



## The 1<sup>st</sup> International Conference on Local Resource Exploitation

[www.lorexp.org](http://www.lorexp.org) / [info@lorexp.org](mailto:info@lorexp.org)  
REF: LOREXP\_2021\_A1130 Pages: 506–521



### Etude expérimentale de l'impact du vieillissement sur les performances du complexe ester naturel papier

#### *Experimental study of the impact of aging on the performance of the natural ester/paper complex*

Gérard Ombick Boyekong <sup>1,\*</sup>, Ghislain Mengata Mengounou <sup>1</sup>, Eméric Tchamdjio Nkouetcha <sup>1</sup> and Adolphe Moukengue Imano <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Technologies et Sciences Appliquées, Université de Douala, Boîte Postale 2701, Douala, Cameroun

\* Auteur Correspondant : [gerard.ombick@gmail.com](mailto:gerard.ombick@gmail.com)

#### RÉSUMÉ :

Les transformateurs électriques sont indispensables au transport et à la distribution de l'énergie électrique. Il est donc nécessaire de prolonger au maximum leur durée de vie, afin d'assurer une fourniture permanente de l'énergie électrique. A cet effet, l'objectif du présent travail est d'étudier la possibilité de remplacer l'huile minérale actuellement utilisée dans les transformateurs de puissance et de distribution, par les liquides bio-isolants. Pour y parvenir tout en valorisant les éco-matériaux locaux, nous avons porté notre attention sur les esters méthyliques des huiles végétales de palmiste et de ricin. Dans cet article, nous présentons les résultats de tests expérimentaux visant à déterminer l'impact du vieillissement thermique sur les performances du complexe d'isolation des transformateurs de puissance. Tout d'abord, nous présentons le processus d'élaboration et de caractérisation des esters méthyliques. Ensuite nous montrons le banc expérimental utilisé pour effectuer le vieillissement thermique. Puis nous présentons les résultats obtenus, notamment la détermination de l'indice d'acide par application de la norme ASTM D974, la quantification des produits de dégradation dissous au moyen de la spectroscopie Ultraviolet (UV) en respectant la norme ASTM D6802. Nous étudions également l'évolution de l'indice de couleur des différents liquides de refroidissement utilisés durant les tests de vieillissement accélérés, en nous appuyant sur les standards ASTM D1524 et D1544. Enfin, nous présentons les résultats de l'observation du diélectrique solide au microscope digital, avant et après le vieillissement thermique.

**Mots clés :** Vieillissement thermique, Ester méthylique, Isolant papier, Spectroscopie UV.

#### ABSTRACT:

Electrical transformers are essential for the transmission and distribution of electrical energy. It is therefore necessary to extend their life span as much as possible, in order to ensure a permanent supply of electrical energy. To this end, the objective of this work is to study the possibility of replacing the mineral oil currently used in power and distribution transformers by bio-insulating liquids. To achieve this while enhancing local eco-materials, we have focused our attention on methyl esters of two vegetable oils, namely palm kernel and castor oils. In this work, we present the results of experimental tests to determine the impact of thermal aging on the performance of the insulation complex of power transformers. We start by explaining the process of elaboration and performance analysis of methyl esters. Then we show the experimental bench used to perform the thermal aging. Next, we present the results obtained, especially the determination of the total acid number by application of the ASTM D974 standard, the quantification of the dissolved decay products through the Ultraviolet (UV) spectroscopy according to the ASTM D6802 standard. We also study the evolution of the color index of the cooling liquids, thanks to the ASTM D1524 and D1544 standards. Finally, we present the results of the observation of the solid dielectric by digital microscope, before and after thermal aging.

**Keywords:** Thermal aging, Methyl ester, Insulating paper, UV spectroscopy.

## 1. INTRODUCTION

Les transformateurs électriques occupent une place incontournable dans la chaîne de transport et de distribution de l'énergie électrique. En effet, il est possible de remplacer très rapidement un générateur défectueux, ou de faire fonctionner en simultané deux générateurs aux heures de forte consommation. Ces options ne sont pas aisées à mettre en œuvre dans le cas des transformateurs de puissance. De plus, les transformateurs électriques ne produisent pas d'énergie électrique, leur rôle est essentiellement lié à l'acheminement de l'énergie électrique générée par les sources présentes dans le réseau. Or, dans les pays en voie de développement à l'instar du Cameroun, l'explosion démographique est importante. Malheureusement, les nouvelles chaînes de production, transport et distribution de l'énergie électrique installées jusqu'à présent ne permettent pas de combler suffisamment les besoins de l'ensemble des consommateurs. Cette insuffisance dans la fourniture de l'électricité crée des surcharges, qui en retour soumettent les transformateurs actuellement en service à de nombreuses contraintes. Ces contraintes sont susceptibles de diminuer la durée de vie des transformateurs telle qu'indiquée par le fabricant. Il est par conséquent essentiel de renforcer les performances actuelles des transformateurs afin de leur permettre d'assurer leur rôle dans la durée de vie indiquée par le constructeur, et ce en dépit des conditions de surcharges retrouvées sur le terrain. Parmi les solutions de renforcement des transformateurs possibles, l'amélioration des performances du système d'isolation constitue l'une des meilleures options. En effet, les études précédemment menées par d'autres auteurs affirment que 40 à 80 % des pannes des transformateurs de puissance sont liées à des défaillances du système d'isolation (Fernández-Diego et al., 2016 ; Sari and Ritonga, 2019 ; Rafiq et al., 2020).

