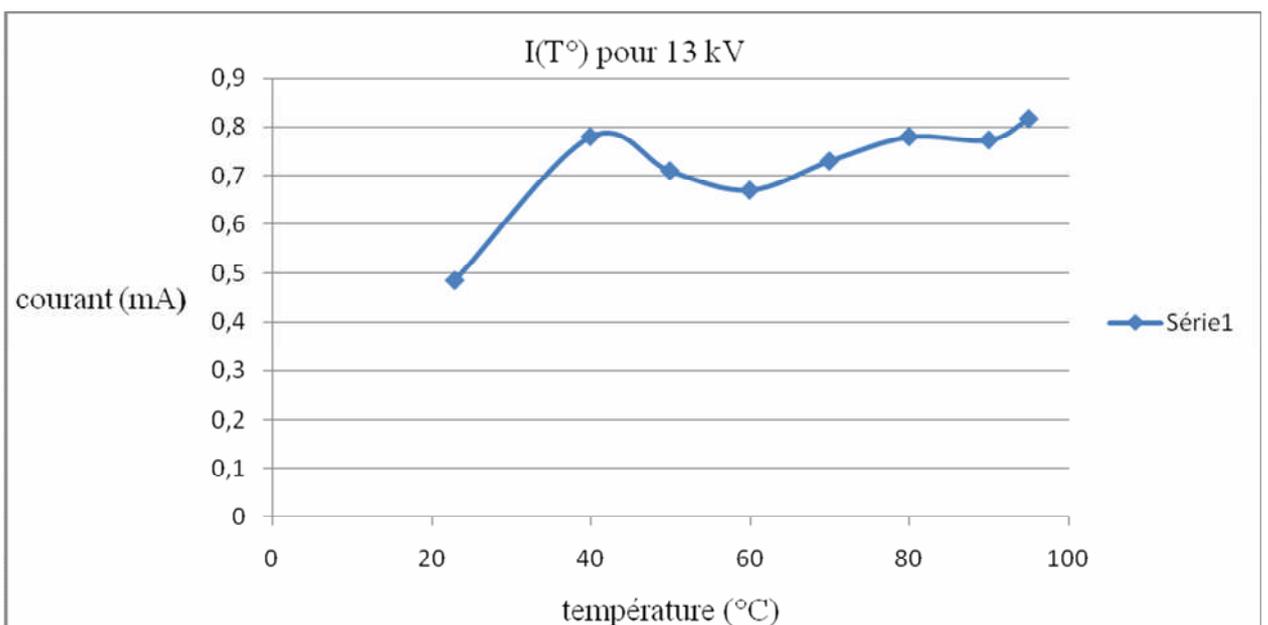


Figure IV.37. Courant en fonction de la température pour une tension de 13 kV.

Le courant traversant l'éprouvette sous une tension de 13kV augmente de 0.48mA à la température de 23°C jusqu'à 0.78mA à 40°C suivit d'une diminution à 60°C qui correspond au courant de 0.67mA pour augmenter de nouveau et atteindre 0.82mA à 95°C.

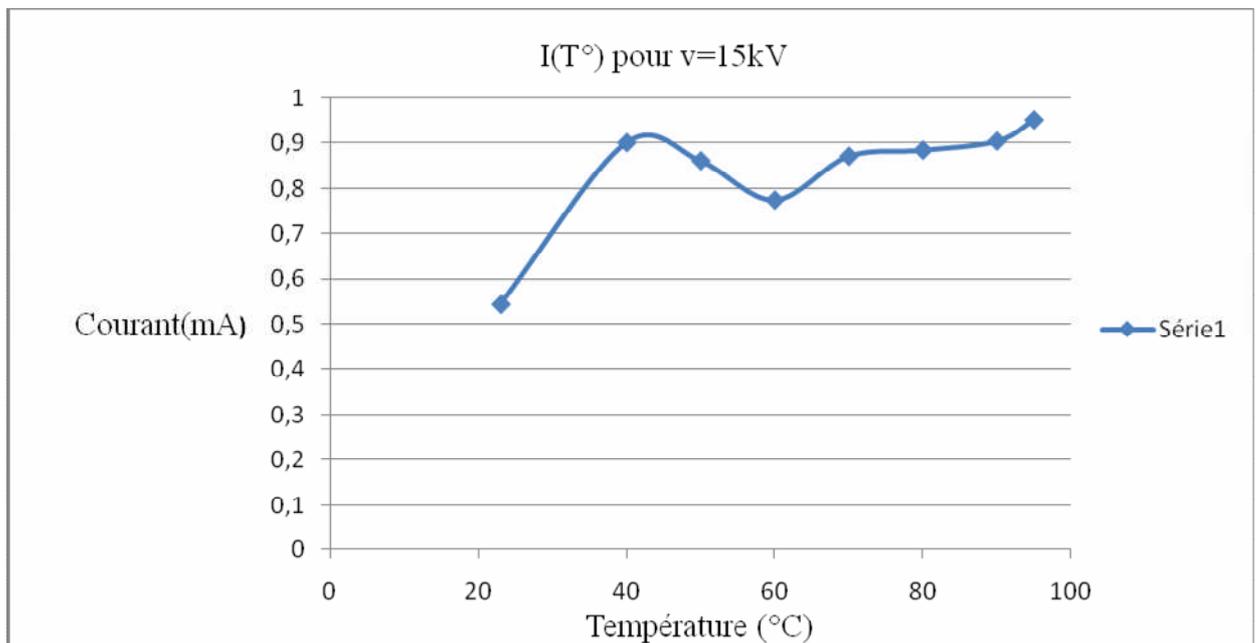


Figure IV.38. Courant en fonction de la température pour une tension de 15 kV.

