

N° d'ordre : 01/2020-D/ELT

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène

Faculté d'Electronique et d'Informatique



THESE DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée pour l'obtention du grade de Docteur

En : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : Systèmes électro-énergétiques

Par : CHETIBI Fouzia epse. GRINAT

Sujet

***Etude de l'aspect physico-chimique lié à l'application
des décharges électriques dans les isolants liquides***

Soutenue publiquement le 01/02/2020, devant le jury composé :

M. Ziani Abderrahmane	Professeur	à l'USTHB	Président
M. Moulai Hocine	Professeur	à l'USTHB	Directeur de thèse
Mme. Saidi Nadia	Professeur	à l'USTHB	Examinatrice
M. Mekhaldi Abdelouahab	Professeur	à l'ENP	Examineur
M. Tegar Madjid	Professeur	à l'ENP	Examineur
M. Otmane-Cherif Tahar	Professeur	à l'UMMTO	Examineur
M. Berbar Tarik	MCA	à l'USTHB	Invité

Dédicaces

A

*La mémoire de mon beau-frère Rachid Grinat qui a été de sa vie et qui demeure après sa mort
une lumière.....*

*A mon cher époux Mustapha et toute ma belle-famille :mon beau-père, ma belle-mère, mes
beaux-frères et belles-sœurs, et leurs enfants, dont le soutien et l'encouragement qu'ils m'ont
apportés.*

*A mes chers parents et toute ma famille, notamment à mon frère Abed el Malek qui
m'encouragé le long de ce travail*

A mes deux chers filles Arwa et Aya, et mon fils Mohamed Islam

A tous les professeurs qui m'ont enseigné

A tous ceux qui me sont chers.

Je dédie ce mémoire

CHETIBI Fouzia

Avant-propos

*Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au sein du laboratoire des systèmes électrique et industriel de la faculté d'électronique et d'informatique à l'USTHB sous la direction du Professeur **Moulai Hocine**. Qu'il me soit permis de lui exprimer mes meilleurs sentiments de gratitude pour le soutien constant qu'il m'a apporté tout au long de ces années, et pour leurs recommandations, leurs conseils et leur compréhension malgré leur charge. Une partie de ce travail a été réalisé aux deux laboratoires différents; le laboratoire de la Raffinerie d'Alger et le laboratoire de NAFTAL/Branche Carburants à l'aéroport Houari Boumediene Dar El Beida. Mes remerciements à tous les personnels de ces laboratoires, pour m'avoir facilité l'accès à leurs entreprises et l'aide qu'ils m'ont apporté lors de la réalisation de mes essais.*

Qu'il me soit d'abord permis de remercier et d'exprimer ma gratitude envers le bon Dieu, qui m'a donné la patience et le courage pour que je puisse continuer ce travail.

Mes remerciements vont bien entendu à Monsieur Ziani Abderrahmane, Professeur à l'USTHB, pour avoir accepté de me faire l'honneur de présider le jury de ma soutenance. Mes remerciements vont également à Monsieur Abdelouahab Mekhaldi Professeur à l'ENP, Madame Saidi Nadia Professeur à l'USTHB, Monsieur Teguair Madjid Professeur à l'ENP et Monsieur Otmane-Cherif Tahar Professeur à l'UMMTO pour avoir examiné ma thèse et accepté de faire partie du jury. Je remercie également Monsieur Berbar Tarik, de m'avoir honoré par sa présence.

J'adresse mes plus profonds remerciements au mon marié Mustapha Grinat pour leur soutien et leur contribution à la réalisation de ce travail. Mes remerciements à toutes les personnes du laboratoire LSEI notamment au monsieur Lehouidj Bachir pour son aide et qui m'a permis d'échanger avec lui des idées dans la même option. Sans oublier monsieur Nacer Azeddine qui m'avoir encouragé dans les moments critiques.

Enfin je remercie toute ma belle-famille pour leur aide et leur soutien (moral, physique ou autres). Sans oublier toute personne de près ou de loin qui a participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Résumé

Le travail réalisé dans cette thèse s'inscrit dans la logique globale d'une caractérisation des huiles végétales en vue de leurs utilisations dans les transformateurs de puissance en remplacement des huiles minérales naphthéniques utilisées actuellement et aussi pour répondre aux exigences internationales sur la protection de l'environnement et l'utilisation des isolants liquides biodégradables.

Pour cela, ce travail est porté sur une étude comparative des deux huiles végétales (l'huile d'Olive et de Soja) et une huile minérale naphthénique (Borak 22). Des études des propriétés physico-chimiques de ces huiles ont été menées sous les deux types de vieillissement thermique et électrique accéléré. Le vieillissement thermique est réalisé dans des bouteilles scellées à 110 °C pendant des durées allant jusqu'à 720h, et le vieillissement électrique sous l'application jusqu'aux 2500 décharges avec une configuration plane et un espacement d'électrodes de 2,5 mm sous des hautes tensions continues. Les propriétés étudiées sont les suivantes: la couleur, la densité, la teneur en eau, la viscosité, l'acidité, le point d'éclair et le point d'écoulement. Les paramètres diélectriques sont le facteur de dissipation, la conductivité et la partie réelle de la permittivité relative complexe de ces huiles qui sont également mesurés dans une large gamme de fréquences (20Hz-10MHz) en utilisant la méthode de la spectroscopie pour les deux types de vieillissements thermique et électrique. Ce travail traite également des courants de décharge électrique générés dans ces huiles et des graphes FFT correspondants, suivi de la densité spectrale de puissance. À la fin, un spectrogramme de ces décharges de courant est présenté, illustrant comment la composition de fréquence et l'intensité de chaque fréquence changent avec le temps.

Les résultats expérimentaux inattendus trouvés dans cette étude semblent encourageants pour l'utilisation des huiles végétales étudiées comme liquide isolant dans les transformateurs. Cependant, l'addition d'antioxydants appropriés et un séchage pour diminuer les teneurs en eau restent nécessaires pour améliorer ses propriétés critiques.

Mots-clés : Isolants liquides, Propriétés physico-chimiques, Polarisation, Propriétés diélectriques, Courants de décharge, FFT, PSD.

Abstract

The work presented in this thesis is devoted to a characterization of vegetable oils for their use in power transformers to replace the naphthenic mineral oils currently used and also to meet international requirements for the environment protection and the use of biodegradable liquid insulations.

For this aim, this work is focused on a comparative study of two vegetable oils (olive and soya oils) and a naphthenic mineral oil (Borak 22). Studies of the physico-chemical properties of these oils have been carried under the two types of accelerated thermal and electrical aging. Thermal aging is carried out in sealed bottles at 110° C for durations up to 720h, and electrical aging is made under application to 2500 discharges occurring in a plane-plane configuration and electrode gap 2.5 mm under DC high voltages. The properties studied are: color, density, water content, viscosity, acidity, flash point and pour point. The dielectric parameters are the dissipation factor, the conductivity and the real part of the complex relative permittivity of these oils which are also measured in a large frequency range (20Hz-10MHz) using the spectroscopy method for both types of thermal and electrical aging. This work also deals with the electric discharge currents generated in these oils and the corresponding FFT graphs, followed by the spectral power density. At the end, a spectrogram of these current discharges is presented, illustrating how the frequency composition and intensity of each frequency change with time.

The unexpected experimental results found in this study seem encouraging for the use of the vegetable oils studied as insulating liquids in transformers. However, the addition of suitable antioxidants and drying to reduce water contents are still necessary to improve their critical properties.

Keywords: Liquid insulations, Physico-chemical properties, Polarization, Dielectric properties, Discharge currents, FFT, PSD.

ملخص

يمثل العمل المنجز في هذه الرسالة جزءاً من المنطق العام لتوصيف الزيوت النباتية لاستخدامها في محولات الطاقة لتحل محل الزيوت المعدنية النفطية المستخدمة حالياً، وأيضاً لتلبية المتطلبات الدولية لحماية البيئة واستخدام العوازل السائلة القابلة للتحلل.

لهذا الغرض، يركز هذا العمل على دراسة مقارنة لزيوتين نباتيتين (زيت الزيتون وفول الصويا) وزيت نفطي معدني (بوراك 22). أجريت دراسات للخواص الفيزيائية والكيميائية لهذه الزيوت تحت نوعين من التلاشي الحراري والكهربائي المسرعة. تم التلاشي الحراري في زجاجات محكمة الإغلاق عند 110 درجة مئوية لفترات تصل إلى 720 ساعة، والتلاشي الكهربائي تحت تطبيق يصل حتى 2500 تفريغ باستعمال الكترودين مستويين البعد بينهما 2.5 ملم تحت جهد مستمر عالي. الخواص التي تمت دراستها هي: اللون، الكثافة، محتوى الماء، اللزوجة، الحموضة، نقطة الوميض ونقطة الانسياب. الخصائص العازلة هي: عامل التبديد، الموصلية والجزء الحقيقي للسماحية النسبية المعقدة لهذه الزيوت التي تم قياسها أيضاً في نطاق تردد واسع (20 هرتز إلى 10 ميغا هرتز) باستخدام طريقة التحليل الطيفي لكلا النوعين من التلاشي الحراري والكهربائي. يتناول هذا العمل أيضاً تيارات التفريغ الكهربائي المتولدة في هذه الزيوت والرسوم البيانية FFT الموافقة لها، تليها كثافة القدرة الطيفية. في النهاية، تم تقديم مخطط طيفي لهذه التفريغات، والذي يوضح كيفية تغير تركيبة التردد وشدة كل تردد بدلالة الزمن.

تبدو النتائج التجريبية غير المتوقعة الموجودة في هذه الدراسة مشجعة لاستخدام الزيوت النباتية التي تمت دراستها كسائل عازل في المحولات. ومع ذلك، لا تزال إضافة مضادات الأكسدة المناسبة والتجفيف لتقليل محتويات الماء ضرورية لتحسين خصائصهم القصوى.

الكلمات المفتاحية : عوازل سائلة، خصائص فيزيائية وكيميائية، استقطاب، خصائص عازلة، تيارات التفريغ، FFT، PSD.

Tables des matières

Tables des matières

Tables des matières	I
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	X
Introduction générale	1

CHAPITRE I : ISOLANTS LIQUIDES POUR TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE, ASPECTS THEORIQUES

I.1. Introduction	4
I.2. Technologie des transformateurs de puissance	4
I.3. Rôle des isolants liquides dans transformateurs de puissance	7
I.3.1. Fonction diélectrique : Isolation au sens électrique et strict.....	8
I.3.2. Fonction transfert de chaleur.....	9
I.3.3. Fonction de résistance à l'incendie.....	11
I.4. Différents types des isolants liquides	11
I.4.1. Huiles minérales.....	11
I.4.2. Huiles de synthèse.....	13
I.4.3. Huiles végétales ou esters naturels.....	14
I.5. Propriétés des isolants liquides	16
I.5.1. Propriétés Physiques.....	16
I.5.1.1. Viscosité.....	16
I.5.1.2. Point d'écoulement.....	18
I.5.1.3. Conductivité et capacité thermique.....	18
I.5.1.4. Point d'éclair et point de feu.....	19
I.5.2. Propriétés Chimiques.....	20
I.5.2.1. Teneur en eau.....	20
I.5.2.2. Acidité.....	21
I.5.2.3. Oxydation.....	22

I.5.2.4. Les gaz dissous.....	22
I.5.3. Propriétés Electriques.....	24
I.5.3.1. Permittivité ou la constante diélectrique.....	24
I.5.3.2. Rigidité diélectrique et Tension de claquage.....	25
I.5.3.3. Conductivité et Résistivité.....	25
I.5.3.4. Facteur de dissipation diélectrique.....	26
I.6. Types et causes de vieillissement des isolants liquides.....	27
I.6.1. Différents types de vieillissement.....	27
I.6.1.1. Le vieillissement thermique.....	27
I.6.1.2. Vieillissement électrochimique.....	28
I.6.1.3. Vieillissement électrique.....	28
I.6.2. Les causes de vieillissement.....	29
I.6.2.1. Contraintes chimiques.....	29
I.6.2.2. Contraintes thermiques.....	32
I.6.2.3. Contraintes électriques.....	35
I.7. Conclusion	39

CHAPITRE II: CARACTIRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES HUILES ETUDIEES APRES VIEILLISSEMENTS

II.1. Introduction.....	41
II.2. Composition chimiques des huiles étudiées.....	42
II.2.1. Huile minérale.....	42
II.2.2. Huiles végétales.....	43
II.2.2.1. Huile d'olive.....	44
II.2.2.2. Huile de soja.....	45
II.3. Mode de vieillissement des huiles étudiées.....	45
II.3.1. Vieillissement thermique.....	46
II.3.2. Vieillissement électrique.....	47
II.3.2.1. Sources de tension alternative et continue.....	48
II.3.2.2. Circuit de protection électrique.....	48
II.3.2.3. Cellule d'essai et résistance de limitation de courant.....	50
II.3.2.4. Système de mesure des courants.....	50

II.3.2.5. Oscilloscope et cage de Faraday.....	51
II.4. Caractérisation physico-chimique des huiles étudiées.....	52
II.4.1. Effet du vieillissement thermique.....	53
II.4.1.1. Variation de la couleur.....	53
II.4.1.2. Variation de densité.....	54
II.4.1.3. Variation de la teneur en eau.....	55
II.4.1.4. Variation de la viscosité.....	56
II.4.1.5. Variation d'acidité.....	58
II.4.1.6. Variation du point d'éclair.....	59
II.4.1.7. Variation du point d'écoulement.....	60
II.4.2. Effet du vieillissement électrique.....	61
II.4.2.1. Variation de la couleur.....	61
II.4.2.2. Variation de densité.....	62
II.4.2.3. Variation de la teneur en eau.....	63
II.4.2.4. Variation de la viscosité.....	64
II.4.2.5. Variation de l'indice d'acidité.....	65
II.4.2.6. Variation du point d'éclair.....	66
II.4.2.7. Variation du point d'écoulement.....	66
II.5. Conclusion.....	67

CHAPITRE III: CARACTERISATION DIELECTRIQUE DES HUILES ETUDIEES APRES VIEILLISSEMENTS

III.1. Introduction.....	70
III.2. Phénomène de polarisation des isolants liquides.....	70
III.2.1. Représentation de la polarisation.....	70
III.2.2. Différents types de polarisation.....	71
III.2.2.1. Polarisation électronique.....	71
III.2.2.2. Polarisation ionique.....	74
III.2.2.3. Polarisation d'orientation.....	75
III.2.2.4. Polarisation interfaciale.....	76
III.2.2.5. Phénomène de résonance et de relaxation.....	77
III.2.3. Polarisation macroscopique.....	79

III.2.4. Différence entre la polarisation et la conduction.....	80
III.2.5. Isolants liquides polaires et non polaires.....	81
III.3. Spectroscopie d'impédance.....	81
III.3.1. Préambule.....	81
III.3.2. Principe de la spectroscopie d'impédance.....	82
III.3.2.1. Permittivité diélectrique.....	83
III.3.2.2. Facteur de dissipation.....	84
III.3.2.3. Conductivité.....	85
III.3.3. Dispositifs de mesure.....	86
III.4. Propriétés diélectriques des huiles utilisées.....	87
III.4.1. Effet du vieillissement thermique.....	87
III.4.1.1. Variation de la permittivité relative.....	87
III.4.1.2. Variation du facteur de dissipation.....	92
III.4.1.3. Variation de la conductivité.....	94
III.4.2. Effet du vieillissement électrique.....	96
III.4.2.1. Variation de la permittivité relative.....	96
III.4.2.2. Variation du facteur de dissipation.....	97
III.4.2.3. Variation de la conductivité.....	97
III.5. Conclusion.....	100

CHAPITRE IV: COURANTS DE DECHARGES ET ANALYSES SPECTRALES

IV.1. Introduction.....	101
IV.2. Aspect théorique de décharge dans les liquides.....	101
IV.3. Comportement d'huile au moment de décharges.....	103
IV.3.1. Mouvement d'huile.....	104
IV.3.2. Développement de l'arc.....	105
IV.3.3. Génération du bulle gaz.....	106
IV.4. Notions fondamentales d'analyse spectrale	107
IV.4.1. Transformation de Fourier rapide FFT.....	107
IV.4.2. Densité spectrale de puissance PSD.....	108
IV.5. Caractérisation fréquentielle des courants étudiés.....	110

IV.5.1. Allure des courants.....	110
IV.5.2. Analyse spectral des courants sous Matlab.....	112
IV.5.2.1. FFT des courants.....	112
IV.5.2.2.Descripteurs des courants.....	112
IV.5.2.3.PSD des courants.....	114
IV.5.2.4.Spectrogramme des courants.....	116
IV.6. Conclusion.....	118
 Conclusion générales.....	 121
Références bibliographiques.....	123

Liste des figures

Liste des figures

Fig (I.1) : Vue générale d'un transformateur de puissance avec ses différentes composantes.....	6
Fig (I.2) : Types de transformateur de puissance, (a) colonne et (b) cuirassé.....	7
Fig (I.3) : Une partie de la section transversale d'un système d'isolation des transformateurs de puissance.....	9
Fig (I.4) : Types d'échangeurs de transformateur de puissance.....	9
Fig (I.5) : Schéma de principe du circuit de refroidissement.....	10
Fig (I.6) : Refroidissement par circulation forcée de l'isolant liquide dans les échangeurs de transformateur de puissance.....	10
Fig (I.7) : Processus de raffinage pour les huiles brutes.....	12
Fig (I.8) : Structures moléculaires d'hydrocarbures composés l'huile minérale.....	12
Fig (I.9) : Courbe de gassing des huiles isolantes utilisées dans les transformateurs de puissance.....	14
Fig (I.10) : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R_1 , R_2 et R_3 sont les chaînes acides gras du même ou de la différent types.....	15
Fig (I.11) : Biodégradabilité de de différents types d'isolant liquide.....	16
Fig (I.12) : Les points typiques d'éclair et de feu de différents types d'isolant liquide.....	16
Fig (I.13) : Représentation des vitesses d'un fluide en mouvement.....	17
Fig (I.14) : Rupture des liaisons des molécules d'huile.....	23
Fig (I.15) : Synthèse du mécanisme principal de dégradation des isolants électriques dans un transformateur de puissance	29
Fig (I.16) : Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur.....	32
Fig (I.17) : Influence de la température sur le facteur de pertes de l'huile Minérale.....	33
Fig (I.18) : Influence de la température sur la résistivité de l'huile Minérale.....	33
Fig(I.19) : Génération des gaz dissous dans l'huile minérale après vieillissement thermique.....	34
Fig(I.20) : Génération des gaz dissous dans l'ester synthétique après vieillissement thermique.....	34
Fig (I.21) : Variation du facteur de dissipation en fonction du nombre de claquages pour différentes températures de mesure.....	36

Fig (I.22) : Variation de la permittivité relative en fonction de la température et du nombre de claquages.....	36
Fig (I.23) : Variation de la conductivité en fonction du nombre de claquages.....	37
Fig (I.24) : Génération des gaz dissous dans l'huile minérale neuve et vieillie après application du champ électrique.....	38
Fig (I.25) : Génération des gaz dissous dans l'huile sous les effets : de l'arc électrique et la décharge de couronne.....	38
Fig (I.26) : Schéma simplifié de la dégradation de l'huile isolante en fonction de différentes contraintes.....	39
Fig (II.1) : Structures moléculaires d'huile minérale Borak 22.....	42
Fig (II.2) : Structure chimique des triglycérides. R_1 , R_2 et R_3 sont les chaînes du même type ou de types différents qu'elles contiennent un nombre impair de carbones (de 15 à 23).....	43
Fig (II.3) : Chaîne continue d'extractions d'huile d'olive.....	44
Fig (II.4) : Schéma récapitulatif des procédés de raffinage d'huile de soja.....	45
Fig (II.5) : Echantillons d'huile utilisés pour le vieillissement thermique.....	46
Fig (II.6) : Instrumentation du banc expérimental pour le vieillissement électrique.....	47
Fig (II.7) : Source de haute tension continue.....	48
Fig (II.8) : Image du module de control des contacteurs et boutons de marche.....	48
Fig (II.9) : Schéma du circuit de protection électrique	49
Fig (II.10) : Cellule d'essai	50
Fig (II.11) : Résistance de limitation de courant.....	50
Fig (II.12) : (a) Système de mesure des courants, (b) : Son enceinte métallique.....	51
Fig (II.13) : Image de l'oscilloscope numérique et cage de Faraday.....	51
Fig(II.14) : Échantillons d'huiles utilisées après vieillissement thermique à 110°C	54
Fig (II.15) : Indice de couleur en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C.....	54
Fig (II.16) : Densité en fonction du temps de vieillissement à une température de 110 °C.....	55
Fig (II.17) : Teneur en eau en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C...56	56
Fig (II.18) : Viscosité en fonction du temps de vieillissement à une température de 110 °C.....	58
Fig (II.19) : Indice d'acidité en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C.....	59
Fig (II.20) : Point d'éclair en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C.....	60
Fig (II.21) : Point d'écoulement en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C.....	61

Fig (II.22) : Indice de couleur en fonction du nombre de décharges électriques.....	62
Fig (II.23) : Densité en fonction du nombre de décharges électriques.....	63
Fig (II.24) : Teneur en eau en fonction du nombre de décharges électriques.....	64
Fig (II.25) : Viscosité en fonction du nombre de décharges électriques.....	64
Fig (II.26) : Acidité en eau en fonction du nombre de décharges électriques.....	65
Fig (II.27) : Point d'éclair en fonction du nombre de décharges électriques.....	66
Fig (II.28) : Point d'écoulement en fonction du nombre de décharges électriques.....	67
Fig(III.1) : Polarisation électronique : (a) déplacement du noyau, (b) déplacement d'électron.....	72
Fig (III.2) : Modèle de Lorentz.....	73
Fig (III.3) : Allure de la polarisabilité électronique de l'atome.....	74
Fig (III.4) : Polarisation ionique.....	75
Fig (III.5) : Polarisation d'orientation.....	75
Fig (III.6) : Allure de la polarisabilité électronique par orientation.....	76
Fig (III.7) : Polarisation interfaciale.....	77
Fig (III.8) : Polarisation de relaxation de type Debye : (a) ϵ_r' et ϵ_r'' en fonction de fréquence (b) ϵ_r'' en fonction de ϵ_r'	78
Fig (III.9) : Variation de ϵ_r' et ϵ_r'' en fonction de la fréquence dans le cas d'une résonance.....	79
Fig (III.10) : Réponse du diélectrique à un champ oscillant.....	80
Fig (III.11) : Principe de la spectroscopie diélectrique.....	83
Fig (III.12) : Visualisation de l'angle de perte δ en fonction de ϵ_r' et ϵ_r''	85
Fig (III.13) : Matériels de mesure des propriétés diélectriques.....	86
Fig (III.14) : Variations de la partie réelle des de la permittivité relative aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différentes durées de vieillissement thermique: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja.....	89
Fig (III.15) : Les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative proche de la résonance pour l'huile minérale après 720 heures de vieillissement.....	92
Fig (III.16) : Variations du facteur de dissipation aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différentes durées de vieillissement thermique: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja.....	93
Fig (III.17) : Variations de la conductivité aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différentes durées de vieillissement thermique: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja.....	95
Fig (III.18) : Variations de la « partie réelle des de la permittivité relative aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différents nombres de décharges électriques appliquées: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja.....	96

Fig (III.19) : Variations du facteur de dissipation aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différents nombres de décharges électriques appliquées: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja.....	98
Fig (III.20) : Variations de la conductivité aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différents nombres de décharges électriques appliquées: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja.....	99
Fig (IV.1) : Allure de courant en fonction du champ appliqué dans un liquide isolant.....	103
Fig (IV.2) : Mouvement d'huile minérale sous forme des ondes mécaniques sous l'effet d'une tension DC 40kV appliquée aux deux électrodes planes espacées de 2.5mm.....	105
Fig (IV.3) : Développement de l'arc électrique entre deux électrodes planes espacées de 2.5mm immergées dans l'huile de soja sous une tension DC 50kV.....	106
Fig (IV.4) : Génération de bulle de gaz (ou d'aire) après l'arc produit entre deux électrodes planes espacées de 2.5mm immergées dans l'huile d'olive sous une tension DC 60kV.....	107
Fig (IV.5) : Courants de décharge générés dans les huiles étudiées sous des tensions continues: (a) huile minérale, (b) huile d'olive, (c) huile de soja.....	111
Fig (IV.6) : Courbe FFT normalisée correspondante des courants de décharge générés dans les huiles étudiées: (a) huile minérale, (b) huile d'olive, (c) huile de soja.....	113
Fig (IV.7). La densité spectrale de puissance des décharges générées dans: (a) l'huile minérale, (b) l'huile d'olive, (c) l'huile de soja, en utilisant un système plan-plan sous tension continu.....	115
Fig (IV.8) : Impulsion de courant de décharge générée dans l'huile minérale et son spectrogramme correspondant dans le domaine temps-fréquence.....	116
Fig (IV.9) : Deux impulsions successives de courant de décharge générées dans l'huile d'olive et leurs spectrogrammes correspondant dans le domaine temps-fréquence.....	117
Fig (IV.10) : Sept impulsions successives de courant de décharge générées dans l'huile de soja et leurs spectrogrammes correspondants dans le domaine temps-fréquence.....	118

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Classification des liquides isolants vis-à-vis du feu (selon la norme CEI 61100).....	20
Tableau (I.2) : Gaz dégagés par les différents types de défaut.....	23
Tableau (I.3) : Mécanismes de réactions d'oxydation des huiles minérales.....	30
Tableau (II.1) : Composition en acides gras des huiles végétales étudiées.....	44
Tableau (II.2) : Normes et valeurs recommandées / limites correspondantes aux paramètres étudiés.....	52
Tableau (II.3) : Paramètres initiaux des huiles étudiées.....	53
Tableau (III.1) : Description de performance du LRC-Meter utilisé.....	87
Tableau (IV.1) : Valeurs des descripteurs en domaine fréquentiel pour les décharges générées dans les huiles étudiées.....	114

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, le transformateur de puissance est l'un des équipements les plus coûteux et les plus importants dans les réseaux électriques. N'importe quelle panne ou mise hors service imprévisible de cet élément peut entraîner des dommages dans les réseaux électriques et conduire à d'importantes pertes financières. Cet équipement d'importance capitale, présente des pertes d'énergie qui provoquent une élévation de température. En haute tension, cette élévation est limitée par l'emploi d'un isolant liquide dont les fonctions principales sont: la protection de l'isolant solide, l'extinction des arcs de décharges et la dissipation de la chaleur [Fof-13]. De plus, ce liquide est un support d'information sensible aux défauts des transformateurs [Aug-12]. Le liquide couramment utilisé dans les transformateurs de puissance est de l'huile minérale. Sa popularité est due à son faible coût, ses bonnes propriétés, ses performances de refroidissement, sa compatibilité avec le papier cellulosique et principalement sa disponibilité [Lia-11, Yan-11].

Cependant, le succès de l'huile minérale commence à être limité pour trois raisons principales; premièrement, l'huile minérale présentant l'inconvénient d'être combustible grâce à son faible point de feu (environ 160°C), ce qui conduit à un risque plus élevé d'explosion du transformateur de puissance [Ciu-12]. Deuxièmement, la nécessité croissante de produits respectueux de l'environnement; parce que l'huile minérale a une faible biodégradabilité (20% d'huile minérale se biodégrade dans les 28 jours). Alors, l'environnement est affecté pour une longue période de temps dans le cas d'un accident, ce qui menace les êtres humains et l'écosystème [Oom-02, Asa-14]]. Troisièmement, les produits pétroliers vont finalement s'épuiser à l'avenir, car le pétrole est non renouvelable. Pour offrir une solution à ces problèmes, une nouvelle isolation liquide avec une résistance au feu attractif, une bonne biodégradabilité, à base d'une source d'énergie renouvelable et ayant le même rendement ou mieux que l'huile minérale, devient l'objet des recherches dans le monde entier.

Alors, les esters naturels ont remplacé avec succès les huiles minérales ; ils répondent à tous les critères de recherche. Ils ont des points de feu plus élevés que l'huile minérale, ce qui réduit les risques d'incendie. Ils sont très biodégradables (95% ou plus d'esters seront biodégradés dans les 28 jours) [Kha-07]. En outre, ces esters sont renouvelables parce qu'ils peuvent être extraits de légumes tels que l'huile d'olive, ricin, colza, soja, tournesol et noix de coco. Actuellement, l'utilisation d'huiles végétales est adaptée à des petits transformateurs de puissance et de distribution comme BIOTEMP, BIOTRANS et ENVIROTEMP développées respectivement par ABB, Cargill et Cooper Power System. Ces huiles présentent des caractéristiques comparables et parfois meilleures que les huiles minérales et silicones utilisées actuellement [Per-09, Dar-07], et de nouvelles améliorations sont en cours dans l'espoir qu'ils seront largement appliqués dans de grands transformateurs électriques.

A cet effet, notre travail est orienté vers la recherche des huiles végétales qui assurent, d'une part des caractéristiques acceptables en vue de leur utilisation dans les transformateurs de puissance, et d'autre part qui soient disponibles au niveau local et en quantité suffisante. Notre choix s'est porté sur deux huiles végétales : l'huile d'olive et l'huile de soja, et une huile minérale pour les comparer. Il est donc fondamental de connaître le comportement de ces huiles végétales lorsqu'elles sont soumises à des contraintes thermiques et électriques. Ce qui permettra d'envisager ou non leur introduction dans les transformateurs de puissance et de se prémunir d'outils de diagnostic sur des équipements de haute tension remplis d'huiles végétales.

Dans cette tendance, ce travail porte sur une caractérisation physico-chimique des trois huiles étudiées dans le but d'identifier les changements causés par les vieillissements thermique et électrique. Ainsi, il porte sur une caractérisation diélectrique en fonction de la fréquence en utilisant la spectroscopie d'impédance de ces huiles pour les deux types de vieillissement. Sans oublier l'étude du comportement dynamique au moment du claquage de ces huiles sous tension continue, par l'analyse des signaux du courant. Ce modeste travail est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présentera d'une manière générale une brève description du transformateur de puissance. Ainsi que les différents types d'isolants liquides, leurs rôles, et leurs principales propriétés (physiques, chimiques et électriques) utilisées dans ces

transformateurs. Les différents types et les causes de vieillissement de ces isolants seront notamment proposés dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre sera consacré aux essais expérimentaux réalisés au sein du laboratoire, concernant les dispositifs expérimentaux et les techniques d'essais et de mesure utilisées permettant d'appliquer les vieillissements thermique et électrique accélérés aux trois huiles étudiées dans l'objectif d'aller jusqu'à un état de dégradation avancée. Nous présenterons et discuterons les résultats de mesure des paramètres physico-chimiques obtenus de ces huiles en fonction du temps de vieillissement et du nombre de décharges, et nous les interpréterons sur la base des normes internationales pour mieux connaître la performance limite de ces huiles.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons brièvement les notions fondamentales de la polarisation et ses différents types sans oublier les phénomènes de relaxation et de résonance diélectrique. Ainsi, nous décrivons la technique de la spectroscopie d'impédance utilisée pour mesurer les propriétés diélectrique en fonction de la fréquence pour les trois huiles étudiées avec une interprétation des résultats obtenus de leurs propriétés pour les deux types de vieillissement : thermique et électrique.

Dans le quatrième chapitre, nous essaierons de décrire le comportement dynamique des trois huiles étudiées au moment de claquage sous tension continue et les courants de décharges générés dans ces huiles, leurs correspondantes FFT. Des descripteurs dans le domaine fréquentiel et des spectrogrammes de ces courants de décharge seront présentés, illustrant comment la composition des fréquences et l'intensité de chaque fréquence changent avec le temps.

Enfin, une conclusion générale viendra parachever ce travail où nous soulignerons les points essentiels dégagés par notre étude.

Chapitre I

Isolants liquides pour transformateurs de puissance, aspects théoriques

I. 1. Introduction :

Les huiles isolantes (ou les isolants liquides) sont utilisées depuis longtemps dans l'industrie électrique : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs Dans les transformateurs, les huiles jouent deux rôles essentiels: celui d'assurer l'isolation électrique et celui d'évacuer la chaleur des enroulements et du noyau magnétique. Dans les câbles et les condensateurs, les huiles isolantes sont utilisées pour l'imprégnation des matériaux solides (papier, polymères), elles permettent d'éliminer les microcavités gazeuses ou interstices d'air, en les remplaçant par de l'huile, matériau de rigidité diélectrique plus élevée et de meilleur comportement vis à vis des décharges partielles que les gaz occlus. Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées).

Tout au long de ce chapitre, nous nous pencherons principalement sur les isolants liquides utilisés dans les transformateurs de puissance. Nous commencerons par la technologie de ces transformateurs, suivis par le rôle des isolants liquides dans ces transformateurs, leurs différents types utilisés de nos jours et les principales caractéristiques (électrique, physique, chimique, et thermique). Et enfin, nous donnons leurs causes et leurs types de vieillissement.

I. 2. Technologie des transformateurs de puissance :

Le transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la Commission Electrotechnique Internationale est un appareil statique destiné à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitude généralement différentes, dans le but de transmettre de la puissance électrique [CEI-11]. Sa principale utilité est de réduire les pertes dans les réseaux électriques. Il s'étend de manière générale sur une gamme allant de 5MVA et 20kV à 1000MVA et 800kV. Seuls les transformateurs de puissance permettent, très économiquement, de

minimiser les pertes en ligne, en assurant le transport de l'énergie à longue distance sous tension élevée (200kV et 400kV et plus entre phases).

Les transformateurs de puissance assurent la conversion et le maintien du flux de puissance. Ils sont généralement utilisés dans les niveaux suivants [Bou-17]:

- ❖ À la sortie des centrales pour élever la tension pour la transmission;
- ❖ Dans les postes d'interconnexion ou de répartition;
- ❖ Dans les postes de distribution où la tension est réduite pour être adaptée à la tension de la distribution;
- ❖ Dans les postes de distribution où la tension est réduite pour être adaptée au niveau de la tension d'utilisation des entreprises et des résidences.

Dans la pratique, la majorité des transformateurs de puissance sont de construction triphasée. Pour des raisons d'encombrement (poids et dimensions) et de transport, on les trouve en unités monophasées. Les principaux organes du transformateur sont (Fig.I.1) :

- ❖ Les bornes de traversées basses et hautes tensions qui peuvent être isolées respectivement par de la porcelaine et du papier imprégné d'huile ou de résine époxy. Elles permettent le transit de la puissance. Certaines sont immergées, notamment pour les très hautes tensions, d'autres sont sèches ;
- ❖ La cuve constituée de tôles d'acier. Les parois de la cuve sont, selon les modèles, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectés par une vanne d'arrêt. La structure et les soudures d'assemblage peuvent être renforcées dans le cas où une bonne tenue au vide est nécessaire;
- ❖ Le noyau magnétique constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés. L'empilage et l'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les meilleures performances possibles du point de vue électrodynamique, électrique et acoustique.
- ❖ Les enroulements (feuillard ou rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium) sont montés sur le noyau. Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation d'huile et les échanges thermiques.

- ❖ Le conservateur d'huile (réservoir métallique (acier en général)) est situé sur le dessus du transformateur. Il joue un rôle de vase d'expansion pour l'huile. Les variations de température de l'huile impliquent des variations du volume.
- ❖ Les changeurs de prise en charge ou hors charge.
- ❖ Le fluide diélectrique (huiles minérales, synthétiques ou végétales).
- ❖ Les isolants solides (papiers à base de celluloses, rubans, vernis, résines époxydes, cartons, bois...).

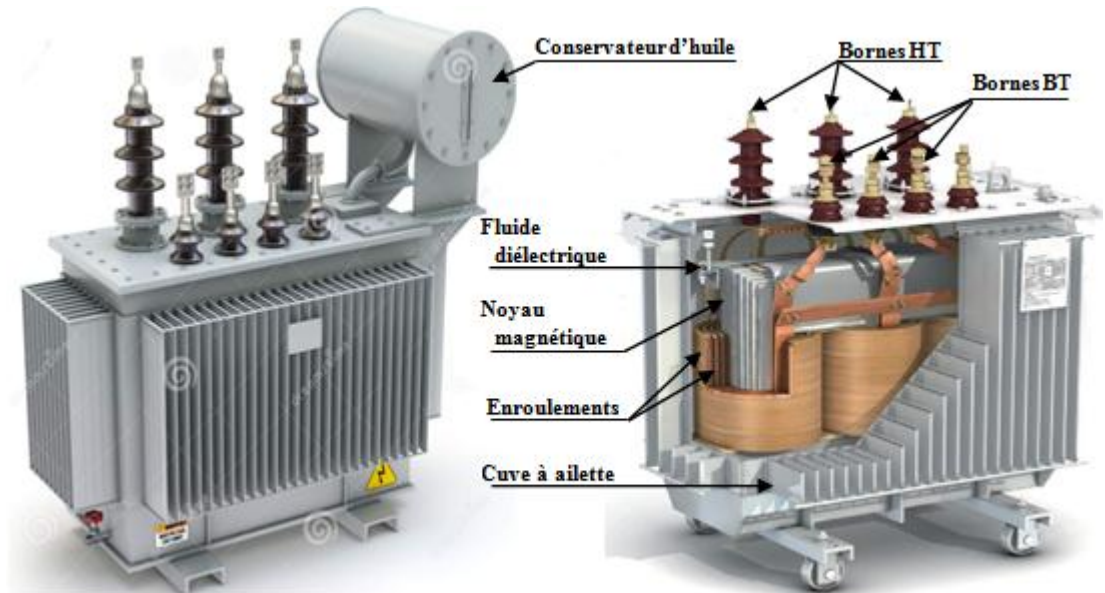


Fig (I.1) : Vue générale d'un transformateur de puissance avec ses différentes composantes

Les transformateurs de puissance sont regroupés en deux types:

- ❖ Les transformateurs de type colonnes (Fig.I.2.a), constitués des enroulements montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs [Lef-06].
- ❖ Les transformateurs de type cuirassés (Fig.I.2.b), constitués d'enroulements en forme "galettes" rectangulaires, séparées par des écrans isolants en fibre de cellulose. Ces enroulements sont ceinturés par le circuit magnétique. Avec cette technologie, l'huile circule moins bien et son mouvement doit être forcé [Per-05].

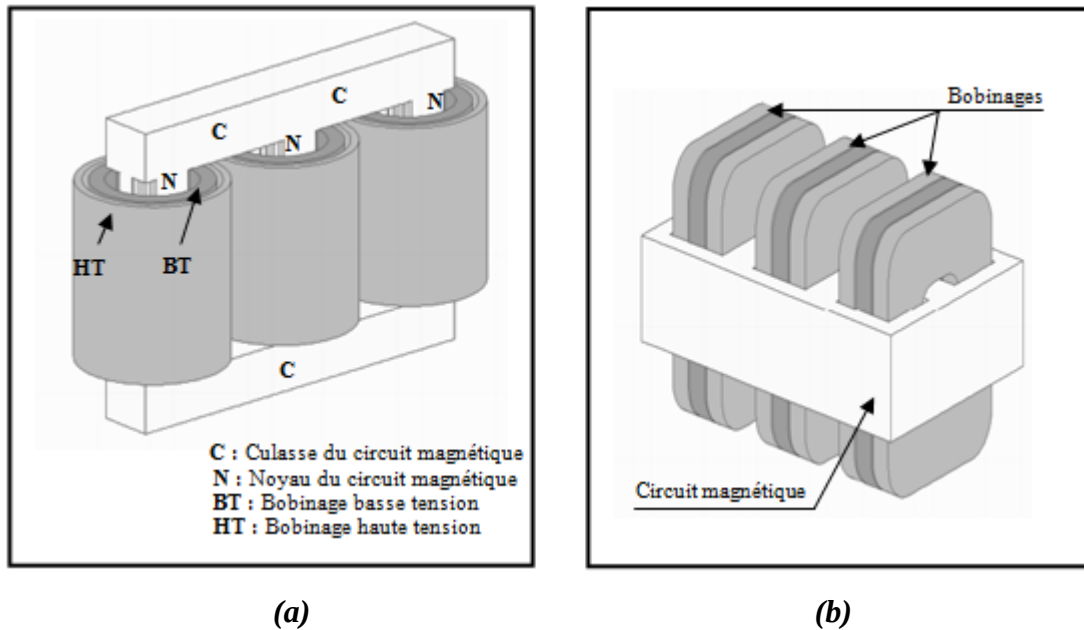


Fig (I.2) : Types de transformateur de puissance, (a) colonne et (b) cuirassé

La technologie colonne est particulièrement répandue, et comparativement à la technologie cuirassé est plus simple à réaliser. Elle est mieux refroidie de par le passage de l'huile naturellement aisé le long des colonnes, mais tient plus de place [San-11].

I.3. Rôle des isolants liquides dans transformateurs de puissance :

Les isolants liquides sont utilisés depuis longtemps dans l'industrie électrique : transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc [Ber-97]. Ils sont utilisés comme imprégnant d'isolations celluloses et/ou comme produit de remplissage des matériels. Les volumes liquides employés varient de quelques litres pour les condensateurs, à quelques dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance [Dan-11]. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation solide, sachant que la rigidité diélectrique des liquides est nettement supérieure à celle des gaz. Ces liquides sont également utilisés pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et, dans certains cas, pour améliorer la résistance au feu (transformateurs de distribution). Dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage [Ber-02].

De nos jours, les transformateurs de puissance sont tous de type immergés, c'est-à-dire remplis d'huile isolante [Per-05]. Contrairement aux petits transformateurs de distribution, qui peuvent être secs (isolés à l'air), les transformateurs immergés ont été conçus car :

- ❖ Les liquides isolants refroidissent et isolent à la fois le transformateur. Cela implique que les transformateurs immergés sont plus compacts que les secs de même puissance;
- ❖ Pour les mêmes performances diélectriques, les solides sont très coûteux par rapport aux liquides ;
- ❖ Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance ;
- ❖ L'analyse d'huile (tenure en eau, analyse de gaz, etc....). permettent de diagnostiquer l'état du transformateur à moindre coût ;
- ❖ Un autre avantage favorise les transformateurs immergés par rapport aux secs : ils sont moins bruyants et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

Il ressort par conséquent trois fonctions essentielles de l'isolant liquide dans le transformateur de puissance qu'il convient de souligner :

I. 3. 1. Fonction diélectrique : Isolation au sens électrique et strict :

Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation électrique entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée soit:

- ❖ Par l'isolant liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple).
- ❖ Par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide, c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement.
- ❖ Par une isolation mixte: combinaison de films de l'isolant liquide et de barrières d'isolants solides (Fig.I.3), c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.

A cette isolation électrique, il y a lieu d'ajouter une autre isolation au sens strict qui permet de ralentir l'oxydation directe des isolations solides [Fof-08, Aka-00].

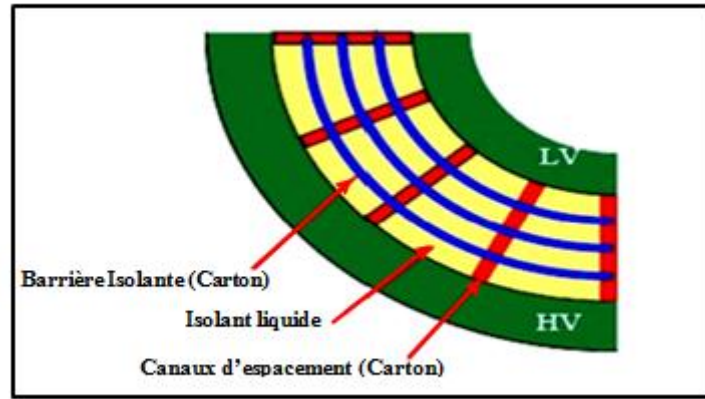


Fig (I.3) : Une partie de la section transversale d'un système d'isolation des transformateurs de puissance

I. 3. 2. Fonction transfert de chaleur :

L'isolant liquide assure le refroidissement d'une façon permanente du transformateur de puissance qui génère beaucoup de pertes énergétiques sous forme de chaleur due aux effets Joules, les courants de Foucault et l'hystérésis. Le circuit de refroidissement du transformateur de puissance se compose:

- ❖ d'un ensemble de canaux ménagés dans la partie active dans lesquels l'isolant liquide reçoit les pertes ;
- ❖ d'un échangeur de chaleur à l'extérieur de la cuve où l'isolant liquide évacue les calories. On distingue trois types d'échangeurs: les radiateurs (Fig.I.4.a), aéroréfrigérants (Fig.I.4.b), hydroréfrigérants (Fig.I.4.c) [Otu-93].



(a)



(b)



(c)

Fig (I.4) : Types d'échangeurs de transformateur de puissance

Le refroidissement s'effectue via cet isolant liquide circulant en circuit fermé de la partie active vers l'échangeur du transformateur en service par le phénomène de convection naturelle ou forcée (à l'aide de pompes ou de ventilateurs) ou par la conduction thermique (Fig.I.5) [Loi-11, Gar-12].

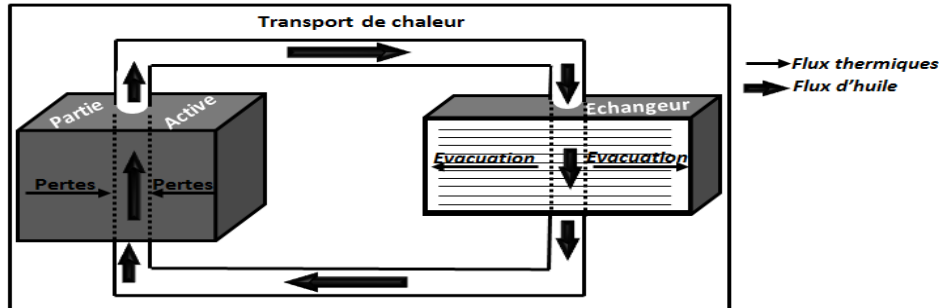
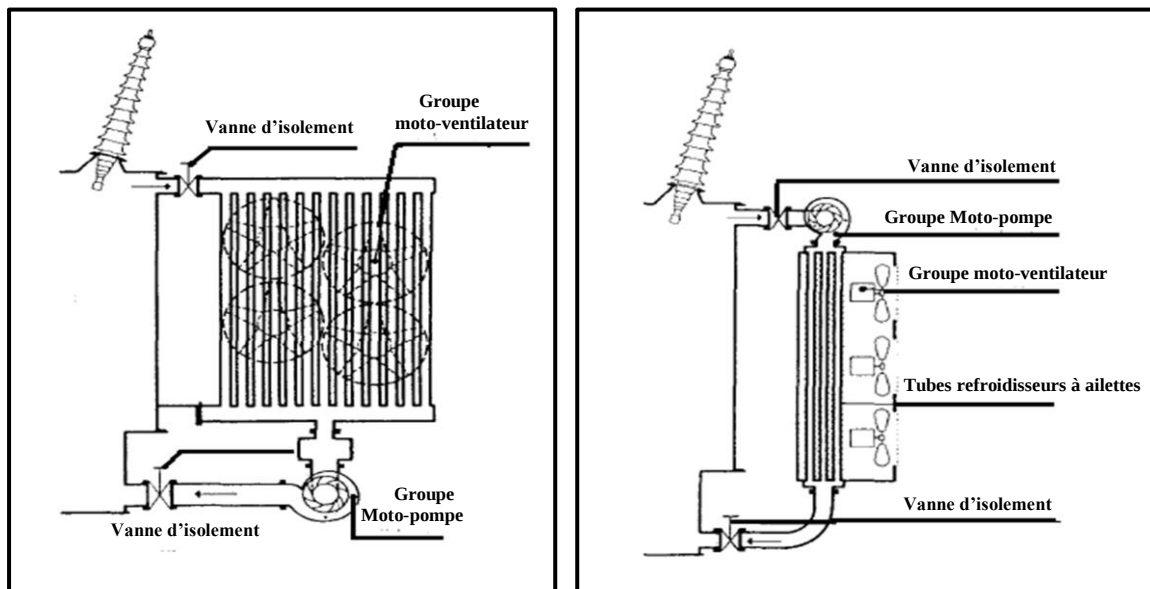


Fig (I.5) : Schéma de principe du circuit de refroidissement

Ces échangeurs permettent l'évacuation énergétique de l'isolant liquide vers un autre fluide extérieur au transformateur: le plus souvent l'air, parfois l'eau. Les radiateurs sont traversés par l'isolant liquide et entourés d'air ambiant (Fig.I.6.a). Ils sont souvent accompagnés de ventilateurs favorisant le mouvement de l'air et par conséquent l'évacuation énergétique. Les aéroréfrigérants sont constitués de nombreux tubes à ailettes ventilés entourés d'air ambiant (Fig.I.6.b). Mais, les hydro réfrigérants forçant un échange avec un circuit d'eau séparé [San-11].