Le système d'isolation des transformateurs de puissance est généralement constitué d'huile et de papier. L'huile assure généralement les fonctions de refroidissement, de diélectrique liquide et d'outil d'aide au diagnostic de l'état du transformateur. Le papier diélectrique pour sa part assure les fonctions de support mécanique et de d'élément de fixation. Etant donné le diélectrique solide est directement fixé sur les enroulements du transformateur, tout remplacement du papier d'isolation implique un arrêt du transformateur. Une telle situation occasionnerait un arrêt de la fourniture de l'énergie électrique, ainsi que des pertes financières et matérielles (Rao et al., 2015). Les contraintes de surcharge mentionnées plus haut provoquent des conditions de pyrolyse, c'est-à-dire des élévations de la température. Ces élévations de la température induisent une augmentation du taux d'humidité autrement dit la présence d'eau sous forme liquide ou gazeuse, mais aussi d'oxydation ou présence d'oxygène. La présence d'oxygène peut également s'expliquer par une mauvaise fixation des joints ou des fuites présentes dans le transformateur. Ces conditions anormales de fonctionnement vont provoquer le vieillissement du transformateur, c'est-à-dire une dégradation irréversible du transformateur impliquant une baisse de ses performances.

Afin d'assurer un fonctionnement permanent et en toute sécurité des transformateurs de distribution et de puissance, il est par conséquent nécessaire de contrôler régulièrement l'état de leur système d'isolation. Etant donné qu'il est pratiquement impossible d'obtenir des échantillons de diélectrique solide sur un transformateur en service, l'option la plus indiquée est l'analyse des échantillons d'huile pouvant être

prélevés sur un transformateur (Bandara et al., 2016). Cette analyse peut permettre de déterminer qualitativement et quantitativement les produits de dégradation générés suite au vieillissement du complexe d'isolation. En effet, l'huile de refroidissement possède la capacité d'absorber l'eau présente dans le papier, notamment lorsque la température est élevée, mais aussi les autres produits de dégradation produits au cours du vieillissement du transformateur. Après le prélèvement de l'huile, plusieurs analyses sont possibles. Ces analyses pourraient être classées en deux catégories : les analyses physicochimiques et les analyses diélectriques. Dans la première catégorie, on retrouve les tests d'acidité, de viscosité cinématique, la quantification des marqueurs chimiques, les spectroscopies UV et FTIR, les points feu et éclair, etc. Les tests diélectriques pour leur part incluent la mesure de la rigidité diélectrique à travers la tension de claquage, les courants de polarisation et de dépolarisation, la résistance de l'isolation, la tension de retour, le facteur de pertes, etc. (Saha, 2003.). L'analyse des résultats obtenus suite à l'utilisation conjointe des méthodes diélectriques et physicochimiques permet d'établir un diagnostic complet de l'état du transformateur.

Les huiles minérales ont longtemps été utilisées comme fluides de refroidissement des transformateurs de puissance. Cependant, ces produits sont dangereux pour la santé humaine, animale et végétale, mais aussi pour l'environnement. En effet, il a été démontré que ces huiles sont cancérigènes. De plus, les valeurs relativement basses des points éclair et feu indique une marge de sécurité réduite face aux risques d'incendie. Enfin, la diminution des réserves mondiales d'hydrocarbures laisse planer le spectre d'un épuisement des réserves mondiales de pétrole disponibles. Toutes ces raisons ont poussé les chercheurs à investiguer de nouveaux liquides candidats potentiels et fiables au remplacement des huiles minérales. Parmi toutes propositions avancées, les esters se positionnent comme une option fiable et sûre (Rafiq et al., 2020). Comparativement aux huiles minérales, les esters sont largement disponibles et renouvelables, fortement biodégradables mais faiblement écotoxiques. De plus, ils ont une capacité d'absorption d'eau très grande, une meilleure rigidité diélectrique et une tension d'interface plus basse, comparativement aux huiles minérales, permettant ainsi une meilleure cohabitation avec le diélectrique solide. Les obstacles les plus importants rencontrés avec leur utilisation sont leur viscosité élevée et leur faible résistance à l'oxydation. A ces difficultés s'ajoute la compétition avec le secteur agroalimentaire dans le cas des esters comestibles, Pour éviter une potentielle compétition avec le secteur agroalimentaire, les recherches menées depuis deux décennies se sont concentrées sur les esters naturels non comestibles (Mariprasath et al., 2017). En ce qui concerne la viscosité élevée, la transestérification des huiles végétales permet d'obtenir des valeurs de viscosité en accord avec les normes applicables aux transformateurs, grâce à la formation des esters méthyliques des huiles végétales (Bertrand and Lauzevis, 2013). Enfin, l'utilisation des transformateurs scellés à l'air permet de réduire l'impact de l'oxygène atmosphérique (Fofana et al., 2002). Les esters peuvent être classés en esters naturels et synthétiques. Les esters naturels possèdent l'avantage d'un cout de production inférieur à celui des esters synthétiques.

