



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Laboratoire de (SKMK) Blida
Unité opérationnelle du traitement des huiles des transformateurs

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master en
Mécanique option énergétique

Etude expérimentale de l'impact de vieillissement sur la capacité
de refroidissement d'huile neuve, régénérée et inhibée.

Proposé et encadré par :

- Promoteur :D^r M. ROUDANE .
- Co-Promotrice :D^r OUMERT LEILA .

Réalisé par :

- M^{elle} Hadjkoulah Souad.
- M^{elle} Mourghad Hayette.

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la foi, la patience et la chance d'étudier et suivre, le chemin de la science.

*Nos très vifs remerciements s'adressent à notre promoteur **D' M. ROUDANE** pour ses conseils lucides et pertinents, sa patience et son précieux suivi tout au long de la réalisation de ce travail. Ses qualités pédagogiques et humaines, et ses compétences nous ont apporté un encadrement déterminant dans ce travail.*

*Aussi, nous aimerions remercier notre Co-promotrice **D' OUMERT LEILA** responsable de laboratoire SKMK SONELGAZ, Blida pour son accueil, le temps qui nous a préservé, de nous avoir partager son expérience au quotidien et à sa confiance. Grace a son aide précieux dans les moments les plus délicats nous avons pu accomplir notre projet avec succès.*

*Nous remercions également **M^r BENALI ABDELHALIM, M^{me} OUNOUGH I AICHA** pour leurs accueils, leurs esprit d'équipe et leurs collaborations.*

*Nos plus sincères gratitudees à notre **P^r TEMMER MOSTAPHA** chef département génie mécanique Université de Blida 1 pour son aide son soutien et son encouragement.*

Nous remercions chacun des membres du jury d'avoir consacré une partie de leur temps à la lecture de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Nos remerciements s'étendent à tous nos enseignants et les membres du département Génie de mécanique l'université de Blida.

En fin nous tenons à remercier toutes les personnes, qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

A ma source de bonheur :

**A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse,
leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.**

**A mes chères sœurs Nabila et Baraa pour leurs encouragements permanents,
et leur soutien moral.**

**A mes chers frères Nabil et Abdelhakim pour leur appui et leur
encouragement.**

**A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours
universitaire,**

**Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de
votre soutien infailible,**

Merci d'être toujours là pour moi.

**Mes chères amies Assma et Chaima ainsi mes collègues Ali, Abd errahman et
Happy.**

A tous les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

HADJKOULAH SOUAD

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

A ma source de bonheur :

Mon père, ma mère pour leurs amour, leurs bonté, leurs sacrifice, leurs encouragements perpétuels, leurs soutien.

Puisse Dieu prolonger leurs vie dans le bonheur.

Mes frères Aymen, Nadir et ma sœur Serin.

A mes chères amies Slamani Ikram et Chadi Nadjwa.

A tous mes collègues et les personnes qui me connaissent de près ou de loin.

Aussi toute l'équipe de *de laboratoire SKMK SONELGAZ, Blida*

MOURGHAD HAYETTE

ملخص

إن استخدام الزيوت المعدنية في محولات الطاقة يضمن تبريد وعزل الجهاز. لسوء الحظ ، يخضع الزيت العازل للتردي نتيجة لعدة عوامل أثناء استخدامه لعدة سنوات.

في هذا العمل، درسنا عن محولات الطاقة وخصائصها، ودرسنا تأثير الشبخوخة الحرارية للزيوت (النفط الجديد، والنفط المجدد، والنفط المثبط) على خصائصها الكهربائية، الفيزيوكيميائية والسوائل الحرارية تحت تأثير درجات الحرارة المختلفة الأجهزة وطرق التشخيص المستخدمة في اختبارات زيت المحولات في مختبر الصيانة (البلديةSONALGAZ (SADEG) .

الكلمات المفتاحية:

محولات الطاقة، الزيت المعدني، الزيت المثبط، الشبخوخة الحرارية، خصائص السوائل الكهربائية و الموائع الحرارية.

Résumé.

Résumé :

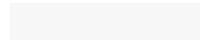
L'utilisation des huiles minérales dans les transformateurs de puissance assure le refroidissement et l'isolation de l'appareil. Malheureusement l'huile isolante subit une dégradation due à plusieurs facteurs lors de son utilisation durant plusieurs années.

Dans ce travail, Nous avons étudié sur les transformateurs de puissance et leurs propriétés et on a étudié l'impact du vieillissement thermique des huiles (l'huile neuve, l'huile régénérée, l'huile inhibée) sur leurs propriétés électriques, physicochimiques et thermo fluidiques sous l'influence de différentes températures.

Les appareils et les méthodes de diagnostic utilisés pour les essais effectués sur l'huile de transformateur au laboratoire de maintenance (SADEG) (SONALGAZ, Blida).

Les mots clés :

Les transformateurs de puissance, huile minérale, huile inhibée, vieillissement thermique, propriétés électriques et physicochimiques et thermo fluidiques.



Abstract.

Abstract:

The use of mineral oils in power transformers ensures the cooling and isolation of the device. Unfortunately, the insulating oil undergoes degradation due to several factors during its use for several years.

In this work, we studied about power transformers and their properties and we studied the impact of thermal aging of oils (new oil, regenerated oil, inhibited oil) on their electrical, physicochemical and thermo-fluidic properties.

Apparatus and diagnostic methods used in the (SADEG) maintenance laboratory (SONALGAZ, Blida).

Keywords:

Power Transformers, Mineral Oil, Inhibited Oil, Thermal Aging, electrical and physicochemical and thermos fluidic properties.

Table des matières.

TABLE DES MATIÈRES :

Dédicace	i
Remercîments.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract	v
Table des matières.....	vii
Liste des figures	xi
Liste des tableaux.....	xvi
Liste des signes et abréviation.....	xviii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Présentation générale des transformateurs de puissance.....	3
I.1 Généralités sur les transformateurs	4
I.2 Système de refroidissement des transformateurs	6
I.2.1 Isolation solide	7
I.2.2 Isolation liquide	8
I.3 Type des huiles diélectriques	9
I.3.1 Les huiles minérales	9
I.3.2 Rôle des huiles minérales	11
I.3.2.1 Rôle isolant	11
I.3.2.2 Rôle caloporteur	11
I.4 Propriétés des huiles diélectriques	11
I.4.1 Propriétés électriques.....	11
I.4.1.1 Conductivité et Résistivité.....	12
I.4.1.2 Le facteur de dissipation $\tan(\delta)$	12
I.4.2 Propriétés physiques.....	12
I.4.2.1 Capacités thermiques	12

Table des matières.

I.4.2.2 Point d'éclaire et point de feu :(inflammabilité).....	13
I.4.2.3 Conductivité thermique.....	13
I.4.2.4 Viscosité.....	13
I.4.3 Propriétés chimiques.....	13
I.4.3.1 Indice d'acidité	14
I.4.3.2 La densité.....	14
I.4.3.3 Couleur et aspect.....	14
I.4.3.4 La teneur en eau	14
I.5 Complexe huile/Papier	15
I.6 vieillissement des transformateurs	15
I.6.1 Dégradation du papier.....	16
I.6.2 Dégradation de l'huile minérale	16
I.6.3.1 Contraintes électriques.....	17
I.6.3.2 Contraintes thermiques.....	17
I.6.3.3 Contraintes mécaniques.....	18
I.6.3.4 Contraintes thermiques.....	18
I.6.3.5 Contraintes environnementales.....	18
I.7 Les huiles inhibées	18
I.8 Huiles régénérées.....	19
I.8.1 Nécessité de la régénération :(Avantages)	19
I.8.2 Régénération des huiles minérales.....	20
I.9 Mécanisme d'oxydation	20
I.10 Fonction de transfert de chaleur.....	22
I.11 Impacte des impuretés sur la qualité du transformateur	22
a. Influence de la pression.....	23
b. Influence de la température.....	23

Table des matières.

c. Influence de la teneur en eau.....	24
I.12 Dégradation du complexe huile/papier	24
Conclusion	25
Chapitre II : Méthode et appareillage.....	26
II.1 Procédure expérimentale	26
II.2 Méthode de vieillissement thermique.....	27
II.3. Appareils de mesures des caractéristiques.....	31
II.3.1. Aspect et Indice de couleur	31
II.3.2 Teneur en eau	31
II.3.3 Facteur de dissipation (Tan δ)	32
II.3.4 Indice d'acidité.....	33
II.3.5 Mesure de la viscosité cinématique	34
II.3.6 Mesure de la densité	36
II.3.7 La conductivité thermique	36
CHAPITRE III : Présentation et discussion des résultats	38
III.1. Effet du vieillissement thermique sur les caractéristiques de l'huile	38
III.1.1. Variation de la viscosité, l'indice de couleur et la Chaleur spécifique	39
III.1.2. Variation de la teneur en eau, l'indice de l'acidité et la densité	43
III.1.3 Variation de la résistivité, le facteur de dissipation (tan δ) et la conductivité thermique	48
Conclusion générale	53
Bibliographie.....	54
Annexes.....	55

Liste des figures.

Liste des figures

Figure I.1 : Exemple d'un réseau électrique.....	3
Figure I.2 : Constitutions d'un transformateur de puissance immergé dans l'huile.....	4
Figure I.3 : Transformateur à sec.....	6
Figure I.4 : Transformateur immergé dans l'huile.....	7
Figure I.5 : Motif élémentaire d'une cellulose.....	8
Figure I.6 : Processus de raffinage pour les huiles brutes.....	9
Figure I.7: Principaux constituants chimiques de l'huile minérale issue du pétrole brut.....	10
Figure I.8 : Interaction entre les contraintes (électriques, thermiques, chimiques) et le système d'isolation du transformateur.....	11
Figure II.1 : Les échantillons dans l'étuve pour le vieillissement.....	27
Figure.II.2 :Variation d'huile pendant le vieillissement thermique a 140°C.....	28
Figure II.3 : Les variations d'huile pendant le vieillissement thermique a 120°C.....	29
Figure II. 4: papier et cuivre afin de vieillissement.....	30
Figure II.5 : Dépôts d'huile après le processus de vieillissement.....	30
Figure II.6 : Colorimètre pour la mesure de la couleur.....	31
Figure II.7: Appareil COULOMETRE de mesure de la teneur en eau.....	32
Figure II.8: Appareil tangent delta de mesure du facteur de dissipation ($\tan \delta$).....	33
Figure II.9: Dispositif et le titrage pour la mesure de l'indice d'acidité.....	34
Figure II.10: Le viscosimètre.....	35
Figure II.11 : Tube capillaire.....	35
Figure II.12 : L'instrument pour mesuré la densité.....	36
Figure III.1:Variation de la viscosité T=140°C.....	39

Liste des figures.

Figure III.2: Variation de la viscosité T= 120°C.....	39
Figure III.3: Variation de la viscosité T=100°C.....	39
Figure III .4: Variation de l'indice de couleur T= 140°C.....	40
Figure III .5 : Variation de l'indice de couleur T= 120°C.....	40
Figure III .6 : Variation de l'indice de T=100°C.....	41
Figure III .7 : Variation de la chaleur spécifique T= 140°C.....	41
Figure III.8 : Variation de la chaleur spécifique T= 120°C.....	42
Figure III.9: Variation de la chaleur spécifique T= 100°C.....	42
Figure III. 10 : Variation de la teneur en eau T= 140 °C.....	43
Figure III.11 : Variation de la teneur en eau T= 120 °C.....	43
Figure III.12 : Variation de la teneur en eau T= 100 °C.....	44
Figure III. 13 : Variation de l'acidité T= 140 °C.....	44
Figure III.14 : Variation de l'acidité T=120 °C.....	45
Figure III.15 : Variation de l'acidité T=100 °C.....	45
Figure III.16 : Variation de la densité T=140 °C.....	46
Figure III. 17 : Variation de la T=120 °C.....	46
Figure III.18 : Variation de la densité T= 100 °C.....	47
Figure III.19: Variation de la résistivité T= 140 °C.....	48
Figure III.20: Variation de la résistivité T= 120 °C.....	48
Figure III.21 : Variation de la T= 100 °C.....	49
Figure III. 22 : Variation de facteur de dissipation (tan δ) T= 140 °C.....	49
Figure III.23: Variation de facteur de dissipation (tan δ) T= 120 °C.....	50
Figure III.24 : Variation de facteur de dissipation (tan δ) T= 100 °C.....	50
Figure III.25 : Variation de la conductivité (λ) T=140 °C.....	51
Figure III.26 : Variation de la conductivité (λ) T=120 °C.....	51
Figure III.27 : Variation de la conductivité (λ) T=100 °C.....	51

Liste des tableaux .

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Quelques propriétés physiques, chimiques et électriques des huiles minérales....	14
Tableau II .1 : Caractéristiques d'huile de transformateur	27

Liste des abréviations.

Liste des abréviations

HN : Huile neuve.

HR : Huile régénéré.

HN+MgO : Huile inhibé.

MgO : Oxyde Magnésium.

KOH : Hydroxyde de potassium.

Cu : Cuivre .

ISO : Organisation internationale pour Standardisation.

CEI : Commission Électrotechnique Internationale.

Eq : Équation.

Ppm : Parties par million.

s : Seconde.

T : Température °C.

t : Temps de vieillissement

d_{15} [Kg/m³]: : Densité d'huile à 15 °C.

ρ_{h15} [kg/m³]: Masse volumique d'huile à 15°C.

I.A [mg KOH/g] : Indice d'acidité.

CP : [J/(kg. °C)] : Capacité thermique.

λ [W/m. °C]: La conductivité thermique.

ρ [E+09 Ω m]: La résistivité.

$\tan \delta$: Facteur de dissipation électrique.

.

Introduction générale.

Introduction générale

La demande mondiale en énergie électrique étant sans cesse en croissance, cela implique un risque de surcharges des transformateurs et par conséquent une surchauffe de ceux-ci. La plupart des transformateurs à travers le monde approchent leur fin de vie utile. Il est devenu primordial de trouver de nouvelles solutions pour améliorer la conception des transformateurs de puissance, mais surtout d'augmenter leur durée de vie utile.

L'analyse du complexe isolant, constitué d'huile et de papier cellulose, fournit des informations non seulement sur la qualité de ces dernières, mais permet également de détecter des signes avant-coureurs de défaillances. En contrôlant de façon précise l'état de ces isolations, on peut détecter à temps les défauts naissants et éviter les pannes potentielles. Pour les puissances élevées, les transformateurs à huile sont préférables à ceux de type sec, car l'huile assure non seulement la fonction d'isolation, mais aussi la fonction de refroidissement.

Plusieurs outils et méthodes pour le diagnostic des transformateurs de puissance sont actuellement disponibles : le facteur de dissipation de l'huile, la teneur en eau, l'acidité, la viscosité, la conductivité, la capacité thermique, la résistivité...etc.

Ce présent travail de recherche intitulé : « **étude de l'impact de vieillissement sur la capacité de refroidissement d'huile neuve, régénérée et inhibée** », a pour objet de connaître les meilleures concentrations en MgO nécessaire pour obtenir des huiles inhibées près de l'idéale en refroidissement ainsi que pour l'isolation, tous cela avec une comparaison avec une huile neuves et régénérée.

Le travail comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre présente d'une manière générale les compositions du transformateur, les différents systèmes de refroidissement, les mécanismes de vieillissement et de dégradation associés aux isolants solides et liquides et l'influence du vieillissement sur certaines propriétés de l'huile minérale.

Le deuxième chapitre traite des matériels et méthodes utilisés dans la partie expérimentale de cette étude.

Le troisième chapitre discute les résultats obtenus de l'expérience sur les huiles sous forme des graphes.

Introduction générale.

Problèmes rencontrés :

Durant la réalisation de ce travail, on a recentré plusieurs problèmes pour effectuer les différentes opérations expérimentales programmées dans cette étude :

- La difficulté de se déplacer au laboratoire pour la réalisation du travail expérimentale à cause de Covid 19.
- La durée expérimentale non suffisante.
- Manque des références.
- Ce travail a été censé de faire une simulation comparative entre les types des huiles utilisées dans un transformateur exemple pour savoir la meilleure huile de refroidissement vieillie qui résiste les hautes températures.

Chapitre I

Présentation générale des transformateurs
de puissance.

Introduction :

Les équipements transformateurs jouant un rôle essentiel dans le transport et la distribution d'électricité au réseau électrique (figure 1), dans l'industrie de l'énergie électrique.

Leurs fonctions sont essentielles dans la transmission et la distribution de l'énergie, qui a augmenté ces dernières années en raison de l'augmentation de la consommation d'énergie.

Ce chapitre présente une description générale et détaillée sur les différents constituants du transformateur ainsi son système de refroidissement qui est le plus important dans le sujet de vieillissement.

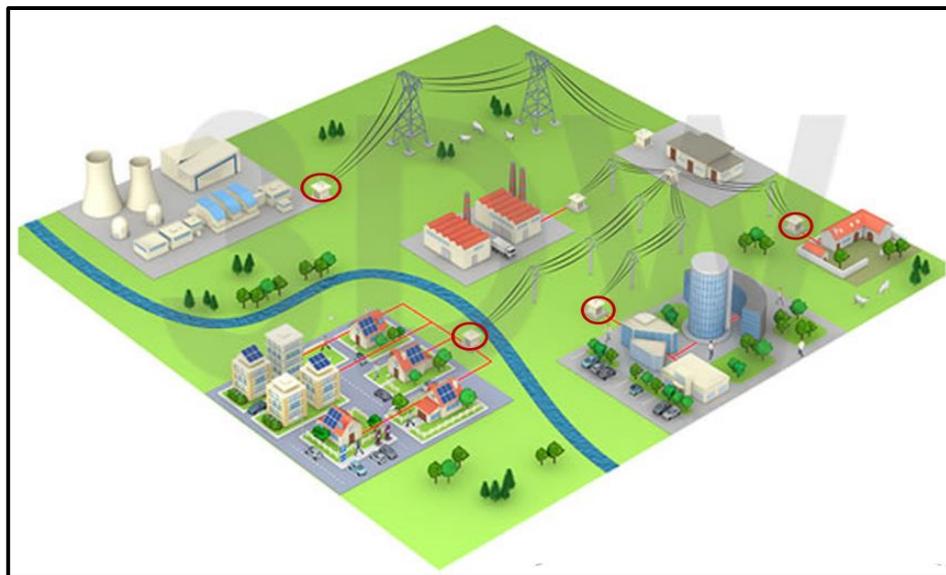


Figure I.1 : Exemple d'un réseau électrique.