(a) : Radiateur ventilé

(b) : Aéroréfrigérant

Fig (I.6) : Refroidissement par circulation forcée de l'isolant liquide dans les échangeurs de transformateur de puissance

A ces deux fonctions fondamentales de l'isolant liquide dans les transformateurs de puissance, il y a lieu d'ajouter une autre fonction non moins négligeable :

I. 3. 3. Fonction de résistance à l'incendie :

La fonction de résistance à l'incendie est liée au point de feu du l'isolant liquide utilisé qui doit être élevée, supérieur à 135 °C pour des raisons de sécurité [CEI-03]. Un dépassement de cette température peut conduire à des incendies voire à des explosions qui peuvent endommager gravement les installations environnantes [Per-05].

I.4. Différents types des isolants liquides:

En l'absence d'une classification normalisée, On distingue trois classes de l'isolant liquide utilisé à l'échelle industrielle :

- ❖ Les huiles végétales ;
- ❖ Les huiles minérales ;
- ❖ Les huiles de synthèse ;

Ce classement est lié à l'ordre d'apparition chronologie 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.

I. 4. 1. Huiles minérales :

Les huiles minérales sont les plus utilisées dans les transformateurs. Elles possèdent une faible viscosité, un bon point d'écoulement pour assurer le transfert de chaleur, un point d'éclair élevé, une bonne stabilité chimique vis-à-vis des phénomènes d'oxydation, une rigidité diélectrique élevée et une bonne compatibilité avec les isolants cellulose [Rou-98]. Elles sont encore disponibles et à des prix assez bas. C'est principalement pour ces raisons technico-économiques, que les huiles minérales sont le 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 [Dan-11].

Les huiles minérales sont des hydrocarbures obtenues à partir du raffinage du pétrole brut. Selon l'origine du pétrole et du processus de raffinage, on peut identifier différents types d'huiles (Fig.I.7).

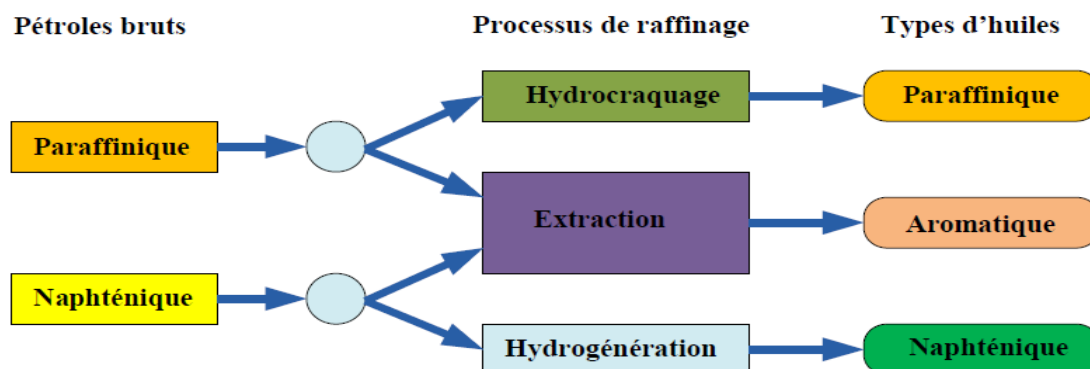


Fig (I.7) : Processus de raffinage pour les huiles brutes

Une fois les impuretés enlevées, ces huiles deviennent des mélanges très complexes ; elles peuvent comporter plus de 3000 hydrocarbures différents [Sab-98]. Ces molécules ne comportent que du carbone et de l'hydrogène. Elles sont divisées en trois groupes comme le montre la figure I.8 : les alcanes (ou paraffines), les cyclanes (ou naphènes) et les composés aromatiques. D'autres constituants peuvent être présents dans l'huile, à savoir de petites quantités de soufre (0.1 à 7 % en masse), d'azote (0.001 à 2 %) et des traces d'oxygène (400 à 600 ppm en masse) [Fof-08]. Selon le processus de raffinage, les proportions de paraffines, de naphènes et d'aromatiques peuvent varier de 40 à 60 %, 30 à 50 % et 5 à 20 % respectivement [Ebe-10, Fof-01].

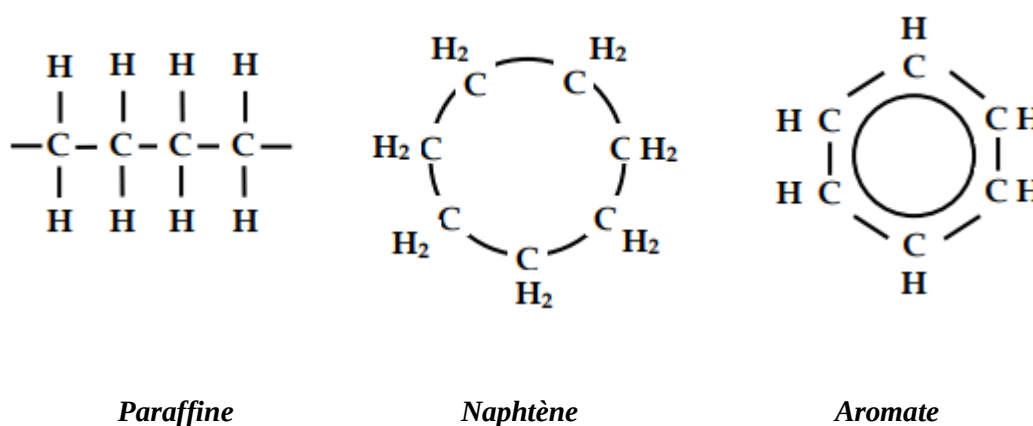


Fig (I.8) : Structures moléculaires d'hydrocarbures composés l'huile minérale [Jim-16]

L'un des inconvénients des huiles minérales est leur inflammabilité. En effet, ces huiles possèdent un point d'éclair relativement bas. Ceci pose un problème pour les appareils installés en zone urbaine, près de la population, tels que les transformateurs de traction ou de distribution. Ce problème est moins important pour les gros transformateurs de puissance qui sont en général installés loin de la population. Cependant, il reste toujours grave du fait que ces derniers peuvent provoquer d'importants dégâts aux installations qu'ils alimentent (centrale nucléaire et industries) [Dan-11].

I. 4. 2. Huiles de synthèse :

Bien que les huiles minérales occupent une place très importante parmi les liquides pour les applications électrotechniques, les huiles de synthèse sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est en particulier le cas lorsqu'il s'agit:

- ❖ D'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de la population (transformateurs de distribution et de traction) ;
- ❖ De rechercher une meilleure stabilité thermique et chimique ;
- ❖ De la recherche de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs).

Les liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés chimiques. Il existe trois principaux types de liquides synthétiques :

- ❖ Les silicones ;
- ❖ Les hydrocarbures chlorés (halogénés), tel que les PCB ;
- ❖ Les esters synthétiques ou esters organiques (esters de pentaérythritol, les phtalates);

Les esters synthétiques sont utilisés dans les transformateurs de distribution pour leur résistance au feu. Leur point de feu élevé ($> 3000^{\circ}\text{C}$) par rapport aux huiles minérales constitue l'une des caractéristiques principales de ces produits. C'est ainsi qu'on les retrouve dans les appareillages proches de la population, dans les immeubles, les tunnels,... etc [Dan-11]. L'utilisation des silicones pour le remplissage des transformateurs est moins répandue que celle des esters synthétiques, à cause de leur coût très élevé (huit fois plus cher que l'huile minérale) [Bet-15], et de la difficulté à les faire éliminer après usage du fait qu'elles ne sont pas du tout biodégradables. Elles sont employées dans les transformateurs de distribution, et plus particulièrement dans les transformateurs de

traction (embarqués dans les trains), car elles ont une bonne stabilité thermique en supportant des températures de 125 à 150°C [Fof-01].

La viscosité élevée est parmi les points faibles qui caractérisent les esters synthétiques. Cette viscosité devient importante aux basses températures. L'autre point faible concerne leur faible stabilité au gazage (gassing), une étude faite par [Dan-11, N'ch-11] a mis en évidence leur mauvaise stabilité avec une forte production de gaz en comparaison avec d'autres types d'huile (Fig. I.9).

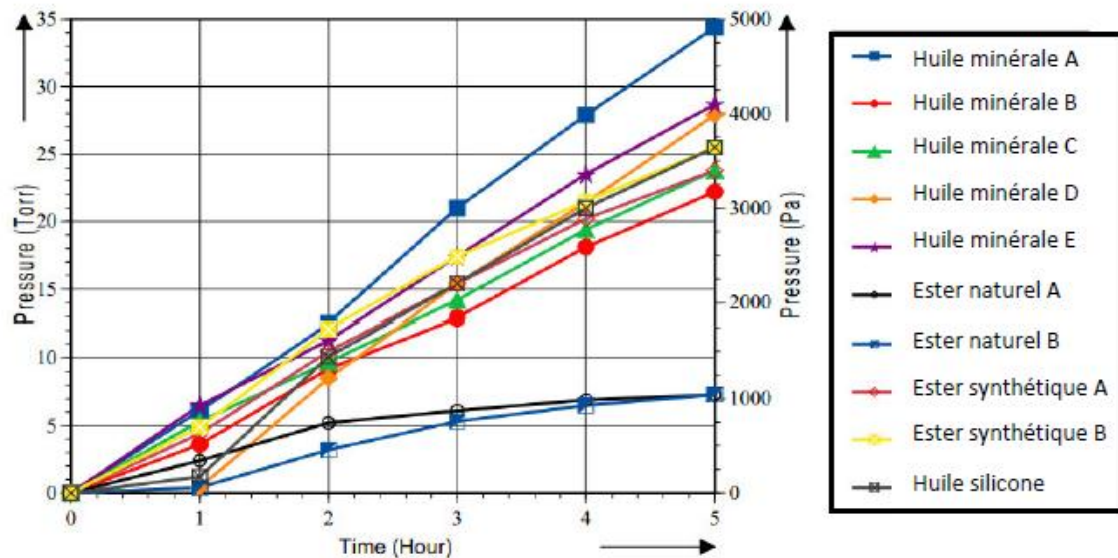


Fig (I.9) : Courbe de gassing des huiles isolantes utilisées dans les transformateurs de puissance [N'ch-11].

I. 4. 3. Huiles végétales ou esters naturels :

Ce type d'huile n'est pas vraiment utilisé dans les transformateurs. Cependant, de nombreuses études ont été faites afin de remplacer les huiles minérales par des huiles végétales pour l'imprégnation des transformateurs [CEI-05, Oom-95]. Beaucoup d'huiles à base d'esters naturels ont été développées en vue d'une utilisation dans les transformateurs de puissance comme BIOTEMP, BIOTRANS et ENVIROTEMP développées respectivement par ABB, Cargill et Cooper Power System. Ces huiles présentent des caractéristiques comparables et parfois meilleures que les huiles minérales et silicones utilisées actuellement. Deux unités ont été d'ailleurs installées ces dernières années qui utilisent ces huiles dans les transformateurs de distribution: l'une au Royaume-Uni (90 MVA/132 kV) et l'autre au Brésil (245 kV/22 Mvar) [Dar-07, Per-09]. Cependant, il y a peu d'expérience pour utiliser de ces huiles dans les grands transformateurs de puissance [Puk-13].

Les huiles végétales naturelles sont obtenues par trituration (broyage et pression) des graines (soja, maïs, colza, tournesol, ricin, palmiste, etc.....). Elles sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple, avec trois acides gras. Ces acides sont monocarboxyliques (de formule $R\text{-COO-H}$), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone. Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés. La réaction d'estérification d'une huile végétale est la suivante (Fig.I.10):

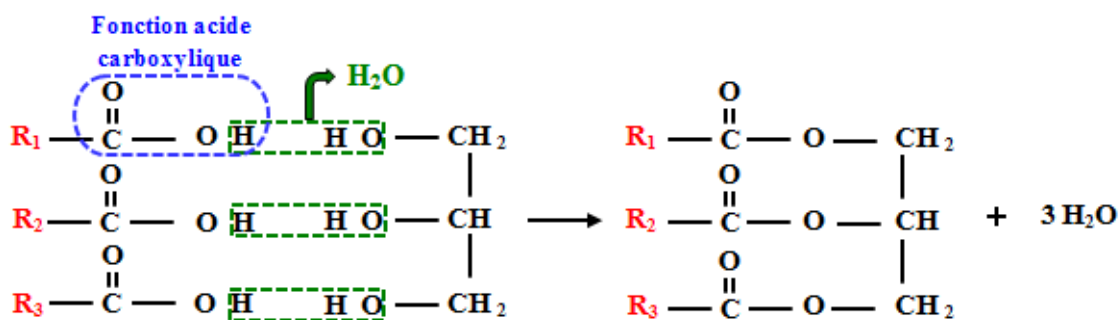


Fig (I.10): Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides);

R_1 , R_2 et R_3 sont les chaînes acides gras du même ou de différent type

Au niveau de ses qualités, les huiles végétales sont en général très peu toxiques, possèdent une excellente biodégradabilité (Fig.I.11), peu inflammables (Fig.I.12), et elles ont une grande solubilité de l'eau (comme les esters organiques) en les comparant aux huiles minérales [Abd-12, Puk-13].

Mais malheureusement en contrepartie, elles ont une grande sensibilité à l'oxydation [Che-09, Pen-09]. De ce fait, leur usage est limité aux appareillages électriques scellés qui ne sont pas respirants, c'est à dire sans communication avec l'atmosphère, où cette sensibilité est compensée avec des antioxydants dont les propriétés environnementales sont mauvaises. Ces huiles présentent une viscosité plus élevée que les huiles minérales et notamment un point d'écoulement assez haut (aux alentours de 20°C) [Pen-09]. Ceci limite le transfert de chaleur et restreint leur usage dans les pays où le climat n'est pas trop froid. Enfin, les huiles végétales neuves ont des propriétés électriques voisines de celles des huiles minérales, bien que leur résistivité soit moins élevée [Dan-11, Pen-09].

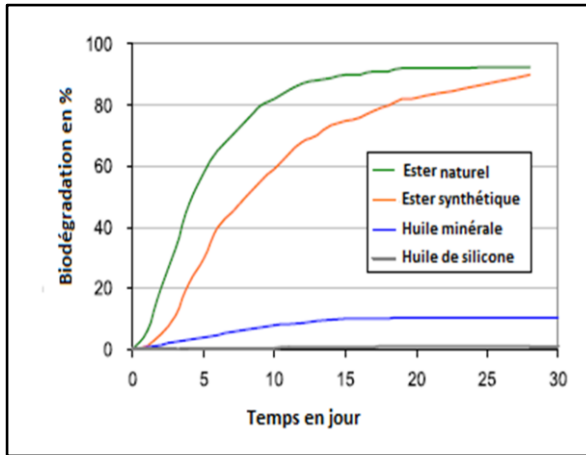


Fig (I.11): Biodégradabilité de de différents types d'isolant liquide [Cig-10]

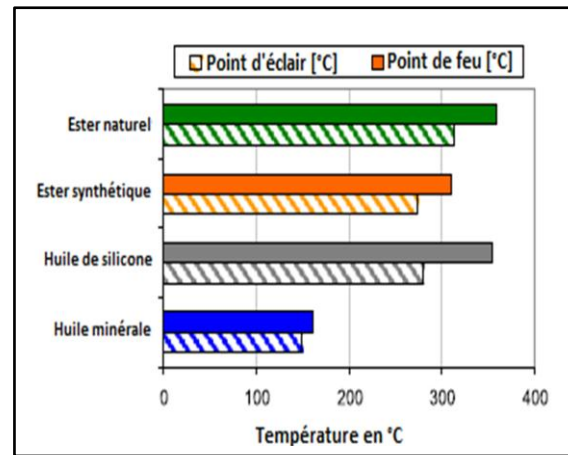


Fig (I.12): Les points typiques d'éclair et de feu de différents types d'isolant liquide [Puk-13]

I.5. Propriétés des isolants liquides :

Les huiles isolantes pour transformateur de puissance, quel que soit leur type, et dans le but d'assurer l'isolation électrique et le transfert de chaleur, doivent toujours répondre à plusieurs critères physiques, chimiques, et électriques.

I.5.1. Propriétés Physiques :

I.5.1.1. Viscosité :

Pour les transformateurs de puissance, la viscosité est parmi les paramètres essentiels des isolants liquides, car elle traduit directement la capacité de l'huile à jouer son rôle de refroidissement [Per-09]. La viscosité se définit comme la propriété qui caractérise sa résistance à l'écoulement. Plus précisément, la viscosité résulte des forces qu'opposent les molécules d'un fluide aux efforts tendant à le faire déplacer par un mouvement relatif en son sein [Per-05]. En d'autres termes, elle mesure les frottements dus aux mouvements internes entre les molécules du fluide. Il existe deux types de viscosité : la viscosité dynamique qui visualise l'aspect microscopique et la viscosité cinématique exprimé en centistokes (cst) qui est la plus importante car elle traduit l'aspect macroscopique.

I.5.1.1.1. Viscosité dynamique :

Si on considère que le fluide est formé de superposition de couches d'épaisseurs très petites, ces dernières ont des vitesses différentes comme le montre la figure suivante [AST-01,Lin-14]:

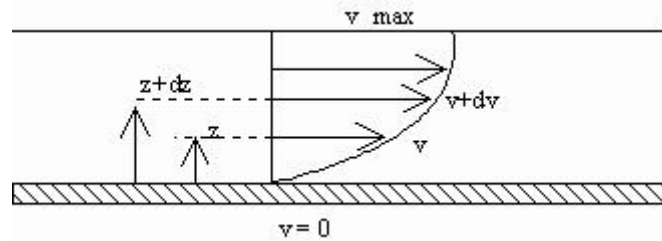


Fig (I.13) : Représentation des vitesses d'un fluide en mouvement

La force de frottement qui s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre est donnée par [Sch-00, Vis-07]:

$$F = -\eta S \frac{dv}{dz} \dots \dots \dots (I.1)$$

Où

η : est la viscosité dynamique ;

S : est la surface de séparation de deux couches superposées.

On distingue deux types de fluides. C'est la viscosité dynamique qui permet de différencier ces deux types de liquides. Si un fluide, à température constante, a une viscosité qui reste constante quel que soit la valeur de la contrainte appliquée, on dit qu'il est newtonien, et inversement, lorsque la contrainte appliquée fait varier la viscosité, il est dit non newtonien. Les huiles de transformateur de puissance sont de type newtonien. La viscosité diminue avec la température et de nombreuses lois empiriques ont été proposées. On utilise généralement la relation de Vogel, Fulcher, Tamman et Hesse (VFTH) [Abd-12]:

$$\lg \eta = A + [B(T - T_0)] \dots \dots \dots (I.2)$$

Avec :

A et B : deux constantes positives caractéristiques du liquide;

T : température (en K) ;

$T_0 = 273.15$ K.

I.5.1.1.2. Viscosité cinématique :

La viscosité mesurée des huiles de transformateurs est la viscosité cinématique ν , plus facile à déterminer que la viscosité dynamique η . Pour un transformateur, une huile de faible viscosité permet une circulation facile et par conséquent un refroidissement efficace. Elle se détermine suivant la norme ISO 3104 [ISO-94] et peut s'écrire à la température donnée [Dal-99]:

$$\nu = \eta / \rho \dots \dots \dots (I.3)$$

Où

ν : est la viscosité cinématique ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) ;

η : est la viscosité dynamique (Pa.s) ;

ρ : est la masse volumique ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$).

La viscosité est extrêmement sensible aux variations de la température. Aux basses températures, les huiles deviennent de plus en plus visqueuses, ce qui conduit à une difficulté de se faire circuler dans le transformateur pour refroidir les parties actives chaudes [Xos-09]. Par contre, aux hautes températures, la viscosité de ces fluides décroît très rapidement. Suivant le type d'huile, la variation de viscosité avec la température est différente.

I.5.1.2. Point d'écoulement :

Le point d'écoulement est également un paramètre important dans le choix d'un liquide destiné à évacuer les calories. C'est la température la plus basse à laquelle le fluide coule lorsqu'il est refroidi sans agitation, et cela dans des conditions normalisées. Ceci est lié à la masse moléculaire, la composition du liquide et au mélange de différentes molécules [Seg-00].

La connaissance de cette caractéristique est primordiale pour l'utilisation de transformateurs dans les pays froids. Les liquides isolants utilisés dans l'électrotechnique se figent généralement à des températures allant de -60°C pour (les polybutènes, huiles silicones) à -30°C pour (les huiles minérales) [Tou-16].

I.5.1.3. Conductivité et capacité thermique :

La capacité thermique massique ou chaleur spécifique se définit comme étant la quantité de chaleur pour augmenter d'un degré Kelvin la température d'un kilogramme

d'une substance, sans qu'il y ait de changement de phase [Whi-00]. 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 (puisque cette dernière décroît avec la température). Elle s'étend pour les liquides isolants de 1000 à 2300 J/kg.K, et peut être calculée par la relation suivante [Seg-00]:

$$C_p = (1684 - 3.39 T) / \sqrt{\rho_{15}} \dots \dots \dots (I.4)$$

Où

C_p : est la chaleur spécifique (J/kg.K) ;

T : est la température (K) ;

ρ_{15} : est la masse volumique à 15°C.

La conductivité thermique qui est une grandeur physique qui caractérise un matériau lors du transfert thermique, elle indique le flux thermique s'écoulant, en régime permanent, sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. En d'autres termes, elle indique la quantité de chaleur transférée par unité de surface et de temps sous un gradient thermique de 1K/m [Tsi-12,Whi-00]. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent, et s'étend de manière générale de 0,10 à 0,16 W/m.K pour les liquides isolants. On utilise la formule de Cragoe pour la calculer :

$$\lambda = 0.117 (1 - a . T) / d_{15} \dots \dots \dots (I.5)$$

Où

λ : est la conductivité thermique (W/m.K) ;

a : est une constante égale à 5, 4.10⁻⁴ ;

T : est la température (K) ;

d_{15} : est la densité à 15°C.

I.5.1.4. Point d'éclair et point de feu

Le chauffage progressif d'un liquide provoque le dégagement de vapeurs, qu'il s'agisse d'un produit pur ou d'un mélange. Dès que la concentration en vapeur au-dessus du liquide devient suffisante pour former un mélange inflammable dans l'air, le mélange brûle à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée point d'éclair du liquide [Ber-02].

Si on poursuit le chauffage, l'expérience montre qu'une combustion permanente s'établit en présence d'une flamme. La température correspondante est appelée point de feu du liquide. Les liquides ininflammables tels que les PCB, n'ont pas de point de feu. Pour que le risque d'inflammation devienne négligeable, il faut que la température reste inférieure de 25 à 30°C au point d'éclair [Rai-93].

La norme CEI61100 permet de classer les liquides isolants en fonction de leur point de feu et de leur pouvoir calorifique inférieur (CPI) (qui caractérise la quantité d'énergie produite par la combustion totale du produit) [Tou-16] (Tableau I.1).

Tableau (I.1) : Classification des liquides isolants vis-à-vis du feu
(selon la norme CEI 61100) [Tou-16]

Classement sur le point de feu		Classement sur l'énergie de combustion	
Classe	point de feu	Classe	PCI
O	< 300°C	1	>42MJ/Kg
K	>300°C	2	32< PCI< 42MJ/Kg
L	Pas de point de feu	3	PCI< 32MJ/Kg

I.5.2. Propriétés Chimiques :

I.5.2.2. Teneur en eau :

La teneur en eau est la quantité d'eau (en ppm : partie par million) dissoute dans l'huile isolante. C'est une donnée primordiale pour la caractérisation d'une huile isolante. Une haute teneur en eau joue un rôle crucial dans la vie du transformateur, parce qu'elle conduit à une perte de la capacité diélectrique de l'huile, provoque le vieillissement prématuré de la cellulose et mène à l'échec du transformateur [Nod-02].

L'eau peut se trouver dans l'huile du transformateur sous trois formes [Du-99]. Dans la pratique, l'eau se dissout dans l'huile, comme elle peut être fixée à certaines molécules d'huile par des liaisons chimiques faibles, surtout pour l'huile la plus dégradée ou encore sous forme libre ou gouttelettes lorsque l'humidité dans l'huile dépasse la valeur de saturation. Il a été montré que la teneur en eau de l'huile va augmenter au cours de la vie du transformateur suite à la pénétration de l'humidité provenant de l'atmosphère [Tou-16].

L'influence de l'eau sur les propriétés d'un liquide isolant dépend généralement de l'humidité relative W_r (%) qui est le rapport entre la teneur en eau de l'huile W_{abs} (ppm) et sa teneur à saturation $W_L(T)$ (ppm). Elle est donnée par [Fof-01]:

$$W_r = W_{abs}/W_L(T) \dots \dots \dots (I.6)$$

La teneur à saturation, qui représente la solubilité dépend de la température (T) : plus la température est élevée, plus la solubilité est grande. Par ailleurs, la solubilité de l'eau dépend beaucoup de la nature chimique du liquide. La conductivité n'est affectée que pour des teneurs en eau supérieures à la saturation [Ber-02]. Par contre, la rigidité électrique diminue fortement lorsque l'humidité relative dépasse 50%.

I.5.2.2. Acidité :

L'acidité est utilisé pour mesurer la teneur en acides présents dans l'huile de transformateur, en mesurant la valeur de l'hydroxyde de potassium KOH, en mg, ce qui est nécessaire pour neutraliser le composant acide total dans chaque gramme d'huile isolante. L'acidité permet de suivre l'altération de l'huile, elle donne une idée claire sur son degré d'oxydation et de décider du moment où elle doit être mise hors service. En effet elle est due à la présence de produits hydrocarbures acides tels que les carboxyliques dont la formation est favorisée sous l'effet de la température, de la pression et de l'oxygène [Lai-12]. L'acidité d'une huile neuve est très faible en service. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile en service [Nac-09]. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante. Cette stabilité s'explique par les dépôts qui précipitent.

La présence de l'acidité affecte non seulement l'huile, mais attaque aussi d'une part, les canaux de refroidissement à l'intérieur du bobinage qui peuvent les obstruer par la formation éventuelle de boues [Nyn-04]. D'autre part, attaque l'isolation solide et les parois métalliques internes des transformateurs [Ems-94], ce qui laisse apparaître d'importantes concentrations de porteurs de charges libres conduisant ainsi à [Noi-13, Koc-07]:

- ❖ Diminuer la rigidité diélectrique ;
- ❖ Augmenter le facteur de perte.

I.5.2.3. Oxydation :

L'oxydation constitue le facteur prédominant dans le vieillissement de l'isolant liquide. On désigne par oxydation, un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes entre l'huile et l'oxygène [Fox-07]. Ces réactions sont influencées par la température, la concentration de l'oxygène, l'humidité et l'action catalytique des métaux [Mil-90, Kan-01].

Les huiles comme tous les produits naturels s'oxydent en donnant des produits de dégradation qui se caractérisent d'abord par une évolution de la couleur et de l'odeur, liée à la formation de composés acides légers, puis pour une apparition de dépôt de résidus agressifs, liée aux acides lourds, et accompagnée généralement d'une augmentation de la viscosité. Les conséquences de l'oxydation de l'huile pour les isolations sont :

- ❖ Une augmentation de l'acidité et de la teneur en eau d'huile [Per-05] ;
- ❖ Une mauvaise évacuation de la chaleur par suite de l'accroissement de la viscosité et de la présence de dépôts [Ber-02, Abe-08];
- ❖ Une détérioration des propriétés électriques de l'huile ; sa conductivité et sa tangente de l'angle de pertes augmentent [Fox-07];
- ❖ Une augmentation des pertes dans les isolations imprégnées qui peuvent entraîner le claquage thermique [Noi-13, Mcs-01].

I.5.2.4. Les gaz dissous :

Une huile isolante soumise à une contrainte électrique ou thermique génère des gaz faisant intervenir différents mécanismes. Ces gaz proviennent de la décomposition des chaînes de carbone essentiellement au niveau de la liaison C-C vu sa faible énergie (346Kj/mole) (Fig.I.14). Cette décomposition peut être due à la collision avec les électrons libres accélérés par le champ électrique, ou une chaleur importante [Ara-09].

L'analyse des gaz dissous est couramment utilisée pour connaître l'état de dégradation d'une huile, et suivre le comportement du transformateur à travers des analyses par chromatographie en phases gazeuse. Elles permettent de :

- ❖ Détecter la présence d'anomalies dans les transformateurs dès leur premier stade d'apparition et de suivre leur évolution ;
- ❖ D'avoir des hypothèses sur le type de défaut (arc, point chaud, décharge partielle,ect) [Nod-02].

Cette technique de diagnostic est une des méthodes prédictives plus fiable et présente l'avantage de pouvoir être effectuée sans laisser le transformateur hors services. L'apparition de défauts d'origine thermique conduit à la dégradation de l'huile. Chaque type de défaut "fait cuire" l'huile ou le papier d'une manière différente, produisant des quantités relatives de gaz dissous qui caractérisent le défaut. Les quantités sont plus ou moins importantes en fonction de l'intensité de la contrainte. La nature des gaz formés et leurs proportions relatives permettent d'obtenir des renseignements sur la nature de la contrainte, son intensité et le type de matériau affecté (*Tableau I.2*).

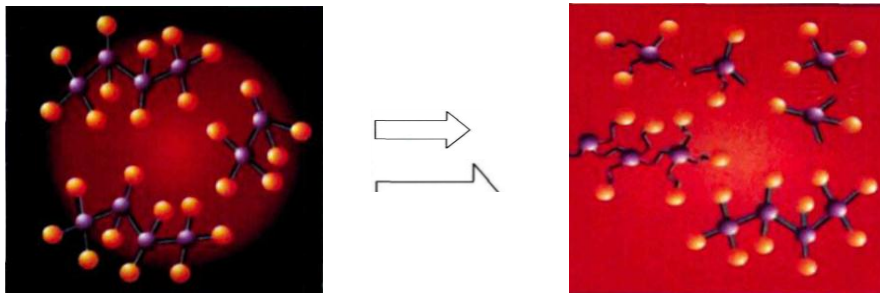


Fig (I.14) : Rupture des liaisons des molécules d'huile [Fof-10].

Tableau (I.2) : Gaz dégagés par les différents types de défaut [Bac-12, IEE-09, Gus-98]

Type	Gaz	Symboles	Interprétations
Gaz Combustible	Méthane	CH_4	Décharges partielles ou décomposition thermique d'huile.
	Acétylène	C_2H_2	Arc électrique.
	Ethylène	C_2H_4	Défaut thermique (décomposition thermique d'huile ou de l'isolement solide).
	Ethane	C_2H_6	défaut thermique (décomposition thermique d'huile).
	Hydrogène	H_2	Effet couronne ou décharge partielle
	Oxyde de carbone	CO	Décomposition de la cellulose (isolation solide)
Gaz non Combustible	Dioxyde de carbone	CO_2	

1.5.3. Propriétés Electriques :

Les propriétés électriques des liquides dépendent de leur formulation (composition et constitution moléculaire, etc.) et de leurs conditions d'utilisation ou conditionnement. Il faut donc éliminer toute impureté qui ne constitue pas le liquide lui-même ; résidus de synthèse, particule, gaz, molécule d'eau. Cette élimination est faite par des opérations de traitement qui comprennent des phases de déshydratation et de dégazage sous vide et en température, ainsi que des filtrations de l'ordre du μm .

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. Dans l'industrie, ces mesures sont souvent rapportées à la température moyenne de fonctionnement d'un transformateur, soit 90 °C.

1.5.3.1. Permittivité ou la constante diélectrique:

La permittivité est la constante macroscopique fondamentale qui caractérise un diélectrique. Elle définit la possibilité d'être traversée par un courant électrique, sous l'action d'un champ électrique. Ceci résulte de diverses contributions de déplacements des charges, orientation des dipôles électriques et déplacement des charges d'espace [Orl-03]. Elle est définie par la relation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \dots \dots \dots (I.7)$$

Où

ε : est la permittivité absolue de l'huile (F/m) ;

ε_0 : est la permittivité du vide ($\varepsilon_0 = 1/36 \cdot \pi \cdot 10^9 = 8.85 \text{ pF/m}$) ;

ε_r : est la permittivité relative de l'huile (sans unité).

La permittivité relative ε_r est aussi appelée constante diélectrique, et est définie par le rapport entre la capacité d'un condensateur rempli d'huile (C_p) et la capacité du même condensateur sous vide (C_0). Dans la pratique, la valeur de référence de ε_r est obtenue en comparant le condensateur plein au condensateur dans l'air :

$$\varepsilon_r = C_p / C_0 \dots \dots \dots (I.8)$$

La permittivité est une caractéristique intrinsèque car elle dépend essentiellement de la structure chimique du produit. Elle caractérise la polarité de la molécule. La permittivité décroît avec l'augmentation de la température et de la fréquence.

I.5.3.2. Rigidité diélectrique et Tension de claquage :

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique qu'on peut lui appliquer sans qu'il n'y ait passage d'un arc électrique entre les deux électrodes. Dans l'industrie et pour définir la tenue diélectrique d'une huile, on parle de la tension de claquage qui désigne l'apparition soudaine d'un arc électrique traversant l'huile. La rigidité diélectrique moyenne E_c est donnée par la relation suivante :

$$E_c = U_c / e \dots \dots \dots (I. 9)$$

Où

E_c : est la rigidité diélectrique (kV/mm) ;

U_c : est la tension de claquage (kV) ;

e : est la distance entre les deux électrodes (mm).

Toutes les huiles sont de bons isolants mais la résistance au claquage dépend de la nature de l'huile et de sa qualité. Cependant, quel que soit la qualité d'une huile, sa rigidité est influencée par la présence de polluants extérieurs qui la réduisent fortement : les bulles d'air, les particules conductrices et non conductrices, l'humidité et l'acidité de fluide [Ray-13].

I.5.3.3. Conductivité et Résistivité :

Tout liquides ; pour être isolant électrique, doit conduire le moins possible d'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité σ doit être la plus faible possible ou inversement sa résistivité ρ doit être la plus forte possible. La conductivité d'un liquide isolant est le résultat de déplacement des charges libres existantes (positive et négative) sous l'effet du champ électrique [Tob-96].

Dans le sens électrique, la résistivité dépend de l'aspect moléculaire et des substances étrangères dans l'huile considérées comme impuretés (poussières, particules, gaz et humidité), même si la quantité de ces impuretés est aussi faible (quelques ppm). Et dépend aussi de la polarité dans le sens physique.

Plus la température est élevée, plus la viscosité du liquide est faible, plus la dissociation des impuretés dissociables en ions est forte, et plus la mobilité des ions est grande, et par conséquent plus la conductivité est élevée. La résistivité d'un liquide diminue donc lorsque la température augmente [Ber-02]. C'est pour cette raison que la plupart des spécifications des produits indiquent une valeur de résistivité à 90°C (température moyenne de fonctionnement d'un transformateur). L'ordre de grandeur de la résistivité pour les liquides diélectriques utilisés dans l'industrie varie de 10^{11} à $10^{17} \Omega.m$ [Ber-02].

1.5.3.4. Facteur de dissipation diélectrique :

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus ou moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est la présence de courant de fuite qui traverse le liquide sous l'effet du champ électrique. La représentation de ces pertes par un schéma équivalent (condensateur C et résistance en parallèle R) permet d'écrire [Seg-00]:

$$\tan \delta = 1/RC \dots \dots \dots (I.10)$$

Où

$\tan \delta$: est le facteur de dissipation, qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et ce courant de fuite.

Ce facteur de dissipation est un paramètre important pour l'évaluation de la qualité de l'huile d'isolation; il est directement lié à la résistivité et à la permittivité.

Le facteur de dissipation $\tan \delta$ est une fonction croissante avec la température à cause de l'accroissement de la mobilité des charges dans le liquide résultant de la diminution de la viscosité η [Abd-12]. Les mesures sont souvent réalisées à 90°C. Le facteur de dissipation est très sensible aux impuretés comme la résistivité ; il signale la qualité électrique de l'isolant. Une bonne corrélation est remarquée entre l'évolution de $\tan \delta$ et certains paramètres, tels que l'acidité et les dépôts, ainsi qu'avec l'oxydation de l'huile [Abd-12]. C'est pourquoi, dans l'industrie, $\tan \delta$ est pris comme critère de vieillissement. En effet, une valeur élevée de $\tan \delta$ pour le cas d'une huile neuve dans un appareil récemment construit, indique sa contamination par les matériaux de construction (résines, vernis, colles, flux de soudure, etc.) et non pas une dégradation par vieillissement.

I.6.Types et causes de vieillissement des isolants liquides

Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration graduelle due à des réactions physiques et chimiques affectant la tenue mécanique et diélectrique du système d'isolation [N'ch-11]. Le degré de ce vieillissement et sa vitesse d'accélération dépendent des propriétés physiques, de la composition chimique de l'huile, de la nature et la durée des contraintes appliquées [Fof-07].

I.6.1.Différents types de vieillissement :

Les différents mécanismes de vieillissement des huiles isolantes sont classés en trois catégories selon les contraintes appliquées et leurs influences sur la modification chimique de la structure d'huile. Nous trouvons le vieillissement thermique, électrochimique, et le vieillissement électrique.

I.6.1.1. Le vieillissement thermique :

On appelle vieillissement thermique tout phénomène traduisant une évolution qui ne fait intervenir que le matériau, l'atmosphère et la température. Il peut faire intervenir des phénomènes physiques et des phénomènes chimiques, et il résulte d'une oxydation de chaînes carboniques qui entraîne une augmentation des pertes diélectriques et une chute des caractéristiques physico-chimiques. Alors, le vieillissement thermique est provoqué par l'action de longue durée de hautes températures sur l'huile isolante.

Les principaux processus de vieillissement thermique sont :

- ❖ La rupture des chaînes multimoléculaires, accompagnée par une dégradation des propriétés physico-chimiques et électriques de l'huile;
- ❖ Le dégagement de gaz à faible poids moléculaire ;
- ❖ L'oxydation conduisant à l'apparition d'acides carboxyliques.

De nombreux travaux ont démontré l'effet de la température et de la présence de l'oxygène sur la dégradation des huiles isolantes, et ce en affectant les différentes caractéristiques de ces derniers [Mcs-02].

I.6.1.2. Vieillessement électrochimique :

Le vieillissement électrochimique: engendré par certains processus dont la cause est le phénomène d'électrolyse ayant lieu dans le diélectrique. Le processus de vieillissement électrochimique a lieu surtout sous l'action d'une tension continue de longue durée d'application, ainsi qu'une tension alternative de faible fréquence. Le courant de fuite circulant à travers l'huile isolante a un caractère électrolytique lié au transfert d'ions. Ces ions peuvent être métalliques ou pas :

- ❖ Les ions non métalliques se déchargent au niveau des électrodes et peuvent former des substances actives se combinant avec l'huile.
- ❖ Les ions métalliques peuvent, après neutralisation, pénétrer dans l'huile et y créer souvent des chemins conducteurs.

Lors du processus du vieillissement électrochimique, la température de l'huile augmente ; cette augmentation engendre non seulement une augmentation de sa conductivité, mais aussi une activation des réactions chimiques qui sont la cause du vieillissement.

I.6.1.3. Vieillessement électrique :

Le vieillissement électrique des isolants liquides se traduit par la génération des décharges partielles dans le liquide, pouvant amener à un claquage. On désigne ainsi l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles où le milieu diélectrique est soudainement traversé par un arc électrique entre conducteurs soumis à une différence de potentiel.

Si l'isolant liquide est soumis à des décharges partielles dont les effets se traduisent par la formation de radicaux libres, ces composés réagissent rapidement avec l'oxygène. Il s'ensuit une dégradation généralisée ou très localisée des isolants. En présence d'humidité, d'impuretés ioniques et sous l'influence de la température, des réactions électrochimiques peuvent conduire à une dégradation des propriétés de l'isolant liquide.

Le vieillissement électrique est caractérisé par une dégradation des propriétés diélectriques de l'isolant liquide, l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité. La dégradation est particulièrement accentuée par la présence d'impuretés de différentes natures, plus particulièrement des vacuoles de gaz au sein de l'huile.

I.6.2. Les causes de vieillissement :

Les isolants liquides, dans les conditions de leur utilisation, sont soumis à différentes contraintes (thermique, électrique, chimique) qui vont modifier leurs propriétés physico-chimiques en fonction du temps.

I.6.2.1. Contraintes chimiques :

Les principales contraintes chimiques présentes dans les transformateurs, susceptibles de dégrader les huiles isolantes et la cellulose, sont l'oxygène et l'humidité (Fig.I.15). L'oxygène est présent sous forme dissoute dans l'huile et l'humidité est présente dans le papier (même après séchage, il reste de l'humidité, supérieure à 0.2% en masse) [Tou-16]. Ses sources de vieillissement sont d'autant plus présentes dans le cas des transformateurs de puissance, qui sont dits « respirant » en contact avec l'atmosphère par l'intermédiaire d'un conservateur et d'un dessiccateur.

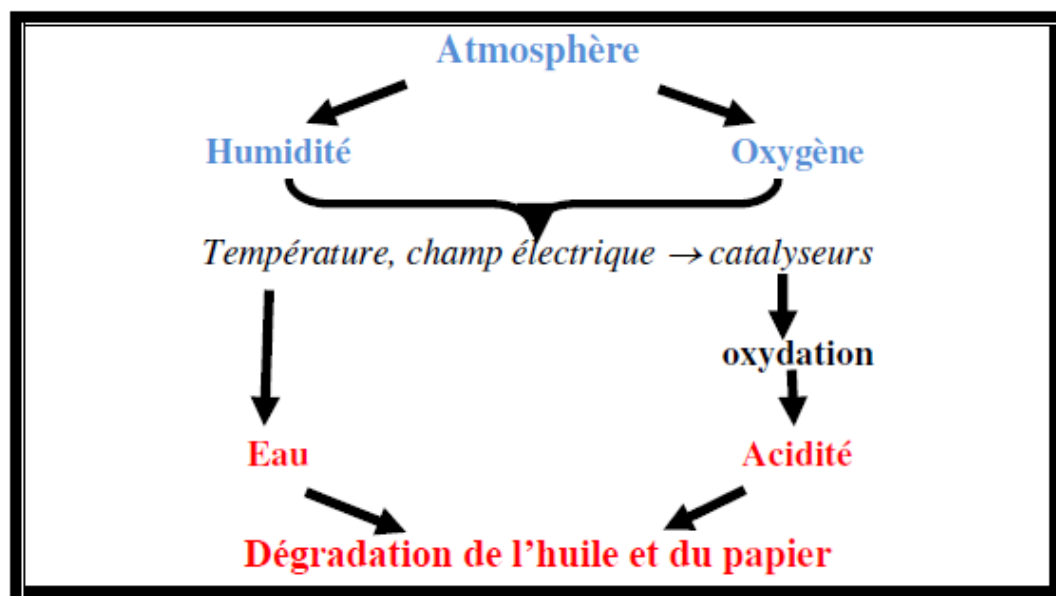


Fig (I.15) : Synthèse du mécanisme principal de dégradation des isolants électriques dans un transformateur de puissance [Per-05]

- **Impact de l'oxygène :**

L'oxygène entraîne la dégradation des huiles isolantes par oxydation qui est l'ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous.

L'oxydation des huiles minérales est un processus chimique progressif pendant lequel des molécules d'hydrocarbures sont attaquées par l'oxygène pour former divers produits oxygénés comme des hydroperoxydes, des alcools et des acides organiques [Sab-01, Duy-09]. L'oxydation est initiée par la formation d'hydroperoxydes et de peroxydes qui réagissent ensuite pour produire des alcools, des cétones, des aldéhydes puis des acides. La vitesse de réaction de ces processus oxydatifs est augmentée en présence de catalyseurs métalliques tels que le cuivre et le fer. Ensuite par polymérisation, il va se former des dépôts insolubles ou boues, liés aux composés aromatiques. Enfin, il y aura la formation d'eau et des gaz suivants : hydrogène (H₂), méthane (CH₄), éthane (C₂H₆), éthylène (C₂H₄), acétylène (C₂H₂) [Gou-93, Gou-94, Mas-99]. Le processus d'oxydation peut être divisé en quatre phases : initiation, propagation, ramification et terminaison comme le montre le Tableau (I.3).

Tableau (I.3) : Mécanismes de réactions d'oxydation des huiles minérales [Bet-15]

1	Initiation	$R - H \rightarrow R^{\bullet} + H^{\bullet}$ $Cu^{2+} + R - H \rightarrow Cu^{+} + H^{\bullet} + R^{\bullet}$ $H^{\bullet} + H^{\bullet} \rightarrow H_2$	Formation des radicaux libres
2	Propagation	$R^{\bullet} + O_2 \rightarrow ROO^{\bullet}$ $ROO^{\bullet} + R - H \rightarrow ROOH + R^{\bullet}$	Formation du radical peroxyde Formation du peroxyde
3	Ramification	$ROOH \rightarrow RO^{\bullet} + OH^{\bullet}$ $ROOH + Cu^{+} \rightarrow RO^{\bullet} + Cu^{+} + OH^{-}$ $ROOH + Cu^{2+} \rightarrow ROO^{\bullet} + Cu^{+} + H^{+}$ $RO^{\bullet} + R - H \rightarrow R^{\bullet} + R - OH$ $OH^{\bullet} + R - H \rightarrow R^{\bullet} + H_2O$	Décomposition du peroxyde Alcool + formation de radical Eau + formation de radical
4	Terminaison	$2R^{\bullet} \rightarrow R - R$ $R^{\bullet} + ROO^{\bullet} \rightarrow ROO - R$ $ROO^{\bullet} + ROO^{\bullet} \rightarrow ROO - R + O_2$ $2 ROH + O_2 \rightarrow 2RCHO + H_2O$ $2 ROH + O_2 \rightarrow 2RCRO + H_2O$ $2 RCHO + O_2 \rightarrow 2RCOOH$ $RCOOH + ROH \rightarrow RCOOR + H_2O$	Formation d'aldéhyde Formation de cétone Formation d'acide carboxylique Formation d'ester
<i>R - H</i> est un hydrocarbure, <i>ROOH</i> des hydroperoxydes, <i>ROO</i> un radical peroxyde			

Les esters naturels s'oxydent de la même façon en formant la succession de produits: alcools, cétones, aldéhydes et enfin acides carboxyliques. En règle générale, les sous-produits de l'oxydation des esters naturels ne forment pas de dépôts ou de boues comme dans l'huile minérale [Sha-05]. Notons que l'influence de l'oxydation sur les propriétés diélectriques des huiles végétales a été peu étudiée.

Pour résumer, on peut dire que les conséquences d'oxydation d'huile sont:

- ❖ Un changement de couleur et d'odeur de l'huile lié à la formation de composés acides légers [Had-15];
- ❖ Une augmentation de facteur de dissipation et de l'acidité de l'huile [Per-05];
- ❖ Une augmentation de la teneur en eau de l'huile [Per-05];
- ❖ Une dégradation de la conductivité de l'huile [Had-15];
- ❖ Une augmentation des pertes diélectriques [N'ch-11];
- ❖ Une augmentation de la viscosité, d'où une diminution de la capacité à éliminer les dégagements de chaleur. Ceci étant dû au fait que les boues produites vont obstruer les conduits de circulation d'huile et affecter le coefficient de transfert de chaleur entre les enroulements et l'huile. Le système de refroidissement perd ainsi son efficacité et l'élévation de la température qui en résulte accélère l'oxydation et la dégradation des isolants solides [N'ch-11];
- ❖ Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis de la cellulose [N'ch-11];
- ❖ Une augmentation de la corrosivité vis-à-vis des parties métalliques [N'ch-11].

• **Impact de l'humidité:**

La présence d'humidité (d'eau) dans l'huile accélère la dégradation du transformateur par :

- ❖ Une accélération du vieillissement de la cellulose (phénomène de dépolymérisation du matériau isolant) ;
- ❖ Une dégradation de l'huile par l'hydrolyse qui est défini par la réaction de l'eau avec les ponts d'oxygène et provoque la rupture de chaînes carboxyliques.
- ❖ Des claquages électriques dus à l'apparition de bues de gaz avec l'augmentation de la température ;
- ❖ Un risque de court-circuit dû à une réduction des propriétés isolantes de l'huile ;
- ❖ Un accroissement de la conductivité d'huile et une accélération du vieillissement ;

- ❖ Des décharges partielles, et par conséquent une diminution de la rigidité diélectrique [Ota-03, Ems-00, Mit-06, Gar-05]. La figure ci-dessous illustre bien cet effet sur la rigidité diélectrique à 50Hz de l'huile de transformateur.