Dans l'objectif d'améliorer la sécurité des transformateurs tout en valorisant les ressources locales, nous présentons dans ce travail de recherche les résultats de tests de vieillissement accéléré du complexe

d'isolation des transformateurs de moyenne et forte puissance. Ces tests permettent de simuler en quelques jours le comportement d'un transformateur ayant fonctionné pendant plusieurs années. La nouveauté de ce travail de recherche réside dans le protocole expérimental. Nous avons utilisé les esters méthyliques de palmiste et ricin, obtenus suite à la transestérification des huiles végétales de palmiste et de ricin respectivement. L'ester méthylique de palmiste avait été élaboré et caractérisé par Mengata Mengounou et Moukengue Imano (2016) et Mengata Mengounou et al. (2016) ; celui de ricin par Tchamdjio et al. (2019). Nous avons utilisé les esters méthyliques qu'ils ont élaborés pour effectuer un vieillissement thermique dans des conditions reproduisant le fonctionnement réel d'un transformateur, ceci grâce à l'ajout du papier d'isolation et des particules métalliques dans des proportions respectant celles utilisées dans un transformateur de puissance en service. A titre comparatif, les tests effectués sur les esters méthyliques ont également été réalisés sur les huiles minérales. L'organisation du présent article est la suivante : après l'introduction, la section 2 est consacrée à la description de la plateforme expérimentale. Dans la section 3, nous présentons les résultats obtenus et nous les comparons aux résultats obtenus par les auteurs précédents, mais aussi à la norme IEEE Std C57-147 (2008). Le guide IEEE C57.147-2008 pour l'acceptation et la maintenance des liquides isolants à base d'esters naturels dans les transformateurs indique les conditions que devrait remplir un ester naturel neuf pour être admis dans un transformateur de puissance ainsi que les conditions limites d'utilisation des esters déjà en service. La section 4 est réservée à la conclusion de l'article.

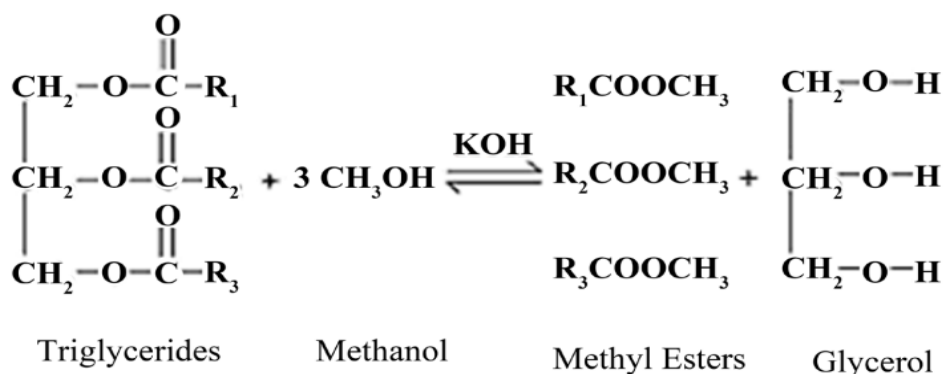
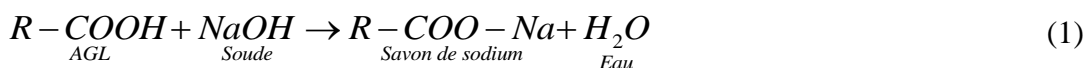
## **2. PLATEFORME EXPERIMENTALE**

### **2.1. Scénario d'obtention des esters méthyliques**

Le processus de production des bio-isolants liquides commence par l'ensemencement et la récolte des noix de palme et des graines de ricin. L'huile de palmiste brute est obtenue par broyage des amandes contenues dans la noix de palme. L'extraction de l'huile peut être faite soit de manière chimique au moyen d'un extracteur de Soxhlet, soit de manière mécanique au moyen d'une presse hydraulique de type « expeller ». Dans notre cas, nous avons utilisé la presse hydraulique. L'huile de palmiste ainsi obtenue est riche en acides gras saturés soit près de 90 %, ce qui la rend impropre à la consommation. Dans le cas de l'huile de ricin, après la récolte, il est nécessaire de sécher les graines. Ensuite, l'on procède au broyage des graines puis à l'extraction de l'huile brute. Plusieurs méthodes d'extraction sont possibles : l'extraction traditionnelle, le pressage par expulseur, le pressage hydraulique et le pressage par solvant. Le pressage par expulseur permet d'obtenir le meilleur taux d'extraction ; cependant le coût d'acquisition élevé de cette presse limite son utilisation. Nous avons donc employé une presse hydraulique pour l'extraction de l'huile brute de ricin.

Les huiles extraites sont ensuite purifiées au moyen d'un dégommeage suivi d'une opération de raffinage. Le but du dégommeage est d'extraire les substances contenues dans l'huile susceptibles de devenir insolubles par hydratation, notamment les phospholipides et les gommes. Durant le dégommeage, l'eau déminéralisée est chauffée et ajoutée à l'huile. L'huile et l'eau sont doucement mélangées, puis l'huile dégommée est

recupérée par décantation. Cette opération est répétée plusieurs fois afin d'extraire le plus de gommages possibles. La neutralisation consiste à mélanger l'huile brute avec une solution alcaline pour neutraliser les acides gras libres. L'hydroxyde sodium (NaOH), communément appelé soude caustique, est le principal composé alcalin employé pour réduire l'acidité des huiles végétales brutes. L'Equation (1) présente la réaction de neutralisation. En général, la concentration de la solution de NaOH augmente avec la teneur en phospholipides de l'huile à traiter. Un choix judicieux de la concentration de soude caustique et du pourcentage de NaOH par masse d'huile permettra d'obtenir les résultats de raffinage souhaités et d'éviter une perte d'huile excessive (Gupta, 2017 ; Logan, 2002 ; Montefrio et al., 2010).