I.1 Généralités sur les transformateurs :

Les transformateurs de puissance sont des équipements électriques importants et coûteux dans les réseaux d'énergie électrique. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale est : « appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique. En termes d'investissement, ces équipements représentent près de 60% du prix d'un poste de transformation.

D'une manière générale, un transformateur est constitué d'un circuit magnétique feuilleté et d'un ensemble des bobines séparées par les écrans électrostatiques qui entourent des noyaux magnétiques. Chaque bobine formant le milieu conducteur est organisée en paquets de spires.

I.1 Les principaux organes du transformateur :

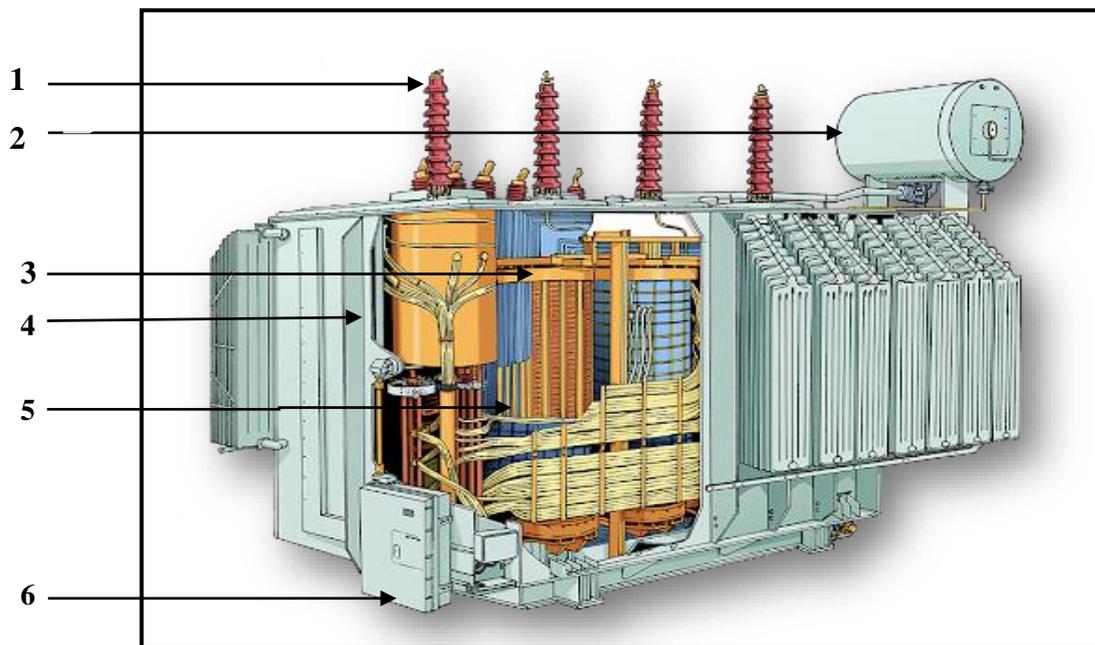


Figure I.2 : constitutions d'un transformateur de puissance immergé dans l'huile

1. **Les bornes de traversées basses et hautes tensions** : peuvent être isolées respectivement par de la porcelaine et du papier imprégné d'huile ou de résine époxy. Elles permettent le transit de la puissance. Certaines sont immergées, notamment pour les très hautes tensions, d'autres sont sèches
2. **Le conservateur d'huile** : réservoir métallique (acier en général) est situé sur le dessus du transformateur. Il joue un rôle de vase d'expansion pour l'huile. Les variations de température de l'huile impliquent des variations du volume. Le conservateur permet au niveau d'huile de varier sans affecter la pression dans le transformateur.
3. **Le noyau magnétique** : constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés. L'empilage et l'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les meilleures performances possibles du point de vue électrodynamique, électrique et acoustique.
4. **Les isolants solides** : Les papiers et les cartons ont caractéristiques diélectriques excellentes. L'imprégnation par un isolant liquide (l'huile minérale), leur confère une rigidité diélectrique remarquable. Le papier Kraft est l'un des papiers les plus utilisés dans l'industrie électrique.
5. **Les enroulements** : (feuillard ou rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium) sont montés sur le noyau. Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation d'huile et les échanges thermiques
6. **La cuve** (constituée de tôles d'acier) Les parois de la cuve sont, selon les modèles, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectés par une vanne d'arrêt. La structure et les soudures d'assemblage peuvent être renforcées dans le cas où une bonne tenue au vide est nécessaire

Le fluide diélectrique : circule entre les différentes compositions du transformateur dans la cuve. [4]

I.2 Système de refroidissement des transformateurs :

Aucun transformateur n'est vraiment un "transformateur idéal" et donc chacun subira des pertes dont la plupart seront converties en chaleur. Si cette chaleur n'est pas dissipée correctement, l'excès de température dans le transformateur peut causer de graves problèmes, tels qu'une défaillance de l'isolation. Il est évident que le transformateur a besoin d'un système de refroidissement.

Le dispositif de refroidissement bien dimensionné permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée cette chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile, vers les radiateurs extérieurs.

Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique, 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. [5]

❖ Types de transformateur :

Les transformateurs peuvent être divisés en deux types selon leur système de refroidissement :

- **Transformateurs de type sec :**

Les enroulements BT (basse tension) et les enroulements HT (haute tension) sont concentriques et enrobés dans une résine époxy. Le transformateur sec peut être disposé dans une enveloppe de protection qui permet de l'isoler du monde extérieur et d'assurer l'évacuation de la chaleur au travers de ses parois. Le transformateur sec présente les meilleures garanties de sécurité contre la pollution (pas de fuite de liquide, pas de vapeurs nocives en cas d'incendie. [3]



Figure I.3 : transformateur à sec.

- **transformateurs immergés dans l'huile :**

Le transformateur est disposé dans un bain d'huile qui assure l'isolement et le refroidissement. Ce transformateur est moins onéreux et a des pertes moindres que le transformateur sec. [3]



Figure I.4 : transformateur immergé dans l'huile.

L'isolation de la plupart des transformateurs est composée de cellulose (papier/carton compressé) ou l'isolation solide et d'huile ou l'isolation liquide. [3]

I.2.1 Isolation solide :

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, compressé, le cylindre isolant et le carton sont faits à partir des matériaux cellulosiques qui constituent le meilleur compromis technico-économique de l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance.

Les papiers captent et retiennent les dépôts issus de la dégradation des matériaux : ils jouent un rôle de purificateur d'huile et se dégradent lentement. Ajoutée au vieillissement, cette dégradation altère les propriétés de l'huile entraînant à terme un risque de claquage du transformateur. [1]

Les papiers et les cartons sont des matériaux isolants possédant des caractéristiques diélectriques excellentes. L'imprégnation par un isolant liquide, essentiellement l'huile minérale leur confère une rigidité diélectrique remarquable. Le papier Kraft est l'un des papiers les plus utilisés dans l'industrie électrique. [2]

Ces isolants solides sont constitués de fibres de celluloses (chaînes de glucose extraites de la pulpe de bois ou de fibres de coton). Les celluloses sont formées de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène

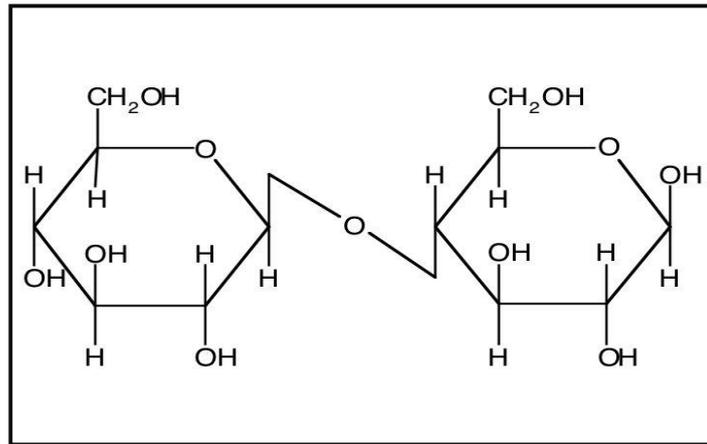


Figure I.5 : Motif élémentaire d'une cellulose [4]

- **Le rôle de l'isolation solide :**

Le constant diélectrique du papier est deux fois plus élevé que celle de l'huile. Le papier et le carton seront donc utilisés dans les zones où règne un fort champ électrique pour renforcer l'isolation dans l'huile.

I.2.2 Isolation liquide :

Dans les transformateurs l'huile isolant fournit un support d'isolation ainsi de transfert de chaleur qui évacue la chaleur produite dans les enroulements et le noyau de fer. La résistance électrique et la durée de vie d'un transformateur dépendent principalement de la qualité de l'huile isolante. Il est très important d'utiliser une huile isolante de qualité et il doit généralement satisfaire aux exigences suivantes :

- Fournir une résistance électrique élevée.
- Permettre un bon transfert de chaleur.
- Avoir une faible viscosité d'huile c'est à dire avoir une plus grande fluidité.

Le rôle fondamental de l'huile est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement du transformateur. Elles devraient avoir les caractéristiques suivantes :

- point d'inflammabilité élevée.
- point de congélation basse.
- rigidité diélectrique élevée.
- basse viscosité.

- bonne résistance à l'électrification statique. [7]

Les défauts internes, thermiques ou électriques entre autres, laissent des traces dans ces huiles. En conséquence l'analyse d'échantillons d'huile prélevés sur les transformateurs permet une détection très efficace de certains de ces défauts, en particulier avec l'huile minérale qui a été très étudiée.

I.3 Type des huiles diélectriques :

- Huiles minérales.
- Huiles végétales.
- Huiles alternatives (synthétique).

I.3.1 Les huiles minérales :

L'huile minérale est faite d'un mélange d'alcane, de naphthènes, et des hydrocarbures aromatiques, raffinés à partir du pétrole brut. Le raffinage est d'extraire toutes les impuretés de l'huile afin de lui conférer de meilleures propriétés. Selon le type de procédé (hydrocraquage, extraction ou hydrogénation), on obtient des huiles de type paraffinique, aromatique ou naphthénique. Les processus de raffinage pourraient inclure le traitement par l'acide, l'extraction par solvants, l'hydrotraitement, ou la combinaison de ces méthodes. Le raffinage lorsqu'il est parfaitement achevé, peut rapporter les caractéristiques de l'huile minérale aux spécifications exigées.

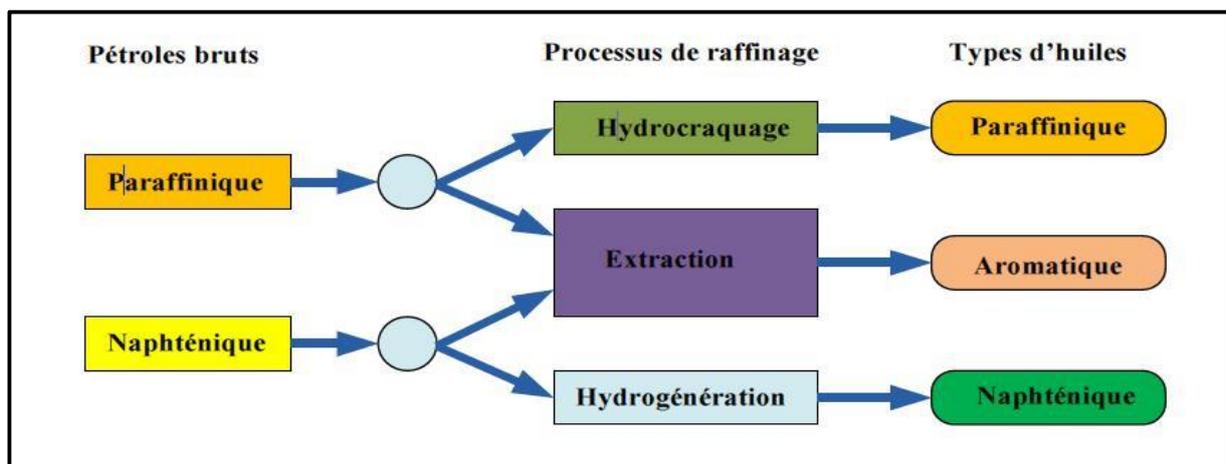
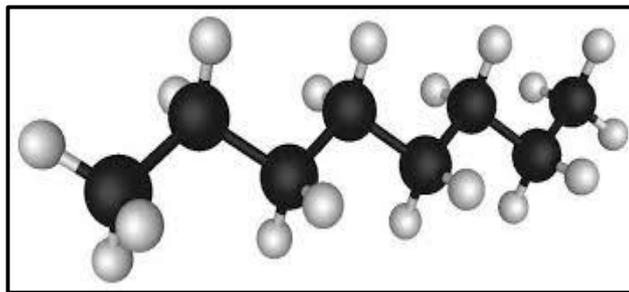


Figure I.6 : Processus de raffinage pour les huiles brutes [6]

Une fois les impuretés enlevées, ces huiles deviennent des mélanges très complexes; elles peuvent comporter plus de 3000 hydrocarbures différents. Ces molécules ne comportent que du

carbone et de l'hydrogène. Elles sont divisées en quatre groupes : les alcanes (ou paraffines), les cyclanes (ou naphènes), les naphènes condensés et les composés aromatiques. D'autres constituants peuvent être présents dans l'huile, à savoir de petites quantités de sulfure (0.1 à 7 % en masse), d'azote (0.001 à 2 %) et des traces d'oxygène (400 à 600 ppm en masse). [6]



Paraffines C_nH_{2n+2}

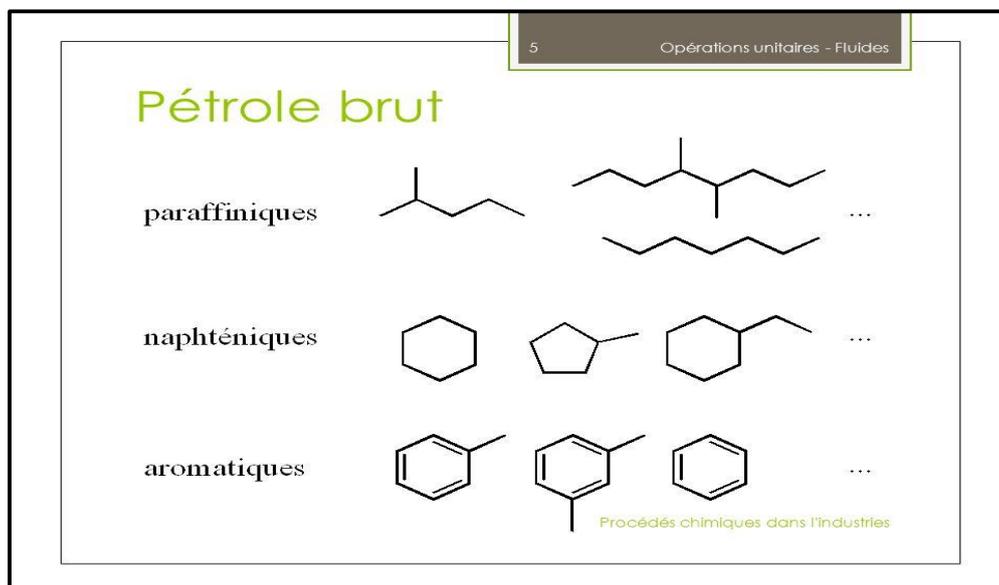


Figure I.7 : Principaux constituants chimiques de l'huile minérale issue du pétrole brut

I.3.2 Rôle des huiles minérales :**I.3.2.1 Rôle isolant :**

L'huile est utilisée pour l'isolation électrique seulement dans les régions où les contraintes électriques sont relativement faibles. Dans un transformateur haute tension, l'huile minérale doit pénétrer les papiers et les cartons qui ont été préalablement séchés et dégazés.

I.3.2.2 Rôle caloporteur :

L'huile sert aussi d'agent caloporteur de la partie active, qui est une source chaude, vers un système de refroidissement, qui est une source froide. La conductibilité thermique de ce fluide et sa chaleur massique doivent être aussi élevées que possible, et sa viscosité idéalement faible. Par exemple dans les plus gros transformateurs, comme en sortie de centrale, les pertes à évacuer peuvent aller jusqu'à quelques MW.

En conséquence les huiles minérales ont trois fonctions principales :

- Assurer l'évacuation de la chaleur, produite par les pertes au niveau des conducteurs, des circuits magnétiques et des isolants, vers les dispositifs de refroidissement.
- Isoler, c'est-à-dire ralentir l'oxydation de l'isolation solide.
- Isoler électriquement.

A ces fonctions principales fondamentales, il y a lieu d'ajouter la fonction résistance incendie et lubrifiant pour certain appareil comportant des pièces mobiles. [18]

I.4 Propriétés des huiles diélectriques :

Les principales propriétés permettent de dire que l'huile remplit sa fonction diélectrique sont classées en trois types :

I.4.1 Propriétés électriques :

Le domaine d'étude des propriétés électriques est caractérisé par la pluridisciplinarité car il touche la chimie, l'électronique et la mécanique des fluides.

Une élimination de tout ce qui étrange du liquide est nécessaire (résidus de synthèse, particules, gaz et molécules d'eau), ces impuretés peuvent être éliminé par les opérations de traitement (dégazage sous vide, ultrafiltration).

I.4.1.1 Conductivité et Résistivité :

Pour dire qu'un liquide est un isolant électrique, il doit conduire le minimum d'électricité sous une tension appliquée. [12]

La conductivité est la présence d'une quantité égale des charges libres positives et négatives, dans les liquides isolants la conductivité prend sa valeur minimale.

La résistivité est influencée par l'existence des substances étrangères (impuretés), elle est fortement indépendante du conditionnement. [21]

❖ Relation entre la conductivité et la viscosité :

Plus la température est élevée, plus la viscosité est faible donc une mobilité facile des ions et par conséquent une conductivité élevée. De plus la dissociation des impuretés dissociables en ions est d'autant plus forte que la température est élevée. Et donc une résistivité faible. [21]

I.4.1.2 Le facteur de dissipation $\tan(\delta)$:

Le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau isolant est une valeur adimensionnelle exprimant les pertes d'énergie dissipées dans le liquide diélectrique lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Ces pertes sont dues aux courants de fuite qui traversent le diélectrique.

Représenté schématiquement par la tangente de l'angle de perte qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte. [12]

Il existe une relation entre le facteur de dissipation et l'acidité de l'huile. Une acidité élevée est accompagnée par une valeur élevée de $\tan \delta$, mais l'inverse n'est pas vérifié. [21]

I.4.2 Propriétés physiques :

I.4.2.1 Capacités thermiques :

La capacité thermique permet de définir en partie la constante de temps thermique des matériels à pleine charge, suivant le type de refroidissement naturel ou forcé. Elle est exprimée en Joules par kilogramme Kelvin croît avec la température. [21]

$$C_p = (1684 - 3,9\theta) / \sqrt{\rho_{h15}}. [31]$$

Eq (I.1).

