الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique
et de l'Informatique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Spécialité : Réseaux électriques

THEME

Contrôle de l'état des huiles minérales régénérées

Proposé et dirigé par,

Dr. Abdi Sif eddine

Préparé et présenté par,

M. Gritli Djamel eddine

M. Azizi Abderrahmane

Année Universitaire 2014-2015

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

Nous remercions ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Nous rendons un hommage particulier à
Mr ABDI SIF EDDINE notre promoteur d'avoir dirigé ce travail.

Aussi nous remercions M^{me} LEILA OUMERT et M^{me} BENYAHIYA SAMIRA et tous les employés de la société SKMK qui nous ont aidés durant toute la période de stage.

Nous voudrons adresser nos vifs remerciements à tous nos professeurs de faculté de science et de la technologie qui ont contribué à notre formation.

Nous formulons notre profonde gratitude, qui nous à donner l'énergie nécessaire pour la réalisation de ce modeste projet.

Nous exprimons nos sincères remerciements
A Monsieur le Président du jury et Mrs les membres du jury qui nous ont honorés en ayant accepté d'évaluer le présent projet de fin d'études.

Nos remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin.

Dédicaces

A ma chère mère

A l'esprit de mon père

A mes frères et sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis

A mon encadreur Mr Abdi Sif Eddine.

Tous les professeurs….

Je dédie ce travail

Djamel Eddine

Dédicaces

A mes trés chèsr parents

A mon oncle mohamed

A mon frère et mes sœurs

A toute ma famille

A tous mes amis

A tous ma famille de scout faoïjeiïitissame

A mon encadreur Mr Abdi Sif Eddine.

Tous les professeurs….

Je dédie ce travail

Abderrahmane

ملخص: في هذا المشروع لإنهاء الدراسة، إننا مهتمون بمراقبة حالة تجديد الزيوت العازلة المعدنية المستخدمة في محول عالي التوتر. من أجل هذا، أجريت اختبارات التجدد، باستخدام أراضي مختلفة في مختبر تحليل ومعالجة زيوت (UTH) المحولات لشركة خدمات المحولات الكهربائية (SKMK)، البليدة. بالإضافة إلى اختبارات أخرى أجريت لرؤية مقاومة هذه الزيت المجددة للإجهاد الحراري، ومقارنته مع الزيت الجديدة. النتائج التي أظهرت أن عملية التجديد موثوقة واقتصادية، و أظهرت خصائص أفضل مماثلة لتلك التي توجد للزيت الجديد.

كلمات مفتاحية: الزيت المستعملة، معامل التبديد العازل، مؤشر الحموضة، مؤشر اللون، التجديد، الزيت المجددة، التزمين الحراري.

Résumé : Dans ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés au contrôle de l'état de la régénération des huiles minérales isolantes utilisées dans le transformateur de haute tension. Pour cela, des essais de régénération, en utilisant différents terres ont été faits au laboratoire d'Analyse et de Traitement des Huiles (UTH) de Transformateurs de SHARIKAT KHADAMAT MOUHAOUILAT0 KAHRABAIA (SKMK), Blida. En plus d'autres essais ont été réalisés pour voir la résistance de cette huile régénérée à la contrainte thermique, et ont été comparés avec de l'huile neuve. Les résultats ont montré que le procédé de régénération constitue un moyen fiable et économique, et présente des carcatéristiques meilleures et presque similaires à celles de l'huile neuve.

Mots clés : Huile usagée, facteur de perte diélectrique, indice d'acidité, indice de couleur, régénération, huile régénérée, vieillissement thermique.

Abstract: In this project of end of studies, we are interested in the State control of the regeneration of mineral insulating oils used in high voltage transformer. For this, regeneration tests, using different lands were made at the laboratory analysis and treatment of oils (UTH) of transformers of SHARIKAT KHADAMAT MOUHAOUILAT KAHRABAIA (SKMK), Blida. In addition to other tests were performed to see this oil regenerated to thermal stress resistance, and were compared with new oil. The results showed that the regeneration process is a reliable and economic, and the best details similar to those of the new oil.

Key words: waste oil, dielectric lost factor, ' acidity index, ' color index, regeneration, regenerated oil, Thermal ageing.

Table des Matières

Table des Matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des Acronymes

Introduction Générale ……...1

Chapitre I :

Huiles minérales isolantes pour transformateurs

I.1 Introduction ……2

I.2 Rôle des huiles isolantes dans les transformateurs ……2

I.2.1.Remplissage des transformateurs par les huiles isolantes ……3

I.2.2.Fonction diélectrique …….....3

I.2.3.Fonction transfert de chaleur ……4

I.3.Huiles minérales isolantes ……..5

I.3.1.Origine et composition ……...5

a- La tendance paraffinique ……6

b- La tendance naphténique ……6

c-La tendance aromatique ……..7

I.3.2.Caractéristiques des huiles minérales isolantes ……7

I.3.2.1.Caractéristiques électriques ……7

a-Permittivité …….....7

b-Conductivité et facteur de pertes diélectriques ……...8

c-Rigidité diélectrique ……9

I.3.2.2.Caractéristiques d'étude ……..9

a- Masse volumique et coefficient de dilatation volumique ……...9

b-Capacité thermique massique à pression constante ……..10

c-Conductivité thermique ……....10

d-Viscosité ……10

e-Point d'écoulement ……11

I .3.2.3.Caractéristiques de service ……...11

a-Solubilité des gaz ……..11

b-Solubilité de l'eau ……....12

c-Acidité et couleur ……..12

d-Stabilité à l'oxydation ……...12

e-Stabilité thermique ……13

f-Stabilité électrique aux décharges partielles ……..13

I.3.2.4.Sécurité d'emploi ……..14

a-Point d'éclair et point de feu ……14

b-Température d'auto- inflammation ……...14

c-Caractéristiques de combustion ……15

I.4.Vieillissement de l'huile en service ……17

I.4 Conclusion ……..17

Chapitre II :

Régénération des huiles de transformateur

II.1.Introduction ……18

II.2.Les cause de vieillissement de l'huile isolante ……..18

II.2.1.Oxydation de l'huile minérale ……..19

II.2.2.Humidité ……...20

II.2.3.Décharges partielles ……20

II.2.4.Température ……20

II.3. Effet de vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile ……..21

II.3.1. Variation du facteur de pertes diélectriques ……21

II.3.2. Tension de claquage ……21

II.3.3. Acidité ……22

II.3.4. Variation de l'indice de couleur ……....23

II.4.Régénération des huiles isolantes ……...25

II.4.1.Définition ……25

II.4.2. Intérêt économique de la régénération ……25

II.4.3.Procédés de régénération d'huile isolante ……28

II.4.4.Évolution des schémas de régénération ……...31

II.5.Conclusion ……..33

Chapitre III :

Techniques expérimentales

III.1.Introduction ……34

III.2.Essais de régénération ……34

III.2.1.Préparation des échantillons ……...34

III.2.1.2.Caractéristiques de l'huile ……34

III.2.1.3.Méthodes de régénération ……35

III.3.Dispositifs pour les mesures des caractéristiques de l'huile ……..40

III.3.1.Mesure de l'indice de couleur ……40

III.3.2.Mesure du facteur de dissipation diélectrique (tgδ), la résistivité, la permittivité relative (ε_r) ……41

III.3.3.Mesure de l'indice d'acidité ……...42

III.4.Effet de la température sur l'huile régénérée ……42

Chapitre IV :

Résultats et Interprétation

IV.1.Introduction ……...45

IV.2. Résultats de régénération de l'huile usagée ……..45

IV.2.1. Résultats de la régénération avec terre (bentonite- carbonate de sodium Na_2CO_3) ……45

IV.2.1.1. Concentration de 10% ……....45

IV.2.1.2. Concentration de 12% ……46

IV.2.1.3. Concentration de 15% ……47

IV.2.2. Résultats de la régénération avec terre (bentonite- acide chlorhydrique HCL) ……..48

IV.2.3. Résultats de la régénération avec terre (bentonite- Acide sulfurique H2SO4) ……..49

IV.3. Effet de la température sur l'huile régénérée ……50

IV.3.1. Variation de facteur de dissipation diélectrique (tg(δ)) en fonction de la température ……50

IV.3.1.1. Huile régénérée ……...50

IV.3.1.2. Huile neuve ……51

IV.3.1.3. Comparaison entre les résultats ……..52

IV.3.2. Variation de l'indice d'acidité en fonction de température ……53

IV.3.2.1. Huile régénérée ……...53

IV.3.2.2. Huile neuve ……54

IV.3.2.3.Comparaison entre les résultats ……...55

IV.3.3 Variation de l'indice de couleur en fonction de la température ……..55

IV.3.3.1. Huile régénérée ……...55

IV.3.3.2. Huile neuve ……56

IV.4. Conclusion ……57

CONCLUSION GENERALE ……58

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Evacuation de chaleur dans un transformateur ……..5

Figure I.2: L'angle de perte tg (δ) ……9

Figure II.1: Processus de vieillissement dans le système d'isolation du transformateur ……19

Figure II.2 : Variation de facteur de pertes diélectriques en fonction de temps ……...21

Figure : II.3 : Variation de la tension de claquage en fonction de temps ……..22

Figure. II.4 : Variation de l'acidité de l'huile en fonction du temps pour différentes températures de vieillissement ……...23

Figure II.5 : Exemple de courbe d'une régénération d'huile ……28

Figure II.6 : Re-raffinage par le procédé Acide Terre ……...31

Figure II.7 : Re-raffinage par le procédé acide-terre ……31

Figure II.8 : Distillation sous vide et hydrofinition ……...32

Figure II.9 : Select propane et hydro finition ……32

Figure III.1 : Procédure de chauffage de l'huile ……35

Figure III.2: Structure de la montmorillonite ……36

Figure III.3: Système de filtration ……39

Figure III.4 : Procédure de régénération de l'huile usagée ……40

Figure III.5 : LOVIBOND- PFX 195 utilisé dans la mesure de l'indice de couleur …….41

Figure III.6 : DIELTEST- DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique (tgδ) ……...41

Figure III.7 : Système de neutralisation ……42

Figure IV.1. Variation de tg (δ) de l'huile régénérée en fonction de la température …….50

Figure IV.2. Variation de tg (δ) de l'huile neuve en fonction de la température ……...51

Figure IV.3. Comparaison entre les facteur de dissipation des huile ……52

Figure IV.4. Variation de l'indice d'acidité de l'huile régénérée en fonction de la température ……53

Figure IV.5. Variation de l'indice d'acidité de l'huile neuve en fonction de la température ……54

Figure IV.6. Comparaison de l'indice d'acidité en fonction de la température ……..55

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Les différentes caractéristiques des huiles minérales isolantes selon la norme CEI 60296 ……16

Tableau II.1 : Variation de l'indice de couleur de l'huile en fonction du temps pour différentes températures de vieillissement ……..24

Tableau II.2 : Valeurs limites recommandées pour la régénération ……...27

Tableau III.1:Caractéristiques de l'huile usagée ……34

Tableau III.2:Caractéristiques de l'huile régénérée ……43

Tableau III.3:Caractéristiques de l'huile neuve ……..43

Tableau IV.1 : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-Na2CO3) à une concentration de 10% ……...46

Tableau IV.2 : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-Na2CO3) à une concentration de 12% ……...46

Tableau IV.3 : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-Na2CO3) à une concentration de 15% ……...47

Tableau IV.4 : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-HCL) …..48

Tableau IV.5 : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite- H_2SO_4) ...49

Tableau IV.6 : La couleur de l'huile régénérée en fonction de la température ……...55

Tableau IV.7 : La couleur de l'huile neuve en fonction de la température …….56

LISTE DES ACRONYMES

LISTE DES ACRONYMES

tan (δ) : Facteur de dissipation ou facteur de pertes diélectrique.

Cp : Nombre de carbones paraffiniques.

CN : Nombre de carbones naphténiques.

ε : permittivité absolue de l'huile.

ε_0 : permittivité du vide.

ε_r : permittivité relative de l'huile.

C : Capacité.

R : Résistance.

W : Pulsation.

ρ_θ : Masse volumique à une température θ .

ρ_{20} : Masse volumique à une température 20°C.

α_v : coefficient moyen de dilatation volumique du liquide au voisinage de la températureθ.

C_p : capacité thermique massique à pression constante.

ρ_{15}: masse volumique à 15°C.

S : Coefficient de solubilité.

V_g : Volume du gaz.

V_h : Volume d'huile.

G : Coefficient de Gassing.

IFP : Institut Français du Pétrole.

UTH : Unité Traitement des Huiles.

SKMK : Sharikat Khadamat Mouhaouilat Kahrabaia.

IC : Indice de Couleur.

IA **:** Indice d'Acidité**.**

TE : Teneur en Eau.

Na_2CO_3 : Carbonate de sodium.

HCL : L'acide chlorhydrique.

H_2SO_4 : L'acide sulfurique.

KOH : Solution de potasse alcoolique.

M : Masse moléculaire de la solution KOH (56.1 g/moles),

m : Masse de l'huile (g),

V : volume en ml de KOH, nécessaire pour l'obtention de la neutralisation.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les transformateurs de puissance sont des composants essentiels des systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils constituent l'un des éléments les plus chers et il est donc fondamental qu'ils fonctionnent correctement durant de nombreuses années.

La plupart des transformateurs de puissance à travers le monde sont remplis de liquides isolants. Ces liquides permettent d'assurer aussi bien l'isolation électrique que le transfert de chaleur.

En effet, en plus de leurs propriétés diélectriques, ils ont de bonnes propriétés de dissipation de chaleur comparés aux isolants solides et gazeux. L'huile minérale constitue le liquide le plus communément employé dans les transformateurs de puissance ; d'une part pour ses propriétés physico-chimiques, et d'autre part pour son faible coût [6].

La dégradation des huiles isolantes au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement. Le vieillissement se traduit par une chute des caractéristiques électrique et physico-chimique de l'huile.

La régénération est un ensemble de procédés permettant la production à partir d'une charge d'huile usagée, une ou plusieurs huiles de base. Le recyclage des huiles usagées permet l'économie de recourir à la consommation de nouvelles quantités d'huiles neuves. Par conséquent, la régénération se présente comme étant une autre forme d'économie d'énergie et de lutte contre la pollution de l'environnement.

L'objectif visé par notre travail consiste à étudier et contrôler l'état de l'huile régénérée avec différentes terres utilisées lors de la régénération, et de voir sa résistance aux différentes contraintes, plus précisément la contrainte thermique.

Notre mémoire est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre concerne le rôle des huiles minérales isolantes pour transformateur et les caractéristiques électriques et physico-chimiques de l'huile.

Le deuxième chapitre est consacré aux causes du vieillissement de l'huile isolante, et à l'effet de ce vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile. En plus l'utilité de la régénération et les différents procédés de régénération des huiles isolantes.

Dans le troisième consacré aux techniques expérimentales, nous avons présenté les essais de régénération de l"huile usagée et les appareils utilisées pour les différentes mesures.

Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus et l'interprétation de ces résultats.

Nous terminerons notre étude par une conclusion.

CHAPITRE I :

HUILES MINERALES ISOLANTES POUR TRANSFORMATEURS

I.1.Introduction :

L'industrie électrique fait un grand usage d'huiles isolantes. En effet, ces dernières contribuent à l'élaboration de matériels électriques très divers tels que les transformateurs, les condensateurs, les câbles et les disjoncteurs etc… Les tensions nominales dans ces appareils s'étendent de quelques centaines de volts à un millier de kilovolts.

Les huiles diélectriques sont classées selon leur origine en huiles minérales, huiles végétales et huiles de synthèses. Les huiles minérales sont des produits naturels obtenues directement par raffinage de bruts pétroliers, elles sont les plus répandues en industrie d'isolation électrique en raison de leur coût de revient réduit. Ces huiles utilisées comme imprégnant d'isolation solide ou comme produits de remplissage de matériels électriques, ont notamment deux fonctions principales : l'isolation électrique et le transfert thermique.