**Figure 1** : Réaction de transestérification (Tchamdjio et al., 2019)

La transestérification est la dernière étape du développement des bio-isolants à partir des huiles végétales. Elle conduit à la formation d'esters alkyliques d'acides gras et de glycérol, comme le présente la Figure 1. La transestérification permet de réduire la viscosité du liquide isolant ; la diminution de la viscosité augmente la capacité de l'huile à évacuer la chaleur produite dans les enroulements (Bertrand and Hoang, 2004). Le méthanol est l'alcool le plus utilisé dans les réactions de transestérification des huiles végétales car, il permet d'obtenir les meilleurs taux de conversion. Un catalyseur basique, tel l'hydroxyde de potassium, est utilisé dans ce procédé, étant donné qu'il a l'avantage d'être moins corrosif et plus rapide que les catalyseurs homogènes acides tels l'acide sulfurique. Après transestérification, il est nécessaire de laver l'huile neutralisée avec de l'eau déminéralisée afin de réduire au maximum les traces de savon encore présentes dans l'huile. Ensuite, l'huile est introduite dans un mélange constitué de gel de silice et d'argile activée dans le but d'éliminer les pigments de l'huile, les produits primaires et secondaires d'oxydation, des métaux, des savons par un procédé d'absorption. Il s'en suit un filtrage sous vide (porosité du filtre 10µm) de l'huile afin d'extraire les résidus d'argile activée et de gel de silice. Enfin, les échantillons sont séchés à 80°C pendant 24 heures, puis retirés du four et scellés (Tchamdjio et al., 2019 ; Ravulapalli et al., 2019).

## 2.2. Préparation des échantillons

Avant d'effectuer le vieillissement thermique, il est important de réduire le taux d'humidité des liquides isolants et du papier isolant. Cette opération permet d'obtenir des échantillons de diélectriques présentant des taux d'humidité conformément aux normes. Pour y parvenir, le liquide isolant notamment l'huile

minérale et l'ester méthylique d'huile de palmiste ainsi que le diélectrique papier ont été chauffés à une température de 80°C pendant 24h. Les caractéristiques des liquides isolants après l'opération de déshumidification sont présentées dans le Tableau 1. L'ester méthylique d'huile de palmiste a été élaboré et caractérisé par Mengata Mengounou et Moukengue Imano (2016) et Mengata Mengounou et al. ((2016). Bien que la plante de ricin (*Ricinus communis*) soit disponible en Afrique, en Amérique latine et en Asie, le ricin que nous avons utilisé est spécifique au climat et à l'environnement agricole d'Afrique Centrale. Il a été élaboré et caractérisé par Tchamdjio et al. (2019). Le prix de l'huile minérale sur le marché est supérieur au coût de production de l'ester méthylique de palmiste, mais sensiblement égal à celui de l'ester méthylique de ricin.

### **2.3. Vieillessement thermique des échantillons**

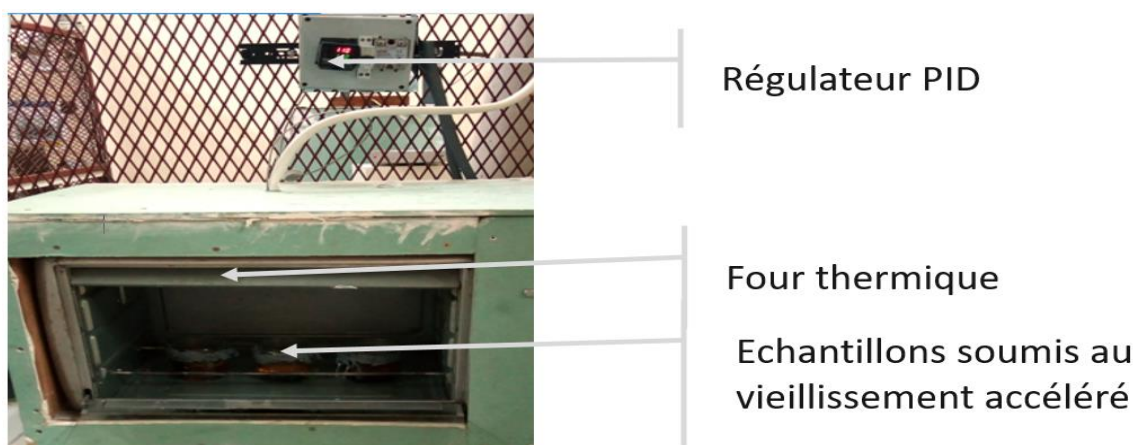
Après l'opération de déshumidification, les échantillons ont été exposés à une température de vieillissement accéléré de 110 °C (IEC, 2000) pendant une durée de 100 h. Cette durée de temps permet d'analyser efficacement la période initiale de vieillissement thermique (Chouhan et al., 2020). Le protocole de vieillissement appliqué est celui élaboré par Tenbohlen et Koch (2012) et Ridzuan et al. (2019). Dans ce protocole, les auteurs effectuent le vieillissement thermique à la fois dans des bocal fermés et dans des bocal ouverts. Dans notre cas, nous avons choisi d'effectuer le vieillissement thermique dans des bocal fermés, afin de représenter les conditions réelles de fonctionnement d'un transformateur rempli d'ester naturel. Dans le même protocole, les auteurs proposent d'insérer des substances métalliques. Nous avons introduit des morceaux de cuivre dans les bocal afin d'observer l'effet catalyseur des particules métalliques dissoutes dans l'huile, suite à l'échauffement des métaux utilisé dans la fabrication des enroulements, le circuit magnétique et autres parties métalliques du transformateur en contact avec le liquide de refroidissement. La proportion de liquide isolant papier particules métalliques est de 20 : 1 : 0,875 g, proportion retrouvée dans les transformateurs de puissance (Munajad et al., 2017 ; Sari et al., 2019). Le four thermique que nous avons utilisé est présenté à la Figure 2. Il s'agit d'un four à convection forcée, contrôlé en température par un régulateur Proportionnel Intégral Dérivé (PID). La plage de températures couverte par le régulateur est comprise entre 0 et 400 °C ± 2 °C.

