



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique Industrielle

Thème

Étude expérimentale de la tension de claquage des huiles végétales utilisées dans les transformateurs de puissance

Présenté et soutenu par :

DAINES Mohamed Said et KALAKHI Charaf Eddine Mounir

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
MECHKEN Karima Amel	MAA	IMSI/Univ-Oran2	Présidente
TALHI Mama	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Encadreur
BOUHAMRI Noureddine	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Examineur

Année 2020/2021

Remerciement

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années. Ça nous fait plaisir de prendre ces quelques lignes, si peu nombreuses, afin de remercier les personnes qui nous ont soutenus durant notre mémoire.

D'une façon spéciale, nous tenons à remercier vivement *Mme TALHI. Mama*, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant de nous encadrer, pour ses orientations précieuses, ses encouragements, le temps qu'elle nous ait consacré tout au long de ce projet et de nous avoir permis de mener nos travaux dans d'excellentes conditions, son support et son professionnalisme ont rendu possible la réalisation des travaux de notre mémoire.

On tient également à remercier *Mme MECHKEN. Karima Amel*, d'avoir accepté de présider le jury de notre mémoire.

On remercie *Monsieur BOUHAMRI. Noureddine*, d'avoir accepté d'examiner notre travail de mémoire.

Nous tenons aussi à remercier *le Professeur HADI Hocine*, responsable du laboratoire Haute tension à l'USTO qui a bien voulu nous accueillir dans son unité.

A tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à l'aboutissement de ce travail :
Merci.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chères parents qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils se trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

À mes frères, à leurs fils et à leurs femmes,

À mes sœurs, leurs fils et leurs maris,

À la mémoire de mes grands pères et ma grande mère,

À ma grande mère,

À toute la famille DAINES et à tous ceux qui sont proches de près ou de loin,

À tous mes amis.

Mohamed Said

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes chères parents qui étaient toujours à mes côtés et m'ont toujours soutenu tout au long de ces longues années d'études. En signe de reconnaissance, qu'ils se trouvent ici, l'expression de ma profonde gratitude pour tout ce qu'ils ont consenti d'efforts et de moyens pour me voir réussir dans mes études.

À mes frères,

À la mémoire de mon grand père et ma grande mère,

À toute ma famille à tous ceux qui sont proches de près ou de loin,

À tous mes amis.

Charaf Eddine Mounir

Résumé

En raison des préoccupations concernant la nécessité énergétique mondiale et l'impact environnemental de l'huile minérale, ces conditions incitent de nombreux chercheurs à rechercher des sources de substitution pour l'huile isolante. Des alternatives aux huiles isolantes aux caractéristiques biodégradables, respectueuses de l'environnement telles que les huiles végétales ont été proposées pour des applications hautes tension. Ce travail présente une étude expérimentale pour comparer les caractéristiques électrique spécialement la tension de claquage des mélanges en quantités variables des cinq huiles végétales (l'huile d'Olive, Sésame, Amande douce, Cactus, et huile de Castor) avec une huile minérale. Tous les tests ont été réalisés conformément aux procédures de test standard : IEC 60156. Les résultats obtenus concernant la tension de claquage, montrent qu'un mélange d'huile minérale et d'huile de Castor pourrait être un liquide potentiel pour l'isolation des appareils électriques et notamment des transformateurs de puissance. Donc, à l'avenir, l'huile végétale sera la meilleure alternative à l'huile minérale.

Mots clés : Tension de claquage ; Huile végétale; Huile minérale; transformateur de puissance.

Abstract

Because of concerns about the global energy requirement and the environmental impact of mineral oil, these conditions prompt many researchers to look for alternative sources for insulating oil. Alternatives to insulating oils with biodegradable, environmentally friendly characteristics such as vegetable oils have been proposed for high voltage applications. This work presents an experimental study to compare the electrical characteristics especially the breakdown voltage of the mixtures in variable quantities of the five vegetable oils (Olive oil, Sesame, Sweet almond, Cactus, and Castor oil) with a mineral oil. All tests were performed according to standard test procedures: IEC 60156. The results obtained by testing oil samples concerning the breakdown voltage, show that a mixture of mineral oil and Castor oil could be a potential liquid for the insulation of electrical appliances and in particular of power transformers. So, in the future, vegetable oil will be the best alternative to mineral oil.

Keywords: Breakdown voltage; Vegetable oil; Mineral oil; Power transformer.

الملخص

بسبب المخاوف بشأن الحاجة العالمية للطاقة والتأثير البيئي للزيوت المعدنية، تدفع هذه الظروف العديد من الباحثين للبحث عن مصادر بديلة للزيوت العازلة. تم اقتراح بدائل للزيوت العازلة ذات الخصائص القابلة للتحلل والتي تحترم البيئة مثل الزيوت النباتية لتطبيقات الجهد العالي. يقدم هذا العمل دراسة تجريبية لمقارنة الخصائص الكهربائية خاصة جهد انهيار لمخاليط بكميات متغيرة من الزيوت النباتية الخمسة (زيت الزيتون ، السمسم ، اللوز الحلو ، الصبار ، زيت الخروع) الإختبار القياسية: IEC 60156. مع الزيت المعدني. تم إجراء جميع الاختبارات وفقاً لإجراءات

النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق اختبار عينات الزيت لجهد الانهيار، توضح أن خليطاً من الزيت المعدني و زيتالخروع يمكن أن يكون سائلاً محتملاً لعزل الأجهزة الكهربائية وخاصة محولات الطاقة. وعليه مستقبلاً، سيكون الزيت النباتي هو أفضل بديل للزيوت المعدنية.

الكلمات الرئيسية: جهد الانهيار؛ زيوت نباتي؛ زيت معدني؛ محولات الطاقة.

Table des matières

<i>REMERCIEMENT</i>	<i>I</i>
<i>DEDICACE</i>	<i>II</i>
<i>DEDICACE</i>	<i>III</i>
<i>RESUME</i>	<i>IV</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>IV</i>
المخلص	<i>V</i>
<i>TABLE DES MATIERES</i>	<i>VI</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i>	<i>XI</i>
<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	<i>XIII</i>
<i>NOMENCLATURE</i>	<i>XIV</i>
<i>INTRODUCTION GENERALE</i>	<i>1</i>
<i>CHAPITRE I : BIBLIOGRAPHIE SUR LES HUILES VEGETALES</i>	<i>4</i>
1.1 HISTORIQUE.....	<i>4</i>
1.2 DEFINITION.....	<i>4</i>
1.3 LES HUILES VEGETALES COMESTIBLES.....	<i>4</i>
1.3.1 LES HUILES VIERGES	<i>4</i>
1.3.2 LES HUILES PRESSEES A FROID	<i>5</i>
1.4 COMPOSITION CHIMIQUE DES HUILES VEGETALES.....	<i>5</i>
1.5 L'EXTRACTION DES HUILES VEGETALES	<i>6</i>
1.5.1 EXTRACTION MECANIQUE (PAR PRESSION)	<i>6</i>
1.5.2 EXTRACTION CHIMIQUE (PAR SOLVANT).....	<i>6</i>
1.5.3 RAFFINAGE.....	<i>6</i>
1.6 UTILISATION DES HUILES VEGETALES	<i>8</i>
1.6.1 L'UTILISATION ALIMENTAIRE DES HUILES VEGETALES	<i>8</i>
1.6.2 L'UTILISATION COSMETIQUE DES HUILES VEGETALES.....	<i>8</i>
1.6.3 L'UTILISATION PHARMACEUTIQUE DES HUILES VEGETALES	<i>9</i>
1.6.4 L'UTILISATION INDUSTRIELLE DES HUILES VEGETALES	<i>11</i>
1.6.4.1 Utilisation des huiles végétales comme biodiesel (biocarburant).....	<i>11</i>
1.6.4.2 Historique l'utilisation des huiles végétales comme biocarburant	<i>11</i>

1.6.4.3	L'utilisation des huiles végétales dans les transformateurs de puissance.....	12
1.7	CONCLUSION	12
CHAPITRE II: UTILISATION DES HUILES VEGETALES DANS LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE.....		14
2.1	INTRODUCTION	14
2.2	LE TRANSFORMATEUR	14
2.3	LES COMPSANTS D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE.....	14
2.4	SYMBOLES	15
2.5	CLASSIFICATION	15
2.6	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	16
2.6.1	SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT	17
2.6.2	PARTIE ACTIVE.....	17
2.6.2.1	Circuit magnétique.....	17
2.6.2.2	Enroulements	17
2.6.2.2.1	Enroulement basse tension.....	18
2.6.2.2.2	Enroulement haute tension.....	18
2.6.2.3	Couplage des enroulements	19
2.6.2.3.1	Couplage étoile	19
2.6.2.3.2	Couplage zig zag.....	20
2.6.3	LA PARTIE CONSTRUCTIVE.....	20
2.6.3.1	Cuve et liquide de refroidissement	20
2.7	LES PARAMETRES D'UN TRANSFORMATEURS	21
2.7.1	ESSAIS A VIDE	21
2.7.1.1	La polarité du transformateur	21
2.7.1.2	Rapport de transformation	22
2.7.1.3	Valeurs de X_m et R_f	22
2.7.2	ESSAI EN COURT-CIRCUIT	22
2.7.3	PERTES DANS UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE	23
2.7.3.1	Pertes fer	23
2.7.3.1.1	Pertes par courant de Foucault.....	24
2.7.3.1.2	Pertes par hystérésis	24

2.7.3.2	Pertes cuivre.....	24
2.7.4	RENDEMENT D'UN TRANSFORMATEUR.....	24
2.8	REFROIDISSEMENT DE TRANSFORMATEUR	25
2.8.1	EXEMPLES	25
2.8.1.1	ONAN (Oil Natural Air Natural).....	25
2.8.1.2	ONAF (Oil Natural Air Forced)	26
2.8.1.3	OFWF (Oil Forced Water Forced)	26
2.9	L'ISOLATION ELECTRIQUE DES TRANSFORMATEURS	27
2.9.1	PRINCIPE D'ISOLATION DES TRANSFORMATEURS	27
2.9.2	LES TYPES D'ISOLATION DANS LES TRANSFORMATEURS	27
2.9.2.1	Isolation solide.....	28
2.9.2.2	Isolation liquide	28
2.9.2.3	Propriétés des liquides isolants.....	28
2.9.2.3.1	Propriétés électriques des huiles	28
2.9.2.3.2	Permittivité ou la constante diélectrique.....	29
2.9.2.3.3	Conductivité et Résistivité	29
2.9.2.3.4	Facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$)	29
2.9.2.3.5	Rigidité diélectrique et Tension de claquage	29
2.9.2.4	Propriétés physiques des huiles	30
2.9.2.4.1	Couleur et aspect.....	30
2.9.2.4.2	La viscosité	30
2.9.2.4.3	Point d'écoulement	30
2.9.2.4.4	Le point de congélation.....	31
2.9.2.4.5	La capacité thermique	31
2.9.2.4.6	La conductivité thermique	31
2.9.2.4.7	La masse volumique et le coefficient de dilatation volumique	31
2.9.2.5	Propriétés chimiques.....	31
2.9.2.5.1	Acidité.....	31
2.9.2.5.2	Teneur en eau	32
2.9.2.5.3	La stabilité à l'oxydation	32

2.9.2.6	Principaux types des isolants liquides	32
2.9.2.6.1	Huiles minérales	32
2.9.2.6.1.1	Structure de base de l'huile minérale	33
2.9.2.6.1.2	Paraffinique	33
2.9.2.6.1.3	Naphténique	33
2.9.2.6.1.4	Aromatique.....	34
2.9.2.6.2	Huiles synthétiques	34
2.9.2.6.3	Huiles végétales	34
2.10	LES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE A HUILE VEGETALE	35
2.10.1	LES AVANTAGES DES TRANSFORMATEURS A HUILES VEGETALES	36
2.10.2	DES EXPERIENCES SUR LE DEVELOPPEMENT DES TRANSFORMATEURS D'HUILES VEGETALES.....	36
2.10.2.1	Huiles végétales FR3.	36
2.10.2.2	Transformateur à huile végétale 420 kV par siemens	37
2.11	CONCLUSION	38
	<i>CHAPITRE III : ÉTUDE EXPERIMENTALE SUR LA TENSION DE CLAQUAGE DES HUILES VEGETALES.</i>	40
	<i>PARTIE 1 : BIBLIOGRAPHIE SUR LE CLAQUAGE DES DIELECTRIQUES LIQUIDES ET LES FACTEURS D'INFLUENCE SUR LEURS TESTS.</i>	40
3.1.1	INTRODUCTION	40
3.1.2	ESSAIS SUR LES HUILES ISOLANTES	40
3.1.2.1	Claquage des huiles diélectriques liquides	40
3.1.2.2	Les facteurs d'influence sur les tests diélectriques	41
3.1.2.2.1	Paramètres électro géométriques	41
3.1.2.2.2	Pression hydrostatique	42
3.1.2.2.3	Température	42
3.1.2.2.4	Tension.....	42
3.1.2.2.4.1	Durée d'application de la tension	42
3.1.2.2.5	Humidité	43
3.1.2.2.6	Nombre de claquages.....	44
3.1.2.2.7	Gaz dissous	44

3.1.3	CRITERES DE CHOIX DES LIQUIDES DIELECTRIQUES	45
3.1.4	COMPATIBILITE DE DIFFERENTES HUILES	45
	PARTIE 2 : ÉTUDES EXPERIMENTALES	46
3.1.5	INTRODUCTION	46
3.1.6	METHODE DE RECHERCHE	46
3.1.7	PROCEDURE D'ESSAI	47
3.1.7.1	Huiles isolants utilisés	47
3.1.7.2	Préparation de l'échantillon	47
3.1.7.3	Dispositifs expérimentaux	48
3.1.7.4	Procédure d'essai de la tension de claquage	50
3.1.8	RESULTATS ET ANALYSES	53
3.1.9	ANALYSE COMPARATIVE DES HUILES CLAQUEES	59
3.1.9.1	L'avenir de l'huile végétale comme fluide isolant diélectrique dans les transformateurs	60
3.1.10	CONCLUSION	60
	CONCLUSION GENERALE.....	63
	REFERENCE BIBLIOGRAPHIE	64

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 Composition panoramique des corps gras et importance relative des Principales classes de composés.	5
Figure I.2 Cycle de Transformation des graines oléagineuses	7
Figure I.3 Procédés classiques d'extraction d'huile à partir de graines oléagineuse.	7
Figure I.4 Moteur à l'huile de palme.....	12

Chapitre II:

Figure II. 1 Transformateur de puissance.....	14
Figure II. 2 Symboles de transformateur de puissance.	15
Figure II. 3 Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.....	16
Figure II. 4 Schéma de circuit équivalent d'un transformateur.....	17
Figure II. 5 Schéma de montage du noyau.....	18
Figure II. 6 Coupe d'une colonne.	19
Figure II. 7 Montage de la cuve.	20
Figure II. 8 Essai à vide d'un transformateur.....	21
Figure II. 9 Essai en court-circuit d'un transformateur.....	23
Figure II. 10 Refroidissement d'un transformateur de type ONAN.....	26
Figure II. 11 Refroidissement d'un transformateur de type ONAF.....	26
Figure II. 12 Refroidissement d'un transformateur de type OFWF.	27
Figure II. 13 Structures chimique d'une huile paraffinique.	33
Figure II. 14 Structure chimique d'une huile naphthénique.....	33
Figure II. 15 Structure chimique d'une huile aromatique.	34
Figure II. 16 Transformateurs à huile végétale par china XD group.	35
Figure II. 17 Transformateur à huile végétale FR3 développé par Cargill.	37
Figure II. 18 Transformateur de 420 KV à huile de végétale par siemens.	38

Chapitre III :

Figure III. 1 Valeur efficace de la tension de claquage AC d'une huile de transformateur en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan.	42
Figure III. 2 La tension de claquage en fonction la durée d'application de tension.....	43
Figure III. 3 La tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau, dans l'huile de transformateur.	44
Figure III. 4 Becher d'essai remplie d'huile.	47
Figure III. 5 Mélange d'huiles à l'aide d'un agitateur à plaque chauffante.....	48
Figure III. 6 Appareil de mesure de la tension de claquage (TUR).	48
Figure III. 7 Schéma du testeur de la tension de claquage.....	49
Figure III. 8 La cellule d'essais à électrodes hémisphériques.	50
Figure III. 9 Détails d'une cellule à électrodes hémisphériques.	50
Figure III. 10 La cellule de test remplie d'huile.	51
Figure III. 11 Étincelle entre électrodes de la cellule d'essai.	51
Figure III. 12 Les pots sont fermés avec du papier d'aluminium.	53
Figure III. 13 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile d'Olive).....	54
Figure III. 14 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile d'Amande).	55
Figure III. 15 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile de Castor).....	56
Figure III. 16 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile de Sésame).	57
Figure III. 17 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile de Cactus).	58
Figure III. 18 Comparaison des tensions de claquage AC.....	59

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I. 1 Utilisation cosmétique de quelque huiles végétales..... 9

Tableau I. 2 Utilisation pharmaceutique de quelque huile végétale. 10

Chapitre II :

Tableau II. 1 Types des cuves selon la puissance du transformateur 21

Chapitre III :

Tableau III. 1 La tension de claquage AC de mélange d'huile d'Olive..... 53

Tableau III. 2 La tension de claquage AC de mélange d'huile d'Amande..... 54

Tableau III. 3 La tension de claquage AC de mélange d'huile de Castor. 55

Tableau III. 4 La tension de claquage AC de mélange d'huile de Sésame..... 56

Tableau III. 5 La tension de claquage AC de mélange d'huile de Cactus..... 58

Nomenclature

E_{bob} : La tension aux bornes de bobinage.

V : La tension simple.

P : La puissance actif.

U : La tension composé.

K : Le rapport de transformation.

N : Le nombre de spires.

P_{Iv} : La puissance à vide au primaire.

X_m : La réactance magnétique.

R_f : La résistance magnétique.

Q : La puissance réactif.

i_{Iv} : Le courant à vide au primaire.

W : Les pertes dans un transformateur.

W_{fe} : Les pertes fer (pertes à vide).

W_{cu} : Les pertes cuivres (pertes en charges).

P_h : Les pertes par hystérésis.

η : Le rendement d'un transformateur.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique joue un rôle important dans le développement que connaît le monde moderne en raison de sa nécessité dans tous les domaines, sa production et sa distribution nécessitent également des équipements de très grande taille et de haute qualité, notamment les transformateurs.

Le transformateur est un émetteur électromagnétique qui transfère l'énergie électrique sans changement de fréquence d'un circuit à l'autre. Dans un système électrique, c'est un outil vital et coûteux. Les transformateurs sont produits en différentes tailles, formes et classifications. Le système d'isolation joue un rôle éventuel dans la durée de vie et les performances du transformateur pour tous les transformateurs, car la plupart des pannes de transformateur ont été causées par des difficultés d'isolation. L'isolation de service du transformateur liquide est utilisée pour alimenter le milieu diélectrique, qui agit comme une isolation de différents conducteurs d'énergie. En pénétrant et en remplissant les espaces entre les flocons d'isolation enroulés, l'huile apporte une contribution décente à l'isolation des transformateurs. L'une de nos fonctions secondaires est l'absorption de la chaleur des zones et la masse tout aussi importante d'huile et de réservoir dans les dispositifs de dispersion d'énergie thermique. Il est transféré dans le milieu environnant par conduction, convection et rayonnement.