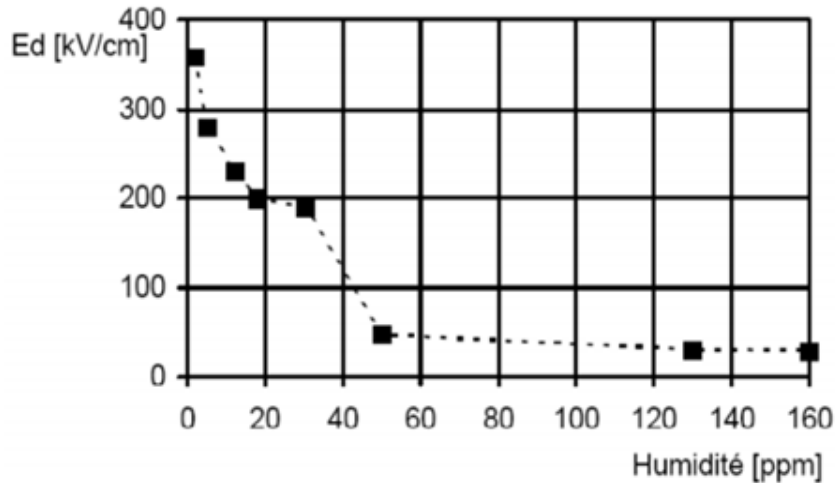


Fig (I.16) : Influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique de l'huile de transformateur

I.6.2.2. Contraintes thermiques :

La contrainte thermique du transformateur de puissance est la chaleur produite par les pertes énergétiques due aux effets Joules, les courants de Foucault et l'hystérésis. Sous l'influence de cette chaleur, la vitesse de toutes les réactions chimiques est augmentée, entraînant une détérioration plus rapide de l'huile isolante.

L'action de longue durée de hautes températures sur l'huile isolante conduit à :

- ❖ Un changement de couleur et une formation de dépôts [Pen-09] ;
- ❖ Une augmentation du facteur de pertes diélectriques [Abd-03];
- ❖ Une diminution de la résistivité et de la tension de claquage (Fig.I.17 et I.18) [Abd-03];
- ❖ une augmentation de l'acidité et de la teneur en eau, avec une légère diminution de la viscosité [Abd-11].

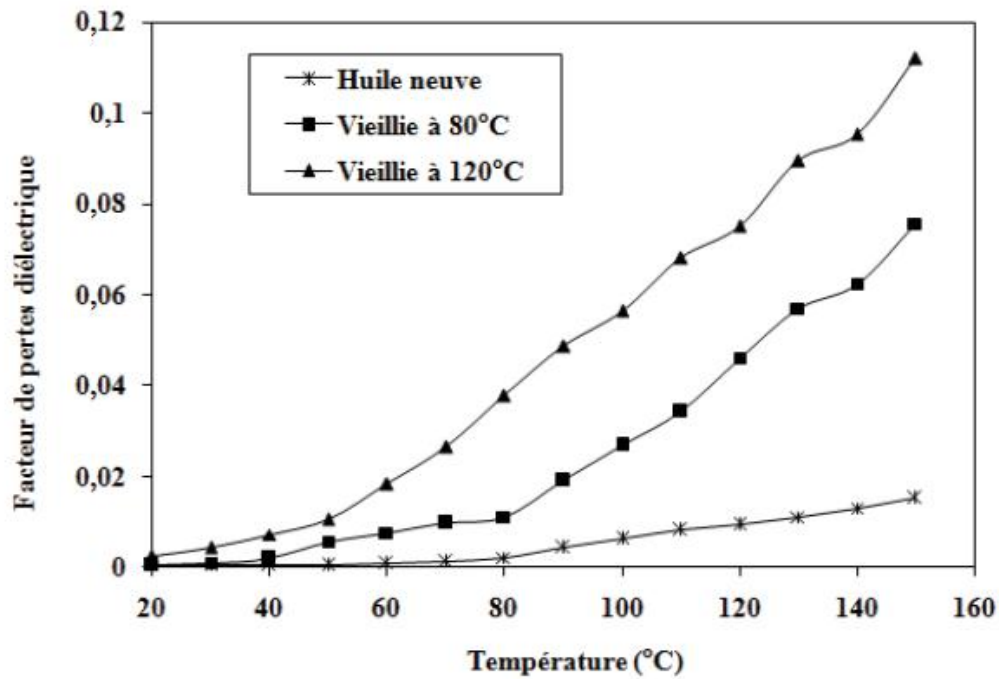


Fig (I.17) : Influence de la température sur le facteur de pertes de l'huile minérale [Abd-03]

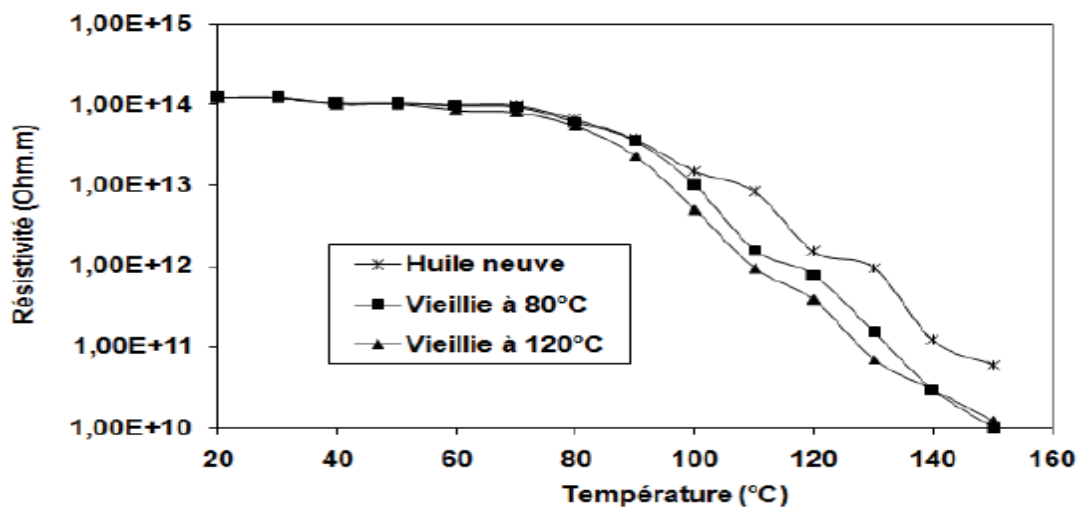


Fig (I.18) : Influence de la température sur la résistivité de l'huile minérale [Abd-03]

L'huile isolante sous l'effet de température peut produire des gaz de différentes natures, créant des bulles gazeuses dans l'huile isolante. Ceci favorise les phénomènes de décharges partielles et peut amener au claquage [Abd-08]. Les résultats présentés dans les figures (I.19) et (I.20), montrent les principaux gaz générés dans différents échantillons soumis au vieillissement thermique à 115 °C.

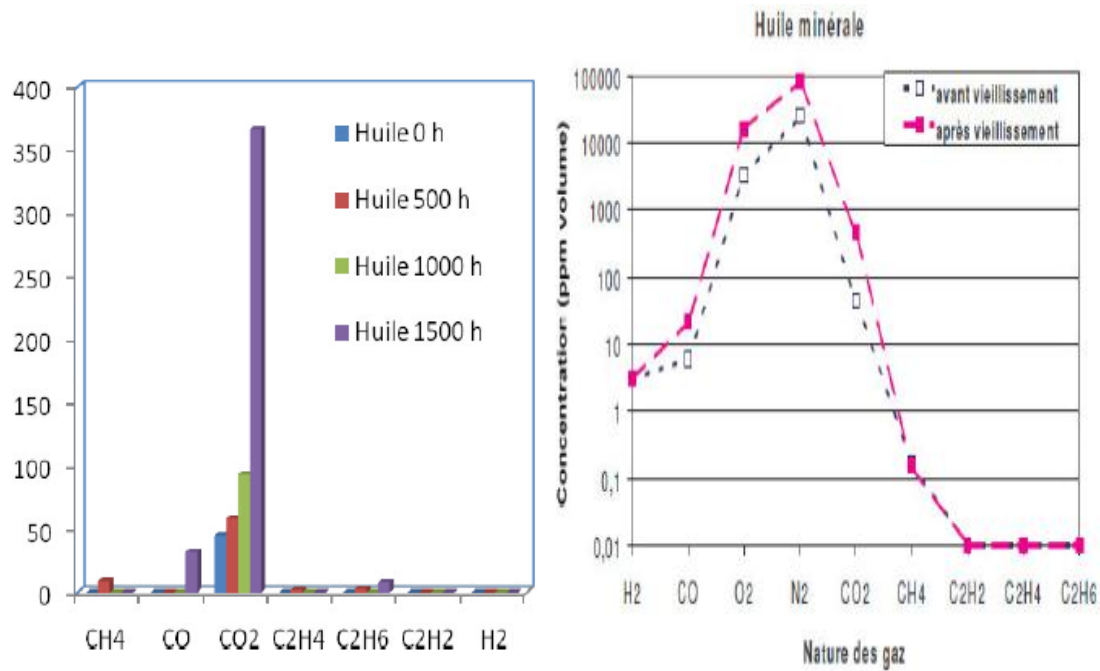


Fig (I.19) : Génération des gaz dissous dans l'huile minérale après vieillissement thermique [Bet-15, Per-05]

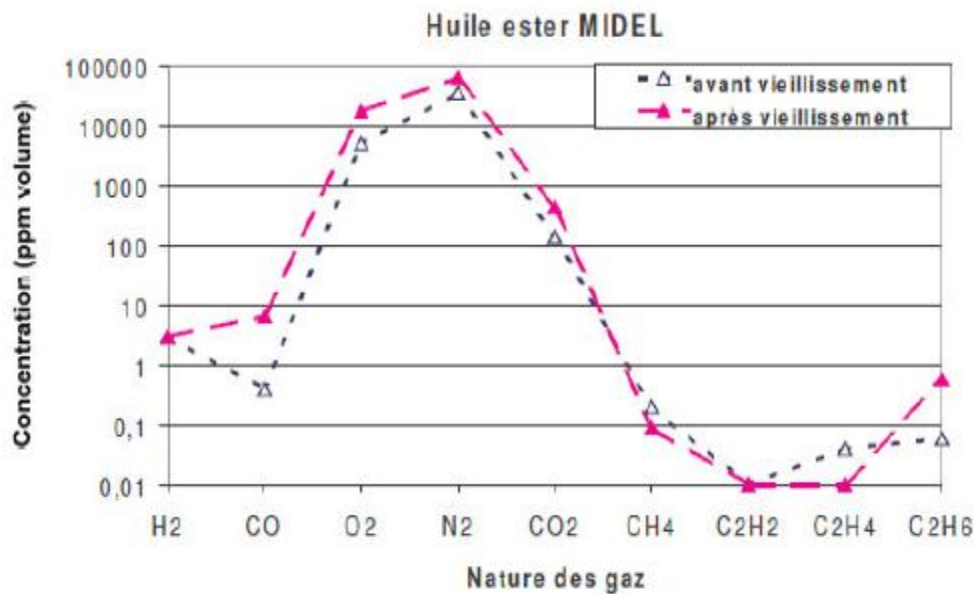


Fig (I.20) : Génération des gaz dissous dans l'ester synthétique après vieillissement thermique [Per-05].

I.6.2.3. Contraintes électriques :

Sous l'application d'une tension élevée, les décharges partielles (DP) apparaissent dans l'huile de transformateur. En pratique, on définit la tension seuil d'apparition des décharges partielles. Elle correspond à la tension appliquée à l'huile à partir de laquelle la charge apparente fournie par la tension est égale à un seuil donné.

Les décharges partielles peuvent avoir lieu dans les isolants liquides à cause :

- ❖ De la présence de bulles de gaz [Ota-03] ;
- ❖ De la présence d'humidité, l'huile isolante associée aux déchets de cellulose produits par le papier d'isolation du transformateur forment des « ponts » électriques dans l'huile;
- ❖ De la présence des contaminants et des impuretés dans l'huile [Kov-06];
- ❖ De la forme de l'isolation solide adjacente à l'huile.

Si le champ électrique à travers les bulles dépasse la rigidité diélectrique de l'huile inclus dans les bulles, des décharges partielles peuvent avoir lieu. Si ces décharges sont suffisamment intenses, elles conduisent à un arc électrique endommageant ainsi l'isolation électrique [Koc-11, Prz-10].

La présence des décharges partielles conduit à une dégradation accélérée de l'isolation. Ceci est caractérisé par l'augmentation des pertes diélectriques et une diminution de la résistivité de l'huile. Le facteur de dissipation diélectrique est très faiblement affecté par le claquage de l'huile. En effet, pour une température de l'huile inférieure ou égale à 70°C, quel que soit le nombre de claquages subi par l'huile, le facteur de pertes diélectriques prend des valeurs acceptables. Pour des températures plus élevées, il augmente en dépassant la limite admise par la norme CEI 60296 (Fig. I.21).

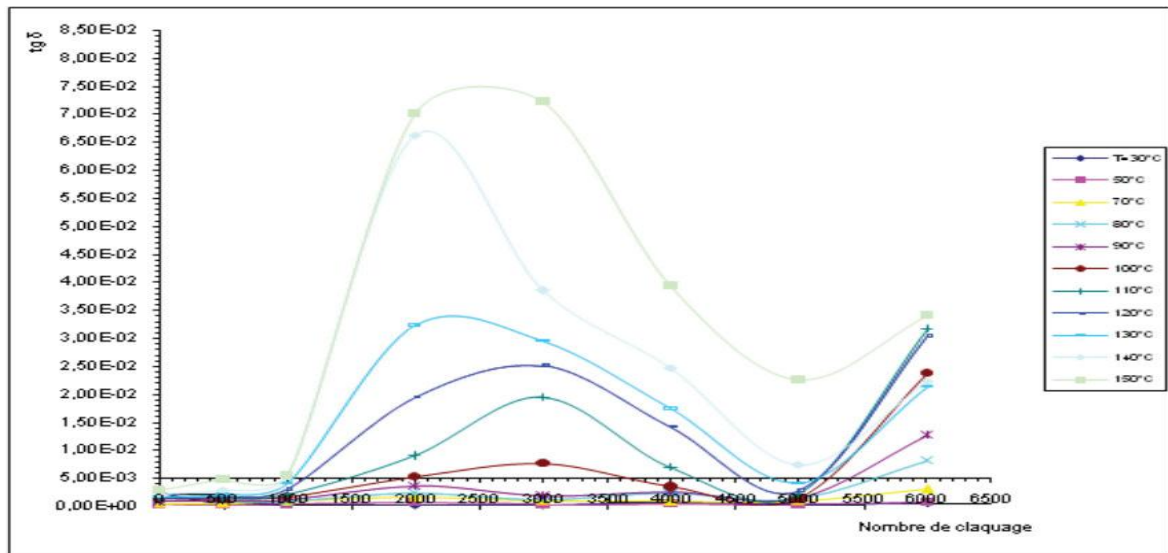


Fig (II.21) : Variation du facteur de dissipation en fonction du nombre de claquages pour différentes températures de mesure [Ben-08, Abd-12]

La permittivité relative diminue en fonction du nombre de tests de claquages et de la température grâce à l'élimination de l'humidité (Fig.I.22). Cette diminution améliore l'état isolant de l'huile en réduisant la possibilité de formation de particules chargées.

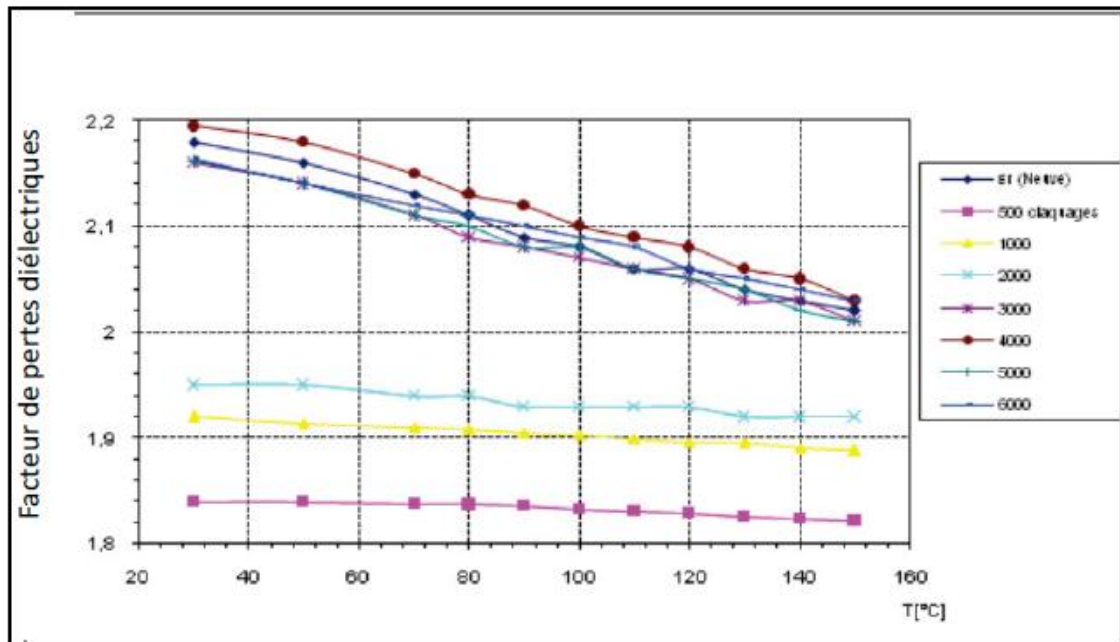


Fig (II.22) : Variation de la permittivité relative en fonction de la température et du nombre de claquages [Ben-08, Abd-12]

Pour une température fixe, la conductivité augmente en fonction du nombre de claquages puis diminue en présentant des fluctuations pour se stabiliser autour d'une valeur stable plus élevée que celle d'une huile neuve (Fig.I.23) [Ben-08, Abd-12].

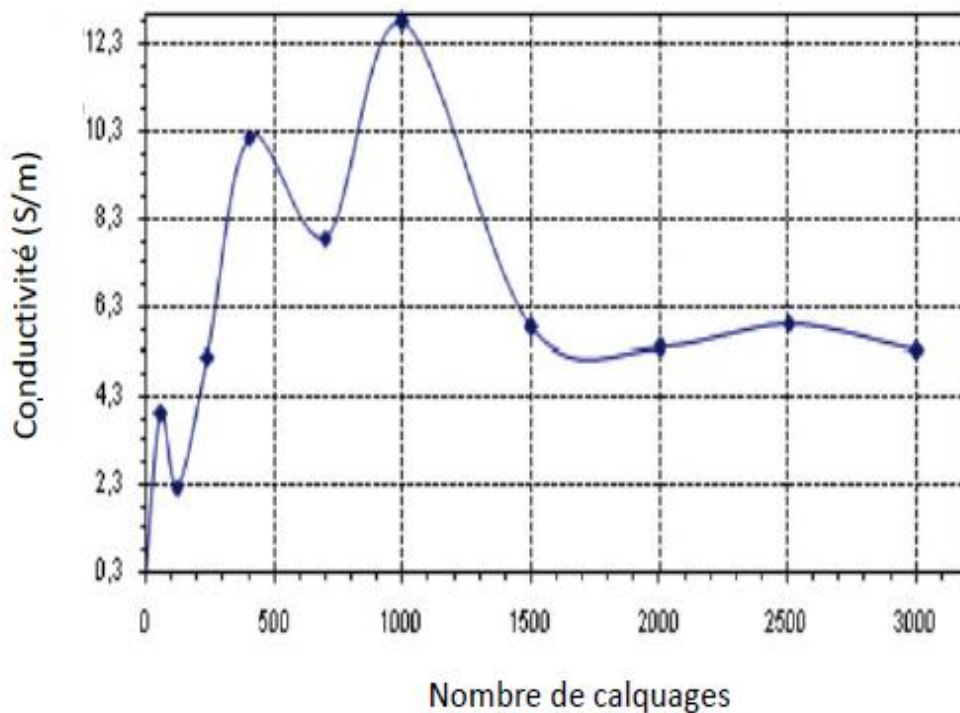


Fig (I.23) : Variation de la conductivité en fonction du nombre de claquages [Ben-08, Abd-12]

La décharge électrique de faible énergie entraîne principalement la production d'hydrogène, du méthane, de l'éthane et de dioxyde de carbone [Bet-15]. Ces gaz proviennent de la recombinaison des radicaux libres. En effet, sous l'effet de l'énergie apportée par le champ électrique, certaines liaisons d'hydrocarbures peuvent se briser et donner naissance à des radicaux libres tels que : $H\bullet$, $CH_3\bullet$, $CH_2\bullet$ et $CH\bullet$ [Bet-15]. La recombinaison de ces substances peut former des gaz.

Généralement, les quantités des gaz dissous augmentent avec la température, la figure (I.24) montre l'évolution des gaz dissous en fonction de la période de vieillissement thermique, après application du champ électrique.

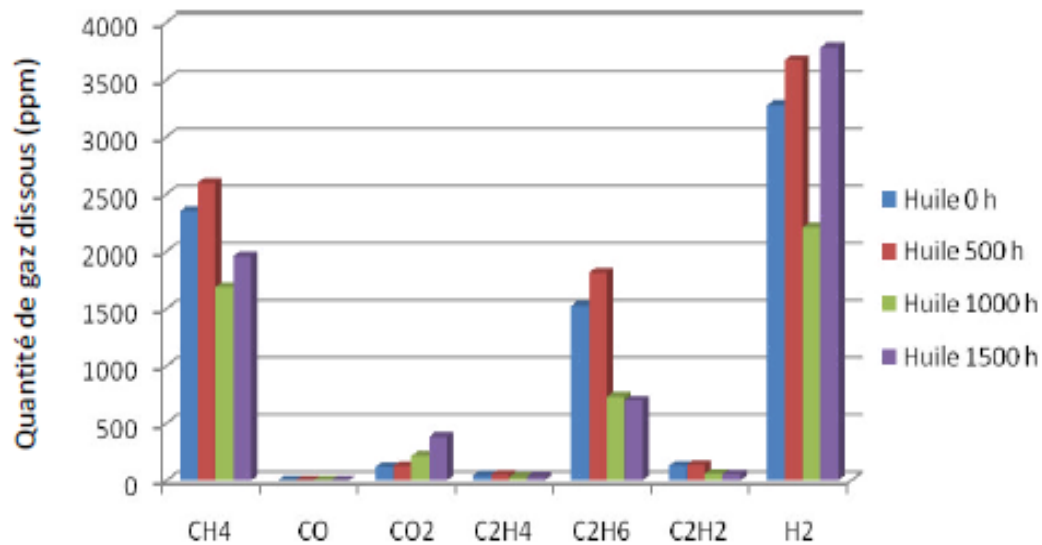


Fig (I. 24) : Génération des gaz dissous dans l'huile minérale neuve et vieillie après application du champ électrique [Bet-15]

La décharge d'arc est caractérisée par la présence de l'acétylène. En plus de l'acétylène, les autres gaz d'hydrocarbure et l'hydrogène seront produits dû au gradient de température entourant l'arc (Fig.I.25).

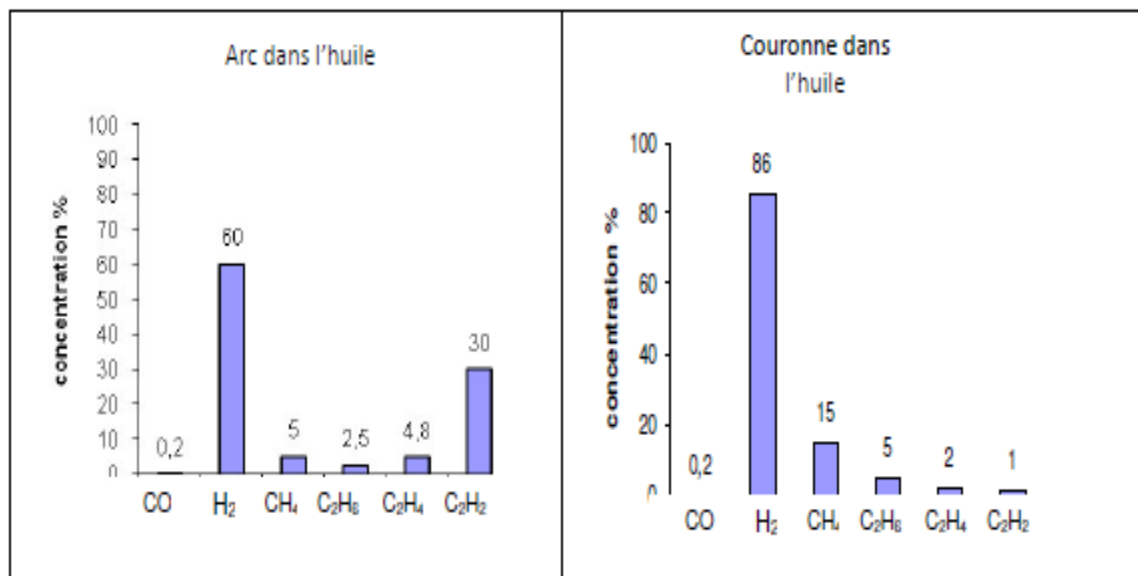


Fig (I. 25) : Génération des gaz dissous dans l'huile sous les effets : de l'arc électrique et la décharge de couronne [Bou-05, Mof-00]

Toutes les explications détaillées ci-dessus peuvent être résumées par le diagramme présenté sur la figure (I.26) qui résume le processus de dégradation de l'huile dans les transformateurs à air libre. Elle illustre la relation entre les causes du processus de dégradation de l'huile isolante et la conséquence d'une mauvaise stabilité de l'huile en service.

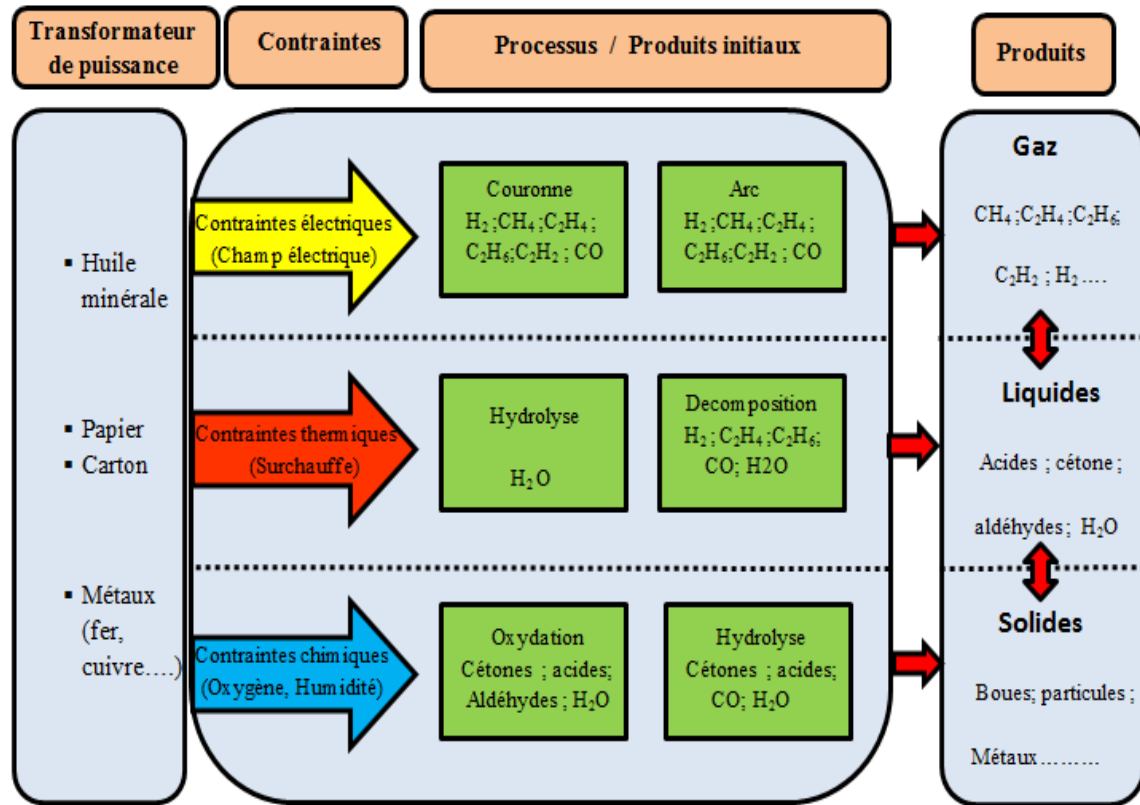


Fig (I.26) : Schéma simplifié de la dégradation de l'huile isolante en fonction de différentes contraintes.

I.7. Conclusion :

La recherche bibliographique répartie sur notre premier chapitre nous a permis d'acquérir des connaissances sur les différents éléments constituant les transformateurs de puissance, en particulier, ses huiles isolantes qui jouent deux rôles essentiels : celui d'assurer l'isolation électrique et celui d'évacuer la chaleur des enroulements et du noyau magnétique, par convection naturelle ou par écoulement forcé grâce à des pompes.

Cette recherche bibliographique nous a permis aussi de connaître les différentes huiles utilisées dans les isolations électriques, qui sont les huiles minérales, les huiles

synthétiques, et les esters naturels. Les huiles minérales sont les plus utilisées dans les équipements électriques, et plus communément dans les transformateurs de puissance, et cela, pour ses bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur. Les esters naturels se démarquent avec leurs bonnes propriétés électriques, leur forte capacité à absorber l'humidité (haute solubilité de l'eau), leur excellente biodégradabilité, leur faible tenue à l'oxydation, leur point d'éclair et d'écoulement élevé. Cependant, les huiles silicones ne sont pas biodégradables mais elles ont une très bonne stabilité à l'oxydation. Il apparaît que 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, une bonne résistance au feu, une stabilité à l'oxydation et une faible tendance à la charge statique.

Nous avons pu noter que le vieillissement se divise en trois types essentiels ; thermique, électrochimique, et électrique. Les principaux facteurs responsable du vieillissement d'une huile sont l'oxygène, la température, l'humidité. L'action combinée de la température et de l'oxygène provoque l'oxydation de l'huile. L'humidité provient essentiellement de l'atmosphère et de la cellulose, et elle contribue au vieillissement de l'huile par l'hydrolyse.

Des nombreux problèmes récents, liés aux huiles minérales, remettent en question leur règne et orientent peu à peu les constructeurs de transformateurs à se diriger vers les huiles végétales à la place de l'huile minérale. Cependant, l'utilisation d'un nouvel isolant liquide nécessite la connaissance de ses propriétés diélectriques, physiques, chimiques, etc. et leurs évolutions en fonction des conditions d'utilisation. De ce fait, le chapitre suivant présentera une caractérisation physico-chimique des deux huiles végétales et une huile minérale vieilles artificiellement sous l'action de la température et des décharges électriques en laboratoire.

Chapitre II

Caractérisation physico- chimique des huiles étudiées après vieillissements

II.1. Introduction :

L'huile minérale est très largement utilisée comme liquide diélectrique et caloporteur dans les transformateurs de puissance, d'une part pour ses propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût. Ses points faibles résident dans sa faible résistance au feu et sa faible biodégradabilité. Alors, il est devenu nécessaire de chercher d'autres liquides de remplacement dont les propriétés isolantes seraient proches voire meilleures que celles des huiles minérales, ainsi qui ont une haute résistance au feu et une biodégradabilité élevée. Les recherches s'orientent actuellement vers les huiles végétales dites biodégradables, c'est-à-dire les esters naturels.

A cet effet, notre travail est orienté vers la recherche des huiles végétales qui assurent, d'une part des caractéristiques acceptables en vue de leur utilisation dans les transformateurs de puissance, et d'autre part qui soient disponibles au niveau local et en quantité suffisante. Notre choix s'est porté sur deux huiles végétales : l'huile d'olive, l'huile de soja et une huile minérale pour les comparer. Il est donc fondamental de connaître le comportement de ces huiles végétales lorsqu'elles sont soumises à des contraintes thermiques et électriques. Ce qui permettra d'envisager ou non leur introduction dans les transformateurs de puissance et de se prémunir d'outils de diagnostic sur des équipements haute tension remplis d'huiles végétales.

Ce chapitre présentera d'abord une description des trois huiles étudiées suivi par les techniques expérimentales réalisées dans notre laboratoire permettant d'appliquer les vieillissements thermique et électrique accélérés à ces huiles dans l'objectif d'aller jusqu'à un état de dégradation avancé. Ensuite, nous présenterons les variations des paramètres physico-chimiques obtenus de trois huiles en fonction du temps de vieillissement et du nombre de décharges, et nous les interpréterons sur la base des normes internationales, pour mieux connaître la performance limite (comportement extrême) de ces huiles. Ces paramètres sont l'indice de couleur, la densité, la teneur en eau, la viscosité, l'acidité, le point d'éclair et le point d'écoulement.

II.2. Composition chimique des huiles étudiées :

Les huiles utilisées dans ces études sont : une huile minérale à base de pétrole et deux huiles végétales (ou esters naturels) dont la première est l'huile d'olive extra vierge et la deuxième est l'huile de soja. Dans ce qui suit, nous présenterons chacune de ces huiles.

II.2.1. Huile minérale :

L'huile minérale est obtenue par le raffinage de bruts pétroliers suivant un procédé inclut habituellement une distillation suivie d'une opération de déparaffinage, d'une extraction par solvant des molécules indésirables et d'une hydrogénation catalytique [Per-05]. Chimiquement, L'huile minérale est un mélange complexe de centaines de différents composés organiques, constituée d'un mélange complexe d'hydrocarbures liquides avec des molécules de différentes structures. Généralement, ces structures sont définies par le carbone qui se trouve en paraffinique, naphénique, aromatique.

Pour réaliser nos expériences, notre choix s'est porté sur une huile minérale appelée la Borak 22 commercialisée par NAFTAL. Elle est utilisée dans la plupart des transformateurs de puissance présents sur le territoire national, notamment dans les centrales et postes de SONEGAS. Elle est considérée comme l'une des excellents isolants liquides. La Borak 22 est une huile naphénique, neuve et de couleur claire, a été prélevée telle quelle, sans traitement, ayant la formule C_nH_{2n} (Fig.II.1). Cette huile est un liquide isolant apolaire le plus communément employé dans les transformateurs de puissance d'une part pour ces propriétés physico-chimiques et d'autre part pour son faible coût et sa disponibilité. La particularité de cette huile fait que la majorité des transformateurs de puissance à travers le monde sont équipés avec ce type de liquide isolant. Cette huile permet d'assurer aussi bien l'isolation électrique que le transfert de chaleur.

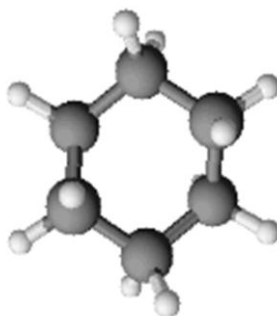


Fig (II.1) : Structures moléculaires de l'huile minérale Borak 22

II.2.2. Huiles végétales :

Les huiles végétales, après raffinage, contiennent presque exclusivement des triglycérides (Fig.II.2). Ces molécules, synthétisées naturellement par tous les organismes vivants, sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple avec trois acides gras. Ces acides sont mono-carboxyliques (de formule $R\text{-COO-H}$), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone (entre 8 et 24). Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés [Ber-03]. Ces acides gras ont une formule brute qui peut être condensée en $Cx:y$ où x indique le nombre d'atomes de carbone et y celui de doubles liaisons. L'acide oléique est un exemple d'acide gras mono-insaturé de formule :

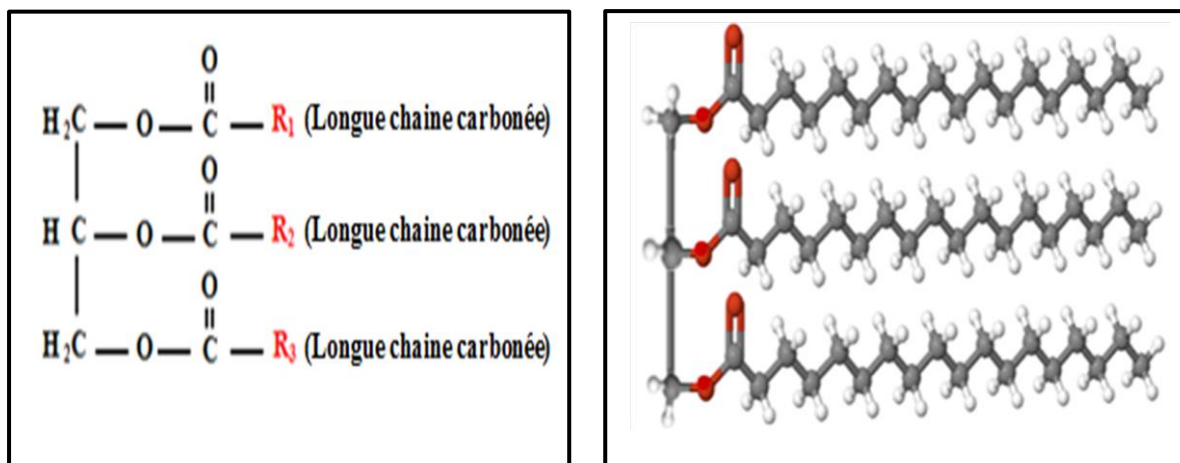
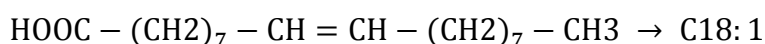


Fig (II.2) : Structure chimique des triglycérides. R_1 , R_2 et R_3 sont les chaînes du même type ou de types différents qui contiennent un nombre impair de carbones (de 15 à 23)

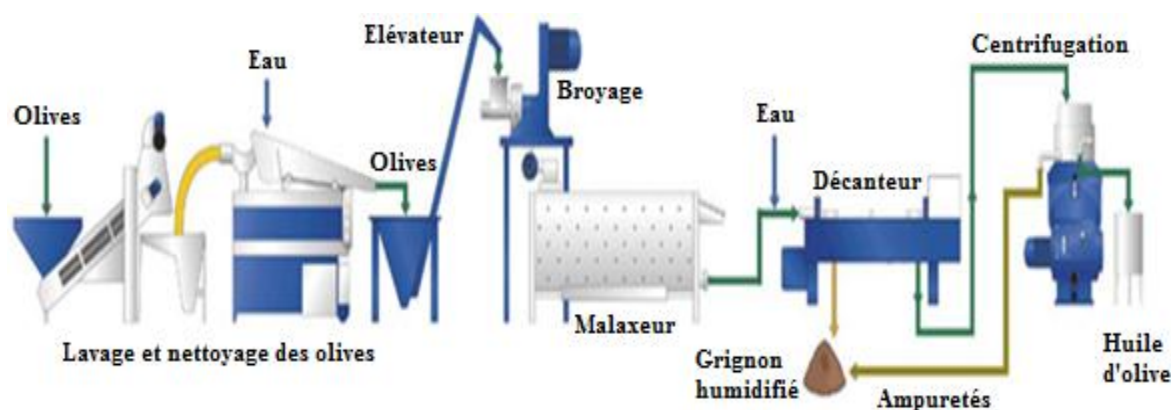
En général, les huiles végétales peuvent être caractérisées par les quantités relatives des différents acides gras, correspondant à une composition en acides gras spécifique comme l'illustre le Tableau (III.1).

Tableau (II.1) : Composition en acides gras des huiles végétales étudiées

Acide gras	Nombre de carbone:liaison	Huile d'olive (%)	Huile de soja (%)	Saturation
Acide myristique	C14:0	≤ 0.05	0 - 0.1	Saturée
Acide palmitique	C16:0	7.5 – 20.0	8 - 13	Saturée
Acide palmitoléique	C16:1	0.3 - 3.5	0 – 0.2	Inasaturée
Acide stéarique	C18:0	0.5 – 5	2 - 5	Saturée
Acide oléique	C18:1	55 - 83	20 - 50	Mono-insaturée
Acide linoléique	C18:2	3.5 - 21	35 - 60	Poly-insaturée
Acide linolénique	C18:3	≤ 0.9	4 - 10	Poly-insaturée
Acide arachidique	C20:0	≤ 0.6	0.2 – 0.5	Saturée
Acide éicosénoïque	C20:1	≤ 0.4	0 – 0.2	Inasaturée
Acide béhénique	C22:0	≤ 0.2	0.5 – 1.6	Saturée

II.2.2.1. Huile d'olive :

La première huile végétale utilisée dans ce travail est une huile d'olive extra-vierge produite et conditionnée par des exploitations situées à Boumerdès (nord-est algérien) et appartenant à la société SPA Thiwisa AGRO. Cette huile n'est pas inhibée, c'est-à-dire qu'elle ne contient aucun additif permettant d'améliorer l'acidité. Sa préparation comprend trois étapes principales: broyage du fruit, malaxation de la pâte résultante et phase de séparation par centrifugation (Fig.II.3). Elle contient des acides gras libres dont la proportion est variable et dépend de l'étendue de l'hydrolyse des triglycérides [Luc-14]. Les pourcentages les plus courants de décomposition par type d'acide gras sont les acides gras saturés (14%), les acides gras mono-insaturés (72%) et les acides gras polyinsaturés (14%) [Har-13]. L'huile d'olive contient une proportion élevée d'acides gras mono-insaturés, comme le montre le Tableau (II.1).

**Fig (II.3) : Chaine continue d'extractions d'huile d'olive**

II.2.2.2. Huile de soja :

La deuxième huile végétale utilisée est une huile de soja produite par le groupe agroalimentaire algérien Safia Cogral SPA dont ses procédés de raffinage sont représentés à la Fig (II.4). Cette huile 100% de soja extra de haute qualité, pur, comestible et léger. C'est une source naturelle importante d'acides gras insaturés des familles des oméga-6 et des oméga-3. La teneur en acides gras insaturés de l'huile de soja étant très élevée, les molécules de triglycéride contiennent au moins deux acides gras insaturés et des glycérides saturés sont pratiquement absents ou en très faibles quantités. La principale différence entre l'huile de soja et les autres huiles végétales est l'acide linoléique (C18 : 2) en quantité appréciable (Tableau.II.1). Cet acide gras est très sensible à l'oxydation; le contact de l'huile avec l'oxygène de l'air doit être évité autant que possible.

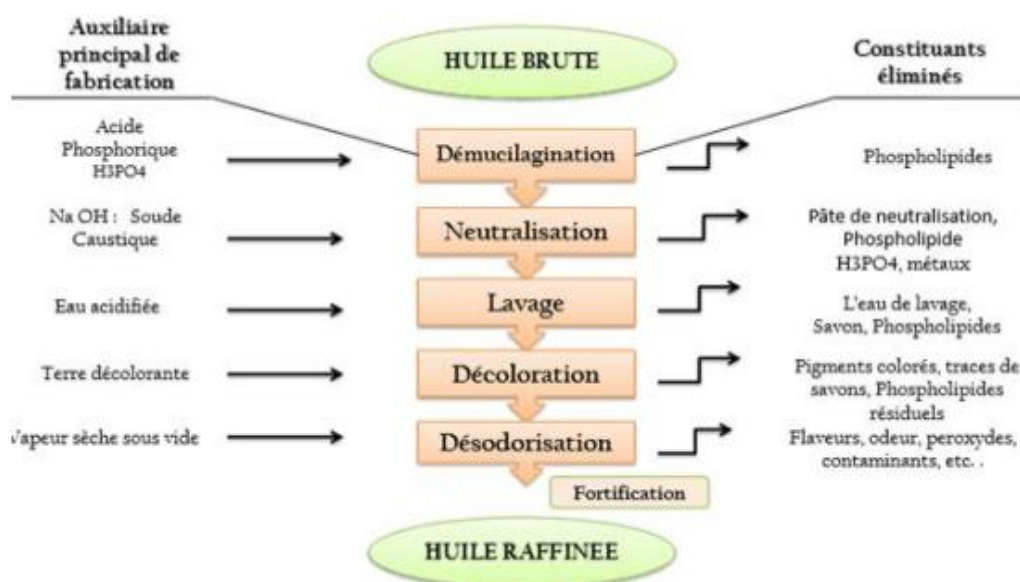


Fig (II.4) : Schéma récapitulatif des procédés de raffinage d'huile de soja

II.3. Mode de vieillissement des huiles étudiées :

On appelle vieillissement, tout phénomène se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés d'un isolant, due aux dégradations survenues au cours de son utilisation normale. Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie.

Deux types d'essais de vieillissement, thermique et électrique, ont été réalisés au sein du Laboratoire des Systèmes Electrique et Industriel (LSEI) de la faculté d'électronique et d'informatique à l'USTHB. Ces essais de vieillissement ont été effectués sur les trois

huiles décrites précédemment: l'huile minérale (Borak 22), l'Huile d'olive extra vierge et l'huile de soja (Safia).

II.3.1. Vieillessement thermique :

On appelle vieillissement thermique tout phénomène traduisant une évolution qui ne fait intervenir que l'isolant, l'atmosphère et la température. Il peut faire intervenir des phénomènes physiques et des phénomènes chimiques, et il résulte d'une oxydation de chaînes carboniques qui entraîne une augmentation des pertes diélectriques et une chute des caractéristiques physico-chimiques.

Avant le vieillissement, nous avons préparé les échantillons des huiles étudiées. En premier lieu, décontaminer les bouteilles en verre d'un volume de 1 litre par un lavage avec de l'acide sulfurique, puis un autre lavage avec de l'eau chaude et du savon. Puis, mises dans une étuve à 100 ° C pendant 48 h afin d'enlever toute trace d'impuretés et d'humidité. En dernier lieu, remplir les bouteilles destinées aux tests (Fig.III.5).

Le vieillissement thermique réalisé consiste à chauffer les cinq échantillons d'huile pour chaque huile étudiée dans une étuve réglée à une température constante de 110°C pour différentes durées: 144h, 288h, 432h, 576h et 720h. Un prélèvement d'échantillons d'huile pour les trois d'huile utilisée est fait toutes les 144 heures durant le vieillissement en retirant une bouteille de l'étuve pour chaque huile étudiée. Les différentes propriétés ont été mesurées à la fin de chaque intervalle d'heures.



Fig (II.5) : Echantillons d'huile utilisés pour le vieillissement thermique

II.3.2. Vieillessement électrique :

Le vieillissement électrique des isolants liquides se traduit par la génération des décharges partielles dans le liquide, pouvant amener à un claquage. On désigne ainsi l'étape ultime d'une succession de processus irréversibles où le milieu diélectrique est soudainement traversé par un arc électrique entre conducteurs soumis à une différence de potentiel [Tob-96].

Le vieillissement électrique réalisé consiste à soumettre les huiles utilisées: huile minérale, d'olive et de soja à des séries de décharges électriques de faible énergie de 500 à 2500 à des tensions respectives de 40, 60 et 50 kV. La réalisation de ce vieillissement nécessite un banc expérimental qui est basé sur la structure présentée à la Fig (II.6). Ce banc est constitué :

- ❖ Des sources de tension alternative et continue ;
- ❖ D'un circuit de protection électrique ;
- ❖ D'une cellule d'essai et résistance de limitation de courant;
- ❖ D'un système de mesure des courants ;
- ❖ D'un oscilloscope à mémoire pour les enregistrements et d'une cage de faraday.

Dans ce qui suit, nous décrivons en détail chaque composant utilisé dans ce banc.

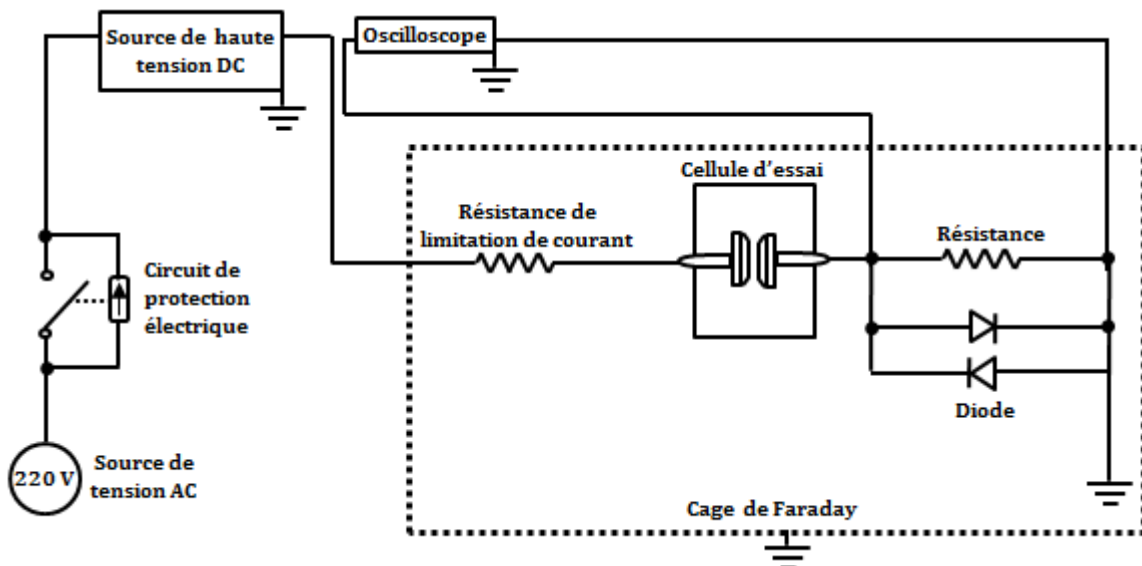


Fig (II.6) : Instrumentation du banc expérimental pour le vieillissement électrique

II.3.2.1. Sources de tension alternative et continue :

Deux types de tensions ont été utilisés pour la réalisation des décharges: une tension alternative 50Hz et une haute tension continue. La première source est prise directement de l'armoire électrique, elle constitue la tension du réseau qui est de 220V/50 Hz suivie par le disjoncteur différentielle de 6A pour éviter les défaillances causées par le courant de court-circuit (surcharge forte). Ce disjoncteur alimente le circuit de protection électrique qui est relié à la prise de terre, pour alimenter ensuite la deuxième source de haute tension continue DC (Glassman High Voltage) qui est un générateur fournissant une tension variable entre 0 et 80kV indépendamment de la charge et d'une façon continue (Fig.II.7). Ce générateur est relié aussi à la terre.