### **2.4. Analyses des échantillons vieillis**

Des échantillons d'huiles ont été prélevés après vieillissement, refroidis à l'obscurité pendant 24 h avant de procéder aux différents tests physicochimiques. Les analyses effectuées sur le liquide isolant comportaient notamment son inspection visuelle grâce aux normes ASTM D1524 et D1544, les tests d'acidité par application de la norme ASTM D974 (ASTM Standard, 2011), la détermination de la quantité de produits de dégradation dissous au moyen de la spectroscopie UV en respectant la norme ASTM D6802 (ASTM Standard, 2010). Des échantillons de papier diélectrique ont été prélevés dans le but d'étudier son évolution morphologique, à l'aide d'un microscope digital. Le microscope digital utilisé, est fabriqué par la marque cooling tech et permet de faire des grossissements d'environ 500 fois. L'utilisation du microscope permet d'observer les micro-trous et microfissures produites dans le diélectrique papier au cours du vieillissement.

**Tableau 1** : Propriétés diélectriques et physicochimiques des liquides isolants utilisés

<i>Propriété</i>	<b>Protocole</b>	<b>Huile minérale, MO [12]</b>	<b>Ester méthylique d'huile palmiste, MEPKO [11]</b>	<b>Ester méthylique d'huile de ricin, MECO [12]</b>
<i>Tension de claquage (KV)</i>	IEC 60156	60	70.7	74.67
<i>Indice d'acide (mg KOH/g)</i>	ASTM D974	0.03	0.04	0.05
<i>Viscosité @ 40°C (cSt)</i>	ASTM D88	9.65	4.6	18.42
<i>Viscosité @ 100°C (cSt)</i>	ASTM D88	1.20	1.90	3.14
<i>Point d'écoulement (°C)</i>	ASTM D97	-35		3
<i>Point d'éclair (°C)</i>	ASTM D92	146	167	183
<i>Point feu (°C)</i>	ASTM D92	175	182	218

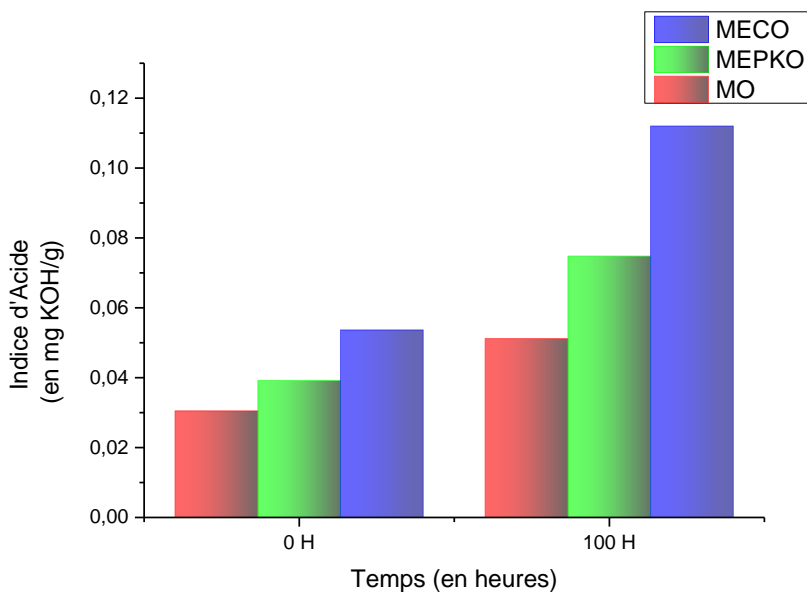


**Figure 2** : Four thermique utilisé pendant les tests de vieillissement accéléré

### 3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 3.1. Détermination de l'indice d'acide

L'indice d'acide a été déterminé pour les trois huiles isolantes étudiées. La Figure 3 présente les résultats des études d'acidité des trois huiles à la fin du vieillissement thermique. L'indice d'acide de l'huile minérale est le plus faible, suivi par le MEPKO et enfin le MECO. Ces résultats sont conformes aux études précédentes sur l'analyse comparative entre les huiles minérales et les huiles végétales. Cependant, la valeur élevée de l'indice d'acidité des esters naturels et méthyliques n'est pas préjudiciable à l'isolant cellulosique, car les esters produisent principalement des acides gras à longue chaîne, tandis que l'oxydation des huiles minérales produit principalement des acides à courte chaîne de faible poids moléculaire. Les acides de faible poids moléculaire accélèrent la dégradation du papier, tandis que les acides gras à longue chaîne augmentent la durée de vie du papier (Azis et Wang, 2011). Ceci explique pourquoi la valeur élevée de l'indice d'acide mesurée chez les esters naturels n'est pas préjudiciable pour l'isolation cellulosique.