Depuis des siècles l'huile minérale est utilisée dans l'isolation et le refroidissement des transformateurs, où ses performances étaient acceptables, mais en revanche, elle présentait de nombreux inconvénients, notamment sa dangerosité pour l'environnement, étant une substance toxique et polluant l'environnement, en plus à son faible point d'inflammation et sa vitesse d'explosion, s'ajoutant à tout cela la crise pétrolière mondiale. Il ajoute à tout cela la crise pétrolière mondiale de 1973, qui pousse les chercheurs et les spécialistes du domaine à rechercher une alternative à l'huile minérale comme matériau isolant, L'huile végétale était la meilleure alternative comme huile isolante, car il s'agit d'une substance naturelle extraite de graines de plantes, ce qui signifie qu'il s'agit d'un matériau renouvelable et non nocif pour l'environnement, contrairement à l'huile minérale, en plus de nombreuses caractéristiques qui en font la future solution idéale.

L'objectif de cette étude est de chercher une huile optimale à base végétale. Cette étude présente des résultats expérimentaux la tenue diélectrique (tension de claquage) de plusieurs échantillons de l'huile végétale et plusieurs mélanges

Le présent manuscrit est devisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique sur les huiles végétales, l'extraction des huiles végétales et leurs utilisations dans les domaines alimentaires, cosmétiques, pharmaceutiques, et énergétiques.

Le deuxième chapitre, Nous exposons des généralités sur les transformateurs des puissances, ces propriétés et le principe de fonctionnement...etc. Nous exposons aussi isolation liquide dans les transformateurs de puissance ainsi. Les transformateurs à huile végétale sont exposés aussi dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux de la tension de claquage de cinq l'huiles végétales et une huile minérale, nous avons aussi présenté dans ce chapitre la tension de claquage de plusieurs mélanges entre l'huile végétale et l'huile minérale. Le but de ces mélanges est de trouver une huile optimale pour les transformateurs de puissance. Les mélanges utilisés dans cette étude sont mélangé selon un standard industriel

Le manuscrit est clôturé avec une conclusion générale.

CHAPITRE I :
Bibliographié sur les huiles
végétales

1 CHAPITRE I : Bibliographié sur les huiles végétales

1.1 Historique

Les huiles végétales elles ont intrinsèquement liée à l'histoire de l'homme, Par exemple, l'huile d'olive est déjà existé depuis plus de 12 000 ans, des plusieurs études ont révélé son utilisation à l'âge de Pierre, Les utilisations des huiles végétales à cette époque étaient principalement à des fins alimentaires ou médicales. **(Monnatte, mai 2017)**

Avec le passage du temps et le développement scientifique et la recherche dans le domaine des huiles végétales, de nombreuses huiles ont été découvertes, telles que l'huile de noix, de noisette, de colza Etc. **(Pasquet, juin 2019)**

Les huiles végétales ont aujourd'hui plusieurs usages dans plusieurs domaines tels que le domaine alimentaire, cosmétique, pharmaceutiques et énergétiques, Des recherches sont toujours en cours dans ce domaine à ce jour pour le développement et l'amélioration de ces huiles et de mieux exploiter leurs propriétés

1.2 Définition

Les huiles végétales sont des produits naturels extraits à partir des graines et fruits des plantes oléagineuses, liquide et pas homogènes avec l'eau, elles sont des caractéristiques physico-chimiques distinctives.

Ce sont des substances insolubles composés en majeure partie d'esters de glycérol d'acides gras appelés triglycéride. **(abdelaziz, 2017) (Swern, 1979)**

- Nous pouvant classée les huiles végétales en 3 catégories :

1.3 Les huiles végétales comestibles

C'est un aliment majoritairement composé de glycérides d'acides gras entièrement dérivés de plantes. Ils peuvent contenir des petites quantités d'autres lipides, tels que des phospholipides, des insaponifiables et des acides gras libres naturellement présents dans les graisses ou les huiles. **(WHO, 2001)**

1.3.1 Les huiles vierges

Il est obtenu entièrement par des procédés mécaniques, tels que l'extrusion ou la pression, et le traitement thermique, sans modifier les propriétés de l'huile. Ils ne peuvent être purifiés que par lavage à l'eau, décantation, filtration et centrifugation.

1.3.2 Les huiles pressées à froid

Complètement par des procédés mécaniques (comme le refoulement ou la pression), il peut être éliminé sans recours à des procédés thermiques, et il n'est pas nécessaire, de modifier l'huile. Ils ne peuvent être purifiés que par lavage à l'eau, décantation, filtration et centrifugation. (WHO, 2001)

1.4 Composition chimique des huiles végétales

Les acides gras et nutriments d'un corps (huile ou graisse) sont composés de divers ingrédients comme le montre la figure. I.1 présentation panoramique ; les triglycérides sont majoritaires (95-99 %) : ils sont composés de glycérine (3-5%) et acides gras (90-95%). D'autres ingrédients sont naturellement présents petites quantités : lipides polaires, tels que les phospholipides (0.1-0.2%) et les dits insaponifiables appartiennent à la partie non glycéride (0.1 à 3%) principalement représenté par des stérols et des tocophérols tocotriénols, mais contenant il existe également des caroténoïdes, des alcools terpéniques, des scalène diagonaux et des composés phénoliques. (MORIN, 2012)

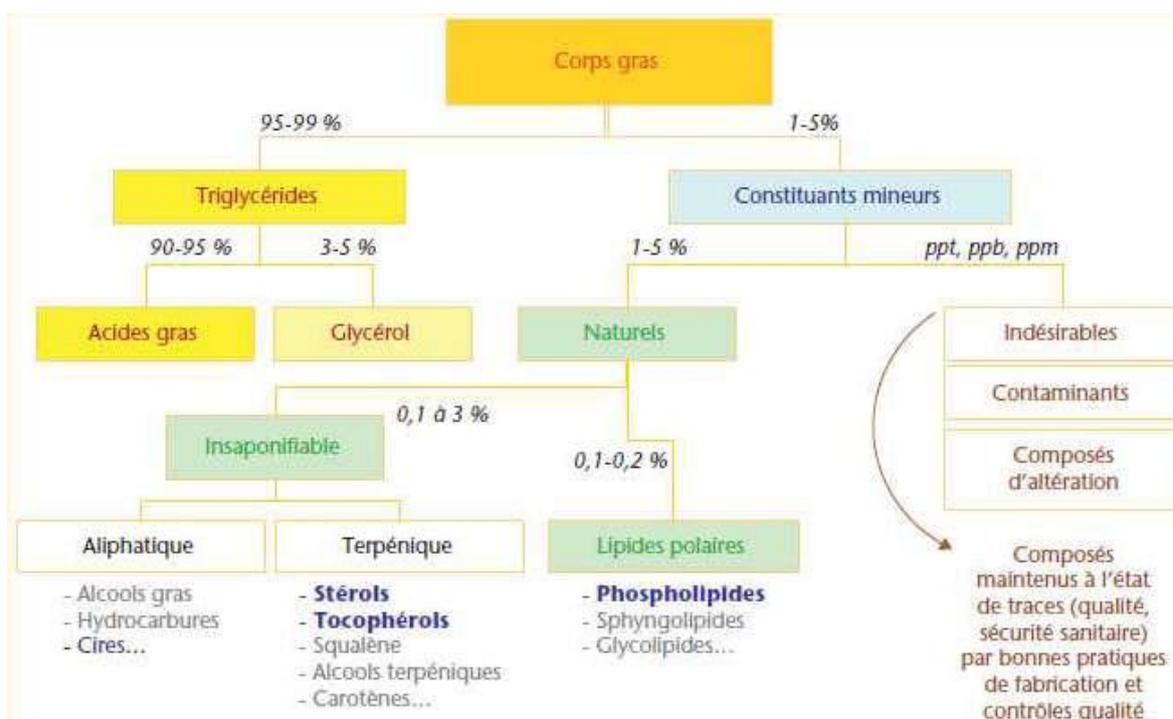


Figure I. 1 Composition panoramique des corps gras et importance relative des Principales classes de composés.(MORIN, 2012)

1.5 L'extraction des huiles végétales

L'extraction c'est une méthode utilisée pour obtenir les huiles à partir des graines et fruits des plantes oléagineuses, (NguyenVan, 2010) Le dernier doit passer à travers des processus séquentiels avant l'extraction qui sont les suivants : (Jennifer régis, 2016)

- Nettoyage.
- Séchage.
- Concassage.
- Décorticage.
- Traitement thermique (cuisson à 60°) dans quelque cas.

Ilya deux méthodes les plus utilisées pour l'extraction des huiles végétales :

1.5.1 Extraction mécanique (par pression)

L'extraction mécanique (ou par pressage) c'est une méthode permet de séparer les liquides par l'application d'une pression extérieure, Le produit est supporté par une paroi ou une toile permettant le passage du liquide. (NguyenVan, 2010)

Cette méthode garantit la pureté et la conservation de l'huile extraite.

1.5.2 Extraction chimique (par solvant)

L'épuisement du produit se déroule dans un extracteur fonctionnant en continu par immersion ou par percolation et dans lequel de l'hexane circule à contre-courant. Le solvant qui s'est continuellement enrichi en huile au cours de l'extraction, est alors distillé tandis que le marc est désolvanté par évaporation de l'hexane dans un désolvanteur. (Jennifer régis, 2016)

1.5.3 Raffinage

L'affinage a pour but de maintenir ou d'améliorer les propriétés organoleptiques (goût et odeur neutre, transparence, jaune clair), stabilité des nutriments et des corps gras. Pour ce faire, il a mis en place plusieurs étapes élimine les composés indésirables (gomme, cire, acide gras libre, pigment, Traces métalliques, composés volatils et odorants) et les polluants potentiels, En matière de matières premières, tout en maîtrisant de nouveaux composés indésirables sont formés par hydrolyse, oxydation ou isomérisation. Si nécessaire, le processus peut être effectué s'adapter à l'utilisation future huile raffinée produite : utilisations Alimentaire (ou cosmétique/pharmaceutique) conduira la raffinerie à optimiser son processus pour protéger les ingrédients d'intérêt Nutrition (acides gras polyinsaturés, vitamine E) ; à des fins techniques, traiter s'adaptera au travail attendu (ex. dans le processus de Tran sesterification ultérieure, il est utilisé pour produire des esters méthyliques pour les huiles végétales et les biocarburants).

Il existe deux types de raffinage : le raffinage chimique et "physique", ce qui conviendrait mieux c'est ce qu'on appelle la "distillation de neutralisation". Le raffinage chimique pour éliminer les acides gras libres étapes pour neutraliser avec de la soude ; la distillation de neutralisation pour éliminer ces composés indésirables (désacidification) distillation. (Xavier PAGES, 2012)

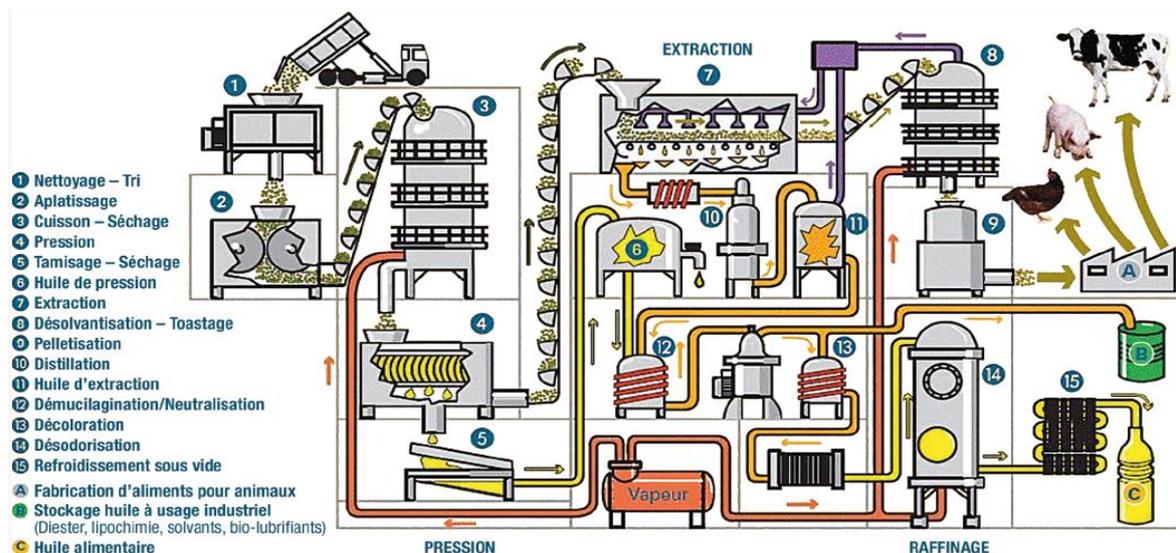


Figure I.2 Cycle de Transformation des graines oléagineuses. (Pasquet, juin 2019)

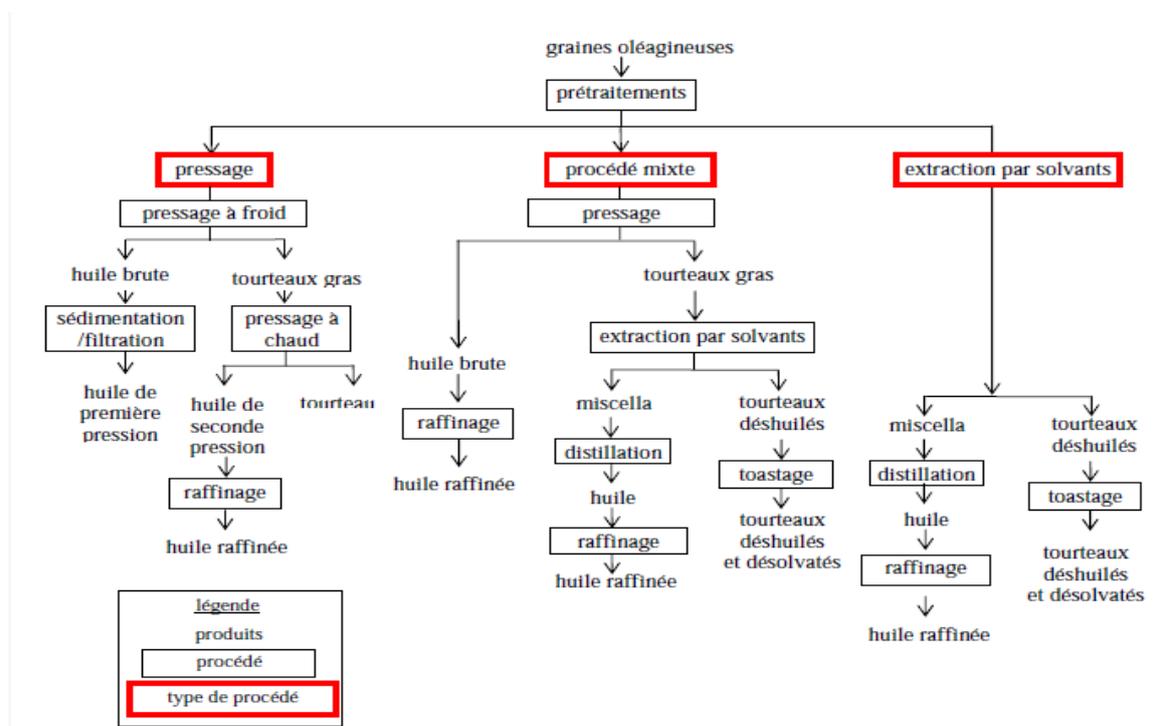


Figure I.3 Procédés classiques d'extraction d'huile à partir de graines oléagineuse.(Gros, 2005)

1.6 Utilisation des huiles végétales

Les huiles végétales sont des extraits naturels des fruits et des graines et les plants oléagineux. Par conséquent, il présente des caractéristiques spécifiques et des avantages, et c'est ce qui lui a permis d'avoir des certaines activités dans plusieurs domaines comme l'alimentaire, pharmaceutique, cosmétique et énergétiqueEtc.

1.6.1 L'utilisation alimentaire des huiles végétales

Les huiles végétales sont utilisées à des fins alimentaires et diététiques elles sont employées dans recettes culinaires, l'assaisonnement des salades, dans les bains de friture (beignets, croquettes) et utilisée aussi pour la fabrication des margarines. **(KAPSEU, 2009)**

Les huiles végétales sont très utilisées en alimentation humaine, les huiles alimentaires sont faites de glycérides qui ne sont pas volatils. Les glycérides sont faites d'acides gras et de glycérol. **(Alaoui, 2002)**

Les nutritionnistes conseillent de consommer diverses huiles végétales pour profiter alternativement de leurs différentes vertus.

Les Français consomment environ 1,7 million de tonnes d'huiles végétales par an, soit 54 litres d'huile par seconde ! Ces huiles sont source de lipides, des graisses nécessaires à notre alimentation et qui devraient représenter entre 35 et 40% de notre apport calorique journalier, selon les recommandations officielles de l'ANSES.

1.6.2 L'utilisation cosmétique des huiles végétales

Les huiles végétales sont très utilisées en cosmétique (Tableau I.1), où leurs propriétés nourrissantes, hydratantes et protectrices feront des merveilles. Elles seront aussi très utiles en aromathérapie avec des propriétés thérapeutiques spécifiques, ou tout simplement parce qu'elles font d'excellentes bases de dilution des huiles essentielles.

Grâce à leurs propriétés nourrissantes, hydratantes, assouplissantes, régénérantes ou protectrices, ces huiles végétales sont particulièrement adaptées aux soins cosmétiques naturels. Elles remplacent avantageusement les multiples produits de synthèse que l'on trouve dans les produits cosmétiques industriels.

Même si elles sont beaucoup moins puissantes que les huiles essentielles, certaines huiles végétales ont toute leur place dans votre aromathèque. Leurs propriétés thérapeutiques leur permettront de venir en soutien de leurs cousines les huiles essentielles. **(Charie, 2019) (Clergeaud, 2003)**

Tableau I. 1 Utilisation cosmétique de quelque huiles végétales. (Alaoui, 2002)

Plante	Utilisation cosmétiques
Arachide (<i>Arachishypogaea</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Utilisée dans les écrans totaux pour la protection contre les rayons ultraviolets.• Conseillée pour protéger la peau dans des conditions environnementales extrêmes.
Carthame (<i>Carthamustinctorius</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Elle a été utilisée pour guérir et cacher les anciennes blessures.• Excellent produit pour la préparation des crèmes et lotions de beauté.
Lin (<i>Linumusitatissimum</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Huile utilisée dans la préparation des produits cosmétiques.
Ricin (<i>Ricinuscommunis</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Utilisée dans la fabrication des rouges à lèvres.• Très luisante si elle appliquée sur la peau.• Utilisée dans la fabrication des savons transparents.• Utilisée pour la fabrication de produits pour cheveux.
Soja (<i>Glycine max</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Connue pour ses utilisations cosmétiques en Chine depuis 4000 ans.• Préparation de produits pour la peau et les cheveux.
Tournesol (<i>Helianthusannus</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Permet la fabrication d'adoucisseurs de la peau simples et bon marché.

1.6.3 L'utilisation pharmaceutique des huiles végétales

A cause de l'origine naturelle des huiles végétales, elles sont très utilisées dans le domaine pharmaceutique et médical, le tableau I.2 représente quelque utilisation pharmaceutique de quelque huile végétale.