Fig (II.7) : Source de haute tension continue

II.3.2.2. Circuit de protection électrique :

Pour garantir la sécurité des appareils de mesure (oscilloscope, source de tension DC) et du manipulateur, nous avons mis en place un circuit de protection électrique représenté à la Fig (II.8). Ce circuit constitué (Fig.II.9) :

- ❖ Des contacteurs et une bobine ;
- ❖ Bouton d'arrêt d'urgence, bouton poussoir Marche et bouton poussoir Arrêt.



Fig (II.8) : Image du module de contrôle des contacteurs et boutons de marche

Pour plus de sécurité, nous avons mis aussi :

- ❖ Disjoncteur différentielle de 6A pour éviter les défaillances causées par le courant de court-circuit (surcharge forte).
- ❖ Deux disjoncteurs magnétothermiques, ces appareils permettent de couper le courant d'un ou plusieurs circuits en cas de surintensité ou surcharge ;
- ❖ Une cage de Faraday reliée à la terre : enceinte utilisée pour protéger des nuisances électriques et subsidiairement électromagnétiques extérieures ou inversement empêcher un appareillage de polluer son environnement et protéger le manipulateur du champ électrique rayonné ;
- ❖ Une mise à la terre ; tous les appareils électriques et les carcasses métalliques ont été mis à la terre pour évacuer les charges électriques dues au champ électrique rayonné.

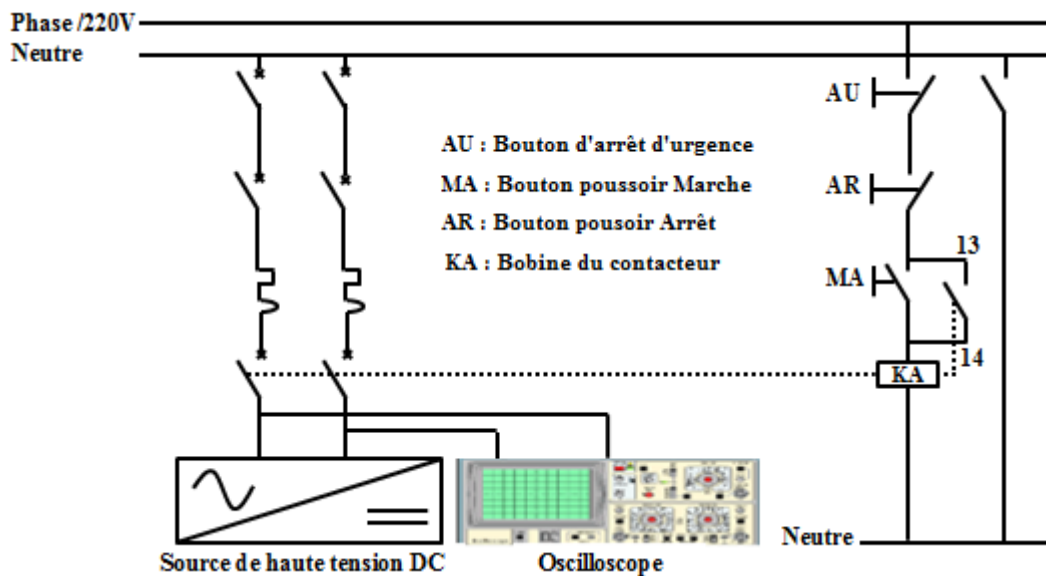


Fig (II.9) : Schéma du circuit de protection électrique

Comme cité précédemment, la source de tension AC passe par le circuit de protection avant d'être convertie vers du continu. Pour pouvoir commencer les manipulations, on actionne les deux disjoncteurs différentiels et magnétothermique pour protéger notre source de tension DC variable en aval. La même chose pour le bouton poussoir marche (MAR) ce qui va exciter la bobine du contacteur (KA). Une fois celle-ci excitée, ses contacteurs seront en position de travail, parmi eux le contact 13-14 qui assure l'auto-maintien et de ce fait la source de tension DC variable sera alimentée et aussi protégée. Pour la protection humaine, un contacteur de fin de course électromécanique nous assure la non présence d'un opérateur dans la cage de Faraday. Après fin des manipulations, le bouton poussoir arrêt

(AR) est actionné pour couper l'alimentation du système après désexcitation de la bobine (KA). En cas de défaillance du système, un bouton d'arrêt d'urgence est mis à disposition.

II.3.2.3. Cellule d'essai et résistance de limitation de courant:

Pour effectuer les décharges dans les huiles isolantes étudiées, nous avons utilisé une cellule de test en plexiglas d'un volume de 500 ml contenant un système d'électrodes plan-plan en acier (Fig.II.10). L'espace entre les électrodes a été réglé à 2,5 mm et le diamètre des électrodes est de $(32,80 \pm 0,02) \text{ mm}$. Le premier plan de la cellule relie à la source de haute tension DC via la résistance de limitation de courant de 220 k Ω (Fig. II.11). Par ailleurs, son deuxième plan est relié au système de mesure des courants de décharge.



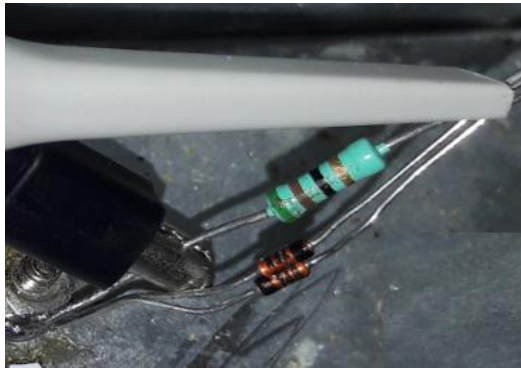
Fig (II.10) : Cellule d'essai



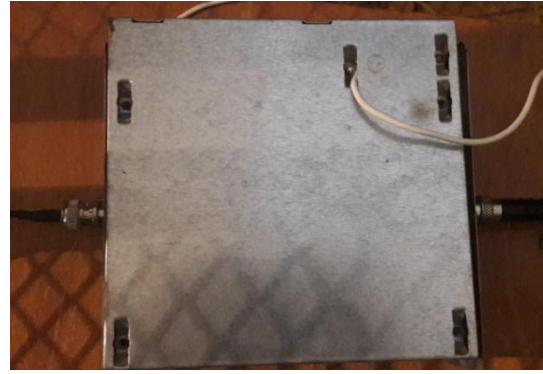
Fig (II.11) : Résistance de limitation de courant

II.3.2.4. Système de mesure des courants :

Le système de mesure des courants s'effectue à travers la mesure de la tension aux bornes d'une résistance non inductive de 50 Ω connectée en série avec la cellule et placée du côté basse tension, grâce à un oscilloscope numérique à mémoire. Deux diodes Zener (AN4148, 100 mA, 4 ns, 100V), montées en tête bêche en parallèle avec la résistance pour protéger l'entrée de l'oscilloscope contre les surtensions ou les surintensités (Fig.II.12). La résistance et les deux diodes sont placées dans une enceinte métallique pour protéger et isoler le système de mesure des perturbations électromagnétiques externes.



(a)



(b)

Fig (II.12) : (a) Système de mesure des courants, (b) : Son enceinte métallique

II.3.2.5. Oscilloscope et cage de Faraday :

Le moyen de mesure et d'enregistrement des signaux du courant de décharge est un oscilloscope numérique (GW Instek: GDS-3504), qui donne une image du courant de décharge grâce à sa fonction «TRIGGER». Il est placé dans une enceinte métallique pour éviter la pollution de signaux parasites venant des appareils d'alimentation (Fig.II.13). Pour effectuer les mesures nous avons utilisé une sonde branchée aux bornes de la résistance non inductive.

Une cage de Faraday (Fig.II.13) constituée d'une grillage métallique avec une maille de quelques centimètres est utilisée pour protéger les nuisances électriques et subsidiairement électromagnétiques extérieures ou inversement empêcher un appareillage de polluer son environnement et protéger le manipulateur du champ électrique rayonné. Les instruments placés dans la cage de Faraday sont : la résistance de limitation de courant, la cellule d'essai, la résistance non inductive et les deux diodes zener.



Fig (II.13) : Image de l'oscilloscope numérique et cage de Faraday

Nous avons remplis la cellule d'essais jusqu'à immersion totale du système d'électrode plan-plan avec l'une des huiles. Après vérification du bon branchement de la totalité des câbles, circuit de protection, mise à la terre de toutes les carcasses métalliques et la cage de Faraday, nous avons entamé les séries d'essais à des niveaux de tension DC variable de 0 à 60 kV. Avant chaque mesure nous nettoyons la cellule d'essai et les électrodes avec de l'acide sulfurique, puis un autre lavage avec de l'eau chaude et du savon. Puis, mises dans une étuve à 100°C pendant 48 h afin d'enlever toute trace d'impuretés et d'humidité.

II.4. Caractérisation physico-chimique des huiles étudiées :

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats relatifs à l'influence du vieillissement thermique et électrique sur les propriétés physico-chimiques des huiles étudiées. Ces essais concernent les variations de l'indice de couleur, de la densité, de la teneur en eau, de la viscosité, de l'acidité, du point d'éclair et du point d'écoulement. Les deux vieillissements thermique et électrique ont été effectués respectivement pour les temps de vieillissement (144, 288, 432, 576, 720) heures, et l'application de (500, 1000, 1500, 2000, 2500) décharges.

Les paramètres physico-chimiques de chaque huile étudiée ont été mesurés dans deux laboratoires différents ; le laboratoire de la Raffinerie d'Alger où nous avons mesuré la densité, la teneur en eau, la viscosité, et l'acidité; puis le laboratoire de NAFTAL/Branche Carburants à l'aéroport Houari Boumediene Dar El Beida, où nous avons mesuré, l'indice de couleur, le point d'éclair, le point d'écoulement. La mesure de ces paramètres a été effectuée en conformité avec les normes internationales représentées au Tableau (II.2). Les paramètres physico-chimiques initiaux de ces huiles sont donnés au Tableau (II.3).

Tableau (II.2) : Normes et valeurs recommandées / limites correspondantes aux paramètres étudiés

Paramètres	Norme	Valeurs limites pour les huiles végétales (IEC 62770)	Valeurs limites pour l'huile minérale (IEC 60296)
Coleur	ASTMD 1500	≥ 1.5	1.0
Densité à 20°C (g/ml)	ISO 3675	≤ 1	max 0.895
Teneur en eau (ppm)	IEC 60814	≤ 200	max 30
Viscosité (cSt) à 40°C	ISO 3104	≤ 50	max 12
Acidité (mg KOH/g)	IEC 620213	≤ 0.06	max 1.2
Point d'éclair (°C)	ISO 2719	≥ 250	min.145
Point d'écoulement (°C)	ISO 3016	$\geq - 10$	max. - 40

Tableau (II.3) : Paramètres initiaux des huiles étudiées

Paramètres	Unité	Huile minérale	Huile d'olive	Huile de soja
Couleur	-	1	1.5	0.5
Densité à 20°C	g/ml	0.859	0.911	0.920
Teneur en eau	ppm	4.1	564.4	345.0
Viscosité à 40°C	cSt	7.93	37.2	32.3
Acidité	mg'KOH'/g	0.067	0.160	0.100
Point d'éclair	°C	146	320	334
Point d'écoulement	°C	- 30	- 12	- 9

II.4.1. Effet du vieillissement thermique:

II.4.1.1. Variation de la couleur:

La couleur est une caractéristique visuelle très utile pour l'analyse des huiles de transformateur et constitue un indice important qui donne une indication sur le degré de dégradation ou de contamination possible au cours du processus de vieillissement. Les échantillons testés ont été récupérés et illustrés afin de montrer les changements de couleur subis par les huiles au cours du vieillissement thermique.

Comme le montrent les deux figures (II.14 et II.15), après 720 heures de vieillissement à 110°C, l'huile minérale devient brune foncée sans formation de dépôts. Ce changement de couleur est essentiellement dû à l'oxydation de l'huile minérale, ce qui conduit par conséquent à la formation de produits acides. Par contre, aucun changement significatif dans la couleur et la transparence des échantillons d'huiles d'olive et de soja. Cela peut être dû au fait que la température n'a pas été élevée pour obtenir une dégradation avancée de ces huiles.

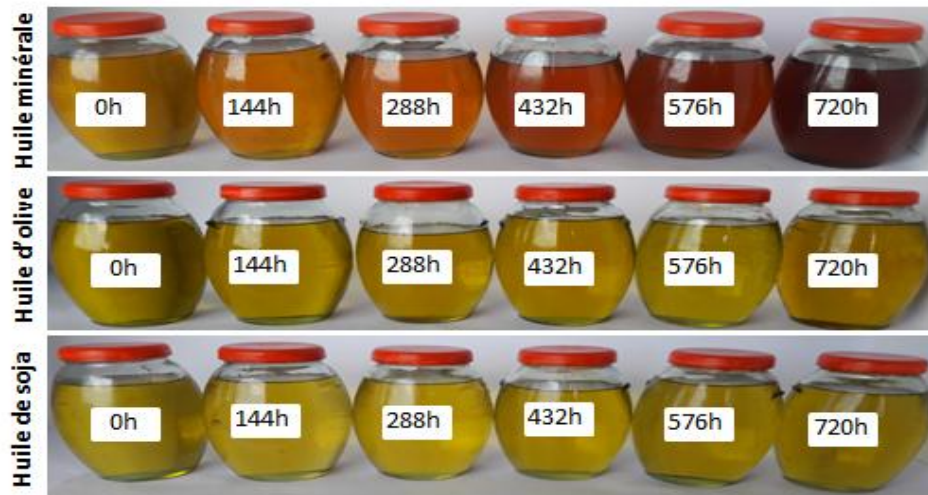


Fig (II.14) : Échantillons d'huiles utilisées après vieillissement thermique à 110 °C

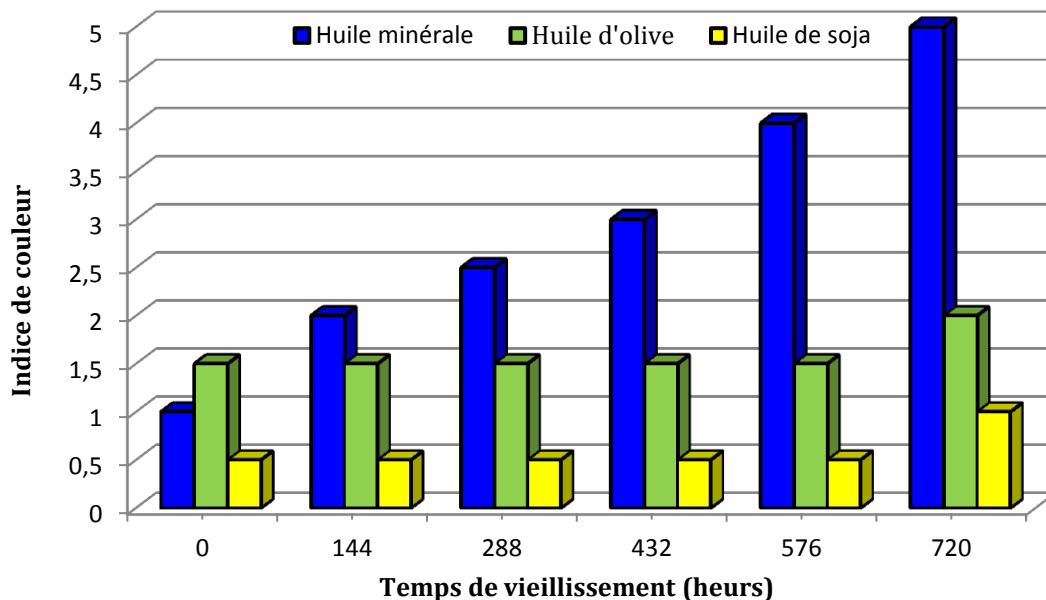


Fig (II.15) : Indice de couleur en fonction du temps de vieillissement à une température de 110 °C

II.4.1.2. Variation de la densité :

La densité est un facteur important pour l'isolant liquide qui influe sur le taux de transfert de masse pendant la phase de refroidissement du transformateur. Cela dépend de la composition chimique du liquide. Dans ces tests, la densité a été mesurée à une température de 20°C pendant les intervalles du temps de vieillissement thermique (Fig.II.16). Il a été constaté que la masse volumique est à peu près constante pour les deux huiles d'olive et de soja, dont les valeurs sont respectivement de 0,91 et 0,92 g/ml, et reste

conforme aux normes. Alors que la densité de l'huile minérale diminue légèrement avec le temps de vieillissement. Lorsque l'huile vieillit à de telles températures, divers facteurs, tels que l'agitation thermique et la formation de bulles gazeuses, se combinent pour provoquer une perte de poids, ce qui, à son tour, affecte la densité de l'huile. En pratique, la température varie selon les saisons et son effet sur la densité de l'huile de transformateur n'est pas facile à évaluer car l'huile est soumise à d'autres contraintes, telles que des tensions et des courants permanents dans des conditions de fonctionnement normales [Abd-11].

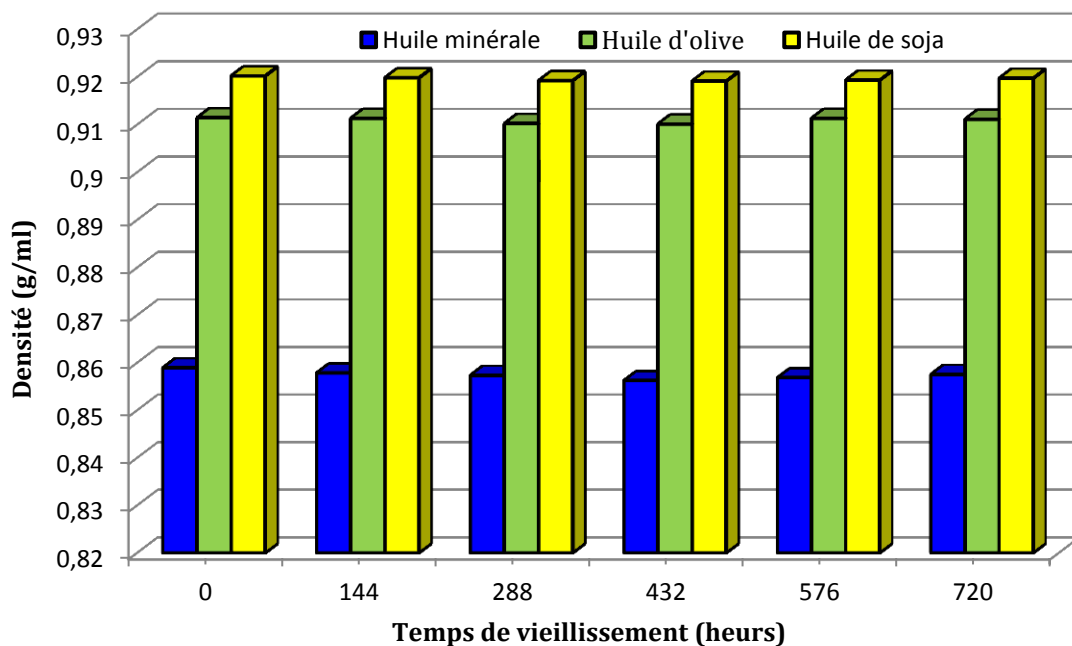


Fig (II.16) : Densité en fonction du temps de vieillissement à une température de 110 °C

II.4.1.3. Variation de la teneur en eau :

La teneur en eau est un paramètre important qui influe fortement sur le comportement des huiles isolantes. Avec le temps, une teneur en eau élevée peut jouer un rôle crucial dans la vie du transformateur, car elle provoque une diminution de la rigidité diélectrique et de la résistivité, une augmentation du facteur de dissipation diélectrique et une accélération de la dégradation chimique du papier Kraft [Car-15].

La Fig (II.17) montre les variations de la teneur en eau de l'huile minérale et les deux huiles végétales à différentes périodes de vieillissement. Les huiles d'olive et de soja contiennent un taux d'eau très élevé avant le vieillissement thermique, car les esters naturels sont en général très hygroscopiques, car le groupe ester (COOR) de la structure de

la chaîne moléculaire a une capacité plus grande de contribuer à la liaison hydrogène [Kha-07, Aug-10]. Ainsi, les esters naturels peuvent absorber de l'eau jusqu'à 1200 ppm ou plus à la température ambiante [Oom-02], ce qui explique la forte teneur en eau des huiles considérées. Mais après avoir chauffé les échantillons d'huile végétale pendant une période de 288 heures à 110 °C, la teneur en eau commence à diminuer de façon remarquable avec un taux de diminution 9.82×10^{-3} ppm/h et de 4.68×10^{-3} ppm/h respectivement pour l'huile d'olive et de soja. Après 432 heures, la teneur en eau des huiles végétales varie peu. Cela peut s'expliquer par d'autres processus que l'évaporation par échauffement; par exemple: la décomposition de l'huile. Par contre, avant le vieillissement thermique, la teneur en eau dans l'huile minérale est importante, mais dans les limites des recommandations de la norme IEC 60814. Sa diminution avec le temps est moins importante en ce qui concerne les huiles végétales.

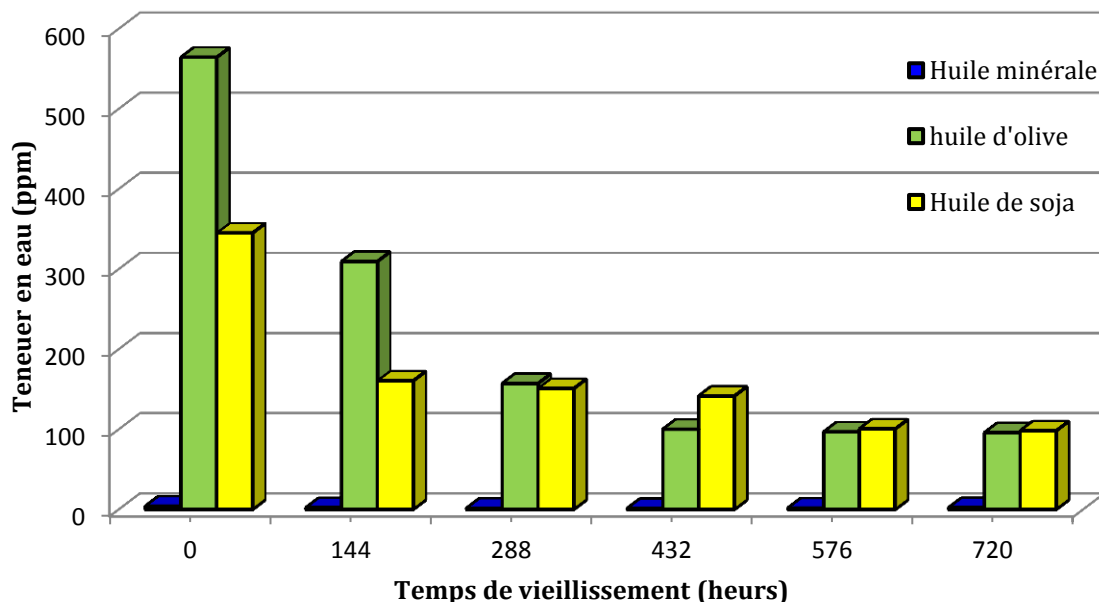


Fig (II.17) : Teneur en eau en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C

II.4.1.4. Variation de la viscosité :

La viscosité d'un fluide est l'un des paramètres clés pour déterminer la capacité de refroidissement du fluide dans la perspective de l'efficacité de la conception des transformateurs. Une légère augmentation de la viscosité peut entraver considérablement l'évacuation de la chaleur. D'autre part, la viscosité influe sur le comportement du liquide en fonction de l'évolution de la température de fonctionnement. Si ce paramètre ne respecte pas les tolérances requises, cela est dû à une lubrification insuffisante des pièces mobiles et à une perte ou une fuite de liquide du transformateur [Spo-12]. Plusieurs chercheurs ont

indiqué que la viscosité est sensible à l'oxydation [**Yan-14**], mais que dans des conditions hermétiques (absence d'air), la viscosité présente un comportement stable [**Ten-10**].

La Fig (II.18) présente les variations de viscosité en fonction du temps de vieillissement thermique pour les trois huiles étudiées. La viscosité des huiles végétales augmente avec le temps de vieillissement. En effet, la viscosité de l'ester naturel peut augmenter de manière significative en cas d'oxydation sévère, confirmant ainsi l'effet d'infiltration d'oxygène à l'intérieur des bouteilles au début et pendant le remplissage d'huile. L'oxygène attaque les doubles liaisons de carbone et conduit à la rupture des chaînes d'acides gras. Ainsi, les molécules de l'ester sont fragmentées en éléments plus petits et la polymérisation des molécules restantes entraîne une augmentation progressive de la viscosité [**Yan-14**, **Ten-10**]. Il est à noter que les esters naturels s'oxydent différemment des huiles minérales. Cela est dû à la composition chimique des fluides. L'oxydation des esters naturels ne génère pas de boues précipitées mais ils ont une tendance à se polymériser. Par conséquent, la polymérisation peut être vue comme une augmentation de la viscosité [**Mcs-02**]. Cependant, les viscosités mesurées pour les huiles végétales restent également acceptables par rapport aux exigences de la norme ISO 3104. Par contre, la viscosité de l'huile minérale augmente pendant les premières 288 heures de vieillissement. Mais après ce temps, la viscosité commence à diminuer de manière significative. Les échantillons d'huile se détériorent et lorsque sa viscosité cinématique diminue, il perd sa capacité d'évacuation de la chaleur, ce qui entraîne une contrainte thermique accrue sur l'isolation du transformateur et, par conséquent, une perte d'énergie.

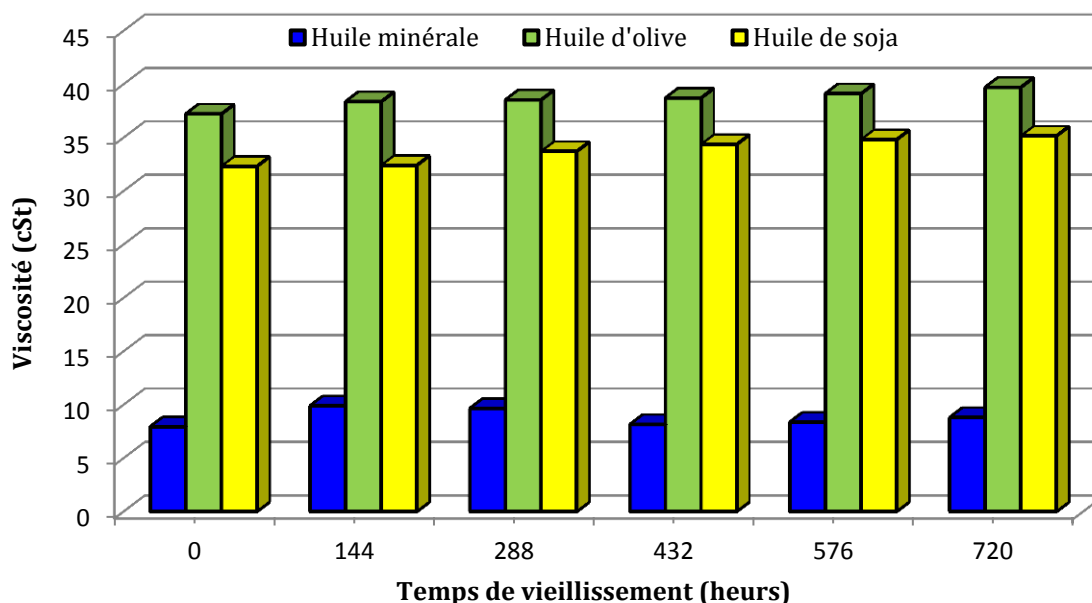


Fig (II.18) : Viscosité en fonction du temps de vieillissement à une température de 110 °C

II.4.1.5. Variation de l'acidité:

La concentration d'acide dans l'huile peut être déterminée par la quantité d'hydroxyde de potassium (KOH) nécessaire pour neutraliser l'acide dans 10g d'huile. L'acidité était traditionnellement utilisée pour évaluer les performances d'oxydation de l'huile [Sin-14], mais elle ne convient pas aux huiles végétales car les acides ne sont pas générés uniquement par oxydation mais également par hydrolyse (il n'y a pas d'hydrolyse dans l'huile minérale) [Cou-13].

La Fig. (II.19) montre l'indice d'acide total pour les deux huiles végétales et l'huile minérale pour différents temps de vieillissement à la température testée de 110°C. On observe que l'acidité de l'huile d'olive est importante par rapport au soja et à l'huile minérale. Cette valeur élevée est due à la teneur en eau élevée de l'huile d'olive et à la limite de solubilité élevée des molécules d'acides dans les esters naturels. Nous remarquons également une forte augmentation de l'acidité de l'huile d'olive entre 0 et 432 heures, avec un taux d'augmentation estimé à $(1,28 \times 10^{-5})$ (mg'KOH'/g) par heure. Cette augmentation est attribuée à la biodégradabilité plus élevée de l'ester naturel et à la réaction d'hydrolyse [Sin-14, Cou-13]. Mais de 432 à 720 heures, le taux d'augmentation de l'acidité estimé à $(3,62 \times 10^{-6})$ (mg'KOH'/g) par heure indique une faible augmentation de l'acidité. D'autre part, les deux huiles : minérale et soja ont maintenu une acidité inférieure tout au long du

processus de vieillissement avec une lente augmentation qui peut être due à la résistance des antioxydants naturels présents dans ces huiles.

Plusieurs chercheurs ont indiqué que l'indice d'acidité de l'huile d'olive ou d'autres huiles végétales est élevé par rapport à l'huile minérale. Cela est dû aux différences de la structure chimique [Sin-14]. La limite maximale de l'indice d'acidité des nouvelles huiles à base d'esters naturels est de 0,06 (mg de KOH/g) alors qu'elle est de 0,3 pour les vieilles huiles en service [IEE-13].

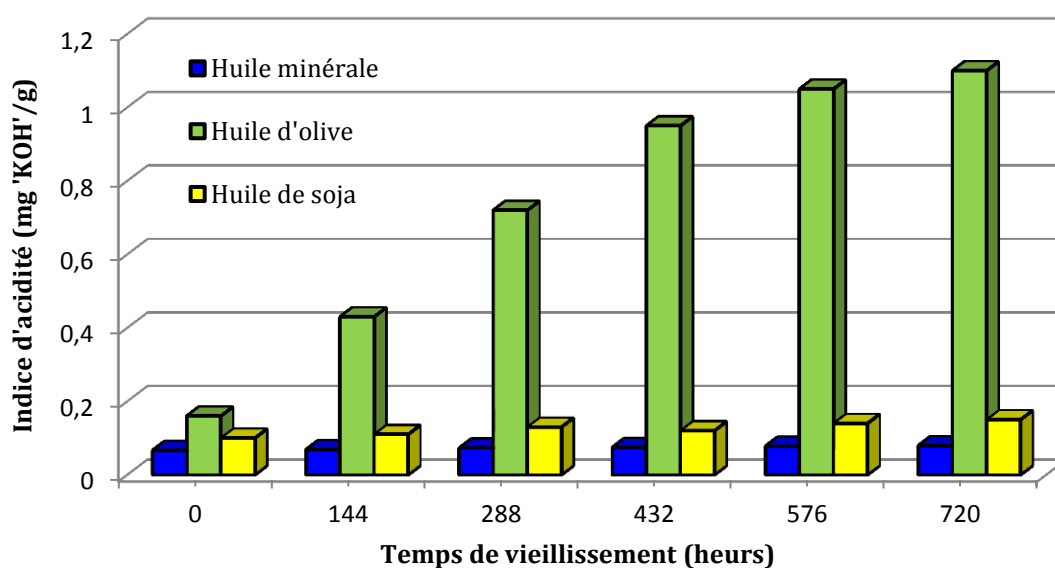


Fig (II.19) : Indice d'acidité en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C

II.4.1.6. Variation du point d'éclair :

Le chauffage progressif d'un liquide provoque le dégagement de vapeurs suivant sa courbe de tension de vapeur, qu'il s'agisse d'un corps pur ou d'un mélange. Dès que la concentration de ces vapeurs dans l'atmosphère surmontant le liquide, devient suffisante pour former un mélange inflammable, elles brûlent à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée le point d'éclair du liquide [24]. Il est très important d'étudier ses variations en fonction du temps de vieillissement thermique des huiles étudiées. Cette évolution est représentée à la Fig (II.20). Il apparaît clairement que les point d'éclair 320°C et 334°C d'huile d'olive et de soja à 0h respectivement est très élevé par rapport au celui de l'huile minérale (146°C). Cela indique une propriété meilleure des huiles végétales que celle de l'huile minérale. Cette propriété traduit la bonne résistance au feu des huiles végétales.

La Fig (II.20) montre aussi que le point d'éclair de l'huile de soja reste pratiquement constant en augmentant le temps de vieillissement thermique. Cela signifie qu'il n'y a pas eu formation d'hydrocarbures gazeux dissous dans cette huile. Par ailleurs, il y a une faible diminution du point d'éclair de l'huile minérale et de l'huile d'olive en fonction du temps de vieillissement thermique. Cette diminution est due à la présence de particules volatiles, de faibles masses molaires et facilement inflammables comme le méthane CH_4 , l'éthane C_2H_6 ou encore l'acétylène C_2H_2 [Liu-12, Don-12]. Ces hydrocarbures de faible masse moléculaire pouvant abaisser le point d'éclair de l'huile. Ainsi dans le cas des huiles végétales, la présence d'aldéhydes en général produits de l'oxydation des acides gras insaturés en quantité élevée peut affecter le point d'éclair [Bos-06].

Tandis que pour tous les temps de vieillissement thermique de 0h à 720h, l'évolution du point d'éclair des huiles végétales est acceptable, et ses valeurs sont conformes à la norme ISO 02719.

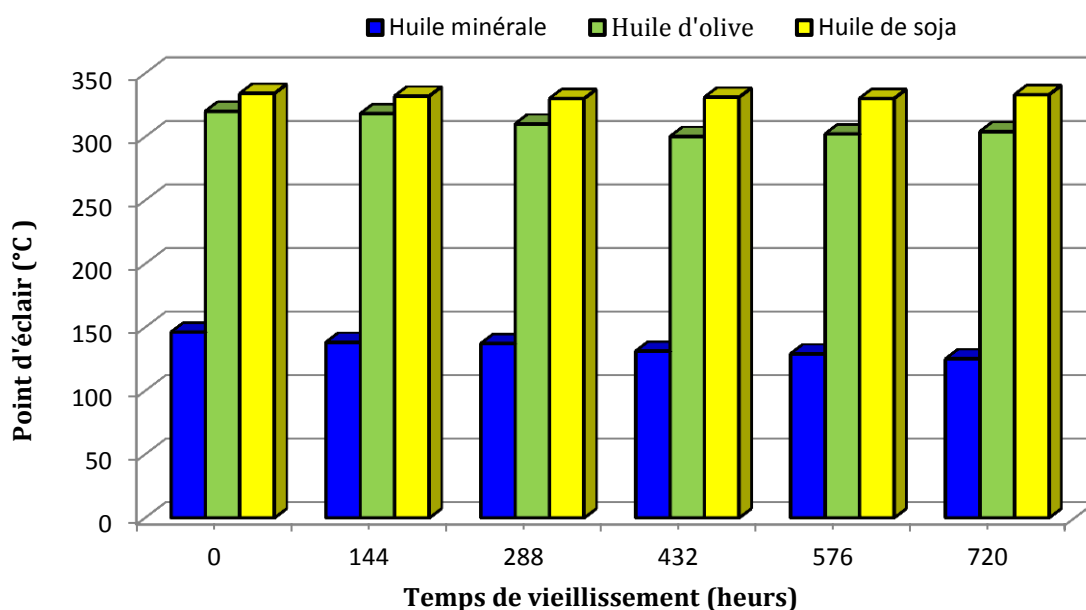


Fig (II.20) : Point d'éclair en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C

II.4.1.7. Variation du point d'écoulement

L'utilisation de matériels électriques extérieurs nécessite de connaître la viscosité des liquides à basses températures correspondant au fonctionnement en hiver (-25°C) ou dans des conditions climatiques extrêmes (-60°C). Pour cela, le point d'écoulement est un paramètre important dans le choix d'un liquide destiné à évacuer les calories de ces matériels électriques. Ce point est défini comme la température la plus basse pour laquelle

un liquide peut couler lorsqu'il est refroidi à des conditions fixées [Mok-04]. Lorsqu'un liquide est refroidi, il acquiert une certaine consistance qui n'est pas la congélation, correspondant à l'état solide d'un corps pur à température fixe. Cette consistance est liée à la masse moléculaire, à la composition du liquide en mélange de différentes molécules (isomères et additifs).

La Fig (II.21) présente les variations du point d'écoulement des trois huiles étudiées à différents temps du vieillissement thermique. En effet, les huiles végétales qui sont facilement biodégradables et se figent à des températures beaucoup plus hautes que l'huile minérale dont les valeurs varient autour de -12°C et -9°C respectivement pour l'huile d'olive et de soja. Le point d'écoulement de l'huile minérale est pratiquement constant durant le vieillissement thermique.

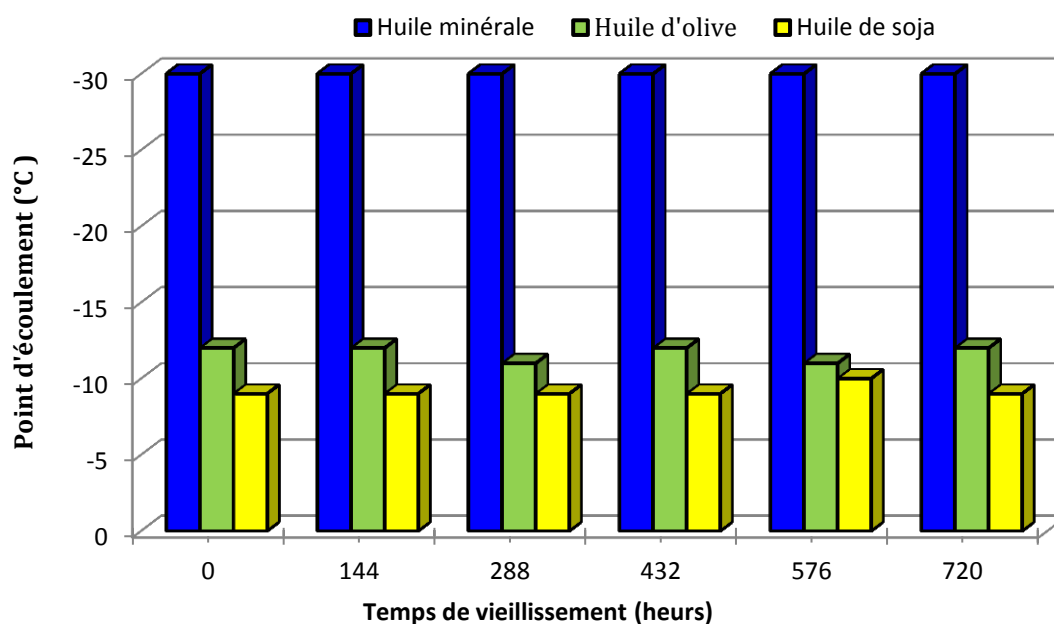


Fig (II.21) : Point d'écoulement en fonction du temps de vieillissement à une température de 110°C

II.4.2. Effet du vieillissement électrique:

II.4.2.1. Variation de la couleur:

La Fig (II.22) présente l'évolution de l'indice de couleur en fonction du nombre de décharges des trois huiles étudiées. Nous remarquons que l'indice de couleur des huiles végétales a augmenté faiblement après 2500 décharges. Cette modeste variation peut être

le résultat d'une carbonisation de ces huiles suite aux décharges. La faible détérioration de l'aspect visuel représente une bonne caractéristique due à la capacité des huiles végétales à dissoudre les produits de dégradation. A noter qu'on n'a pas constaté de dépôt solide dans ces huiles végétales.

Nous observons également que d'huile minérale garde sa couleur initiale jusqu'au 1000 décharge, mais à partir de 1500 décharges, l'indice de couleur est augmenté. En effet, cette élévation est due à l'oxydation de l'huile, qui a pour conséquence la formation de produits acides [Mok-04] avec des dépôts solides. Cette augmentation indique un état avancé de dégradation de l'huile minérale.

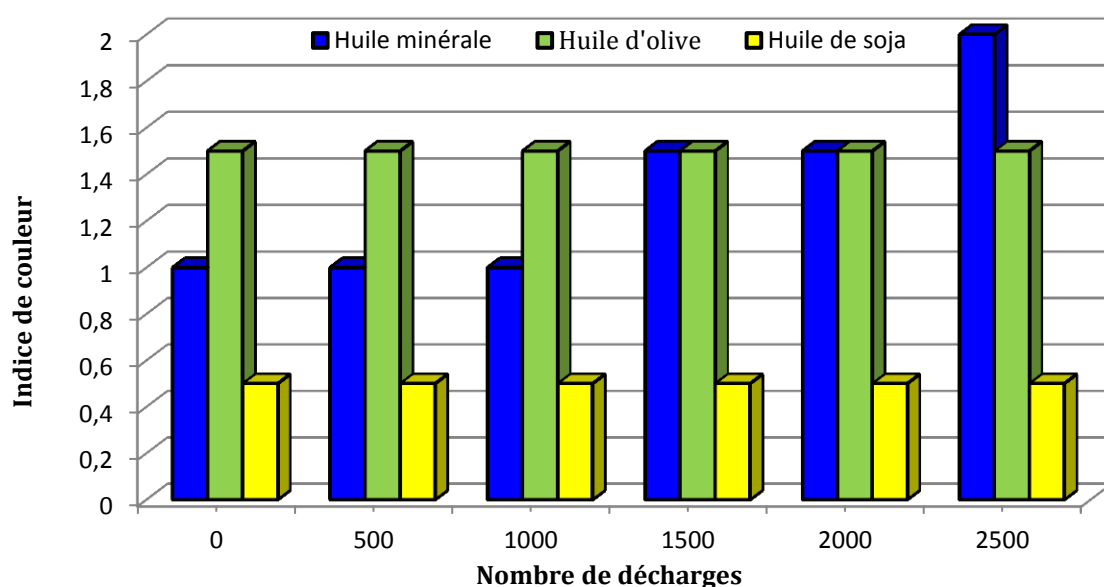


Fig (II.22) : Indice de couleur en fonction du nombre de décharges électriques

II.4.2.2. Variation de la densité :

L'évolution de la densité en fonction du nombre de décharges pour les trois huiles étudiées est représentée à la Fig (II.23). Elle ne montre aucune influence du nombre de décharges ($N \leq 2500$) sur la densité des huiles végétales et de l'huile minérale. Ceci pourrait être dû au fait que la composition chimique de ces huiles reste la même durant ces décharges.

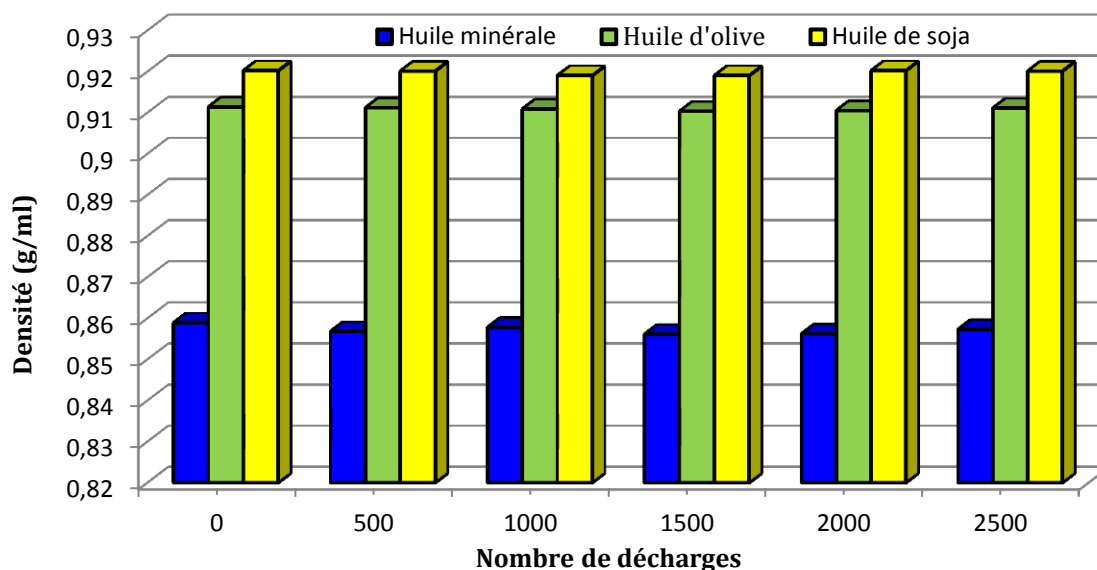
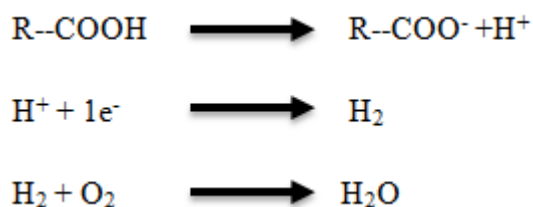


Fig (II.23) : Densité en fonction du nombre de décharges électriques

II.4.2.3. Variation de la teneur en eau :

La Fig. (II.23) exprime les variations de la teneur en eau en fonction du nombre de décharges subies par les trois huiles étudiées. En observant que la teneur en eau des huiles végétales présente une variation fluctuante quoi qu'elle tende à augmenter vu la différence entre le début et la fin de ces allures. En effet, cette variation aléatoire peut être due à la contamination de ces huiles par l'air lors des mesures même avec les précautions que nous avons prises, et l'augmentation peut provenir de la réaction des molécules d'hydronium issu des acides gras présents dans ces huiles par les électrons générés lors de la décharge selon le mécanisme suivant :



Cependant, l'application de décharges sur l'huile minérale produit une faible diminution de la teneur en eau de la valeur 4.1 à 3.2 ppm qui due à l'évaporation des traces d'eau présents dans la zone d'occurrence des décharges. L'effet de vaporisation engendré par les décharges dans cette huile est relativement peu important par rapport à celui induit par la température.

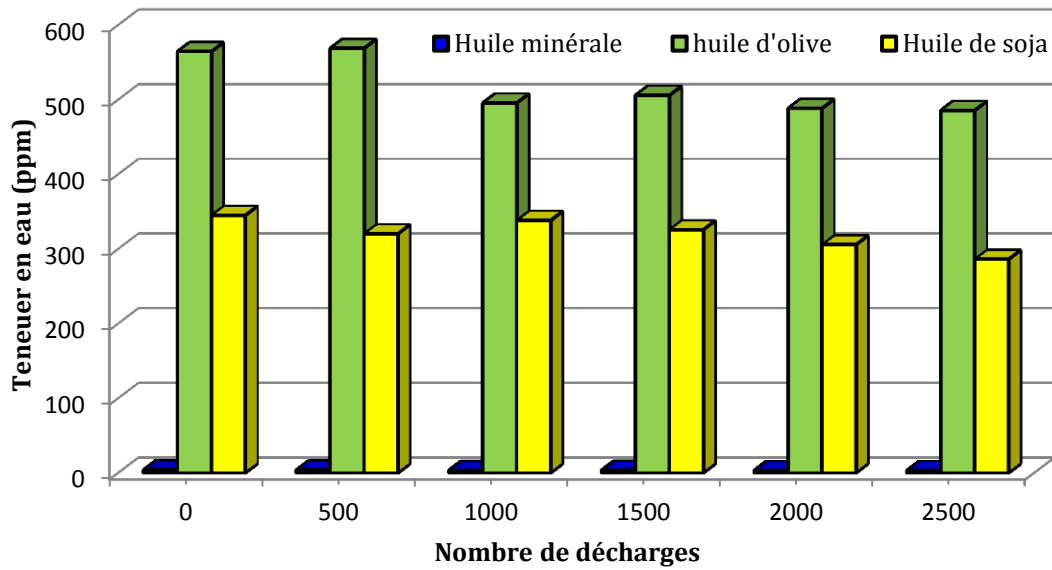


Fig (II.24) : Teneur en eau en fonction du nombre de décharges électriques

II.4.2.4. Variation de la viscosité :

La viscosité d'une huile est un paramètre important pour le refroidissement du transformateur. Plus la viscosité est faible, meilleur est le refroidissement [Moh-00]. L'analyse d'huile minérale montre que la viscosité cinématique est légèrement augmentée en fonction du nombre de claquages (Fig.II.24). Ceci peut être le résultat de la pollution de l'huile par des particules solides dissoutes au sein des échantillons, ou encore conséquence de produits d'oxydation. Cependant, il y a une nette tendance à la baisse de la viscosité des huiles végétales avec l'application de décharges électriques.