I.4.2.2 Point d'éclair et point de feu :(inflammabilité)

Une augmentation de la concentration des vapeurs dans l'atmosphère surmontant le liquide devient suffisante pour former un mélange inflammable. La température correspondante est appelée le point d'éclair du liquide. [21]

On générale, il faut que la température reste inférieure de 25 à 30°C au point d'éclair pour que le risque d'inflammation devienne négligeable.

I.4.2.3 Conductivité thermique :

Elle exprime le flux thermique s'écoulant permanent sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide, mesurée en Watt par mètre.Kelvin et définit par le signe (λ), les valeurs usuelles sont de l'ordre de 0,14 W/(m.K). Toute une augmentation de température et masse volumique engendre une décroissance de la conductivité. [21]

I.4.2.4 Viscosité :

Il n'est jamais avantageux d'utiliser des huiles à viscosité élevée, parce que plus la viscosité est élevée, moins les capacités de refroidissement sont performantes. C'est les températures de fondement les plus élevées et les pertes importantes qui provoquent une détérioration plus rapide de l'huile et du papier.

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 [11].

Exprimée en mm²/s, elle constitue la résistance de l'huile au mouvement dans des conditions spécifiques de température. Elle a une grande influence sur l'efficacité de l'échange thermique. Plus la viscosité est basse, mieux est la circulation d'huile et l'évacuation de chaleur plus efficace.

I.4.3 Propriétés chimiques :

L'étude des caractéristiques chimiques d'un liquide diélectrique permet de connaître les composantes réelles qui le constituent, elle nous renseigne sur l'état d'évolution du liquide et son aptitude à remplir ses fonctions principales, savoir l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur.

I.4.3.1 Indice d'acidité :

L'acidité représente les dérivés acides formés au cours du vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de l'huile, ainsi que de décider du moment où elle doit être mise hors service. Cette dernière est exprimée par la masse de l'indice d'acidité qui est le nombre de mg de KOH normale nécessaires pour neutraliser un gramme d'huile.

I.4.3.2 La densité :

La densité des huiles isolantes est le rapport de deux poids d'un même volume d'huile et d'eau. Déterminée dans des conditions spécifiques de température, sa valeur est inférieure à celle de l'eau et dans les régions froides elle doit être la plus faible possible pour éviter la formation de glace à la surface.

I.4.3.3 Couleur et aspect :

La couleur et l'aspect d'une huile minérale sont des facteurs révélateurs surtout quand il s'agit d'une huile déjà en service. Une couleur sombre indique que le processus de dégradation de l'huile est entamé. Une mauvaise odeur, quant à elle, prouve l'amorçage d'arcs électriques ayant abouti à un claquage partiel de l'huile.

I.4.3.4 La teneur en eau :

La présence d'humidité dans l'huile renseigne sur l'état des papiers présents dans le transformateur (composant cellulosique).

Une faible teneur en eau est nécessaire pour obtenir une tension de claquage adéquate et des pertes par dissipation réduites. Pour éviter l'apparition d'eau libre dans l'huile, il convient que les huiles isolantes neuves aient une teneur en eau limitée. [12]

Propriétés générales	Unité	10 GBN huile minéral
La densité 0 20 C	Kg/m ³	0,88
La chaleur spécifique à 20 C	J /kg. K	1860
La conductivité thermique	W /m. K	0,126
Viscosité cinématique à 100 C	mm ² /s	2,6

Tableau I.1 : Quelques propriétés physiques, chimiques et électriques des huiles minérales [17]

I.5 Complexe huile/Papier :

L'huile assure avec le papier un complexe isolant très efficace. Ce complexe constitue une clé maîtresse dans l'isolation électrique dans un transformateur de puissance. C'est également sa composante la plus fragile.

Les caractéristiques électriques des complexes sont obtenues grâce à l'huile, le papier diminuant sensiblement les caractéristiques de celle-ci.

La tenue mécanique du complexe est assurée par le papier. Les phénomènes vibratoires dus aux parties actives du transformateur sont en partie atténués par la présence des supports. On limite ainsi les contraintes subies par le complexe. Dans le but de renforcer la tenue mécanique du papier, celui-ci est disposé en bandes alternées de 75 μm d'épaisseur autour de la barre de cuivre. Le nombre de bandes de papier est généralement compris entre 3 et 12. [20]

Longueur à la rupture ou résistance à la traction.

- ❖ Allongement à la rupture.
- ❖ Indice de déchirement.
- ❖ Résistance au pliage.
- ❖ Limite élastique à la traction.
- ❖ Indice Différentes caractéristiques peuvent être mesurées pour tester le papier [20] :
 - d'éclatement.
 - Mesure du degré de polymérisation moyen viscosimétrique.

Cette dernière caractéristique est de nos jours la plus utilisée pour évaluer l'état du papier.

Sur le plan chimique, le complexe papier/huile subit l'action de l'eau et de l'oxygène, l'action de ces réactifs étant exaltée par la température. Les effets les plus importants sont observés sur le papier.

I.6 vieillissement des transformateurs

Le vieillissement d'un transformateur est la dégradation irréversible de la capacité de service d'un transformateur, en générale altérée par l'augmentation de la probabilité conditionnelle de défaillance avec le temps qui due par exemple à la dégradation des matériaux isolants, d'une autre façon une modification des contraintes économiques et stratégiques peut diminuer la capacité de service. [14]

La vie d'un transformateur dépend en grande partie de la vie du papier qui est utilisé pour isoler le bobinage et divers autres composants. La vie du papier est fonction de la qualité de l'huile avec laquelle le transformateur est rempli, de la qualité même du papier, de la température de fonctionnement, de la charge et des variations brusques de tension auxquelles le transformateur est exposé.

La qualité de l'huile est dépendante du cycle de service et du régime de maintenance qui lui sont appliqués. La durée de vie avant défaillance des gros transformateurs est autour de 50 ans. De telles informations pourraient sembler indiquer que les défaillances sont relativement rares dans les 25 premières années mais que le taux de défaillance augmente de façon significative après 40 ans d'utilisation. [5]

I.6.1 Dégradation le papier:

Le champ électrique, l'humidité, la température, la concentration en oxygène et les acides, sont les causes principales de la dégradation du papier [8]. Cette dégradation est associée à la pyrolyse, à l'oxydation et à l'hydrolyse qui entraînent la rupture des macromolécules de cellulose et réduisent le degré de polymérisation. Toute augmentation de température de la concentration en oxygène et de taux d'humidité accélèrent ces réactions. Il faut noter que pour des températures inférieures à 140°C, il devient très difficile de distinguer ces trois mécanismes. Car la dégradation du papier dans ce cas est due à l'action combinée de l'oxygène ou de l'eau, catalysée par la température. Il existe trois méthodes pour mesurer ou estimer l'état de la dégradation du papier :

- Le degré de polymérisation qui permet de quantifier la scission des chaînes dans le papier. Plus ce nombre est faible et plus le papier est dégradé.
- La tenue en traction qui permet d'évaluer directement la tenue mécanique du papier.
- L'analyse des dérivées furaniques apparaissant lors de la rupture des chaînes et de la création de glucose.

I.6.2 Dégradation de l'huile minérale :

La plupart des industries emploie des systèmes hydrauliques ou des équipements actionnés par l'hydraulique. De nombreuses machines de transformation du métal et du plastique en utilisent. Le développement de tels systèmes a vu la substitution de l'eau au profit d'huiles minérales. Ces

huiles minérales sont d'excellents fluides hydrauliques du fait de leur stabilité, de leur pouvoir de lubrification et de leur capacité à être mélangées pour une variété d'utilisation. Elles présentent les avantages de ne pas être corrosives vis-à-vis des équipements, d'être peu coûteuses et facilement disponibles. Le principal inconvénient est le fait que ces huiles minérales brûlent. En fait, elles brûlent particulièrement bien lorsqu'elles sont portées à haute pression et notamment en cas de fuite au niveau d'un flexible, d'un joint d'étanchéité ou d'un raccord de tuyauterie, où le brouillard pulvérisé formé devient alors facilement inflammable.

En service, les huiles isolantes subissent des changements irréversibles de leurs propriétés physico-chimiques. Ces changements sont dus à un ensemble de processus réactionnels responsables de la durée de vie des huiles isolantes en service. Ce processus réactionnel conduit inexorablement au vieillissement de ces huiles. L'action simultanée de l'oxygène moléculaire et du champ électrique en présence de matériaux de construction des appareils conduit au vieillissement. L'oxydation est le facteur prédominant.

I.6.3 Récapitulatif du vieillissement de l'huile et de papier :

Dans les transformateurs de puissance, ce n'est pas toujours le comportement électrique qui est le plus difficile à maîtriser, mais c'est l'interaction de toutes les autres contraintes.

En fonctionnement normal ou lors d'un défaut, les transformateurs sont soumis à des contraintes susceptibles d'affecter le bon fonctionnement des équipements électriques sont :

I.6.3.1 Contraintes électriques:

Les transformateurs doivent résister aux tensions de fonctionnement mais aussi aux tensions de chocs comme celles de la foudre ou des surtensions de manœuvres. Toute sa partie interne notamment l'isolation diélectrique est donc soumise à des champs électriques qui peuvent induire des défauts.

I.6.3.2 Contraintes thermiques:

Pendant l'exploitation du transformateur, des pertes internes provoquées par des courants de charges, qui augmentent sa température, sont enregistrées. Les hautes températures provoquent l'accélération de la dégradation des matériaux isolants.

I.6.3.3 Contraintes mécaniques :

On peut citer le transport d'un site à un autre, les tremblements de terre ou les défauts de court-circuit qui mettent à l'épreuve la structure du transformateur.

I.6.3.4 Contraintes chimique :

(Humidité relatif ou oxygène).

I.6.3.5 Contraintes environnementales :

Les conditions atmosphériques, la foudre, la poussière sont autant de situations qui peuvent altérer le bon fonctionnement du transformateur.

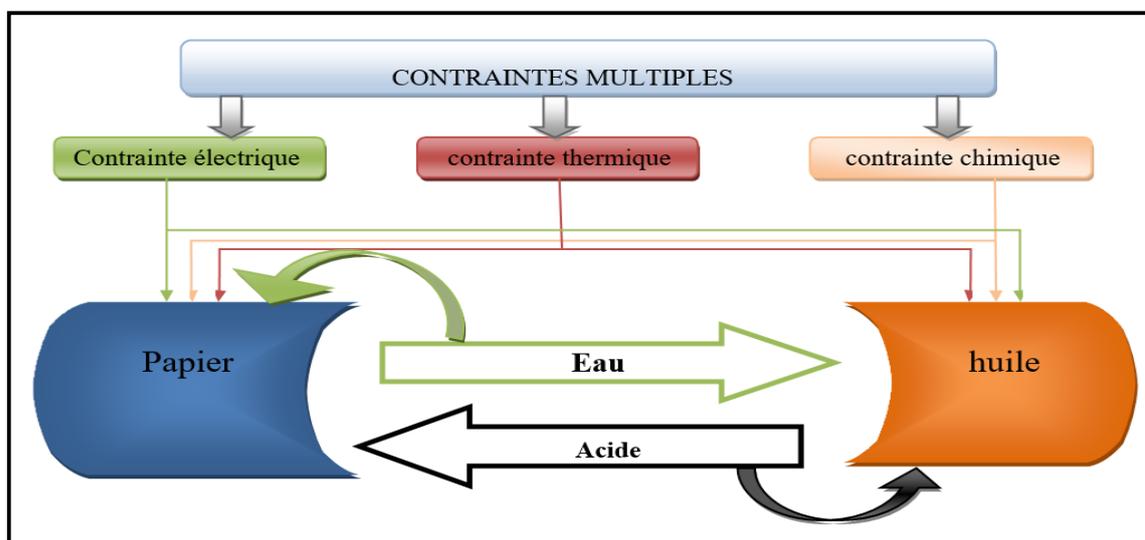


Figure I.8 : Interaction entre les contraintes (électriques, thermiques, chimiques) et le système d'isolation du transformateur [10].

I.7 Les huiles inhibées :

Dans le but de casser la réaction d'oxydation, empêcher la formation d'acide et de composés polaires qui dégradent de manière irréversible l'huile minérale, des additifs sont ajoutés à très faibles doses. Ces additifs prolongent la durée de vie de l'huile avant son altération. L'avantage est lorsque ces additifs sont consommés, les vitesses de formation des acides dans l'huile est la même que s'il n'y avait pas eu d'additifs dans l'huile. [11]

I.8 Huiles régénérées :

Une huile après utilisation devient contaminée (ses propriétés altérées) elle ne peut continuer à remplir sa tâche convenablement c'est une huile usagée. Cette catégorie de matières comprend les lubrifiants à moteur, les liquides hydrauliques, les liquides servant à travailler le métal, les fluides isolants et les liquides de refroidissement, les huiles usagées conduisent à trois formes de résidus :

- L'huile usagée elle-même.
- Le filtre à l'huile, contenant un résidu d'huile usagée et des dépôts agglutinés.
- Le contenant dans lequel l'huile a été mise en marché et le restant d'huile vierge demeure au fond du contenant.

La régénération est un ensemble de procédés permettant le traitement chimique et physique d'une charge d'huile usagée. Le recyclage de ces huiles permet l'économie de recourir à la consommation de nouvelles quantités d'huiles neuves. 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, un nouveau petit raffinage est nécessaire dans ce cas régénération.

I.8.1 Nécessité de la régénération :(Avantages)

La principale raison du vieillissement de l'huile est l'oxydation, le vieillissement est également influencé par la température, ainsi que par les métaux tels que le cuivre et le fer, l'eau et les acides. La procéder à la régénération d'huile devient une nécessité lorsque l'huile présente des valeurs non acceptables pour la tension inter faciale, l'acidité, le facteur de dissipation ...etc.

La régénération de l'huile des transformateurs permet de restaurer les propriétés de l'huile afin d'obtenir un produit présentant quasiment les mêmes propriétés qu'une huile neuve, grâce à des moyens chimiques et des absorbants qui éliminent les contaminants et les produits acides.

Avant l'emploi, les huiles lubrifiantes sont constituées de 80% à 90 % d'huile lubrifiante de base et de 10% à 20% d'additifs destinés à améliorer leurs performances, durant l'usage leur composition change dû à certains facteurs, tels que la modification physique et chimique des molécules (à cause de l'élévation de température de certaines parties de l'équipement), la

dégradation des additifs, l'addition de métaux provenant de l'usure et l'infiltration de substances étrangères.

I.8.2 Régénération des huiles minérales :

Les huiles minérales usagées utilisées dans ce travail sont récupérées par l'unité opérationnelle du traitement des huiles des transformateurs, située aux niveaux des ateliers de maintenance de SKMK (SONELGAZ, Blida).

I.9 Mécanisme d'oxydation :

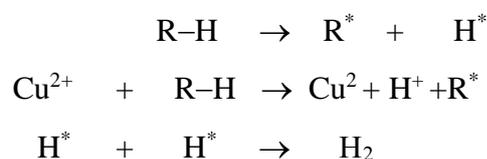
L'oxydation des huiles minérales est un processus chimique progressif pendant lequel des molécules d'hydrocarbures sont attaquées par l'oxygène pour former divers produits oxygénés comme des hydro-péroxydes, des alcools et des acides organiques.

L'oxydation est initiée par la formation d'hydro-péroxydes et de peroxydes qui réagissent ensuite pour produire des alcools, des cétones, des aldéhydes puis des acides. La vitesse de réaction de ces processus oxydatifs est augmentée en présence de catalyseurs métalliques tels que le cuivre et le fer. [12]

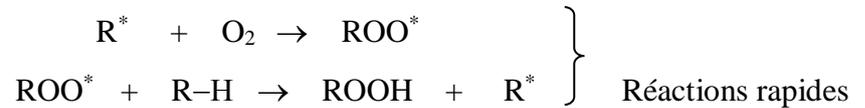
L'oxydation constitue le facteur prédominant dans le vieillissement des isolants liquides et particulièrement dans l'huile minérale. On désigne ainsi un ensemble de réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène dissout.

Les huiles comme tous les produits naturels s'oxydent en donnant naissance à des produits de dégradation qui se caractérisent d'abord par une évolution d'aspect, de couleur et d'odeur liées à la formation de composés acides légers, puis par une apparition de dépôts de résidus liés aux acides lourds et accompagnés en général, d'une augmentation de la viscosité. Il est généralement admis que l'oxydation procède selon un mécanisme de réactions en chaînes initiées par les radicaux libres (molécules ou fragments de molécules dans un état électronique excité qui ont une valence libre et qui sont chimiquement très réactifs et électriquement neutres). De telles réactions sont dites auto catalytiques, c'est à dire que les produits formés par oxydation servent de catalyseurs. [12]

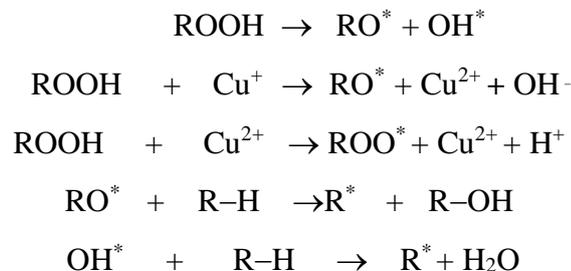
- **Initiation**



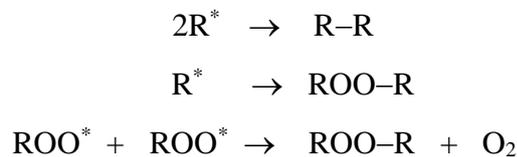
- **Propagation**



- **Ramification**



- **Terminaison**



En service, les huiles isolantes subissent des changements irréversibles de leurs propriétés physico-chimiques. Ces changements sont dus à un ensemble de processus réactionnels responsables de la durée de vie des huiles isolantes en service. Ce processus réactionnel conduit inexorablement au vieillissement de ces huiles. L'action simultanée de l'oxygène moléculaire et du champ électrique en présence de matériaux de construction des appareils conduit au vieillissement. L'oxydation est le facteur prédominant. [22]

I.10 Fonction de transfert de chaleur :

Après chaque conversion il y a une perte de l'énergie dans le transformateur, et ça c'est qu'à cause de son rendement (élevé). L'énergie perdue qui se dissipe sous forme de chaleur nécessite aussi le refroidissement de l'appareil. En raison des pertes, les températures de chacun des éléments s'élèvent jusqu'à établissement d'un équilibre entre la vitesse de production et d'évacuation de chaleur.