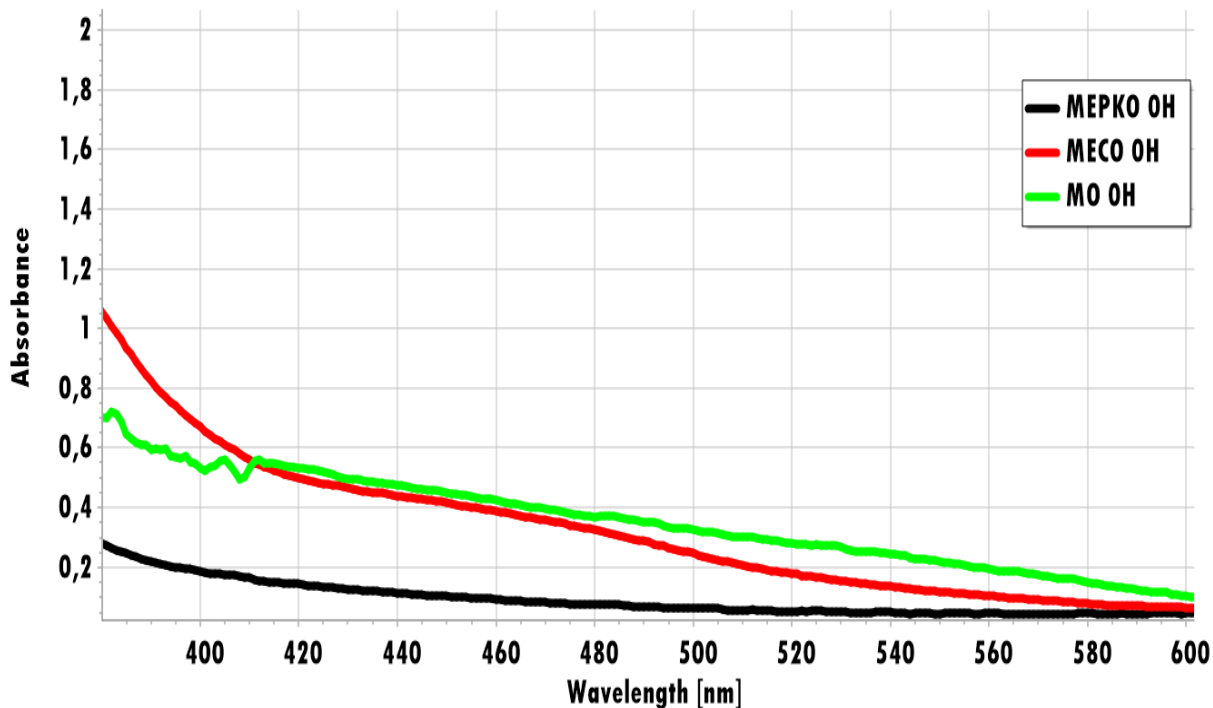


**Figure 3 :** Indice d’acide des liquides isolants

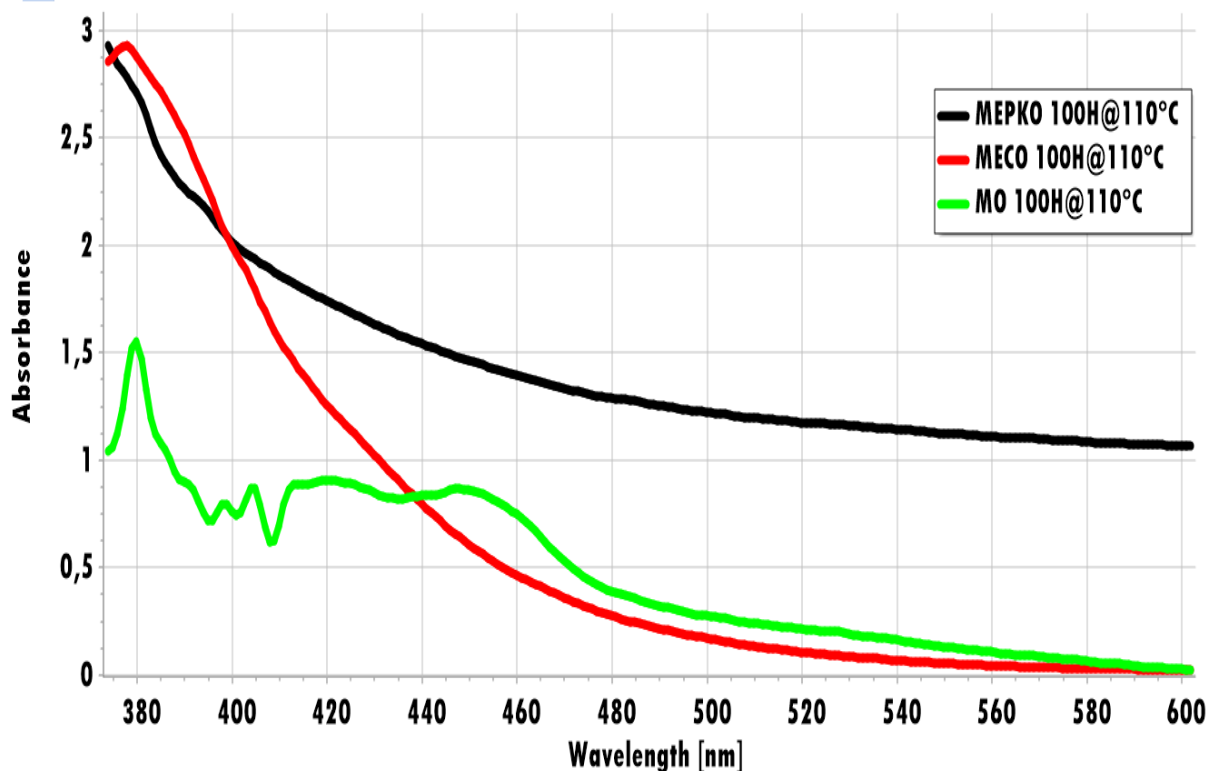
### 3.2. Evaluation de la quantité de produits de dégradation dissous générés grâce à la spectroscopie UV-Visible