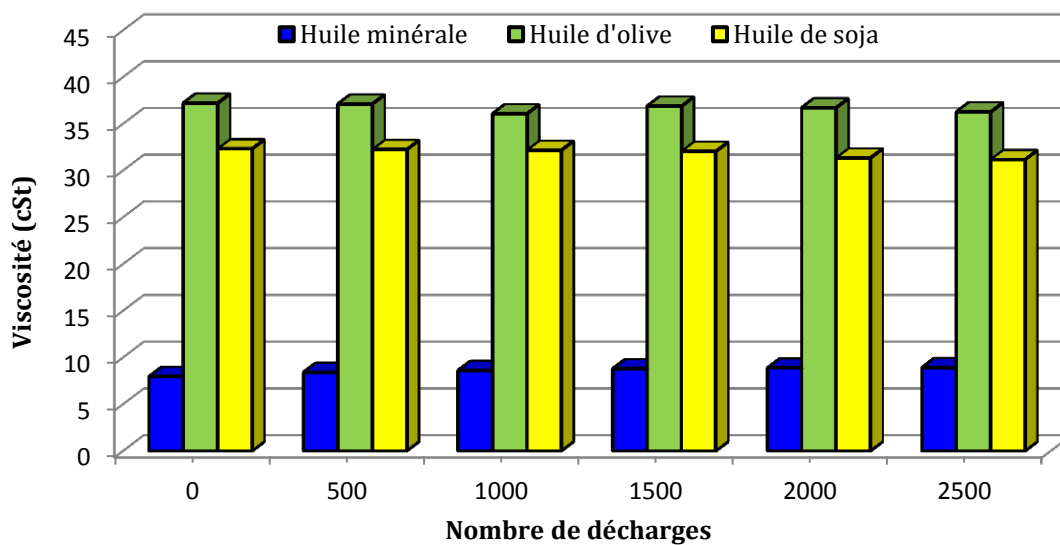


Fig (II.25) : Viscosité en fonction du nombre de décharges électriques

II.4.2.5. Variation de l'acidité:

Un résultat inattendu a été trouvé dans ces expériences où l'indice d'acidité des huiles végétales diminue avec le nombre de décharges (Fig.II.26). Ceci peut être expliqué par le changement de la structure des molécules de ces huiles par la décharge qui va modifier l'huile localement. L'énergie dissipée provoque la rupture de la structure moléculaire de ces huiles d'où résulte une augmentation des molécules d'hydronium. Cette hypothèse concorde avec l'augmentation de la teneur en eau constatée précédemment.

La Fig (II.26) indique aussi une augmentation de l'indice d'acidité de l'huile minérale au début des décharges. Celui-ci se stabilise pour des décharges intermédiaires, pour qu'il croisse de nouveau durant les dernières décharges. L'augmentation de l'indice d'acidité semble résulter des produits d'oxydation en présence, conséquence probable de l'existence de l'eau et du contact avec l'air. Cette élévation de l'indice d'acidité nous permet de faire l'hypothèse quant à l'existence de particules conductrices, conséquence de corrosion. En effet, le fer est un composé qui peut se présenter sous forme dissoute, jouant le rôle de catalyseur en activant la réaction d'oxydation. Ces réactions donnent naissance à des proportions de produits acides.

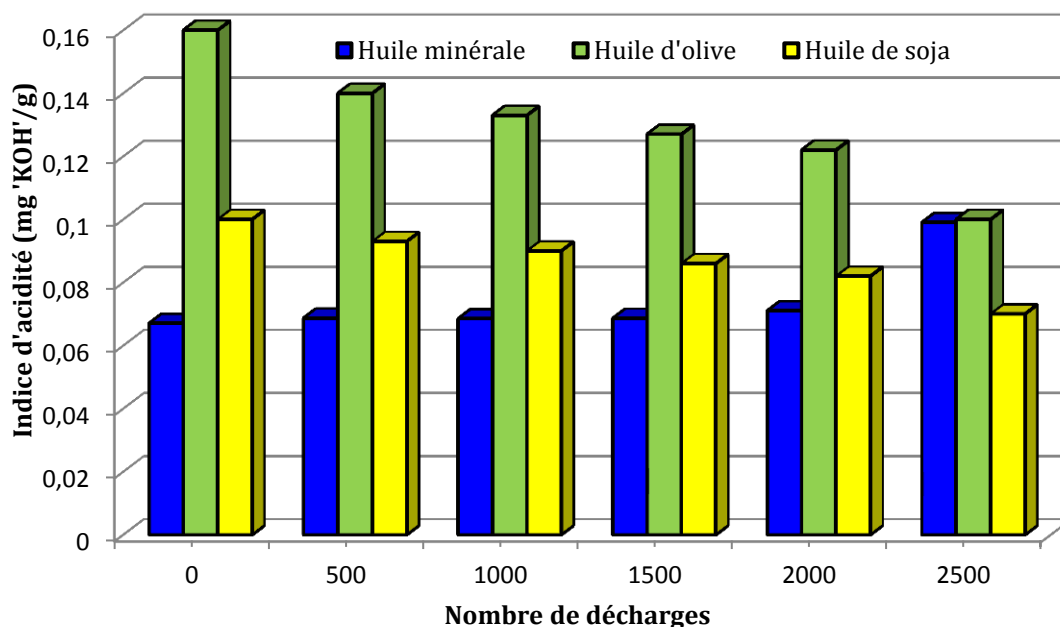


Fig (II.26) : Acidité en fonction du nombre de décharges électriques

II.4.2.6. Variation du point d'éclair :

La Fig (II.27) présente l'évolution du point d'éclair en fonction du nombre de décharges des trois huiles étudiées. La courbe montre une décroissance de 20 et 15 degrés après 1000 décharges pour l'huile d'olive et de soja respectivement, puis une lente variation qui tend cependant à se stabiliser autour de 300 et de 315 °C pour les mêmes huiles. En effet, les décharges électriques dans les huiles végétales génèrent des gaz combustibles en particulier l'acétylène (C_2H_2), ou des molécules de faibles poids moléculaires [Kha-08] ainsi que d'autres hydrocarbures inflammables. Ce qui peut affecter fortement le point d'éclair de ces huiles. Cependant, le nombre de claquages n'a pratiquement pas d'effet sur le point d'éclair d'où la non formation d'hydrocarbures gazeux.

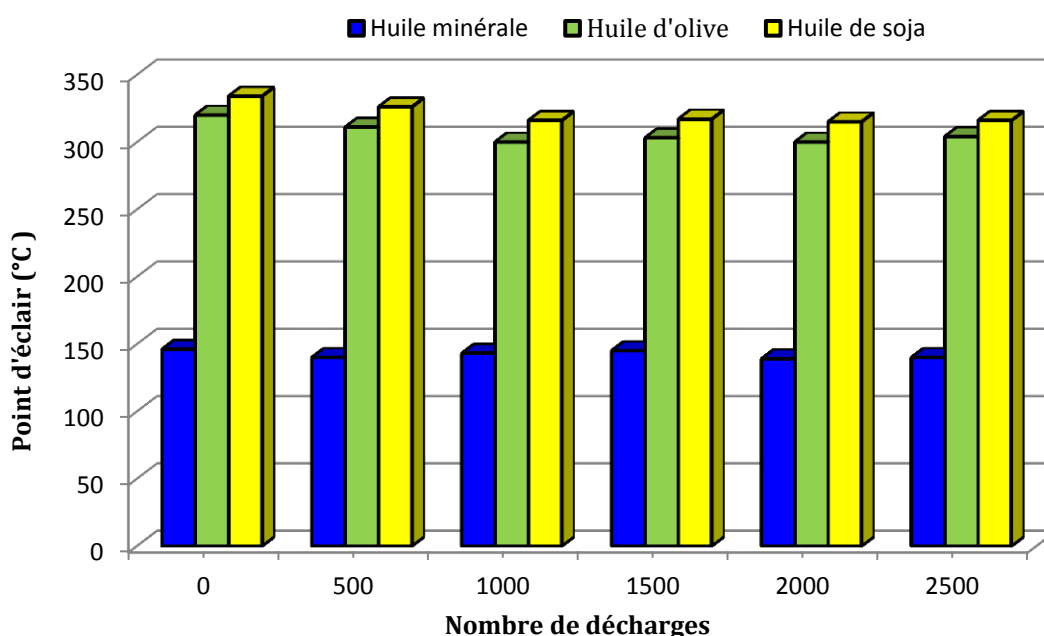


Fig (II.27) : Point d'éclair en fonction du nombre de décharges électriques

II.4.2.7. Variation du point d'écoulement:

C'est un critère important dans le choix du liquide diélectrique approprié à un transformateur donné surtout dans les pays froids. Le point d'écoulement est défini comme étant la plus petite température à laquelle l'huile se solidifie en formant des cristaux qui s'accumulent. Au point d'écoulement, l'huile perd la caractérisation d'écoulement. La Fig (II.28) représente l'évolution de point d'écoulement en fonction du nombre de décharges des trois huiles étudiées. A partir des résultats obtenus, on constate que le point d'écoulement de ces huiles étudiées est pratiquement constant durant le vieillissement électrique.

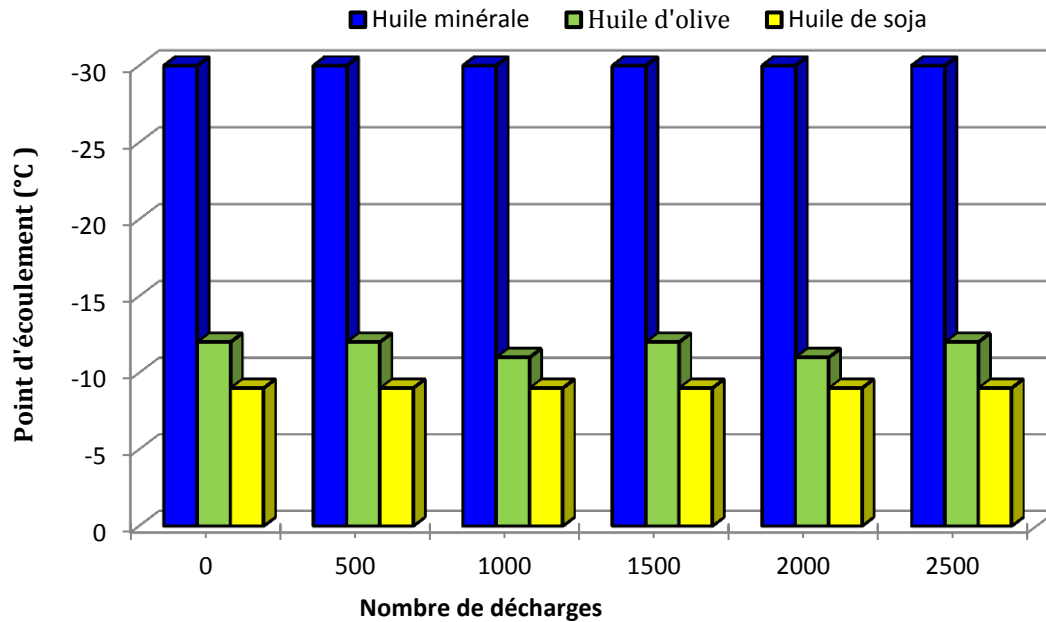


Fig. (II.28) : Point d'écoulement en fonction du nombre de décharges électriques

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons essayé de suivre les variations des paramètres physico-chimiques des trois huiles étudiées sous l'influence du temps de vieillissement thermique et des décharges électriques afin d'identifier les points faibles qui peuvent limiter l'utilisation des huiles végétales dans une application en électrotechnique. L'analyse des différents échantillons de ces huiles a donné des résultats très significatifs qui peuvent être résumés comme suit :

- ❖ Aucun changement significatif dans la couleur des huiles végétales après les deux types de vieillissement thermique et électrique. Cependant l'huile minérale devient brun foncé ce qui indique son oxydation.
- ❖ Les huiles végétales contiennent un taux d'eau très élevé avant les vieillissements, mais après 288h de vieillissement thermique, elles ont été séchées et les teneurs en eau deviennent conformes aux normes IEC 60814.
- ❖ Par contre, après le vieillissement électrique, la teneur en eau des huiles végétales est augmentée à cause de la réaction des molécules d'hydronium issu des acides gras présents dans ces huiles par les électrons générés lors de la décharge.

- ❖ La viscosité des huiles végétales augmente avec le temps de vieillissement, mais reste également acceptable par rapport aux exigences de la norme ISO 3104. Celle d'huile minérale est cependant légèrement augmentée.
- ❖ L'acidité de l'huile d'olive varie dans une gamme de valeurs élevée par rapport à l'huile de soja. Elle est augmentée durant les 432 heures du vieillissement thermique avec un taux d'augmentation estimé à $(1,28 \times 10^{-5})$ (mg'KOH'/g) par heure. Par ailleurs, l'huile minérale et de soja ont maintenu une acidité inférieure tout au long du processus de vieillissement avec une lente augmentation qui peut être due à la résistance des antioxydants naturels présents dans ces huiles.
- ❖ L'acidité des huiles végétales est diminuée avec le nombre de décharges. Ceci peut être expliqué par le changement de la structure des molécules d'huile par le claquage qui va modifier l'huile localement, et l'énergie dissipée provoque la rupture de la structure moléculaire d'huile.
- ❖ Les points d'éclair 320°C et 334°C de l'huile d'olive et de soja respectivement sont très élevés par rapport à celui d'huile minérale 146°C. Cette propriété traduit la bonne résistance au feu des huiles végétales qui est meilleure de celle de l'huile minérale.
- ❖ Les huiles végétales se figent à des températures beaucoup plus hautes que l'huile minérale dont les valeurs varient autour de -12°C et -9°C respectivement pour l'huile d'olive et de soja.

Malheureusement, nous n'avons pas pu mesurer les variations des paramètres électriques des trois huiles étudiées sous les contraintes thermique et électrique au niveau des laboratoires disponibles au niveau d'Alger (GRTE et CREDEG). Nous avons mesuré seulement la tension de claquage initiale des trois huiles : minérale, olive et soja qui sont respectivement (30, 71, 70) kV qui sont acceptables par rapport à la norme IEC 60156. Des résultats inattendus sont trouvés dans ce chapitre où les décharges électriques améliorent certaines propriétés clés des huiles végétales, en particulier l'indice d'acidité. Ils semblent encourageants pour l'utilisation de ces huiles comme liquide isolant dans les transformateurs. Cependant, l'addition d'antioxydants appropriés et un séchage pour diminuer ses teneurs en eau restent nécessaires pour améliorer les propriétés critiques des huiles végétales.

Dans le but d'une étude approfondie des trois huiles utilisées dans ce travail, une caractérisation diélectrique de ces huiles sera présentée au chapitre suivant.

Chapitre III

Caractérisation diélectrique des huiles étudiées après vieillissements

III.1. Introduction :

Les isolants liquides sont des diélectriques dont les charges ne peuvent pas se déplacer au niveau macroscopique lors de l'application d'un champ électrique faible, c'est-à-dire que pour un diélectrique parfait, il n'y a pas de phénomène de conduction de courant. Cependant, au niveau microscopique, il se produit un phénomène de polarisation des charges qui consiste au déplacement ou à l'orientation des dipôles. Ce phénomène de polarisation est évalué par les mesures diélectriques dans le domaine temporel et fréquentiel par les techniques suivantes: la mesure de tension de retour RVM, courant de polarisation et de dépolarisation PDC et spectroscopie dans le domaine de fréquence FDS. Cette dernière technique, repose sur la spectroscopie d'impédance qui mesure l'impédance complexe du matériau en faisant varier la fréquence de quelques Hz à quelques MHz. Cette technique conduit aussi à déterminer les propriétés diélectriques du matériau.

Dans ce chapitre, nous allons revoir brièvement les notions fondamentales de la polarisation et nous décrivons ses différents types. Puis, nous présenterons la technique de spectroscopie d'impédance utilisée pour mesurer les propriétés diélectrique qui sont: la permittivité complexe ε^* , le facteur de perte $\tan \delta$ et la conductivité. Enfin, comme complément à la caractérisation physico-chimique des huiles étudiées au chapitre précédent, nous présenterons les résultats obtenus de ces propriétés diélectriques en fonction du vieillissement thermique et électrique. Ces propriétés seront utilisées comme marqueur du vieillissement de ces huiles.

III.2. Phénomène de polarisation des isolants liquides:

III.2.1. Représentation de la polarisation :

Les isolants liquides, comme la plupart des matériaux diélectriques : les molécules ou les atomes, qui les constituent, renferment en quantités égales, des charges positives et négatives, retenues par des forces de rappel élastiques, chacune constitue une entité neutre. En l'absence d'un champ électrique, le moment électrique est nul car la somme algébrique des charges dans toutes les molécules dans un volume donné est nulle, du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident.

En présence d'un champ électrique E , les charges positives et négatives se déplacent légèrement les unes par rapport aux autres, provoquant l'apparition de dipôles électriques. C'est à dire, il se produit un phénomène de polarisation qui correspond à des modifications dans l'organisation des charges électriques notamment par le déplacement des charges et la réorientation des dipôles électriques. En effet, le champ électrique pénètre au cœur du diélectrique et induit une séparation des barycentres de charges positives et négatives. Si le champ électrique varie, les dipôles changeront leur alignement afin de suivre les variations du champ.

III.2.2. Différents types de polarisation :

On peut distinguer les différents types de polarisation pouvant prendre place dans un diélectrique : polarisation électronique P_e , polarisation ionique P_i , polarisation d'orientation P_o (ou de Debye) , et polarisation interfaciale P_{in} (ou du type Maxwell - Wagner) [Red-09]. La polarisation totale P d'un diélectrique résulte de la contribution de ces différents mécanismes :

$$P = P_e + P_i + P_d + P_{in} \dots \dots \dots (III.1)$$

Plus précisément, la polarisation totale est exprimée par [Ori-03] :

$$P_k = \sum_k N_k \alpha_k (E_{loc})_k \dots \dots \dots (III.2)$$

α_k est la polarisabilité ou le facteur de polarisation, N_k le nombre de dipôles k par unité de volume et E_{loc} le champ local agissant sur un dipôle. Il peut être considéré comme la somme de deux composantes :

- ❖ Le champ électrique appliqué aux électrodes ;
- ❖ La contribution au champ des dipôles entourant le point considéré du diélectrique.

III.2.3.1. Polarisation électronique :

Elle caractérise tous les diélectriques sans exception et résulte de deux déplacements, le premier est le déplacement relatif du noyau de l'atome par rapport à l'ensemble des électrons qui l'entourent (Fig.III.1.a) [Bel-12], le deuxième est le déplacement des orbitales électroniques externes par rapport au noyau de l'atome (Fig.III.1.b) [Ori-03]. Le premier déplacement peut être décrit par le modèle classique suivant. L'atome est considéré comme formé d'un noyau ponctuel, portant une charge Z_e . Ce noyau est entouré d'un nuage

électronique sphérique de centre O et de rayon R , dont la charge $-Z_e$ est uniformément répartie. En l'absence de champ, le noyau se trouve au centre O de la sphère. Un champ local E_{loc} crée des forces F_r tendant à extraire le noyau de la sphère chargée. Mais un déplacement δ du noyau par rapport au centre de la sphère, crée à son tour des forces d'attraction coulombienne F_a tendant à ramener le noyau au centre de cette sphère. Le déplacement du noyau est donc déterminé par la condition d'équilibre $F_a = F_r$.

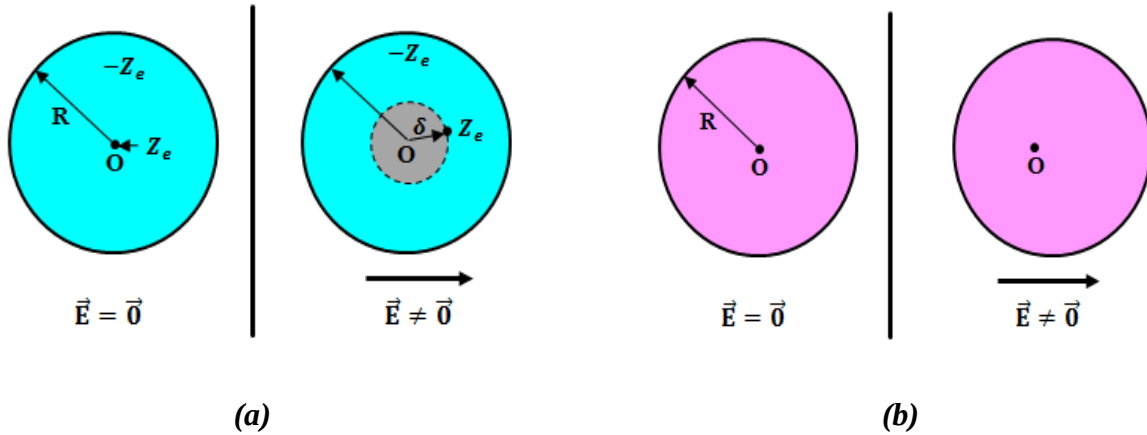


Fig (III.1) : Polarisation électronique : (a) déplacement du noyau, (b) déplacement d'électron

Savoir que le noyau, au moins 1800 fois plus lourd que les électrons, peut être considéré comme immobile. Alors, nous pourrions ici négliger le déplacement de noyau. Il nous reste le déplacement des électrons que nous pouvons expliquer par le modèle de physicien Lorentz (1853 – 1928). Ce modèle est la théorie microscopique élémentaire de la permittivité diélectrique qui traite l'électron comme un oscillateur harmonique amorti par frottement fluide (Fig.III.2) [Eve-11]. Ces frottements peuvent être simplement dus au fait que l'électron perd de l'énergie par rayonnement ou à cause de l'agitation thermique dans le fluide.

Dans ce modèle, l'électron (de masse m_e et de charge $-Z_e$) est lié élastiquement au noyau de l'atome par une force de rappel élastique de la forme $-k \vec{r}$ dont l'objectif est de le ramener dans la position qu'il occuperait à l'équilibre. Ici, $\vec{r}$ est le vecteur de déplacement de l'électron par rapport à cette position d'équilibre. Nous admettrons que l'on peut rendre compte globalement les effets de frottements par $\gamma(\omega)$. Le coefficient de couplage k et la masse m_e de l'électron déterminent la fréquence propre des oscillations libres de l'électron via la relation :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_e}} \dots \dots \dots (III.3)$$

La description du mouvement d'oscillation de l'électron sous le champ électrique

$E_{loc}(t) = E_0 \exp(j\omega t)$ est donnée par l'équation différentielle [Eve-11]:

$$\ddot{r}(t) + \tau(\omega) \cdot \dot{r}(t) + \omega_0^2 r(t) = \frac{-Z_e}{m_e} E_{loc}(t) \dots \dots \dots (III.4)$$

La solution de cette équation en fréquence est la suivante :

$$r(\omega) = \frac{-Z_e/m_e}{(\omega_0^2 - \omega^2) - j \cdot \gamma(\omega) \cdot \omega} E_{loc}(\omega) \dots \dots \dots (III.5)$$

Nous en déduisons le facteur de polarisation électronique (ou la polarisabilité) de l'atome :

$$\alpha_e(\omega) = \frac{-Z_e \cdot r(\omega)}{E_{loc}(\omega)} = \frac{Z_e^2}{m_e} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) - j \cdot \omega \cdot \gamma(\omega)} \dots \dots \dots (III.6)$$



Fig. (III.2) : Modèle de Lorentz

En notant $\alpha_e^*(\omega) = \alpha_e'(\omega) + j\alpha_e''(\omega)$, où $\alpha_e'(\omega)$ et $\alpha_e''(\omega)$ sont respectivement les parties réelle et imaginaire de la polarisabilité électronique complexe. On se place au voisinage de la résonance, et l'on a : $(\omega_0^2 - \omega^2) = 2\omega(\omega_0 - \omega)$, l'équation (III.6) devient :

$$Re[\alpha_e^*(\omega)] = \alpha_e'(\omega) = \frac{Z_e^2}{2m_e\omega} \frac{(\omega_0 - \omega)}{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma(\omega)^2/4} \dots \dots \dots (III.7)$$

$$Im[\alpha_e^*(\omega)] = \alpha_e''(\omega) = \frac{Z_e^2}{2m_e\omega} \frac{\tau(\omega)/2}{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma(\omega)^2/4} \dots \dots \dots (III.8)$$

La courbe (III.3) tracée si dessous indique les variations des parties réelle et imaginaire de la polarisabilité électronique en fonction de la pulsation.

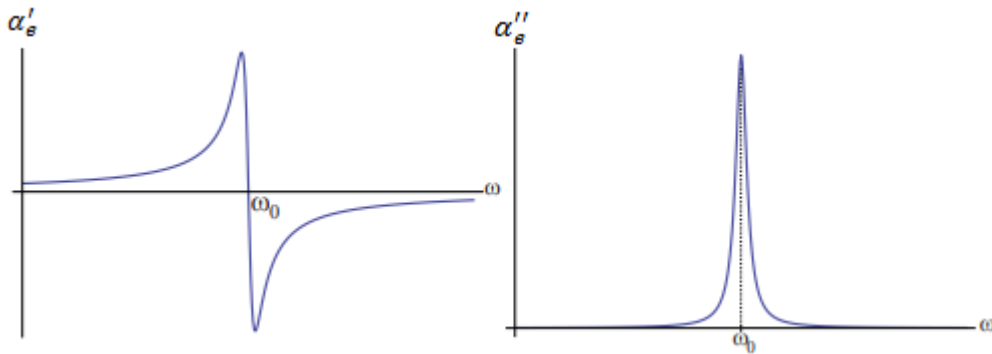


Fig (III.3) : Allure de la polarisabilité électronique de l'atome [Eve-11]

III.2.3.2. Polarisation ionique :

Ce processus de polarisation est lié au déplacement relatif des ions par rapport à leurs positions d'équilibre au sein de la molécule. Sous l'effet d'un champ électrique, le diélectrique ionique est soumis à des forces coulombiennes qui s'exercent sur les ions de signes opposés, de sorte que les ions tendent à s'écarter les uns des autres. Ainsi, la distance inter-ionique change et un dipôle induit apparaît (Fig.III.4). Cette polarisation intervient pour des fréquences inférieures au Téra Hertz ($f < 10^{12} \text{ Hz}$) [Man-08]. La polarisation ionique, de même que la polarisation électronique, créent des dipôles induits ; elle ne provoque pas de pertes d'énergie et disparaît avec la suppression du champ appliqué. La polarisabilité ionique est définie par :

$$\alpha_i = \frac{N^2 Z_e^2}{k} \dots \dots \dots (III.9)$$

Où N est le nombre de charges, Z_e la charge électronique et k est le force de rappel de la liaison. Ce mécanisme se généralise à toute liaison ionique créée entre deux atomes d'électronégativités différentes. Il entraîne une légère déformation des molécules. Ce mécanisme est également appelé polarisation vibrationnelle.

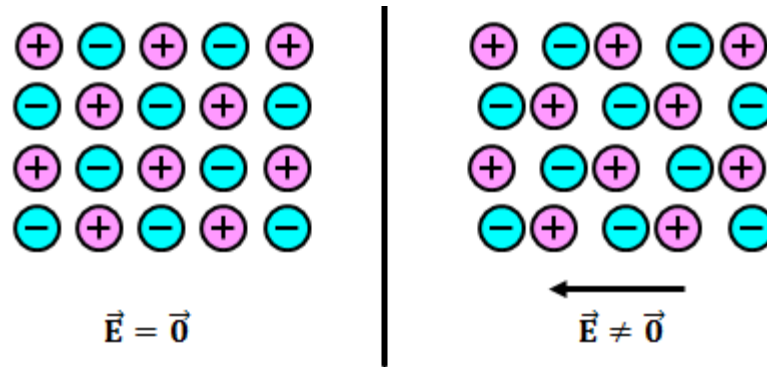


Fig (III.4) : Polarisation ionique

III.2.3.3. Polarisation d'orientation :

La polarisation d'orientation (ou dipolaire ou de Debye) est spécifique aux diélectriques polaires, les dipôles s'orientent suivant la direction du champ électrique appliqué (Fig.III.5). En l'absence de champ, les dipôles sont orientés de façon désordonnée, de telle façon que la polarisation globale est pratiquement nulle. Sous l'action du champ électrique, les molécules polaires possèdent un moment dipolaire. La polarisation d'orientation est influencée et liée avec l'agitation thermique des molécules, la température exerce un effet appréciable sur ce type de polarisation. En plus de ce phénomène d'orientation, le champ peut faire varier le moment de la molécule, par déformation de cette dernière et de ses orbitales. On peut utiliser l'intuition pour observer qu'aux basses fréquences les molécules ont le temps de répondre au champ électrique appliqué et la polarisation peut donc être grande. D'autre part, si nous appliquons un champ électrique haute fréquence, les molécules n'auront peut-être pas le temps de répondre en raison de leur inertie, de leurs collisions avec d'autres molécules, etc.

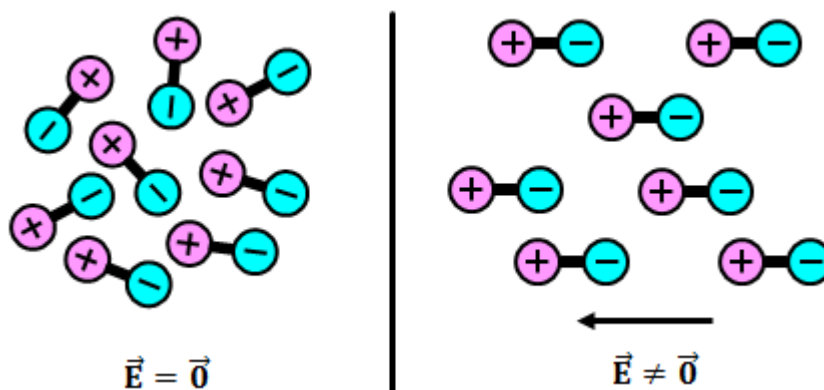


Fig (III.5) : Polarisation d'orientation

La polarisabilité par orientation complexe α_o^* d'un dipôle de moment dipolaire p dépend de la température T à la différence des polarisations électronique et ionique [Ver-11] :

$$\alpha_o^* = \frac{p^2}{3k_B T} \frac{1}{1 + j\omega\tau} = \alpha_o' + j\alpha_o'' \dots \dots \dots (III.10)$$

Où k étant la constante de Boltzmann ($k = 1.380658 * 10^{23} J/K$), τ est le temps de retard (relaxation) par rapport aux changements du champ électrique externe. En séparant les parties réelle et imaginaire de l'équation (III.10) :

$$\alpha_o' = \frac{p^2}{3k_B T} \frac{1}{1 + \omega^2\tau^2} \dots \dots \dots (III.11)$$

$$\alpha_o'' = \frac{p^2}{3k_B T} \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \dots \dots \dots (III.12)$$

La courbe (III.6) tracée si dessous indique les variations des parties réelle et imaginaire de la polarisabilité par orientation en fonction de la pulsation.

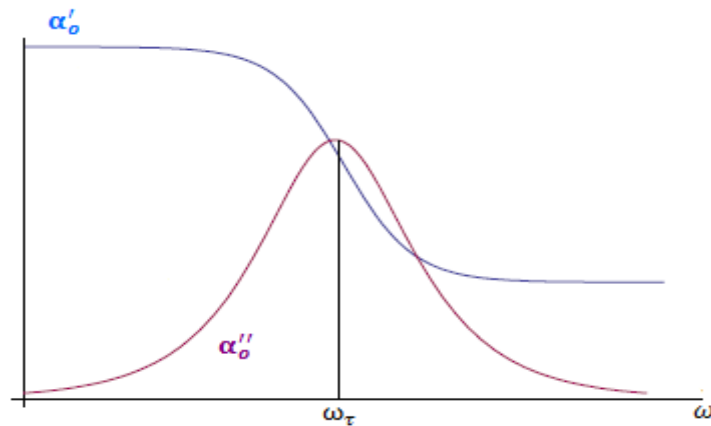


Fig (III.6) : Allure de la polarisabilité électronique par orientation

III.2.3.4. Polarisation interfaciale :

La polarisation interfaciale (ou de type de *Maxwell-Wagner*) s'observe dans les diélectriques qui présentent de nombreux porteurs de charges libres intrinsèques, que ce soient des ions ou des électrons. Elle intervient surtout lorsqu'il existe association de deux diélectriques 1 et 2 non homogènes dont les permittivités (ϵ_1' et ϵ_2') et les conductivités (σ_1 et σ_2). En absence du champ électrique, les charges libres sont dispersées

uniformément dans chaque région. Lorsqu'on applique un champ électrique, une accumulation de charges dues à l'ensemble des phénomènes de migration à la frontière des deux milieux. En effet, les porteurs de charges, jamais totalement absents dans un diélectrique, migrent sous l'effet du champ et tendent à se concentrer autour de défauts tels que les impuretés et les joints de grains (Fig. III.7). Cette polarisation est caractérisée par le temps d'établissement le plus long de tous, qui peut atteindre plusieurs minutes et même davantage.

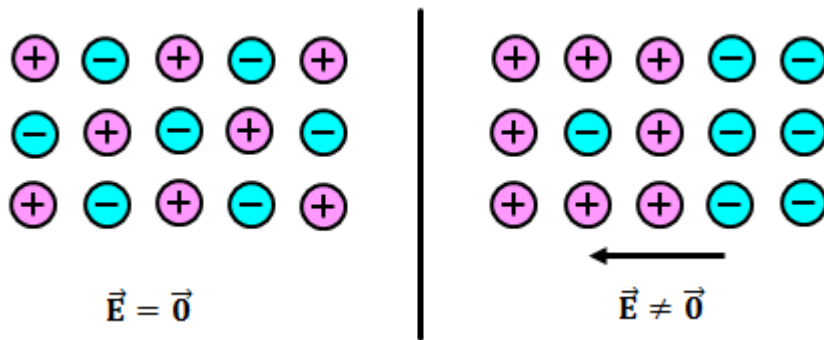


Fig (III.7) : Polarisation interfaciale

III.2.2.5. Polarisation de résonance et de relaxation :

Les phénomènes de relaxations et de résonance caractérisent un diélectrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique et sont générés par divers mécanismes de polarisation (polarisation électronique, polarisation dipolaire, polarisation ionique, polarisation interfaciale) [Ker-00]. Tous ces types de polarisation (décrits précédemment) peuvent être classés en deux groupes selon leurs caractères: la polarisation de résonance (ou élastique) et la polarisation de relaxation [Orl-03].

La polarisation de relaxation concerne la polarisation d'orientation P_o et la polarisation interfaciale P_{in} . Elle englobe tous les mécanismes dans lesquels, sous l'action du champ électrique, s'effectue un déplacement de charges liées, conduisant à une désorganisation de la structure du milieu. Dans le phénomène de relaxation, le changement d'orientation ne s'effectue pas immédiatement mais avec un certain retard (relaxation) par rapport aux changements du champ électrique externe; le temps nécessaire pour atteindre un équilibre est appelé temps de relaxation τ .

Une relaxation diélectrique de type Debye est caractérisée par une valeur constante de ϵ'_r suivie d'une chute brutale, alors que ϵ''_r présente un pic large qui passe par un

maximum à la fréquence de relaxation f_r . Le diagramme de ε_r'' en fonction de ε_r' est un demi-cercle centré sur l'axe des abscisses (Fig.III.8) [Ker-00]. Dans la plupart des diélectriques, un écart à la loi de Debye est observé. Plusieurs corrections empiriques ont été donc proposées afin d'obtenir des formulations conformes aux résultats expérimentaux (loi de Cole – Cole, loi de Cole – Davidson). Ce phénomène de relaxation diélectrique, appelé aussi dispersion normale.

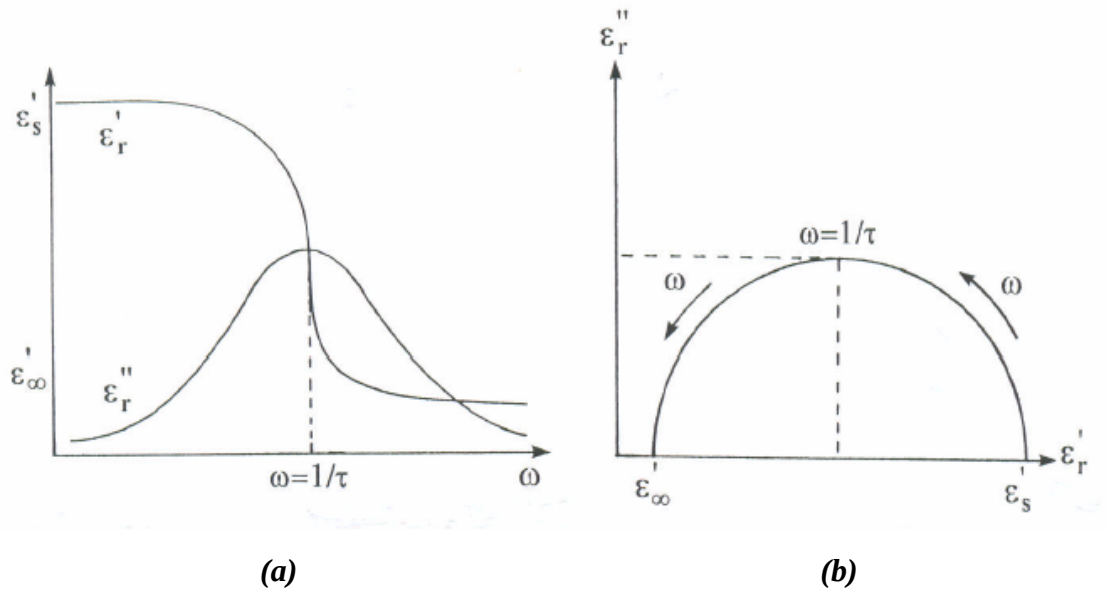


Fig (III.8) : Polarisation de relaxation de type Debye : (a) ε_r' et ε_r'' en fonction de fréquence (b) ε_r'' en fonction de ε_r' [Ker-00]

La polarisation de résonance englobe la polarisation électronique P_e et la polarisation ionique P_i . Dans ce cas, les électrons, les atomes ou les ions dans le diélectrique soumis à des forces de rappel proportionnelles à leurs déplacements, sont considérées comme des oscillateurs harmoniques [Ayd-05, Ker-00]. Un tel phénomène est appelé aussi dispersion anormale de la constante diélectrique. Une courbe de résonance est caractérisée par un pic étroit de ε_r'' dont le maximum correspond à la fréquence de résonance. Quant à la variation de ε_r' avec la fréquence, la courbe augmente hyperboliquement en passant par un maximum, puis chute brutalement, atteint un minimum avec une valeur négative puis croît de nouveau de manière asymptotique (Fig. III.9) [Ker-00].

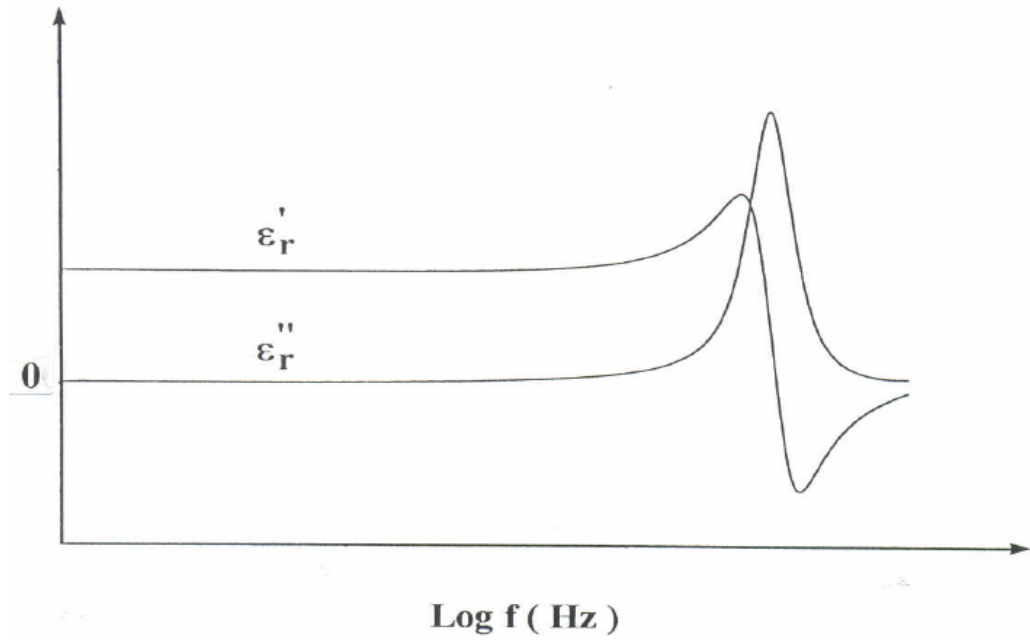


Fig (III.9) : Variation de ϵ'_r et ϵ''_r en fonction de la fréquence dans le cas d'une résonance [Ker-00]

III.2.3. Polarisation macroscopique :

La relation linéaire entre l'amplitude complexe de la polarisation $\vec{P}$ et celle du champ électrique macroscopiquement $\vec{E}$, à une pulsation ω , permet de définir une susceptibilité électrique complexe χ du milieu diélectrique donnée par:

$$P(\omega) = \chi^*(\omega) \epsilon_0 E(\omega) \dots \dots \dots (III.13)$$

D'où ϵ_0 est la permittivité du vide ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), et $\chi^*(\omega)$ la susceptibilité complexe qui permet d'obtenir l'amplitude et l'argument de la polarisation. La susceptibilité est exprimée par :

$$\chi^*(\omega) = \frac{NZ_e^2}{m_e \epsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega \gamma(\omega)} \dots \dots \dots (III.14)$$

Où N est le nombre d'atomes par unité de volume, En posant $\Omega^2 = \frac{NZ_e^2}{m_e \epsilon_0}$, il vient :

$$\chi^*(\omega) = \frac{\Omega^2}{m_e \epsilon_0 (\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega \gamma(\omega)} \dots \dots \dots (III.15)$$

La susceptibilité complexe $\chi^*(\omega)$ exprime le déphasage de la réponse (la polarisation $\vec{P}$) par rapport à l'excitation (le champ électrique $\vec{E}$) (Fig. III.10). Pour les basses

fréquences ($\omega \ll \omega_0$) on a $\vec{P}$ est en phase avec $\vec{E}$; on retrouve le cas des régimes stationnaires où la susceptibilité est une constante réelle positive. A haute fréquence ($\omega \gg \omega_0$); on remarque que $\vec{P}$ et $\vec{E}$ sont en opposition de phase et pour ($\omega \approx \omega_0$); la polarisation et le champ sont en quadrature.

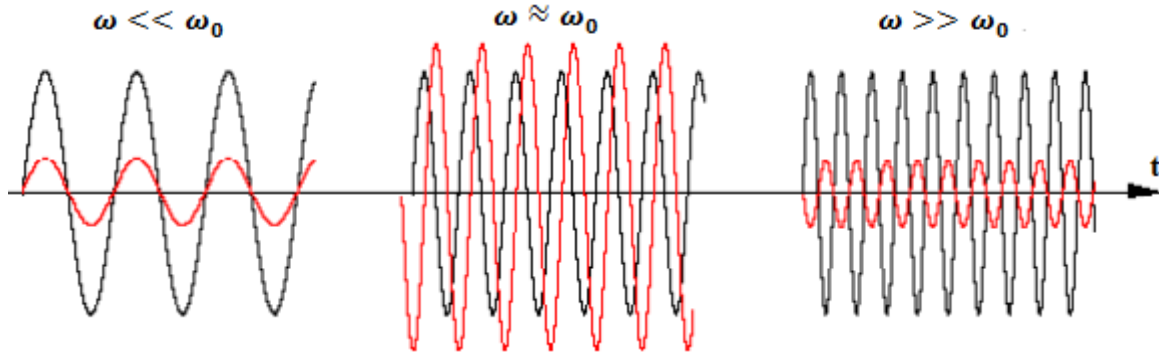


Fig (III.10) : Réponse du diélectrique à un champ oscillant.

III.2.4. Différence entre la polarisation et la conduction :

- ❖ Durant la polarisation, les charges sont mises en mouvement mais ne peuvent jamais quitter la molécule. Par contre, la conduction est le déplacement des charges sur de grandes distances, qui se libèrent et quittent les particules ;
- ❖ La conduction dans les diélectriques est pratiquement assurée par les impuretés se trouvant dans l'isolant et non pas due à sa structure de base. La polarisation peut donc être représentée comme un grand nombre de charges se déplaçant sur de très petites distances, sans jamais quitter les molécules. Tandis que la conduction dans les diélectriques comme le déplacement d'une petite quantité de charges mais sur de larges distances ;
- ❖ La polarisation peut être considérée comme un mouvement élastique. Quand l'effet du champ électrique externe disparaît, les charges reviennent à leur position initiale, ce qui ne se passe jamais pour la conduction ;
- ❖ Tandis que la conduction se produit tant que la tension continue est appliquée, la polarisation ne se produit que lors de l'application ou de la suppression de la tension. La polarisation, et donc le courant capacitif, ne subsistent que lorsqu'il s'agit d'une tension alternative.

III.2.5. Isolants liquides polaires et non polaires :

Les isolants liquides sont regroupés en deux catégories selon la structure des charges dans la molécule et leur comportement dépend fortement des moments dipolaires de la molécule, on peut distinguer deux cas [Lai-12]:

- ❖ **Les isolants liquides apolaires (non polaires)** sont caractérisés par un arrangement moléculaire symétrique du fait que les centres de gravité des charges positives et négatives coïncident avec le centre de symétrie. De ce fait, ils ne possèdent pas des moments dipolaires permanents ($\vec{P} = \vec{0}$), et dont la permittivité relative est $\varepsilon_r \leq 2,5$ comme : hexane, benzène, huiles minérales et silicones des transformateurs. Ils possèdent une haute résistivité et dits inertes, c'est-à-dire qu'ils sont à la fois non ionisés et non ionisants.
- ❖ **Les isolants liquides polaires** constitués de molécules qui possèdent une distribution asymétrique. Dans ce cas, même en absence de champ électrique externe, la molécule possède un moment dipolaire permanent. Leur permittivité relative est comprise entre $10 \leq \varepsilon_r \leq 100$, il est habituel de les repartir en deux classes selon qu'ils sont ou non autoionisés spontanément.

Les liquides isolants employés dans la pratique industrielle sont les liquides apolaires ou faiblement polaires, dont leurs caractéristiques sont : bon comportement au feu, bonnes qualités thermiques, bonne tenue aux surtensions, stabilité dans le temps Les liquides utilisés sont d'origine naturelle (huiles minérales ou végétales) ou synthétiques. En général, les matériaux qui présentent une forte polarisation d'orientation sont dits matériaux polaires. Tandis que les matériaux non-polaires possèdent seulement une polarisation électronique [Pro-08].

III.3. Spectroscopie d'impédance:

III.3.1. Préambule

La plupart des propriétés macroscopiques d'un système se déterminent à partir de sa réponse à une excitation extérieure, variable dans l'espace et dans le temps. Dans le cas où cette excitation est faible, la réponse est généralement linéaire donc lui est proportionnelle. C'est ce coefficient de proportionnalité qui définit et caractérise le système :

- ❖ Admittance : excitation / réponse

❖ Impédance : excitation / réponse

La spectroscopie d'impédance est basée sur la mesure de l'impédance complexe des matériaux en faisant varier la fréquence de quelques Hz à quelques MHz. Plus précisément, la spectroscopie d'impédance est une méthode alternative pour étudier les phénomènes de polarisation qui se produisent dans un diélectrique donné lorsque ce dernier est soumis à un champ électrique [Idi-17, Abh-12]. Cette technique permettant aussi de déterminer les propriétés diélectriques (la permittivité, le facteur de dissipation et la conductivité) du matériau en fonction de la fréquence, et également, dans certains cas, en fonction de la tension appliquée [Pha-05]. Le phénomène de polarisation que nous avons décrit précédemment sera observé clairement dans la spectroscopie de l'impédance.