La chaleur s'est évacuée par la circulation naturelle ou forcée de l'huile vers les radiateurs extérieurs. Un dispositif de refroidissement bien dimensionné permet d'éviter la formation de points chauds grâce à une circulation importante et régulée.

Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique. [31] La conduction thermique implique le transfert de chaleur d'un point à un autre du même corps sans déplacement du fluide. Cette propriété est mesurée avec la conductivité thermique (W/m.K). Plus cette dernière est importante, plus le transfert de chaleur est efficace. Les principales caractéristiques qui permettent de juger l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

La convection quant à elle, signifie que la chaleur est transportée par mouvement du liquide. Elle est influencée par trois facteurs :

- La viscosité cinématique qui donne l'aptitude de fluide à se déplacer plus ou moins vite en fonction de la température.
- La chaleur spécifique qui conditionne la quantité de chaleur transportée.
- Le coefficient d'expansion thermique qui favorise la convection grâce au gradient de densité entre zones chaudes et froides. [5]

I.11 Impacte des impuretés sur la qualité du transformateur :

La fiabilité et la durée de vie d'un transformateur dépendent entre autres de la qualité de l'huile. Même neuve, une huile peut contenir des composés indésirables ou des molécules polaires, résidus du processus de raffinage. Ces résidus peuvent avoir un impact négatif sur la qualité du transformateur. D'autre part, les propriétés électriques, chimiques et thermiques de l'huile peuvent être affectées par différents types de contraintes, durant l'exploitation du transformateur. L'isolation liquide et solide suit un processus de dégradation lent, mais continu.

Comme nous l'avons déjà indiqué, le liquide isolant dans un transformateur de puissance doit assurer deux fonctions : l'isolation électrique et le transfert de chaleur. Le facteur de dissipation électrique et la conductivité sont deux paramètres importants qui permettent de surveiller en toute sécurité l'huile dans le transformateur.

a. Influence de la pression :

La pression joue un grand rôle, chaque fois qu'augmente la pression, la tension de claquage (une caractéristique des isolants électriques qui définit la différence de potentiel maximale qui peut être appliquée à un matériau avant qu'il ne devienne conducteur) [29].

Les liquides utilisés comme isolants diélectriques tels que les huiles minérales sont peu influencés par la pression, parce qu'à chaque fois qu'augmente la pression, la tension de claquage fait de même car elle limite la propagation du streamer (canal gazeux ionisé provoquant une décharge lumineuse) [21]. La rigidité augmente de façon régulière et dans d'assez fortes proportions avec la pression. La rigidité diélectrique de certains liquides diélectriques dépend de la pression hydrostatique. [12]

b. Influence de la température :

C'est le même phénomène que la pression ; il a été montré qu'à teneur en eau constante, la tension de claquage augmente avec la température. [4]

La température est un facteur qui a une importance non négligeable pour tous les types de matériaux et un de ceux qui changent le plus dans les phases de contrôles industriels.

Le claquage aux champs électriques élevés dans les liquides peut s'expliquer par plusieurs théories, les théories électroniques très voisines des mécanismes de décharges électriques dans les gaz, les théories des bulles et la théorie des particules. L'expérience a montré que la rigidité diélectrique varie peu en fonction de la température. Cette dernière agit indirectement par la modification de la permittivité, de la résistivité et du facteur de dissipation diélectrique, entraînant très probablement un phénomène du type claquage thermique. Sur un liquide diélectrique pur, si on utilise une onde de choc de courte durée ($1 < t < 50 \mu s$) pour éviter le claquage thermique, on observe que l'augmentation de la température provoque en général une diminution de la valeur du champ de claquage (avec une chute brutale au voisinage de la température d'ébullition). Ce phénomène s'explique par la diminution de la densité et de la viscosité du liquide qui augmente la mobilité des ions et des électrons. [12]

c. Influence de la teneur en eau :

La teneur en eau est le facteur pénalisant dans la qualité de l'isolation électrique. Elle a une très grande influence sur la tension de claquage des isolants liquides. Plus la teneur en eau est importante, plus la tension de claquage d'une huile est faible (influence directement corrélée à l'augmentation de la température). [21]

I.12 Dégradation du complexe huile/papier :

Les phénomènes de vieillissement thermique restent essentiellement les mêmes pour chaque composante du complexe. Cependant, il a été constaté que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement du papier soit par leur action propre, soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile. Par exemple, la vitesse de dégradation du papier peut être dix (10) fois plus rapide dans l'huile que dans un diélectrique chloré qui ne s'oxyde pas [9].

Corrosion :

La méthode d'évaluation consiste à plonger une lame de cuivre ou d'argent dans l'huile à 140°C pendant 19h. La méthode consiste à analyser le taux du soufre qui ne doit pas être détectable par les lames. [12]

La présence de composés soufrés corrosifs contenus dans certaines huiles isolantes, en contact avec les matériaux métalliques du transformateur, peut entraîner la détérioration de ces derniers à un niveau qui dépend de leur quantité, de la durée du contact et de la température. La détection du soufre corrosif permet donc d'identifier cette source de défaillance de l'appareil.

Conclusion

Il ressort de cette analyse que les deux types d'isolation, papier et huile, sont essentiels dans la vie du transformateur. Lorsque le transformateur est en service, il est soumis à plusieurs contraintes (électriques, chimiques, mécaniques, thermiques) qui altèrent son système d'isolation. Le vieillissement/dégradation de l'huile minérale et du papier procède de différents mécanismes. Le vieillissement de l'huile est essentiellement dû à l'action de l'oxygène tandis que celui du papier provient de l'action de la température, de l'humidité et de l'oxygène. L'oxydation de l'huile a pour conséquence une diminution de son pouvoir isolant suite à l'augmentation des pertes diélectriques, une mauvaise circulation de l'huile suite à la formation des produits de décomposition dissous, une dégradation plus rapide du papier. La vie du transformateur étant liée à celle de son isolation, l'évaluation de l'état du transformateur s'avère indispensable pour apprécier l'état du système d'isolation lorsqu'il est neuf et après plusieurs années d'utilisation. Cette évaluation passe nécessairement par des techniques et des méthodes de diagnostic tant électriques que physico-chimique.

Chapitre I

MATERIELS ET METHODE.

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes techniques d'essais et de mesures utilisées dans le but d'étudier l'impact du vieillissement thermique des huiles sur leurs propriétés physicochimiques et thermo fluidiques.

Les techniques les plus utilisées pour surveiller l'état d'un transformateur en service sont fondées sur les analyses de l'huile : analyse des propriétés physico- chimiques et diélectriques de l'huile.

L'huile utilisée est de type naphthénique de couleur blanche. Elle est utilisée par la SONELGAZ dans les transformateurs des postes se moyenne et haute tension.

La raison principale du vieillissement de l'huile est l'oxydation, il est également influencé par la température, les produits d'oxydation les plus problématiques est :

- ❖ L'eau
- ❖ Le cuivre
- ❖ Le fer
- ❖ Les acides boues

Les essais et les mesures des différents paramètres ont été effectués dans le laboratoire de l'unité opérationnelle du traitement des huiles des transformateurs, située aux niveaux des ateliers de maintenance de SKMK (SONELGAZ, Blida).

II.1 Procédure expérimentale :

Les huiles étudiées sont :

- ❖ L'huile neuve.
- ❖ L'huile inhibés (l'huile neuve +MgO (0.001g), l'huile neuve +MgO (0,004g), l'Huile neuve + MgO(0.008g)).
- ❖ L'huile régénérée.

On y ajoute du 0,3% cuivre (1,5g) et papier pour chaque flacon de 500 ml d'huile qui agit comme catalyseur métallique. Ensuite mis étuve pour vieillissement thermique accéléré.

II.2 Méthode de vieillissement thermique :

Le vieillissement thermique s'est fait dans une étuve à trois paliers de températures différents (140°C, 120°C, 100°C), chaque palier de température est maintenu pendant 596 heures, un prélèvement est effectué chaque 96 et 72 heures pour voir (viscosité cinématique, masse volumique, conductivité thermique et la chaleur spécifique, la densité, facteur de dissipation ($\tan \delta$), l'indice d'acidité, teneur en eau, la résistivité, la couleur...) dans chaque prélèvement pendant le vieillissement.

Test	La norme	L'unité	Valeur
Indice d'acidité	CEI 296	mgKOH/g	<0,03
Teneur en eau	CEI 814	ppm	<30
Facteur de dissipation (90 ° C)	CEI 247	/	0,005
La densité ρ (22°C)	ISO 12185	Kg/m ³	<0,895
Viscosité ν (40°C)	ISO 03104	mm ² /s	<11
Couleur	ISO 00296	/	<2

Tableau II.1 : Caractéristiques d'huile de transformateur neuve.



Figure II.1 : Les échantillons dans l'étuve pour le vieillissement.

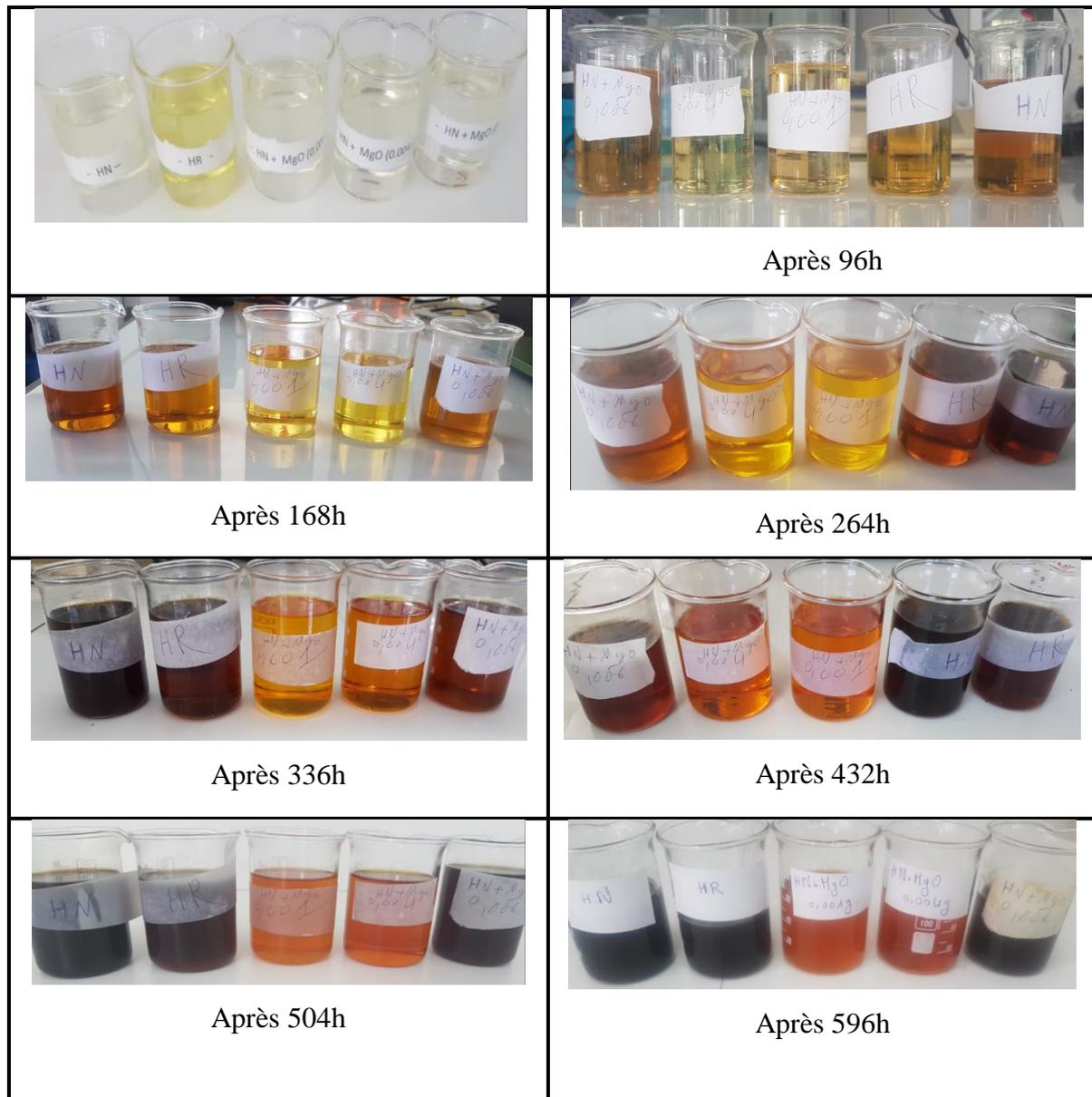


Figure.II.2 :Variation d'huile pendant le vieillissement thermique a 140°C.

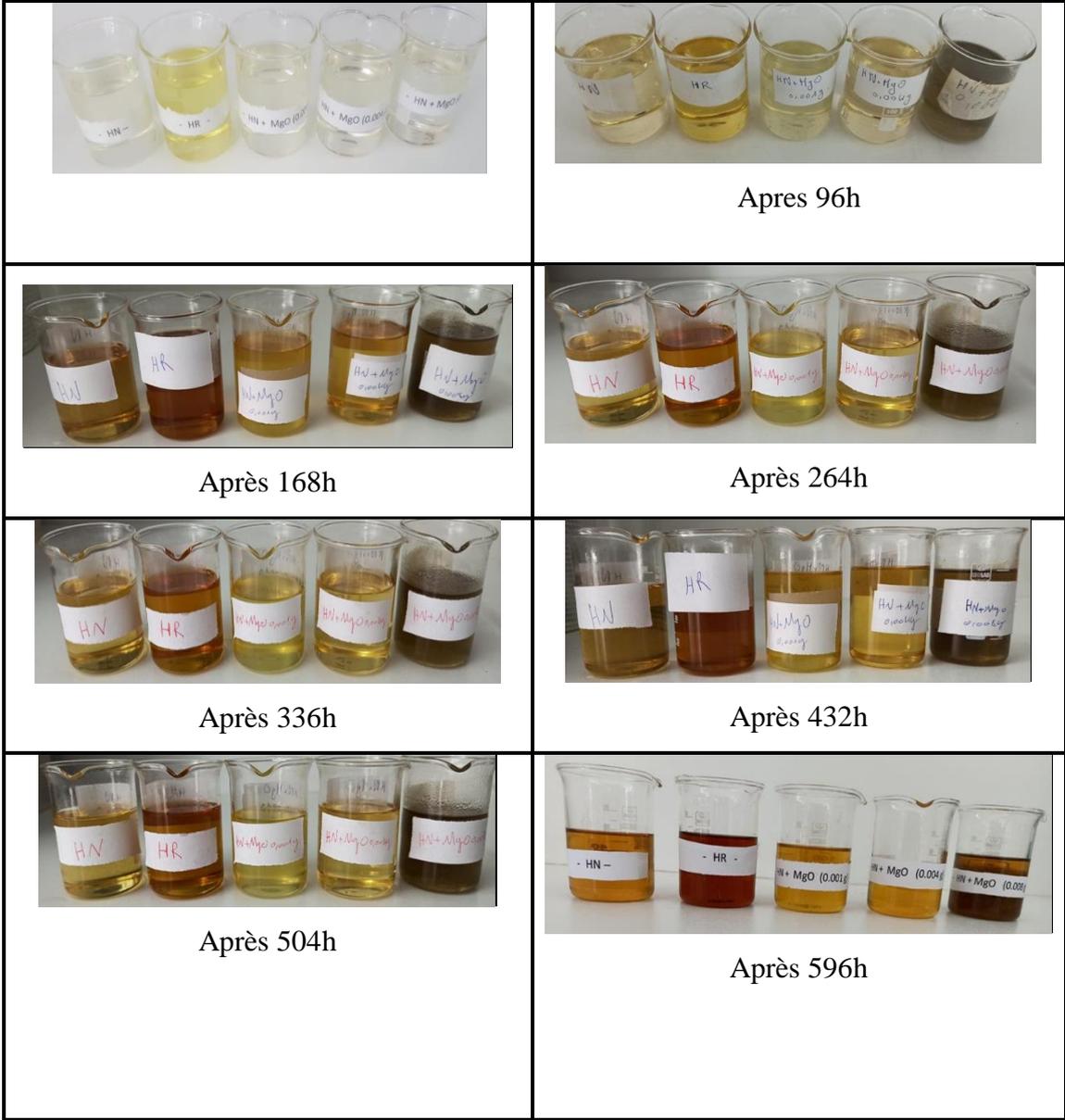


Figure II.3 : les variations d’huile pendant le vieillissement thermique a 120°C.

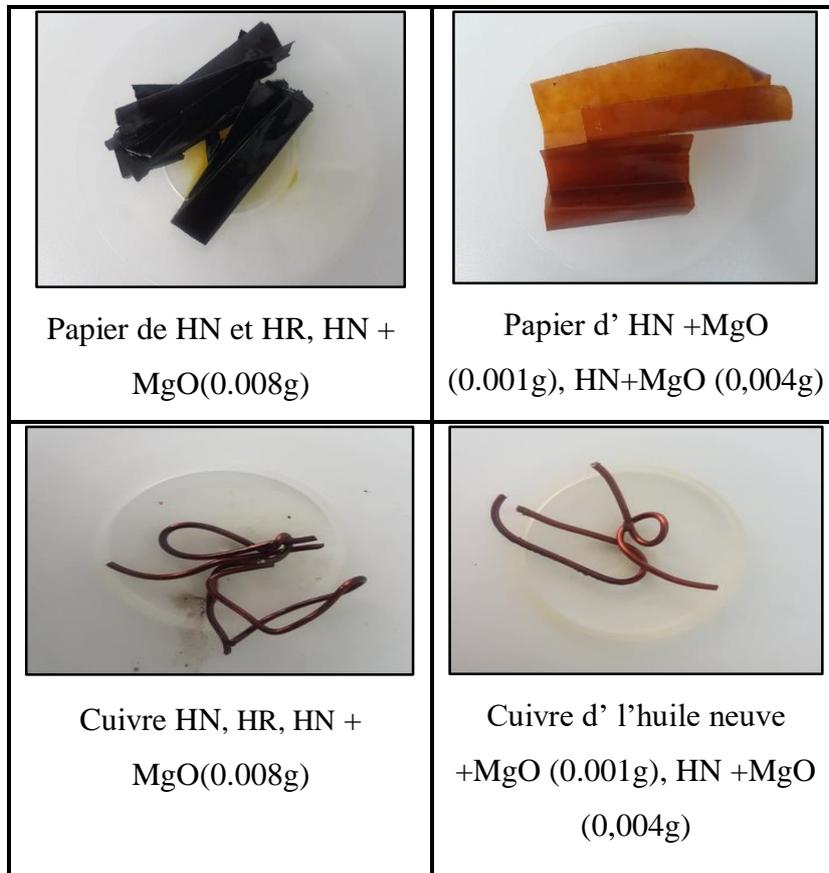


Figure II. 4: papier et cuivre afin de vieillissement.