Les huiles minérales isolantes peuvent être soumises à plusieurs contraintes, électriques, thermiques, chimiques etc… Malgré les avantages qu'ils présentent, ces diélectriques se détériorent progressivement sous l'action combinée ou séparée de ces contraintes. L'analyse des performances de l'huile en service peut être appréciée par le diagnostic des différentes caractéristiques électriques et physico-chimiques. Qui nous renseignent du degré de détérioration de l'huile. **[1]**

I.2.Rôle des huiles isolantes dans les transformateurs :

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers: transformateurs (de puissance, de distribution, de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc…**[2]**. Les volumes d'huiles employés varient de quelques litres pour les condensateurs, à plusieurs dizaines de milliers de litres pour les transformateurs de puissance. 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 Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à assurer l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas des transformateur.

I.2.1.Remplissage des transformateurs par les huiles isolantes :

Les transformateurs remplis d'huile ou «immergés» ont été développés depuis plus d'un siècle. Cette technologie est toujours très utilisée dans les transformateurs de puissance, et ce contrairement aux transformateurs de distribution, qui peuvent être secs. Différentes raisons expliquent cette préférence :

- Par rapport aux solides, les liquides refroidissent et isolent à la fois le transformateur. Ainsi, les transformateurs immergés sont plus compact que les transformateurs secs de même puissance.
- Les solides permettent d'obtenir des performances diélectriques équivalentes aux liquides, mais à des coûts beaucoup plus élevés.
- Les isolants solides utilisés seuls présentent des risques énormes aux décharges partielles (inclusions gazeuses) pour les niveaux de tension des transformateurs de puissance.
- Les analyses d'huiles (teneur en eau, analyse de gaz, etc…) permettent de diagnostiquer l'état du transformateur, à moindre coût.
- Les transformateurs immergés sont moins bruyants que les secs et provoquent ainsi moins de nuisance sonore.

I.2.2.Fonction diélectrique :

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

- Soit par le diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple).
- Soit 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.
- Soit par une isolation mixte : combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides ; c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.

Les principales propriétés qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction de diélectrique sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou facteur de perte (tan δ), la permittivité et la résistivité. Ces quatre caractéristiques, qui dépendent de la température et de la fréquence pour une tension donnée, sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur.

I.2.3.Fonction transfert de chaleur :

Bien que son rendement soit exceptionnellement élevé (99 à 99.9%), un transformateur ne peut échapper à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur nécessitant ainsi le refroidissement de l'appareil. En raison des pertes, les températures de chacun des éléments s'élèvent jusqu'à établissement d'un équilibre entre les vitesses de production et d'évacuation de la chaleur

La chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile, vers les radiateurs extérieurs (figure 1.1). Un dispositif de refroidissement bien dimensionné permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée. Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique **[2]**, et les principales caractéristiques qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

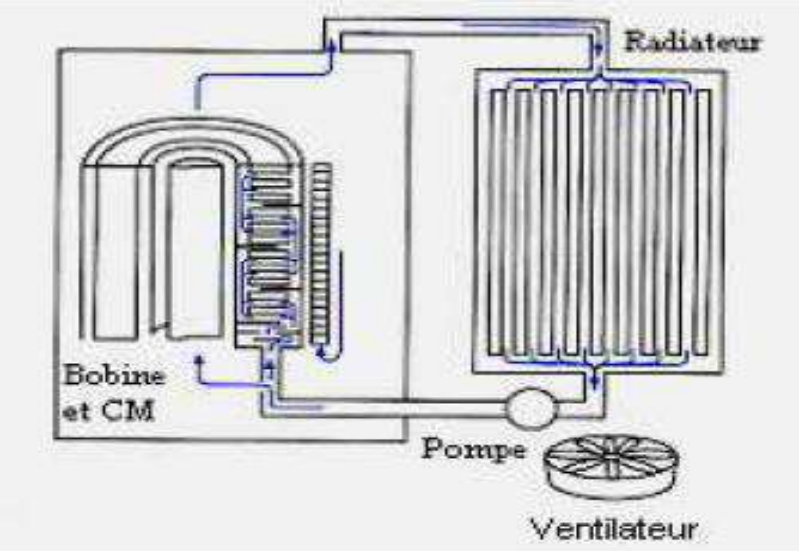


Figure I.1 : Evacuation de chaleur dans un transformateur **[2]**.

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arc 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, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, il ne faut pas oublier la fonction d'isolant du matériel solide au sens strict du terme, c'est à dire, qui est celle de ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique.

I.3.Huiles minérales isolantes:

I.3.1.Origine et composition :

L'utilisation des huiles minérales dans les matériels électriques remonte pratiquement au début de leur production industrielle. Elles ont deux fonctions principales : l'isolation électrique et le transfert thermique.

Les huiles minérales isolantes sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, substances naturelles d'origine géologique, débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau, etc.). Les pétroles sont composés d'hydrocarbures saturés paraffiniques (alcanes) et naphténiques (cycloalcanes), qui constituent la matrice liquide fondamentale, et d'hydrocarbures aromatiques (dont des aromatiques ramifiés par des chaînes alkylées). Ils contiennent également des hydrocarbures hétérocycliques à

base de soufre, d'azote et d'oxygène, dont les teneurs ne dépassent pas 10 % **[3]**, on les désigne sous le terme de bruts. Ils sont extraits dans toutes les régions du monde et plusieurs centaines de types différents ont été mis en évidence.

L'amélioration progressive des procédés de raffinage des bruts a abouti à l'obtention d'huiles minérales de plus en plus performantes. Ces améliorations, associées aux évolutions technologiques, ont permis de réduire progressivement les volumes d'huiles dans les appareils.

Les huiles minérales contiennent près de 3000 produits différents, dont 90% n'ont pas encore été identifiés. En première approximation, elles sont considérées comme paraffiniques ou naphténiques suivant que le rapport du nombre de carbones paraffiniques (Cp) au nombre de carbones naphténiques (CN) est supérieur ou inférieur à 2 **[3]**.

a- La tendance paraffinique :

La tendance paraffinique est représentée par l'ensemble des hydrocarbures saturés à chaîne droite ramifiée ou non, mais non cyclique.

Les paraffines qui sont plus intéressantes se rencontrent en qualité appréciable dans les fractions de bruts paraffiniques. Alors que les paraffines à chaîne droite de poids moléculaire élevés sont retirées par déparaffinage. Les caractères de cette famille d'huiles riches en hydrocarbures paraffiniques sont [3] :

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

b- La tendance naphténique :

Les types de naphtènes ayant seulement quelques cycles par molécule et une prépondérance d'atomes de carbone sous forme de longues chaînes paraffiniques possèdent probablement les propriétés qui sont les plus désirées dans les huiles de graissage. Les caractéristiques physiques et chimiques de ces hydrocarbures se traduisent en particulier par **[3]** :

- Une densité relativement élevée pour une viscosité donnée.
- Des variations assez rapides de la viscosité en fonction de la température.
- Une plus grande volatilité que les fonctions paraffiniques correspondantes de même viscosité.
- Un pouvoir solvant relativement élevé.

c-La tendance aromatique :

La tendance aromatique présente des caractères encore plus prononcés que les hydrocarbures naphténiques. Du fait de leur densité élevée et de leur indice de viscosité faible, ces fractions présentent une importance limitée dans la composition des huiles finies. Elles sont faiblement oxydables, ce qui provoque la formation de produits résineux ou asphaltiques accompagnés de dérivés corrosifs **[3]**.

I.3.2.Caractéristiques des huiles minérales isolantes :

Les propriétés des liquides sont généralement divisées en propriétés physiques, chimiques et électriques. Cependant, certaines propriétés appartiennent indifféremment à l'une ou l'autre de ces divisions. Les propriétés chimiques relatives aux applications électriques étant limitées, et les propriétés électriques étant prépondérantes. La division se fait en caractéristiques électriques, caractéristiques d'étude, caractéristiques de service et autres caractéristiques **[4]**.

I.3.2.1.Caractéristiques électriques :

Les caractéristiques électriques des liquides en général, dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire etc…), et de leurs conditions d'utilisation au conditionnement (filtration, déshydratations etc…). On cite : la permittivité, la conductivité, le facteur de pertes diélectriques et la rigidité diélectrique.

a-Permittivité :

C'est une caractéristique électrique liée à la formulation du liquide, elle dépend essentiellement de sa structure chimique. Pour une huile diélectrique, la permittivité définit la possibilité de libérer des charges sous l'action d'un champ électrique **[4]**.Elle résulte des phénomènes de polarisation électronique et atomique.

La permittivité relative ε_r est définie comme le rapport ($\varepsilon/\varepsilon_0$) de la permittivité absolue ε du liquide à celle du vide. La permittivité relative des huiles varie peu avec la fréquence.

$$\varepsilon_0 = (1/36.\pi).10^{-9} = 8.85.10^{-12} \text{ F/m} \qquad \textbf{(I .1)}$$

La permittivité relative décroît avec la température et la fréquence du courant. Cependant, pour les produits polaires et visqueux, on observe, au-dessous d'une certaine température, une brusque chute de la permittivité due à l'immobilisation des dipôles **[1]**.

b-Conductivité et facteur de pertes diélectriques :

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes électriques qui se traduisent par un échauffement plus au moins important du liquide. La cause principale de ces pertes est de toute évidence, la présence de courant qui traverse le liquide. Ce courant caractérisant la conductivité électrique du fluide est le résultat de déplacement des charges libres existantes (positive et négative), sous l'effet du champ électrique **[1]**.

Aux faibles champs, la conduction présente généralement un caractère ohmique. Aux champs élevés, la conduction des isolants perd son caractère ohmique. Plusieurs théories rendent compte des courants élevés selon qu'ils sont contaminés ou non par des impuretés **[1]**.

En pratique, pour mieux caractériser un diélectrique du point de vue pertes, il est usuel d'utiliser la tangente de l'angle de perte tg (δ) qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui résulte lorsque le diélectrique se compose exclusivement du matériau isolant. Cette caractéristique est une fonction croissante de la température et dépend de la tension **[1]**.

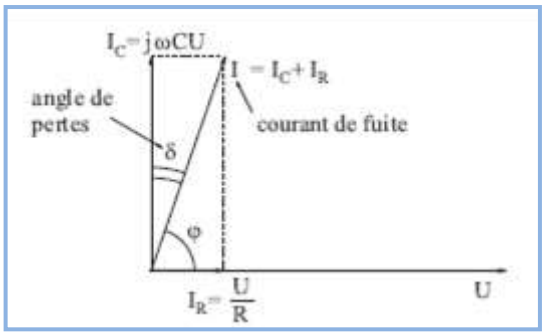


Figure I.2 : L'angle de perte (δ) **[19]**.

Sachant que beaucoup de liquides isolants ont des dipôles dans leurs structures moléculaires, la polarisation par orientation a une importance particulière. En effet, elle est la cause majeure des pertes par polarisation et responsable de la dépendance fréquentielle de ε_r et de tg (δ) **[1]**.

c-Rigidité diélectrique :

La rigidité diélectrique à fréquence industrielle est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à l'huile sans décharge **[1]**.Comme la conductivité, la rigidité diélectrique à fréquence industrielle est une caractéristique de conditionnement du liquide mais aussi de sa formulation.

Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans les conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, distance et nature sont spécifiées, d'où son nom de « tension de claquage » **[1]**.

I.3.2.2.Caractéristiques d'étude :

a- Masse volumique et coefficient de dilatation volumique :

La masse volumique ρ_0 exprimée en kilogrammes par mètre cube, est le rapport d'une masse m du liquide à son volume v, mesurée à la températureθ. Elle est déterminée à 20°C, et diminue quand la température augmente [1].

La masse volumique est obtenue à 20 °C par la formule suivante :

$$\rho_{20} = \rho_\theta [1 + \alpha_v (\theta - 20)] \qquad \textbf{(I .2)}$$

Où :

ρ_θ : Masse volumique à une température θ ;

α_v : Coefficient moyen de dilatation volumique du liquide au voisinage de la température θ.

La masse volumique est une caractéristique intrinsèque d'un produit, elle dépend de la composition chimique. Ainsi, les huiles minérales parrafiniques ont une masse volumique plus faible que les huiles naphténiques **[1]**.

Le coefficient de dilatation volumique α_v définit la variation de la masse volumique en fonction de la température **[1]**.

b-Capacité thermique massique à pression constante :

Pour les huiles minérales, la capacité thermique massique à pression constante croit avec la température et décroît avec la masse volumique suivant la relation suivante [1] :

$$C_p = (1684 + 3{,}39.\theta) / \sqrt{\rho_{15}} \qquad [\text{J/kg . K}] \qquad \textbf{(I .3)}$$

Avec ρ_{15}: masse volumique à 15°C.

À 20°C, la capacité thermique varie de 1000 à 2300 J / (kg.K).

c-Conductivité thermique :

Mesurée en Watt par mètre Kelvin, elle exprime le flux thermique s'écoulant, en régime permanent sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent.

La valeur moyenne est: $\lambda = 0{,}14$ [W/ (m.K)] [1].

d-Viscosité :

La viscosité d'un fluide traduit les forces qui opposent les molécules de ce fluide à une force tendant à les déplacer. C'est donc, la résistance au mouvement que

manifestent tous les fluides. L'indice de viscosité exprime la variation de la viscosité en fonction de la température. Les huiles pour transformateur ont un indice très bas ; ce qui permet une circulation plus facile, donc un refroidissement plus efficace.

La viscosité et sa variation avec la température sont des paramètres de première importance pour le transfert thermique. En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil, pour refroidir les parties actives chaudes **[1]**.

e-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).

Les liquides utilisés se figent généralement à températures pouvant aller de - 60°C (polybutènes, huiles silicones), à - 30°C (huile minérale), sans parler des liquides de synthèse ayant un haut point d'écoulement (+9°C pour les chlorobiphényles), et des huiles pour câbles à matière non migrante dont les points d'écoulement sont de 80 à 100°C **[1]**.

Le point d'écoulement est défini comme la température la plus basse, pour laquelle un liquide peut couler lorsqu'il est refroidi à des conditions fixées. 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) **[1]**.

Les huiles à point d'écoulement plus bas sont obtenues à partir des coupes naphténiques.

I .3.2.3.Caractéristiques de service :

a-Solubilité des gaz :

Tous les gaz se dissolvent plus au moins dans l'huile minérale, comme d'ailleurs dans les liquides. La plus grande valeur du volume de gaz qui peut être mis en solution à la saturation est appelé coefficient de solubilité **S**. Ce coefficient est défini comme étant le rapport du volume du gaz dissous au volume d'huile et est exprimé en pour-cent.

$$S = V_g / V_h \qquad \textbf{(I.4)}$$

V_g : volume du gaz**.**

V_h : volume d'huile.

b-Solubilité de l'eau :

Les propriétés électriques des liquides sont affectées par leur teneur en eau. Cette dernière dépend de la température et de la pression partielle d'eau dans l'atmosphère au-dessus du liquide. La solubilité de l'eau dans l'huile dépend de la composition chimique de celle-ci. Elle croit avec la concentration en hydrocarbures aromatiques. Dans le cas d'une huile vieillie, les produits de dégradation augmentent la quantité d'eau qu'elle peut contenir **[1]**.

c-Acidité et couleur :

Dans les huiles neuves, on ne constate pas de présence d'acides minéraux, mais celle d'acides organiques.

L'acidité d'une huile neuve est très faible, elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile. 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 se précipitent **[1].**

La couleur est une propriété intrinsèque de l'huile neuve. Elle a une relation avec les hydrocarbures qui constituent l'huile. Elle permet d'apprécier la qualité des huiles neuves et constitue un moyen efficace pour surveiller l'acidité des huiles en service. Elle renseigne également sur le vieillissement de l'huile, puisque celle-ci devient plus foncée avec l'âge **[1]**.

d-Stabilité à l'oxydation :

On désigne par oxydation, un ensemble de réactions complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissout. La vitesse des réactions d'oxydation croit avec la température et la concentration en oxygène. Les consequences de l'oxydation de l'huile sur l'isolation sont **[4]**:

- Une mauvaise évacuation de la chaleur par augmentation de la viscosité ;
- Une augmentation des pertes diélectriques et de la conductivité ;

- Une corrosion des pièces métalliques ;
- Une dégradation plus rapide de l'isolation cellulosique.

e-Stabilité thermique :

La stabilité thermique concerne généralement les matériaux en association avec l'huile. Cependant, la connaissance du comportement de l'huile seule présente de l'intérêt dans le cas de points chauds hors bobinage. L'oxygène joue un rôle prépondérant dans la décomposition thermique des huiles, pour des températures de 175°C à 235°C.