La spectroscopie UV-vis est une technique permettant d’obtenir plusieurs informations sur les liquides isolants, notamment l’indice d’acide (Hadjadj et al., 2015), la tension d’interface (Baka et al., 2015), la couleur (Polanský et al., 2020), les chromophores (Alshehawy et al., 2016), c’est-à-dire les composés chimiques qui absorbent la lumière UV-Vis en raison de la transition électronique. Les Figures 4 (a) et (b) présentent les spectres d’absorption de MO, MEPKO et MECO à 0 h et 100 h respectivement. Les courbes se déplacent vers une longueur d’onde plus grande, indiquant une augmentation de la quantité de produits de dégradation dissous. Les pics d’absorption, dans le cas de l’huile minérale, relevés autour de 380 nm et 450 nm, ont également été observés par les auteurs précédents (Alshehawy et al., 2016 ; Fofana et al., 2011). L’aire sous les courbes représente la quantité de produits de désintégration dissous (DDP). La Figure 5 présente les valeurs de DDP des trois huiles au début du vieillissement et après 100 h. La DDP la plus grande est obtenue dans le cas du MECO et la plus faible dans le cas du MO, tandis que le MEPKO a une valeur intermédiaire. En effet, dans la période initiale de vieillissement, la quantité de produits de dégradation générée par les esters est supérieure à celle générée par l’huile minérale. Ce comportement peut être justifié par la présence d’antioxydants dans les huiles minérales. Ces antioxydants ajoutés aux huiles minérales au cours du processus de fabrication, augmentent leur résistance à l’oxydation. Pour leur part, les esters méthyliques que nous avons utilisés durant les tests de vieillissement ne comportaient pas d’additifs antioxydants. Il faut cependant préciser que durant la phase finale du vieillissement, ces produits antioxydants présents dans les huiles minérales perdent leurs propriétés de résistance à l’oxydation, et par conséquent la quantité de produits de décomposition dissous produits dans les huiles minérales devient supérieure à la valeur du DDP dans les esters naturels et méthyliques.



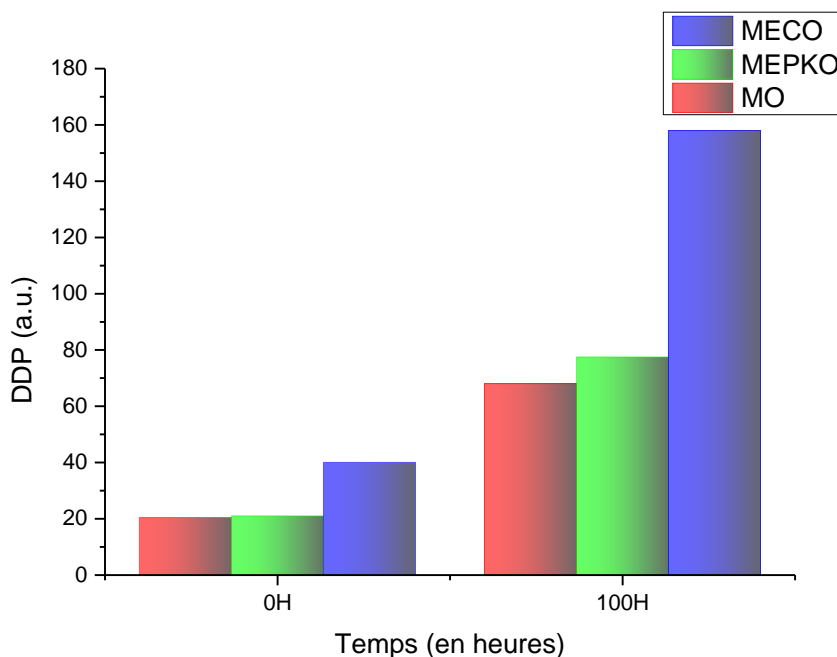


(a)



(b)

**Figure 4 :** Analyse comparative des spectres d'absorbance des trois liquides investiguées après : (a) 0h de vieillissement ; (b) 100h à 110°C



**Figure 5 :** Evolution des DDP des liquides isolants en fonction de la durée de vieillissement

### 3.3. Inspection morphologique du complexe d’isolation

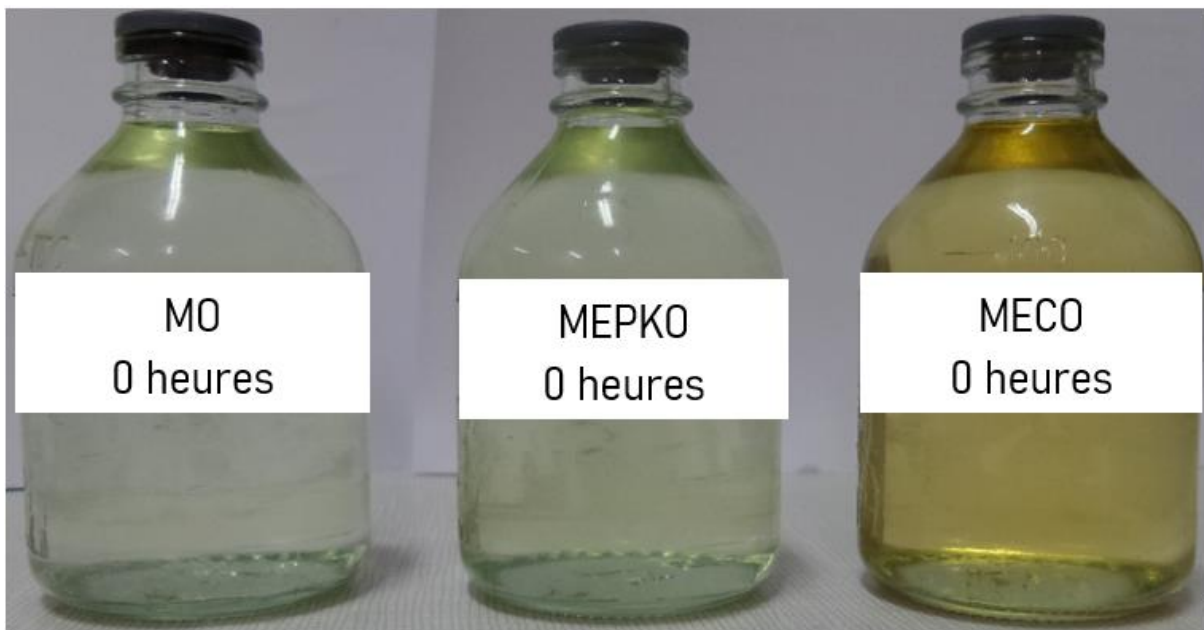
#### 3.3.1. Examen visuel des liquides isolants.