III.3.2. Principe de la spectroscopie d'impédance:

Le principe de la spectroscopie d'impédance est basé sur la mesure de l'impédance complexe de l'échantillon par l'application d'une tension alternative sinusoïdale [$U(t) = U_0 \exp(j\omega t)$] avec une fréquence angulaire de $2\pi f$ sur un condensateur à plaques parallèles incorporant un matériau diélectrique, qui se polarise à différentes fréquences (Fig.III.11). La réponse à cette excitation est un courant électrique $I(t)$ qui circule dans l'échantillon avec un certain retard de phase φ par rapport à $U(t)$. Ce courant peut être exprimé par [Guo-17]:

$$I(t) = I(\omega) = I_0 \exp(j\omega t + \varphi) \dots \dots \dots (III.16)$$

Le rapport entre $U(t)$ et $I(t)$ définit l'impédance complexe Z^* :

$$Z^*(\omega) = \frac{U}{I} = \frac{U_0 \exp(j\omega t)}{I_0 \exp(j\omega t + \varphi)} = Z'(\omega) - jZ''(\omega) \dots \dots \dots (III.17)$$

Où $Z'(\omega)$ et $Z''(\omega)$ sont respectivement la partie réelle et imaginaire de l'impédance complexe $Z^*(\omega)$. Le courant traversant le diélectrique est donné aussi par l'équation suivante [Guo-17]:

$$I(\omega) = j\omega [C'(\omega) - jC''(\omega)] U(\omega) \dots \dots \dots (III.18)$$

Où $C'(\omega)$ et $C''(\omega)$ sont respectivement la partie réelle et imaginaire de la capacité complexe $C^*(\omega)$. En effectuant la transformation de Fourier sur l'équation (III.18), on obtient:

$$I(\omega) = j\omega C_0 \left[\varepsilon_\infty + \chi'(\omega) - j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right) \right] U(\omega) = j\omega C_0 (\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)) \dots (III.19)$$

Dans l'équation (III.19), C_0 est la capacité géométrique, $\chi'(\omega)$ et $\chi''(\omega)$ sont respectivement les parties réelle et imaginaire de la susceptibilité complexe, ε_0 est la constante diélectrique du vide ($\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), ε_∞ est la constante diélectrique à une fréquence élevée, σ_0 est la conductivité du matériau, $\varepsilon_r'(\omega)$ et $\varepsilon_r''(\omega)$ sont les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative complexe $\varepsilon_r^*(\omega)$.

Le terme $\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega}$ représente les pertes produites par les charges libres, soit les pertes par conduction, et le terme $\chi''(\omega)$ représente les pertes dues à l'inertie des charges, soit les pertes diélectriques.

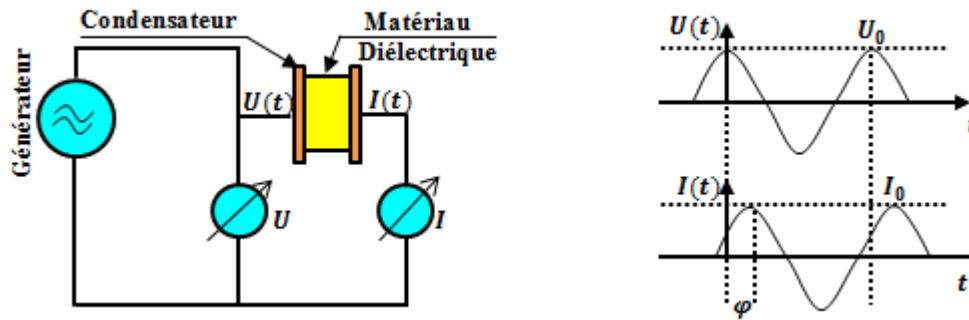


Fig (III.11) : Principe de la spectroscopie diélectrique

A partir de la détermination de l'impédance complexe Z^* (ou l'admittance complexe Y^*), caractéristique de l'échantillon, il est possible de déduire les propriétés diélectriques : la permittivité relative, le facteur de dissipation et la conductivité. Ces trois grandeurs au moyen desquelles l'ingénieur électricien caractérise le plus souvent un diélectrique.

III.3.2.1. Permittivité diélectrique :

La permittivité relative ε_r , aussi appelée constante diélectrique relative, est une grandeur sans dimension qui caractérise la décroissance de l'intensité du champ électrique après l'introduction d'un diélectrique dans ce champ. Elle peut traduire « l'aptitude » d'un matériau à stocker de l'énergie électrique [Rek-09]. Dans le cas d'un diélectrique parfait, ε_r est le quotient de la capacité C_x entre deux électrodes, supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité C_v de la même configuration d'électrodes dans le vide :

$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_v} \dots \dots \dots (III. 20)$$

La permittivité absolue ε est le produit de la permittivité relative ε_r par la permittivité du vide ε_0 ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m) : $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$. La permittivité absolue définit la possibilité d'être traversé par un courant électrique sous l'action du champ électrique. Ceci résulte de diverses contributions de déplacements des charges : déplacement des électrons, déplacements des atomes et des ions, orientation des dipôles électriques et déplacement des charges d'espace. Ainsi, on définit également la permittivité complexe relative :

$$\varepsilon_r^*(\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega) \dots \dots \dots (III. 21)$$

Où ε_r^* joue le rôle qu'avait ε_r dans le cas des isolants parfaits. La permittivité complexe absolue est de la même manière, égale au produit de la permittivité complexe par ε_0 . On peut relier la permittivité relative complexe du diélectrique réel en considérant l'admittance complexe comme suit [Tat-13]:

$$Y^*(\omega) = Y_{réelle} + j Y_{imaginaire} = j \left(\frac{S}{d} \right) * \omega * \varepsilon_0 * [\varepsilon_r'(\omega) - j\varepsilon_r''(\omega)] \dots \dots \dots (III. 22)$$

Où S est la surface de la capacité de la plaque et d est la distance entre les deux plaques. En utilisant l'équation (III.21), les parties réelle et imaginaire de la permittivité complexe peuvent être calculées par l'admittance exprimée par les équations suivantes:

$$\varepsilon_r'(\omega) = \frac{d}{S * \omega * \varepsilon_0} Y_{imaginaire} \dots \dots \dots (III. 23)$$

$$\varepsilon_r''(\omega) = \frac{d}{S * \omega * \varepsilon_0} Y_{réelle} \dots \dots \dots (III. 24)$$

III.3.2.2. Facteur de dissipation :

Dans un champ électrique alternatif, la répartition des charges ne pourra pas suivre le champ de manière instantanée. Il s'en suit une relaxation diélectrique qui induit une perte d'énergie. Ces pertes sont dues au travail nécessaire à l'établissement de la polarisation et la conduction ohmique du diélectrique [Ori-03]. Nous pouvons introduire l'angle de perte δ qui est couramment utilisé (Fig.III.12).

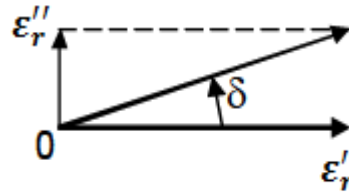


Fig (III.12) : Visualisation de l'angle de perte δ en fonction de ε'_r et ε''_r

Le facteur de dissipation dans le domaine fréquentiel (ou tangente de la perte ou l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte) est défini comme suit [Yan-17]:

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''_r(\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{Y'(\omega)}{Y''(\omega)} \dots \dots \dots (III.25)$$

Ce terme représente le ratio de l'énergie dissipée par radian dans le diélectrique sur l'énergie accumulée. Le facteur de dissipation diélectrique des huiles isolantes constitue un moyen de détermination de la concentration des porteurs de charges qui détériorent la principale fonction diélectrique du liquide. Si la concentration des porteurs de charges excède une certaine limite (valeur critique) sous contrainte électrique, une panne peut survenir dans le transformateur. Une faible valeur du facteur de dissipation indique de faibles pertes diélectriques et un faible niveau de contaminants ioniques polaires solubles ou colloïdaux. Ces caractéristiques constituent un moyen de contrôle de qualité et un indicateur des modifications de l'huile en service résultant d'une contamination ou de la détérioration de l'huile [Loi-13].

III.3.2.3. Conductivité :

La conductivité électrique σ est un paramètre important pour toutes les applications électriques, surtout sous tension continue. La conductivité d'un liquide est due à la présence de charges libres positives et négatives (en général des ions) en quantités égales [Tra-09]. Sous l'effet d'un champ électrique E , ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction ($J = \sigma E$, J est la densité de courant). La conductivité n'est pas une propriété intrinsèque d'un liquide isolant. Elle est liée à la présence d'infimes quantités (de l'ordre des ppm) d'impuretés inusables. La conductivité complexe est obtenue à partir des pertes diélectriques, et exprimée par la relation suivante [Tat-13]:

$$\sigma^*(\omega) = j\varepsilon_0\varepsilon_r^*(\omega) = j\varepsilon_0[\varepsilon'_r(\omega) - j\varepsilon''_r(\omega)] = \varepsilon_0 \dots \dots \dots (III.26)$$

La partie réelle de la conductivité complexe calculée en utilisant les relations (III.24 et III.26):

$$\sigma'(\omega) = \varepsilon_0 \omega \varepsilon_r''(\omega) = \frac{d}{S} * Y_{réelle} \dots \dots \dots (III.27)$$

III.3.3. Dispositifs de mesure :

Pour mesurer les propriétés diélectriques des trois huiles étudiées, nous avons utilisé les dispositifs dont la photographie est présentée à la Fig (III.13). Ces dispositifs sont :

- ❖ Une cellule de mesure qui est déjà décrite au chapitre II (Paragraphe II.3.2.3). Cette cellule contient l'une des huiles étudiées ;
- ❖ Un LCR-Mètre nommé INSTEK LRC- 8110G lié aux électrodes de la cellule de mesure dont les principales performances sont résumées dans le Tableau (III.1);
- ❖ Un ordinateur lié au LCR-Meter via le connecteur RS232. Ce PC contient un logiciel adapté qui nous permet d'introduire les paramètres de la tension appliquée, de choisir le circuit RC en série ou en parallèle, de sélectionner la mesure (impédance, admittance,.....ect), et d'enregistrer les résultats de mesure.



Fig (III.13) : Matériels de mesure des propriétés diélectriques

Notons que dans toutes les mesures réalisées, nous avons appliqué une tension purement sinusoïdale qui a une valeur efficace $V_{rms} = 1V$, et de fréquence ajustable (de 20Hz à 10MH) sur les électrodes de la cellule de mesure. Ensuite, après chaque série de vieillissement thermique et électrique, nous avons mesuré le module et la phase de

l'impédance (ou l'admittance) du liquide à tester. Sans oublier que nous avons choisi le schéma ($R_p // C_p$) parallèle avec R_p et C_p sont la résistance et la capacité du circuit parallèle équivalent au comportement diélectrique des huiles isolantes utilisées selon le modèle de Debye. Les tests ont été réalisés dans les conditions atmosphériques suivantes:

- ❖ Une température ambiante moyenne $(18 \pm 1) ^\circ \text{C}$;
- ❖ Une humidité moyenne en laboratoire 60, 75% ;
- ❖ Une pression atmosphérique de 1 bar.

Tableau (III.1) : Description des performances du LRC-Meter utilisé

Gamme de fréquence	20Hz ~ 10 MHz
Tension alternative	0.01V ~ 2V _{rms}
Tension Continue	0.01V ~ 2V
Mesure disponible	Impédance, Admittance, Inductance, Capacité, Réactance, Susceptance, Facteur de qualité, Facteur de dissipation, Angle

III.4. Propriétés diélectriques des huiles utilisées :

Pour les deux types de vieillissement thermique et électrique, nous étudions les propriétés diélectriques des trois huiles dans une gamme de fréquence de 10Hz à 20 MHz. Ces propriétés sont : la permittivité relative, le facteur de dissipation et la conductivité. A travers ces résultats, nous identifions quel type de polarisation décrit précédemment apparaît dans ces huiles.

III.4.1. Effet du vieillissement thermique :

III.4.1.1. Variation de la permittivité relative :

La partie réelle de la permittivité relative complexe $Re[\varepsilon_r^*(\omega)] = \varepsilon_r'(\omega)$ est une mesure de l'énergie stockée à partir du champ électrique appliqué dans le diélectrique et identifie la force d'alignement des dipôles dans le diélectrique. La partie imaginaire de la permittivité relative complexe $\varepsilon_r''(\omega)$, ou les pertes, est l'énergie dissipée dans le diélectrique associée à l'amortissement par frottement qui empêche les déplacements de la

charge liée avec les changements de champ (énergie nécessaire pour aligner les dipôles et de déplacer les ions) [Naw-15, Tat-13].

La Fig (III.14.) montre la dépendance de la partie réelle de la permittivité relative ϵ'_r en fonction de la fréquence pour les différentes durées de vieillissement des trois huiles étudiées. La comparaison des valeurs à 20 Hz de ϵ'_r de l'huile d'olive et de l'huile de soja avec celles de l'huile minérale montre que les valeurs de ϵ'_r de l'huile d'olive (entre 3.14 à 4.75) et de l'huile de soja (entre 1.51 à 4.22) sont supérieures à celles de l'huile minérale (entre 0.33 à 2.75). Les deux huiles végétales ont presque la même constante diélectrique, ce qui est relativement plus élevé que celui trouvé dans l'huile minérale. Ceci peut être attribué à la présence de triglycérides dans les huiles végétales qui ont un caractère polaire. D'autre part, l'huile minérale est principalement composée de pétrole raffiné contenant une molécule d'alcane non polaire et présente donc une constante diélectrique comparativement inférieure [Sha-11].

Pour les fréquences inférieures à 100 kHz, ϵ'_r des trois huiles étudiées présente des valeurs différentes et évoluent de différentes manières. Ce comportement reflète les changements survenus à l'échelle moléculaire dans les huiles à différents niveaux de dégradation [Jun-08]. Aux fréquences entre 100 kHz et 4 MHz, ϵ'_r augmente pour les trois huiles étudiées à différentes périodes de vieillissement. Cela tend également à corrélérer grossièrement avec l'augmentation de l'indice d'acidité avec le vieillissement.

Lorsque la fréquence est supérieure à 2 MHz, la constante diélectrique augmente également avec la montée en fréquence avec l'apparition de pics autour de 4.5 MHz pour toutes les huiles étudiées. L'augmentation de ϵ'_r peut-être due à l'augmentation de l'effet de polarisation, cependant l'apparition de pics à haute fréquence est appelée phénomène de "dispersion anormale" [Ruj-15]. Avant d'expliquer ce phénomène de résonance, nous devons d'abord développer une théorie microscopique de la polarisation et comprendre comment la polarisabilité des particules dans un certain champ effectif est liée à des paramètres mesurables tels que la permittivité relative complexe $\epsilon_r^*(\omega)$.

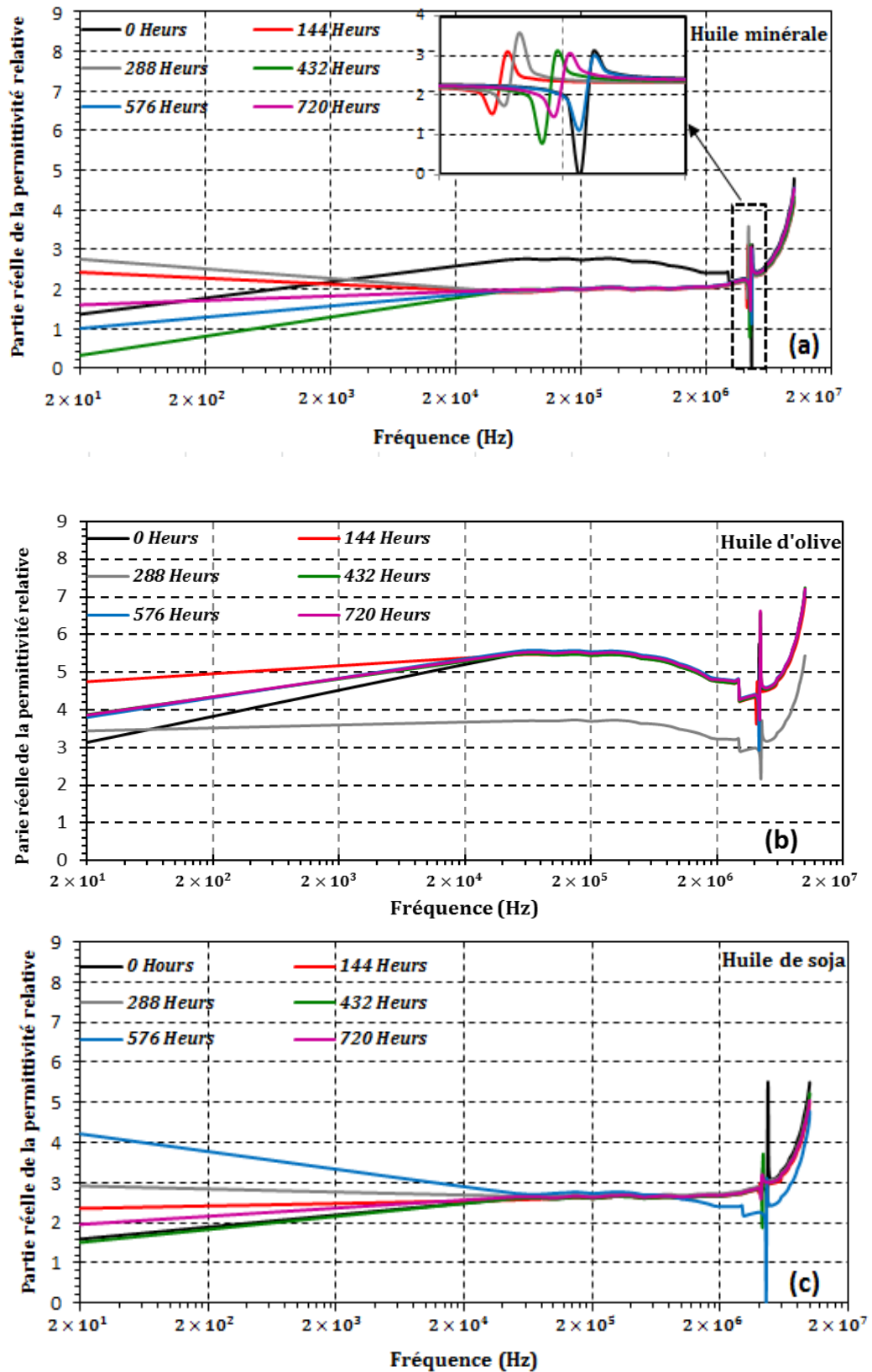


Fig (III.14) : Variations de la partie réelle des de la permittivité relative aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différentes durées de vieillissement thermique: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja

Les mécanismes de polarisation peuvent être supposés comme un déplacement de particules chargées à partir d'une position d'équilibre donnée. Nous pouvons modéliser ceci comme une particule de charge q , de masse m , maintenue en équilibre par une force linéaire en déplacement (c'est-à-dire un ressort) avec une constante de ressort $m\omega_0^2$. Le milieu dans lequel se trouve la particule fournit une constante de frottement $m\gamma$, et la particule est soumise à une force provenant d'un champ électrique oscillant $E_{loc} = E_0 \exp(j\omega t)$. L'équation de mouvement résultante est alors:

$$m \left(\frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x \right) = q E_0 \exp(j\omega t) \dots \dots \dots (III.28)$$

La solution à l'état d'équilibre sera de la forme: $x_0 \exp(j\omega t)$, et par substitution dans l'équation différentielle ci-dessus:

$$x = x_0 \exp(j\omega t) = \frac{q}{m (\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma} E_0 \exp(j\omega t) \dots \dots \dots (III.29)$$

Le moment dipolaire de particule est le produit de sa charge et de son déplacement : $q \cdot x$. La polarisation totale est donc:

$$P = nqx = \frac{nq^2}{m (\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma} E_0 \exp(j\omega t) \dots \dots \dots (III.30)$$

D'autre part, la polarisation induite en un point donné du diélectrique est proportionnelle au champ électrique local tel que:

$$P = n\alpha E_{loc} = n\alpha E_0 \exp(j\omega t) \dots \dots \dots (III.31)$$

Où n est la densité de particules de polarisabilité α . La relation de Clausius – Mossotti exprime la permittivité relative complexe d'un diélectrique qui équivaut à l'équation de Lorentz – Lorenz et qui peut être exprimée par [Atk-10]:

$$\frac{\varepsilon_r^*(\omega) - 1}{\varepsilon_r^*(\omega) + 2} = \frac{n\alpha}{3\varepsilon_0} \dots \dots \dots (III.32)$$

En utilisant les équations (III.30) et (III.31), on peut extraire la polarisabilité α puis utiliser la relation de Clausius-Mossotti (Eq. III.32) pour obtenir la permittivité relative:

$$\frac{\varepsilon_r^*(\omega) - 1}{\varepsilon_r^*(\omega) + 2} = \frac{nq^2}{3m\varepsilon_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma} \dots \dots \dots (III.33)$$

Dans la limite de la résonance ($\varepsilon_r^*(\omega)$ tend vers 1), la relation de Clausius-Mossotti se simplifie et l'équation (III.33) devient:

$$\frac{n\alpha}{3\varepsilon_0} \approx \frac{\varepsilon_r^*(\omega) - 1}{3} \rightarrow \varepsilon_r^*(\omega) = 1 + \frac{nq^2}{m\varepsilon_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j\omega\gamma} \dots \dots \dots (III.34)$$

Ces expressions peuvent être simplifiées dans le cas où ω est proche de la fréquence de résonance ω_0 avec la substitution: $(\omega_0^2 - \omega^2) = 2\omega(\omega_0 - \omega)$

$$Re[\varepsilon_r^*(\omega)] = \varepsilon_r'(\omega) = 1 + \frac{nq^2}{2m\omega\varepsilon_0} \frac{(\omega_0 - \omega)}{(\omega_0 - \omega)^2 + \gamma^2/4} \dots \dots \dots (III.35)$$

$$Im[\varepsilon_r^*(\omega)] = \varepsilon_r''(\omega) = -\frac{nq^2}{2m\varepsilon_0} \frac{\gamma/2}{(\omega_0 - \omega)^2 + \frac{\gamma^2}{4}} \dots \dots \dots (III.36)$$

Pour les limites où ω est petit ($\omega \rightarrow 0$) ou grand ($\omega \rightarrow \infty$), on peut revenir à l'équation (III.34):

$$\text{Si: } \omega \rightarrow 0, \text{ alors } \varepsilon_r^*(\omega) \rightarrow 1 + \frac{nq^2}{m\varepsilon_0\omega_0^2} \dots \dots \dots (III.37)$$

$$\text{Si: } \omega \rightarrow \infty, \text{ alors } \varepsilon_r^*(\omega) \rightarrow 1 \dots \dots \dots (III.38)$$

Si nous comparons l'équation (III.35) avec (III.7) et (III.36) avec (III.8), cela nous montre clairement que la polarisation qui s'est produite dans les pics décrits à la Fig (III.14) est une polarisation électronique et peut être ionique aussi. Ces polarisations sont dues aux oscillations harmoniques (résonance) des électrons et des ions dans l'huile. Pour illustrer plus ce phénomène de résonance, nous traçons les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative de l'huile minérale après une période de vieillissement de 720 heures Fig (III.15). La partie imaginaire $\varepsilon_r''(\omega)$ montre l'absorption maximale à la résonance à haute fréquence $f_0 = \omega_0/2\pi$. Cette courbe ressemble fortement à celle tracée sur la Fig(III.9). Alors, les pic que nous avons trouvés sont des pics de résonance et non de relaxation.

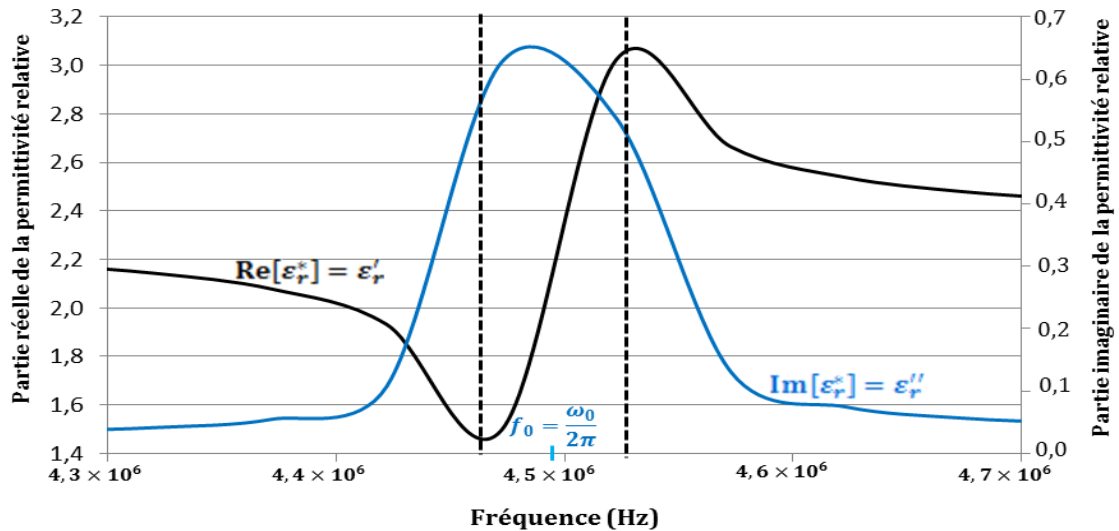


Fig (III.15) : Les parties réelle et imaginaire de la permittivité relative proche de la résonance pour l'huile minérale après 720 heures de vieillissement.

III.4.1.2. Variation du facteur de dissipation :

Le facteur de dissipation diélectrique ($\tan\delta$) est défini pour un matériau diélectrique soumis à une tension externe comme la perte d'énergie interne causée par la conductance diélectrique et la polarisation diélectrique, qui indique le rapport entre le courant actif et le courant réactif [You-15]. Cette perte d'énergie indique que le courant de fuite résulte de trois types de processus de perte distincts [Sch-00]: (1) la conduction ionique principalement due à la dissociation de molécules et / ou aux impuretés électrolytiques contenues dans le liquide; (2) l'orientation des dipôles qui dépend beaucoup de la nature des molécules et de la fréquence, contrairement au premier qui ne dépend que du champ électrique appliqué [Bar-94]; et (3) la polarisation de la charge d'espace qui se produit lorsque les porteurs de charge sont rassemblés dans l'interface formée par deux couches diélectriques. En règle générale, des valeurs plus élevées de $\tan\delta$ indiquent un plus grand degré de vieillissement ou de dégradation du diélectrique [Yan-17].

La Fig (III.16) montre les variations du facteur de dissipation ($\tan\delta$) avec la fréquence à différentes périodes de vieillissement pour les trois huiles étudiées. Il apparaît clairement que $\tan\delta$ à 20Hz des deux huiles végétales est inférieur à celui de l'huile minérale. Pour cela, les huiles végétales peuvent être utilisées dans les transformateurs car le facteur de perte est même inférieur à celui de l'huile minérale.

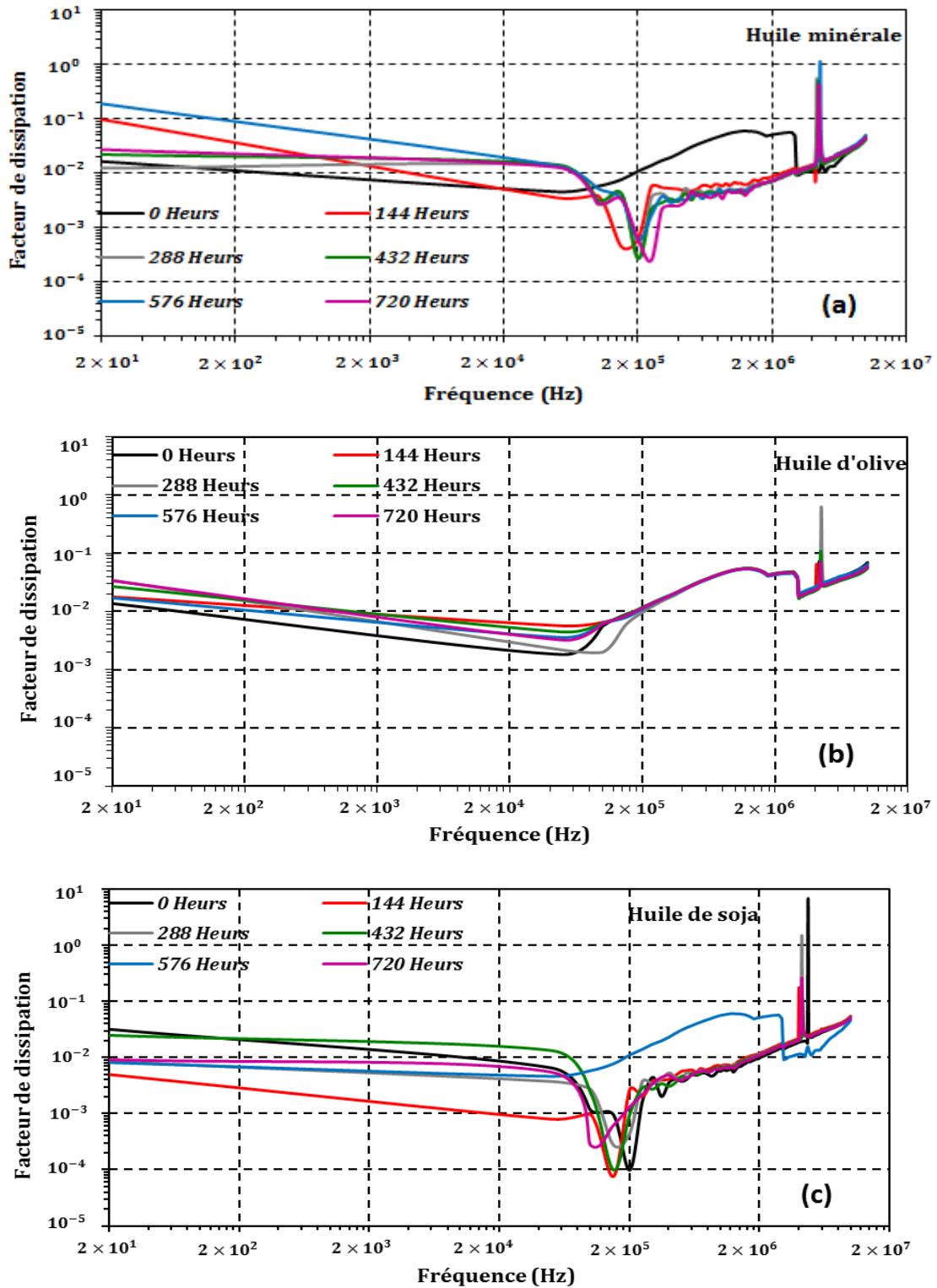


Fig (III.16) : Variations du facteur de dissipation aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différentes durées de vieillissement thermique: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja

L'analyse de ces diagrammes indique aussi les remarques suivantes: (1) $\tan\delta$ a tendance à diminuer avec l'augmentation de la fréquence appliquée de 20 à 100 kHz; (2) le $\tan\delta$ diminue jusqu'à atteindre un pic à 200 kHz, puis augmente dans la plupart des échantillons d'huiles usées; (3) le facteur de dissipation augmente avec l'augmentation de la fréquence appliquée avec l'apparition de pics de résonance.

Pour le premier changement, l'évolution des pertes diélectriques laisse penser qu'elle est due à la polarisation de la charge d'espace ou à la conduction ionique. Il est difficile de faire la distinction entre ces deux mécanismes alors que le deuxième changement montre un mécanisme de perte similaire à la perte d'orientation dipolaire. Le troisième changement peut s'expliquer par le fait que des processus de polarisation lents ne peuvent pas se produire avec un changement plus rapide du champ électrique; les dipôles sont incapables de suivre instantanément ce champ variable rapide, ce qui augmente la perte diélectrique.

III.4.1.3. Variation de la conductivité :

La conductivité reflète le mouvement des charges dans le liquide. Lorsque le diélectrique est soumis à un champ électrique alternatif $U(\omega)$, la densité de courant totale résultante décrite par l'équation de Maxwell est la suivante:

$$J(\omega) = \sigma U(\omega) + j\omega(\epsilon'_r(\omega) - j\epsilon''_r(\omega))U(\omega) \dots \dots \dots (III.39)$$

La densité de courant de fuite a également deux composantes qui sont décrites par l'équation suivante:

$$J(\omega) = (\sigma + \omega\epsilon''_r)U(\omega) \dots \dots \dots (III.40)$$

La première composante représente le mouvement des porteurs de charge libres, ce qui entraîne une conductivité ohmique qui dépend du champ électrique appliqué. D'autres paramètres peuvent avoir une influence significative, tels que la mobilité et la viscosité du liquide. Le second mécanisme est associé aux charges liées ou aux dipôles créant un courant de déplacement qui dépend principalement de la fréquence [43]. L'ensemble des deux paramètres décrit la conductivité AC.

La Fig (III.17) montre les variations de la conductivité en courant alternatif en fonction de la fréquence à différentes durées de vieillissement pour les trois huiles étudiées. Comme le montrent ces figures, la conductivité augmente avec la fréquence de

20Hz à 2MHz pour tous les échantillons considérés. Cette augmentation peut être attribuée aux impuretés qui se situent dans les huiles.

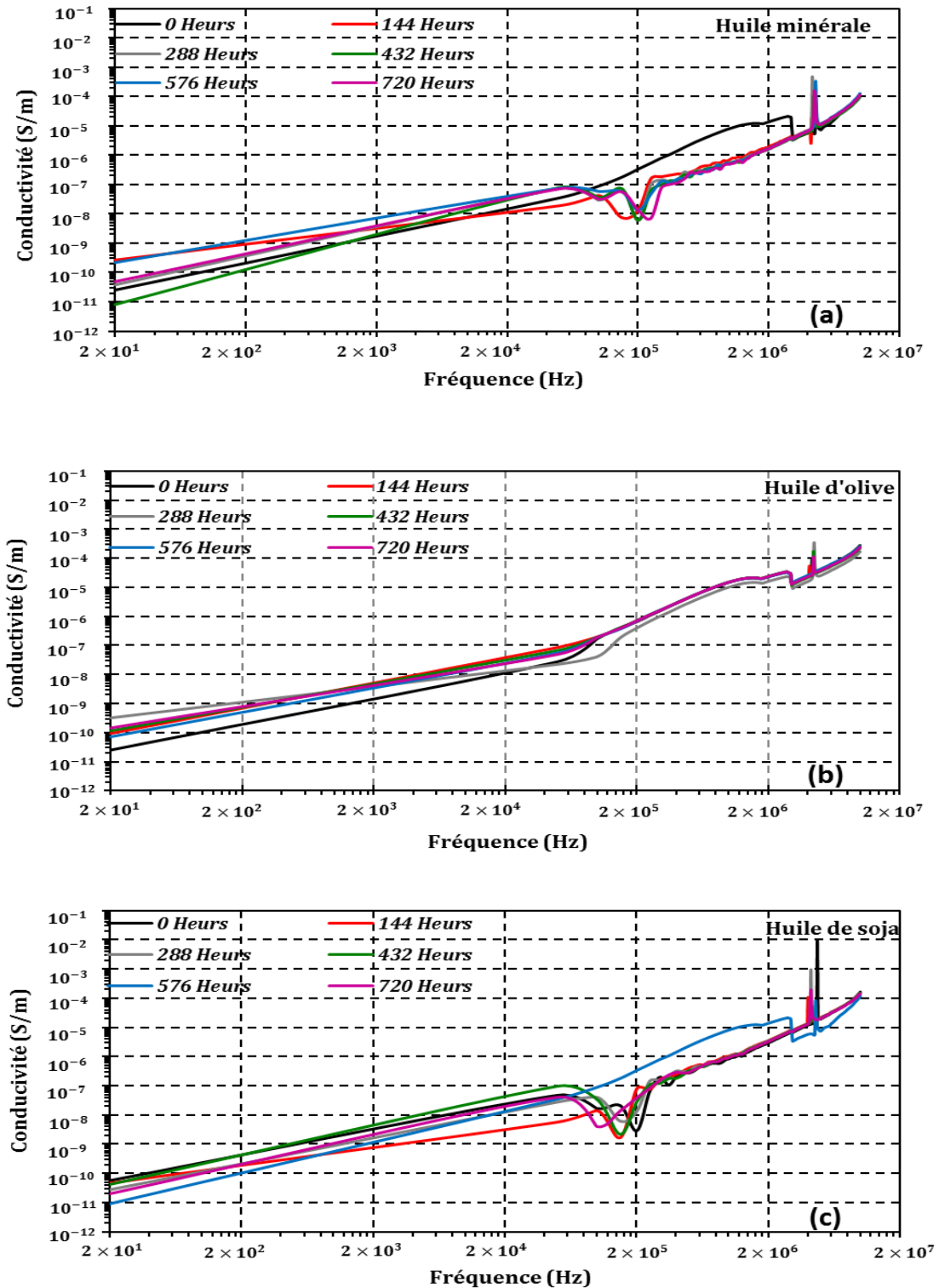


Fig (III.17) : Variations de la conductivité aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différentes durées de vieillissement thermique: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja

III.4.2. Effet du vieillissement électrique :

III.4.2.1. Variation de la permittivité relative :

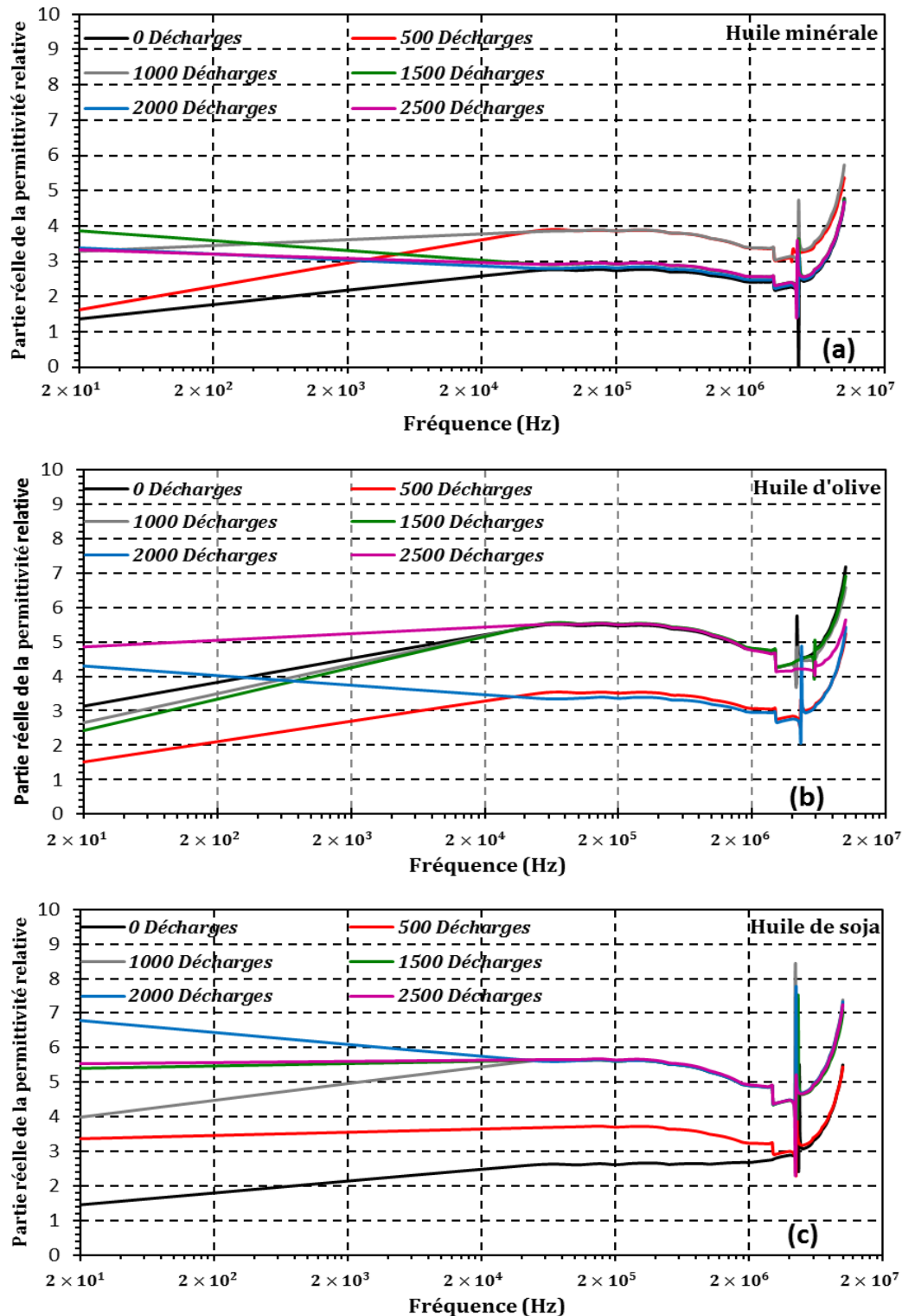


Fig (III.18) : Variations de la « partie réelle des de la permittivité relative aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différents nombres de décharges électriques appliquées: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja

La Fig (III.18) montre l'évolution de la partie réelle de la permittivité relative en fonction de la fréquence à différents nombres de décharges électriques appliquées pour les trois huiles étudiées. $\varepsilon'_r(\omega)$ change de la même manière qu'il a changé après le vieillissement thermique. Sans oublier aussi que, à 20 Hz, les huiles d'olive et de soja ont une permittivité relative supérieure à celle des huiles minérales. Cela est dû au fait que la plupart des molécules d'huile minérale sont non polaires, alors que les esters naturels ont un caractère polaire nettement supérieur à celui des huiles minérales [Lia-12].

III.4.2.2. Variation du facteur de dissipation :

Les pertes diélectriques ont pour origine les pertes de conduction, les pertes dipolaires et les pertes vibrationnelles [Naw-15]. Le facteur de dissipation pour les trois huiles étudiées a été mesuré en fonction de la fréquence à différents nombres de décharges (Fig.III.19). Il apparaît clairement que $\tan\delta$ a le même comportement que celui en vieillissement thermique en fonction du vieillissement électrique; c'est-à-dire que $\tan\delta$ diminue d'abord aux fréquences inférieures à 100kHz qui peut être due à la diminution de la conductance, puis augmente au fur et à mesure que nous passons au côté haute fréquence en raison de l'augmentation de la conductance.

III.4.2.3. Variation de la conductivité :

La Fig (III.20) montre une dépendance fréquentielle de la conductivité pour les trois huiles étudiées à différents nombres de décharges. La conductivité augmente linéairement avec la fréquence avec l'apparition de pics de résonance. Cette augmentation peut être attribuée aux impuretés qui se situent dans les huiles.

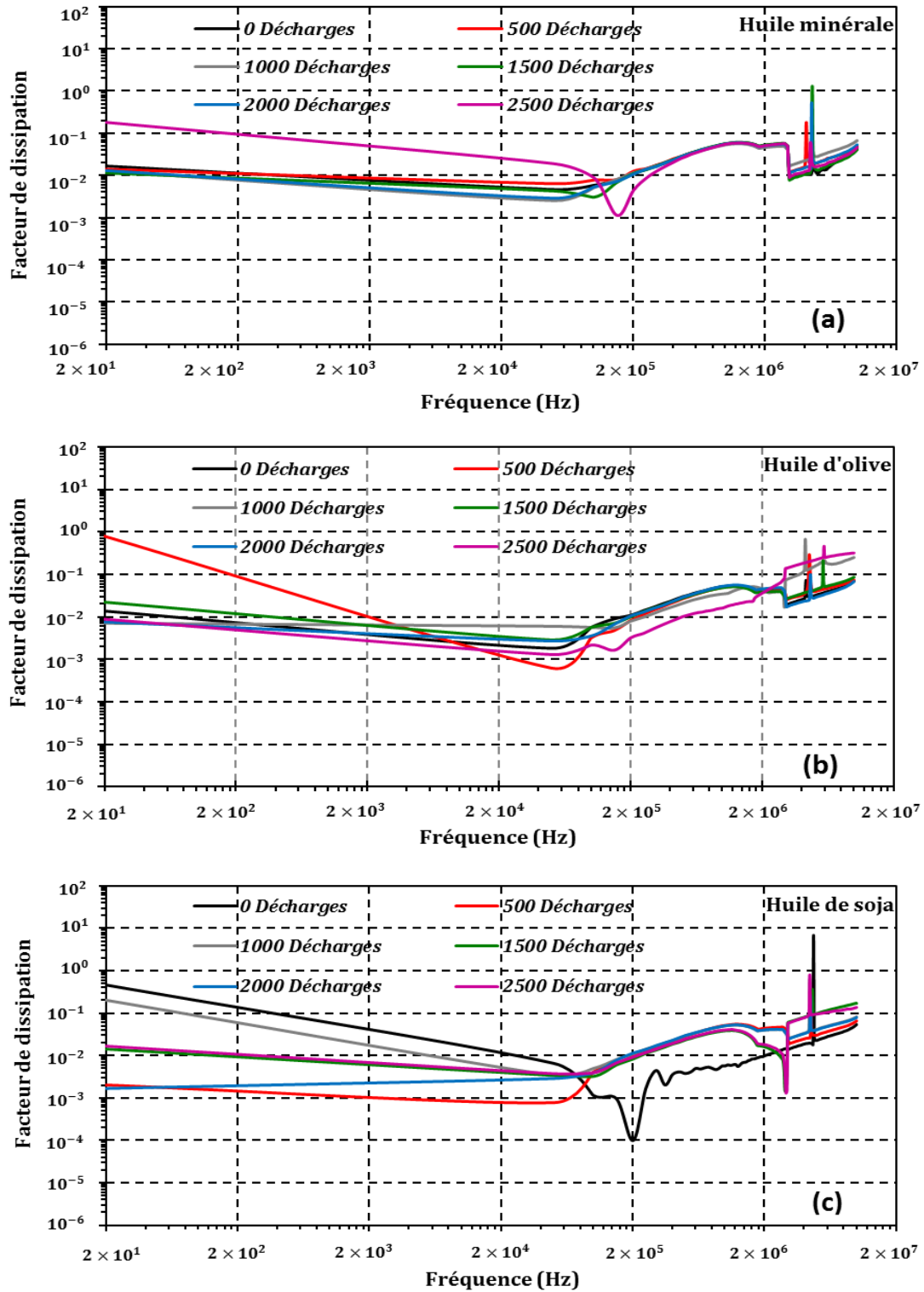


Fig (III.19) : Variations du facteur de dissipation aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différents nombres de décharges électriques appliquées: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja

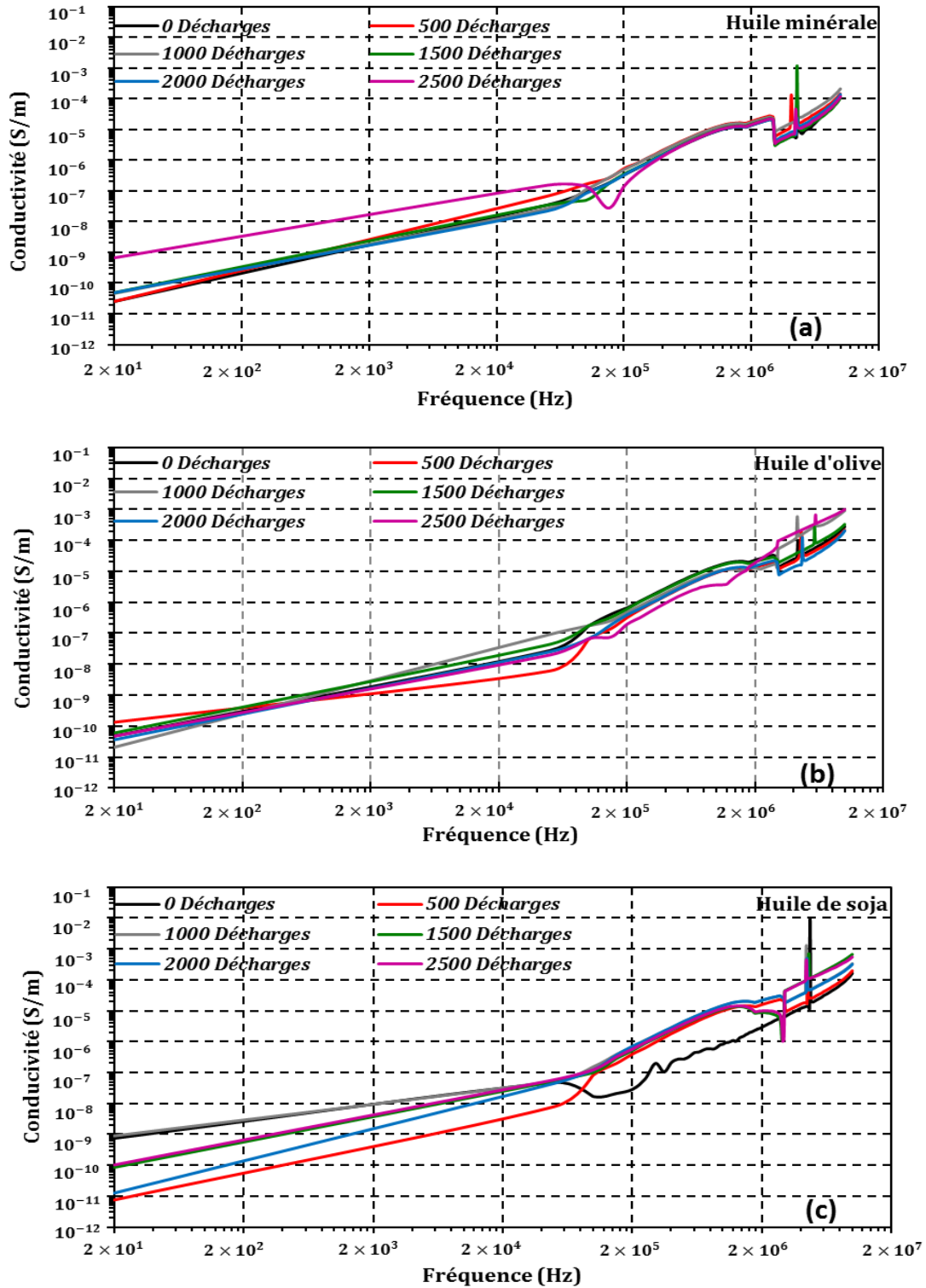


Fig (III.20) : Variations de la conductivité aux fréquences 20 Hz - 10 MHz pour différents nombres de décharges électriques appliquées: (a) pour l'huile minérale, (b) l'huile d'olive et (c) l'huile de soja

III.5.Conclusion :

Il ressort de ce chapitre, que les phénomènes de relaxations et de résonance caractérisent un diélectrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique et sont générés par divers mécanismes de polarisation (polarisation électronique, polarisation dipolaire, polarisation ionique, polarisation inter faciale). Une relaxation diélectrique de type Debye est caractérisée par une valeur constante de ε'_r suivie d'une chute brutale, alors que ε''_r présente un pic large qui passe par un maximum à la fréquence de relaxation f_r . Par contre, une courbe de résonance est caractérisée par un pic étroit de ε''_r dont le maximum correspond à la fréquence de résonance. Quant à la variation de ε'_r avec la fréquence, la courbe augmente hyperboliquement en passant par un maximum, puis chute brutalement, atteint un minimum avec une valeur négative puis croît de nouveau de manière asymptotique.