Tableau I. 2 Utilisation pharmaceutique de quelque huile végétale. (Alaoui, 2002)

Plantes	Utilisation pharmaceutique
Carthame (<i>Carthamustinctorius</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Utilisée pour guérir les anciennes blessures.• Son utilisation est associée avec la réduction du taux de cholestérol dans le sang.• Les extraits des fleurs contiennent des produits utilisés dans le traitement de certaines maladies, dont les désordres liés au cycle menstruel, et les maladies cardio-vasculaires. L’huile de carthame est conseillée pour remédier à l’enflure associée aux traumatismes.• Huile riche en acide oléique et linoléique.• Huile comparable à l'huile d'olive, elle est thermostable et sert surtout d'huile à friture de qualité.
Lin (<i>Linum usitatissimum</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Bon supplément nutritif pour réduire le taux de cholestérol dans le sang et pour l'amélioration de l'activité cardiaque.
Ricin (<i>Ricinus communis</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Huile utilisée comme produit hautement purgatif.
Arganier (<i>Argania spinosa</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Elle est aussi utilisée pour les massages et pour soulager des problèmes d’articulation.
Olivier (<i>Olea europea</i>)	<ul style="list-style-type: none">• Les personnes qui consomment régulièrement l’huile d’olive présentent un faible risque d’atteinte par le cancer, ce qui est spécialement vrai pour le cancer des seins.• L’huile d’olive joue un rôle dans la prévention des ulcères du tube digestif et des calculs des reins.• Elle réduit les risques des crises cardiaques et d’autres maladies cardio-vasculaires. C’est une huile riche en acides gras mono-insaturés (80%) et en antioxydants, ce qui maintient un bon taux

	<p>de cholestérol dans le sang et réduit la tension artérielle.</p> <ul style="list-style-type: none">• Utilisée par les athlètes pour la souplesse des muscles et les articulations.• Elle est riche en vitamines A1, B1 et E, et en éléments minéraux et sels. Elle est recommandée chez la femme enceinte, stimule la croissance des bébés et jeunes enfants et retarde les effets de l'âge.
--	--

1.6.4 L'utilisation industrielle des huiles végétales

1.6.4.1 Utilisation des huiles végétales comme biodiesel (biocarburant)

Après plusieurs des recherches pour trouver une source énergie renouvelables pour les moteurs diesel, il a été proposer le huiles végétales comme un biocarburant. (**Achten WMJ, 2008**)

Le biodiesel est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus important. Il est non toxique, biodégradable, son pouvoir calorifique est important et son utilisation réduit l'émission de gaz à effet de serre. (**Z. Bettahar 1, 2016**)

Les huiles végétales naturelles ont des propriétés énergétiques proches de celles du fioul avec faible coût de production et nécessite des moyens de production et petites technologies disponibles. (**Rousset, 2008**)

1.6.4.2 Historique l'utilisation des huiles végétales comme biocarburant

- En 1891 Rudolf Diesel procède les premiers essais sur les moteurs Diesel avec huiles végétales.
- 1900 L'entreprise OTTO selon la demande du gouvernement français présent un moteur fonctionnant à l'huile d'arachide.
- Au début de la dernière guerre la Société de Construction du port d'Abidjan (Côte d'Ivoire) utilisée l'huile de palme filtrée dans ses moteurs de 50 à 800 chevaux.
- Durant la dernière guerre, 30 à 40 camions de l'armée française fonctionnant à l'huile d'arachide effectuaient chaque semaine la liaison Dakar-Alger (3 500 km) (**Rousset, 2008**)



Figure I. 4 Moteur à l'huile de palme (Cirad).(Rousset, 2008)

1.6.4.3 L'utilisation des huiles végétales dans les transformateurs de puissance

Les huiles végétales sont utilisées depuis des siècles comme liquide d'isolation électrique et le refroidissement des transformateurs, dans le deuxième chapitre en va détaillée sur cette utilisation.

1.7 Conclusion

Les huiles végétales sont proposées comme alternatives aux huiles minérales dans les transformateurs de puissance, ce chapitre présente des généralités sur des huiles végétales, l'extraction de ces huiles et leurs applications dans plusieurs domaines. Le coût des huiles végétales est cher, la raison pour laquelle leur utilisation est limitée dans le domaine industriel.

CHAPITRE II :
Utilisations des huiles
végétales dans les
transformateurs de puissance

2 CHAPITRE II: Utilisation des huiles végétales dans les transformateurs de puissance

2.1 Introduction

Le transformateur joue un rôle important dans la fourniture d'une alimentation électrique fiable et efficace et est l'un des appareils les plus critiques dans les systèmes de transmission et de distribution d'énergie électrique. Le maximum des transformateurs hautes tensions est rempli d'huiles isolantes ou d'huile de transformateur. L'huile sert d'isolant électrique ainsi que de fluide caloporteur.

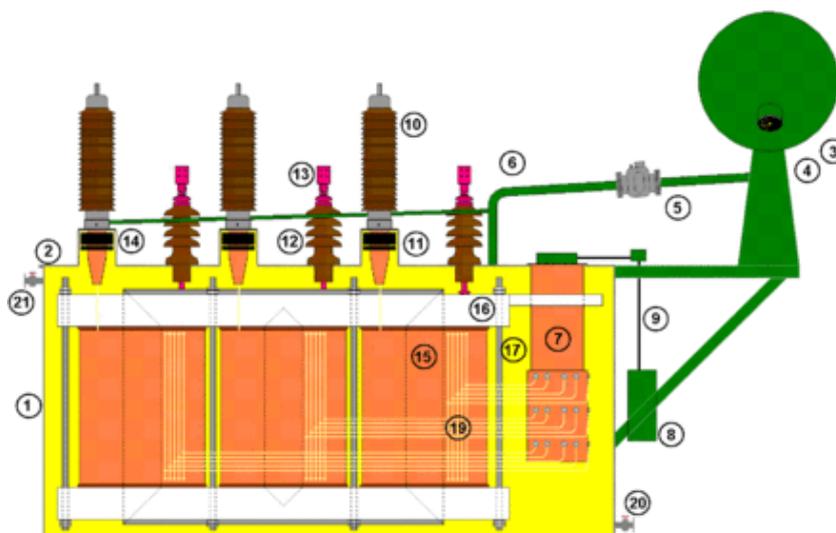
L'huile minérale de transformateur a été remplacée par des huiles alternatives telles que l'huile végétale, l'huile végétale à un point d'éclair élevé, une permittivité relative élevée que l'huile minérale. De plus, l'huile végétale a obtenu une ressource abondante. L'huile végétale est hautement biodégradable, renouvelable et respectueuse de l'environnement par rapport à l'huile minérale.

2.2 Le transformateur

Le transformateur est une machine électrique statique et un convertisseur alternatif-alternatif qui permet de modifier la valeur efficace d'une tension alternative en maintenant la fréquence et la forme de l'onde constantes. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. (PIOTROVSKI, 1969)

2.3 Les composants d'un transformateur de puissance

Les transformateurs sont des machines très compliquées qui comportent plusieurs composants. La figure II.1 présente les différents composants d'un transformateur de puissance.



- | | |
|---|---|
| 1 : Cuve. | 12 : Traversée du secondaire. |
| 2 : Couvercle. | 13 : Connexion du secondaire avec l'extérieur. |
| 3 : Conservateur. | 14 : Dôme avec transformateurs de courant à l'intérieur. |
| 4 : Indicateur de niveau d'huile. | 15 : Enroulements. |
| 5 : Relais Buchholz. | 16 : Noyau magnétique. |
| 6 : Tuyau d'huile. | 17 : Élément mécanique maintenant le noyau magnétique et les enroulements ensemble exerçant une force de compression. |
| 7 : Changeur de prises. | 18 : (Non représenté). |
| 8 : Moteur électrique du changeur de prises. | 19 : Connexion du changeur de prises aux enroulements. |
| 9 : Transmission mécanique du changeur de prises. | 20 : Robinet d'huile. |
| 10 : Traversée du primaire, avec connexion à son extrémité. | 21 : Robinet d'air. |
| 11 : Dôme avec transformateurs de courant à l'intérieur. | |

Figure II. 1 Transformateur de puissance.

2.4 Symboles

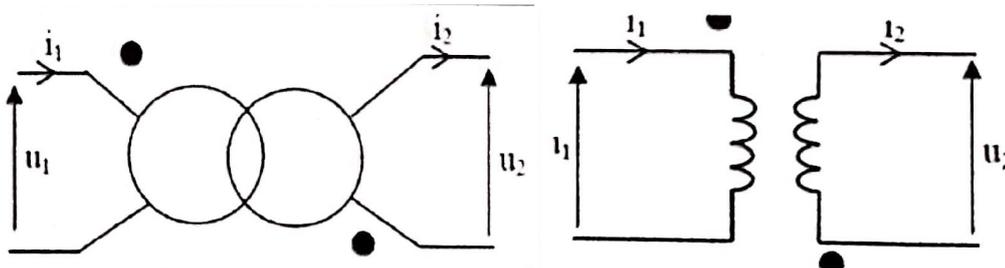


Figure II. 2 Symboles de transformateur de puissance.

2.5 Classification

On peut classer les transformateurs de puissance selon plusieurs aspects. Ces aspects sont indépendants : **(document réf transformateur , 2010)**

1. La puissance

-Transformateurs de distribution : jusqu'à 2.5 MVA en triphasé ou 0.833 MVA en monophasé.

-Transformateur de moyenne puissance : au-delà de 2.5 MVA et jusqu'à 100 MVA en triphasé et 33.3 MVA en monophasé.

-Transformateur de grande puissance : au-delà de 100 MVA en triphasé 33.3 MVA en monophasé.

2. Le nombre de phases : **monophasé ou triphasé.**
3. Le milieu réfrigérant et le mode de refroidissement : **air ou huile, naturel ou forcé.**
4. Le rapport de transformation : **élévateur ou abaisseur.**
5. La forme du circuit magnétique : **colonne ou galette (cuirassé).**
6. Type de respiration : **hermétique ou respiration libre.**

2.6 Principe de fonctionnement

Le transformateur monophasé est constitué de deux enroulements indépendants qui enlacent un circuit magnétique commun. Le côté de la source est appelé le primaire, et a N_1 enroulements de fils (tours). Le côté de la charge est appelé le secondaire et a N_2 enroulement.

L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale. Il est donc traversé par un courant sinusoïdal et donne naissance à un flux sinusoïdal. Ce flux engendre alors une force électromotrice induite E_1 dans l'enroulements primaire et E_2 dans l'enroulement secondaire. Aux niveaux des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdal dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire, mais dont l'amplitude est différente (figure II.3).

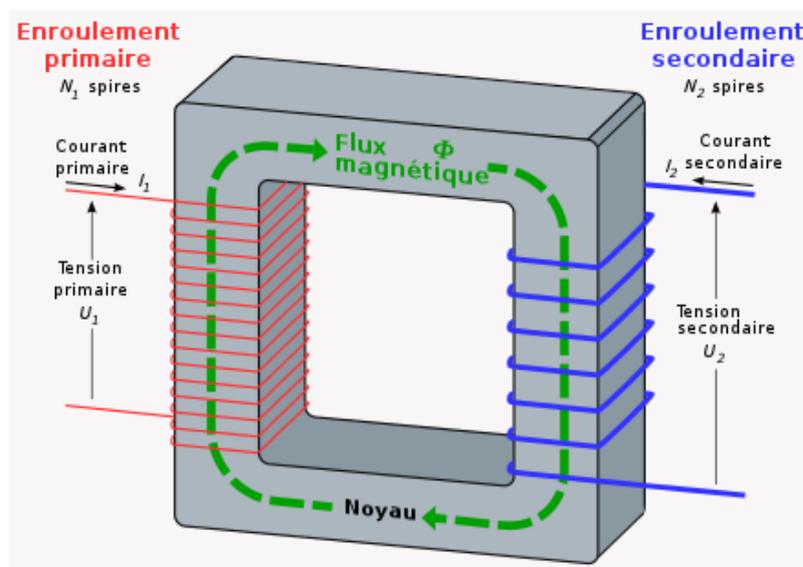


Figure II. 3 Schéma de principe de fonctionnement d'un transformateur de puissance.

2.6.1 Schéma électrique équivalent

Le schéma électrique équivalent d'un transformateur est donné par la figure II.4

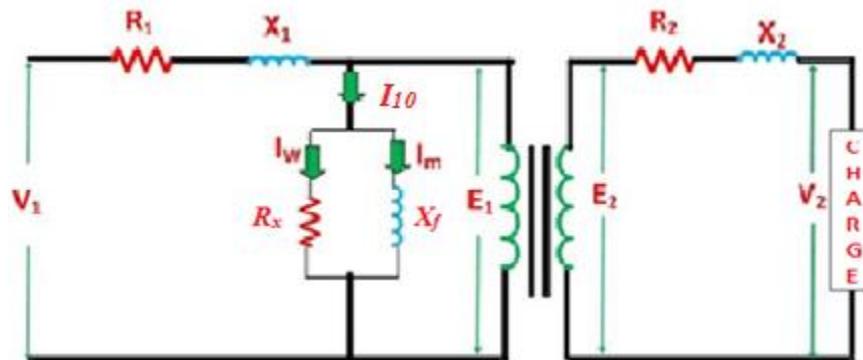


Figure II. 4 Schéma de circuit équivalent d'un transformateur.

Le transformateur de puissance comporte deux parties essentielles : (**Lounis Aziz, 2012**)

- Partie active.
- Partie constructive.

2.6.2 Partie active

Elle est constituée d'un circuit magnétique (noyau) (Figure II.5) et deux enroulements (primaire et secondaire).

2.6.2.1 Circuit magnétique

Le circuit magnétique est constitué par empilage de tôles de fer silicium (0,8 à 3,5 % de silicium) à grains orientés, de faible épaisseur (0,3 à 0,35 mm), isolées entre elles. Son rôle essentiel est la canalisation du flux magnétique. La structure de sa section droite en gradins lui confère une forme circulaire semblable à celle des bobines afin de réduire les fuites magnétiques d'une part, et de présenter une bonne résistance mécanique aux efforts électrodynamiques de court-circuit d'autre part.

2.6.2.2 Enroulements

Le transformateur comporte deux enroulements (primaires et secondaires) montés sur les colonnes du circuit magnétique qui sert de support. (Figure. II.6)

Le primaire destiné à la création d'un champ alternatif sinusoïdal et le secondaire à la création d'un courant induit par la variation du flux généré par le champ alternatif.

Le primaire se comporte comme un récepteur, par contre le secondaire comme un générateur, il diffère du primaire par le nombre de spires. Les enroulements sont réalisés à

partir de conducteur en cuivre de forme circulaire ou rectangulaire selon la valeur de la tension.

2.6.2.2.1 Enroulement basse tension

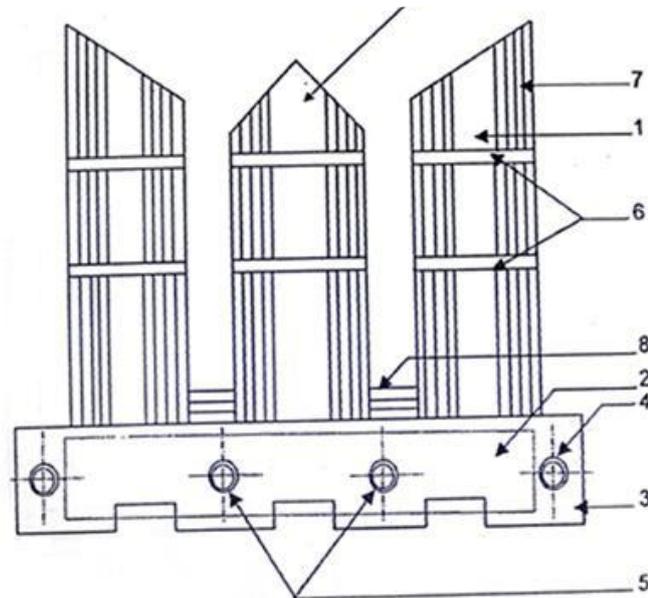
Le courant qui circule dans l'enroulement secondaire se caractérise par une forte intensité. Cette caractéristique impose un nombre de spires limité et une section du conducteur relativement importante.

2.6.2.2.2 Enroulement haute tension

La tension est élevée et l'intensité du courant est de faible valeur, ce qui impose un fil conducteur de faible section et un nombre de spires plus important.

On distingue deux modes d'enroulements HT :

- Enroulement en couches.
- Enroulement à galettes.



- 1 : Colonne latérale.
- 2 : Plaque isolante.
- 3 : Tôle de serrage.
- 4 : Boulons de serrage.

- 5 : Frettes.
- 6 : Gradins.
- 7 : Culasse inférieur.
- 8 : Colonne centrale.

Figure II. 5 Schéma de montage du noyau.

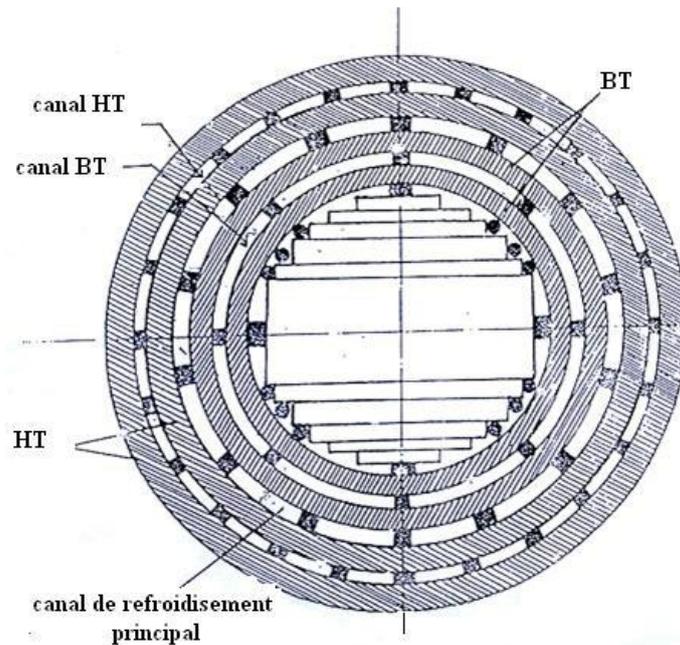


Figure II. 6 Coupe d'une colonne.

2.6.2.3 Couplage des enroulements

Le couplage des enroulements du transformateur est réalisé suivant le principe utilisé pour coupler les enroulements statoriques du moteur asynchrone triphasé.

- Les enroulements primaires se couplent au choix en Y ou en Δ :
 - En respectant la tension maximale supportée par un enroulement.
 - En fonction de la tension du réseau de distribution disponible.
- Les enroulements secondaires se couplent en Y, Δ ou en zigzag :
 - En fonction de la valeur de la tension au secondaire que l'on veut obtenir.

2.6.2.3.1 Couplage étoile

Aux bornes du bobinage, on trouve la tension simple :

$$\overrightarrow{E_{bob}} = \overrightarrow{V} \text{ (II. 1)}$$

Aux bornes du bobinage, on trouve la tension composée :

$$\overrightarrow{E_{bob}} = \overrightarrow{U} \text{ (II. 2)}$$

2.6.2.3.2 Couplage zig zag

On relie 2 bobinages de même nombre de spire mais montés sur 2 colonnes différentes.