Figure II.5 : dépôts d'huile après le processus de vieillissement.

II.3. Appareils de mesures des caractéristiques :

Pour étudier le vieillissement thermique d'un isolant liquide et le suivi de son traitement, nous avons utilisé un ensemble d'appareils situés au niveau des ateliers de maintenance (SADEG) SONELGAZ Blida, qui est le suivant :

II.3.1. Aspect et Indice de couleur :

Puisque l'huile est exposée à de nombreux facteurs dans le transformateur causant des dommages et des changements de couleur, donc nous pouvons considérer la couleur comme l'un des facteurs qui nous permettent de connaître la qualité de l'huile, l'indice de couleur est mesuré selon la norme ASTM D1500. [23]

L'appareil utilisé pour cette mesure est un spectrophotomètre, de type Lovibond PFX (Figure II.6).



Figure II.6 : colorimètre pour la mesure de la couleur.

II.3.2 Teneur en eau :

La teneur en eau est faible au départ, lorsque l'huile est neuve et traitée (< 10 ppm pour l'huile minérale). Cette teneur va augmenter au cours de la vie du transformateur suite à la pénétration de l'humidité provenant de l'atmosphère mais aussi avec la dégradation du papier.

Pour savoir combien d'eau libre est dans l'huile isolante, on utilise un appareil numérique. Connecté à un tube contenant une solution chimique et de l'iode, puis par injection prendre le volume d'huile au poids avant de l'injecter dans le tube d'essai et le peser à nouveau après l'injection pour trouver le volume d'huile injecté et entrer la quantité injectée, dans l'appareil qui

affiche la teneur en eau en ppm (en poids et en volume) après spécification de la densité de l'huile après quelques instants. [24]

La valeur de la teneur en eau doit être < 30 ppm (normalisée), Si plus (>30) , il faut appliquer un traitement physique (chauffage et séchage) sur l'huile analysée.

L'appareil utilisé pour cette mesure est une titrimétrie de type 756 KARL FISHER



Figure II.7: Appareil COULOMETRE de mesure de la teneur en eau.

II.3.3 Facteur de dissipation (Tan δ) :

Le rôle du facteur de dissipation d'huile est de déterminer la concentration des porteurs de charge qui conduit à un déséquilibre de la fonction isolante principale de l'huile, si elle dépasse la limite fixée sous pression électrique, ce qui conduit à une défaillance latente du transformateur. Une faible valeur du facteur de dissipation indique de faibles pertes diélectriques et un faible niveau de contaminants ioniques polaires.

L'appareil utilisé est un pont automatique de type DIELTEST-DTL. On remplit la cellule avec de l'huile diélectriques puis chauffée à la température imposée par la norme de mesure (90°C), après quelques minutes les résultats sont affichés et imprimés automatiquement.

Le facteur de perte diélectrique (Tan δ) est mesuré selon la norme CEI 247. [25]



Figure II.8: Appareil tangent delta de mesure du facteur de dissipation (Tan δ).

II.3.4 Indice d'acidité :

L'acidité d'une huile en service résulte des produits d'oxydation, cette mesure, qui la plus représentative du vieillissement d'une huile constitue l'outil majeur pour connaître l'état de vieillissement.

Nous étudions l'acidité qui est formée par l'huile à travers une procédure chimique simple : neutralisation (titrage acido-basique).

On met un solvant +3goutte Alcalin bleu dans un erlenmeyer, puis ajouter le KOH avec une burette contenant une solution de KOH suivant la norme CEI 60296 [38]. Jusqu'à ce que la couleur change, après dans un bécher on met une masse d'huile et le peser, puis le mélanger avec la première solution, nous obtenons un tour changer la couleur en bleu à nouveau, on le répète l'étalonnage pour obtenir une nouvelle couleur.

Le calcul est simple pour voir le rapport d'acide dans l'huile :

$$IA=0,1M_1V/M.$$

Eq(II.1).

IA : Indice d'acidité [mg KOH/g d'huile].

0,1 : Normalité de la solution de KOH [g/l].

M₁ : Masse moléculaire de la solution de KOH [g/l].

M : Masse d'huile [g].

V : Volume en [ml]de KOH nécessaire pour avoir la neutralisation.

L'acidité est exprimée en mg de KOH par g d'huile, c'est-à-dire le nombre de mg d'une solution potasse alcoolique de normalité 0.1N, nécessaire pour neutraliser un gramme d'huile à essayer.

Les limites autorisées pour la valeur de l'indice d'acidité sont régies par les normes : CEI 296 pour les huiles neuves et CEI 422 pour les huiles en service. [26]

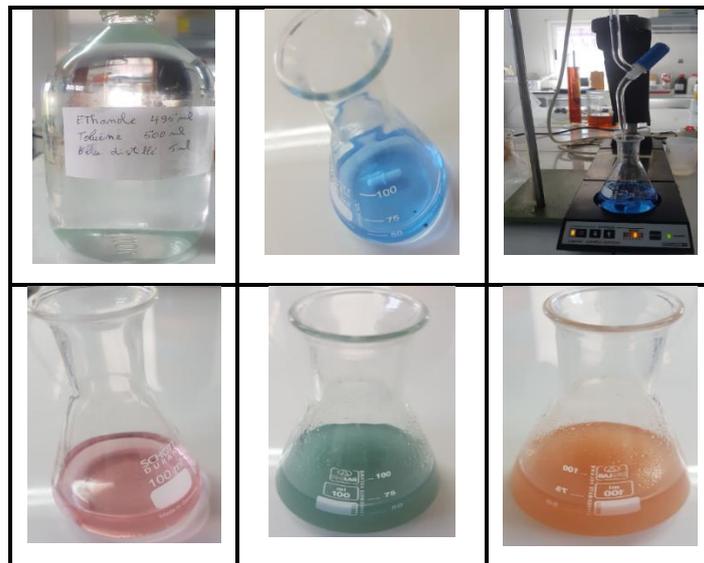


Figure II.9: Dispositif et le titrage pour la mesure de l'indice d'acidité.

II.3.5 Mesure de la viscosité cinématique :

La viscosité est un important facteur contrôlant l'évacuation de la chaleur. Le vieillissement et l'oxydation d'huile ont tendance à accroître cette caractéristique.

La viscosité cinématique est en fonction de la température du fluide et variable avec la pression, est mesurée par un viscosimètre de type TAMSON (PMT) (Figure II.10) selon la norme ISO 03104. [28]



Figure II.10: Le viscosimètre.

Nous mesurons la viscosité par le temps d'écoulement d'un volume liquide dans un tube capillaire de série 1, N° du type G587 le coefficient 0,01176 dans un bain d'huile chauffé à une température de 40 °C.

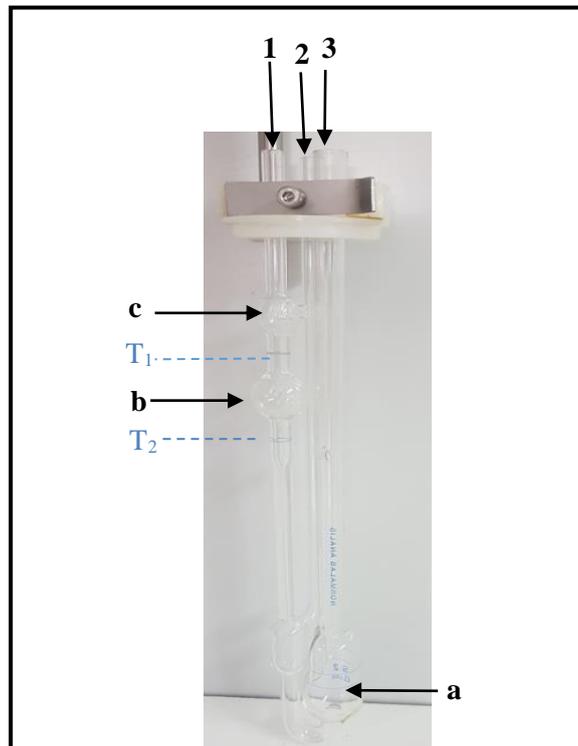


Figure II.11 : Tube capillaire.

1, 2, 3 : Tubes.

a, b, c : Les réservoirs d'huile.

T₁ : Temps de début d'écoulement d'huile.

T₂ : Temps de fin d'écoulement d'huile.

II.3.6 Mesure de la densité :

Dans une éprouvette graduée, nous mettons une masse d'huile, puis on le met dans un bain de l'eau froide, quand l'huile refroidit 15°C on introduit soigneusement le densimètre dans l'éprouvette, ensuite la lecture de de la valeur de la densité correspondante selon la norme ISO 02719. [27]



Figure II.12 : l'instrument pour mesuré la densité.

II.3.7 La conductivité thermique :

La conductivité thermique est la grandeur introduite pour quantifier l'aptitude d'un corps à conduire de la chaleur, elle exprime le flux thermique qui s'écoule en régime permanent, sous l'effet d'un gradient thermique entre deux corps isotherme, elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmente.

$$\lambda = 0,117. (1-a\theta) / d_{15}. [31]$$

Eq (II.2).

λ : La conductivité thermique [W/m.°C].

a : La constante $5,4.10^{-4}$

θ : la Température (°C).

d_{15} : La densité a 15 (°C).

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la méthode de vieillissement thermique à trois températures différentes, les matériels et les dispositifs excrémenteux utilisées dans nos investigations expérimentales.

Toutes les mesures effectuées par les normes mentionnées dans les références.

CHAPITRE III

Présentation et discussion des résultats

Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats expérimentaux des propriétés physico-chimiques, thermo fluidiques et électriques des huiles neuves, régénérées et inhibées avec trois concentrations de MgO après un vieillissement thermique de 596 heures à trois températures différentes de 140°C, 120°C et 100°C.

L'objectif visé dans ce chapitre est :

- Étudier l'impact du vieillissement thermique des huiles sur leurs propriétés Physicochimiques et thermo fluidiques.
- Comparer les huiles pour savoir l'huile la plus résistante au vieillissement.

III.1. Effet du vieillissement thermique sur les caractéristiques de l'huile :

Pour étudier la stabilité à l'oxydation des différents types d'huile, le vieillissement a été réalisé conformément à la norme CEI 61125 C. C'est le test de référence pour évaluer une nouvelle huile minérale. Il consiste à faire vieillir l'huile en présence d'un catalyseur de cuivre et papier à 140°C, 120°C, 100°C pendant 596 heures. Chaque échantillon d'huile a été placé dans un récipient de verre de 500 ml, maintenu à une température constante et qui sont mis à l'intérieur d'un four pour le processus de vieillissement thermique accéléré, exposés à l'air à l'intérieur du four afin de représenter la respiration libre de transformateur et favorise le processus d'oxydation. Des échantillons ont été recueillis à des intervalles de temps réguliers et analysés, afin de vérifier la variation des caractéristiques de l'huile.

Les propriétés physico-chimiques, électriques et thermo fluidiques ont été mesurées pour détecter les changements après un stress thermique, au niveau de la viscosité, l'indice de couleur, la Chaleur spécifique, l'indice d'acide, la teneur en eau, la densité, la résistivité, le facteur de dissipation ($\tan \delta$).

III.1.1. Variation de la viscosité, l'indice de couleur et la Chaleur spécifique :

➤ La viscosité :

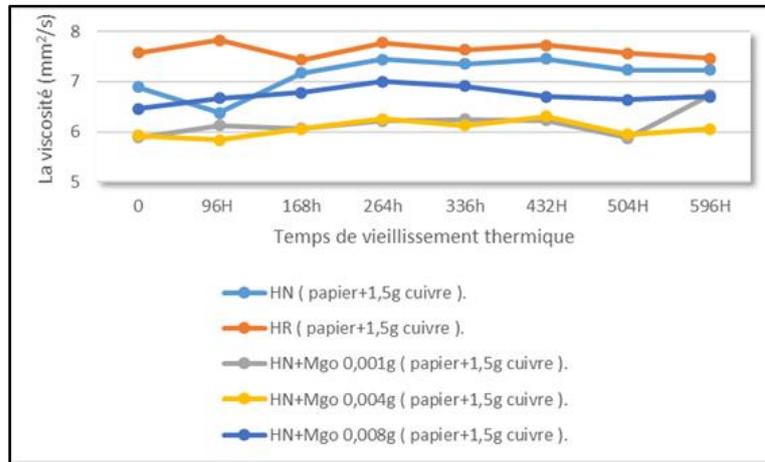


Figure III.1: Variation de la viscosité en fonction de temps sous effet de la température 140°C.

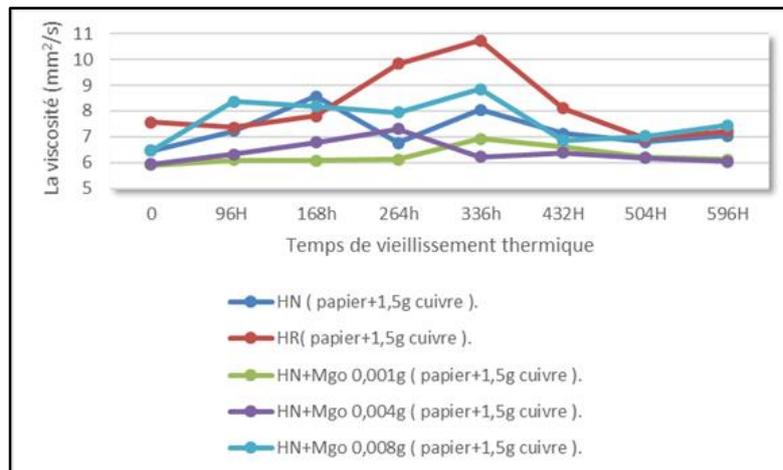


Figure III.2: Variation de la viscosité en fonction de temps sous effet de la température 120°C.

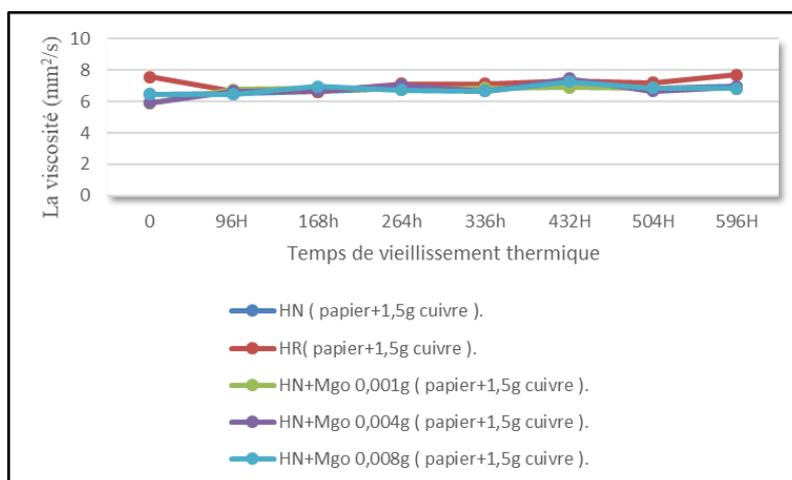


Figure III.3: Variation de la viscosité en fonction de temps sous effet de la température 100°C.

Les résultats de l'essai de la viscosité, montrent qu'à température 140°C, 120°C et 100°C l'huile (HN, HR et HN +0,008(g) MgO) a perdu plus de ces fluidités en raison de la contamination. L'oxydation ou la présence des contaminants avec des éléments isolables provoquent l'augmentation de la viscosité. [32]

- **L'indice de couleur :** Nous présentons dans les figures III.(4, 5 et 6) les variations de l'indice de couleur en fonction du temps pour les deux températures de vieillissement 140°C, 120°C et 100°C.

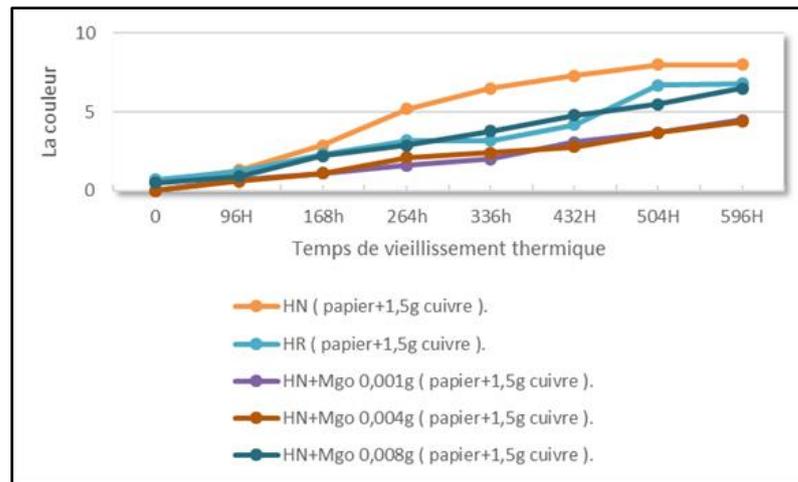


Figure III .4: Variation de l'indice de couleur en fonction de temps et sous effet de la température 140°C.

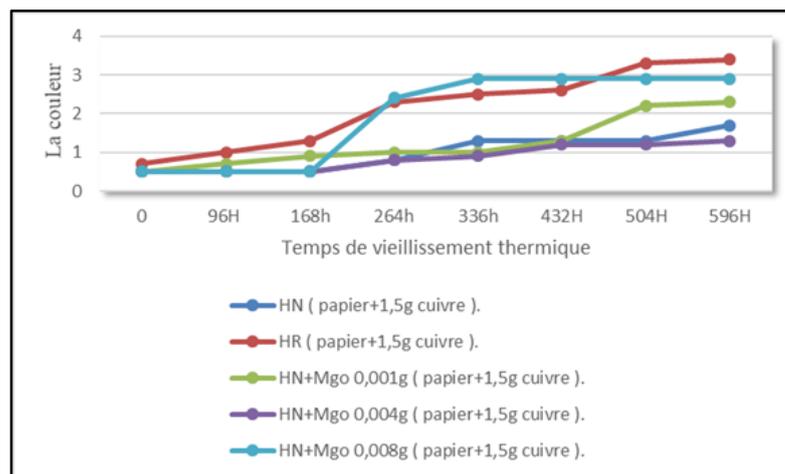


Figure III .5 : Variation de l'indice de couleur en fonction de temps et sous effet de la température 120°C.