Sans oublier que la technique de spectroscopie d'impédance nous a permis de déterminer les paramètres diélectriques (la permittivité, le facteur de dissipation et la conductivité) des trois huiles étudiées sur une large gamme de fréquences (20Hz à 10MHz). Deux types de comportements sont observés pour ces propriétés : pour les fréquences inférieures à 100 kHz, ces paramètres évoluent de manière différente pour chaque paramètre, mais pour les fréquences supérieures à 100 kHz, l'évolution de chaque paramètre est la même pour les deux types de vieillissements avec une apparition des pic de résonances autour de la fréquence 4.5 MHz dus aux oscillations harmoniques des électrons et des ions de ces huiles. Il apparaît aussi que le facteur de dissipation des deux huiles végétales est inférieur à celui de l'huile minérale. Pour cela, les huiles végétales peuvent être utilisées dans les transformateurs car le facteur de perte est même inférieur à celui de l'huile minérale.

Dans le chapitre suivant, nous essayons de suivre le comportement dynamique des trois huiles étudiées au moment des décharges avec une analyse fréquentielle des courants associés aux décharges.

Chapitre IV

Courants de décharges et analyses Spectrales

IV.1. Introduction :

Nous avons entamé des série de décharges électriques sur les trois huiles étudiées: (l'huile minérale, l'huile d'olive et l'huile de soja) à des niveaux de tension DC variables de 0 à 60kV. Le but étant de faire des observations expérimentales du comportement de ces huiles au moment des décharges, et également de capturer l'image des courants générés dans ces huiles (ou les courants associés à ces décharges) avec un oscilloscope numérique.

Pour cela, ce chapitre présentera le comportement dynamique des trois huiles étudiées au moment des décharges suivi des notions fondamentales d'analyse spectrale d'un signal comme sa transformation de Fourier rapide FFT et sa densité spectrale de puissance PSD. Des allures de ces courants seront présentées avec les analyses spectrales sous Matlab qui contiennent: leurs correspondantes FFT, leurs densités spectrales de puissance et les descripteurs fréquentiels qui sont: le pic maximal, la valeur moyenne, la valeur efficace, le facteur de pic, la variance et l'écart type du spectre FFT. Sans oublier la fréquence de résonance et la largeur de la bande passante de ces courants. En outre, ce chapitre traitera les spectrogrammes de ces courants, en illustrant comment les compositions de fréquence du courant et l'intensité de chaque fréquence changent avec le temps.

IV.2. Aspect théorique de décharge dans les liquides:

Une décharge électrique est un canal conducteur se formant, sous certaines conditions, entre deux électrodes, à travers un milieu isolant. Dans les gaz ou les liquides, l'apparition d'une décharge est souvent appelée claquage. Les processus fondamentaux conduisant au claquage des isolants liquides sont encore mal connus. Ceci est lié en grande partie au fait que la connaissance des propriétés physiques de l'état liquide est encore moins bien développée que dans les gaz et les solides. De nombreux chercheurs ont tenté d'appliquer aux liquides les théories proposées pour les gaz et les solides.

En 1937, Von Hippel proposait d'adopter les résultats acquis dans le domaine de la disruption des gaz, pour la compréhension du claquage électrique dans la phase condensée. C'est ainsi que 20 ans plus tard. Lewis et Adamczewski proposaient l'existence d'un processus d'ionisation du type semblable à celui des gaz: théorie de

claquage électronique basée sur les vibrations moléculaires et les électrons libres. Par la suite, Swan postulait qu'une émission électronique et une multiplication de charges jouaient un rôle essentiel dans le processus de claquage des liquides [Bou-11]. Ce modèle présente un certain nombre d'insuffisances, en particulier son incapacité d'expliquer le fait que la tension de claquage dépend de la pression comme l'ont rapporté Kock et Higham. Cette dépendance de la pression, suggère d'un changement de phase durant le claquage. Pour Watson et Sharbaugh, le processus de claquage est dû à la formation d'une cavité (bulle) gazeuse par ébullition locale du liquide, au niveau d'aspérités sur la surface de la cathode. Des mécanismes de bulle ont été aussi proposés par Kao, Krasucki, Thomas,...

Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux de recherche ont été menés sur les phénomènes de pré-claquage et de claquage dans les huiles isolantes. Ces investigations ont permis de progresser de façon très significative dans la compréhension des mécanismes conduisant au claquage. Ainsi, il a été établi que le claquage d'un liquide est précédé d'une phase de pré-claquage elle-même constituée de deux phases : une phase de génération correspond à l'apparition d'une perturbation (de quelques mm de diamètre) caractérisée par un indice de réfraction différent de celui du liquide environnant, au voisinage de l'électrode acérée où le champ électrique est le plus intense, et une phase de propagation de la phase précédemment créée durant laquelle différentes structures plus ou moins ramifiées appelées « streamers » prennent naissance se développent vers l'électrode opposée [Dan-11]. Selon les conditions expérimentales (ou d'exploitation), ces streamers peuvent conduire au claquage c'est-à-dire à l'établissement d'un arc électrique transportant un fort courant. Les streamers sont caractérisés par leur forme et leur vitesse de propagation. Ils sont accompagnés par des courants, des émissions lumineuses et des ondes de chocs; leur conductivité dépend des mécanismes impliqués dans leur propagation. Principales différences d'avec les gaz :

- ❖ La mobilité des ions est beaucoup plus faible dans les liquides. Ils n'atteignent pratiquement jamais une vitesse suffisante pour arracher des électrons à la cathode ;
- ❖ Les mouvements des ions entraînent, par viscosité, des mouvements de l'ensemble du liquide (électro-convection) qui assurent une uniformisation de la température ;
- ❖ La cathode reste relativement froide, de sorte que l'émission des électrons y est uniquement due à l'effet de champ et non à un effet thermoélectronique ;

- ❖ Un champ électrique assez élevé donne naissance à des streamers qui engendrent des sous-produits et des bulles.

Le courant qui s'établit dans un liquide isolant, en fonction de la tension appliquée (ou du champ E) passe schématiquement par trois étapes avant le claquage Fig (IV.1). Tout d'abord, le courant ohmique qui s'établit relativement à faible champ (1^{ère} zone) est essentiellement tributaire des impuretés présentes dans le liquide. Quant aux mécanismes de dissociation ionique dans le liquide (2^{ème} zone), ainsi qu'à celui de l'arrachage des électrons à la cathode (3^{ème} zone), ils sont assez hypothétiques et dépendent beaucoup du type de liquide. L'étude de ces mécanismes n'a jamais permis de prévoir la valeur de la tension disruptive.

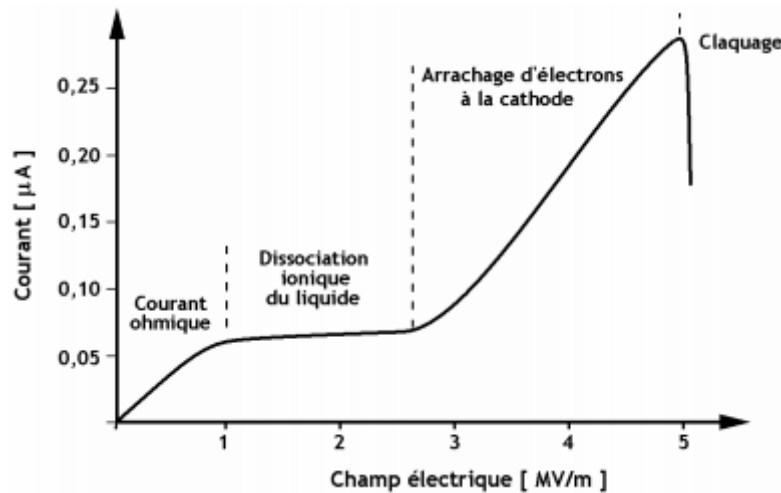


Fig (IV.1) : Allure de courant en fonction du champ appliqué dans un liquide isolant

IV.3. Comportement de l'huile au moment des décharges :

Toute la durée de notre expérimentation sur le vieillissement électrique des différents échantillons des trois huiles étudiée, nous avons essayé d'observer autant que possible le comportement de chaque huile avant, pendant et après le développement de l'arc électrique. En rappelant que nous avons utilisé une cellule d'essai contenant deux électrodes planes espacées de 2.5mm, immergées dans l'un des échantillons des trois huiles étudiées sous une haute tension variable DC de 0 à 60kV. Le détail du banc expérimental pour réaliser ce vieillissement est décrit au chapitre II (Paragraphe II.3.2).

Le vieillissement électrique réalisé consiste à soumettre les huiles utilisées: huile minérale, d'olive et de soja à des séries de décharges électriques de faible énergie de 500 à

2500 à des tensions respectives de 40, 60 et 50 kV. En comparant ces tensions de claquage pour chaque type d'huile, nous avons constaté que l'arc a plus de difficulté à se former dans les huiles végétales que dans l'huile minérale, ce qui nous amène à penser que les huiles végétales ont un pouvoir d'atténuation de l'arc électrique supérieur à celui de l'huile minérale. Dans ce qui suit, nous présenterons un résumé de tous les phénomènes que nous avons observés au fur des essais, de les expliquer et les interpréter.

IV.3.1. Mouvement d'huile :

Avant le claquage, où se développe l'arc électrique, nous avons vu une perturbation se produisant entre les électrodes de la cellule d'essai, puis elle se déplace dans toute la quantité d'huile avec l'augmentation de la tension continue appliquée. Cette perturbation apparaît clairement à la surface de l'huile sous forme d'ondes mécaniques qui se propagent, où le front de cette onde est centré dans l'espace entre-électrode avec l'audition d'un son qui est très similaire au son de l'eau en ébullition (Fig (IV.2)).

La perturbation entre électrode est peut-être due aux mouvements des ions qui se trouvent entre les électrodes sous l'effet du champ électrique appliqué. Cette perturbation se propage par le phénomène d'électro-convection ou électro-hydro-dynamique (EHD) qui désigne l'ensemble des mouvements internes (verticaux ou horizontaux) sous l'influence de la force de Coulomb. Ces mouvements internes se propagent à toutes les charges de volume du liquide.

De plus, nous avons remarqué que la tension de seuil d'électro-convection est plus faible dans l'huile minérale que dans les huiles végétales. Sachant que le phénomène d'électro-convection fait partie des phénomènes de pré-claquage influant sur la rigidité diélectrique des isolants liquides. Ainsi, dans les huiles minérales de transformateur, l'électro-convection peut entraîner une défaillance catastrophique des transformateurs **[Jar-18]**.

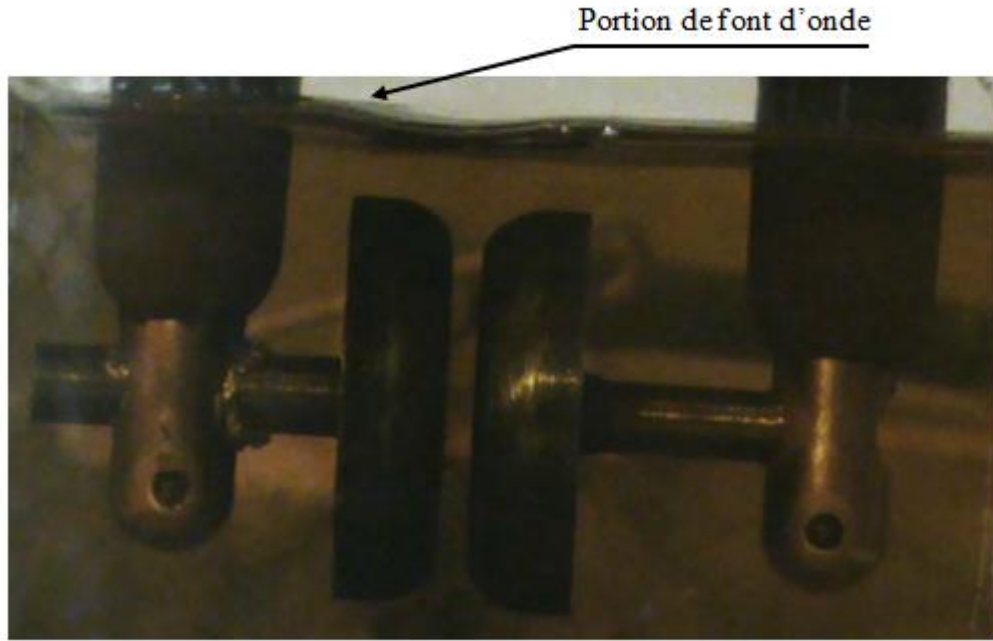


Fig (IV.2) : Mouvement d'huile minérale sous forme d'ondes mécaniques sous l'effet d'une tension DC 40kV appliquée aux deux électrodes planes espacées de 2.5 mm

IV.3.2. Développement de l'arc :

Après le mouvement d'huile décrit précédemment, nous avons augmenté légèrement la tension DC appliquée à l'huile. Nous avons observé des lignes horizontales parallèles plus intenses entre les deux électrodes (Fig (IV.4.a)). Ces lignes se trouvent autour du centre des électrodes planes. Ceci peut être expliqué par les mouvements des particules et des ions dans la même direction des lignes du champ électrique appliqué. Lorsque nous avons augmenté suffisamment l'intensité du champ électrique, nous avons atteint une valeur pour laquelle se développe l'arc électrique qui est un canal ionisé entre les électrodes Fig (IV.3.b). Cet arc s'accompagne de divers effets lumineux, bruits sonores, qui sont brusques et accompagnés d'une augmentation du courant et une chute de la tension.

Egalement, nous avons observé la production d'arcs successifs avec une différence de temps de quelques microsecondes ; mais il est à noter que l'emplacement de chaque arc se situe au-dessus de l'arc précédent jusqu'à ce qu'il atteigne la limite supérieure des électrodes comme indiqué sur les photographies des Fig (IV.4. b,..., f). Après quelques secondes, la série précédente d'arcs se répète, avec la différence dans le point de départ qui est aléatoire, parfois en bas et d'autres en haut. Sans oublier que la plus grande densité

lamineuse est celle du premier arc de la série, et elle diminue progressivement à mesure que les arcs montent vers le haut.

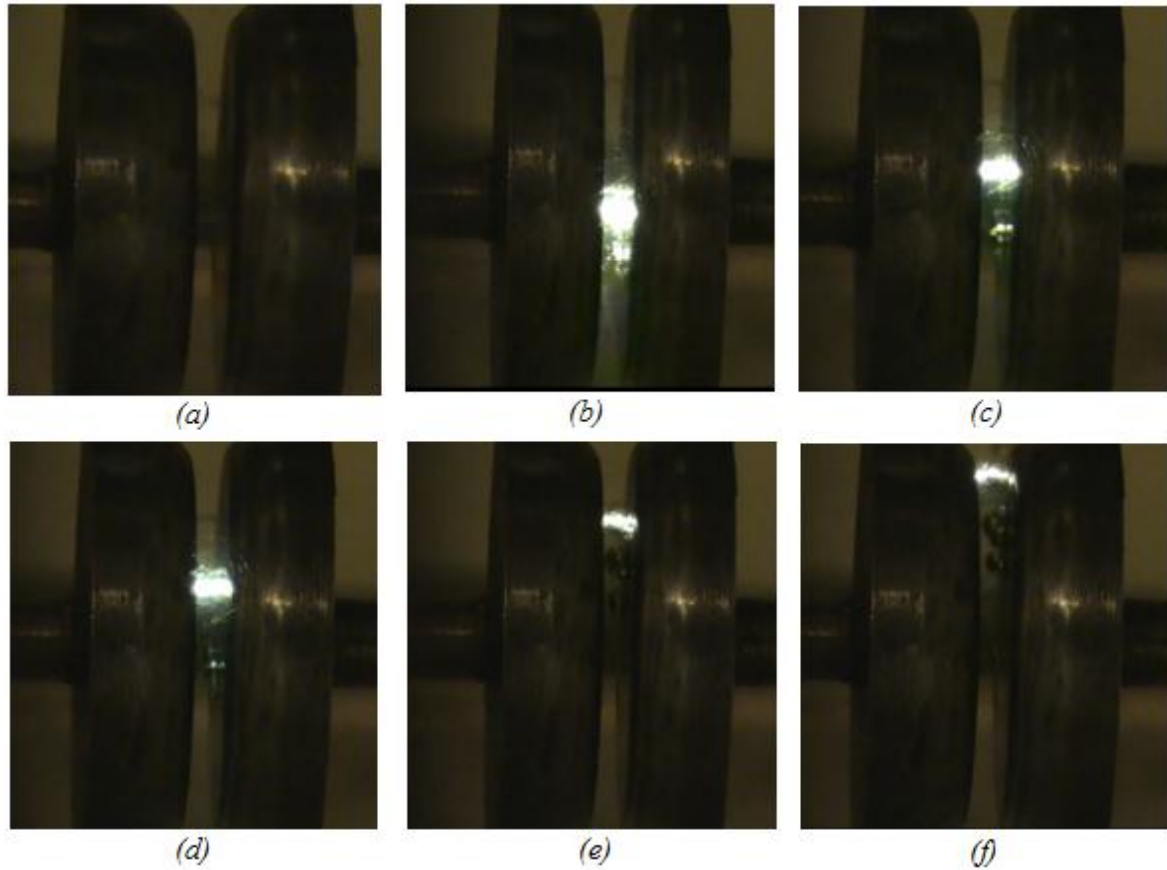


Fig (IV.3) : Développement de l'arc électrique entre deux électrodes planes espacées de 2.5mm immergées dans l'huile de soja sous une tension DC 50kV

IV.3.3. Génération de bulles de gaz :

Après la naissance des arcs, nous avons vu une formation des bulles de gaz (ou d'air) qui peut être s'expliquée par (Fig(IV.4)) :

- ❖ l'apparition de poches de gaz se formant au voisinage des électrodes ;
- ❖ la répulsion électrostatique de charges présentes dans le liquide ;
- ❖ la dissociation des molécules du liquide avec libération de sous-produits gazeux sous l'effet du bombardement par des électrons ou des ions ;
- ❖ vaporisation due à des décharges locales (impuretés, aspérité des électrodes...). Il se crée alors des colonnes de bulles dans lesquelles se produit finalement le claquage ;

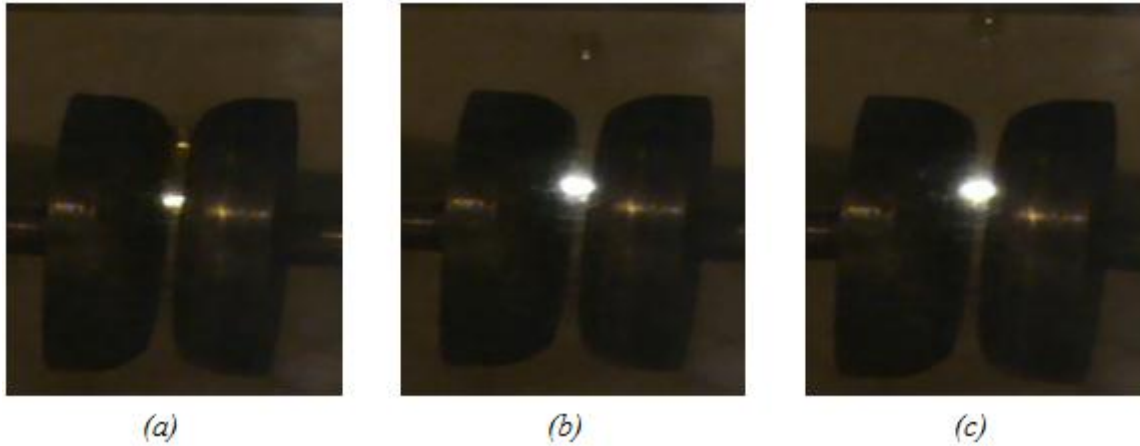


Fig (IV.4) : Génération de bulle de gaz (ou d'air) produites par l'arc entre deux électrodes planes espacées de 2.5mm immergées dans l'huile d'olive sous une tension DC 60kV

IV.4. Notions fondamentales d'analyse Spectrale :

L'analyse spectrale est la décomposition d'une grandeur variant (ou d'un signal vibratoire) en fonction du temps en ses composantes fréquentielles. C'est l'une des techniques les plus courantes de traitement des signaux. La représentation spectrale est la représentation en fonction de la fréquence dans un diagramme amplitude-fréquence appelé spectre. Parmi les traitements de l'analyse spectrale, la transformation de Fourier rapide FFT et la densité spectrale de puissance PSD que nous allons présenter dans ce qui suit.

IV.4.1. Transformation de Fourier rapide FFT:

En général, la transformation de Fourier rapide ou FFT (Fast Fourier Transform) est une technique puissante qui facilite l'analyse de signaux dans le domaine fréquentiel. En termes précis, la FFT est un algorithme de calcul de la transformation de Fourier discrète (TFD). Cet algorithme est couramment utilisé pour transformer des données discrètes du domaine temporel dans le domaine fréquentiel.

Mathématiquement, l'expression de la transformée de Fourier $X(f)$ d'une fonction réelle continue $x(t)$ est définie pour $0 \leq t \leq \infty$ par [Dao-09] :

$$X(f) = \int_0^{\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt \dots \dots \dots (IV.1)$$

La représentation discrète du signal continu $x(t)$ exige des échantillons régulièrement espacés à une fréquence d'échantillonnage f_e à condition que le signal

échantillonné représente correctement le signal continu si on peut le reconstituer sans ambiguïté. Alors, la question posée : « *combien d'échantillons faut-il pour représenter exactement un signal ?* ». La réponse mathématique de cette question est au niveau du théorème d'échantillonnage qui est souvent appelé théorème de Shannon qui stipule qu'un signal doit être échantillonné à une fréquence au moins deux fois supérieure à la fréquence la plus élevée: $f_e > 2 f_{max}$ (fréquence de Nyquist) [Lah-16].

En prenant une fréquence d'échantillonnage f_e et un temps d'observation T , on aura alors un échantillons $x(t_n)$ de taille N . Cela revient à observer $x(t)$ à des temps discrets espacés d'un pas $\Delta t = 1/f_e$; on observe donc un signal aux instants $t_n = n \times \Delta t$ avec $0 \leq n \leq N - 1$. La transformation de Fourier discrète TFD d'un signal s'exprime sous la forme suivante :

$$X(f_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j2\pi kn/N) \dots \dots \dots (IV.2)$$

Avec : $k = 0, 1, 2, \dots, \dots, \dots, \frac{N}{2}$, et $x(0) \dots x(N - 1)$: sont la série temporelle. Cette opération est utile dans de nombreux domaines mais son calcul directement à partir de la définition est souvent trop lent pour être pratique. La transformation rapide de Fourier (FFT) est un moyen de calculer la DFT plus rapidement car elle réduit le coût de calcul.

IV.4.2. Densité spectrale de puissance PSD :

Supposons que $x(t)$ est une fonction réelle continue définie pour $0 \leq t \leq \infty$. Cette fonction a une énergie infinie $\{x(t)\}$ exprimée par :

$$\{x(t)\} = \sum_{t=-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \dots \dots \dots (IV.3)$$

En utilisant la transformation de Fourier, la densité spectrale de l'énergie $S(\omega)$ dans le domaine fréquentiel est définie par :

$$S(\omega) = |X(\omega)|^2 \dots \dots \dots (IV.4)$$

Où $S(\omega)$ représente la distribution de l'énergie de séquence en fonction de la fréquence.

D'après le théorème de Parseval :

$$\sum_{t=-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} S(\omega) d\omega \dots \dots \dots (IV.5)$$

Selon le théorème de Wiener-Khinchin, le spectre de puissance d'un processus stochastique stationnaire à moyenne nulle :

$$E\{x(t)\} = 0 \quad \text{pour tout } t \dots \dots \dots (IV.6)$$

Où $E\{\cdot\}$ désigne l'opérateur d'attente (qui fait la moyenne sur l'ensemble des réalisations). $x(t)$ peut être calculé comme la transformée de Fourier de sa fonction de covariance $r(k)$. La séquence d'auto-covariance (ACS) de $x(t)$ est définie comme suit :

$$r(k) = E\{x(t)x^*(t-k)\} \dots \dots \dots (IV.7)$$

Où (*) désignant le conjugué complexe. La première définition de la densité spectrale de puissance (PSD : Power Spectral Density) est:

$$\phi(\omega) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} r(k)e^{-j\omega k} \dots \dots \dots (IV.8)$$

La deuxième définition de la densité spectrale de puissance PSD est:

$$\phi(\omega) = \lim_{n \rightarrow \infty} E \left\{ \frac{1}{N} \left| \sum_{t=0}^{N-1} x(t)e^{-j\omega t} \right|^2 \right\} \dots \dots \dots (IV.9)$$

La PSD représente la répartition fréquentielle de la puissance suivant les fréquences qui le composent (son unité est de la forme U_X^2/Hz , où U_X représente l'unité physique du signal).

IV.5. Caractérisation fréquentielle des courants étudiés :

IV.5.1. Allure des courants :

Le vieillissement électrique se fait par l'application des décharges électriques aux trois huiles étudiées qui est déjà décrite au chapitre II (Paragraphe.II.3.2). La mesure de l'image des courants associés à ces décharges s'effectue à travers la mesure de la tension aux bornes d'une résistance non inductive de $50\ \Omega$ à la sortie de la cellule grâce à un oscilloscope numérique à mémoire à l'aide de sa fonction TRIGGER .

En général, le courant de décharge généré dans ces huiles est essentiellement un processus de transfert de charge qui se produit dans une courte durée. La Fig (IV.5) présente une variation typique du courant de décharge dans le domaine temporel généré dans les trois huiles étudiées. Ils sont obtenus en configuration d'électrode plane de Rogowski et avec un espacement d'électrode de 2,5 mm sous les tensions continuées DC (40, 60, 50) kV respectivement pour les huiles : minérale, d'olive et de soja. Ces courants sont enregistrés par un oscilloscope avec une fréquence d'échantillonnage de 20GHz et 25000 points.

Selon ces figures, les courants de décharge des trois huiles sont caractérisés par des durées courtes ne dépassant pas $1\mu s$, et leur amplitude évolue sous forme d'oscillations harmoniques avec une diminution rapide. En outre, on note qu'il existe une différence d'amplitude significative entre les trois courants qui dépendent principalement de la tension appliquée. Les courants enregistrés dans l'huile minérale et l'huile d'olive sont de forme et d'amplitude similaires, tandis que le courant associé aux décharges dans l'huile de soja est deux fois plus élevé en amplitude. Les durées de décharge sont cependant similaires pour les trois huiles étudiées.

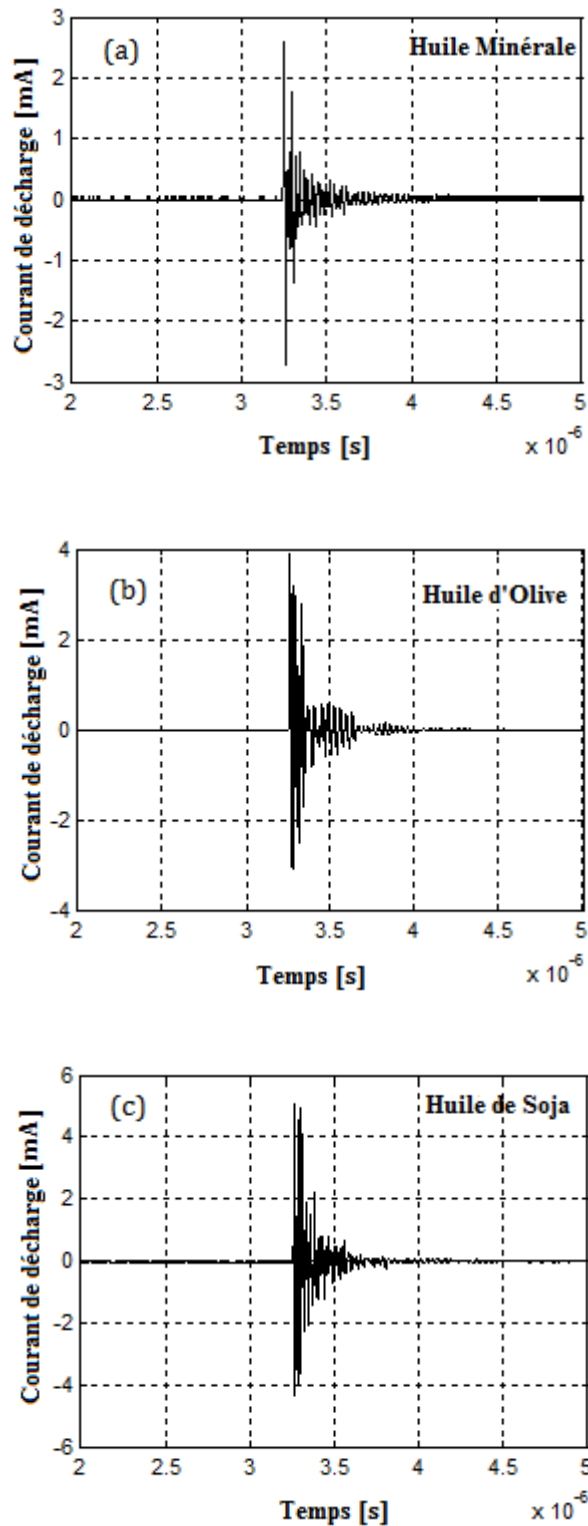


Fig (IV.5) : Courants de décharge générés dans les huiles étudiées sous des tensions continues: (a) huile minérale, (b) huile d'olive, (c) huile de soja

IV.5.2. Analyse spectral des courants sous Matlab :

Matlab est un environnement informatique numérique développé par MathWorks. Il permet les manipulations matricielles, le traçage des fonctions et des données, la mise en œuvre des algorithmes et l'analyse spectral des signaux qui nous a permis de faire une caractérisation fréquentielle des courants de décharges des trois huiles étudiées par :

- ❖ la transformée de Fourier rapide (FFT);
- ❖ la méthode d'estimation de la densité spectrale de puissance (PSD);
- ❖ les descripteurs fréquentiels;
- ❖ le spectrogramme de trois dimensions : temps, fréquence et PSD.

IV.5.2.1. FFT des courants :

Pour analyser plus en détail les courants de décharge présentés dans la Fig (IV.5), pour des valeurs du temps t comprises entre 0 et $3\mu s$, leurs signaux correspondants sont transformés au domaine spectral de fréquences par la transformée de Fourier rapide (FFT) présentée à la Fig (IV.6) avec une fréquence d'échantillonnage $f_s = 1 \times 10^9$ Hz et une fréquence de Nyquist $f_N = 2 \times 10^9$ Hz.

IV.5.2.2. Descripteurs des courants :

Certains descripteurs en domaine fréquentiel ont été définis et calculés dans le Tableau (IV.1). Ces descripteurs sont les suivants: la fréquence de résonance f_{reso} , le pic maximum $E(f)_{max}$, la valeur moyenne $E(f)_{av}$, la valeur efficace $E(f)_{rms}$, le facteur de crête C_f , la variance $\delta^2(f)$, l'écart standard $\delta(f)$ et la fréquence de la largeur de bande f_{bdwth} correspondant au spectre de magnitude. Les descripteurs proposés peuvent être liés aux dangers possibles des systèmes d'isolation des installations d'énergie électrique [Boc-01]. Ils caractérisent les valeurs d'amplitude transférées par des fréquences particulières du courant de décharge. Le facteur de crête a été défini par [Mic-18]:

$$C_f\{E(f)\} = \frac{E_{max}}{E_{rms}} \dots \dots \dots (IV. 10)$$

La variance a été définie par:

$$\delta^2(f) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} [E(f) - E(f)_{av}]^2 df}{\int_{f_1}^{f_2} E_{av}(f) df} \dots \dots \dots (IV. 11)$$

Où δ est la déviation standard et $E(f)$ la valeur du spectre dans le domaine fréquentiel.

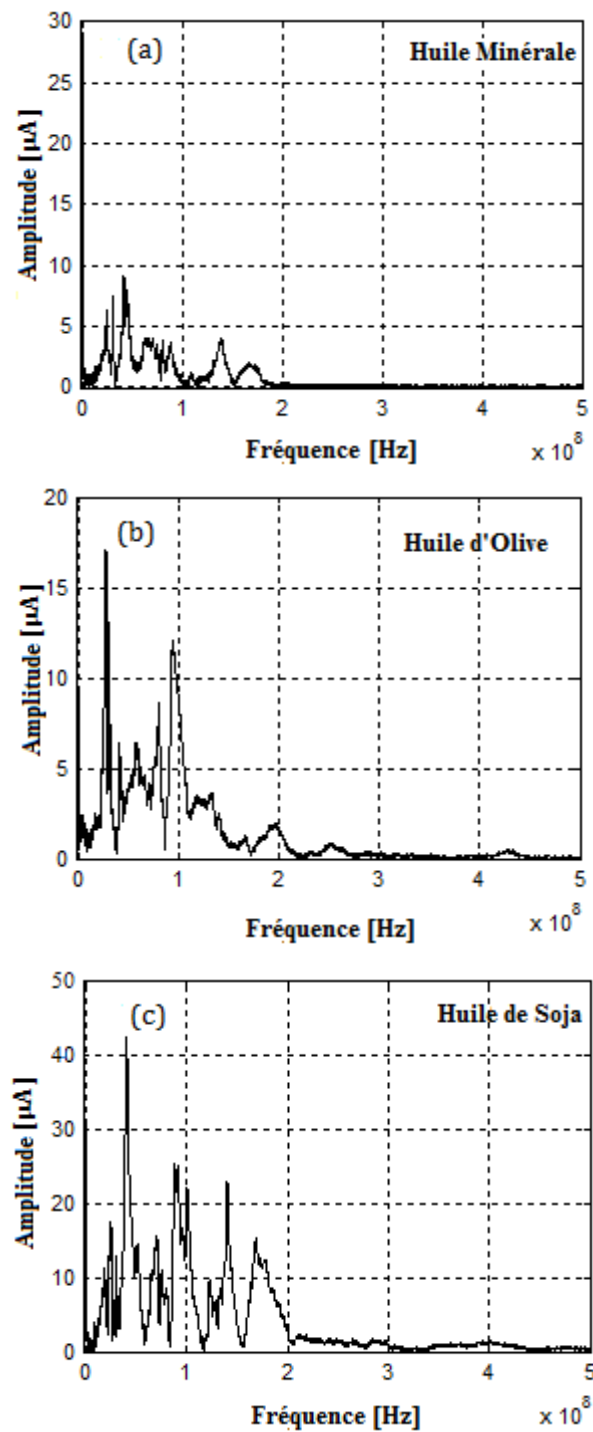


Fig (IV.6) : Courbe FFT normalisée correspondant aux courants de décharge générés dans les huiles étudiées: (a) huile minérale, (b) huile d'olive, (c) huile de soja

Tableau (IV.1) : Valeurs des descripteurs en domaine fréquentiel pour les décharges générées dans les huiles étudiées

Descripteurs	Unités	Huile Minérale	Huile d'Olive	Huile de Soja
Fréquence de résonance	MHz	40.88	26.64	39.84
Pic maximum	μA	8.85	17.09	21.11
Valeur moyenne	μA	0.43	0.76	1.09
Valeur efficace	μA	1.09	1.90	2.57
Facteur de crête	Sans unité	8.15	8.96	8.26
Variance	μA	9.98×10^{-4}	3.05×10^{-3}	5.34×10^{-3}
Déviati on standard	μA	0.99	1.75	2.31
Bandwidth frequency	MHz	39.92 $\rightarrow$ 41.62	25.52 $\rightarrow$ 27.36	38.64 $\rightarrow$ 41.84

En comparant les descripteurs calculés ci-dessous pour divers courants de décharge des trois huiles étudiées, on peut clairement indiquer que:

1. Les huiles minérales et de soja ont approximativement la même valeur de fréquence de résonance, environ 40 MHz. Celle de l'huile d'olive est cependant différente. Elle est autour de 27 MHz.
2. Le pic maximum, la valeur moyenne, la valeur efficace et le facteur de crête des trois huiles ne sont pas très différents les uns des autres.

IV.5.2.3. PSD des courants :

Des recherches supplémentaires ont été menées en utilisant la densité spectrale de puissance (PSD) du courant de décharge généré dans les huiles étudiées. En physique, la PSD du signal décrit la puissance présente dans le signal en fonction de la fréquence, par unité de fréquence [Lub-16]. Il est calculé en utilisant un ensemble de données numériques fournies par les signaux FFT. En pratique, le courant de décharge se propageant dans une huile d'impédance Z , de sorte que l'énergie de ce signal de décharge est délivrée à l'huile qui l'absorbe. Dans le domaine fréquentiel, cette énergie exprime la densité du spectre de puissance. Les résultats obtenus de la PSD pour les huiles étudiées sont présentés à la Fig (IV.7). Il a été éclairé que la densité PSD décroît progressivement d'une valeur initiale de -80 dB / Hz à proximité de -160 dB / Hz lorsque la fréquence normalisée varie entre 0 et 500 MHz.

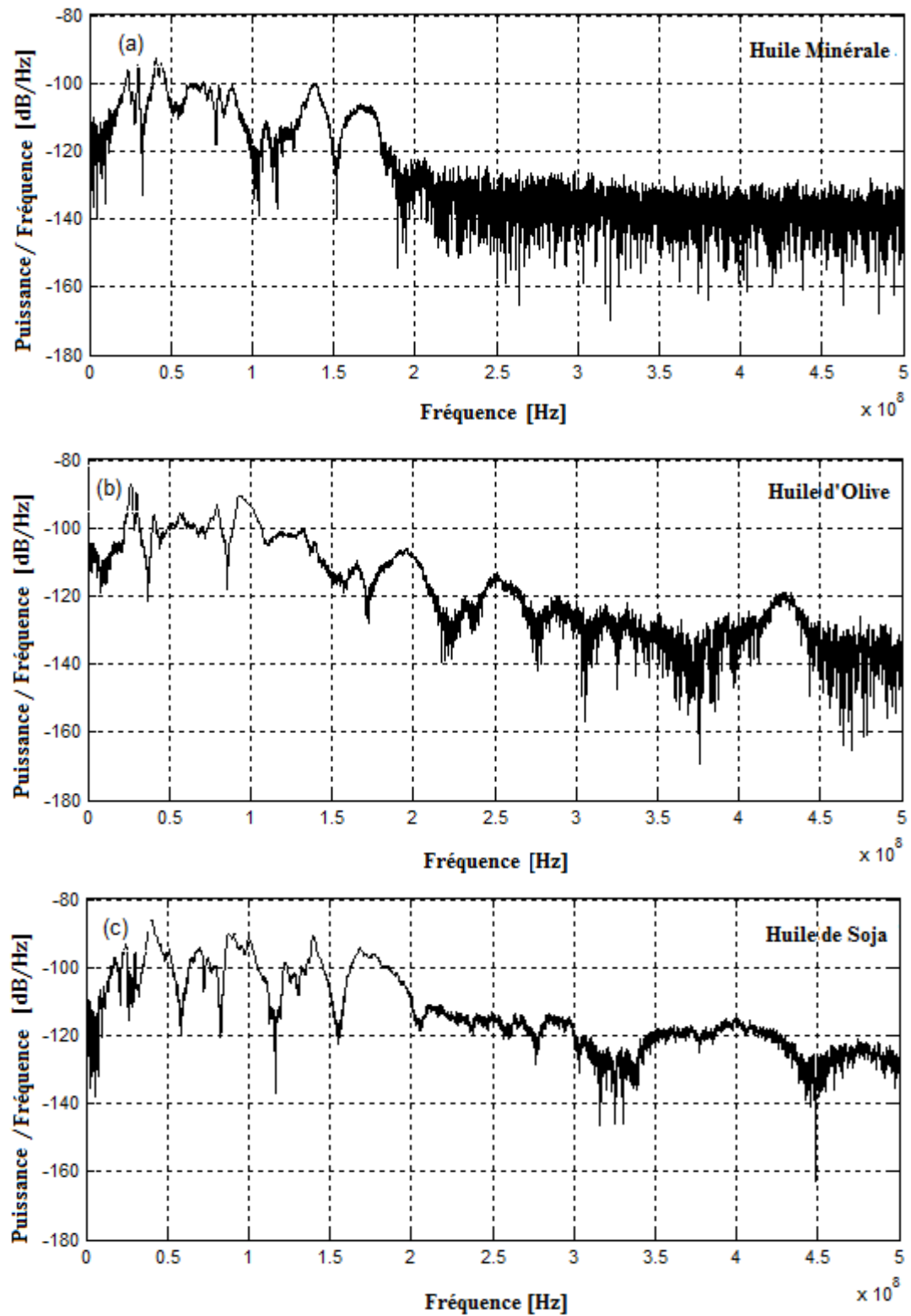
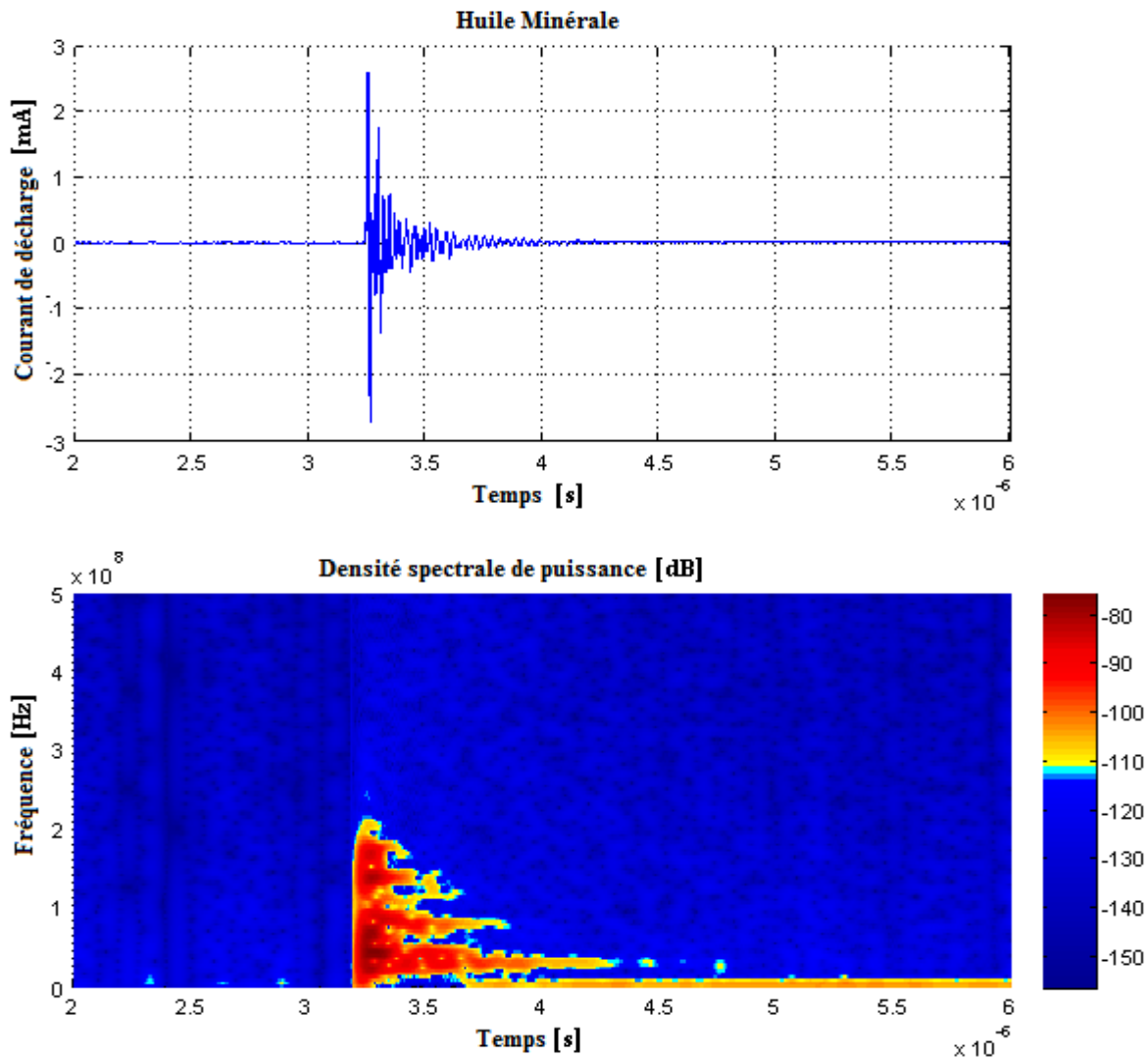


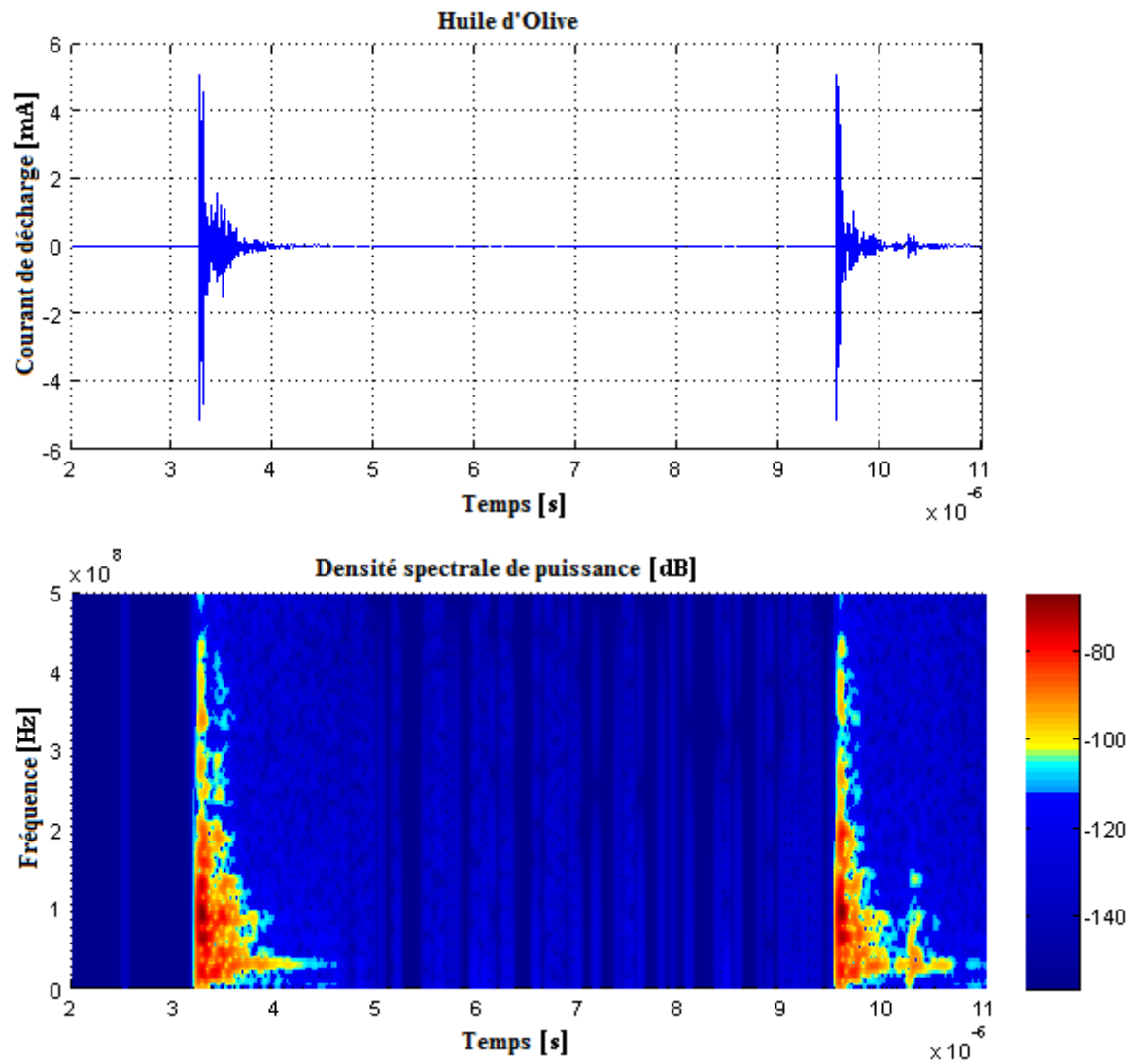
Fig (IV.7). La densité spectrale de puissance des décharges générées dans: (a) l'huile minérale, (b) l'huile d'olive, (c) l'huile de soja, en utilisant un système plan-plan sous tension continue

IV.5.2.4. Spectrogramme des courants :

Une série de trois spectrogrammes présentés dans les Figs (IV.8), (IV.9) et (IV.10) correspond à une, deux et sept impulsions de courant de décharge générés dans les huiles minérales, d'olive et de soja, respectivement. Ces spectrogrammes illustrent l'évolution de la composition fréquentielle des courants de décharge mais également de l'intensité de chaque fréquence. En outre, il permet une compréhension beaucoup plus profonde de la fréquence de résonance et de son évolution dans le temps. A partir de ces graphiques, les impulsions de courant de décharge générées dans les huiles étudiées ont une durée comprise entre 0,5 et 0,8 μs . On constate également que l'énergie des décharges est la plus importante, en rouge, ce qui correspond à -80 dB, environ 40 MHz pour les huiles minérales et de soja et 27 MHz pour l'huile d'olive. C'est la fréquence de résonance, celle pour laquelle l'huile vibre le plus avec une émission acoustique.