La tension simple au secondaire est une combinaison des tensions d'enroulements :

$$\vec{E}_{bob1} + \vec{E}_{bob2} = \vec{V}_2 \text{ (II. 3)}$$

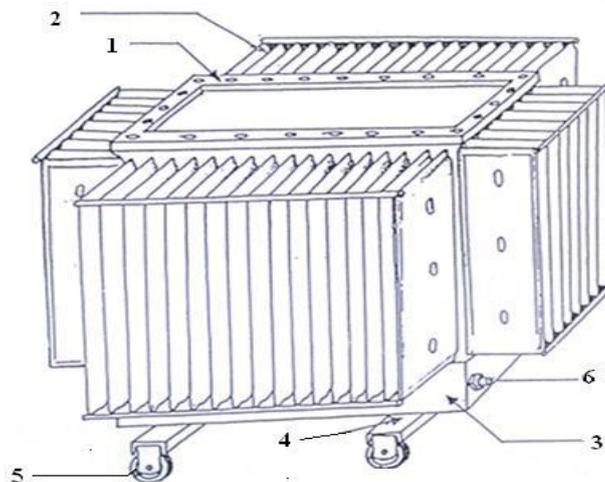
2.6.3 La partie constructive

Une série d'éléments mécaniques qu'on peut appeler pièces constructive destinées à l'isolation, à la fixation et au refroidissement de la partie active.

2.6.3.1 Cuve et liquide de refroidissement

Elle assure la protection de la partie active du transformateur, son rôle est refroidir en utilisant de l'huile. (Figure II.7)

Il a une grande surface d'échange thermique avec l'environnement extérieur qui lui permet d'introduire des ondulations afin d'augmenter cette surface avec l'environnement extérieur.



- 1 : Cadre.
- 2 : Parois ondulées.
- 3 : Partie inférieur.

- 4 : Support.
- 5 : Galet de roulement.
- 6 : Bouchon de vidange.

Figure II. 7 Montage de la cuve.

Généralement la cuve d'un transformateur de puissance est de forme rectangulaire. Mais il a des plusieurs types différentes selon la puissance des transformateurs : (Tableau II.1)

Tableau II. 1 Types des cuves selon la puissance du transformateur.

Puissance	Type de la cuve
Jusqu'à 30 KVA	Des cuves lisses (simples).
jusqu'à 3000 KVA	On utilise des cuves à ondulation.
Jusqu'à 10000 KVA	Des réfrigérants radiateurs à refroidissement naturel adaptés aux parois de la cuve.
plus de 10000 KVA	Les radiateurs sont soufflés aux moyens de ventilateurs.

2.7 Les paramètres d'un transformateurs

On peut déterminer les paramètres d'un transformateur à partir les essais suivants :

2.7.1 Essais à vide

Il consiste à appliquer la tension nominale au primaire et en gardent le secondaire à vide ($i_{2v}=0$). La mesure du courant i_1 , la puissance p_{1v} et de la tension v_{10} dans cet assai permet à déterminer : (Figure II.8)

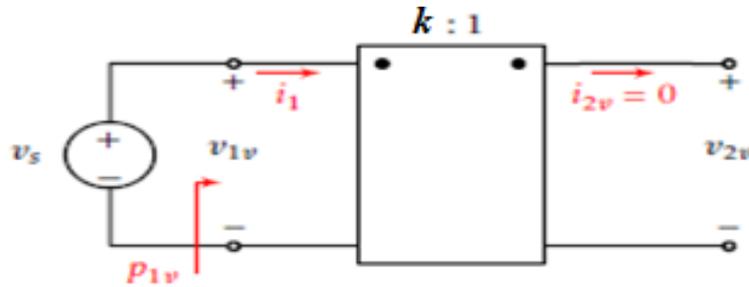


Figure II. 8 Essai à vide d'un transformateur.

2.7.1.1 La polarité du transformateur

C'est la direction des tensions induites dans l'enroulement primaire et secondaire des transformateurs. Si les transformateurs sont connectés en parallèle, la polarité doit être connue pour le bon raccordement du transformateur.

- Si v_{1v} et v_{2v} sont en phase,
- la polarité est bonne. Sinon, inverse (**Cormier**)

2.7.1.2 Rapport de transformation

Rapport de transformateur qui détermine le rapport entre la tension appliquée au primaire du transformateur et celle induite dans le secondaire.

$$K = \frac{U_{20}}{U_1} \quad (\text{II. 4})$$

$$K = \frac{V_{20}}{V_1} \quad (\text{II. 5})$$

Aussi il est la entre le de spires entre le secondaire et le primaire :

$$K = \frac{N_2}{N_1} \quad (\text{II. 6})$$

Ce rapport de transformation dépend des nombres des pires des bobinages et des couplages du primaire et du secondaire.

2.7.1.3 Valeurs de X_m et R_f

- On suppose que $X_m \gg X_l$ et $R_c \gg R_l$, donc :

$$P_{1v} = \frac{v_{1v}^2}{R_c} \Rightarrow R_c = \frac{v_{1v}^2}{P_{1v}} \quad (\text{II. 7})$$

- $S_{1v} = v_{1v} \cdot i_{1v}$

$$Q_{1v} = \sqrt{S_{1v}^2 - P_{1v}^2} = \sqrt{(v_{1v} i_{1v}) - P_{1v}^2} \quad (\text{II. 8})$$

$$Q_{1v} = \frac{v_{1v}^2}{X_m} \Rightarrow X_m = \frac{v_{1v}^2}{\sqrt{(v_{1v} i_{1v}) - P_{1v}^2}} \quad (\text{II. 9})$$

2.7.2 Essai en court-circuit

On ajuste la tension v_s pour obtenir un courant i_{1cc} qui est le courant nominal au primaire et on mesure la tension v_{1cc} , i_{1cc} ; le courant au primaire et P_{1cc} la puissance dissipée. (Figure II.9)

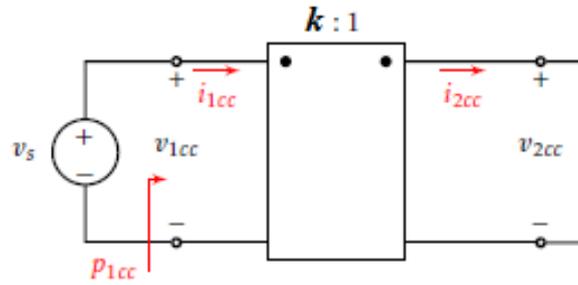


Figure II. 9 Essai en court-circuit d'un transformateur.

On suppose que R_m et X_m des effets négligeables et in obtient : **(Cormier)**

- Les résistances : $R_{eq} = R_1 + K^2 R_2$

$$p_{1cc} = i_{1cc}^2 R_{eq} \Rightarrow R_{eq} = \frac{p_{1cc}}{i_{1cc}^2} \text{ (II. 10)}$$

- Les réactances équivalents : $X_{eq} = X_1 + K^2 X_2$.

$$Q_{1cc} = \sqrt{s_{1cc}^2 - p_{1cc}^2} = \sqrt{(v_{1cc} i_{1cc})^2 - p_{1cc}^2} \text{ (II. 11)}$$

$$Q_{1cc} = i_{1cc}^2 X_{eq} \Rightarrow X_{eq} = \frac{\sqrt{(v_{1cc} i_{1cc})^2 - p_{1cc}^2}}{i_{1cc}^2} \text{ (II. 12)}$$

2.7.3 Pertes dans un transformateur de puissance

Les pertes d'un transformateur de puissance se composent des pertes à vide (pertes fer) et les pertes en charge (pertes cuivre). **(Hering, 2007)**

$$W = W_{fe} + W_{cu} * \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \text{ (II. 13)}$$

Ou :

- S : puissance nominale du transformateur [W]
- S_n : charge appliqué aux bornes [VA]

2.7.3.1 Pertes fer

Elles se produisent au sein du noyau ferromagnétique et constant quel que soit le régime de charge,

C'est la somme des pertes par hystérésis et des pertes par courant de Foucault.

2.7.3.1.1 Pertes par courant de Foucault

L'induction crée des courants au sein du noyau de fer, qui chauffe ce dernier par effet Joule. Elles sont minimisées par l'utilisation de tôles magnétiques vernies, donc isolées électriquement les unes des autres pour constituer le circuit magnétique, ce en opposition à un circuit massif. Elles sont proportionnelles au carré de la fréquence. (Wildi, 2003)

2.7.3.1.2 Pertes par hystérésis

Le changement de direction permanent du flux oblige le fer à se réorienter lui aussi en permanence, cela ne se fait pas sans frottement ce qui crée ces pertes. (Renvoizé, 2010)

La surface du cycle d'hystérésis s'exprime en (*joule/m³*). Elle correspond à un échauffement du matériau dû aux frottements des moments magnétiques. (Lounis Aziz, 2012)

$$P_h \approx fVS_h \approx fV(B_{\max}) \quad (\text{II. 14})$$

Ou :

- f : est la fréquence de l'excitation magnétique.
- V : est le volume de fer subissant le cycle.
- S_h : est la surface du cycle qu'on admet être proportionnelle à $(B_{\max})^2$.

2.7.3.2 Pertes cuivre

Sont appelées également pertes par effet joule, elles dépendent de la résistance de ces enroulement et de l'intensité du courant qui les traverse, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.

$$P_J = \sum_i R_i I_i^2 \quad (\text{II. 15})$$

- R_i : Résistance de l'enroulement i .
- I_i : Intensité du courant qui le traverse.

2.7.4 Rendement d'un transformateur

Le rendement (η) d'un transformateur est défini comme le rapport de la puissance active au secondaire sur la puissance active au primaire.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \text{ (II. 16)}$$

2.8 Refroidissement de transformateur

L'augmentation de température du transformateur provoque une dégradation de l'isolation utilisée dans le transformateur, endommageant les différentes pièces et une défaillance du transformateur.

Donc un système de refroidissement est toujours mis en place pour maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables.

Un système de refroidissement est caractérisé par un code de quatre lettres:

La première lettre désigne le fluide de refroidissement interne : **O** pour l'huile minérale (99 % des cas), **K** pour les liquides isolant ayant un point de feu > 300°C, **L** pour les liquides à point de feu non mesurable.

La seconde lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement interne : **N** pour naturel, **F** pour forcé (présence d'une pompe, mais l'huile circule librement), **D** pour forcé et dirigé (pompe et l'huile est forcée et dirigée à travers les enroulements).

La troisième lettre indique le fluide de refroidissement externe : **A** pour air, **W** pour eau.

Enfin la quatrième lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement externe : **N** pour naturel, **F** pour forcé (ventilateurs).

Ainsi le mode de refroidissement le plus simple est l'ONAN. Concrètement l'huile colporte la chaleur vers l'extérieur du transformateur et est refroidie à l'intérieur du radiateur, qui évacue la chaleur par convection. Des ventilateurs permettent d'augmenter cette dernière.

Des canaux permettant la circulation de l'huile sont aménagés dans le noyau et les enroulements afin de permettre l'évacuation de leur chaleur. (**Elec-13, 2017**)

2.8.1 Exemples

2.8.1.1 ONAN (Oil Natural Air Natural)

Les circulations de l'huile non forcée dans le transformateur.

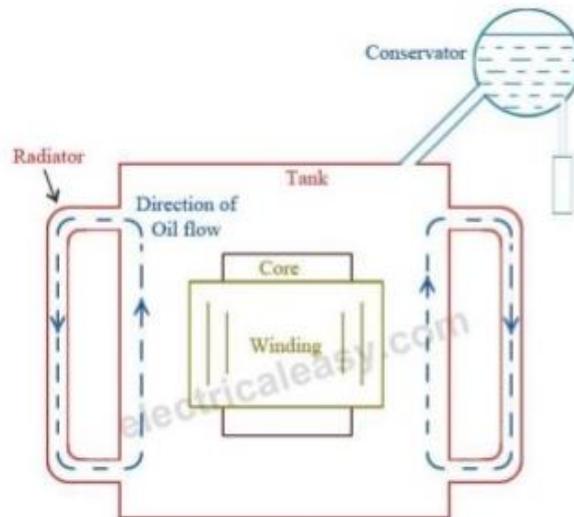


Figure II. 10 Refroidissement d'un transformateur de type ONAN.

2.8.1.2 ONAF (Oil Natural Air Forced)

Les circulations de l'huile dans le transformateur est no forcée est refroidi à l'aide de l'air ventilé sur ses radiateurs.

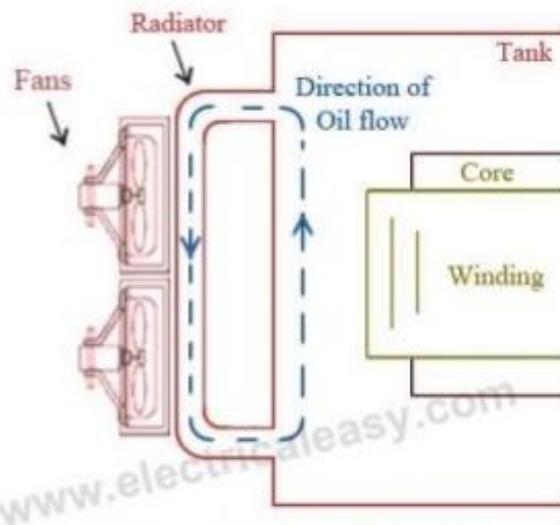


Figure II. 11 Refroidissement d'un transformateur de type ONAF.

2.8.1.3 OFWF (Oil Forced Water Forced)

La circulation de l'huile est forcée à l'aide d'une pompe vers l'échangeur de chaleur; l'eau traverse le circuit de l'échangeur à l'aide d'une pompe

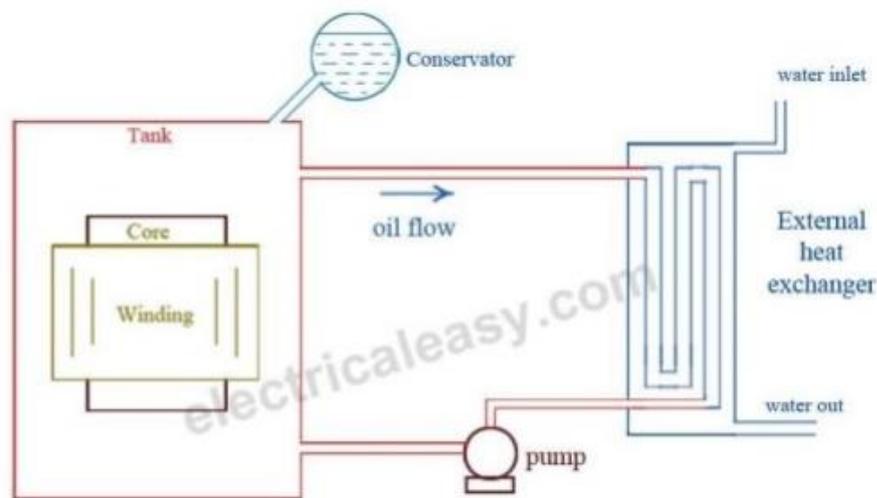


Figure II. 12 Refroidissement d'un transformateur de type OFWF.

2.9 L'isolation électrique des transformateurs

L'isolement exige une séparation physique entre circuit primaire et circuit secondaire, ce qui sera réalisé par des composants isolants. **(legrand, 2018)**

Le bon fonctionnement des transformateurs de haute tension repose en grande partie sur leur isolation électrique et sur le contrôle de leur température. **(Janvier-Sylvestre, 2011)**

2.9.1 Principe d'isolation des transformateurs

La fabrication de transformateurs de puissance haute tension ou moyenne tension nécessite des quantités importantes de papier et d'huile isolante. Ces quantités sont proportionnelles à la puissance assignée d'un transformateur et à sa tension de service. **(NormeCEI, 1995)**

Les transformateurs contiennent deux types de matériaux isolants majoritaires : de l'huile minérale, liquide diélectrique qui permet l'évacuation de la chaleur et des matériaux ligno-cellulosiques. Parmi ces derniers figurent les papiers de guipage qui entourent les fils de cuivre des bobinages et des écrans en carton permettant le support mécanique des bobinages et l'isolation électrique entre les différentes phases du transformateur. **(R.Fournié, 1990)**

2.9.2 Les types d'isolation dans les transformateurs

L'isolation électrique est une partie très nécessaire dans le fonctionnement de transformateur. Elle contient deux types d'isolateurs majoritaires :

- Isolant solide : papier et carton.
- Isolant liquide : huile.

2.9.2.1 Isolation solide

Elle est constituée des papiers et des cartons. Les papiers et les cartons sont des matériaux isolants possédant des caractéristiques diélectriques excellentes ; ces isolants assurent plusieurs fonctions. Ils sont utilisés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement. Afin d'augmenter leur rigidité diélectrique et réduire le risque de décharge partielles ; les papiers et les cartons sont imprégnés par le diélectrique liquide (huile).

2.9.2.2 Isolation liquide

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellululosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation, la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage. (**N.Berger, 2002**)

Les transformateurs remplis d'huile ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée dans les transformateurs de puissance.

Rôle principal des huiles est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer ses propriétés (**Bartnikas, 1994**). Elles jouent aussi le rôle de refroidissement en captant la chaleur dissipée par les éléments actifs pour la restituer à une source froide. L'huile isolante joue aussi le rôle d'isolant entre les différentes parties des transformateurs :

- Isolation entre conducteurs sous tension.
- Isolation entre enroulements basse et haute tension.
- Isolation entre enroulement et cuve (terre).

2.9.2.3 Propriétés des liquides isolants

Les propriétés et les caractéristiques des liquides isolants sont (**R.Bartnikas, 1994**):

2.9.2.3.1 Propriétés électriques des huiles

Les caractéristiques électriques des liquides dépendent de leur formation (composition, constitution moléculaire, etc. ...) et de leurs conditions d'utilisation ou de conditionnement (**I.Höhlein, 2006**).

La permittivité ϵ , la résistivité ρ , le facteur de pertes diélectriques $\tan \delta$ et la rigidité diélectrique E_c sont les caractéristiques électriques principales. Outre la structure du liquide et le conditionnement, ces propriétés dépendent de la tension appliquée, de la fréquence et de la température (Tobazeon, 1996). Dans l'industrie, ces mesures sont souvent rapportées à la température de 90°C.

2.9.2.3.2 Permittivité ou la constante diélectrique

La permittivité est une caractéristique intrinsèque de l'huile. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule. Elle définit la possibilité, sous l'action du champ électrique, de libérer des charges. Elle est surtout due aux phénomènes de polarisation électronique et atomique. (Adel, 2015)

La permittivité décroît avec l'augmentation de la température et de la fréquence. Le milieu dont la permittivité est la plus faible peut supporter une contrainte électrique assez élevée. (N.Berger, 2002)

2.9.2.3.3 Conductivité et Résistivité

La résistivité est une propriété fortement dépendante du conditionnement. Ainsi, la résistivité d'une huile est influencée par la présence de substances étrangères considérées comme impuretés (poussières, particules, gaz et humidité), qui même en quantité aussi faible que quelques *ppm* (*mg/l*) ont une influence sur les valeurs mesurées. (Tobazeon, 1996)

La conductivité n'est pas une propriété intrinsèque d'un liquide isolant. Elle est liée à la présence d'infimes quantités (en général, inférieures à 1 *ppm*) d'impuretés ionisables.

2.9.2.3.4 Facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$)

Le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau isolant est la tangente de l'angle de pertes qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte. Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes diélectriques qui se traduisent par un échauffement du liquide plus ou moins important. La cause principale de ces pertes est la présence d'un courant de fuite qui traverse le liquide sous un champ électrique. (Adel, 2015)

2.9.2.3.5 Rigidité diélectrique et Tension de claquage

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans décharge disruptive. Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans des conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, la distance et la nature font l'objet d'une norme. Ce paramètre est connu sous le

nom de tension de claquage. (*Le chapitre trois est consacré à la mesure de la tension de claquage pour plusieurs échantillons d'huile, vu l'importance de cette mesure pour évaluer la qualité de l'huile afin d'éviter les dégâts électriques*)

2.9.2.4 Propriétés physiques des huiles

Les propriétés physiques des huiles isolantes sont très importantes dans le traitement et la surveillance des transformateurs de puissance.