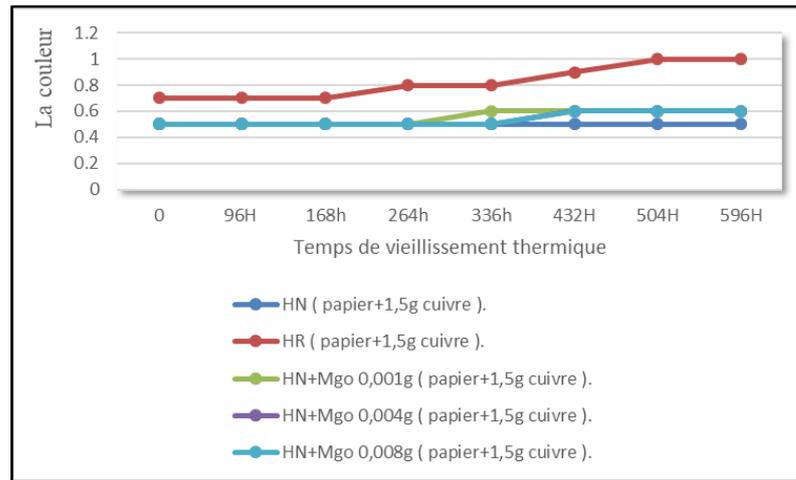


Figure III .6 : Variation de l'indice de couleur en fonction de temps et sous effet de la température 100°C.

La valeur de l'indice de couleur varie de (<0,5) à (>8) pour la température la plus élevée (140°C). L'augmentation de la couleur peut indiquer une dégradation ou une contamination de fluide, d'après les figures III (4,5et 6) l'indice de couleur dans la température 120°C réalise une dégradation faible (<4) et a température 100°C la dégradation de couleur est très faible (<2) mais dans la température 140°C la couleur des huiles est très foncée surtout l'huile neuve.

- **La chaleur spécifique :** Nous présentons dans les figures III (7,8 et 9) les variations de la chaleur spécifique en fonction du temps pour les trois températures de vieillissement 140°C, 120°C et 100°C.

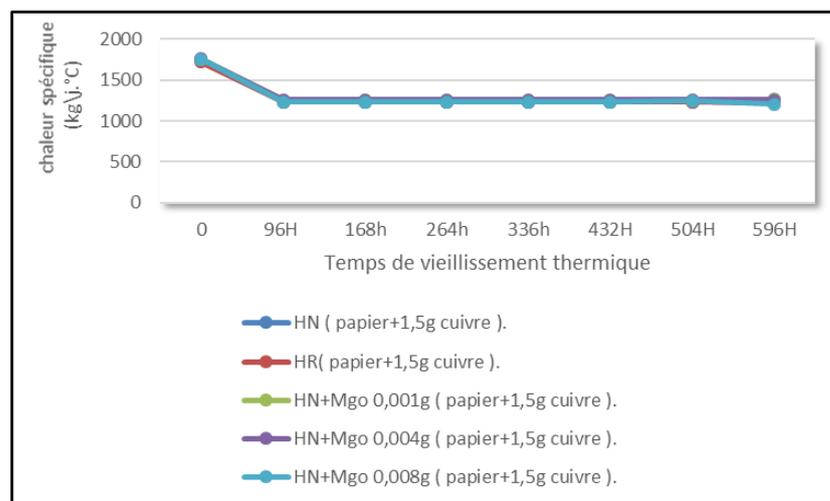


Figure III .7 : Variation de la chaleur spécifique d'huiles en fonction de temps et sous effet de la température 140°C.

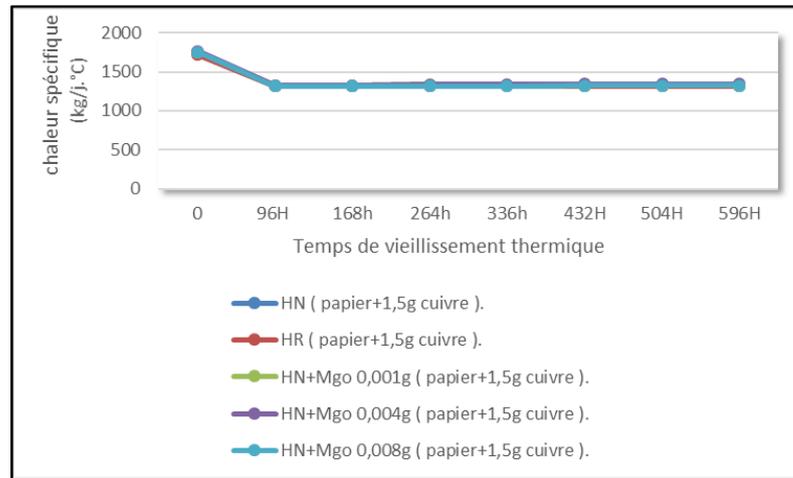


Figure III.8 : Variation de la chaleur spécifique d'huiles en fonction de temps et sous effet de la température 120°C.

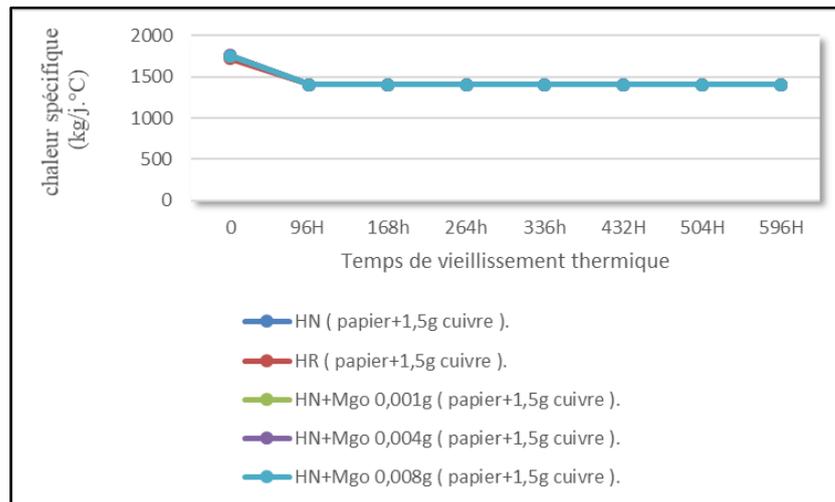


Figure III.9: Variation de La chaleur spécifique d'huiles en fonction de temps et sous effet de la température 100°C.

Les résultats de la chaleur spécifique obtenus à partir des valeurs mesurées de la masse volumique (équation I.1) à 15 °C pour les huiles. Selon les résultats des Figures III (7,8 et 9) les chaleurs spécifiques des huiles sont similaires à huile neuve. Cette observation est aussi vérifiée au cours du vieillissement jusqu'à 596 heures. On peut aussi observer que la variation de la chaleur spécifique avec le vieillissement pour chaque huile est très faible. Donc on peut conclure que le vieillissement thermique semble ne pas avoir d'impact considérable sur la chaleur spécifique des huiles.

III.1.2. Variation de la teneur en eau, l'indice de l'acidité et la densité :

Les Figures (10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18) représentent les variations de la teneur en eau, l'acidité et la densité des échantillons d'huiles à la fin d'un vieillissement thermique aux températures de 140°C, 120°C et 100°C.

➤ La teneur en eau :

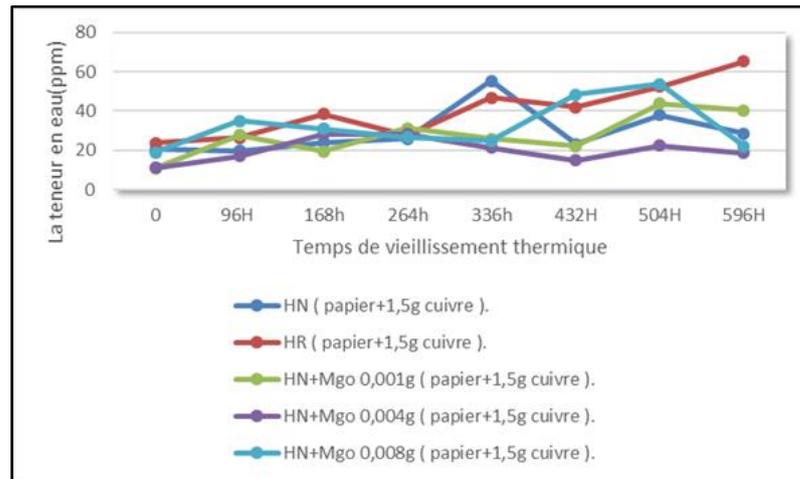


Figure III. 10 : Variation de la teneur en eau en fonction de temps et sous effet de la température 140 °C.

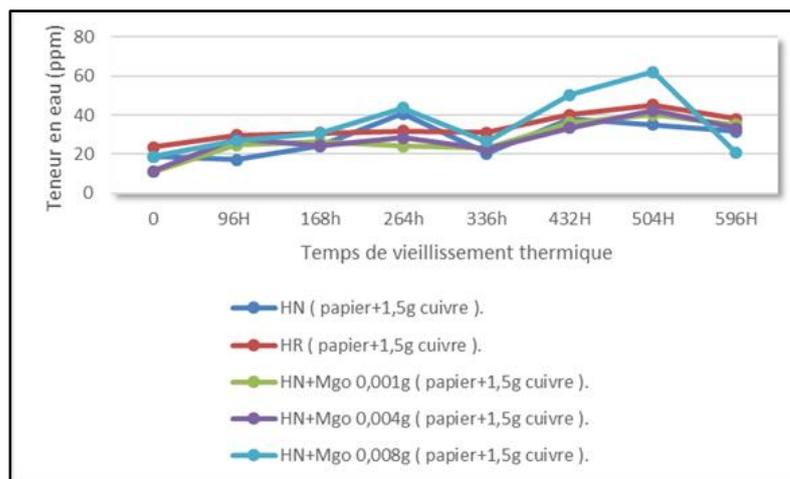


Figure III.11 : Variation de la teneur en eau en fonction de temps et sous effet de la température 120 °C.

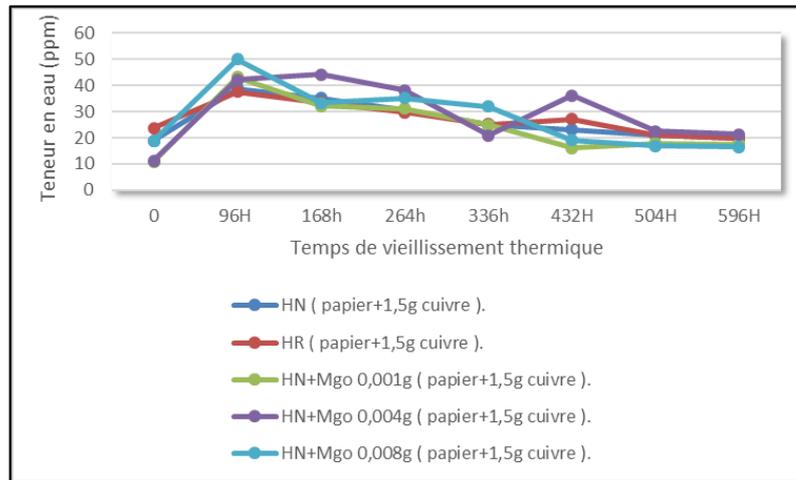


Figure III.12 : Variation de la teneur en eau en fonction de temps et sous effet de la température 100 °C.

D'après les figures III (10,11 et 12) à 0 heure la teneur en eau d'HR la plus élevée (23,5 ppm). On observe qu'à température 140°C (figures III 10) la teneur en eau de HN, HN+0,008(g) et HR augmente plus et à 596 heures la teneur en eau de HR est très élevée (>60 ppm).

Selon la figure III.11 la teneur en eau de HN+0,008 (g) MgO a augmenté jusqu'à un pic aux 504 heures (60 ppm) puis a diminué à nouveau. A température 100°C l'HN a augmenté jusqu'à (50 ppm), aussi il y a une augmentation de HN+0,004(g) MgO, à 168heures (44ppm) et à 432heures (36.1 ppm).

Le vieillissement thermique provoque l'augmentation de la teneur en eau de l'huile durant les 596 heures pour les trois températures de vieillissement 140°C, 120°C et 100°C.

➤ L'indice de l'acidité :

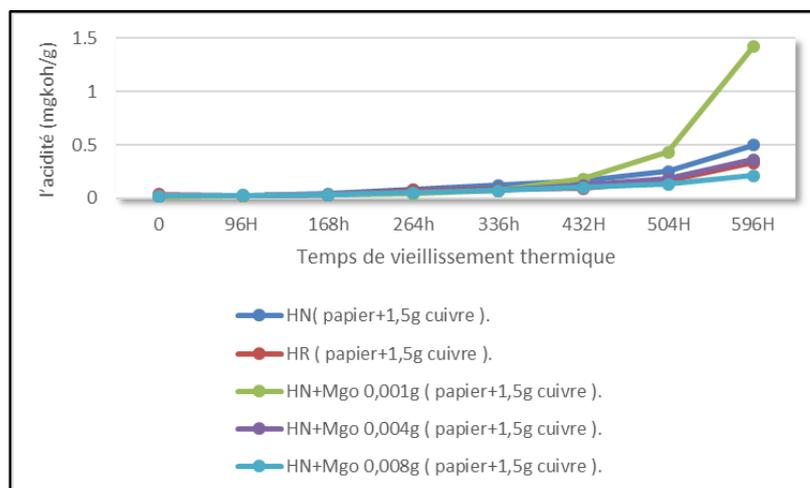


Figure III. 13 : Variation de l'acidité en fonction de temps et sous effet de la température 140 °C.

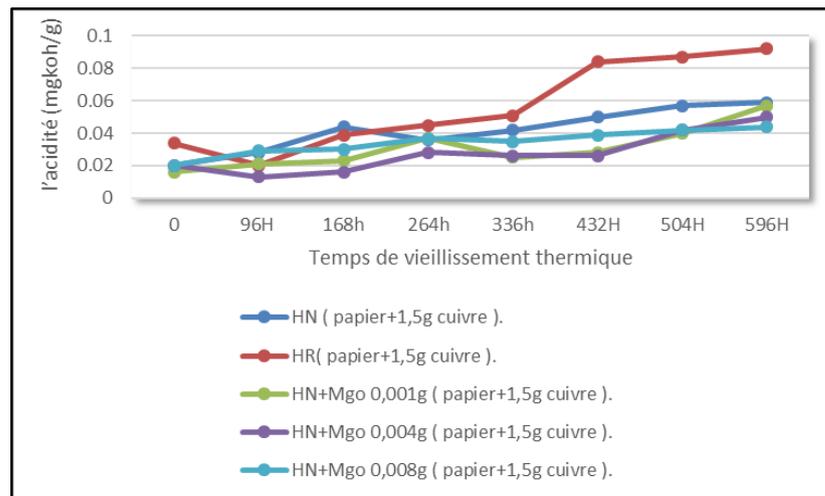


Figure III.14 : Variation de l'acidité en fonction de temps et sous effet de la température 120 °C.

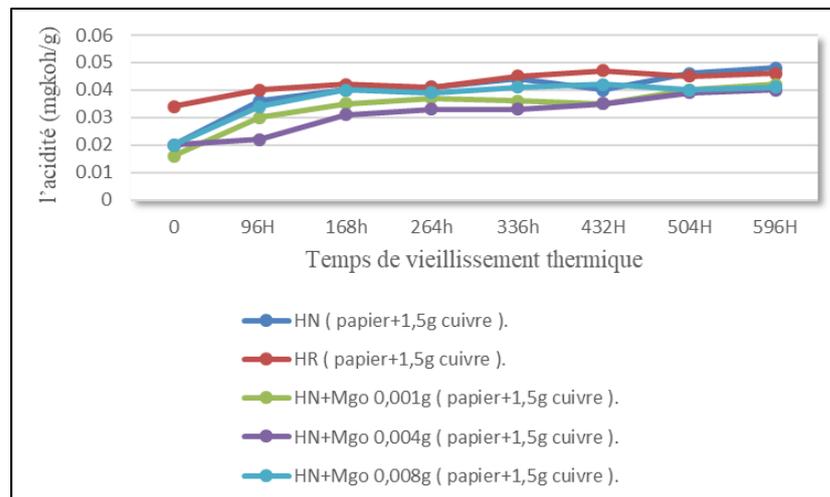


Figure III.15 : Variation de l'acidité en fonction de temps et sous effet de la température 100 °C.

Pendant le processus de vieillissement, l'indice d'acidité d'huile est augmenté dans les trois températures de vieillissantes.

D'après les figures III (13,14 et 15) oxydation des huiles à température 140°C est plus élevée (HN+0,001(g) IA=1,42 mgkoh/g à 596 heures), et selon les résultats de la figure (III.14) l'HR est plus oxydée, à 0 heure IA d'HR= 0,03 mgkoh/g, et à 596 heures IA d'HR=0,09 mgkoh/g. Selon la figure III.15 l'HR est le plus élevé, l'oxydation des huiles est faible para port aux autres températures (140°C et 120°C). Ceci est principalement dû à l'oxydation des huiles accélérée et catalysée par la présence d'ions de cuivre et papier.

L'indice d'acide total d'huile a augmenté beaucoup, la qualité d'huile change au fur et à mesure que sa composition change.

Ceci est le résultat d'un processus chimique complexe qui se produit pendant les contraintes thermiques exercées sur l'huile. [33] Les réactions chimiques aléatoires décomposent l'huile en cassant les liaisons d'hydrocarbures, avec la formation conséquente par défaut des molécules colloïdales. [34] L'augmentation de l'indice d'acidité est plus importante pour la température de vieillissement la plus élevée.