Les huiles minérales sont stables jusqu'à des températures de 110°C ou 120°C [4].

f-Stabilité électrique aux décharges partielles :

Sous l'action d'un champ électrique intense et par l'intermédiaire de décharges partielles dans des occlusions gazeuses qui se forment ou qui préexistent, les liquides se décomposent en donnant des gaz.

La stabilité électrique, désignée sous le vocable Gassing, s'évalue par le coefficient de Gassing (G). Deux méthodes indiquent, suivant les conditions d'essai, si les isolants liquides sont des absorbeurs ou des émetteurs de gaz. Le comportement au Gassing d'un isolant liquide est particulièrement fonction de sa composition chimique, mais des variations de certains paramètres d'essais peuvent modifier les résultats de façon considérable. Ces deux méthodes se différent par leurs conditions d'essais. G_A exprimé en millimètres cube par minute est positif ou négatif suivant qu'il y ait émission ou absorption de gaz.

Dans le cas d'arc électrique, et donc de températures très élevées (supérieure à 2000°C), il n'y a pas de liquides qui puissent résister. La nature des gaz formés et leurs proportions relatives permettent de caractériser la sévérité de la contrainte **[4]**.

I.3.2.4. Sécurité d'emploi :

La sécurité d'emploi des liquides isolants concerne les risques d'incendies et d'explosions, dont ils pourraient être la cause de la santé des individus et les risques pour l'environnement.

Le danger d'incendie repose sur des caractéristiques d'inflammabilité (point d'éclair, point de feu, température d'auto inflammation) et certaines caractéristiques de combustion (indice d'oxygène, quantité de chaleur dégagée).

Le danger d'explosion est lié à la nature des gaz produits par décomposition des liquides sous arcs électriques et points chauds, hydrogène, méthane et acétylène étant les principaux gaz concernés **[4]**.

a-Point d'éclair et point de feu :

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.

En poursuivant le chauffage, l'expérience montre qu'une combustion permanente s'établit en présence d'une flamme à partir d'une certaine température qui correspond au point de feu du liquide. Les liquides ininflammables n'ont pas de point de feu.

b-Température d'auto- inflammation :

La température d'auto-inflammation d'un liquide est la température minimale à laquelle se produit une combustion instantanée, elle peut être supérieure à celle du point d'éclair. Cette température correspond au comportement d'un liquide dans un incendie, alors que le point de feu caractérise des limites thermiques de service (par exemple, 105 °C pour une isolation papier-huile) **[1]**.

c-Caractéristiques de combustion :

Le point de feu permet de distinguer les liquides inflammables et les liquides ininflammables, situation simple quand la construction électrique disposait seulement d'huiles minérales et d'Askarels. L'interdiction des Askarels et l'apparition de liquides de remplacement pose le problème de l'inflammabilité en termes nouveaux. Ces liquides de remplacement ont un point de feu élevé (> 300 °C) qui peut réduire les risques d'incendie, mais, quoique dits peu inflammables, ils n'en brûlent pas moins et leur comportement dans les matériels pris dans un incendie pose problème. Pour répondre à cette interrogation, les caractéristiques de combustion (indice limite d'oxygène, capacité thermique de combustion, dégagement de fumées) sont maintenant considérées, associées en outre à la corrosivité des produits de combustion et à leur toxicité **[1]**.

Le tableau ci-dessous présente les différentes caractéristiques des huiles minérales isolantes selon la norme CEI 60296 **[5]**.

Caractéristiques		**Classe (1)**		
		I et IA	***II et II A***	**III et III A**
Viscosité Cinématique (2)	+40°C +20°C +15°C -30°C -40°C	C(mm^2/s ou cSt) ≤ 16.5 (≤ 40) ≤ 800	≤ 11 (≤ 25) ≤ 1800	≤ 3.5 (≤ 6) ≤ 150
Point de feu en coupe ouverte (°C)		**Non spécifié**		
Point d'écoulement (°C)		≤ -30	≤ -45	≤ -60
Aspect		**Limpide et sans matières en suspension ni dépôts**		
Masse volumique à 20°C (kg/m^3)		≤ 895		
Tension interfaciale à 25°C (Essais facultatif) (°C)		≥ 40.10^{-3}		
Indice de neutralisation sur huile neuve (d'acidité) [(mgKOH/g)]		≤ 0.03		
Souffre corrosif		**Non corrosif**		
Teneur en eau (essais facultatif) (mg/kg)		(citerne : < 30 ; fût : < 40)		
Additifs antioxydants		Aucun pour les huiles non inhibées ; type et concentration doivent être indiquées pour les huiles inhibées		
Stabilité à l'oxydation des huiles inhibées Indice de neutralisation après essais d'acidité [(mgKOH/g)] Dépôt en masse %		0.40 0.10		
Tension de claquage A la livraison (kV) Huiles traitée (kV)		 ≥ 30 ≥ 70		
Facteur de pertes diélectriques (à 90°C)		≤ 0.03		
classe I, II, III huiles non inhibées classe IA, IIA, IIIA huiles inhibées (2) Les valeurs entre parenthèses correspondent à des essais facultatifs				

Tableau I.1 : *Les différentes caractéristiques des huiles minérales isolantes selon la norme CEI 60296*

I.4.Vieillissement de l'huile en service :

Le vieillissement est tout phénomène se traduisant par une évolution lente et irréversible des propriétés du matériau. Ces changements affectent considérablement les performances de l'isolant et réduisent sa durée de vie. Le terme vieillissement n'implique pas un mécanisme précis à cause de la complexité de la composition chimique du matériau **[6]**.

Le processus de dégradation d'un isolant liquide met souvent en jeu des facteurs extérieurs tels que l'atmosphère et la température qui ont pour effet la présence de gouttelettes d'eau, des bulles gazeuses et des contaminants et impuretés **[6]**.

Le vieillissement influe directement sur les caractéristiques de huile, le facture de pertes diélectrique augment, la tension de claquage et la résistivité diminue, la teneur en eau et l'acidité augment, et la viscosité diminue.

I.4.Conclusion :

Il ressort de ce première chapitre que le choix d'un liquide, destiné à l'isolation électrique, est basé sur les propriétés électriques, la capacité à évacuer la chaleur et de sa sécurité d'emploi.

La capacité d'une huile à évacuer la chaleur est une caractéristique à ne pas négliger car elle permet d'éviter la surchauffe du transformateur, et de diminuer ainsi la dégradation prématurée de certains matériaux sensibles aux hautes températures (telle que la cellulose).

Les huiles minérales isolantes présentent les meilleures caractéristiques d'isolation et de refroidissement, c'est pour cette raison qu'elles sont très utilisées dans le domaine de haute tension.

CHAPITRE II :

REGENERATION DES HUILES DE TRANSFORMATEUR

II.1.Introduction :

L'huile isolante est soumise aux conditions physiques et chimiques imposées par l'environnement ; les contraintes qui en résultent peuvent provoquer des dégradations spécifiques ou aggravés qui permet perturber le fonctionnement de transformateur.

La dégradation des huiles isolantes au cours du temps est connue sous le nom de vieillissement. Le vieillissement se traduit par une chute des caractéristiques électrique et physico-chimique de l'huile.

Une des meilleures caractéristiques des liquides par rapport aux solides est la régénération, c'est un procède chimique qui permet d'améliorer les caractéristiques dégradés pour arriver à un stade proche de l'état neuve.

II.2.Les cause de vieillissement de l'huile isolante :

Les principaux agents présents dans les transformateurs, susceptibles de dégrader les huiles isolantes (et la cellulose), sont l'oxygène (présent sous forme dissoute dans l'huile) et l'humidité (présente dans le papier, même après séchage, il reste une quantité d'humidité, supérieure à 0,2% en masse).

L'oxygène et l'humidité amènent respectivement la dégradation de l'huile par oxydation et hydrolyse. A ces deux facteurs de vieillissement « naturels », s'ajoutent autres catalyseurs qui sont la température (pyrolyse) et le champ électrique. La présence des matériaux de construction de l'appareil, tels que le fer, le cuivre ou la cellulose viennent s'ajouter aussi comme catalyseur de vieillissement **[2]**.

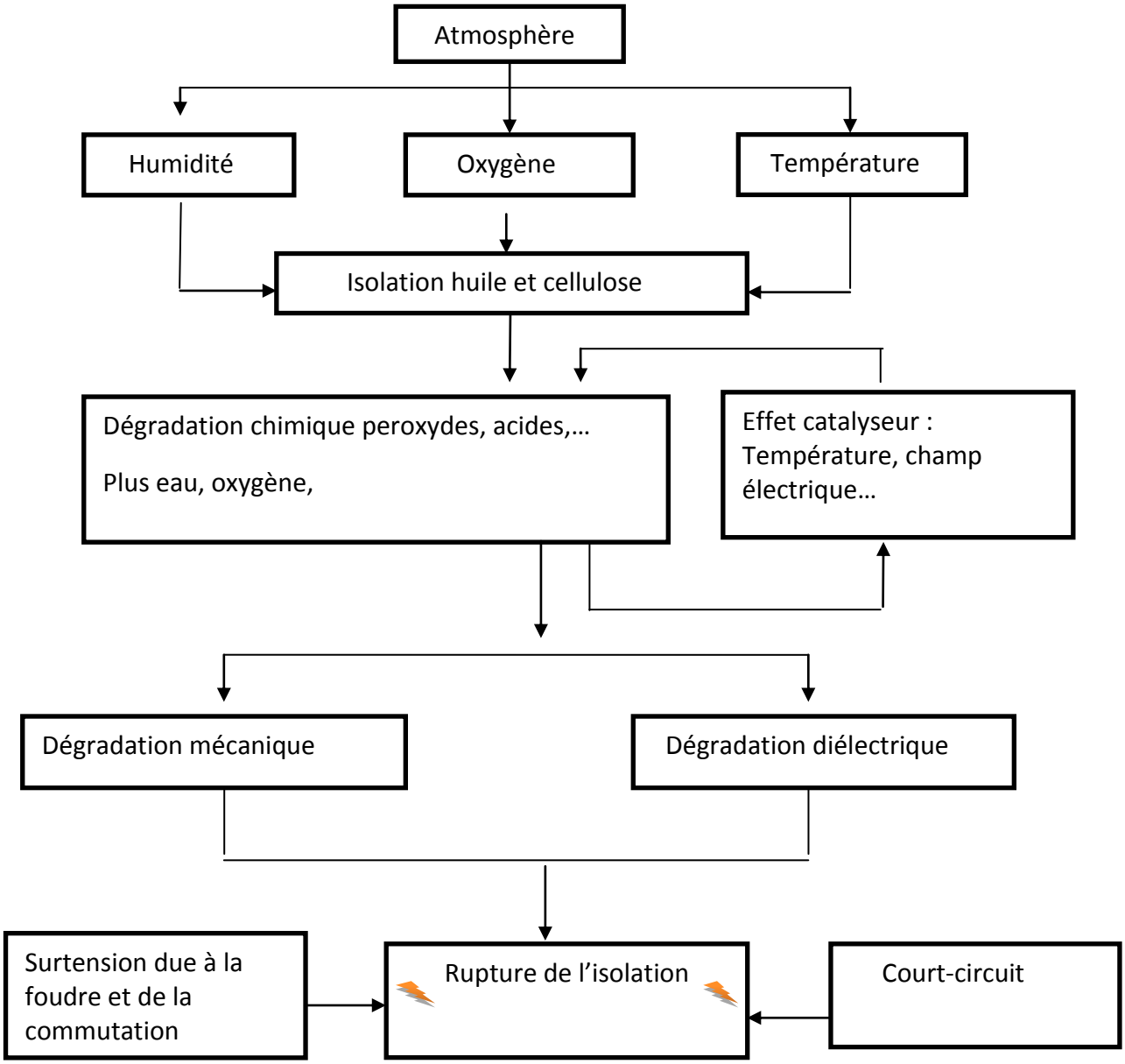


Figure II.1 : Processus de vieillissement dans le système d'isolation du transformateur **[13]**.

II.2.1.Oxydation de l'huile minérale:

L'oxydation constitue le facteur prédominant du vieillissement des isolants liquides, et plus particulièrement dans celui des huiles minérales. On désigne ainsi un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissous.

L'oxydation des huiles minérales croit avec la température et la concentration en oxygène, la vitesse de réaction est multipliée par 2, approximativement tous les 8 à 10°C, à partir de 60°C **[2]**.

II.2.2.Humidité :

Ce phénomène est d'autant plus prononcé dans les huiles isolantes car ces dernières ont une faible solubilité de l'eau. Avant le remplissage du transformateur, l'huile est séchée pour atteindre une faible teneur en humidité. À partir de ce moment, cette teneur en humidité va continuellement augmenter pour différentes raisons [2].

Les deux principales sources d'augmentation de la teneur en eau de l'huile sont :

- la pénétration d'humidité provenant de l'atmosphère du fait que les transformateurs de puissance sont souvent à air ouvert.
- la dégradation de la cellulose apporte de l'eau car bien que cette dernière soit séchée, il subsiste toujours au moins 0.2 % en masse d'humidité en son sein.

II.2.3.Décharges partielles :

Sous l'effet du champ électrique et des inhomogénéités locales (gaz, humidité, particules), il peut apparaitre des micro-décharges qui décomposent l'huile en générant des gaz. À long terme, ces décharges peuvent devenir nocives si elles tendent à se fixer sur les isolants solides imprégnés et parviennent à un niveau suffisant pour les détériorer [2].

II.2.4.Température :

La température agit comme un catalyseur d'oxydation, le comportement de l'isolant à températures élevées désigne sa stabilité thermique, en faisant abstraction de toute autre contrainte telle que l'oxydation, l'hydrolyse ou les décharges partielles.

Dans les conditions normales de l'utilisation des transformateurs (températures entre 80°C et 100°C), la stabilité des liquides isolants est largement suffisante. Au-delà de 120°C, la stabilité thermique diminue [2].

II.3. Effet de vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile :

D'après les études faites par Dr. **Abdi Sif-Eddine [6]**, le vieillissement thermique affecte considérablement les caractéristiques de l'huile de transformateur.

II.3.1. Variation du facteur de pertes diélectriques :

Les variations du facteur de perte diélectrique en fonction du temps pour différentes températures de vieillissement sont présentées dans la figure II.2

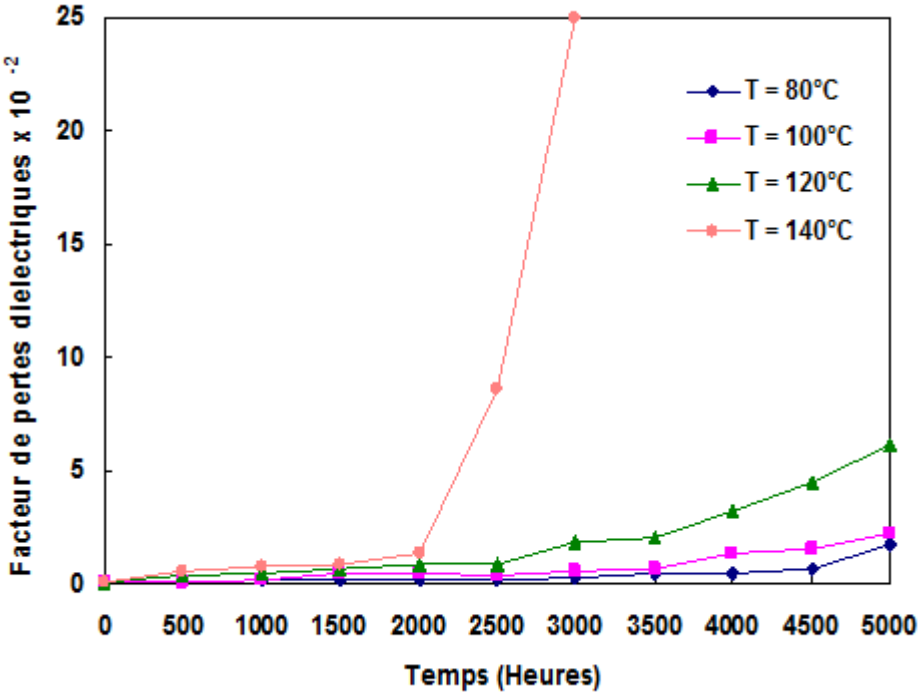


Figure II.2 : Variation de facteur de pertes diélectriques en fonction de temps **[13]**.