Dans l'étude d'huile isolant pour le transformateur il y a des paramètres importants on peut les classées comme suivants :

2.9.2.4.1 Couleur et aspect

La couleur et l'aspect fournissent rapidement des informations utiles qui peuvent être obtenues sur site. Une personne expérimentée peut remarquer immédiatement un phénomène anormal. L'aspect d'une huile peut indiquer la présence d'eau libre et d'impuretés telles que fibres ou particules de cellulose. Le test visuel d'une huile permet aussi de détecter la présence des corps en suspension, et d'évaluer la couleur et la viscosité. La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve, Elle dépend des hydrocarbures qui la constituent. (Adel, 2015)

2.9.2.4.2 La viscosité

La viscosité peut être définie comme étant la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. C'est donc, la résistance au mouvement que manifestent tous les fluides. Les huiles pour transformateurs ont une viscosité très basse ; ce qui permet une circulation plus facile, donc un refroidissement plus efficace.

Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. Pour un liquide, la viscosité tend généralement à diminuer lorsque la température augmente.

2.9.2.4.3 Point d'écoulement

Le point d'écoulement est également un paramètre important dans le choix d'une huile. Il est défini comme étant la température au-dessous de laquelle le liquide ne coule plus. Deux phénomènes peuvent être responsables de la perte d'écoulement :

- L'augmentation de viscosité à basse température.
- La cristallisation de certains composants (notamment les paraffines dans l'huile minérale).

2.9.2.4.4 Le point de congélation

Le point de congélation est la température la plus haute à laquelle le produit analysé reste immobile quand on incline à 45° le tube qui le contient. Pour une fraction pétrolière, le point de congélation s'étend sur tout un intervalle de température, du fait de la présence des différentes familles d'hydrocarbures. Cette caractéristique présente un avantage dans le domaine du raffinage, étant donné qu'elle est la base de la séparation par cristallisation fractionnée. Un point de congélation bas dénote une nature de tendance aromatique. Un point de congélation élevé (supérieur à 70-75°C) est relatif à des fractions riches en paraffines. **(R.Bartnikas, 1994)**

2.9.2.4.5 La capacité thermique

La capacité thermique massique ou chaleur spécifique est définie comme étant la quantité de chaleur pour augmenter d'un Kelvin la température d'un kilogramme d'une substance, sans qu'il y ait de changement de phase. Ainsi, pour une huile de transformateur, plus la valeur de chaleur spécifique est élevée, moins le transformateur s'échauffera. La capacité thermique croît avec la température et décroît avec la masse volumique. **(Kang, 1967)**

2.9.2.4.6 La conductivité thermique

La conductivité thermique (λ), mesurée en watts par mètre-kelvin, exprime le flux thermique s'écoulant, en régime permanent, sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent. Les valeurs usuelles sont de l'ordre de 0,14 W/(m.K). A 20 °C, λ vaut 0.11 à 0.12 W/(m.K). **(I.Höhlein, 2006)**

2.9.2.4.7 La masse volumique et le coefficient de dilatation volumique

La masse volumique est le rapport d'une masse m du liquide à son volume v déterminée à la température T . C'est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend de la composition chimique. Ainsi, les huiles minérales paraffiniques ont une masse volumique plus faible que les huiles naphthéniques. **(Hirschler, 2000)**

2.9.2.5 Propriétés chimiques

2.9.2.5.1 Acidité

L'acidité d'une huile en service résulte des produits d'oxydation acides **(Nynas, 2004)**. Une huile acide peut endommager le papier et les parties métalliques du transformateur.

L'acidité s'exprime par l'indice de neutralisation ou nombre de milligrammes de potasse alcoolique pour neutraliser un gramme d'huile. Elle est de l'ordre de 0,005 (mg KOH)/g pour une huile neuve, et atteint en fin de vie des valeurs de 0,5 correspondant au début des précipitations des boues. On peut effectuer ces mesures par titrage calorimétrique (**ISO6618, 1997**), ou par titrage potentiométrique. (**CEI62021, 2003**)

2.9.2.5.2 Teneur en eau

L'humidité joue un rôle néfaste pour la rigidité diélectrique aussi bien dans l'huile et dans le papier avec lequel elle est associée. Cet effet de réduction est cependant plus important dans l'huile (**CEI296, 1982**). L'augmentation de la teneur en eau joue donc un rôle prépondérant dans l'accélération du processus de cette dégradation. (**Nacer, 2009**)

2.9.2.5.3 La stabilité à l'oxydation

L'oxydation des huiles minérales conduit à la formation d'acides organiques, dépôts insolubles et boues. Ces produits sont très nocifs dans les transformateurs électriques (**R.Bartnikas, 1994**). Les acides et les composés polaires contribuent à l'augmentation des pertes diélectriques dans le liquide isolant et ont donc une influence néfaste sur le fonctionnement des transformateurs (**C. Lamarre, 1987**), Conduisant parfois à une perte totale de l'équipement.

2.9.2.6 Principaux types des isolants liquides

Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. On distingue trois types : les huiles végétales (produit naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés) et les liquides de synthèse. Cette classification est liée à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées, puis les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications. Dans ce qui suit, nous présentons les trois types d'isolants liquides utilisés dans les transformateurs. (**DANG, 2011**)

2.9.2.6.1 Huiles minérales

Les huiles minérales sont obtenues par raffinage de bruts de pétrole ; elles sont les plus utilisées dans les matériels électriques. Elles possèdent de bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, et une bonne compatibilité avec les isolants celluloseux. Malgré les tensions sur le marché international, les huiles minérales sont encore disponibles et à des prix assez bas. C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont les plus communément utilisées dans les transformateurs de puissance. Aussi, avec le développement de nouvelles techniques de traitement (séchage, purification ...), les propriétés des huiles minérales n'ont cessé de s'améliorer depuis leur première utilisation au début du siècle dernier. (**DANG, 2011**)

2.9.2.6.1.1 Structure de base de l'huile minérale

L'huile minérale est composée de près de 3000 produits différents dont 90% ne sont pas encore identifiés (N.Berger, 2002). On peut classer les huiles minérales par rapport au nombre de carbones paraffiniques (Cp) et naphéniques (Cn) en trois classes.

2.9.2.6.1.2 Paraffinique

Connues aussi sous le nom des alcanes, ce sont des hydrocarbures saturés de formule générale, ils peuvent être linéaires (n-alcane) ou ramifiés (iso-alcane) (R.Bartnikas, 1994). Les alcanes sont aussi connus sous le nom de paraffine ou cire et ont de mauvaises propriétés d'écoulement aux basses températures. Leur structure est montrée dans la Figure II.13.

Les principales caractéristiques de cette catégorie sont :

- Une faible densité pour une viscosité donnée.
- Variation relativement faible de la viscosité en fonction de la température.
- Faible volatilité pour une viscosité donnée.
- Faible pouvoir solvant.



Figure II. 13 Structures chimique d'une huile paraffinique.

2.9.2.6.1.3 Naphténique

Les molécules de ce type d'huile sont constituées d'hydrocarbures cycliques à liaison saturée (R.Bartnikas, 1994) comme le montre la Figure II.14. Elle possède une densité relativement élevée pour une viscosité donnée, une viscosité sensible à la température, un pouvoir solvant relativement élevé, et de bonnes propriétés de graissage. (N.Berger, 2002)

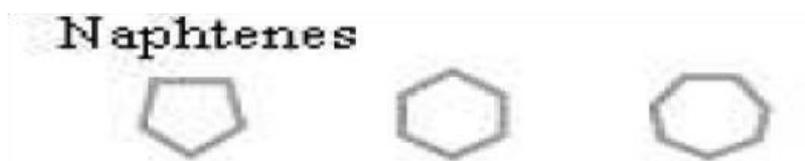


Figure II. 14 Structure chimique d'une huile naphénique.

2.9.2.6.1.4 Aromatique

Ces molécules sont des composés cycliques (figure II.15), aussi appelées hydrocarbures insaturés, de formule générale C_nH_{2n-6} . Elles sont totalement différentes des molécules paraffiniques et naphthéniques (R.Bartnikas, 1994), mais jouent un rôle très important dans les propriétés d'une huile minérale. Elles sont fortement oxydables, ce qui provoque la formation de produits résineux ou aspartiques accompagnés de dérivés corrosifs.

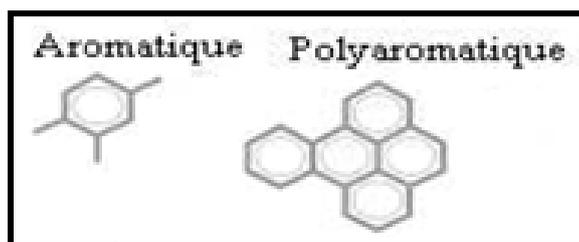


Figure II. 15 Structure chimique d'une huile aromatique.

2.9.2.6.2 Huiles synthétiques

Les huiles synthétiques sont apparues durant la seconde guerre mondiale ; Elles ont une durée de vie supérieure aux huiles minérales. Ces huiles sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de lieux sensibles tels que les aéroports et les hôpitaux (transformateurs de distribution et traction). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés de la pétrochimie. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs :

- Les huiles Ester de pentaérythritol (Ester synthétique ou ester organique).
- Les huiles silicones.
- Les hydrocarbures chlorés (halogénés) tels que les PCB.

2.9.2.6.3 Huiles végétales

Les huiles végétales sont produites à base d'esters naturels dont la composition chimique est simple (quelques dizaines de molécules). Les principales caractéristiques des liquides de cette famille sont la résistance au feu, la solubilité élevée de l'eau, une toxicité faible et une biodégradabilité élevée (due notamment à une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse). Il a été montré que les huiles végétales peuvent satisfaire les spécifications exigées pour certaines applications électriques. Ainsi, pour des raisons autant écologiques qu'économiques ou techniques, des tentatives ont été faites pour utiliser des huiles végétales à la place de l'huile minérale dans les transformateurs basse et moyenne tensions. De nombreux prototypes de transformateurs de distribution ont été

réalisés avec succès. Leur utilisation dans les transformateurs de puissance suscite actuellement de nombreuses études.

Les généralités et les propriétés des huiles végétales sont bien détaillées dans les chapitres I et III.

2.10 Les transformateurs de puissance à huile végétale

L'huile minérale isolante traditionnelle est utilisée depuis des centaines d'années, mais elle présente des inconvénients tels qu'un point d'inflammation bas, une détérioration lente, une pollution facile de l'environnement et une faible capacité de surcharge. Par rapport aux transformateurs à huile minérale traditionnels, les transformateurs d'huile végétale présentent les avantages d'un risque d'incendie extrêmement faible, d'une forte capacité de surcharge et d'un faible coût de cycle de vie. De plus, l'huile végétale étant une ressource renouvelable extraite des graines de plantes, elle peut être comparée à l'huile minérale. Réduisez efficacement les émissions de carbone. De plus, les transformateurs d'huile végétale ont une plus large gamme d'applications par rapport aux transformateurs d'huile minérale existants et sont particulièrement adaptés aux zones ayant des exigences élevées en matière de sécurité incendie et de protection de l'environnement, telles que les zones densément peuplées et les zones de protection de l'environnement. (Xing.wentao, 2021)



Figure II. 16 Transformateurs à huile végétale par china XD group.

2.10.1 Les avantages des transformateurs à huiles végétales

Le transformateur d'huile végétale est une sorte de transformateur de puissance vert qui utilise de l'huile isolante d'ester naturel (huile végétale) comme moyen d'isolation et de refroidissement. Il présente de nombreux avantages par rapport aux transformateurs à huile minérale traditionnels. (PCE, 2019)

Excellentes performances environnementales. L'huile végétale ne contient aucun composant nocif, aucune toxicité et aucun danger dans l'eau et le sol, une bonne biodégradabilité et une compatibilité environnementale. Le taux de biodégradation en 28 jours peut atteindre 97%, et il ne polluera pas l'environnement. L'huile végétale est non toxique après infusion, la vitesse de pénétration est lente et elle peut être complètement décomposée. Le coût de l'infiltration et du traitement est faible, et il n'y a pas de pollution de l'eau et du sol.

Bonne sécurité. Le point d'inflammation de l'huile végétale est généralement supérieur à 350 °C, tandis que l'huile minérale est de 160 °C. Le risque d'explosion d'un incendie de transformateur est bien inférieur à celui d'un transformateur à huile minérale. L'huile végétale prend plus de temps à s'enflammer que l'huile minérale et nécessite une température plus élevée. Dans le même temps, l'huile végétale s'éteint pendant une courte période et le taux de génération de fumée est plus faible. Par rapport aux huiles minérales, les huiles végétales sont moins volatiles et produisent moins de gaz lorsqu'elles sont brûlées, ce qui réduit les défauts d'arc à haute énergie et réduit le risque d'explosions et de dommages collatéraux associés.

Excellentes performances électriques. Le constant diélectrique de l'huile végétale est d'environ 3,2 et la distribution de l'intensité du champ dans le système d'isolation en papier huilé est plus raisonnable. Les bonnes propriétés d'absorption d'humidité de l'huile végétale peuvent emprisonner l'humidité du transformateur dans l'huile et améliorer les propriétés électriques des matériaux isolants solides. Les transformateurs d'huile végétale ont une capacité de surcharge supérieure.

La durée de vie du papier isolant du transformateur et conservant une meilleure rigidité diélectrique. L'huile végétale a une polarité moléculaire plus élevée et est moins imperméable, de sorte qu'elle absorbe plus d'humidité dans le papier isolant et prolonge la durée de vie thermique du papier isolant d'environ 6 fois.

2.10.2 Des expériences sur le développement des transformateurs d'huiles végétales

2.10.2.1 Huiles végétales FR3 (Lizardo, 2018)

Le géant américain Cargill a produit de l'huile végétale isolante FR3 pour les transformateurs comme alternative à l'huile minérale et a été utilisée dans les transformateurs de haute tension jusqu'à 420kV. FR3 a été utilisé dans plus d'un million de

CHAPITRE II : Utilisations des huiles végétales dans les transformateurs de puissance

transformateurs dans le monde et a été vérifié par plus de 250 tests, répond aux spécifications IEEE et IEC et est certifié FM Global.

Le fluide Cargill FR3 a un point de feu de 360 °C, soit plus de deux fois le point de feu de l'huile minérale. Cela améliore considérablement la sécurité incendie de tout transformateur, en particulier dans les zones densément peuplées et à ce jour, aucune défaillance liée au feu n'a été signalée avec les transformateurs FR3.

De plus, les laboratoires (Underwriters) classé Cargill FR3 dans la classe K, un liquide moins inflammable et avec cette sécurité incendie, les entreprises peuvent :

- Réduire les primes d'assurance.
- Élimine le besoin de systèmes de lutte contre l'incendie plus coûteux.



Figure II. 17 Transformateur à huile végétale FR3 développé par Cargill.

2.10.2.2 Transformateur à huile végétale 420 kV par siemens

Siemens a produit le premier transformateur à grande échelle au monde qui utilise de l'huile végétale. À l'avenir, l'appareil reliera le niveau de très haute tension de 380 kV au réseau de 110 kV de la sous-station de Bruchsal Kändelweg près de Karlsruhe, en Allemagne. Les transformateurs sont généralement refroidis et isolés avec de l'huile minérale ou de silicone. En comparaison, les huiles végétales sont plus écologiques et

moins inflammables. Jusqu'à présent, Siemens utilisait une isolation à l'huile végétale dans les transformateurs de puissance avec des tensions allant jusqu'à 123 kV. Le nouveau transformateur est conçu pour 420 kV. C'est la première fois que l'huile végétale est utilisée avec cette catégorie de tension au lieu de l'huile minérale pour l'isolation et le refroidissement.



Figure II. 18 Transformateur de 420 KV à huile de végétale par siemens.

2.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière générale la technologie des transformateurs de puissance. L'isolation électrique (surtout l'isolation liquide) et les propriétés physico chimiques et électriques sont présentées aussi dans ce chapitre. Nous avons aussi donné dans ce chapitre des exemples sur des transformateurs à huile végétales.

La tension de claquage est une des propriétés électriques pour évaluer la qualité de l'huile ; une étude expérimentale de cette tension pour les huiles végétales et leurs mélanges est présenté dans le chapitre trois.

Chapitre III :
Etude expérimentale sur la
tension de claquage des
huiles végétales

3 CHAPITRE III : Étude expérimentale sur la tension de claquage des huiles végétales

3.1 Partie 1 : Bibliographie sur le claquage des diélectriques liquides et les facteurs d'influence sur leurs tests

3.1.1 Introduction

Les transformateurs de puissance sont immergés dans l'huile afin d'assurer une isolation électrique efficace par imprégnation de l'isolation cellulosique et de réaliser une bonne évacuation de la chaleur générée par la partie active (circuit magnétique et bobinage) vers l'extérieur. Des propriétés physico-chimiques satisfaisantes, une bonne compatibilité avec les isolants solides et un faible coût font de l'huile végétale peut être un diélectrique adéquat pour les transformateurs électriques.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement à la tension de claquage des huiles végétales, la plupart de ces huiles ne sont pas utilisées dans les transformateurs de puissance. Nous présentons aussi les différents types des mélanges d'huiles végétales isolantes avec l'huile minérale. L'utilisation d'une huile isolante dans un transformateur de puissance ne peut être envisagée que si cette dernière remplit certains critères dont les principaux sont : une bonne tenue diélectrique, un faible facteur de pertes (ou de dissipation), un bon point d'écoulement (faible viscosité) pour assurer un bon transfert de chaleur.

3.1.2 Essais sur les huiles isolantes

3.1.2.1 Claquage des huiles diélectriques liquides

Les transformateurs de puissance en haute tension contiennent une grande quantité de l'huile isolante pour l'isolation et le refroidissement. Les bonnes qualités diélectriques de l'huile isolante sont donc une condition importante pour une isolation correcte dans les transformateurs.

Les trois propriétés importantes d'un diélectrique liquide sont la conductivité, la constante diélectrique et la rigidité diélectrique (la tension de claquage). La conductivité et la rigidité sont sensibles aux impuretés ou à d'autres facteurs, alors que la constante diélectrique apparaît comme une caractéristique du matériau. La rigidité diélectrique de l'huile isolante dépend essentiellement de sa composante, de sa préparation et son vieillissement. Sa détermination est très importante dans les essais à haute tension des transformateurs.

Beaucoup d'aspects sur le claquage des liquides ont été étudiés, ces dernières décennies mais les résultats et conclusions de beaucoup de chercheurs s'ont pu être réconciliés et donner une théorie générale applicable aux liquides, comme les données indépendantes sont souvent différentes et parfois contradictoires. La raison principale pour

cette situation est le manque de théorie compréhensive concernant la base physique de l'état du liquide qui formerait la structure dans laquelle les observations pourraient être comparées et liées entre elles.