Nous observons sur la courbe courant-température pour la tension de 15kV une augmentation du courant traversant l'échantillon allant de 0.54mA à 0.9mA entre 23°C et 40°C, une légère diminution apparaît au niveau de 60°C qui correspond à un courant de 0.77mA puis une augmentation à nouveau pour atteindre 0.95mA à 95°C.

VI.6.3. Discussion et interprétation des résultats

- ✓ Les caractéristiques courant-tension montrent une augmentation du courant avec le niveau de tension appliquée. Cette augmentation a lieu pour toutes les températures.
- ✓ Les courants ont pratiquement la même valeur quelle que soit la position de la pointe sur l'échantillon de papier. Nous remarquons pour les trois éprouvettes, ce qui atteste de la reproductibilité des résultats et des phénomènes les régissant. Nous pouvons donc dire que la température est uniforme sur la surface de l'échantillon. Par extension, nous pouvons conclure que la température dans un transformateur est uniforme sur des surfaces de $11 \times 11 \text{ cm}^2$.
- ✓ En ce qui concerne l'évolution du courant en fonction de la température, nous remarquons à l'examen des courbes des figures IV.31 à IV.38 que le courant augmente légèrement jusqu'à une température de 50°C . Au-delà, une diminution du courant a lieu jusqu'à 60°C , après quoi le courant augmente de nouveau pour se stabiliser à partir de 70 à 80°C .

Conclusion

Les essais que nous avons réalisés dans le cadre de ce mémoire nous ont été d'une grande utilité dans la compréhension de certains phénomènes liés aux évolutions pouvant se manifester lors de l'augmentation de la température du système papier/huile. Cette augmentation de température peut survenir lors du fonctionnement d'un transformateur de puissance. La température peut en effet prendre toutes les valeurs qui dépendent de la charge du transformateur.

Pour se placer dans les conditions de fonctionnement d'un transformateur de puissance, nous avons fait varier la température de notre système huile/papier de 23.6 à 95°C. Nous avons ainsi relevé le courant traversant le système pour différents niveaux de tension. Le courant augmente en fonction de la température mais il présente une diminution aux environs de 60°C.

Nos essais ont été réalisés en plaçant la pointe sur le centre et des points équidistants. Le fait que le courant soit indépendant de la position de la pointe pour une température donnée montre l'uniformité de la température sur le papier. Ce qui nous mène à dire que la température serait uniforme sur le papier d'isolation utilisé dans un transformateur une fois que l'équilibre entre la température de l'huile et la température du papier est atteint.

Notre travail ouvre les perspectives suivantes :

- Une étude pour toutes les températures c'est-à-dire des intervalles serrés pour pouvoir détecter la température exacte à laquelle une diminution du courant se manifeste.
- Une étude avec des niveaux de tension très élevés en vue de détecter les différentes détériorations que peut subir le papier suite à une élévation de température.
- Une étude sur plusieurs épaisseurs du papier.
- Une étude en tension continue.

bibliographie

- [1] ALBERT FREDERICK, «Les ressources énergétique de notre planète». Edition Dangles - Saint-Jean-Braye, 1984.
- [2] STEVE KRAWIEC, STEVE LEATH, «Conférence des clients internationaux de Doble». Petro-CANADA.LUB-2403F (08.11).
- [3] L. PASTOURIAX, A .VAROUQUAUX, et autres «Electricité industrielle ; machine électrique».Paris Libraire, 1965.
- [4] ANTHOY LEFEVRE, «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs».thèse de Doctorat, université de Naute, France, 2006.
- [5] N. BOUAZIZ, « Modélisation par éléments finis d'un transformateur de puissance » mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2004-2005.
- [6] A. GENON, W. Legros «Machines électriques » Hermès science. Europe.2000.
- [7] M. DJOUAD et S. LAMALI, «Influence de teneur en eau sur les propriété électrique du papier imprégné », mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2001.
- [8] D. SEMSOUM, E. MEHIDI et K. TAHIR, «Caractérisation du complexe papier presspahn-huile minérale isolant utilisé dans les transformateurs de puissance », projet de fin d'études, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2009.
- [9] T. WILDI, G. SYBILLE, «L'électrotechnique », quatrième édition, 2005.

- [10] Z. ZEROUALI et S. LARBI, «Utilisation des techniques non destructives pour la caractérisation du papier d'isolation des transformateur », mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2007.
- [11] M. LEBIB, « Les huiles minérales isolantes», société des travaux de maintenance industrielle, Juin 2000.
- [12] N. BEGER, «Liquide isolante en électrotechnique, présentation générale», techniques de l'ingénieur, D2 470, paris, Mais 2002.
- [13] R. HELLER, R. ESNAULT, C. LANCE, «Physiologie végétale-Développement», Edition Masson, Paris, 1995.
- [14] Mme. S. ASSOUS Née KHELIL, «Caractérisation du papier presspahn utilisé dans l'isolation des transformateurs de haute tension», thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2004.
- [15] AMAR TILMANE, «Diélectriques», techniques de l'ingénieure, D2 470, Paris, Mais 2002.
- [16] R. FOURNIE, «Diélectriques – Basses théoriques», techniques de l'ingénieure, D 213, Juin 1986.
- [17] DJOUDI HAKIM, «Etude des courants d'absorption et de résorption du papier d'isolation», thèse de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2009.

[18] C. MENGUY, «Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides», techniques de l'ingénieur, D2 310, Paris, 1997.

[20] K. SAMIR, «Etude du vieillissement thermique du polyester – imide immergé dans l'huile isolant " BORAK 22 " », mémoire d'ingénieur, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, promotion 2007.