Le facteur de pertes diélectriques augmente en fonction du temps de vieillissement. Cette augmentation est non linéaire et est plus rapide quand la température de vieillissement est plus élevée.

II.3.2. Tension de claquage :

Les variations de la tension de claquage en fonction du temps pour différentes températures de vieillissement sont présentées dans la figure II.3

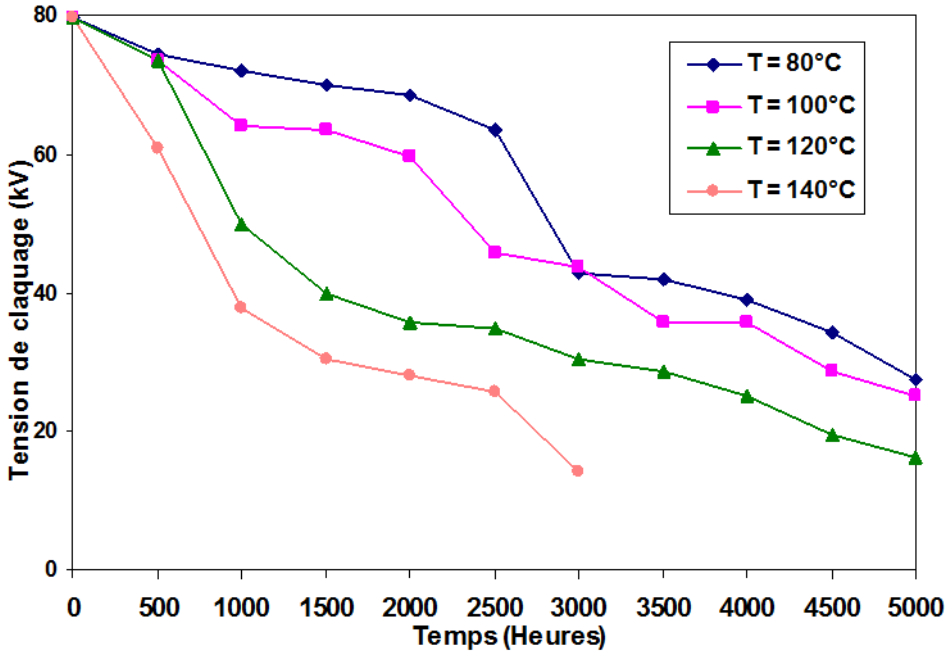


Figure : II.3 : Variation de la tension de claquage en fonction de temps **[13].**

La tension de claquage diminue en fonction du temps, cette diminution est très considérable pour l'huile vieillie à la température la plus élevée de 140°C

II.3.3. Acidité :

La figure II.4 présente les variations de l'acidité en fonction du temps de vieillissement de 5000 heures, pour différentes températures de vieillissement 80°C, 100°C, 120°C et 140°C.

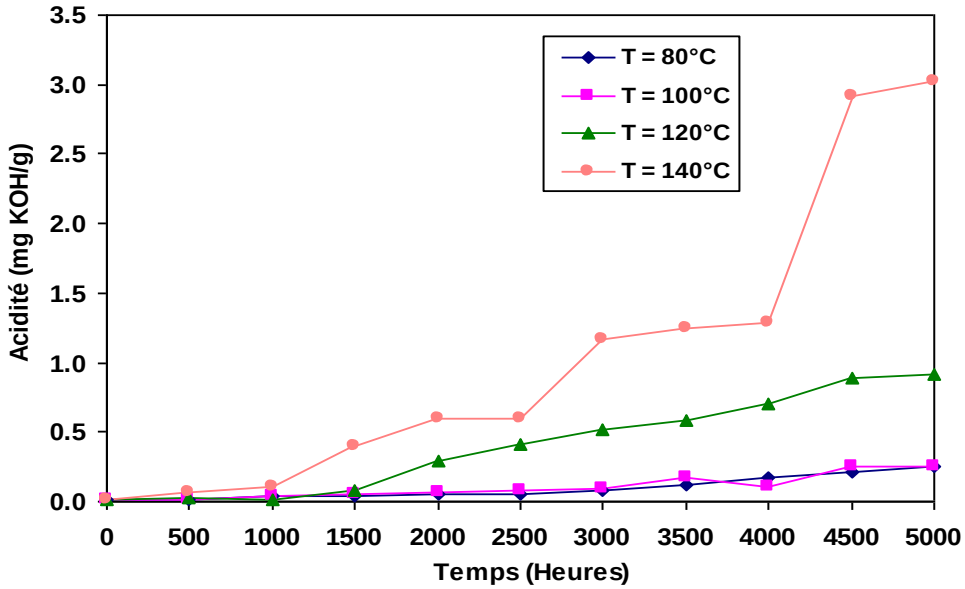


Figure. II.4 : Variation de l'acidité de l'huile en fonction du temps pour différentes températures de vieillissement **[13]**.

On relève une augmentation de l'indice d'acidité avec le vieillissement de l'huile. Les variations pour les deux températures 80°C et 100°C sont presque identiques, tandis que cette variation est importante pour la température le plus élevée.

II.3.4. Variation de l'indice de couleur :

Le tableau II.1 présente les variations de l'indice de couleur en fonction de temps pour différentes températures de vieillissement.

Temps de vieillissement (heures)	**Indice de couleur pour les quatre températures de vieillissement**			
	T = 80°C	**T = 100°C**	**T = 120°C**	**T = 140°C**
0	< 0.5	< 0.5	< 0.5	< 0.5
500	< 0.5	< 0.5	1,3	2,4
1000	< 0.5	< 0.5	2,3	3,8
1500	< 0.5	< 0.5	3,7	5,4
2000	< 0.5	< 0.5	4,7	6,7
2500	< 0.5	< 0.5	5,7	7,1
3000	< 0.5	< 0.5	> 8	> 8
3500	< 0.5	< 0.5	> 8	> 8
4000	< 0.5	< 0.5	> 8	> 8
4500	< 0.5	< 0.5	> 8	> 8
5000	< 0.5	< 0.5	> 8	> 8

Tableau II.1 : Variation de l'indice de couleur de l'huile en fonction du temps pour différentes températures de vieillissement **[13].**

On remarque d'après le tableau II.1 que pour les deux températures de vieillissement à 80°C et à 100°C, l'indice de couleur reste presque constant, et garde son état neuf c'est à dire une couleur jaune pâle. Par ailleurs, pour les deux températures de vieillissement à 120°C et 140°C, l'indice de couleur dépasse un facteur de 8, ce qui correspond à une couleur marron foncé.

II.4. Procédé de régénération des huiles isolantes :

II.4.1. Définition :

La régénération est nécessaire lorsque l'huile est sévèrement polluée par des produits de décomposition. Si ces derniers sont instables, ils provoquent des dépôts, dont l'élimination nécessite un décuvage, et s'ils ne sont pas contre-soluble, ils contaminent le diélectrique, en jouant parfois un rôle de catalyseur dans la poursuite de la décomposition, et ne peuvent être éliminés que par une opération chimique ou physico-chimique spécifique assimilable à un nouveau raffinage.

La régénération est un ensemble de procédés permettant la production à partir d'une charge d'huile usagée, une ou plusieurs huiles de base. Le recyclage des huiles usagées permet l'économie de recourir à la consommation de nouvelles quantités d'huiles neuves. Par conséquent, la régénération se présente comme étant une autre forme d'économie d'énergie et de lutte contre la pollution de l'environnement [1].

II.4.2. Intérêt de la régénération :

La régénération est une source très appréciable d'entrée de devises et une augmentation non négligeable de la capacité des pays à résister à une diminution des ressources en lubrifiants.

De cet état de fait, il en résulte les considérations suivantes :

- L'industrie de la régénération est susceptible de fournir environ 15% des besoins du marché en huile de base **[7]**.
- Les huiles régénérées étant le plus souvent consommées dans le pays d'origine, chaque tonne d'huile régénérée produite à partir de cette matière première qu'est l'huile usagée permettrait d'exporter une tonne d'huile neuve produite par l'industrie pétrolière à partir du brut.
- En cas de conflit armé, les grandes raffineries constituent traditionnellement des cibles de choix, alors qu'au contraire les usines de régénération ont beaucoup plus de chance d'échapper à une destruction totale et, donc, de pouvoir continuer à

fournir les produits nécessaires à la lubrification des matériels militaires ou industriels [7].

Grâce au contrôle approfondi des caractéristiques de l'huile, il est possible de planifier et piloter avec précision le processus de régénération. Après que l'huile d'isolation et l'isolation solide ont été nettoyées, l'huile d'isolation est dégazée et inhibée.

L'inhibition constitue une étape importante pour accroitre la résistance à l'oxydation de l'huile nettoyée et ralentir la dynamique de vieillissement de l'isolation huile et cellulose. Elle est expressément recommandée par la norme CEI 60422 [8].

Les critères mentionnés dans le tableau ci-dessous, d'après la norme CEI 60422, recommandent une régénération des qu'un vieillissement rapide ou une accélération des processus de dégradation sont constatés.

Caractéristique	Valeur limites recommandées pour la régénération
Acidité	≥0 ,15(mg de KOH/g d'huile)
Facteur de perte de permittivité à 90°c et 40 Hz à 60 Hz	≥0,20 pour les transformateurs de puissance/réducteurs d'une tension nominale supérieure à 170kV ≥0,50 pour les transformateurs de puissance /réducteurs d'une tension nominale inférieure à 170Kv
Teneur en inhibant	Concentration d'inhibant < 40 % de la valeur de sortie/initiale
Combinaison de l'acidité et de la tension des surfaces limites	Acidité >0,06mg de KOH/g d'huile et tension des surfaces limites<30 mN/ m
Dépôts et sédiments	Lorsque la présence de dépôts et sédiments sont constatées, l'huile doit être régénérée

Tableau II.2 : Valeurs limites recommandées pour la régénération.

Le diagramme ci-dessous représente le développement des paramètres importants de l'huile lors de la régénération d'un transformateur de groupe de 216 MVA avec environ. 40 tonnes d'huile d'isolation présentant un vieillissement important.

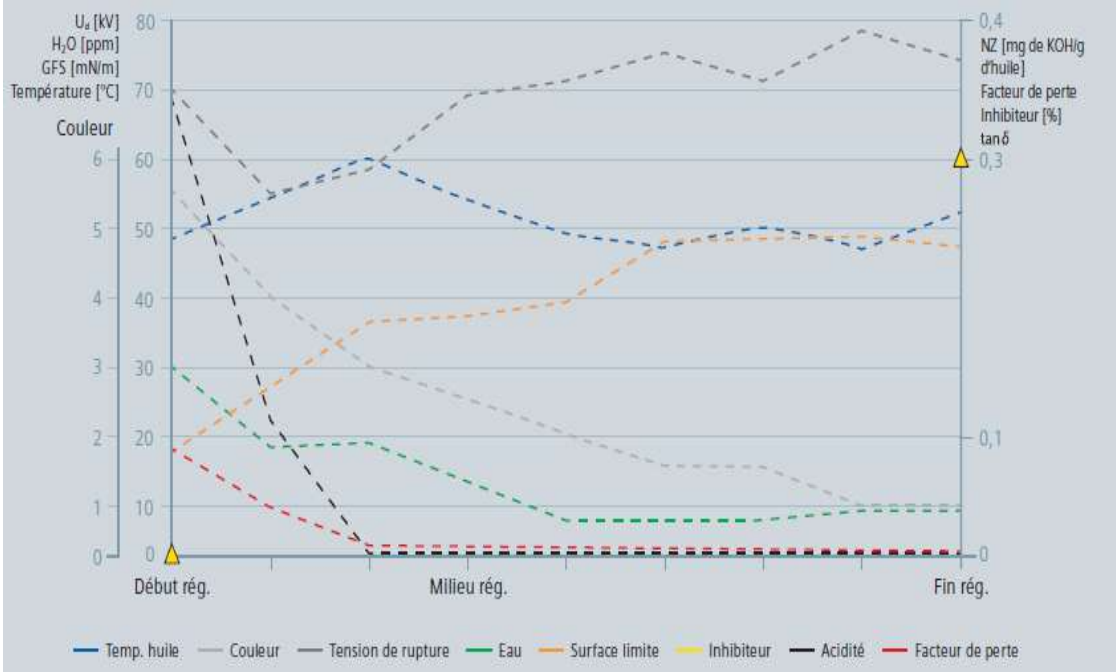


Figure II.5 : Exemple de courbe d'une régénération d'huile.

Une fois la régénération de l'huile effectuée avec succès dans des conditions de processus optimales, l'huile d'isolation même utilisée pendant des années reste conforme aux valeurs limites applicables au remplissage des nouveaux transformateurs de puissance. De plus, les paramètres essentiels des caractéristiques diélectriques de l'huile demeurent stables et ce, même plusieurs années âpres le traitement de régénération **[13]**.

II.4.3. Procédés de régénération d'huile isolante :

Les procédés de régénération sont nombreux. Ils diffèrent les uns des autre par la nature des moyens mis en œuvre pour assurer l'élimination de contaminants solubles chlorés, oxydés, dérivés d'additifs et d'impuretés en suspension comme les produits condensés métalliques et les produits riches en carbone. Une régénération correcte devra prendre en compte ces différentes familles de produits en mettant en œuvre une cascade d'étapes que nous décrivons, ci-après :

-Première étape : cette étape est appliquée en tête de la plupart des chaines de régénération, elle consiste à effectuer une distillation douce de l'huile brute de manière à éliminer l'eau (2 à 4 %), l'essence (1 à 2%), des solvants, du glycol et certains dérivés d'additif **[7]**.

-Deuxième étape : consiste en général, à faire une purification de l'huile par précipitation des matières en suspension. A ce stade, l'huile contient encore des composés solubles partiellement oxydés qui doivent être éliminés par action chimique mise en œuvre dans une troisième étape. Certains procédés combinent ces deux actions (physique et chimique) en une seule étape. Les traitements de purification physique les plus connus sont les suivants :

- **La distillation sous vide** :

Tant que l'acide sulfurique était largement utilisé comme étape majeure de la régénération, la distillation sous vide était pratiquée en fin de chaine pour séparer les produits régénérés en huile légère (spindle), moyenne et visqueuse en fond de colonne. La distillation sous vide poussée est devenue un moyen utilisé pour extraire le maximum d'huile ainsi purifiée afin de perdre le moins possible d'huile visqueuse en fond de colonne.

- **Clarification au solvant (propane ou butane) :**

Ce procédé développé par l'IFP (Institut Français du Pétrole) implique un taux de solvant de 10 à 15 % et est relativement coûteux mais très performant, et particulièrement adapté aux fractions résiduaires venant de la distillation sous vide pour la récupération de l'huile visqueuse (Bright stock).

- **Ultrafiltration**

La filtration simple, faisant appel par exemple à des seuils particulaires de quelques µm est totalement inefficace. Pour que la filtration soit opérable avec les seuils requis, il faut faire appel à la technique de filtration tangentielle mise en œuvre en ultrafiltration. Cette technique est efficace mais coûteuse et d'application assez délicate. Coûteuse en énergie parce que nécessitant une circulation élevée du milieu à filtre (5 à 10m/s sous 10 bars sur membranes minérales), pour ne pas colmater rapidement les membranes et délicate parce qu'exigeant, en général, un prétraitement spécifique.