Il y a ceux qui tentent d'expliquer le claquage des liquides sur un modèle qui est une extension de claquage des gaz basée sur l'ionisation d'avalanche des atomes induite par des électrons de conduction quand un champ électrique est appliqué. Les électrons sont supposés être émis de la cathode ou par émission de champ électrique. Par contre il y a d'autres qui pensent, que la formation de bulles dans le liquide et son effet sur la force de claquage a longtemps été reconnue. Dans une autre approche, le claquage des liquides est suggéré être créé par des particules étrangères suspendues. Il est bien connu que la présence de particules minuscules dans un isolant liquide baisse radicalement la rigidité des liquides

3.1.2.2 Les facteurs d'influence sur les tests diélectriques

De très nombreux phénomènes physiques, électriques et chimiques influent sur les propriétés diélectriques des huiles isolantes. On appelle facteurs d'influence sur les essais de rigidité d'isolement, tous les éléments qui peuvent modifier ces propriétés.

Parmi les facteurs d'influence les plus importants on peut citer : les impuretés et les gaz dissous dans le liquide, la pression hydrostatique, la configuration des électrodes, la température, et la durée d'application de la tension.

3.1.2.2.1 Paramètres électro géométriques

En augmentant la distance entre les électrodes, la tension de claquage augmente mais la rigidité diélectrique du liquide diminue (Figure III.1) (**Tobazéon, 1997**). En champ non uniforme, lorsque la tension appliquée dépasse un certain niveau, une densité d'énergie sous forme d'impulsions est injectée à partir d'aspérités de la pointe. Le rayon de courbure de la pointe joue un rôle important sur la nature et la durée des phénomènes pré disruptifs, plus ce rayon est faible, plus l'intensité du champ électrique obtenu est considérable.

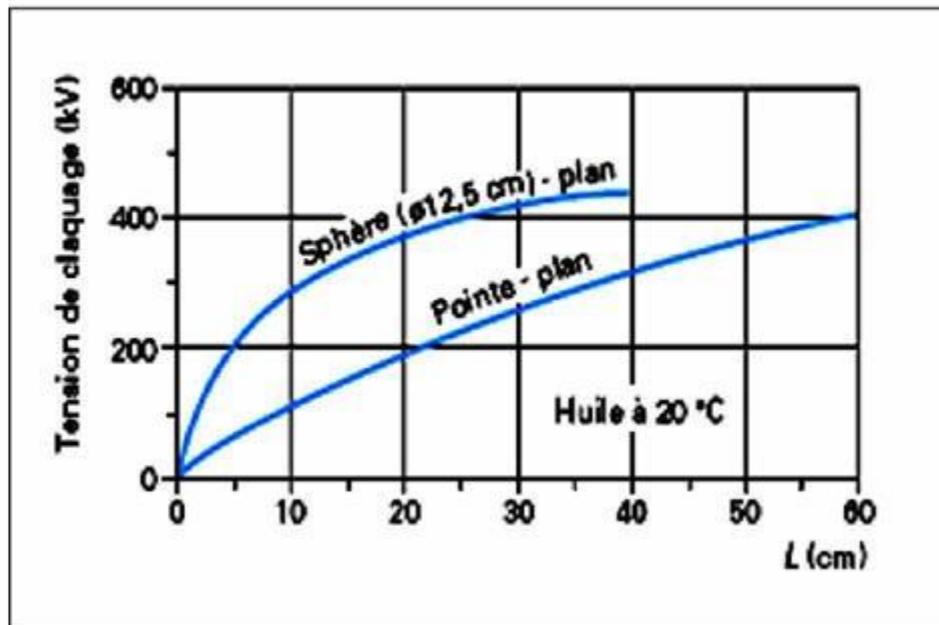


Figure III. 1 Valeur efficace de la tension de claquage AC d'une huile de transformateur en fonction de la distance inter-électrodes, en géométrie pointe-plan et sphère-plan.

3.1.2.2.2 Pression hydrostatique

Il est connu depuis longtemps que la pression hydrostatique a un effet considérable sur la tension de claquage des diélectriques liquides ; celle-ci est d'autant plus élevée que la pression est accrue (B. Moula, 2007). Tels que l'augmentation de la pression hydrostatique améliore la rigidité diélectrique du liquide.

3.1.2.2.3 Température

L'augmentation de la température entraîne la diminution de la rigidité diélectrique d'huile. A des températures élevées, les conditions pour avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent (B. Moula, 2007).

3.1.2.2.4 Tension

Le temps de montée de la tension, sa polarité, sa durée et son amplitude affectent énormément la vitesse de propagation et la forme du streamer. Pour des niveaux de tension légèrement supérieurs à la tension seuil de génération, plusieurs auteurs confirment l'apparition de bulles gazeuses au voisinage de l'électrode pointe (B. Moula, 2007).

3.1.2.2.4.1 Durée d'application de la tension

Si la durée d'application de tension diminue, la tension de claquage augmente. La Figure III.2 ci dessous présente la caractéristique $U_c(t)$ la tension de claquage en fonction du temps d'huile de transformateur.

Plus la durée d'application de la tension augmente, plus l'effet des différentes impuretés ne se fait ressentir et la tension de claquage diminue. Pour les temps inférieurs à $10\mu s$, le claquage a un caractère électrique et pour les longues durées, il a un caractère thermoélectrique.

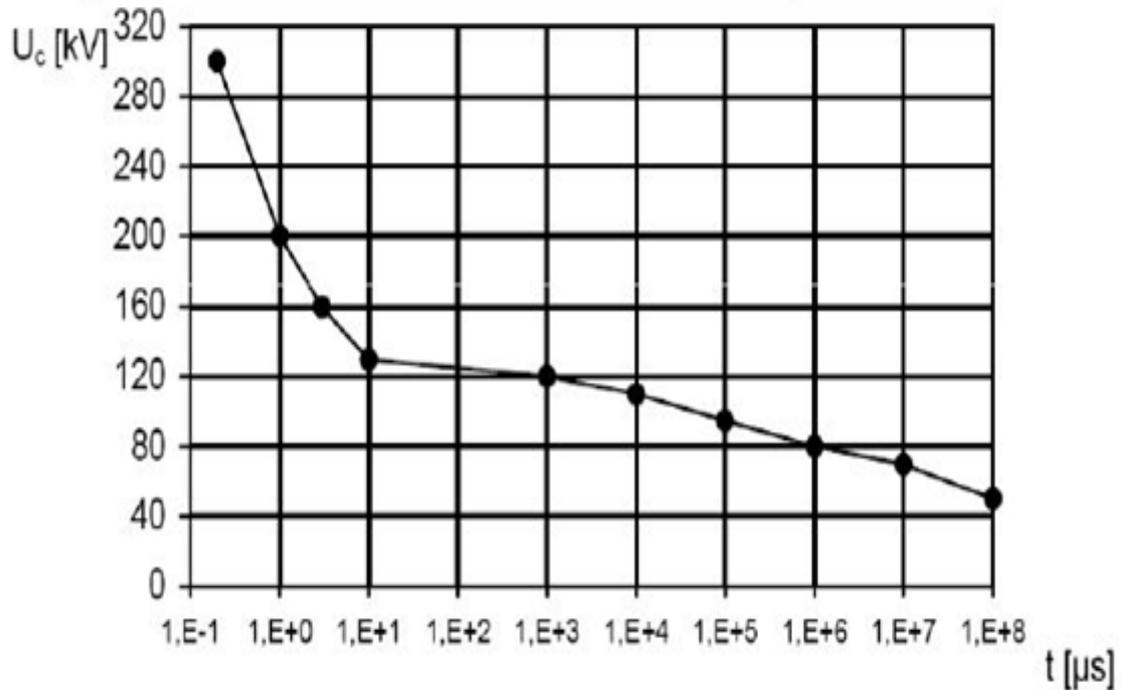


Figure III. 2 La tension de claquage en fonction la durée d'application de tension.

3.1.2.2.5 Humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement la rigidité diélectrique de ce dernier (Figure III.3). Une huile saturée en eau peut conduire à la formation de petites gouttelettes, suite à des fluctuations de la température de l'huile. Ces gouttelettes très fines peuvent conduire à des émulsions eau huile. (Tobazéon, 2003)

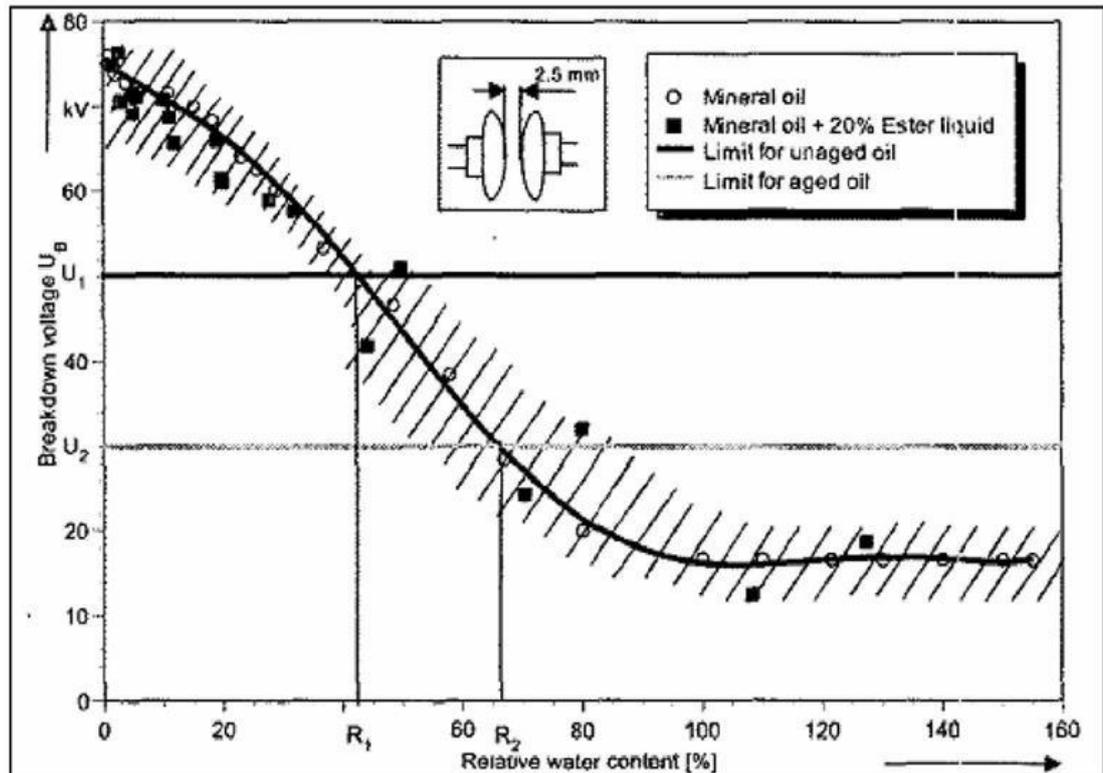


Figure III. 3 La tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau, dans l'huile de transformateur.

3.1.2.2.6 Nombre de claquages

Il a été observé par plusieurs chercheurs, que la tension de claquage de l'huile, dans un système de configuration donnée, augmentait en fonction du nombre d'essais, restait ensuite constante et puis diminuait. Le nombre d'essais variait de 20 à 40.

Ceci peut être expliqué par l'élimination des bulles de gaz par les premiers claquages, cependant des claquages répétés et nombreux détériorent le liquide.

3.1.2.2.7 Gaz dissous

La présence d'oxygène dissous entraîne une augmentation du champ de claquage, vraisemblablement par diminution du libre parcours moyen des électrons, par exemple de l'oxygène dissous à saturation dans du n-hexane préalablement dégazé éleva sa rigidité de 50 %.

Il est important de noter qu'en pratique, ces facteurs n'agissent jamais seuls (sauf en laboratoire au cours d'expériences spécialement mises en œuvre pour étudier un facteur particulier), bien souvent ils interagissent en modifiant les lois qui les caractérisent et rendent ainsi plus complexes leurs analyses.

3.1.3 Critères de choix des liquides diélectriques

Les techniques actuelles les plus puissantes pour évaluer l'état d'un transformateur sont fondées sur l'analyse des différentes propriétés physico-chimiques de l'huile. En effet, pour assurer la continuité de fonctionnement de l'appareil, l'huile isolante doit avoir les qualités suivantes : **(D.Ouakli, 1997) (Fournié, 1986)**

- Forte rigidité diélectrique.
- Stabilité thermique dans une large gamme de température.
- Grande pureté, ce qui entraîne une homogénéité et une bonne reproductibilité de la rigidité diélectrique.
- Non polaire, ce qui conduit à une faible dissociation d'espèces et conduit à une faible contamination.
- Non toxique et biodégradable, et donc conforme aux lois en vigueur sur la protection de l'environnement.
- Grand indice d'aromaticité, ce qui lui confère de bonnes propriétés de gassing.
- Une faible viscosité et un bon point d'écoulement pour assurer sa circulation.
- Un point éclair élevé.
- Une bonne stabilité chimique vis-à-vis des phénomènes d'oxydation et de décomposition.

3.1.4 Compatibilité de différentes huiles

La compatibilité de différentes huiles est un sujet de controverse qui dure depuis très longtemps. Bien que la question revête une grande importance, elle demeure toujours non tranchée si ce n'est que l'on affirme que toutes les huiles répondant aux critères de la norme CEI 60 296 sont miscibles entre elles. **(Djoudi, 2014)**

Partie 2 : Études expérimentales

3.1.5 Introduction

Les huiles isolantes biodégradables à base d'huiles végétales sont de plus en plus utilisées dans les transformateurs de puissance parce que, comparées aux huiles minérales à base de pétrole couramment utilisées, elles sont plus sûres pour l'environnement, plus saines et ont de meilleures propriétés diélectriques comme la tension de claquage (**B.S.H.M.S.Y. Matharage, 2012**). La production abondante d'huile végétale encourage l'étude de rendre ces liquides isolants plus disponibles et plus abordables pour les transformateurs de puissance. (**Caixin Sun, 2006**)

Dans cette étude, les essais expérimentaux seront menés sur l'analyse de la tension de claquage des huiles végétales en présence d'une huile minérale (mélange) dans des conditions non traitées. L'objectif de ce travail est de chercher une huile végétale optimale pour l'isolation dans les transformateurs de puissance. En général, les différents tests réalisés dans ce travail suivent les normes internationales (CEI).

Pour améliorer la tension de claquage AC, de l'huile végétale ont été mélangées à de l'huile minérale.

3.1.6 Méthode de recherche

En raison de l'importance de la tension de claquage pour la détermination de la qualité de l'huile qui assure le bon refroidissement et la bonne isolation des transformateurs de puissance, le choix le plus approprié pour le mélange d'huile, qui sera étudié ultérieurement, dépendra de la valeur de cette tension, compte tenu de son faible coût et de son respect de l'environnement. Cette étude a commencé par l'examen des recherches antérieures sur les huiles isolantes biodégradables. Tous les renseignements pertinents ont été recueillis et résumés. Les informations recueillies concernaient les tensions de claquage des huiles biodégradables, et sur l'aptitude de quelque d'huile végétale qui à remplacer l'huile minérale classique à base de pétrole dans les transformateurs de grande puissance. Cette étude est la mesure de la tension de claquage des mélanges des huiles végétales (5 échantillons) et une huile minérale sous une tension AC.

Les essais expérimentaux sont effectués au laboratoire de la haute tension de l'université USTO. L'étude du phénomène de claquage des huiles isolantes utilisées pour l'isolation et le refroidissement des transformateurs de puissance nécessite un appareil de mesure très sensible. Les essais sont réalisés à la température ambiante du laboratoire.

3.1.7 Procédure d'essai

3.1.7.1 Huiles isolants utilisés

Les échantillons d'huile utilisés dans cette étude étaient cinq huiles végétales à savoir l'huile d'Olive, Sésame, Amande douce, Cactus, et huile de Castor ; et une huile minérale, en différentes quantités (20 : 80, 50 : 50, 80 : 20).

3.1.7.2 Préparation de l'échantillon (NACER, 2009)

Les étapes de préparation des échantillons avant qu'ils ne soient prêts pour l'essai de claquage de la tension citée ci-dessous ont été respectées pour l'échantillonnage des différentes huiles :

- Décontamination et nettoyage des bouteilles:
 - Laver les bouteilles de prélèvement avec un produit de nettoyage.
 - Rincer avec de l'eau distillée plusieurs fois pour décontaminer des particules.
 - Sécher les bouteilles de prélèvement.
 - Garder les bouteilles de prélèvement fermées.
- Mélanger l'huile présente dans la bouteille de prélèvement doucement (pour éviter les bulles gazeuses) afin d'avoir une huile homogène. 250 ml d'échantillon d'huile a été rempli, comme le montre la Figure III.4. un agitateur magnétique à plaque chauffante est utilisé pour mélanger les huiles pendant 5 à 10 minutes, pour s'assurer que les huiles se mélangent correctement (la Figure III.5). (AZALI, 2018)
- Trois échantillons ont été préparés pour chaque type d'huile avec des pourcentages différents (20 % d'huile végétale avec 80 % d'huile minérale - 50 % d'huile végétale avec 50% d'huile minérale - 80% d'huile végétale avec 20% d'huile minérale).



Figure III. 4 Becher d'essai remplie d'huile.



Figure III. 5 Mélange d'huiles à l'aide d'un agitateur à plaque chauffante.

3.1.7.3 Dispositifs expérimentaux

L'appareil d'essais TUR est un équipement de laboratoire pour la détermination de la tension de claquage des isolants liquides (la Figure III.6). Le dispositif schématisé sur la Figure III.7 (BANUMATHI, 2016).



Figure III. 6 Appareil de mesure de la tension de claquage (TUR).

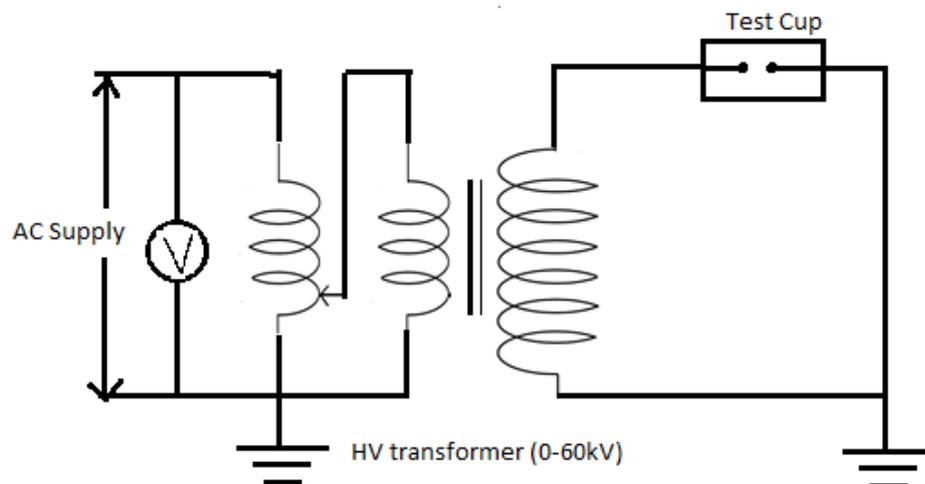


Figure III. 7 Schéma du testeur de la tension de claquage.

Ce dernier comporte les éléments suivants (**Amine Illiten, 2015**) :

- Une source de tension avec vitesses de montée de 2 kV/s.
- Transformateur élévateur pouvant délivrer une tension allant de 0 à 60 kV pour des essais en tension alternative.
- Récipient cylindrique en verre porte deux électrodes démontables (la Figure III.8). Les détails d'une cellule d'essais à électrodes hémisphériques sont donnés sur la Figure III.9.
- Un voltmètre de crête (V), à affichage permettant la mesure.
- Régulateur de tension.
- Disjoncteur.
- Système de limitation d'énergie (résistance).
- Enfin, l'ensemble dispositif-échantillons est entouré par une cage de protection.