Fig(IV.8) : Impulsions de courant de décharge générées dans l'huile minérale et le spectrogramme correspondant dans le domaine temps-fréquence



Fig(IV.9) : Deux impulsions successives de courant de décharge générées dans l'huile d'olive et leurs spectrogrammes correspondants dans le domaine temps-fréquence

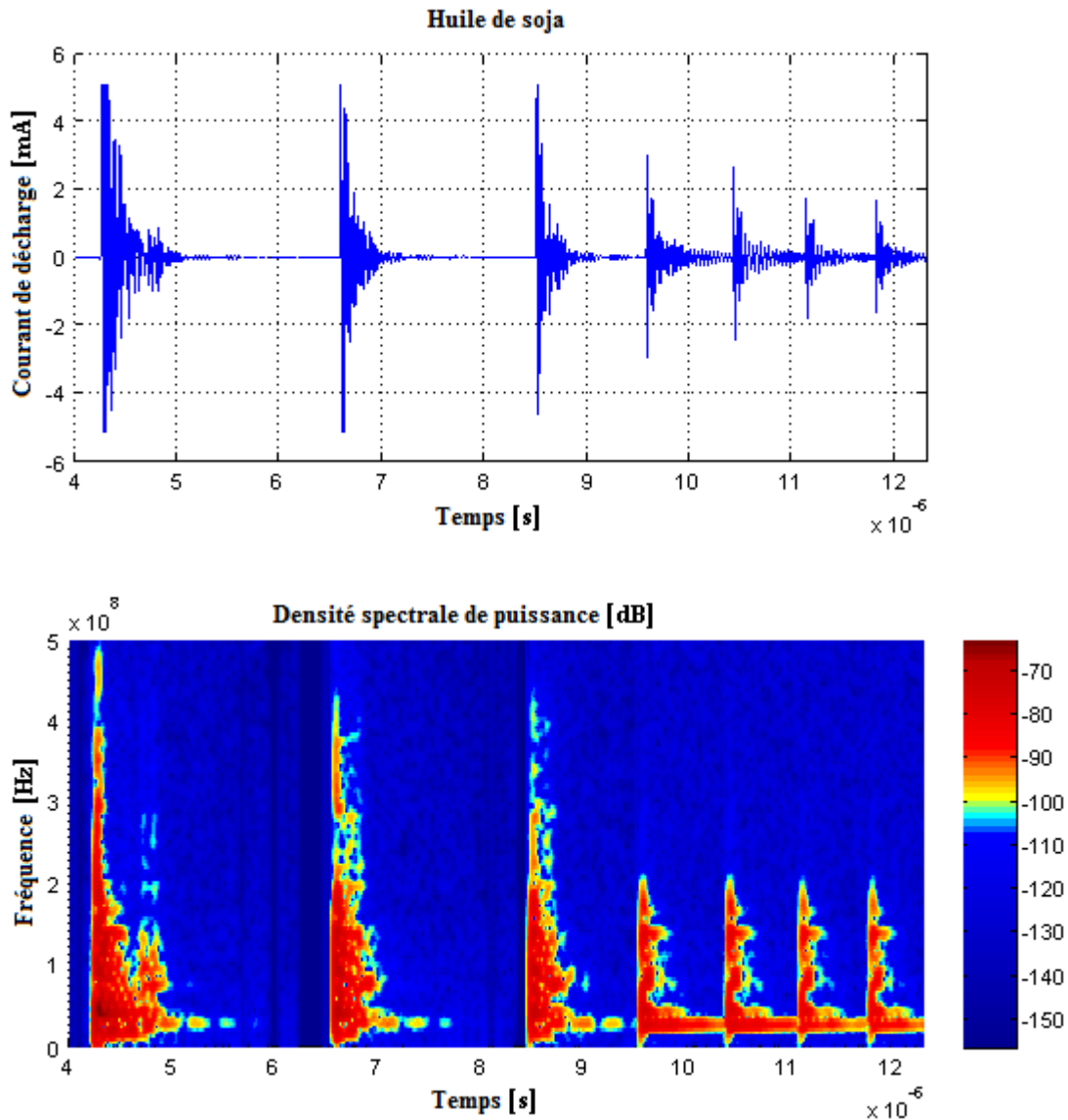


Fig. (IV.10) : Sept impulsions successives de courant de décharge générées dans l'huile de soja et leurs spectrogrammes correspondants dans le domaine temps-fréquence

IV.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, un résultat important a été trouvé. En effet le vieillissement électrique réalisé des huiles : minérale, d'olive et de soja à des tensions respectives de 40, 60 et 50 kV nous ont permis d'établir que l'arc a plus de difficultés à se former dans les huiles végétales que dans l'huile minérale, ce qui nous amène à penser que les huiles végétales ont un pouvoir d'atténuation de l'arc électrique supérieur à celui de l'huile minérale.

Egalement nous avons reconnu le comportement des huiles étudiées au moment de la décharge qui passe par trois étapes dont la première est une phase de pré-claquage concernant le mouvement d'huile sous forme d'ondes mécaniques qui se propagent où le front de cette onde est centré dans l'espace entre-électrode. Ce phénomène peut-être dû aux mouvements des ions qui se trouvent entre les électrodes sous l'effet du champ électrique appliqué et se propagent par le phénomène d'électro-convection ou électro-hydrodynamique (EHD) de toutes les charges de volume du liquide.

La deuxième étape où se développe l'arc électrique qui est un canal ionisé entre les électrodes accompagne de divers effets lumineux, bruits sonores, brusque augmentation du courant et chute de la tension. Pendant cette étape, une série d'arcs successifs est produite avec une différence de temps de quelques microsecondes. L'emplacement de chaque arc se situe au-dessus de l'arc précédent jusqu'à ce qu'il atteigne la limite supérieure des électrodes. A chaque fois, cette série de décharge se répète avec la différence dans le point de départ, qui est aléatoire parfois en bas et d'autres en haut. Sans oublier que la plus grande densité lamineuse est celle du premier arc de la série d'arcs, et elle diminue progressivement au fur et à mesure que les arcs montent vers le haut. La troisième étape représente la formation de bulles de gaz (ou d'air) après la naissance des arcs. Ces bulles peuvent être expliquées par : la dissociation des molécules du liquide avec libération de sous-produits gazeux sous l'effet du bombardement par des électrons ou des ions ou la vaporisation due à des décharges locales (impuretés, aspérité des électrodes...).

Egalement, les résultats obtenus de l'analyse spectrale des différents courants de décharges des trois huiles étudiées sont résumés comme suit:

- ❖ Les huiles minérales et de soja ont approximativement la même valeur de fréquence de résonance, environ 40MHz, alors que celle de l'huile d'olive est autour de 27MHz ;
- ❖ Les descripteurs de domaine de fréquence calculés: pic maximum, valeur moyenne, valeur efficace et facteur de crête pour les trois huiles ne sont pas très différents les uns des autres ;
- ❖ La densité spectrale de puissance (PSD) du courant de décharge généré dans les huiles étudiées diminue progressivement, passant d'une valeur initiale de -80 dB / Hz à proximité de -160 dB / Hz lorsque la fréquence normalisée varie entre 0 et 500 MHz ;

- ❖ Les impulsions de courant de décharge dans les huiles étudiées sont caractérisées par des durées allant de 0,5 à 0,8 μ s et leur énergie la plus importante correspond à -80 dB. Leur fréquence caractéristique est d'environ 40 MHz pour les huiles minérales et de soja et de 27 MHz pour l'huile d'olive. Ces fréquences particulières correspondent chaque fois à la fréquence de résonance pour laquelle l'huile vibre le plus avec une émission acoustique.
- .

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans cette thèse s'inscrit dans la logique globale d'une caractérisation des huiles végétales en vue de leur utilisation dans les transformateurs de puissance en remplacement des huiles minérales naphthéniques utilisées actuellement et aussi pour répondre aux exigences internationales sur la protection de l'environnement et l'utilisation des isolants liquides biodégradables. Pour cela, nous avons mené une étude comparative sur la base d'analyses et d'observations expérimentales entre deux esters naturels : huile d'olive et huile de soja, et une huile minérale.

La recherche bibliographique répartie sur le premier chapitre nous a permis de rassembler les connaissances sur les transformateurs de puissance et les isolants liquides en général, et différencier entre les principales propriétés des différentes huiles en particulier. La majorité des caractéristiques de performance des huiles végétales sont de loin supérieures à celles des huiles minérales classiques y compris la sécurité incendie, la biodégradabilité, les caractéristiques électriques et thermiques ainsi qu'une réduction significative du taux de vieillissement de l'isolation solide. Le plus grand inconvénient des transformateurs remplis avec les esters naturels est la différence de prix et leurs faibles tenus à l'oxydation.

L'étude expérimentale nous a permis d'abord de suivre le comportement des trois huiles étudiées (l'huile minérale, d'olive et de soja) sous les deux types de vieillissements thermique et électrique, ainsi qu'une caractérisation des principales propriétés requises pour un fonctionnement normal afin d'identifier les points faibles qui peuvent limiter l'utilisation de ces huiles végétales dans les applications en électrotechnique. Il en ressort globalement de ce travail que l'exposition des huiles étudiées à une température de 110°C pour une longue durée 720heures affecte pratiquement toutes les propriétés physico-chimiques, en réduisant la teneur en eau et en augmentant la viscosité des huiles végétales, mais elles restent acceptables respectivement par rapport aux exigences des normes IEC 60814 et ISO 3104. Aucun changement significatif dans la couleur des huiles végétales, cependant l'huile minérale devient brun foncé, ce qui indique son oxydation. D'autre part,

le vieillissement électrique, à faible énergie de 2500 décharges, a eu une influence plutôt positive sur l'acidité des huiles végétales.

Pour leur part, les autres propriétés physico-chimiques présentent une dégradation plus ou moins importante en l'occurrence le point d'éclair et le point d'écoulement où les huiles végétales se figent à des températures beaucoup plus hautes que l'huile minérale. Les points d'éclair 320°C et 334°C de l'huile d'olive et de soja respectivement sont très élevés par rapport à celui de l'huile minérale 146°C. Cette propriété traduit la bonne résistance au feu des huiles végétales qui est meilleure de celle de l'huile minérale. Malheureusement, nous n'avons pas pu mesurer les variations des paramètres électriques (la tension de claquage, la résistivité, la permittivité et le facteur de dissipation) des trois huiles étudiées sous les contraintes thermique et électrique chez les laboratoires disponibles au niveau d'Alger (GRTE et CREDEG). Nous avons mesuré seulement la tension de claquage initiale des trois huiles : minérale, olive et soja qui sont respectivement (30, 71, 70) kV qui sont acceptables par rapport à la norme IEC 60156.

Il ressort de la mesure des paramètres diélectriques sur une large gamme de fréquences (20Hz à 10MHz) des trois huiles étudiées qu'il y a deux types de comportement observés: pour les fréquences inférieures à 100 kHz, ces paramètres évoluent de manière différente pour chaque paramètre. Mais pour les fréquences supérieures à 100 kHz, l'évolution de chaque paramètre est la même pour les deux types de vieillissements avec une apparition de pics de résonances autour de la fréquence 4.5 MHz qui seraient dus aux oscillations harmoniques des électrons et des ions de ces huiles. Il apparaît aussi que le facteur de dissipation des deux huiles végétales est inférieur à celui de l'huile minérale. Pour cela, les huiles végétales peuvent être utilisées dans les transformateurs car le facteur de perte est même inférieur à celui de l'huile minérale.

En général, les résultats expérimentaux inattendus trouvés dans cette étude semblent encourageantes pour l'utilisation des huiles végétales étudiées comme liquide isolant dans les transformateurs. Cependant, l'addition d'antioxydants appropriés et un séchage pour diminuer les teneurs en eau restent nécessaires pour améliorer ses propriétés critiques. Des tests complémentaires sont nécessaires en particulier ceux en relation avec la stabilité à l'oxydation et les propriétés électriques de ces huiles.

Bibliographie

Bibliographie

- [Abd-03] S. Abdi, A. Boubakeur, "*Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur*", Proceedings de la 5ème Conférence Nationale de Haute Tension (CNHT), pp. 139-142, Oran (Algérie), 01-03 Décembre 2003.
- [Abd-08] S. Abdi, A. Boubakeur, A. Haddad, "*Influence of thermal ageing on dissolved gases in transformer oil*", Proceedings de la 6ème Conférence de la Société Française d'Electrostatique (SFE), pp. 227-230, Paris (France), 7-9 Juillet 2008.
- [Abd-11] S. Abdi, A. Boubakeur, A. Haddad, N. Harid , "*Influence of artificial thermal ageing on transformer oil properties*", Electric Power Components & System, Vol. 39, n°15, pp. 1701-1711, 2011.
- [Abd-12] S. Abdi, "*Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur*", Thèse de doctorat, Ecole Nationale polytechnique (Algérie), Juin 2012.
- [Abe-08] B. Abedian, M. Ma, K. N. Baker, "*Temperature Effects on the Electrical Conductivity of Dielectric Liquids*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, no. 3, pp. 888–892, 2008.
- [Abh-12] J. Abhishek, A. Pooja, "*Dielectric diagnosis of EHV current transformer using frequency domain spectroscopy (FDS) & polarization and depolarization current (PDC) techniques*", Int. J. Sci. Eng. Res., vol. 3, pp.1–11, 2012.
- [Aka-00] N. T. Aka, "*Contribution à l'étude des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides – modèles de génération et de propagation des streamers*", Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, juin 2000.
- [Ara-09] V. G. Arakelian, I. Fofana, "*Physicochemical Aspects of Gassing of Insulating Liquids under Electrical Stress*", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 25, no. 3, pp. 43–51, 2009.

-
- [Asa-14] R. Asano, S. A. Page, *"Reducing Environmental Impact and Improving Safety and Performance of Power Transformers With Natural Ester Dielectric Insulating Fluids"*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol.50, Issue. 1, pp.134-141, 2014.
- [AST-01] Norme ASTM D 445-01, *"Standard test Method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids"*, 2001.
- [Atk-10] P. Atkins, J. Paula, *"Atkins' physical chemistry"*, (Oxford University Press), pp. 622–629, 2010.
- [Aug-10] M. Augusta, G. Martins, *"Vegetable Oils, an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers-Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil"*, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 26, pp.7-13. 2010.
- [Aug-12] M. Augusta, G. Martins, A.R. Gomes, *"Comparative Study of the Thermal Degradation of Synthetic and Natural Esters and Mineral Oil: Effect of Oil Type in the Thermal Degradation of Insulating Kraft Paper"*, IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 28, Issue. 2, pp.22-28, 2012.
- [Ayd-05] A. Aydi, *"Elaboration et caractérisations diélectriques de céramiques ferroélectriques et/ou relaxeur de formule $MSnO_3-NaNbO_3$ ($M=Ba, Ca$)"*, Tèse de doctorat, Faculté des Sciences de Sfax, 2005.
- [Bac-12] K. Bacha, S. Souahlia, M. Gossa, *"Power transformer fault diagnosis based on dissolved gas analysis by support vector machine"*, Electric Power Systems Research, vol. 83, no. 1, pp. 73–79, 2012.
- [Bar-08] T. Barkat, *"Intelligence en essaim, état de l'art et applications dans les matériaux diélectriques"*, Thèse de magister, Université de Batna (Algérie), 2008.
- [Bar-94] R. Barnikas, *"Electrical insulating liquids"*, (ASTM, Montreal, 1994, 3rd edn.)
- [Bel-12] D. Belkami, *"Etude des caractéristiques de matériaux isolants pour transformateurs"*, Thèse de magister, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

- [Ben-08] R. Benamar , *"Influence du nombre de claquages sur les propriétés de l'huile de transformateur"*, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (Algérie), 2008.
- [Ber-02] N. Berger, *"Liquides isolants en électrotechnique, Présentation générale"*, Techniques de l'Ingénieur, D 2 470, 2002.
- [Ber-03] Y. Bertrand, L.C. Hoang, G. Valentin, *"Des huiles végétales Mots clés comme alternative aux huiles minérales isolantes"*, conférence MATPOST, Lyon (France), 21-23 Novembre 2003.
- [Ber-97] N. Berger, M. Randoux, G. Ottmann, P. Vuarchex, *"Revue des isolants liquides"*, ELECTRA (F) no 171 p. 32-57, avril 1997.
- [Ber-98] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A. J. Schwabe, H. Yamashita, K. Yamazawa, M. Danikas, W. G. Chadhand, Y. Torshin, *"Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics"*, IEEE Electr. Insul. Magazine, Vol.14, No. 2, pp. 6-17, 1998.
- [Bet-15] A. Betie, *"Impacts de la qualité du système d'isolation sur la condition et l'efficacité des transformateurs de puissance"*, Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Septembre 2015.
- [Bos-06] D. Boskou, *"Olive Oil, Chemistry and technology"*, Second edition, Thessaloniki, Greece, 2006.
- [Bou-05] S. Boudraa, *"Analyse des gaz dissous dans les huiles de transformateurs en utilisant la technique de l'intelligence artificielle"*, mémoire magistère, Université de Batna/ Algérie 2005.
- [Bou-06] S. Bouazabia, *"Etude des phénomènes de génération des streamers dans les diélectriques liquides"*, Thèse de doctorat, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 2006.
- [Bou-11] A. Boubakeur, *"Le vieillissement de l'huile de transformateur"*, Conférence organisé par ARELEC à l'IFEG de Ben Aknoun (Algérie), 23 novembre 2011.

-
- [Bou-17] S. Boudraa, *"Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile-Apport de l'Intelligence artificielle-"*, Thèse de doctorat, Université de Batna2 (Algérie), janvier 2017.
- [Car-15] J. Carcedo, I. Fernández, A. Ortiz, , F. Delgado, C. J. Renedo, C. Pesquera, *"Aging assessment of dielectric vegetable oils"*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.31, pp. 13 – 21. 2015.
- [CEI-03] Norme Internationale CEI 60296, *"Fluides pour applications électrotechniques – Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion"*, clause 6, version 2003.
- [CEI-05] Norme Internationale CEI 60422, *"Lignes directives de la maintenance et de la surveillance des huiles minérales isolantes en service dans les matériels électriques"*, Octobre 2005.
- [CEI-11] Norme Internationale CEI 60076-1, *"Transformateurs de puissance"*, clause 3.1.1, version 2011.
- [Che-09] D. Cherry, *"Insulating Fluids: An Overview of Dielectric Fluids Used in Transformers"*, Principal Consulting Scientist for Dielectric Fluids, October 29, 2009.
- [Cig-10] Cigre Working Group A2.35, *"Experiences in service with new insulating liquids"*, ISBN: 978-2-85873-124-4, Octobre 2010.
- [Ciu-12] A. Ciuriuc, M. S.Vihacencu, L. M. Dumitran, P .V. Notingher, *"Comparative Study on Power Transformers Vegetable and Mineral Oil Ageing"*, IEEE Conference Publications, 2012.
- [Cou-13] M. L. Coulibaly, C. Perrier, M. Marugan, A. Beroual, *"Aging Behavior of Cellulosic Materials in Presence of Mineral Oil and Ester Liquids under Various Conditions"*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 20, pp.1971-1976, 2013.

-
- [Dal-99] G. Dallemagne, *"Fluides hydraulique – Facteurs d'influence"*, Techniques de l'ingénieur, Traité BM 6012, 1994.
- [Dan-11] V. H. Dang, *"Etude des phénomènes de pré-claquage et de claquage des huiles végétales, minérales et synthétiques – caractérisation des décharges aux interfaces"*, Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon, 10 Mars 2011.
- [Dao-09] A. Daoui, A. Meslem, A. zerizer, R. Marchal, *"Identification des fréquences de résonance et du module d'élasticité par la méthode d'analyse vibratoire"*, 1^{er} International Conférence on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET oran, octobre 2009.
- [Dar-07] A. Darwin, C. Perrier, P. Foliot, *"The use of natural ester fluids in transformer"*, Proceedings of MATPOST conference, Lyon (France), Paper 0036, November 15-16, 2007.
- [Don-12] K. Dongjin, K. Kyosun, *"The Criteria of Dissolved Gas Analysis in Natural Ester Fluid"*, IEEE international conference on condition monitoring and diagnosis, pp. 901–904, 2012.
- [Du-99] Y. Du, *"Moisture equilibrium in transformer paper-oil systems"*, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 15, No. 1: p. 11-20. 1999.
- [Duy-09] C. T. DUY, *"Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension"*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier- Grenoble 1, 2009.
- [Ebe-10] R. Eberhardt, H. M. Muhr, W. Lick, B. Wieser, R. Schwarz, G. Pukel, *"Partial discharge behaviour of an alternative insulating liquid compared to mineral oil"*, Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), Page(s): 426 - 429, 2010.
- [Ems-00] A.M. Emsley, X. Xiao, R.J. Heywood, M. Ali, *"Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 2: Formation of furan products in insulating oil"*, IEE Proceedings of Science and Measurement Technology, Vol. 147, n°3, pp. 110-114, May 2000.
-

-
- [Ems-94] A. M. Emsley, G. . Stevens, "*Review of chemical indicators of degradation of cellulosic electrical paper insulation in oil-filled transformers*", IEE Proc.Sei. Meas. Technol, vol. 151, no. 05, 1994.
- [Eve-11] C. Evellin, "*Interactions entre atomes de rubidium dans des états de Rydberg et intrication par blocage de Rydberg*", thèse de doctorat, Ecole doctorale de plytechnique, Decembre 2011.
- [Fof-01] I. Fofana, H. Borsi, E. Gockenbach, "*Fundamental investigations on some transformer liquids under various outdoor conditions*", IEEE Transactions and Electrical Insulation, Vol.8N°.6, Decembre 2001.
- [Fof-07] I. Fofana, H. Borsi E. Gokenbakh, M. Farzaneh, "*Aging of transformer oil insulating materials under selective conditions*", European Transactions on Electrical Power, Vol. 17, n°5, pp. 450-470, September/October 2007.
- [Fof-08] I. Fofana, J. Sabau, "*Application of Petroleum-based oil in Power Transformer*", 23 pages, In *Natural Gas Research Progress*, Editors: Nathan David and Theo Michel, Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-1-60456-700-7, 2008.
- [Fof-10] I. Fofana, "*Insulating Oil - Another Vital Part of Transformer Body*", IEEE Seminar by Joint IEEE Ottawa-Montreal Section DEIS Chapter, June 2010.
- [Fof-13] I. Fofana, "*50 Years in the Development of Insulating Liquids*", IEEE Electr. Insul. Mag, Vol. 29, Issue. 5, pp.13-25, 2013.
- [Fox-07] N. J. Fox, G. W. Ą. Stachowiak, "*Vegetable oil-based lubricants . A review of oxidation*", Tribology International, vol. 40, pp. 1035–1046, 2007.
- [Gar-05] B. García, J.C. Burgos, A.M. Alonso, J. Sanz, "*A moisture-in-oil model for power transformer monitoring - Part I: Theoretical foundation*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, n°2, pp. 1417-1422, April 2005.
- [Gar-12] D. F. Garci, J. C. Burgos, "*Analysis of the influence of low-frequency heating on transformer drying – Part 2: Experiences with a real transformer,*"

-
- International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 38, pp. 90–96, 2012.
- [Gou-93] P. Gournay, O. Lesaint, "*A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane*", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 26, 1993.
- [Gou-94] P.Gournay, "*Génération et propagation des streamer positifs dans quelques hydrocarbures*", Thèse de doctorant, Institut national polytechnique de Grenoble, 1994.
- [Guo-17] X. Guoqiang, W. Guangning, G. Bo, Y. Haojie, "*A new method for evaluating moisture content and aging degree of transformer oil–paper insulation based on frequency domain spectroscopy*", J. Ener., Vol.10, pp. 1–15, 2017.
- [Gus-98] B. Gustaven, A. Semlyen, "*Application of vector fitting to state equation representation of transformers for simulation of electromagnetic transients*", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998.
- [Had-15] Y. Hadjadj, "*Exploration de techniques physicochimiques et conception d'un capteur en ligne pour la diagnostic des transformateurs de puissance*", Univesité du Québec, avril 2015.
- [Har-13] J. Harwood, R. Aparicio, "*Handbook of Olive Oil, Analysis and Properties*", Springer, 2013.
- [Idi-17] O. Idir, A. Reffas, B. Lehoudj, H. Moulai, A. Beroual: "*Electrical discharges influence on the dielectric properties of natural insulating oil*". IEEE 19th Int. Conf., Manchester, , pp. 1–6, 2017.
- [IEE-09] IEEE Std C57.104, "*IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*", 2009.
- [IEE-13] IEEE Std C57.152, "*IEEE guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors*", 2013

- [ISO-94] Norme ISO 3104, "*Produits pétroliers – Liquides opaques et transparents- Détermination de la viscosité cinématique et calcul de la viscosité dynamique*", octobre 1994.
- [Jim-16] M. Jimil Shah, I. Syed Haider Rizvi, I. Sravani Kota, S. Reddy Nagilla, D. Thakkar, D. Agonafer, "*Design Considerations Relating to Non-Thermal Aspects of Oil Immersion Cooling*", Conference Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), 11-17 Novembre 2016.
- [Jun-08] J. Jung, , J. Jung, "*The effect of thermal ageing on the electrical characteristics of insulating oil for Po transformers*". Int. Conf. on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, pp. 1–6, 2008.
- [Kan-01] M. Kanno, T. Suzuki, "*Changes in ECT and Dielectric Dissipation Factor of Insulating Oils Due to Aging in Oxygen*", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 8, no. 6, pp. 1048–1053, 2001.
- [Kat-90] R. Kattan, "*Étude de la formation et de la dynamique de bulles dans les hydrocarbures liquides générées par les impulsions de courant en champ électrique intense*", Thèse de Doctorat, Université Joseph FOURIER – GRENOBLE 1, France, November 1990.
- [Kat-91] R. Kattan, A. Denat, N. Bonifaci, "*Formation of vapor bubbles in non- polar liquids initiated by current pulses*", IEEE Trans. on Elec. Insul., Vol. 26, No. 4, pp. 656-662, Août 1991.
- [Ker-00] H. Kermoun, L. Benziada-Taibi, "*Phénomène relaxation diélectrique et de résonance dans les matériaux de type perovskite*", Conférence sur les Matériaux Céramiques, Bordj-El-Bahri, Alger, 27 Février 2000.
- [Kha-06] B. Khaddour, "*Modélisation du champ électrique modifié par la charge d'espace injectée*", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Novembre 2006.

- [Kha-07] I. U. Khan, Z.Wang, I. Cotton, S. Northcote, "*Dissolved Gas Analysis of Alternative Fluids for Power Transformers*", IEEE Electr. Insul. Mag., Vol.23, pp.5-14, 2007.
- [Kha-08] I. Khan, I. Cotton, S. Northcote, "*Fault gas generation in ester based transformer fluids and dissolved gas analysis (DGA)*", International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, pp. 909–913, 2008.
- [Koc-07] M. Koch, M. Fischer, P. S. Tenbohlen, "*The Breakdown Voltage Of Insulation Oil Under The Influences Of Humidity , Acidity , Particles And Pressure*", International Conference APTADM, pp. 1–6, 2007.
- [Koc-11] M. Koch, S. Tenbohlen, "*Evolution of bubbles in oil–paper insulation influenced by material quality and ageing*", IET Electric Power Applications, Vol. 5, n°1, pp. 168-174, 2011.
- [Kov-06] D.S. Kovacevic, S.P. Skundric, J.M. Lukic, "*Monitoring and diagnostics of power transformer insulation*", Journal of Thermal Science, Vol. 10, n°4, pp. 43-54, 2006.
- [Man-08] J.P. Manceau, "*Etude du phénomène de relaxation diélectrique dans les capacités Métal-Isolant-Métal*", Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 2008.
- [Lai-12] Z. Laimeche, "*Contribution à la caractérisation électrique des matériaux isolants, application aux huiles de transformateurs de haute tension*", Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algérie), 2012.
- [Lah-16] R. Lahouli, "*Etude et Conception de Convertisseur Analogique Numérique Large Bande Basé sur la Modulation Sigma Delta*", Thèse de Doctorat, École Doctorale Sciences Physiques et de l'Ingénieur de l'Université de Bordeaux, 2016.

- [Leb-15] P. Leblanc, *"Étude du phénomène d'électrisation par écoulement : impact d'un champ électrique externe sur la double couche électrique"*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2015.
- [Lef-06] A. Lefevre, *"Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs"*, Ecole Polytechniques de Nantes, 2006.
- [Lew-94] T. J. Lewis, *"Basic Electrical Processes in Dielectric Liquids"*, IEEE Trans. On Electrical Insulation, Vol. 1, No.4, pp. 630-644, 1994.
- [Lia-11] R. Liao, J. Hao, G. Chen, Ma. Zhiqin, L.Yang, *"A Comparative Study of Physicochemical Dielectric and Thermal Properties of Pressboard Insulation Impregnated with Natural Ester and Mineral Oil"*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, Issue. 5, pp.1626-1637, 2011.
- [Lia-12] R. Liao, S. Liang, L.Yang, J. Hao, *"Comparison of ageing results for transformer oil–paper insulation subjected to thermal ageing in mineral oil and ageing in retardant oil"*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, pp.825–830, 2012.
- [Lin-14] R. Lin, Y. Zhu, L. L. Tavlarides, *"Effect of thermal decomposition on biodiesel viscosity and cold flow property"* Fuel, vol. 117, pp. 981–988, 2014.
- [Liu-12] Y. Liu, J. Li, and Z. Zhang, *"Gases dissolved in natural ester fluids under thermal faults in transformers"*, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 223–226, 2012.
- [Loi-11] L. Loisel, I. Fofana, *"Influence de la qualité de l'huile isolante sur le refroidissement des transformateurs de puissance"*, Xème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes 20-22 juin 2011, Saguenay.
- [Loi-13] L. Loisel, *"Influence des produits de dégradation sur la stabilité thermique et diélectrique des fluides isolants pour transformateur de puissance"*, Exigence partielle de maîtrise en ingénierie, université du Québec, 2013.

-
- [Luc-14] C. Lucas-torres, Á. Pérez, B. Cabañas, A. Moreno : *"Study By 31 P NMR Spectroscopy Of The Triacylglycerol Degradation Processes In Olive Oil With Different Heat-Transfer Mechanisms"*, Food Chemistry, pp. 21-28. 2014.
- [Mas-99] G. Massala, *"Propagation et propriétés électriques des streamers positifs à grande distance dans l'huile minérale sous très haute tension impulsionnelle"*, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 1999.
- [Mcs-01] C. P. Mcshane, K. J. Rapp, J. Luksich, *"Aging of Paper Insulation in Natural Ester Dielectric Fluid"*, Transmission and Distribution Conference and Exposition, vol. 02, pp. 675–679, 2001.
- [Mcs-02] C.P. McShane, K.J. Rapp, J.L. Corkran, G.A. Gauger, J. Luksich, *"Aging of Kraft paper in natural ester dielectric fluid "*, IEEE Proceedings of International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), pp. 173-177, Graz (Austria), 7-12 July 2002.
- [Mil-90] H. Milos, *"Oxidation In Organique Chemistry"*, Washington, DC, USA: American Chemistry Society, 1990.
- [Mit-06] P.M. Mitchinson, P.L. Lewin, G.C. Chen, P. Jarman, *"An experiment for evaluating the scale effect of moisture on high voltage transformer insulation"*, IEEE Proceedings of International Symposium on Electrical Insulation, Canada, pp. 218-221, 11-14 June 2006.
- [Mof-00] I. S. Mofizul , T. Wu, G. Ledwic, *"A Novel Fuzzy Logic Approach to Transformer Fault Diagnosis"*, Article IEEE Transactions on Dielectrics and Elecfrical Insulation, April 2000.
- [Moh-00] F. Mohellebi, *"Analyse et régénération des huiles usagées"*, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2000.
- [Mok-04] L.Mokhnache, « Application des réseaux de neurones dans le diagnostic et la prédiction des isolation de hautes tension », Thèse de Doctorat d'Etat, Département d'Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Janvier 2004.

-
- [Mou-07] B. Moula, *"Comportement de l'huile de transformateur «Borak 22» sous tension alternative 50 Hz"*, Thèse de magister, Ecole Nationale polytechnique (Algérie), 2007.
- [Nac-09] A. Nacer, *"Caractérisation diélectrique des matériaux – application à l'huile minérale de transformateur"*, Thèse de doctorat d'état, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algérie), 2009.
- [Naw-15] A. M. Nawar, H.M. AbdEl-Khalek, , M.M. El-Nahass, *"Dielectric and electric modulus studies on Ni (II) tetraphenyl porphyrin thin films"*, Int. J. Organo Opto-Electron., Vol.1, pp. 25–38, 2015.
- [N'ch-11] J. S. N'Cho, *"Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance"*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 10 mars 2011.
- [Nod-02] T. Noda, H. Nakamoto, S. Yokoyama, *"Accurate modeling of core-type distribution transformers for electromagnetic transient studies"*, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.17, N°.4, Octobre 2002.
- [Noi-13] B. Noirhomme, M. Lessard, J. Jalbert, S. Besner, F. Brochu, E. Dupuis, H. Ireq, *"Influence of Transformer Oil Acidity on Insulating Paper Degradation"*, Electrical Insulation Conference, pp. 392–396, Ottawa June 2013.
- [Nyn-04] Nynas Naphtenics AB, *"Transformer oil handbook"*, Sweden, 2004.
- [Oom-02] T.V. Oommen, *"Vegetable Oils for Liquid-Filled Transformers"*, IEEE Electr. Insul.Mag., Vol.18, pp.6-11, 2002.
- [Oom-95] T.V. Oommen, G.L. Grune, *"Low temperature viscosity behaviour of transformer oils"*, IEEE Proceedings of Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Windings Conference, pp. 107-112, Chicago (USA), 18- 21 September 1995.
- [Orl-03] S. Orłowska, *"conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à deux et trois phase par la modélisation et la validation pratique"*, Thèse de doctorat, Ecole centrale de lyon, janvier 2003.
-

-
- [Ota-03] K. Ota, M. Miura, M. Sone, H. Mitsui, *"Conduction of water clusters in modified aged oil"*, Electrical Engineering in Japan, Vol. 145, n°2, pp. 695-701, 2003.
- [Otu-93] F. Otuszewski, *"Modélisation thermique des transformateurs de puissance de type cuirasse"*, Thèse de doctorat, Université des sciences et techniques de Lille Flandres Artois, novembre 1993.
- [Pen-09] D. Peng, D. Yang, C.F. Wang, M. Ali , *" The influence of transformer oil aging to dielectric dissipation factor and its insulating lifetime"* , IEEE Asia-Pacific Power Energy Engineering Conference (APPEEC), pp. 1-4, Wuhan (China), 27-31 March 2009.
- [Per-05] C. Perrier, *"Etude des huiles et des mélanges à base d'huiles minérales pour transformateurs de puissance- recherche d'un mélange optimal"*, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Avril 2005,
- [Per-09] C. Perrier, A. Beroual, *" Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: mineral, ester, and silicone oils"* , IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 25, No. 6, 2009.
- [Pha-05] T. Pham Hong, *" Caractérisation et modélisation du comportement diélectrique d'un matériau composite soumis à un vieillissement hydrothermique"*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 2005.
- [Pro-08] H. Provencher, *"Analyse de la réponse diélectrique du complexe papier-huile dans le transformateur de puissance"*, Thèse de magistère, L'école de technologie supérieure, 2008.
- [Prz-10] P. Przybylek, Z. Nadolny, H. Moscicka-Grzesiak, *" Bubble effect as a consequence of dielectric losses in cellulose insulation"*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 17, n°3, pp. 913-917, June 2010.
- [Puk-13] G. J. Pukel, R. Schwarz, F. Baumann, H. M. Muhr OVE, R. Eberhardt OVE, B. Wieser OVE, D. Chu, *" Power transformers with environmentally friendly and low flammability ester liquids"* , CIGRE2012, Elektrotechnik &

Informationstechnik DOI 10.1007/s00502-012-0110-4, GRE – Reprint from www.cigre.org with kind permission 2013.

- [Qot-05] R. Qotba, "*Etude expérimentale des phénomènes induits dans un liquide par une injection fortement localisée d'énergie*", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, Décembre 2005.
- [Rai-92] P. Rain, "*Etude des phénomènes prédisruptifs et disruptifs à grande distance dans l'huile minérale de transformateur sous tension alternative*", thèse de doctorant. Grenoble, France: INPG, 1992.
- [Rai-93] P. Rain, O. Lesant, R. Tobazeon, "*Phénomènes disruptifs et prédisruptifs sous tension alternative dans de grandes intervalles d'huile de transformateur*", RGE, n°1, pp. 17-25, Janvier 1993.
- [Ray-13] A. Raymon, P. S. Pakianathan, P. E. Rajamani, R. Karthik, "*Enhancing the Critical Characteristics of Natural Esters with Antioxidants for Power Transformer Applications*", IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 20, Issue. 3, pp.899-912, 2013.
- [Red-09] A. Reddaf, "*Etude et simulation du comportement des matériaux diélectriques à fréquence fixe*", Thèse de magistère, Université Ferhat Abbas-Setif, 2009.
- [Rek-09] H. M. Rekik, "*Caractérisation structurale et suivi du vieillissement par diffusion X aux petits angles d'un polymère époxyde-Contribution à l'étude des propriétés électriques*", Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Sfax Et Le Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, 2009.
- [Rou-98] T. O. Rouse, "*Mineral Insulating Oil in Transformers*", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume 14, N°3, pp 6-16, 1998.
- [Ruj-15] T. Rujun, J. Chen, Q. Wenhua, J. Jie, Z. Xin, W. Haiyan, Y. Hao, "*Dielectric relaxation, resonance and scaling behaviors in Sr₃Co₂Fe₂₄O₄₁ hexaferrite*", Sci. Rep., pp. 1–11, 2015.

-
- [Sab-98] J. Sabau, "*Determination of Solid Suspensions in Electrical Insulating Oils by Turbidimetry*", SAIT/CEA Technology Symposium Calgary (Alberta), 11-12 June 1998.
- [Sab-01] J. Sabau, "*On-line reclamation of aged transformer oils*", IEEE Insulation Conference and Electrical Manufacturing, USA, Octobre 2001.
- [San-11] J. Sanchez, "*Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance*", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [Sch-00] W. F. Schmidt, "*Liquid state electronics of insulating liquids*", Published by CRC -Press, Berlin, Germany, 2000.
- [Seg-00] Y. Segui, "*Diélectriques – Courants de conduction*", Techniques de l'ingénieur, Traité de génie électrique, D2301, Mai 2000.
- [Sha-05] F. Shahidi, "*Bailey's industrial oil and fat products*", Vol.6, Edition. 6, Copyright John Wiley & Sons, 2005.
- [Sha-11] Z. H. Shah, Q. A. Tahir, "*Dielectric Properties of Vegetable Oils*", Journal of scientific research, Vol. 3, pp. 481-492, 2011.
- [Sin-14] S. Singha, R. Asano, G. Frimpong, "*Comparative Aging Characteristics between a High Oleic Natural Ester Dielectric Liquid and Mineral Oil*", IEEE Trans. Dielectr.Electr.Insul., Vol. 21, pp.149-158, 2014.
- [Sla-13] M. E. Slama, "*Breakdown of liquids*", Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, DOI: 10.13140/RG.2.1.3920.7925, janvier 2013.
- [Spo-12] M. Spohner, "*A Study of the Properties of Electrical Insulation Oils and of the Components of Natural Oils*", Acta Polytechnica, Vol. 52, pp. 100-105, 2012.
- [Tat-13] A. Tataroglu, "*Dielectric permittivity, AC conductivity and electric modulus properties of metal/ferroelectric/semiconductor (MFS) structures*", Gazi University Journal of Science, vol. 26, pp. 501–508, 2013.

-
- [Ten-10] S. Tenbohlen, M.Koch, *"Aging Performance and Moisture Solubility of Vegetable Oils for Power Transformers"*, IEEE Trans. Dielectr.Electr.Insul., Vol.25, pp.825-830, 2010.
- [Tob-96] R. Tobazeon, *"Conduction électrique dans les liquides "*, Techniques de l'ingénieur, Traité de génie électrique, D2430, Novembre 1996.
- [Tou-16] T. Toudja, *"Etude de la problématique des mélanges d'huiles des transformateurs de puissance par l'analyse des propriétés physicochimiques et électriques"*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (Algérie), 2016.
- [Tra-09] C. Tran Duy, *"Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension"*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier- Grenoble1, 08 janvier 2009.
- [Tsi-12] M. A. Tsili, E. I. Amoiralis, A. G. Kladas, A. T. Sou, *"Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model"*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 53, pp. 188–201, 2012.
- [Van-99] T.T .Van, *"Etude de la génération des streamers dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle et alternative"*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, janvier 1999.
- [Ver-11] V. Verriere, *"Analyse électrique de diélectriques SiOCH poreux pour évaluer la fiabilité des interconnexions avancées"*, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, février 2011.
- [Vis-07] D. S. Viswanath, T. K. Ghosh, D. L. Prasad, N. K. Dutt, K. Y. Rani, *"Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data"*, Published by Springer, Netherlands, 2007.
- [Wat-91] P. K. Watson, W. G. Chadband, M. Sadeghzadeh-Araghi, *"The role of electrostatic and hydrodynamic forces in the negative-point breakdown of"*

- liquid dielectrics*", IEEE Trans. Electr. Ins., Vol. 26, No. 4, pp. 543-559, Août 1991.
- [Whi-00] A. G. Whittaker, A. R. Mount, M. R. Heal, *"Physical Chemistry"*, Edinburgh, UK: BIOS Scientific Publishers, 2000.
- [Xos-09] M. L. F. Xose, A. M. Casimiro, *"Computation method for transeits power transformers with lossy winding"*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45, N°. 3, March 2009.
- [Yan-11] L. Yang, R. Liao, S. Caixin, Z. Zhu, *"Influence of Vegetable Oil on the Thermal Aging of Transformer Paper and its Mechanism"*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 18, Issue. 3, pp. 692-700, 2011.
- [Yan-14] X. Yang, S. Qian, Q. Liu, Z. D. Wang, *"Oxidation Stability Assessment of a Vegetable Transformer Oil under Thermal Aging"*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 21, pp. 683-692, 2014.
- [Yan-17] X. Yang, N. Shawn, L. Gerard, *"Frequency domain spectroscopy measurements of oil-paper insulation for energized transformers"*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 24, pp. 1657–1664, 2017.
- [You-15] W. Youyuan, X. Kun, C. Bijun, L. Yuanlong, *"Study of the impact of initial moisture content in oil impregnated insulation paper on thermal aging rate of condenser bushing"*, Energies, pp. 1–13, 2015.

Résumé :

En vue de remplacer l'huile minérale par des huiles végétales dans les transformateurs de puissance, ce travail est porté sur une étude comparative des deux huiles végétales (l'huile d'Olive et de Soja) et une huile minérale naphthénique (Borak 22). Des études des propriétés physico-chimiques de ces huiles ont été menées sous les deux types vieillissements thermique et électrique accélérés qui sont réalisés thermiquement dans des bouteilles scellées à 110 °C pendant des durées allant jusqu'à 720h, et électriquement sous l'application jusqu'aux 2500 décharges avec une configuration plane et un espacement électrode de 2,5 mm sous des tensions continues. Ces propriétés sont les suivantes: la couleur, la densité, la teneur en eau, la viscosité, l'acidité, le point d'éclair et le point d'écoulement. Les paramètres diélectriques : le facteur de dissipation, la conductivité et la partie réelle de la permittivité relative complexe de ces huiles sont également mesurés dans une large gamme de fréquences (20Hz-10MHz) en utilisant la méthode de la spectroscopie pour les deux types de vieillissements thermique et électrique. Ce travail traite également des courants de décharge électrique générés dans ces huiles et du graphe FFT correspondant, suivi de la densité spectrale de puissance. À la fin, un spectrogramme de ces décharges de courant est présenté, illustrant comment la composition de fréquence et l'intensité de chaque fréquence changent avec le temps.

Abstract :

In order to replace mineral oil with vegetable oils in power transformers, this work is focused on a comparative study of the two vegetable oils (Olive and Soya oils) and a naphthenic mineral oil (Borak 22). Studies of the physico-chemical properties of these oils have been carried under the two types of accelerated thermal and electrical aging which are thermally aged in sealed bottles at 110°C for durations up to 720h, and electrically under application to 2500 discharges formed with a plane-plane configuration and electrode gap 2.5mm under DC voltages. These properties are: color, density, water content, viscosity, acidity, flash point and pour point. The dielectric parameters: dissipation factor, conductivity, and real part of the complex relative permittivity of these oils are also measured in a large frequency range (20Hz–10MHz) using the impedance spectroscopy method for both types of thermal and electrical aging. This work also discusses the electric discharge currents generated in these oils and the corresponding FFT graph, followed by the power spectral density. At the end, a spectrogram of these current discharges is presented, illustrating how the frequency composition and intensity of each frequency change with time.

ملخص :

من أجل استبدال الزيت المعدني بالزيوت النباتية في محولات الطاقة، يركز هذا العمل على دراسة مقارنة لزيوتين نباتيين (زيت الزيتون و زيت الصويا) وزيت معدني (Borak 22). أجريت دراسات على الخواص الفيزيائية والكيميائية لهذه الزيوت تحت نوعين من التلاشي الحراري والكهربائي المسرع؛ الذي تم حرارياً في زجاجات مغلقة عند 110 درجة مئوية لفترات تصل إلى 720 ساعة، وكهربائياً تحت تطبيق يصل حتى 2500 تفريغ باستعمال الكترودين مستويين البعد بينهما 2.5 ملم تحت جهد مستمر. هذه الخصائص هي: اللون، الكثافة، كمية الماء، اللزوجة، الحموضة، نقطة الوميض ونقطة الانسياب. لقد تم قياس الخصائص العازلة : عامل التبديد، الموصلية والجزء الحقيقي للسماحية النسبية المعقدة لهذه الزيوت في نطاق تردد واسع (20 هرتز إلى 10 ميغا هرتز) باستخدام طريقة التحليل الطيفي لكلا النوعين من التلاشي الحراري والكهربائي. يتناول هذا العمل أيضاً تيارات التفريغ الكهربائي الناتجة في هذه الزيوت والرسم البياني FFT الموافق لها، متبوعاً بكثافة القدرة الطيفية. في النهاية، تم تقديم مخطط طيفي لهذه التفريغات، والذي يوضح كيفية تغير تركيبة التردد وشدة كل تردد بدلالة الزمن.