- **La floculation**

Un certain nombre de procédés peu répandus font appel à des agents déstabilisants généralement en phase aqueuse et nécessitant souvent plusieurs extractions. Certaines sociétés revendiquent l'action d'agents alcalins puissants introduits en amont et entraînant la séparation des contaminants par distillation sous vide poussé ou par centrifugation.

-Troisième étape : l'huile purifiée par l'un des traitements précédents doit généralement subir un traitement de raffinage ayant pour but d'éliminer les produits résiduels, solubles, oxydés et/ou azotés éventuellement dérivés d'additifs. L'objectif est d'obtenir toutes les propriétés d'une huile de base vierge (couleur, stabilité de couleur, indice d'acide, …) **[7]**.

Cette étape peut être obtenue par l'un des traitements suivants :

- Lorsqu'une distillation sous vide est installée en amont, les distillats peuvent être traités :

  -Soit avec 2 à 3% d'acide et 3% de terre.

  -Soit avec la terre seulement (8 à 10 %) mais le raffinage est légèrement inférieur au précédent.

  -Soit par hydrogénation catalytique.

- Lorsque la distillation sous vide n'est pas appliquée en amont, l'huile globale purifiée par les autres traitements décrits précédemment peut demander :

  -Soit 4 à 5% d'acide + 3% de terre environ.

  -Soit une quantité massive de terre, soit une hydrogénation catalytique plus sévère que dans le cas précédent.

II.4.4. Évolution des schémas de régénération :

Le schéma présenté à la figure II.6 se rapporte au traitement acide /terre.

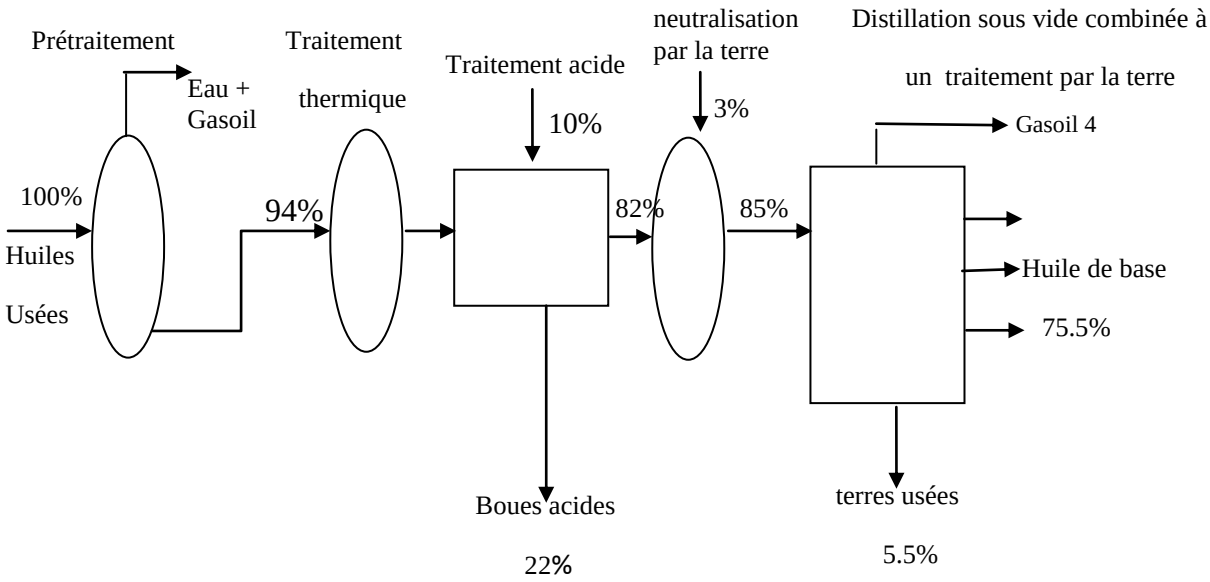


Figure II.6 : Re-raffinage par le procédé Acide Terre **[7]**.

Le schéma présenté à la figure II.7 incluant un raffinage acide allégé marque la tendance actuelle très nette vers la distillation sous vide poussée en amont avec une maximisation des distillats.

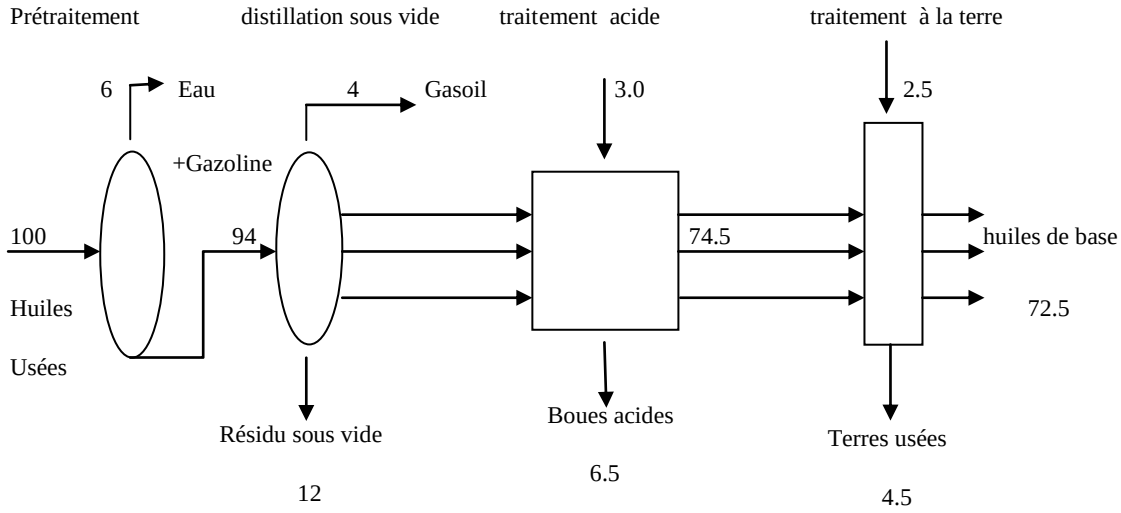


Figure II.7 : Re-raffinage par le procédé acide-terre. **[7].**

Dans le schéma de la figure II.8, l'acide et la terre sont remplacés par une hydrogénation catalytique.

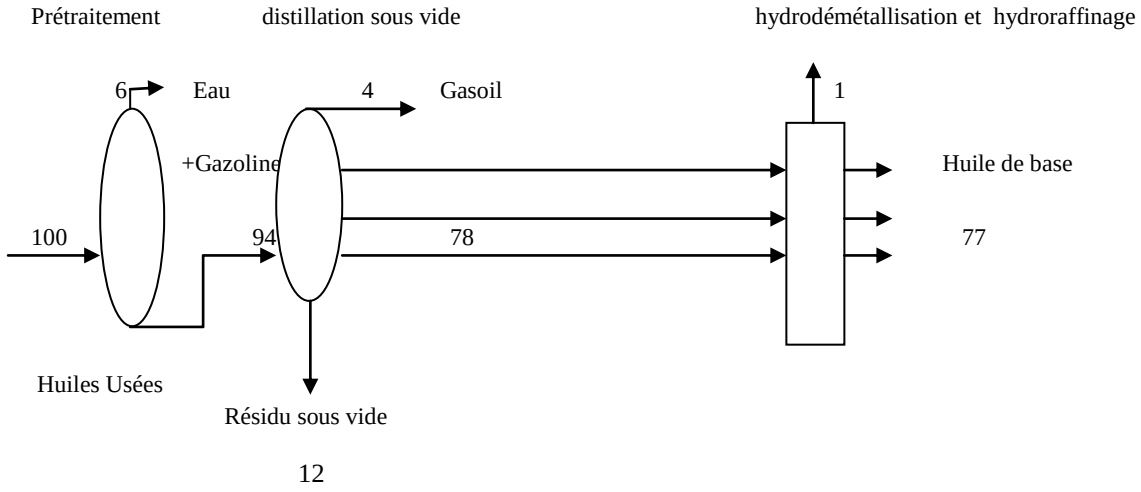


Figure II.8 : Distillation sous vide et hydrofinition **[7]**.

Le schéma de la figure II.9 est comparable au précédent mais inclut la régénération de l'huile visqueuse (Bright stock) par application de la clarification au solvant au résidu sous vide.

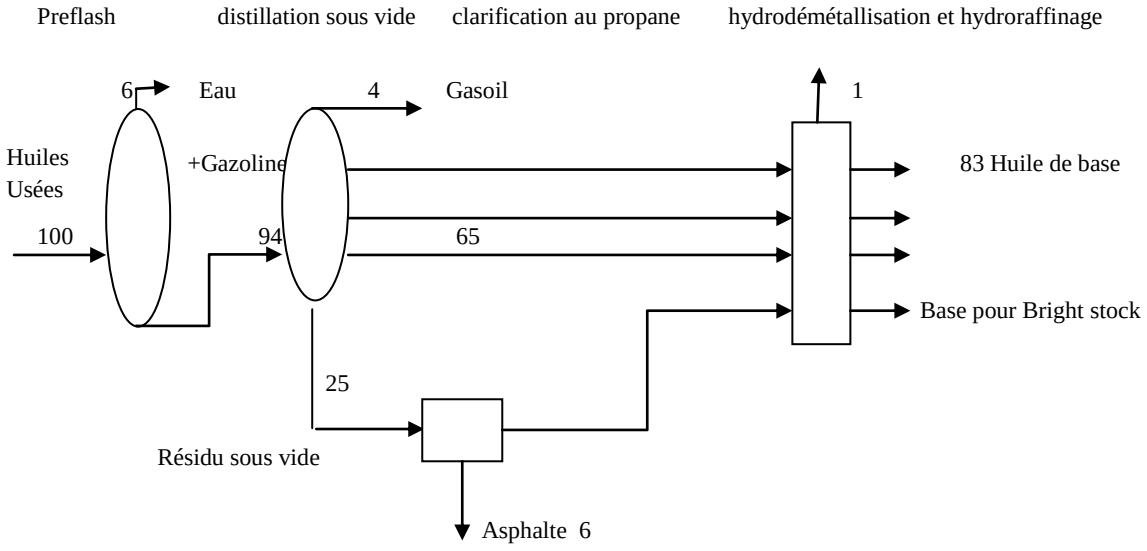


Figure II.9 : Select propane et hydro finition **[7]**.

Il existe d'autres techniques pur la régénération telles que le procédé PROP (Phillips Re-refining Process), le procédé BERC (Bartlesville Energy Research Center) et le procédé RTI (Resource Technology Inc) et le procédé RECYCLON.

II.4. Conclusion:

Au cours de leur utilisation et sous l'effet de différentes contraintes telle que l'oxydation, l'hydrolyse, les décharges partielles et l'augmentation de la température, les huiles minérales isolantes se dégradent, d'où le phénomène de vieillissement.

Pour pallier à ce problème de vieillissement, la régénération de l'huile constitue un processus très utilisé dans la technologie des isolants, pour améliorer les caractéristiques de l'huile vieillie tout en économisant des sommes importantes d'argent. En plus de ses avantages en ce qui concerne l'environnement.

CHAPITRE III :

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les essais effectués au Laboratoire d'Analyse et de Traitement des Huiles (UTH) de Transformateurs de SHARIKAT KHADAMAT MOUHAOUILAT KAHRABAIA (SKMK), Blida. Ces essais concernent essentiellement les points suivant :

- Les essais de régénération de l'huile usagée
- Le contrôle de l'état de cette régénération, en faisant des essais de cette huile après traitement en fonction de la température, en la comparent avec un huile neuve.

III.2. Essais de régénération :

III.2.1. Préparation des échantillons :

III.2.1.2. Caractéristiques de l'huile :

Les caractéristiques de l'huile usagée utilisée dans le test de régénération qui est prélevée d'un transformateur en service, sont données an tableau **(III.1)**.

Propriétés de l'huile	**Huile usagée**
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.253
Indice de couleur (IC)	6.9
Teneur en eau (ppm)	30.4
Indice d'acidité (IA) (mg KOH/g)	0.384
Résistivité (MΩ.m)	940.4
Tension de claquage (kV)	73.4
Viscosité 40°C	7.77
Densité	0.875
Indice de réfraction	1.478

Tableau III.1: Caractéristiques de l'huile usagée.

L'huile utilisée comme échantillon présente un taux de dégradation assez important, surtout pour son facteur de perte assez grand, aussi qui le taux d'humidités et de produits acides présentes.

III.2.1.3. Méthodes de régénération :

La méthode de régénération est faite selon le processus suivant :

- L'huile usagée est prise comme échantillon pour faire la régénération.
- L'échantillon de l'huile est chauffé à une température de 80°C, dans le but d'éliminer les quantités d'eau dissoutes dans l'huile. Le chauffage est réalisé à l'aide d'une plaque chauffante avec un thermomètre pour mesurer la température **(figure III.1)**.



Figure III.1 : Procédure de chauffage de l'huile.

- On ajoute à l'échantillon une quantité de terre dans le but d'éliminer les impuretés, telles que le sable, poussière, particules et micro impuretés dissoutes dans l'huile.

  La terre est un mélange de bentonite brute avec un autre élément chimique, qui est soit de la base carbonate de sodium (Na_2CO_3), ou des acides tels que l'acide chlorhydrique HCL et l'acide sulfurique H_2SO_4.

  La bentonite est une roche argileuse, friable, tendre et onctueuse au toucher, sa teinte dépend des composés minéraux et impuretés qui lui sont étroitement associés. Elle est blanche, grise ou légèrement jaune. Elle contient plus de 75 % de montmorillonite est le constituant principal de la bentonite. **[12]**

  Dont la structure chimique est la suivante :

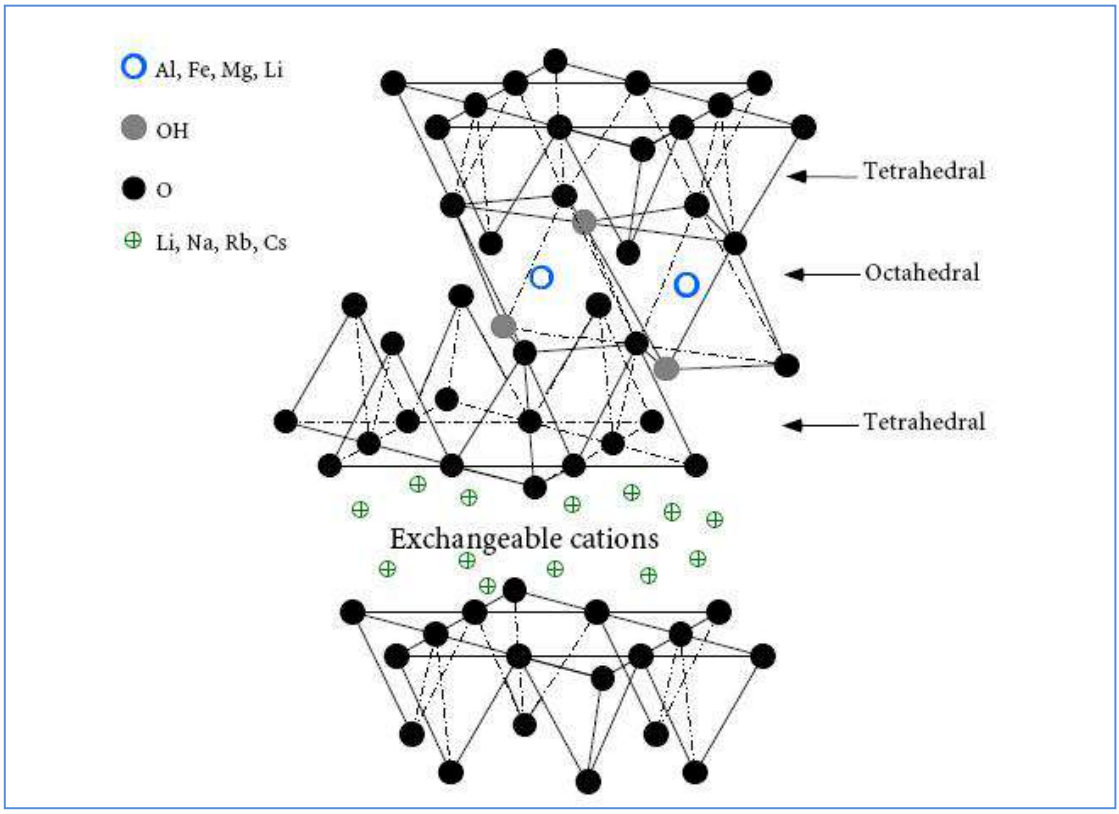


Figure III.2: Structure de la montmorillonite.