➤ La densité :

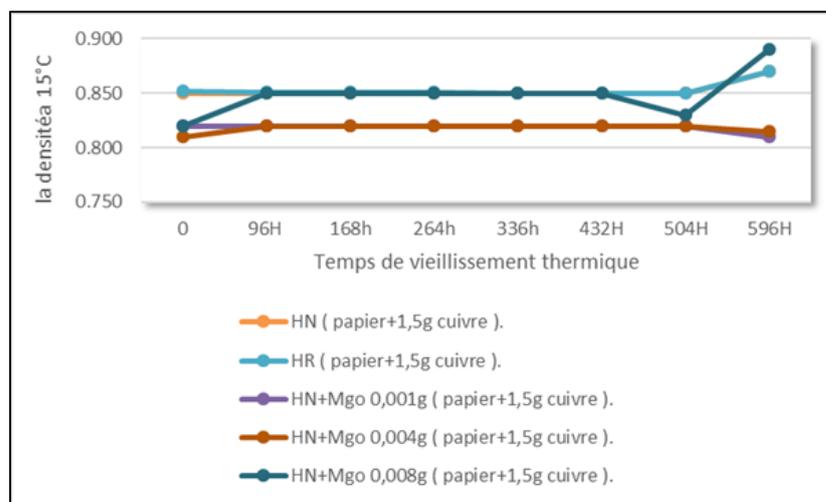


Figure III.16 : Variation de la densité (kg/m³) en fonction de temps et sous effet de la température 140 °C.

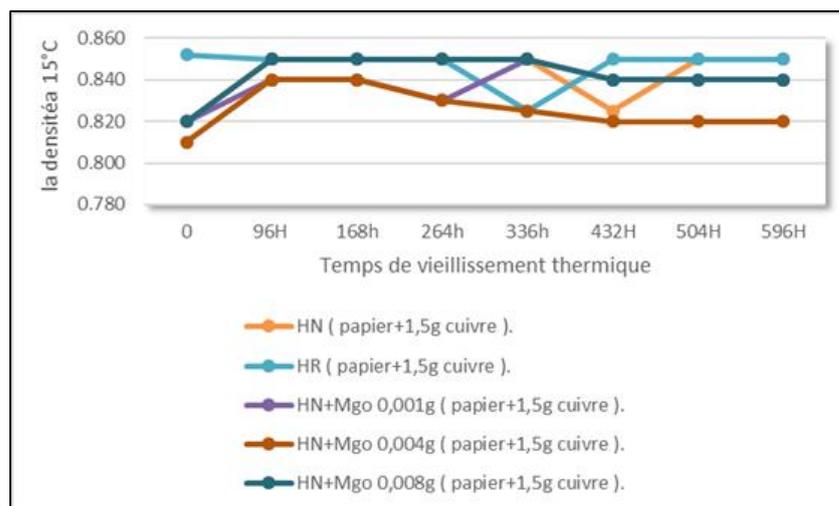


Figure III. 17 : Variation de la densité (kg/m³) en fonction de temps et sous effet de la température 120 °C.

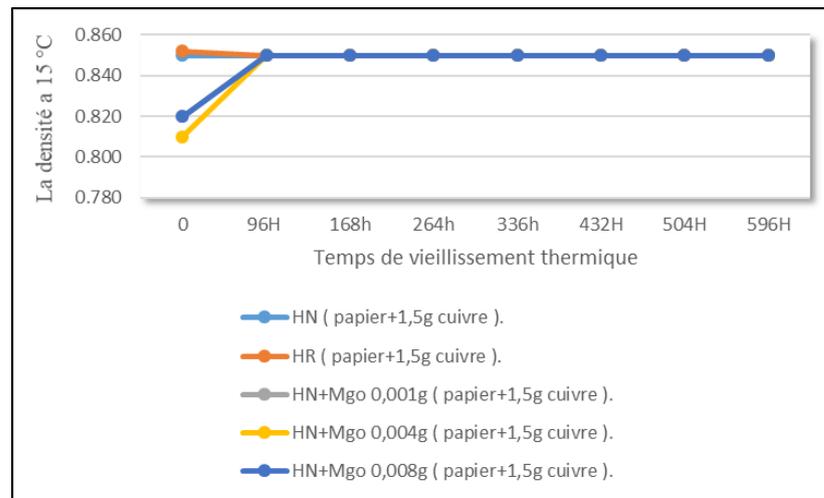


Figure III.18 : Variation de la densité (kg/m^3) en fonction de temps et sous effet de la température $100\text{ }^\circ\text{C}$.

La densité est affectée par la quantité d'eau dans l'huile, la densité d'une huile contaminée pourrait être inférieure ou supérieure à celle de son lubrifiant vierge, cela dépend de la nature de la contamination. Si l'huile de lubrification utilisée était contaminée en raison de la dilution de l'eau en provenance de la dégradation ou par la pluie, sa densité serait inférieure à celle de son huile de lubrification fraîche ou celle régénérée. D'après les figures III (16,17 et 18) la variation de la densité entre $0,810$ et $0,850\text{ kg/m}^3$, sauf dans la figure III.16 à 596 heures la densité d'HN+0,008(g) MgO est $0,890\text{ kg/m}^3$. Durant le vieillissement il n'y a pas de changement majeur, et grâce aux résultats des expériences, on conclut qu'elle n'est pas affectée par le processus de vieillissement.

III.1.3. Variation de la résistivité, le facteur de dissipation ($\tan \delta$) et la conductivité thermique :

Les Figures III (19, 20, 21, 22, 23 et 24) représentent les variations de la résistivité et le facteur de dissipation ($\tan \delta$) d'huiles à la fin d'un vieillissement thermique aux températures de 140°C, 120°C et 100°C.

➤ **La résistivité :**

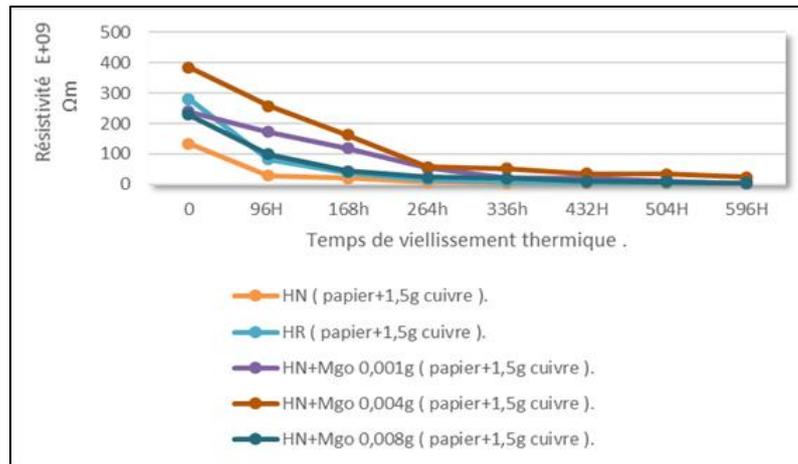


Figure III.19: Variation de la résistivité en fonction de temps et sous effet de la température 140 °C.

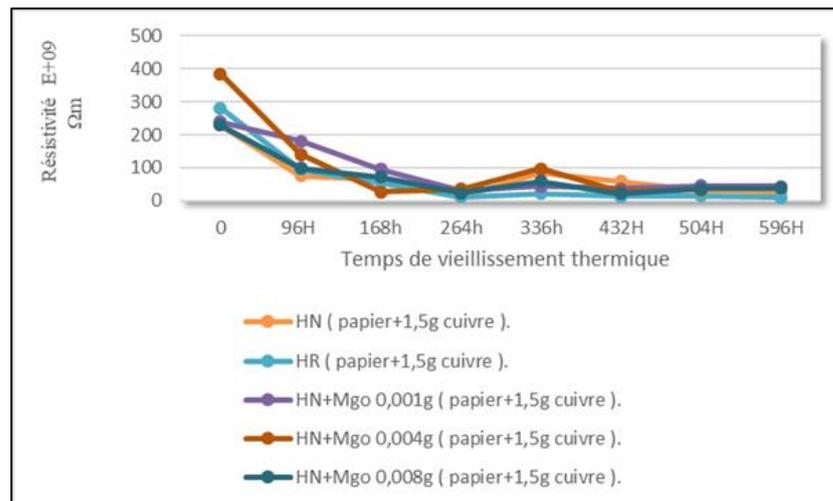


Figure III.20: Variation de la résistivité en fonction de temps et sous effet de la température 120 °C.

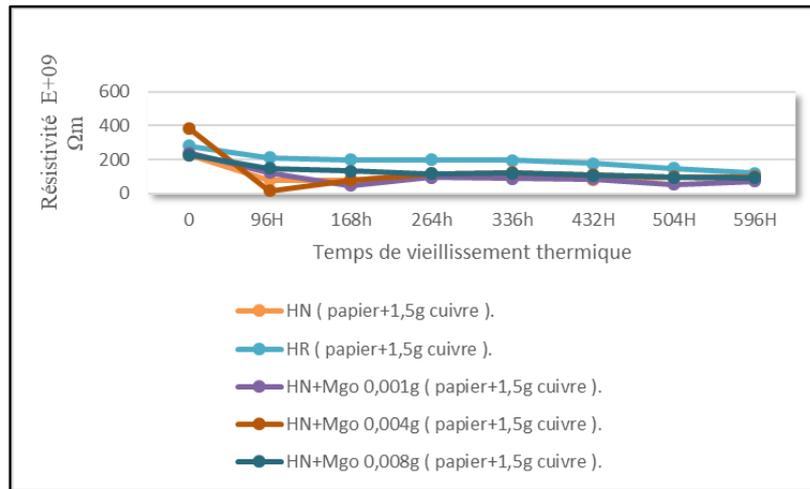


Figure III.21 : Variation de la résistivité en fonction de temps et sous effet de la température 100 °C.

Les figures III (19,20 et 21) montrent également une tendance à la diminution de la résistivité durant le vieillissement thermique. La résistivité dépend de l'aspect moléculaire et des particules préexistantes dans cette huile, surtout si elles sont de nature conductrice. Ceci est aussi un élément suggérant la dégradation moléculaire de la liquide suite aux décharges du niveau d'énergie appliquée.

➤ **Le facteur de dissipation (tan δ) :**

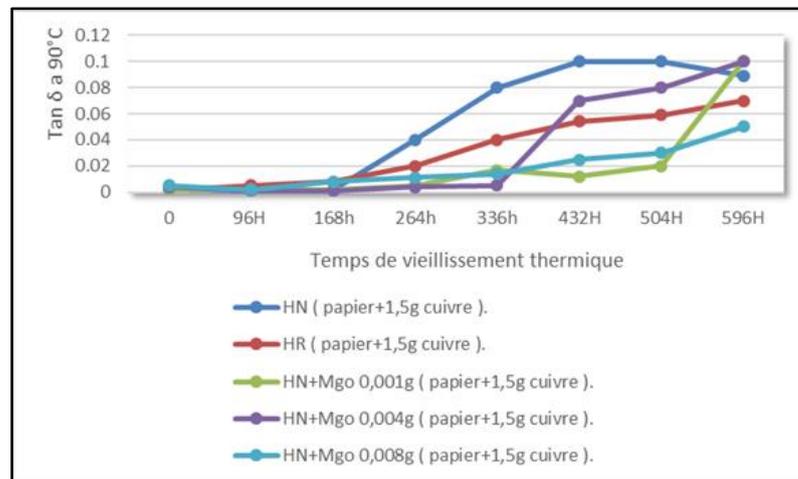


Figure III. 22 : Variation de facteur de dissipation (tan δ) en fonction de temps et sous effet de la température 140 °C.

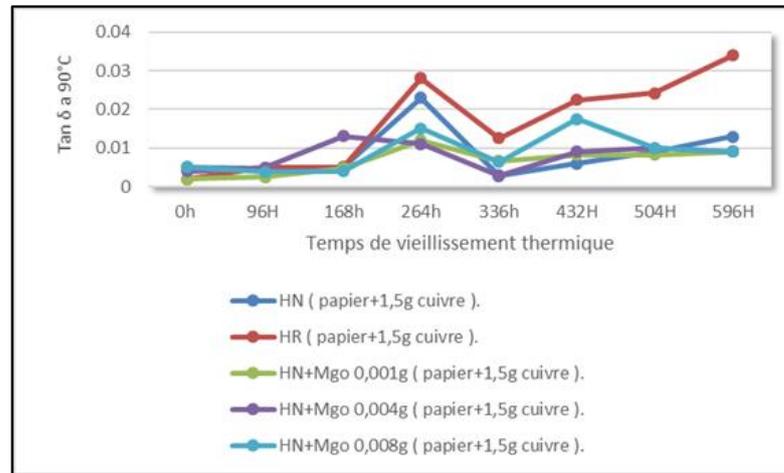


Figure III.23: Variation de facteur de dissipation ($\tan \delta$) en fonction de temps et sous effet de la température 120 °C.

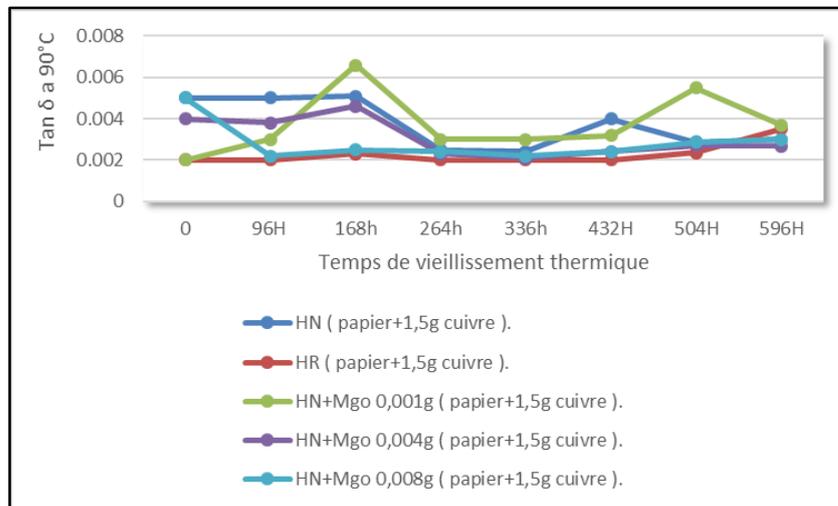


Figure III.24 : Variation de facteur de dissipation ($\tan \delta$) en fonction de temps et sous effet de la température 100 °C.

D'après les figures III (22,23 et 24) le facteur de dissipation ($\tan \delta$) d'huile augmente progressivement avec le temps. L'augmentation est importante pour la température de vieillissement à 140 °C (Figure III.22), est atteinte la valeur de 0,1 après 504 heures de vieillissement (HN+0,001(g) MgO et HN+0,004(g) MgO). D'après la figure III.23 l'HR le plus élevé, et à 100 °C (l'HN+0,001(g) MgO) le plus élevé mais la variation de facteur de dissipation ($\tan \delta$) faible d'après la figure III.24. L'oxygène et le cuivre peuvent favoriser la dégradation significative du facteur de dissipation ($\tan \delta$), qui devient plus grand lorsque le temps de vieillissement est le plus grand.

➤ La conductivité thermique:

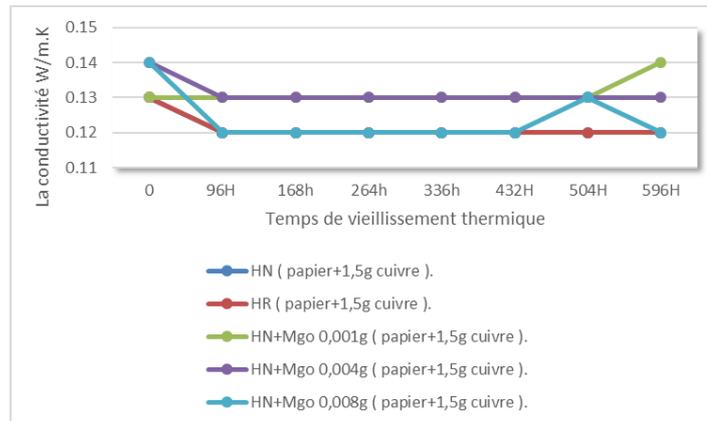


Figure III.25 : Variation de la conductivité en fonction de temps et sous effet de la température 140 °C.

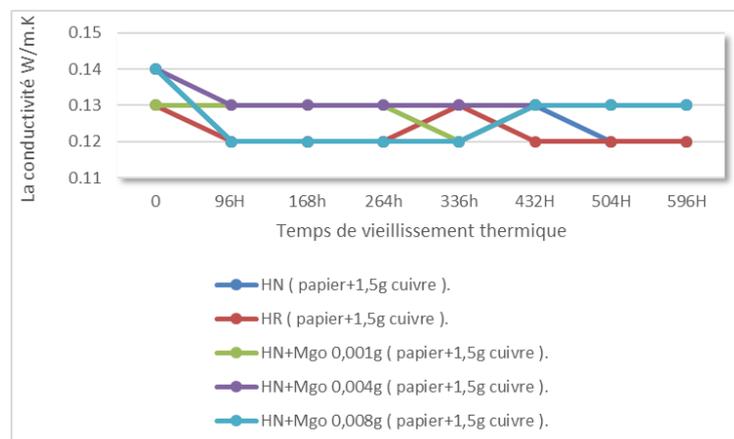


Figure III.26 : Variation de la conductivité en fonction de temps et sous effet de la température 120 °C.

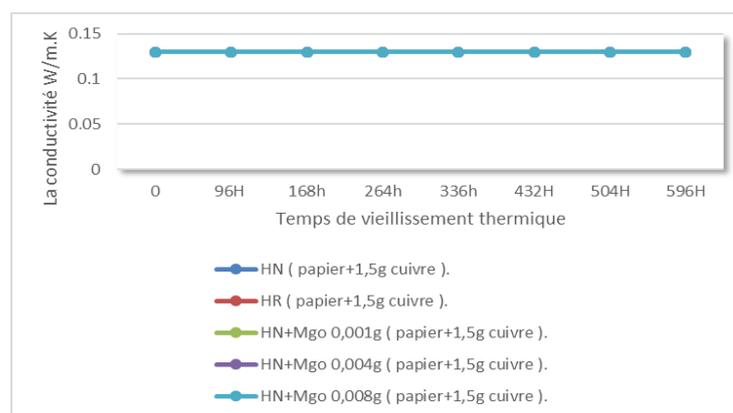


Figure III.27 : Variation de la conductivité en fonction de temps et sous effet de la température 100 °C.

Les résultats de la conductivité thermique obtenus à partir des valeurs mesurées de la densité (équation II.1) à 15 °C pour les huiles. À partir des figures III (25,26 et 27) la variation de la

conductivité thermique avec le vieillissement pour chaque huile est très faible. On peut observer qu'elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmente.

Conclusion :

Les résultats indiquent que pour les huiles étudiées, le vieillissement thermique a un impact marqué sur les propriétés physico-chimiques de l'huile minérale. Quant aux paramètres thermo fluidiques, le vieillissement thermique a un impact sur la viscosité cinématique et sur la masse volumique. Cette influence est importante d'autant que la température de vieillissement est grande.