Figure III. 8 La cellule d'essais à électrodes hémisphériques.

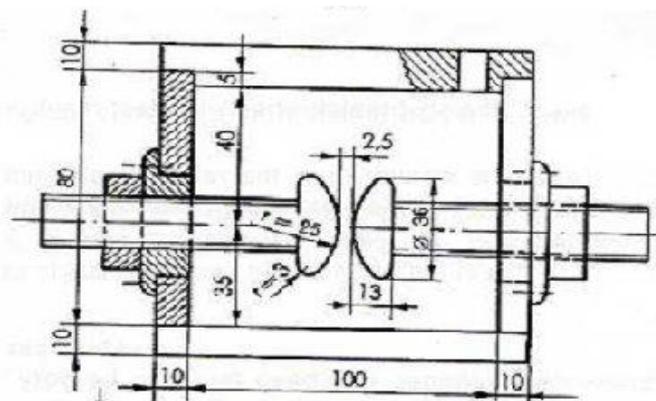


Figure III. 9 Détails d'une cellule à électrodes hémisphériques.

3.1.7.4 Procédure d'essai de la tension de claquage

La tension de claquage est la tension atteinte au cours de l'essai au moment où se produit la première étincelle entre électrodes. On effectue six essais consécutifs pour un même remplissage, avec un repos de 2 minutes entre deux essais. A chaque renouvellement de l'huile à essayer, les électrodes sont rincées avec de l'huile du prélèvement.

- L'huile du transformateur est remplie dans un récipient cylindrique constituée de verre lentement de façon à éviter la formation de bulle d'air du dispositif d'essai. Le récipient d'essai se compose de deux électrodes d'essai conformes aux normes de diamètre 20 mm et distantes de 10 mm l'une de l'autre sont entourées par l'huile diélectrique (il y a deux vis par lesquelles l'écart entre les électrodes peut être ajusté). On fait couler l'huile jusqu'à ce que le niveau d'huile dépasse d'environ 20 mm la partie

supérieure des électrodes. La cellule d'essai utilisée dans cette étude est illustrée à la Figure III.10.



Figure III. 10 La cellule de test remplie d'huile.

- On met en place le couvercle et les essais électriques sont effectués aussitôt, sans laisser reposer l'échantillon dans la cuve.
- Une tension d'essai est appliquée aux électrodes et est continuellement augmentée jusqu'à la tension de claquage avec un taux de balayage constant 2kV/s.
- À un certain niveau de tension, la rupture se produit sous la forme d'un arc électrique, conduisant à un effondrement de la tension d'essai (Figure III.11).

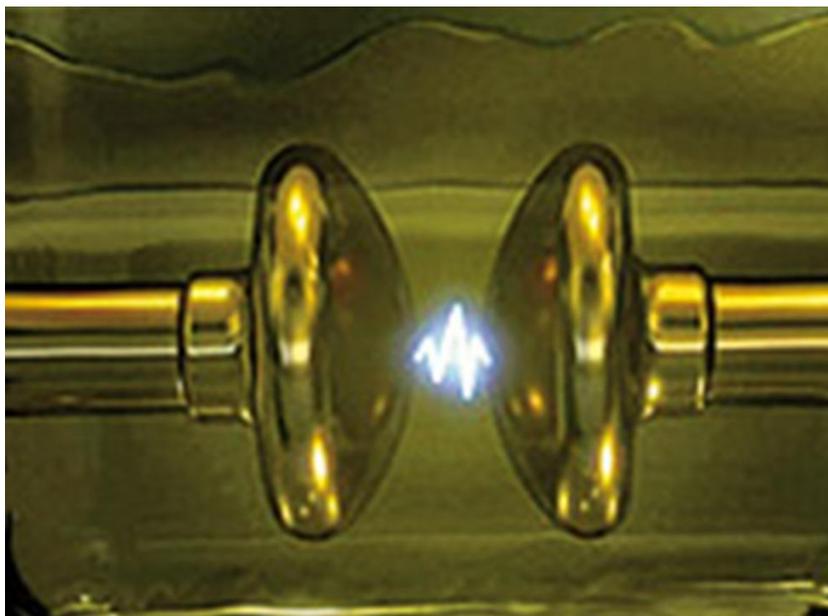


Figure III. 11 Étincelle entre électrodes de la cellule d'essai.

CHAPITRE III: Etude expérimentale sur la tension de claquage des huiles végétales

- Un instant après l'allumage de l'arc, la tension d'essai est coupé automatiquement par le dispositif d'essai. L'arrêt ultra rapide est hautement souhaitable, car la carbonisation due à l'arc électrique doit être limitée pour maintenir la pollution supplémentaire aussi faible que possible.

- Le dispositif d'essai de l'huile du transformateur, mesure et signale la valeur de la tension de claquage.

- Une fois l'essai d'huile du transformateur terminé, la séquence d'essai est exécutée de façon répétée. (Habituellement, 6 répétitions, selon la norme). Avec un intervalle de temps de 2 minutes est utilisé entre les claquages consécutifs, afin de dissiper les gaz qui se produisent lors de la décharge électrique.

- Pour les cinq essais suivants, la tension est appliqué une minute au maximum après la disparition des bulles d'air éventuellement formées.

- Après chaque claquage, on agite légèrement l'huile entre les électrodes au moyen d'une tige en verre propre et sèche ou autres moyens.

- En conséquence, la tension de claquage est calculée comme valeur moyenne des mesures individuelles.

L'équation III.1 c'est la valeur de la tension de claquage adaptée dans cet ouvrage est la valeur moyenne des six mesures de cette tension :

$$U = \sum_{m=1}^6 \frac{U_m}{6} \quad (\text{III. 1})$$

Avec:

U : Tension de claquage moyenne.

Um : Tension mesurée.

m : Nombre de mesures répétées égal à 6.

- A noter qu'à chaque fois, avant de mesurer la tension de claquage du prochain échantillon d'huile, nous nettoyons et séchons la cellule de test et les électrodes qui doivent être propres pour ne pas comporter de cratères dus à la mesure précédente. C'est mieux que ce soit fait le rinçage de la bouteille en verre au moins trois fois avec la même huile destinée aux essais.

- Après avoir terminé la série de tests, et une fois l'échantillon d'huile testé est prélevé, les pots sont fermés avec du papier d'aluminium pour éviter le contact avec l'humidité de l'air ambiant (Figure III.12).



Figure III. 12 Les pots sont fermés avec du papier d'aluminium.

3.1.8 Résultats et analyses

À partir des données tirées de l'expérience, la tension de claquage a été mesurée. Les tensions de claquage des mélanges sous différentes concentrations (dans les rapports 20:80, 50 :50, et 80:20 en masse) traités dans les mêmes conditions, réalisée à température ambiante et sous pression atmosphérique, sont indiquées dans les tableaux suivants.

Pour les huiles brutes nous avons réalisé trois essais ; pour les mélanges des huiles, nous avons réalisé six essais trois après 5 minutes de agitation (essais 1, 2,3) et trois essais après 10 minutes de agitation (essais 1, 2,3).les résultats de la tension de claquage sont presque les même.

L'huile minérale est indiquée par la lettre M, l'huile végétale est indiquée par la lettre V.

1/ Cas d'huile d'Olive :

Les résultats de cet essai sont représentés sur le tableau III.1.

Tableau III. 1 La tension de claquage AC de mélange d'huile d'Olive.

	La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale/huile végétale « Olive ») (kV)						
Huile (%)	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyen
100M/0V	40	41	41	-	-	-	40,67
100V/0M	32	33	16	-	-	-	27
20V/80M	42,8	32	30,5	41,8	41,8	42,8	38,62
50V/50M	43	42,5	42,5	34	37	26	37,5
80V/20M	32,2	48	27,8	46,8	35,6	20	35,1

CHAPITRE III: Etude expérimentale sur la tension de claquage des huiles végétales

Les données du tableau ci-dessus peuvent être interprétées à l'aide de l'histogramme présenté dans la Figure III.13:

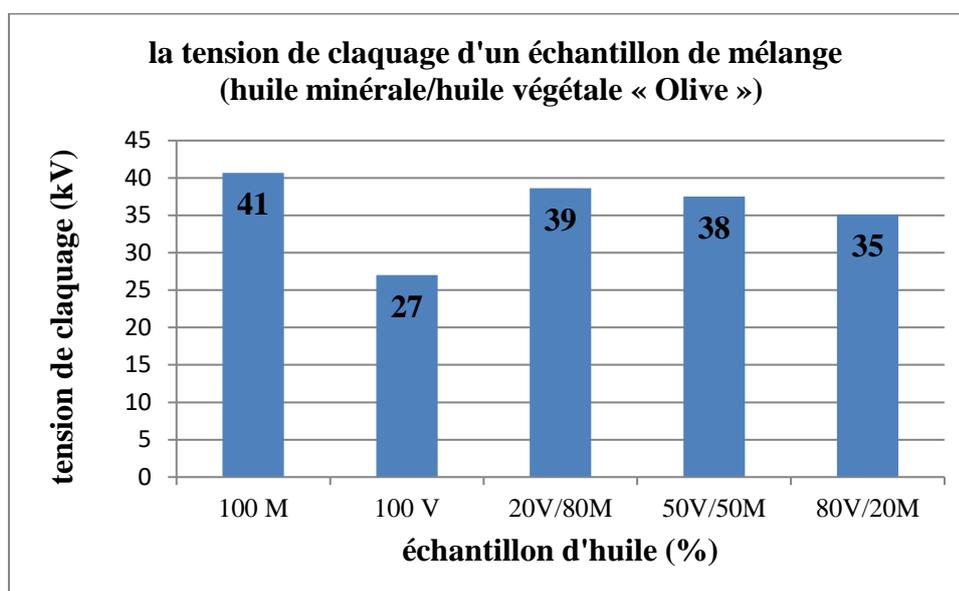


Figure III. 13 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile d'Olive).

Les résultats montrent que la tension de claquage de 20% : 80%, 50% : 50% et 80% : 20% du mélange d'huile minérale/Olive étaient supérieurs à 30 kV, ce qui respectait la norme CEI 60296. La Figure III.13 montre que la plus faible tension de claquage est observée dans l'huile d'Olive brute (27 kV) et la plus élevée que celle d'huile minérale brute (41kV).

2/ Cas d'huile de Amande :

Les résultats de cet essai sont montrés sur le tableau III.2.

Tableau III. 2 La tension de claquage AC de mélange d'huile d'Amande.

La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale/huile végétale « Amande ») (kV)							
Huile (%)	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyen
100M/0V	40	41	41	-	-	-	40,67
100V/0M	46	45	45	-	-	-	45,33
20V/80M	43	42	42,2	41,8	43,7	43,7	42,73
50V/50M	25	36	38	49,5	29,5	34	35,33
80V/20M	45,8	51,8	51	55	53,5	53,8	51,82

Les données du tableau ci-dessus peuvent être interprétées à l'aide l'histogramme présenté dans la Figure III.14:

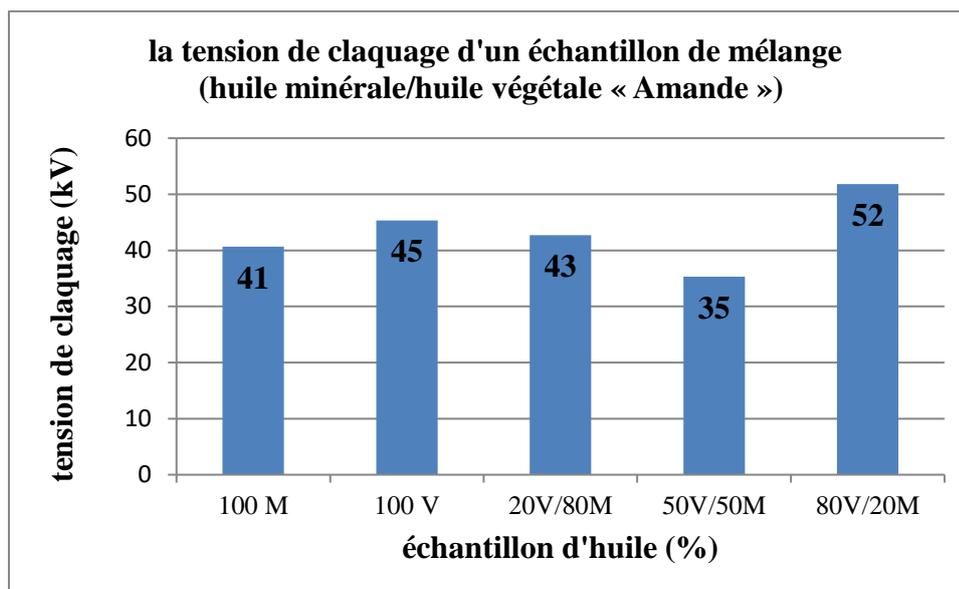


Figure III. 14 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile d'Amande).

Tous les résultats de la tension de claquage des mélanges étaient supérieurs à 30 kV, ce qui respectait la norme CEI 60296. De plus, la tension de claquage de 100 % d'huile d'Amande obtenue dans cette expérience était également relativement plus élevée que l'huile minérale. Les résultats montrent que le mélange (80 % d'huile d'Amande + 20 % d'huile minérale) a une tension de claquage élevée, par rapport à l'huile de transformateur et les autres pourcentages de mélange (50:50, 20V:80M).

3/ Cas d'huile de Castor :

Les résultats de cet essai sont montrés sur le tableau III.3.

Tableau III. 3 La tension de claquage AC de mélange d'huile de Castor.

La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale/huile végétale « Castor ») (kV)							
Huile (%)	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyen
100M/0V	40	41	41	-	-	-	40,67
100V/0M	56,8	49,5	49,5	-	-	-	51,93
20V/80M	43,8	39	40	31	49	40	40,47
50V/50M	45	45	45	45,8	44	33	42,97
80V/20M	+60	+60	+60	+60	+60	+60	+60

Les données du tableau ci-dessus peuvent être interprétées à l'aide l'histogramme présenté dans la Figure III.15:

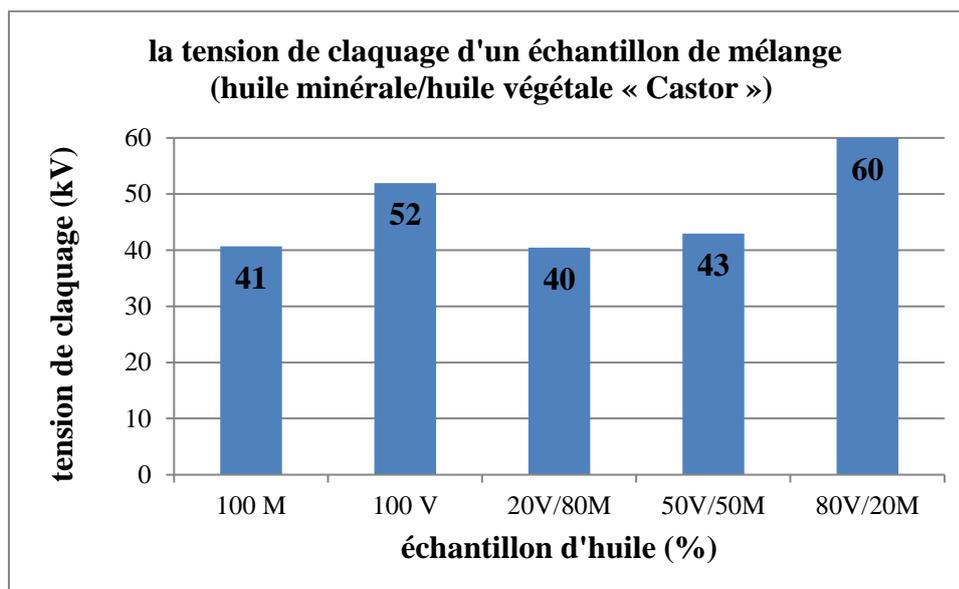


Figure III. 15 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile de Castor).

Tout d'abord, tous les résultats de la tension de claquage des mélanges étaient supérieurs à 30 kV, ce qui respectait la norme CEI 60296. En outre, la tension de claquage d'huile de Castor brute était plus élevée que l'huile minérale.

Les résultats ont montré que le mélange (80 % d'huile de ricin + 20 % d'huile minérale) avait un tension de claquage beaucoup plus élevé que tous les mélanges d'huiles y compris l'huile de ricin brute et l'huile minérale brute ; plus que 60 kV.60 kV est la valeur maximale de l'appareil, au-delà de cette tension un court-circuit est provoqué.

4/ Cas d'huile de Sésame :

Les résultats de cet essai sont montrés sur le tableau III.4.

Tableau III. 4 La tension de claquage AC de mélange d'huile de Sésame.

La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale/huile végétale « sésame ») (kV)							
Huile (%)	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyen
100M/0V	40	41	41	-	-	-	40,67
100V/0M	47	38	29	-	-	-	38
20V/80M	48,2	46	46	42	36	38	42,7
50V/50M	25	36	38	49,5	29,5	34	35,33
80V/20M	52	48	52,2	38	42	38,2	45,10

Les données du tableau ci-dessus peuvent être interprétées à l'aide de l'histogramme présenté dans la Figure III.16

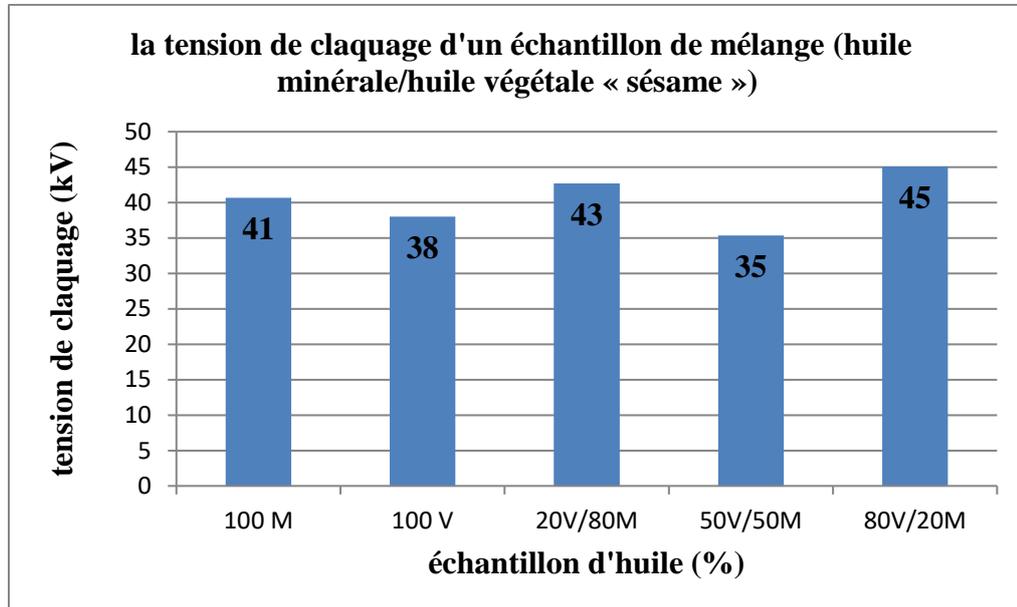


Figure III. 16 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile de Sésame).

Premièrement, tous les résultats de la tension de claquage des mélanges étaient supérieurs à 30 kV ce qui respectait la norme CEI 60296. Ainsi que, la tension de claquage d'huile de Sésame brute était moins que l'huile minérale.