Les éléments chimiques de la terre sont utilisés avec des concentrations calculées, dans le but d'améliorer le pouvoir d'absorption des impuretés.

L'activation de la bentonite se fait par les techniques suivantes :

- **Activation de la bentonite- carbonate de sodium Na_2CO_3**

On prend une quantité de 200g de bentonite mélangée une autre quantité de carbonate de sodium Na_2CO_3 selon un rapport massique égale à 0.3.

La masse Na_2CO_3 / la masse bentonite = 0.3 **(III.1)**

Par conséquent, la quantité de carbonate de sodium Na_2CO_3 utilisée dans le mélange est égale à 60g.

Le mélange est chauffé sur la plaque chauffante est utilisant un système agitation jusqu'à une température de 80°C pendant une durée de 90 minute.

Ce mélange est ensuite filtré, séché à une température élevé 110°C ou 120°C, puis broyé dans le but d'avoir des particules fines.

- **Activation de la bentonite avec d'acide chlorhydrique HCL**

On ajoute à une quantité de 750g de bentonite une quantité de 7.5L d'eau distillée, le tout est mit sous agitation pendant une durée de deux heures.

Ensuite, quantité d'eau distillée est ajoutée à un volume de 8.2 ml d'acide chlorhydrique (HCL), jusqu'à attendre un volume total de 1 litre.

Les deux préparations (bentonite + HCL) sont mélangées sous agitation pendant deux heures.

On ajoute de l'eau distillée au nouveau mélange dans le but d'augmentés son PH jusqu'à attendre 6 à 7.

Ce dernier mélange est laissé pendant 24 heures, le temps de se repose et se décanter, après il est filtré, et séché à une température élevée de 110°C ou 120°C, et enfin broyé pour avoir des particules fine de la terre.

- **Activation de bentonite avec d'acide sulfurique H_2SO_4**

On ajoute à une quantité de 750g de bentonite une quantité de 7.5L d'eau distillée, le tout est mit sous agitation pendant une durée de deux heures.

Ensuite, quantité d'eau distillée est ajoutée à un volume de 8.2 ml d'acide sulfurique (H_2SO_4), jusqu'à attendre un volume total de 1 litre.

Les deux préparations (bentonite + H_2SO_4) sont mélangées sous agitation pendant 90 minutes.

On ajoute de l'eau distillée au nouveau mélange dans le but d'augmentés son PH jusqu'à attendre 6 à 7.

Ce dernier mélange est laissé pendant 24 heures, le temps de se repose et se décanter, après il est filtré, et séché à une température élevée de 110°C ou 120°C, et enfin broyé pour avoir des particules fine de la terre.

- Les quantités utilisées de la terre différente selon la nature de ce dernier. Par exemple, pour 100 ml de l'huile usagée, la quantité de la terre composée de bentonite avec carbonate de sodium (Na_2CO_3) représente 12 %, est une quantité de 12g. tandis que pour la terre composée de bentonite avec d'acide chlorhydrique (HCL), elle représente 30 % de l'échantillon de l'huile, alors que pour la terre composée de bentonite avec d'acide sulfurique (H_2SO_4), elle représente 15 % de l'huile.

- Le mélange échantillon de l'huile usagée avec la terre est chauffé à une température de 80°C, avec un temps de contact 20min, en utilisant un système d'agitation (barreau magnétique). Cette température reste constante tout le temps de contact.

- Après un temps de repos, le nouveau mélange est divisé en deux couches. Une quantité d'huile qui flotte en haut, et une quantité de boue (terre avec les impuretés dissoutes dans l'huile usagée) qui descend en bas.

- Un système de filtration est réalisé à l'aide d'un entonnoir muni d'un papier filtre placé sur ce dernier, ensuite une pompe à vide est reliée à un ballon de filtration dans lequel l'entonnoir est fixé à l'aide d'un bouchon en caoutchouc, permet de filtrer le mélange et avoir une huile régénérée après traitement.



Figure III.3: Système de filtration.

- Les caractéristiques de cette huile régénérée sont mesurées par les différents appareils
- Si les caractéristiques de cette échantillons sont bonnes et proches des caractéristiques de l'huile neuve, la régénération est terminée avec succès, sinon on procède un autre passage de régénération sur cette huile traitée.

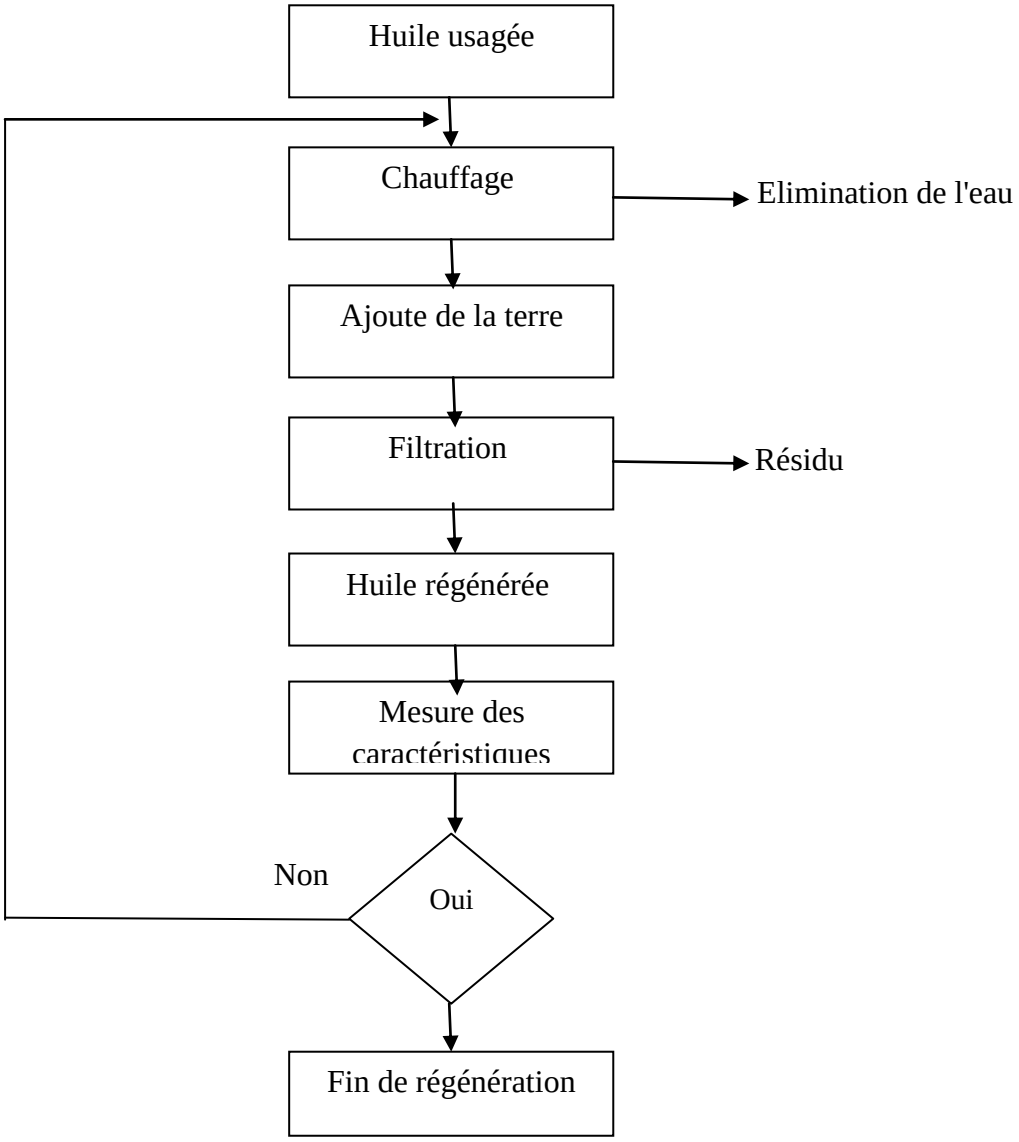


Figure III.4 : Procédure de régénération de l'huile usagée**.**

III.3. Dispositifs pour les mesures des caractéristiques de l'huile :

III.3.1. Mesure de l'indice de couleur :

L'indice de couleur est mesuré selon la norme ISO 2049 [9]. L'appareil utilisé pour cette mesure est un spectrophotomètre, de type LOVIBOND- PFX 195, TINTOMETER (Figure III.3). La couleur de l'huile isolante est déterminée en lumière

transmise, et exprimée par un indice obtenu par comparaison avec une série de couleurs de verres étalons. L'étalon correspondant, ou celui dont la couleur est juste supérieure, est pris comme valeur de cet indice.



Figure III.5 : LOVIBOND- PFX 195 utilisé dans la mesure de l'indice de couleur.

III.3.2. Mesure du facteur de dissipation diélectrique (tg δ), la résistivité, la permittivité relative (ε_r) :

Le facteur de pertes diélectriques (tgδ) est mesuré selon la norme CEI 60 247 [10], L'appareil utilisé est un pont automatique de type DIELTEST- DTL (figure III.4). Qui permet de mesure en plus de tg(δ) la résistivité et la permittivité. Après avoir mesuré la capacité de la cellule à vide, celle-ci est remplie d'huile, puis chauffée jusqu'à 90°, une tension de l'ordre de 2kV est appliquée. La durée de la mesure est environ 15 à 20 minutes. Les données sont affichées et imprimées automatiquement.



Figure III.6 : DIELTEST- DTL utilisé dans la mesure du facteur de dissipation diélectrique (tgδ).

III.3.3. Mesure de l'indice d'acidité :

La mesure de l'indice d'acidité est réalisée par un procédé chimique simple : la neutralisation, selon la norme CEI 60021-1 [11]. Elle est exprimée en mg de KOH par g d'huile, c'est-à-dire le nombre de mg d'une solution de potasse alcoolique de normalité 0.1, nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile (figure III.5).

L'indice d'acidité est calculé au moyen de l'expression :

$$IA = 0.1\ M\ V / m \qquad \text{(III.1)}$$

0.1 : normalité de la solution KOH (g/l),

M : masse moléculaire de la solution KOH (56.1 g/moles),

m : masse de l'huile (g),

V : volume en ml de KOH, nécessaire pour l'obtention de la neutralisation.



Figure III.7 : Système de neutralisation.

III.4. Effet de la température sur l'huile régénérée :

Après régénération, l'échantillon de l'huile est soumis à l'effet de la température dans le but de contrôler l'état de cette régénération, et de comparer la variation des caractéristiques de l'huile régénérée en fonction de la température, avec les résultats

correspondants à la variation des caractéristiques de l'huile neuve en fonction de la température.

Les caractéristiques d'huile régénérée sont données en tableau suivant :

Propriétés de l'huile	**Huile régénérée**
Indice de couleur (IC)	0.5
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.00246
Indice d'acidité (IA) (Mg KOH/g)	0.01
Résistivité (GΩ.m)	508.6
Permittivité relative (ε_r)	2.12

Tableau III.2: Caractéristiques de l'huile régénérée.

Les caractéristiques d'huile neuve sont données en tableau suivant :

Propriétés de l'huile	**Huile neuve**
Indice de couleur (IC)	<0.5
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.00165
Indice d'acidité (IA) (Mg KOH/g)	0.009
Résistivité (GΩ.m)	921
Teneur en eau (ppm)	23.3
permittivité relative (ε_r)	2.09

Tableau III.3: Caractéristiques de l'huile neuve.

Les caractéristiques des échantillons de l'huile régénérée et neuve utilisés pour ce test, sont présentées dans le tableau **III.2** et **III.3**. Les deux échantillons sont chauffés à des températures différentes, et à chaque fois les différentes caractéristiques sont mesurées.

CHAPITRE IV :

RESULTATS ET INTERPRETATION

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats expérimentaux faites dans le Laboratoire d'Analyse et de Traitement des Huiles (UTH) de Transformateurs de SHARIKAT KHADAMAT MOUHAOUILAT KAHRABAIA (SKMK), Blida. Ces résultats sont divisés en deux parties essentielles :

En première partie, nous présentons les résultats pratiques concernant des essais de régénération de l'huile usagée avec les différentes terres utilisées pour cette régénération : terre avec de la bentonite et du carbonate de sodium Na_2CO_3**,** terre avec de la bentonite et de l'acide chlorhydrique HCL, et enfin de la terre avec de la bentonite et de l'acide sulfurique H_2SO_4.

En deuxième partie, nous présentons les résultats du facteur de pertes diélectrique (tg δ), de l'indice d'acidité, et l'indice de couleur pour une huile régénérée et huile neuve en fonction de la température, et cela dans le but de confirmer l'état de la régénération lorsqu'elle est soumise à une contrainte thermique et de la comparer à celle de l'huile neuve.

IV.2. Résultats de régénération de l'huile usagée :

IV.2.1. Résultats de la régénération avec terre (bentonite- carbonate de sodium Na_2CO_3) :

IV.2.1.1. Concentration de 10% :

La quantité de la masse de terre ajoutée à un échantillon 100 ml de l'huile usagée est de 10g.

Après la régénération, nous avons obtenue les résultats suivant :

Caractéristiques de l'huile	**Huile usagée**	**Huile régénérée**
Indice de couleur (IC)	6.9	6
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.253	0.1466
Indice d'acidité (IA) (mg KOH/g)	0.384	0.072
Résistivité (Ω.m)	940.4 E+6	2.235 E+9

***Tableau IV.1** : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-Na_2CO_3) à une concentration de 10%*

D'après le tableau, on remarque qu'en utilisant cette consentration, une amélioration des caractéristiques de l'huile usagée est remarquable. Par example, l'indice d'acidité diminue de 0,384 à 0,072 sauf que sa valeur reste superieur à celle exigée par la norme requise (<0.03) **[11]**.

Le facteur de pertes diélectrique réalise aussi une amélioration, il passe de 0,253 à 0,1466 après regénération. Tandis que l'indie de couleur passe de 6,9 à 6, mais il reste toujour loin de le norme (<2) **[9]**.

La résistivité de 'huile aussi subit une augmentation.

IV.2.1.2. Concentration de 12% :

La quantité de la masse de terre ajoutée à un échantillon 100 ml de l'huile usagée est de 12g.

Le tableau IV.2 présente les résultats après regénération:

Caractéristiques de l'huile	**Huile usagée**	**Huile régénérée**
Indice de couleur (IC)	6.9	5.4
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.253	0.1238
Indice d'acidité (IA) (mg KOH/g)	0.384	0.07
Résistivité (Ω.m)	940.4 E+6	2.7109 E+9

***Tableau IV.2** : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-Na_2CO_3) à une concentration de 12%*

Pour cette concentration, les même remarques peuvent être mentionnées. L'indice d'acidité atteint une valeur de 0,07, le facteur de perte diélectrique diminue à 0,1238 et l'indice de couleur atteint 5,4 avec une augmentation de la résistivité.

IV.2.1.3. Concentration de 15% :

La quantité de la masse de terre ajoutée à un échantillon 100 ml de l'huile usagée est de 15g. Les résultats sont les suivants :

Caractéristiques de l'huile	**Huile usagée**	**Huile régénérée**
Indice de couleur (IC)	6.9	5.6
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.253	1.278
Indice d'acidité (IA) (mg KOH/g)	0.384	0.071
Résistivité (Ω.m)	940.4 E+6	308.8 E+6

***Tableau IV.3** : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-Na_2CO_3) à une concentration de 15%*

Comme pour les concentrations précédentes, on remarque une légére amélioration avec le diminuation de l'indice d'acidité à 0,071 et de l'indice de couleur à 5,6. Toutefois, le facteur de pertes diélectrique augmente à 1,278.