Conclusion générale et perspectives .

Conclusion générale et perspectives

Pour que un transformateur fonctionne bien est sans risque il nécessite un refroidissement des différentes composantes intérieur chauffées par la chaleur dissipée par les enroulements et ainsi par le circuit magnétique.

Les meilleurs produits d'isolation utilisés depuis près d'un siècle sont les huiles, plus précisément les huiles minérales, le problème posé dès la première utilisation de ces huiles c'est sa dégradation causée par l'augmentation des températures internes qui influence les caractéristiques d'isolation et diminue son rendement. Plusieurs études sont faites pour améliorer la bonne isolation (électrique et thermique) ainsi pour augmenter sa durée de vie, parmi lesquelles notre étude basée sur la méthode chimique (huile inhibée).

L'objectif globale de ce travail est de trouver une huile résistive aux changements de température (le vieillissement thermique) et qui donne un bon rendement de refroidissement.

Les objectifs spécifiques associés à l'objectif global étaient résumés comme suit:

- Savoir les composantes et le fonctionnement de système de refroidissement.
- Étudier l'impact du vieillissement thermique des huiles sur leurs propriétés physicochimiques et thermo fluidique.

Les résultats indiquent que Le traitement des huiles isolantes avec le mélange (MgO) par les trois concentrations a significativement amélioré la qualité de l'huile mais par des degrés divers, l'huile traitée par (0.008g de MgO) est moins fiable que les deux huiles (0.004g et 0.001g) restantes ainsi pour l'huile régénérée.

Une analyse des résultats assure que les huiles inhibées sont presque proches aux résultats de l'huile neuve, mais elles sont aussi plus résistibles aux conditions de vieillissement, et donc pour un bon refroidissement, les huiles inhibées des concentrations de MgO (0,004 g et 0,001g) sont les plus préférable.

Perspectives :

Suite aux résultats obtenait pendant notre stage dans les ateliers de maintenance (SADEG) SONELGAZ Blida.

- On recommande pour suivre ce travail par une autre étude thermique pour déterminer la répartition de la température à l'intérieur d'huile ainsi que les différentes quantités

Conclusion générale et perspectives .

de chaleur produites à cause de vieillissement d'huile, afin de connaître l'efficacité de refroidissement de chaque huile.

- Prolonger la période d'essai pour obtenir des résultats plus fiable (plus de 596h pour chaque palier de température).

Bibliographies

- [1] José Mak and all, Transformer Fluid: A Powerful Tool for the Life Management of an Ageing Transformer Population, Proceedings of the Tech Con 2000 Asia-Pacific.
- [2] R.Fournié, “Les isolants en électrotechnique : Essais, Mécanismes de dégradation, Applications Industrielles”, Collection de la Direction des Études et Recherches d’Électricité de France, Eyrolles, Paris, 1990.
- [3] Document SONELGAZ « Ecole technique de Blida les transformateurs de puissance ».
- [4] J. S. N’CHO, "Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance," Ecole Centrale de Lyon, 2011.
- [5] C.Perrier, A.Beroual, and J.-L. L. Bessède, "Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters," Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2006.
- [6] I.Fofana and J.Sabau, “Application of Petroleum-based oil in Power Transformer”, In Natural Gas Research Progress, Editors: Nathan David and Theo Michel, 2008 Nova Science Publishers.
- [7] A.Abdelkebir and N.Saadi, “Application de la Logique Floue pour le Diagnostic des Transformateurs de Puissance par Analyse des Gaz dissous ”, juin 2017.
- [8] B.WARD, ‘Application of Filtration System for On-Line Oil Reclamation, Degassing, and Dehydration ‘. EPRI, USA2003.
- [9] K.AMRANE, S.BOUBEKEUR, « Régénération Chimique des Huiles Diélectriques Usagées par Bentonite Brute de Maghnia », p 18-19, 2017.
- [10] I. Fofana, Y. Zié and M. Farzaneh, “Dielectric Response methods for diagnostics of Power equipment”, In Recent Advances in Dielectric Materials, Editor: Ai Huang, Nova Science Publishers.
- [11] R. Fournié, “Les isolants en électrotechnique : Essais, Mécanismes de dégradation, Applications Industrielles”, Collection de la Direction des Études et Recherches d’Électricité de France, Eyrolles, Paris, 1990.
- [12] A.NAIT DJOUDI, ‘Caractérisation de l’huile pour transformateurs en service, Tizi-Ouzou, septembre 2014, p 12
- [13] LABORATOIRE OKSMAN SERAPHIN Guide appel d'offres- indice9.doc – 11/2009

Bibliographies

- [14] H.Benaicha, «Analyse des stratégies de maintenance des systèmes de production industrielle», Oran, 2015.
- [15] V. Prabhashankar, D. J. Badkas, “Mechanism of Oxidation of Transformers Oils”, June 1961.
- [16] N.M. Emanuel, E. T. Denisov, Z. K. Maizus, “Liquid Phase Oxidations of Hydrocarbons”, Plenum Press, New York, 1967.
- [17] S.KASSI, ‘étude de l’impact du vieillissement des huiles minérales et alternatives sur le refroidissement des transformateurs de puissance: approches numériques et expérimentales’,
- [18] R.Girgis, M.Bernesjo, G.Frimpong, ‘Detailed performance of a 50 MVA transformer filled with a natural ester fluid versus mineral oil’, CIGRE, 2010.
- [19] J. Vergne, “Étude du vieillissement physico-chimique du complexe papier-huile dans les transformateurs électriques” Thèse INPT, 1992.
- [20] I. Fofana, Y.Zié and M.Farzaneh, “Dielectric Response methods for diagnostics of Power equipment”, In Recent Advances in Dielectric Materials, Editor: Ai Huang, Nova Science Publishers.
- [21] A.Nacer, « Caractérisation des matériaux diélectriques application a l’huile minérale de transformateur », usthb, 2009.
- [22] L.Oumert, ‘Etude comparative des caractéristiques des huiles électriques neuves et régénérées dans les transformateurs’, Blida, 2014.
- [23] La Norme CEI 60814, « Détermination de la teneur en eau ».
- [24] norme CEI 247 : « Mesure du facteur de dissipation ».
- [25] norme CEI 422 « Mesure du Indice d’acidité pour les huiles en service ».
- [26] La Norme ISO 12185, « Mesure de la densité ».
- [28] La Norme ISO 03104, « Mesure de la viscosité ».
- [29] https://fr.wikipedia.org/wiki/Tension_de_claquage
- [30] norme ASTM D1500 : Équivalent à NFT 60 – 104 et NFT ISO 2049 produits pétroliers « détermination de la couleur ».
- [31] C.Perrier, « Étude des huiles et des mélanges à base d’huiles minérales pour transformateurs de puissance- recherche d’un mélange optimal », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Avril 2005.

Bibliographies

[32] SCAPIN MA., «Recycling of Used Lubricating Oils by Ionizing», Linking Hub, 2007.

[33] R.Sanghi, "Chemistry behind the life of a transformer," Resonance, vol. 8, pp 17; 23, 2003.

[34] S. K. Singh, A. K. Agarwal, D. K. Srivastava, and M. Sharma, "Experimental investigation of the effect of exhaust gas recirculation on lubricating oil degradation and wear of a compression ignition engine," Journal of engineering for gas turbines and power, vol. 128, pp. 921-927, 2006

Annexes

Annexes.

Variation de l'acidité (mg koh/g) en fonction de temps et sous effet de la température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN(papier+1,5g cuivre).	0.02	0.023	0.04	0.08	0.123	0.16	0.25	0.5
HR (papier+1,5g cuivre).	0.034	0.021	0.031	0.076	0.08	0.09	0.16	0.33
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.016	0.02	0.03	0.04	0.07	0.18	0.43	1.42
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.026	0.03	0.06	0.07	0.12	0.18	0.36
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.025	0.03	0.05	0.072	0.1	0.13	0.21

$\alpha T=140^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.028	0.044	0.036	0.042	0.05	0.057	0.059
HR(papier+1,5g cuivre).	0.034	0.02	0.039	0.045	0.051	0.084	0.087	0.092
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.016	0.021	0.023	0.037	0.025	0.028	0.04	0.057
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.013	0.016	0.028	0.026	0.026	0.042	0.05
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.029	0.03	0.037	0.035	0.039	0.042	0.044

$\alpha T=120^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.036	0.04	0.041	0.044	0.04	0.046	0.048
HR (papier+1,5g cuivre).	0.034	0.04	0.042	0.041	0.045	0.047	0.045	0.046
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.016	0.03	0.035	0.037	0.036	0.035	0.04	0.042
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.022	0.031	0.033	0.033	0.035	0.039	0.04
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.02	0.034	0.04	0.039	0.041	0.042	0.04	0.041

$\alpha T=100^{\circ}C.$

Annexes.

Variation de l'indice de couleur en fonction de temps et sous effet de température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.5	1.3	2.9	5.2	6.5	7.3	8	8
HR (papier+1,5g cuivre).	0.7	1.2	2.3	3.2	3.2	4.2	6.7	6.8
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0,5	0.7	1.1	1.6	2	3.1	3.7	4.5
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0,5	0.6	1.1	2.1	2.4	2.8	3.7	4.4
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.9	2.2	2.9	3.8	4.8	5.5	6.5

$\alpha T=140^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.5	0.5	0.8	1.3	1.3	1.3	1.7
HR (papier+1,5g cuivre).	0.7	1	1.3	2.3	2.5	2.6	3.3	3.4
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.7	0.9	1	1	1.3	2.2	2.3
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.5	0.5	0.8	0.9	1.2	1.2	1.3
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.5	0.5	2.4	2.9	2.9	2.9	2.9

$\alpha T=120^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
HR (papier+1,5g cuivre).	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	1	1
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6

$\alpha T=100^{\circ}C.$

Annexes.

Variation de la viscosité (mm²/s) en fonction de temps sous effet de température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	6.89	6.38	7.17	7.44	7.35	7.45	7.23	7.23
HR (papier+1,5g cuivre).	7.57	7.82	7.43	7.77	7.63	7.72	7.56	7.46
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	5.89	6.13	6.07	6.22	6.25	6.23	5.88	6.73
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	5.93	5.84	6.06	6.26	6.13	6.31	5.95	6.06
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	6.46	6.67	6.78	7	6.91	6.70	6.64	6.70

a T=140 °C.

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	6.46	7.23	8.56	6.77	8.06	7.13	6.8	7.05
HR (papier+1,5g cuivre).	7.57	7.37	7.8	9.83	10.73	8.10	6.93	7.23
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	5.89	6.09	6.07	6.12	6.93	6.6	6.2	6.11
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	5.93	6.32	6.79	7.3	6.22	6.38	6.18	6.04
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	6.46	8.36	8.19	7.95	8.84	6.87	7.03	7.45

a T=120 °C.

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	6.46	6.51	6.64	6.82	6.99	7.11	6.86	6.98
HR (papier+1,5g cuivre).	7.57	6.62	6.63	7.14	7.13	7.29	7.19	7.7
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	5.89	6.77	6.82	6.77	6.87	6.9	6.87	6.82
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	5.93	6.66	6.71	7.06	6.66	7.46	6.66	6.93
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	6.46	6.45	6.97	6.72	6.66	7.26	6.87	6.83

a T=100 °C.

Annexes.

Variation de la teneur en eau (ppm) en fonction de temps et sous effet de température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	20.6	19.8	24	26	55.4	23.2	37.9	28.5
HR (papier+1,5g cuivre).	23.7	26.5	38.5	27.6	46.7	42.1	52.3	65.3
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	10.9	27.9	19.4	31.3	25.9	22.2	43.9	40.3
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	11.2	17	28.3	28.4	21.4	15	22.4	18.8
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	18.9	35.1	31	26.8	24.9	48.5	53.8	22.3

$\alpha T=140^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	18.9	17.3	24.2	40.6	20.4	38.2	35	31.6
HR (papier+1,5g cuivre).	23.7	29.7	30.7	31.8	31.2	40.2	45.4	38.1
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	10.9	24.6	26.3	24.1	23	36.1	40.2	35
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	11.2	28	24.5	28.4	22.6	33.6	42.2	33.3
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	18.9	26.9	30.9	43.8	26.6	50.3	62.2	20.7

$\alpha T=120^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	18.9	38.8	35.1	30.7	25.2	23.1	21.1	19.8
HR (papier+1,5g cuivre).	23.7	37.6	33.5	29.7	25.2	27.2	21.1	20
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	10.9	43.2	32.1	31.2	25	16	17.9	17.5
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	11.2	42.1	44.2	38.2	20.9	36.1	22.5	21.4
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	18.9	50	33.4	35.1	32	19	16.8	16.4

$\alpha T=100^{\circ}C.$

Annexes.

Variation de la résistivité ($E+09 \Omega m$) en fonction de temps et sous effet de température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	133.59	27.93	19.98	6.21	3.28	2.46	2.56	2.76
HR (papier+1,5g cuivre).	280.98	82.59	39.19	14.87	8.01	5.83	5.21	3.68
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	240.3	172.09	118.8	53.02	20.97	19.91	11.43	2.03
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	385.76	257.72	162.52	56.76	51.47	34.9	34.27	23.34
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	229.17	98.21	44.34	23.86	20.02	10.9	8.43	5.78

$\alpha T=140^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	229.17	75.8	63.1	11.82	85.99	58.04	32.32	27.57
HR (papier+1,5g cuivre).	280.98	96.15	54.68	11.6	22.28	14.15	15.07	9.71
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	240.3	181.08	95.96	32.66	44.33	36.57	45.35	43.27
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	385.76	140.45	27.49	34.52	97.92	28.21	32.94	30.02
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	229.17	99.72	72.9	22.96	58.04	22.59	37.13	37.96

$\alpha T=120^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	229.17	79.44	80.24	118.36	114.59	81.87	94.38	93.39
HR (papier+1,5g cuivre).	280.98	211.05	200.65	198.28	196.34	178.3	150.18	120.05
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	240.3	124.06	48.87	96.21	90.27	86.88	55.05	73.15
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	385.76	16.24	77.76	116.74	123.78	111.66	97.08	98.24
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	229.17	149.9	132.55	115.99	120.14	109.09	95.81	90.7

$\alpha T=100^{\circ}C.$

Annexes.

Variation de facteur de dissipation ($\tan \delta$) en fonction de temps et sous effet de température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.002	0.0012	0.0014	0.04	0.08	0.1	0.1	0.089
HR (papier+1,5g cuivre).	0.002	0.005	0.008	0.02	0.04	0.054	0.059	0.07
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.002	0.0016	0.002	0.005	0.017	0.012	0.02	0.1
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.004	0.001	0.001	0.004	0.005	0.07	0.08	0.1
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.005	0.002	0.008	0.011	0.014	0.025	0.03	0.05

$\alpha T=140^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.005	0.0048	0.005	0.023	0.0027	0.006	0.009	0.0129
HR (papier+1,5g cuivre).	0.002	0.0049	0.005	0.028	0.0125	0.0224	0.02422	0.034
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.002	0.0025	0.0048	0.012	0.0066	0.0082	0.0083	0.009
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.004	0.0049	0.013	0.011	0.0029	0.009	0.01	0.009
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.005	0.0038	0.004	0.015	0.0064	0.0175	0.01	0.009

$\alpha T=120^{\circ}C.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.005	0.005	0.0051	0.0025	0.0024	0.004	0.00288	0.00299
HR (papier+1,5g cuivre).	0.002	0.002	0.0023	0.002	0.002	0.002	0.00237	0.00352
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.002	0.003	0.0066	0.003	0.003	0.0032	0.0055	0.0037
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.004	0.0038	0.0046	0.0023	0.0021	0.0024	0.0027	0.00269
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.005	0.0022	0.0025	0.0024	0.0022	0.0024	0.00286	0.003

$\alpha T=100^{\circ}C.$

Annexes.

Variation de la chaleur spécifique d'huiles (J /kg.°C) en fonction de temps et sous effet de température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	1751	1234	1234	1234	1234	1234	1234	1234
HR(papier+1,5g cuivre).	1718	1233	1233	1233	1234	1234	1234	1220
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	1752	1256	1256	1256	1256	1256	1256	1264
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	1762	1256	1256	1256	1256	1256	1256	1260
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	1751	1234	1234	1234	1234	1234	1249	1206

$\alpha T=140\text{ }^{\circ}\text{C}.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	1751	1319	1319	1319	1319	1319	1319	1319
HR(papier+1,5g cuivre).	1718	1319	1319	1319	1338	1319	1319	1319
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	1752	1326	1326	1335	1319	1326	1326	1326
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	1762	1326	1326	1335	1338	1344	1344	1344
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	1751	1319	1319	1319	1319	1326	1326	1326

$\alpha T=120\text{ }^{\circ}\text{C}.$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	1751	1404	1404	1404	1404	1404	1404	1404
HR(papier+1,5g cuivre).	1718	1404	1404	1404	1404	1404	1404	1404
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	1752	1404	1404	1404	1404	1404	1404	1404
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	1762	1404	1404	1404	1404	1404	1404	1404
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	1751	1404	1404	1404	1404	1404	1404	1404

$\alpha T=100\text{ }^{\circ}\text{C}.$

Annexes.

Variation de la densité (kg/m³) en fonction de temps et sous effet de température :

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.870
HR (papier+1,5g cuivre).	0.852	0.851	0.851	0.851	0.850	0.850	0.850	0.870
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.810
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.810	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.820	0.815
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.820	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.830	0.890

$\alpha T=140\text{ }^{\circ}\text{C.}$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0.820	0.850	0.850	0.850	0.850	0.825	0.850	0.850
HR (papier+1,5g cuivre).	0.852	0.850	0.850	0.850	0.825	0.850	0.850	0.850
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0.820	0.840	0.840	0.830	0.850	0.840	0.840	0.840
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0.810	0.840	0.840	0.830	0.825	0.820	0.820	0.820
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0.820	0.850	0.850	0.850	0.850	0.840	0.840	0.840

$\alpha T=120\text{ }^{\circ}\text{C.}$

Temps de vieillissement thermique	0	96H	168h	264h	336h	432H	504H	596H
HN (papier+1,5g cuivre).	0,820	0.85	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
HR (papier+1,5g cuivre).	0,852	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
HN+Mgo 0,001g (papier+1,5g cuivre).	0,820	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
HN+Mgo 0,004g (papier+1,5g cuivre).	0,810	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850
HN+Mgo 0,008g (papier+1,5g cuivre).	0,820	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850

$\alpha T=100\text{ }^{\circ}\text{C.}$