Les résultats aussi montre que le mélange (80 % d'huile de Sésame + 20 % d'huile minérale) avait un tension de claquage plus élevé par rapport à l'huile minérale brute Où était-il mesuré 45 kV, C'est la valeur la plus élevée qu'on a été enregistrée dans un mélange contenant de l'huile de sésame.

5/ Cas d'huile de Cactus :

Les résultats de cet essai sont montrés sur le tableau III.5

Tableau III. 5 La tension de claquage AC de mélange d'huile de Cactus.

La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale/huile végétale « Cactus ») (kV)							
Huile (%)	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Moyen
100M/0V	40	41	41	-	-	-	40,67
100V/0M	54	+60	+60	-	-	-	+58
20V/80M	42	42	42	48	46	46	44,33
50V/50M	46	40	44	44	40	48	43,67
80V/20M	34	44	44	44	44	42	42

Les données du tableau ci-dessus peuvent être interprétées à l'aide l'histogramme présenté dans la Figure III.17:

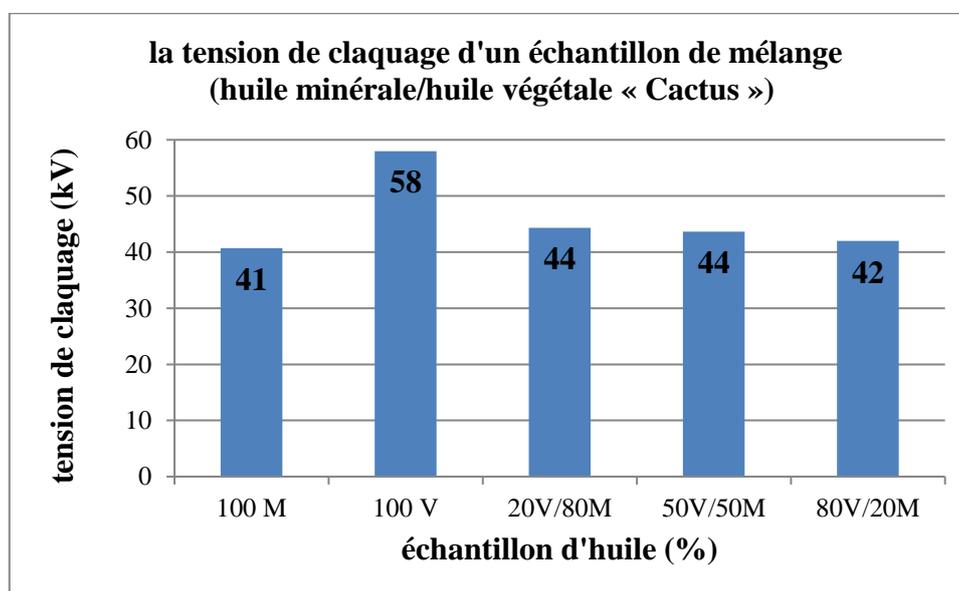


Figure III. 17 La tension de claquage d'un échantillon de mélange (huile minérale / huile de Cactus).

Les résultats de la tension de claquage des mélanges étaient supérieurs à 30 kV ce qui respectait la norme CEI 60296. De plus, la tension de claquage d'huile de Cactus brute obtenue dans cette expérience était également beaucoup plus élevée que l'huile minérale, Où était-il mesuré 58 kV come valeur moyenne de la tension de claquage et de +60 kV dans les essais 2ème et 3ème, ce qu'il provoquant un court-circuit électrique. En termes de mélanges (20 :80, 50 :50 et 80 :20), ils sont relativement proches, et légèrement mieux que l'huile minérale brute.

3.1.9 Analyse comparative des huiles claquées

La Figure III.18 montre la comparaison de la tension de claquage entre les mélanges des huiles. Nous avons présenté sur cette figure la tension de claquage la plus élevée pour chaque échantillon.

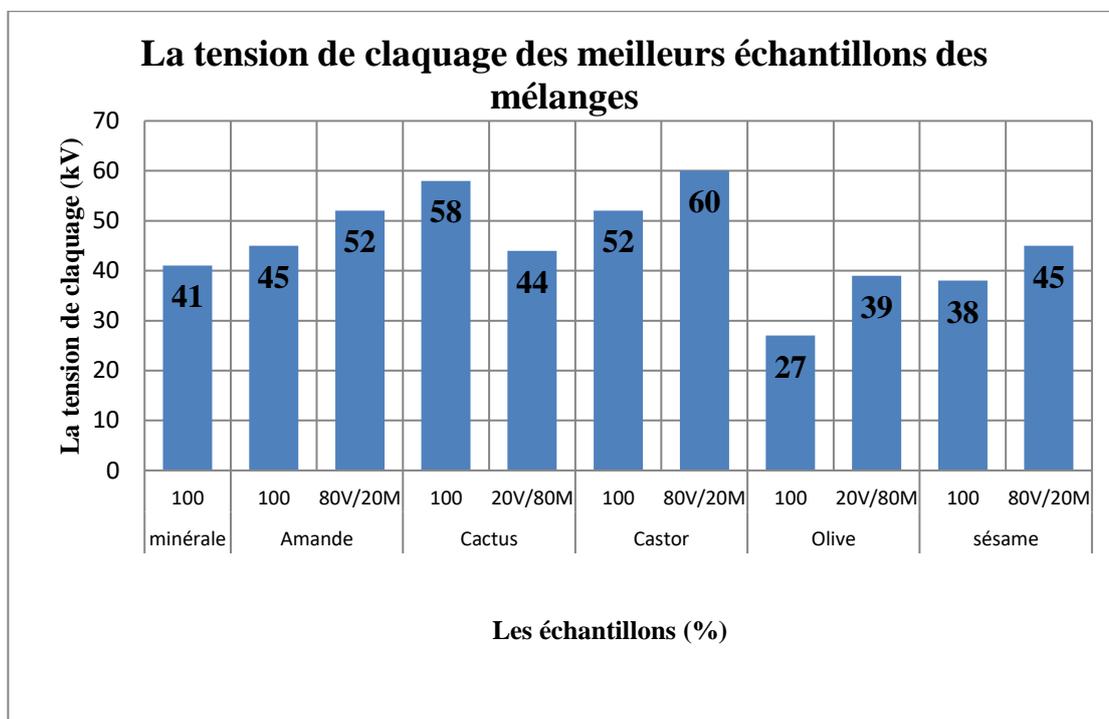


Figure III. 18 Comparaison des tensions de claquage AC.

Les tests expérimentaux sur les mélanges d'huile végétale/minérale, sont conformes aux normes internationales.

Cette étude expérimentale a montré que les huiles végétales brutes en particulier l'huile de Cactus, Castor et Amande a une tension de claquage nettement plus élevée que l'huile minérale seul et les deux autres huiles végétales (l'huile d'Olive et Sésame). Sur la Figure III.18, le mélange (80% d'huile de Castor, 20% d'huile minérale) a une tension de claquage la plus élevée, comparativement à l'huile minérale brute. La Figure.III.18montre aussi que la plus faible tension de claquage est observée pour l'huile d'Olive. La plus faible tension de claquage est trouvée dans les huiles végétales brutes (Olive et Sésame), ce qui indique que le nombre de particules (impuretés) et l'humidité sont plus élevés dans celles-ci. Selon aussi ces résultats ; Le mélange de l'huile d'olive et l'huile de sésame avec de l'huile minérale a également amélioré la tension de claquage.

3.1.9.1 L'avenir de l'huile végétale comme fluide isolant diélectrique dans les transformateurs

Ces résultats expérimentaux ont montré que la tension de claquage elle change en fonction des caractéristiques de chaque huile et est affectée par plusieurs facteurs précédemment évoqués. Dans la plupart des huiles étudiées, nous avons remarqué qu'il y avait au moins un intervalle de tensions où il n'y avait pas de dégradation des huiles (la tension de claquage est pratiquement la même), ceci est dû au nombre limité de séries de mesures.

Les résultats ont également confirmé que l'hypothèse susmentionnée « *pour améliorer la tension de claquage AC, l'huile végétale est mélangée à l'huile minérale* », est correcte et utilisable.

Il ressort de cette étude, que l'addition d'huile végétale permet d'améliorer la tenue diélectrique de l'huile minérale de façon nette.

Les tensions moyennes de claquage les plus élevées sont observées pour les mélanges suivants : l'huile minérale et l'huile Amande ou l'huile minérale et l'huile Castor.

Les tensions moyennes de claquage des mélanges est très importantes, ce dernier résultat semble prometteur pour utiliser les huiles végétales en tant qu'additif pour augmenter la tension de claquage de l'huile minérale.

Ces premiers résultats sont d'une importance capitale, bien que les essais sont réalisés sur des huiles non traitées, qui en plus d'une teneur en eau élevée ou pollution particulaire, sont susceptibles de contenir plus ou moins de particules, pouvant alors fausser l'interprétation des résultats.

3.1.10 Conclusion

La résistance diélectrique ou à la résistance au claquage de l'huile isolante est une mesure de sa capacité à résister aux contraintes électriques sans défaillance. La compréhension de la tension de claquage alternative pour un milieu isolant donné est l'un des paramètres vitaux pour la conception des transformateurs de puissance.

L'huile pourrait affecter l'efficacité de refroidissement des transformateurs. Par conséquent, un simple changement rapide de l'huile minérale à l'huile végétale dans les transformateurs n'est pas toujours possible et nécessite de nombreuses études, en particulier sur la tension de claquage, le vieillissement et la stabilité à l'oxydation au niveau du laboratoire.

CHAPITRE III: Etude expérimentale sur la tension de claquage des huiles végétales

Le résultat obtenu de cette étude est prometteur, mais il est suggéré que, afin de mieux comprendre les performances et le mécanisme de l'huile végétale comme diélectriques; Des études approfondies doivent être menées sur différentes caractéristiques électriques, physiques et chimiques. En outre, une étude plus approfondie doit être effectuée pour examiner l'influence des différents facteurs sur les caractéristiques des diélectriques liquides.

Les huiles végétales comme le Castor, Amande et Cactus présentent des tensions de claquage plus élevées que l'huile minérale brute; elles permettent également d'optimiser la tenue diélectrique de l'huile minérale, en suivant la loi des mélanges. Ces résultats confirment les travaux menés par FOFANA et al. (**I. FOFANA, 2002**)

Conclusion générale

Conclusion générale

Les transformateurs de puissance haute tension utilisent couramment de l'huile minérale à base de pétrole à des fins de refroidissement et d'isolation. Les chercheurs recherchent des huiles végétales appropriées comme alternatives à l'huile minérale pour être utilisées comme huile de transformateur. Les huiles végétales alternatives biodégradables sont produites à partir de graines ou de légumes, non toxiques et respectueuses de l'environnement. De plus les huiles végétales sont des produits naturels disponibles en abondance. Ils peuvent nécessiter un traitement et une modification pour améliorer certaines de leurs propriétés afin de garantir leur utilisation sûre dans les transformateurs de puissance et de distribution ainsi que dans les équipements haute tension. Dans ce travail nous avons présenté une étude expérimentale sur les tensions de claquage AC dans des conditions non traitées de quelques mélanges d'huile végétale (5 types: huile d'Olive, Sésame, Amande douce, Cactus, et huile de Castor) et un huile minérale; Les échantillons des mélanges d'huile ont été analysés en variant des proportions (20/80, 50/50, 80/20), pour recherche d'une mélange optimal, utilisée dans les transformateurs de puissance.

En général, les tensions de claquage de quelque des huiles végétales come l'huile de Amande, Castor, et Cactus, étaient plus élevées que celle de huile minérale. La rigidité diélectrique du matériau isolant dépend de la tension diélectrique développée sous haute tension. Certains facteurs influent sur la résistance au claquage diélectrique, comme la température, l'impureté dans la substance diélectrique et l'humidité.

D'après ces résultats expérimentaux, on peut conclure que les huiles végétales analysées peuvent être la meilleure alternative à l'huile minérale. Ces résultats puissent servir pour le développement technologique des liquides comme matériau isolant dans l'industrie, en raison de leur tension de claquage.

Référence bibliographique

- Abdelaziz, k. (2017).** Utilisation des huiles de Quercus dans les transformateurs. Ouargla.
- Achten WMJ, V. L. (2008).** Jatropha bio-diesel production and use.
- Adel, S. (2015).** Influence de la présence de matériaux sur le comportement de l'huile isolante., (p. P18). Alger.
- Alaoui, B. (2002).** Les utilisations alternatives des huiles vegetales . Département d'Agronomie et d'Amélioration des Plantes, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, BP 6202, Rabat-Instituts, Rabat, Maroc, maroc.
- Amine Illiten, H. Z. (2015).** Etudes des paramètres influant sur la tension de claquage de l'huile borak 22 utilisée dans les transformateurs de puissance. Thèse de doctorat. Université de bejaia.
- AZALI, N. A. (2018).** Breakdown characteristic of palm oil and coconut oil under AC and DC voltage with different moisture rate . Thèse de doctorat.
- B. Moula. (2007).** « Comportement de l'huile de transformateur (Borak 22) sous tension alternative 50 Hz», Mémoire de Magister, École nationale polytechnique d'Alger .
- B.S.H.M.S.Y. Matharage, M. B. (2012).** “Aging Effect of Coconut Oil as Transformer Liquid Insulation - Comparison with Mineral Oil”, Industrial and Information Systems (ICIIS), 7th IEEE International Conference.
- BANUMATHI, S. E. (2016).** Analysis of breakdown strength and physical characteristics of vegetable oils for high voltage insulation applications. Journal of advances in chemistry.
- Bartnikas, R. (1994).** Engineering dielectrics, Vol.3.
- C. Lamarre, J. C. (1987).** Influence of Oxidation on the Electrical Properties of Inhibited Naphthenic and Paraffinic Transformer Oils. IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol.EI-22 No.1.
- Caixin Sun, J. L. (2006).** “Electrical properties of vegetable oil-based dielectric liquid and lifetime estimation of the oil-paper insulation”, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- CEI296, N. I. (1982).** Spécification des huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillage de connexion, deuxième édition.
- CEI62021. (2003).** Liquides isolantes – Détermination de l'acidité – Partie 1 Titrage potentiométrique automatique.
- Charie, T. (2019).** Se soigner par les huiles essentielles. Pourquoi et comment ça marche ? Rocher.
- Clergeaud, C. (2003).** Les huiles végétales : huiles de santé et de beauté. Amyris.

Cormier, G. (s.d.). Transformateur chapitre 8.

D.Ouakli, H. (1997). « Propriétés diélectriques de l'huile de transformateur au présence de gaz dissous », Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Département de Génie Electrique.

DANG, V. H. (2011). Étude des phénomènes de préclaquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – caractérisation des décharges aux interfaces. Électronique, électrotechnique, automatique, lyon.

Djoudi, A. N. (2014). Caractérisation de l'huile pour transformateurs en service. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.

Document réf transformateur . (2010).

Elec-13. (2017). Refroidissement des transformateurs : ONAN – ONAF – ODAF – OFAF – ODWF.

Fournié, R. (1986).« Les isolants en électrotechniques: concepts et théories», Edition Eyrolles, Paris.

Gabriel, G.Transformateur .

Gros, C. (2005). Extraction aqueuse et athermique de l'huile de lin assistée par décharges électriques de haute tension. Université de Technologie de Compiègne, FRANCE.

Hirschler, M. (2000). Electrical Insulating Materials: International Issues. Marcelo M.Hirschler editor.

I. FOFANA, H. B. (2002). Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers, Part 1: Investigation of mixed liquids », IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, n° 3.

I.Höhlein, P. W. (2006). New Properties of “Old” Transformer Materials. IEEE International Symposium on Electrical Insulation.

ILILTEN Amine, H. Z. (2014). Etudes des paramètres influant sur la tension de claquage de l'huile Borak 22utilisée dans les transformateurs de puissance.

ISO6618, n. (1997). Produits pétroliers et lubrifiants – Détermination de l'indice d'acide ou de l'indice de base – Méthode par titrage en présence d'un indicateur coloré.

Janvier-Sylvestre. (2011). Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance. Engineering Sciences. Lyon.

Jennifer régis, F. J. (2016). Impact de la trituration et du raffinage sur la teneur et micronutriment des huiles végétales de colza, soja et tournesol.

Kang, B. (1967). Thermal dependency of viscosity, power factor and ion content of electrical insulating oil. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,, (pp. Vol. EI-2, n°1, pp. 55-69).

- KAPSEU, C. (2009).** Production, analyse et applications des huiles végétales en Afrique. OCL VOL. 16 N° 4 . Département de génie des procédés et d'Ingénierie, Ecole nationale supérieure des sciences agro-industrielles, Université de Ngaoundéré (Cameroun), Cameroun.
- Legrand. (2018).** Guide technique de transformateurs HT-BT. France.
- Lizardo, A. (2018).** Nouvelle huile végétale de transformateur respectueuse de l'environnement. IEEE PES T&D Expo .
- Lounis Aziz, S. L. (2012).** Impact du changement de l'épaisseur de la tôle. Tizi ouzou, Faculté de génie électrique et d'Informatique.
- Monnatte, S. (mai 2017).** Qu'est ce qu'une huile végétale.
- MORIN. (2012).** Huiles et corps gras végétaux.
- N.Berger. (2002).** Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale. Techniques de l'ingénieur.
- NACER, A. (2009).** Caractérisation des matériaux diélectriques application à l'huile minérale de transformateur. Thèse de doctorat.
- Nguyenvan.C.(2010).** Maîtrise de l'aptitude technologique des oléagineux par modification structurelle: applications aux opérations d'extraction et de transestérification in-situ. France.
- Normecei. (1995).** Transformateurs de puissance.
- Nynas, N. (2004).** Transformer oil handbook. Sweden.
- Pasquet, V. (juin 2019).** La fabrication des huiles végétales, de nombreuses étapes accidentogènes. Face au risque , 553.
- PCE. (2019).** Recherche et développement de transformateurs d'huile végétale.
- PIOTROVSKI, M. K. (1969).** Machines électriques., Moscou.
- R.Bartnikas. (1994).** Engineering Dielectrics Volume III: Electrical Insulating Liquids. Eds Institut de Recherche d'Hydro-Québec Varennes, Canada.
- R.Fournié. (1990).** Les isolants en électrotechnique, Essais, Mécanismes de dégradation, Applications industrielles. Paris: Editions Eyrolles.
- Renvoizé, V.(2010).** Physique PSI-PSI. Paris.
- Rousset, P. (2008).** Guide technique pour une utilisation. Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad), Brasília.
- Swern, D. (1979).** Bailey's industrial oil and fat products, John Wiley and Sons, vol.1, 4th Ed.
- Tobazéon, R. (2003).** « Conduction électrique dans les liquides », Technique de l'Ingénieur.

Tobazéon, R. (1997). «Préclaquage et claquage des diélectriques liquides », Technique de l'Ingénieur.

Tobazeon, R. (1996). Conduction électrique dans les liquides. Techniques de l'ingénieur .

WHO, F. A. (2001).Codex Alimentarius Commission – Procedural Manual twenty-seventh. Genève.

Wildi, T. (2003). Electrotechnique. De Boek.

Xavier PAGES, O. M. (2012). Raffinage des huiles et des corps gras et élimination des contaminants. OCL VOL 28 .

Xing.wentao. (2021). Grand pouvoir! China Xidian Group a développé avec succès le transformateur d'huile végétale avec la tension la plus élevée et la plus grande capacité en Chine. Seetao .

Z. Bettahar 1, B. C. (2016). Etude de la transestérification d'un mélange des huiles usagées pour la production du biodiesel. Faculté de Technologie, Université de Blida1.