D'après cette série de régénération, nous pouvons voir que le test de regénération avec 12% de concentration présente le test le plus optimal qui présente la meilleure amélioration. Toutefois, les caractéristiques de l'huile regénérée ne présentent pas toujours des caractéristiques proches de celles de l'huile neuve.

IV.2.2. Résultats de la régénération avec terre (bentonite- acide chlorhydrique HCL):

Les résultats de regénération d'une huile usagée, en utilisent une terre (bentonite + HCL) avec une concentration de 30%, sont présentés aux tableau IV.4.

Caractéristiques de l'huile	**Huile usagée**	**Huile régénérée 1er passage**	**Huile régénérée 2eme passage**	**Huile régénérée 3eme passage**	**Huile régénérée 4eme passage**
Indice de couleur (IC)	6.9	4.7	3.4	2.5	1.8
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.253	0.0449	0.00576	0.00273	0.00186
Indice d'acidité (IA) (mg KOH/g)	0.384	0.093	0.041	0.031	0.024
Résistivité (Ω.m)	940.4 E+6	15.68 E+9	86.23 E+6	241.09 E+6	306.51 E+6

***Tableau IV.4** : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite-HCL).*

D'après le tableau IV.4, on remarque que l'utilisation de cette terre (bentnite + HCL) avec 30% de concentration, améliore nettement les caractéristiques de l'huile usagée, et cela après quatre passages de régénération.

Le facteur de pertes diélectrique diminue d'une valeur de 0.253 pour l'huile usagée, et atteint la valeur de 0,00186 pour l'huile régénérée après le quatrième passage.

L'indice de couleur est amélioré de 6.9 jusqu'à une valeur de 1.8, valeur qui correspond à celle donnée par le norme (<2) **[9]**.

Pour l'indice d'acide, les résultats sont clairs, il y a une large diminution de l'indice d'acidité dans l'huile après cette régénération, il passe de 0.384 jusqu'à 0.024. Avec la valeur donnée par la norme requise est (<0.03) **[11]**.

En fin de cette regénération, nous constatons que l'huile traitée présente de bonnes caractéristiques, et peut être utilisé dans le transformateur sans danger, sauf que ces valeur restent loin de celles de l'huile neuve.

IV.2.3. Résultats de la régénération avec terre (bentonite- Acide sulfurique H_2SO_4) :

Les résultats de regénération d'une huile usagée, en utilisent une terre (bentonite + H_2SO_4) avec une concentration de 15%, sont présentés aux tableau IV.5.

Caractéristiques de l'huile	**Huile usagée**	**Huile régénérée 1er passage**	**Huile régénérée 2eme passage**	**Huile régénérée 3eme passage**	**Huile régénérée 4eme passage**
Indice de couleur (IC)	6.9	2.5	1.7	0.9	0.5
Facture de dissipation diélectrique à 90 °C à 50 Hz (tgδ)	0.253	0.0056	0.0073	0.000819	0.00246
Indice d'acidité (IA) (mg KOH/g)	0.384	0.041	0.037	0.027	0.01
Résistivité (Ω.m)	940.4 E+6	379.15 E+9	815.01 E+9	725.9 E+9	508.6 E+9

***Tableau IV.5** : Caractéristiques de l'huile régénérée avec terre (bentonite- H_2SO_4).*

D'après cette régénération, on remarque une amélioration importante des caractéristiques de l'huile après traitement. Nous pouvons les résumer comme suit:

Le facteur de pertes diélectrique diminue pour atteindre une valeur de 0,00246 après le quatirème passage.

L'indice de couleur subit une large amélioration. Il passe de 6.9 jusqu'à 0.5, valeur qui peut être considéré comme étant une valeur d'huile neuve (<0,5).

L'indice d'acidité est nettement amélioré, et atteint une valeur de 0,01 après regénération. Cette valeur correspond à celle donnée par la norme (<0,03) **[11]**.

On remarque aussi que la résistivité de 'huile régénérée augmente et passe de $940,4.10^6$ Ω.m à $508,6.10^9$ Ω.m

On peut dire que la regénération qui utilisé la terre (bentonite + H_2SO_4) améliore d'une façon significative les caractéristiques de l'huile usagée.

IV.3. Effet de la température sur l'huile régénérée :

IV.3.1. Variation de facteur de dissipation diélectrique (tg(δ)) en fonction de la température :

IV.3.1.1. Huile régénérée :

La figure IV.1 représente la variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la température pour une huile régénérée avec de la bentonite + H_2SO_4 et une concentration de 15%, mais aprés quatre passages de régénérations chose qui est du point de vue économique reste moins fiable.

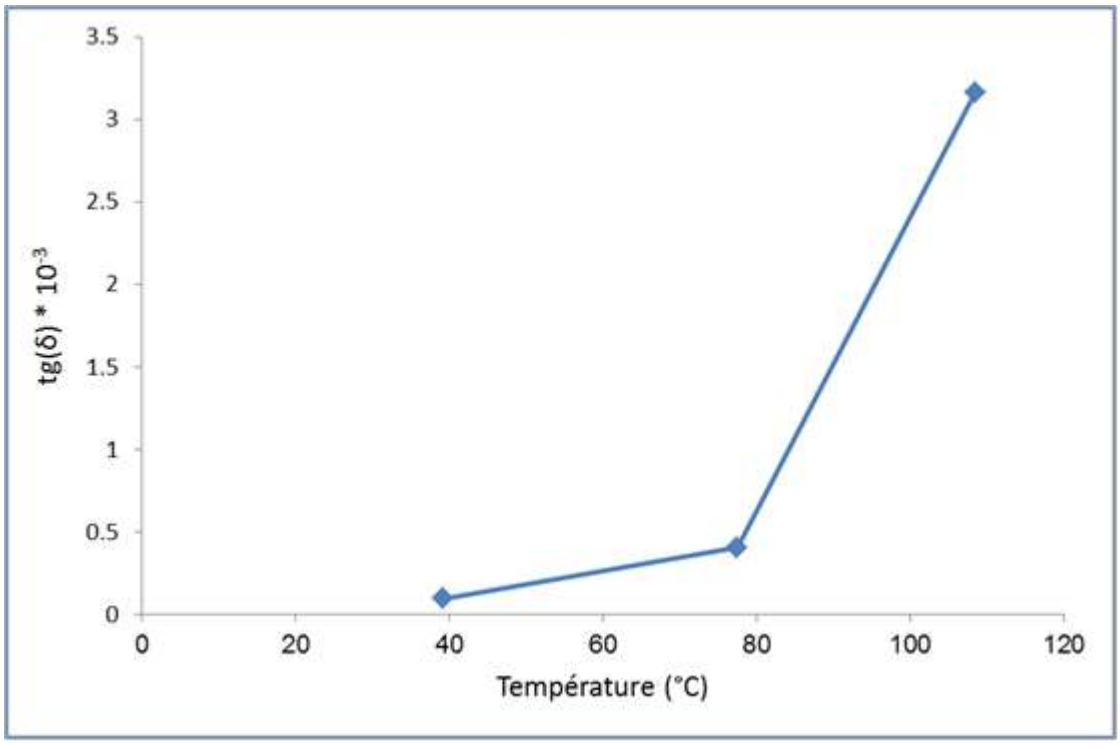


Figure IV.1. *Variation de tg (δ) de l'huile régénérée en fonction de la température.*

On remarque que le facteur de dissipation diélectrique (tg(δ)) augmente en fonction de la température. Il passe de $(0,095.10^{-3})$ pour la température 39.1°C jusqu'à la

valeur de ($0{,}406.10^{-3}$) pour la température 77.4°C. Pour les températures élevées la variation du facteur de dissipation diélectrique (tg(δ)) est importante et augmente d'une façon linéaire jusqu'à ($3{,}16.10^{-3}$) à la température 108.4°C.

Cette augmentation du facteur de dissipation avec la température est due essentiellement aux déplacement des charges libres. En plus, quand la température est élevée, la mobilité de ces charge augmente, ce qui engendre des courant de fuite plus importants.

IV.3.1.2. Huile neuve :

La figure IV.2 représente la variation du facteur de dissipation diélectrique en fonction de la température pour huile neuve.

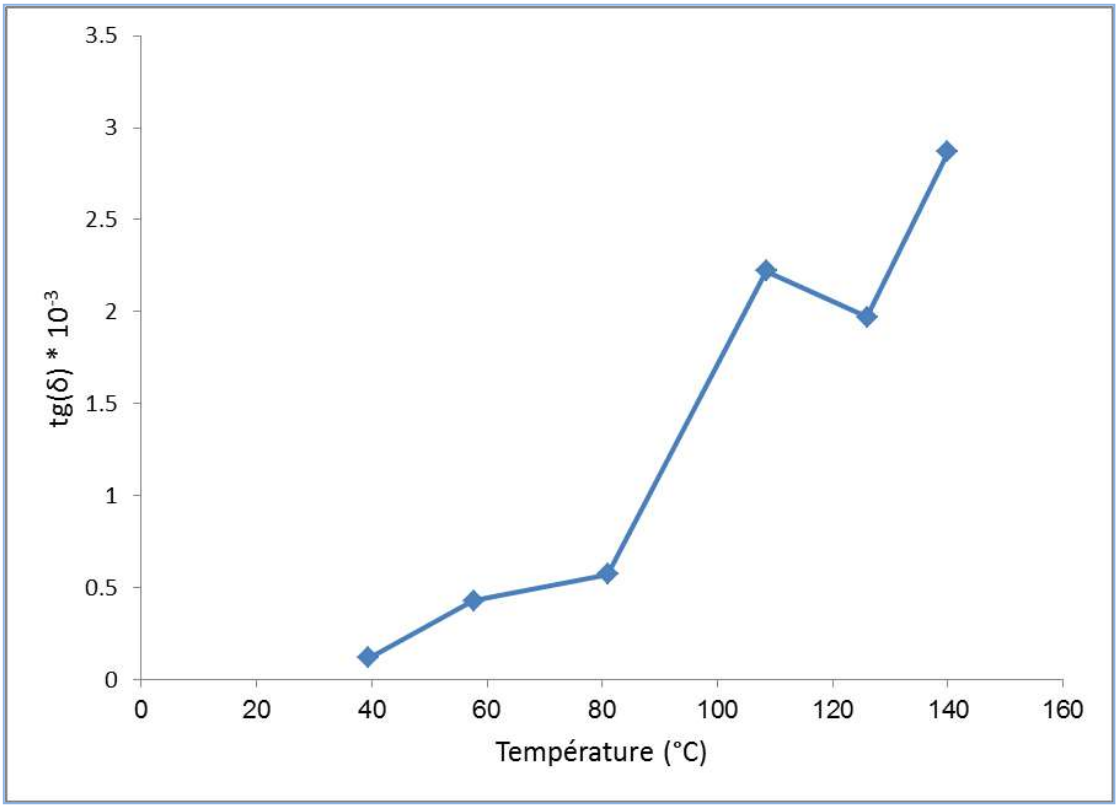


***Figure IV.2**. Variation de tg (δ) de l'huile neuve en fonction de la température.*

On remarque que le facteur de dissipation diélectrique (tg(δ)) augmente en fonction de la température. Il passe de ($0{,}119.10^{-3}$) pour la température 39.5°C jusqu'à la

valeur de ($2{,}22.10^{-3}$) pour la température 108.5°C, et atteint un valeur de $2{,}87.10^{-3}$ pour le température de 140°C.

Cette augmentation du facteur de dissipation avec la température est due aux mouvement des charges provoquées par l'augmentation de la température..

IV.3.1.3. Comparaison entre les résultats :

La figure IV.3 représente les variations du facteur de dissipations diélectriques en fonction de la température, pour une huile neuve et une huile régénérée.

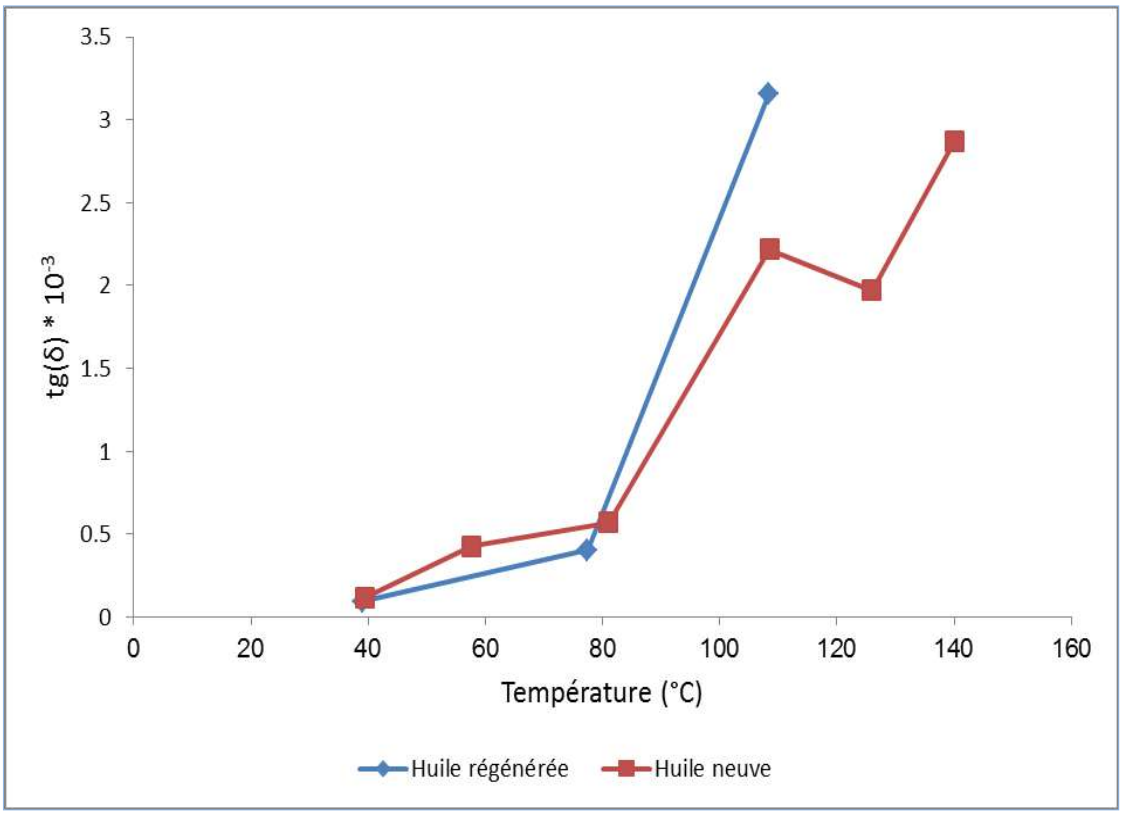


Figure IV.3. *Comparaison entre les facteur de dissipation des huile.*

D'après le figure, on remarque que le facteur de pertes tend à augmenter pour les deux types d'huile. L'augmentation du facteur de pertes pour l'huile regénérée n'est pas assez importante par rapport à celle de l'huile neuve.

IV.3.2. Variation de l'indice d'acidité en fonction de température :

IV.3.2.1. Huile régénérée :

La figure IV.4 représente la variation du l'indice d'acidité en fonction de la température pour l'huile régénérée.

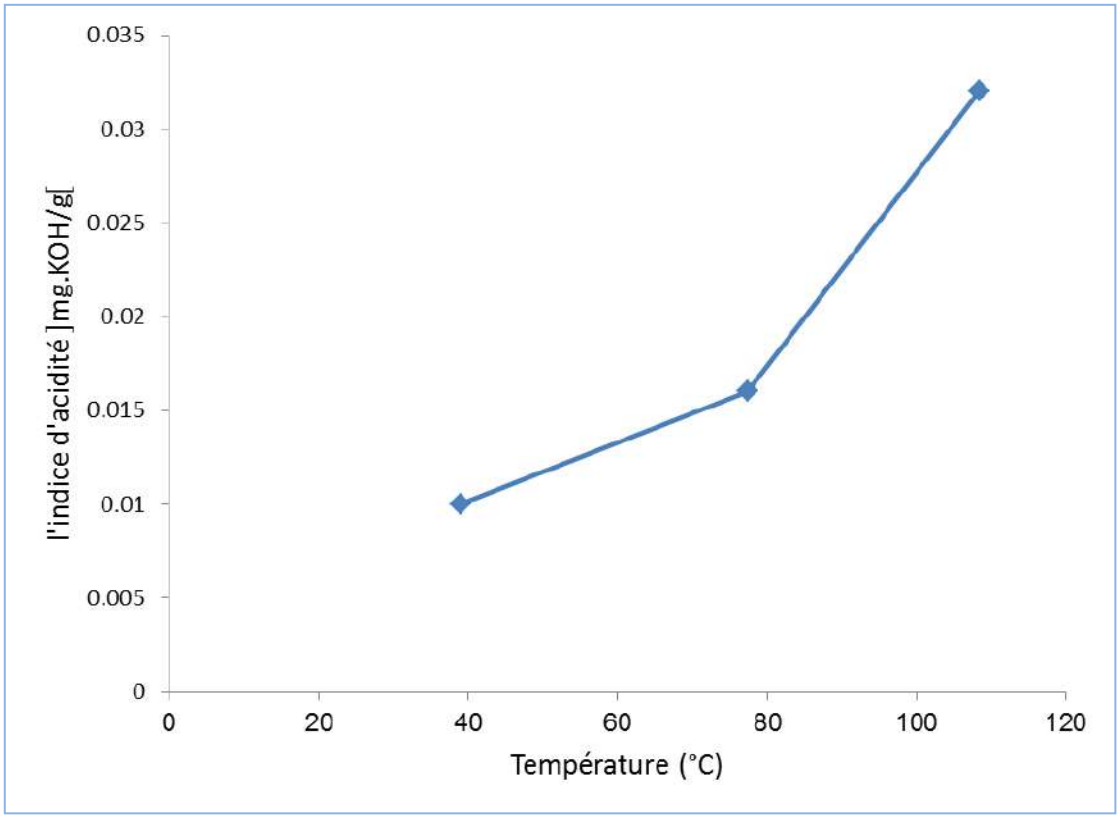


Figure IV.4*. Variation de l'indice d'acidité de l'huile régénérée en fonction de la température.*

On remarque que l'indice d'acidité augmente en fonction de la température. Il passe de (0,01) pour la température 39.1°C jusqu'à la valeur de (0,016) pour une température 77,4°C. A partir de la température 77.4°C et pour les température les plus élevées, l'augmentation devient plus importante et linéaire, pour la température 108,4°C elle atteint la valeur de (0,032).

Cette augmentation de l'indice d'acidité avec la température est due essentiellement à la reproduction des produits acides qui ont été éliminées après la

régénération dont leurs présences est petite pour les faibles températures. Par contre la présence des produits acides augmente et devient importante pour les températures élevées.

IV.3.2.2. Huile neuve :

La figure IV.5 représente la variation de l'indice d'acidité en fonction de la température pour une huile neuve.

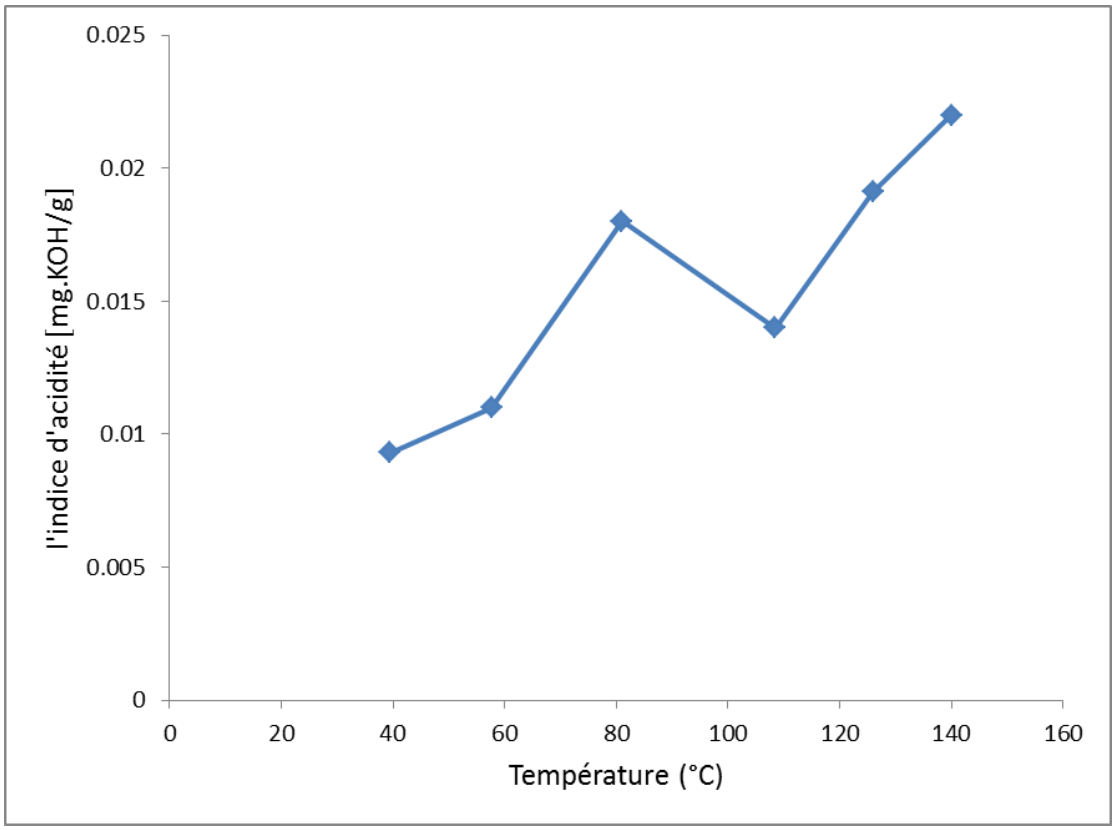


***Figure IV.5**. Variation de l'indice d'acidité de l'huile neuve en fonction de la température.*

On remarque que l'indice d'acidité augmente en fonction de la température Il passe de (0.0093) pour la température 39.5°C jusqu'à la valeur de (0,022) pour la température de 140°C.

Cette augmentation est due essentiellement au phénoméne d'oxydations qui donnent naissance à des produits acides. La quantités de ces produits acides augmente avec l'augmentation de la température.

IV.3.2.3.Comparaison entre les résultats :

La figure IV.6 représente les variations de l'indice d'acidité des huiles neuve et régénérée en fonction de la température.

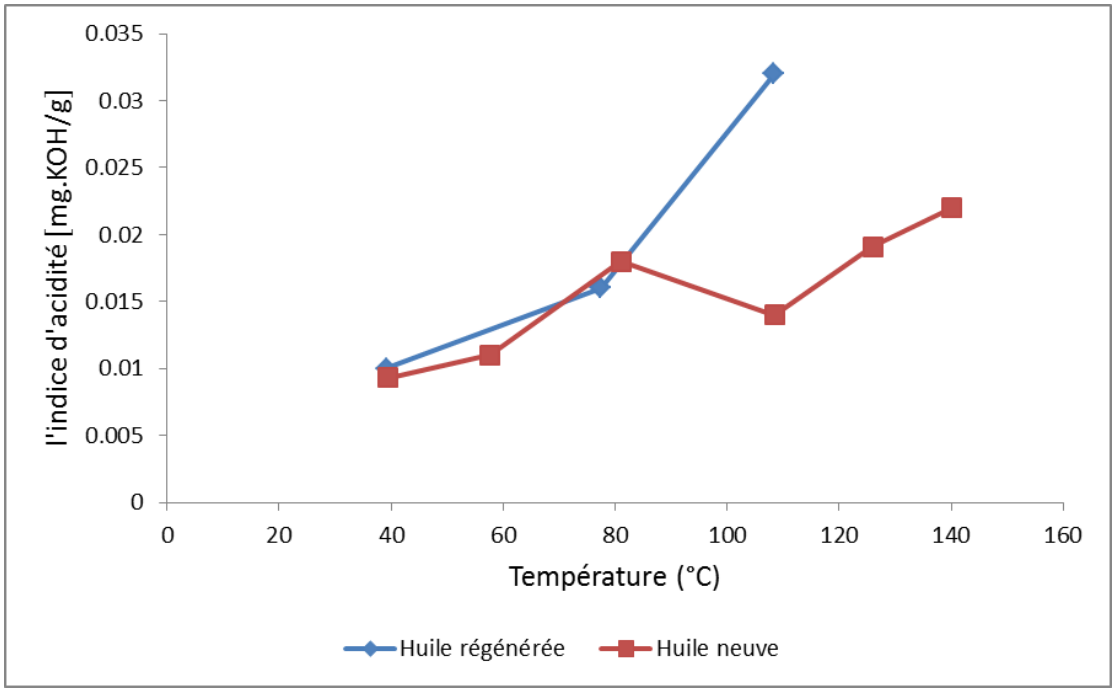


***Figure IV.6**. Comparaison de l'indice d'acidité en fonction de la température.*

On remarque que l'indice d'acidité augmente pour les deux types de l'huiles. Sauf que l'augmentation est légérement importante pour la variation de l'acidité correspondants à l'huile regénérée.

IV.3.3 Variation de l'indice de couleur en fonction de la température :

IV.3.3.1. Huile régénérée :

Le tableau IV.6 représente la variation de la couleur de l'huile régénérée en fonction de la température.

La température °C	39.1	77.4	108.4
La couleur	0.5	0.6	0.6

***Tableau IV.6** : La couleur de l'huile régénérée en fonction de la température.*

On remarque que la couleur réalise un petit changement pour une température de 77,4°C et reste constant à partir de la température 108,4°C. Toutfois l'indice de 0,6 est un indice qui correspond à une couleur jaune peu foncée qui est proche à l'état initiale, ceci est dû à la quantité d'acide dans l'huile qui n'est pas très importante pour causer le dégradation.

IV.3.3.2. Huile neuve :

Le tableau IV.7 représente la variation de la couleur de l'huile neuve en fonction de la température.

La température °C	39.5	57.7	81	108.5	126	140
La couleur	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.5	0.6

***Tableau IV.7** : La couleur de l'huile* neuve *en fonction de la température.*

On remarque que la couleur est reste pratiquement constante. Elle atteint un indice de 0,6 après une température de 140°C .

La valeur (<0.5) de la couleur de l'huile neuve correspond à une couleur jaune. Pour l'indice 0,6 la couleur devient un peu foncée.

D'après les résultats des deux types de l'huile (Tableau IV.6 et Tableau IV.7), la variation de l'indice de couleur est similaire.

IV.4. Conclusion :

D'après les résultats présentés dans ce travail il est clair que la méthode de régénération utilisée par la terre de bentonite-acide sulfurique H_2SO_4 permet d'éliminer efficacement les contaminants et produits acides de l'huile usagée. Elle permet donc d'obtenir une huile régénérée avec des caractéristiques proches de celle d'une huile neuve.

On a constaté que l'effet de la température sur l'huile régénérée et neuve est presque identique. L'évolution des caractéristiques de l'huile en fonction de la température est presque le même.

De ce fait, le regénération présente un moyen idéale pour améliorer les caractéristiques de l'huile, sechant qu'après traitement, l'huile regénérée resiste aux différentes contraintes de même que l'huile neuve.

.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La régénération de l'huile constitue un processus très utilisé dans la technologie des transformateurs de puissance. Elle permet d'améliorer les caractéristiques électriques et physico-chimiques de l'huile vieillie tout en économisant des sommes importantes d'argent. En plus de ses avantages en ce qui concerne l'environnement

D'après les résultats de régénération avec différentes terres utilisées, nous avons pu constater que la meilleure méthode de régénération est celle qui utilise la terre composée de bentonite-acide sulfurique (H_2SO_4), et qui permet d'éliminer efficacement les contaminants et les produits acides de l'huile usagée, tout en améliorant ses caractéristiques pour devenir presque similaire à celles de l'huile neuve.

Les résultats ont montré que le facteur de pertes diélectrique diminue après régénération, de même que l'indice d'acidité et l'indice de couleur.

D'autres types de résultats concernant l'effet de la température sur l'huile régénérée ont été comparés avec ceux de l'huile neuve. Nous avons constaté que le vieillissement thermique influe considérablement les deux états de l'huile neuve et usagée. Toutefois, la variation des caractéristiques pour l'huile usagée n'est pas assez importante par rapport à celle de l'huile neuve, ce que confirme que l'huile régénérée résiste contre les différentes contraintes de même que l'huile neuve. Ce qui confirme la fiabilité technique et économique de la régénération.

En perspective, des études de régénération sont proposées avec mesurés tous les caractéristiques électriques et physico-chimiques de huile régénérée sans exceptions, pour trouver les limites de caractéristiques pour la régénération ne présente aucune amélioration à l'huile.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[1] **MOULA Belkacem** «Comportement de l'huile de transformateur « Borak 22 »sous tension alternative 50 Hz», Thèse de Magister, **É**cole **N**ationale **P**olytechnique Alger, 2007.

[2] **Christophe Perrier** «étude des huiles et des mélanges à base d'huiles minérale pour transformateurs de puissance –recherche d'un mélange optimal », Thèse de doctorat, **É**cole **C**entrale **d**e **L**yon, 2005.

[3] **Khelil Djazia et Zoutat Sonia** «Étude des Phénomènes de Décharge Électrique dans la Borak 22 sous Tension Alternative», Projet de fin d'étude PFE, **É**cole **N**ationale **P**olytechnique Alger, Juin 2006

[4] **Abdi Sif-Eddine** «Influence Du Vieillissement Thermique Sur Les Propriétés De L'huile De Transformateur », Thèse Pour obtention du diplôme de : Magistère en électrotechnique, **É**cole **N**ationale **P**olytechnique Alger, Juillet 2002.

[5] **Norme CEI 60296** «Huiles minérales isolantes neuves pour transformateurs et appareillages de connexion», Avril 2004.

[6]. **Abdi Sif-Eddine** «Influence Du Vieillissement Thermique Sur Les Propriétés De L'huile De Transformateur », Thèse de doctorat, **É**cole **N**ationale **P**olytechnique Alger,2012

[7] **FAROUDJA MOHELLEBI** ; «Analyse et régénération des huiles usagées » ; Thèse de doctorat, **É**cole **N**ationale **P**olytechnique d'Alger ENP 2001.

[8] **Norme CEI 60422** «Huiles minérales isolantes dans les matériels électriques – Lignes directrices pour la maintenance et la surveillance», 3eme édition 2005.

[9] **RECOMMANDATION ISO 2049** «Produits pétroliers-Détermination de la couleur (échelle ASTDM)», 2eme édition 1996.

[10] **Norme CEI 60247** «Liquides isolants – Mesure de la permittivité relative, du facteur de pertes diélectriques et de la résistivité», 2004.

[11] **Norme CEI 60021-1** «Liquides isolants – Détermination de l'acidité, Partie 1 : Titrage potentiométrique», 2003.

[12] **CHIKHI Khalid** « Adsorption du zinc sur la bentonite de Maghnia», Universite kasdi merbah ouargla

[13] **AZIZI MOHAMED et DAHMANI FATIMA** «Etude de la régénération des huiles de transformateur» Thèse ingénieure**,** Université de Dr. Yahia Fares Médéa 2011.

[14] **Norme CEI 60156** «Liquides isolants – Détermination de la tension de claquage à haute fréquence», 1995.

[15] **Amar Tilmatine** « Chapitre 7 : MATERIAUX DIELECTRIQUES », [En ligne] Disponible : http://www.univsba.dz/fsi/downloads/ETL437-Chapitre_7 .PDF.