La norme ASTM D1524 indique que l’inspection visuelle pourrait permettre d’évaluer la couleur et la turbidité des liquides isolants. Cet examen peut donc révéler la présence d’eau et de sédiments dans l’huile de refroidissement. Les sédiments pourraient être des matériaux insolubles, le carbone, des fibres voire de la saleté. Si le liquide isolant comporte des matériaux contaminants insolubles, cette norme recommande de procéder à un filtrage de l’huile, puis à une identification des résidus, car une grande concentration des contaminants pourrait réduire la tension de claquage du diélectrique liquide. Les Figures 6 (a) et (b) présentent l’aspect visuel des trois huiles isolantes après 100 heures de vieillissement thermique. Le MECO présente le taux de coloration le plus élevé, suivi du MEPKO et enfin du MO.

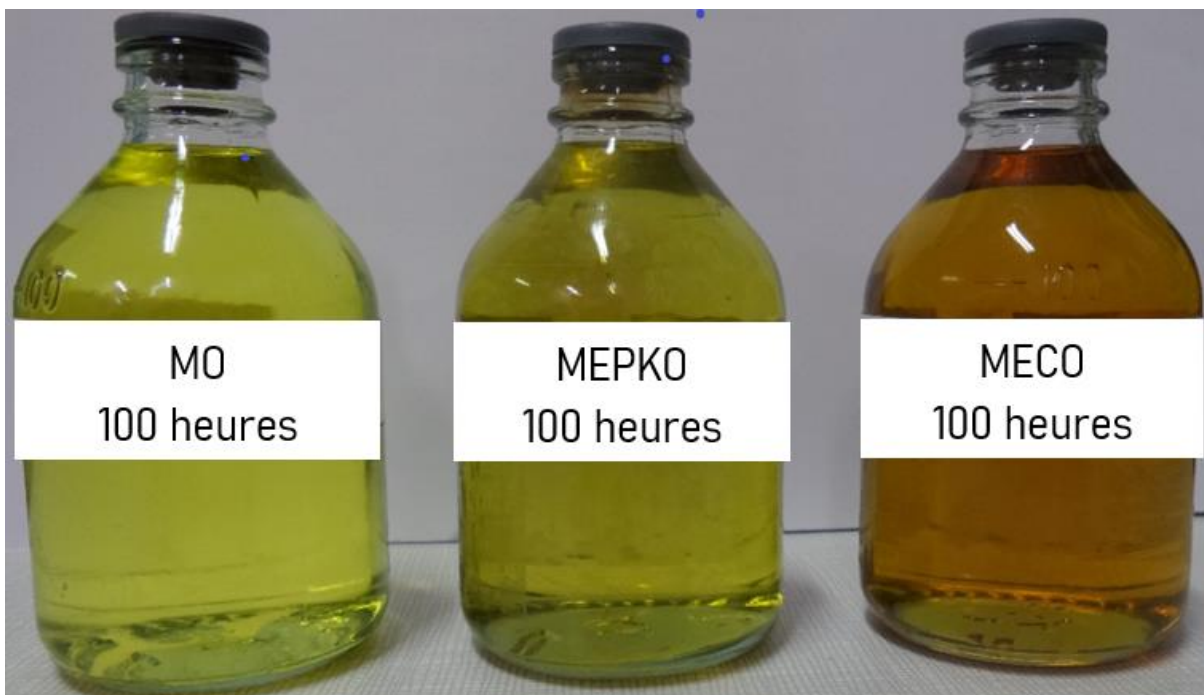
En se référant à la norme ASTM D1544, on peut déterminer si les huiles sont encore neuves après 100 h de vieillissement thermique. Afin d’y parvenir, nous utilisons la relation liant la DDP et la couleur proposée par Hadjaj et al. (2015) :

$$DDP = 27,9 \cdot (NC) - 38,09 \tag{2}$$

Dans cette relation, NC représente le numéro de couleur. En insérant dans cette relation les différentes valeurs de DDP des trois liquides isolants présentées sur la Figure 5, on obtient les valeurs relevées dans le Tableau 2. Lorsqu’une huile a un numéro de couleur inférieur à 7, elle peut être considérée comme neuve. Par conséquent, après 100 h de vieillissement accéléré, les liquides isolants restent relativement neufs, confirmant ainsi les résultats présentés sur la Figure 6 (IEEE Standard, 2010 ; Lombard, 2009 ; Pearce, 1988).



(a)



(b)

**Figure 6** : Examen visuel comparatif des liquides isolants: (a) après 0 h; (b) après 100 h de vieillissement à 110 °C.

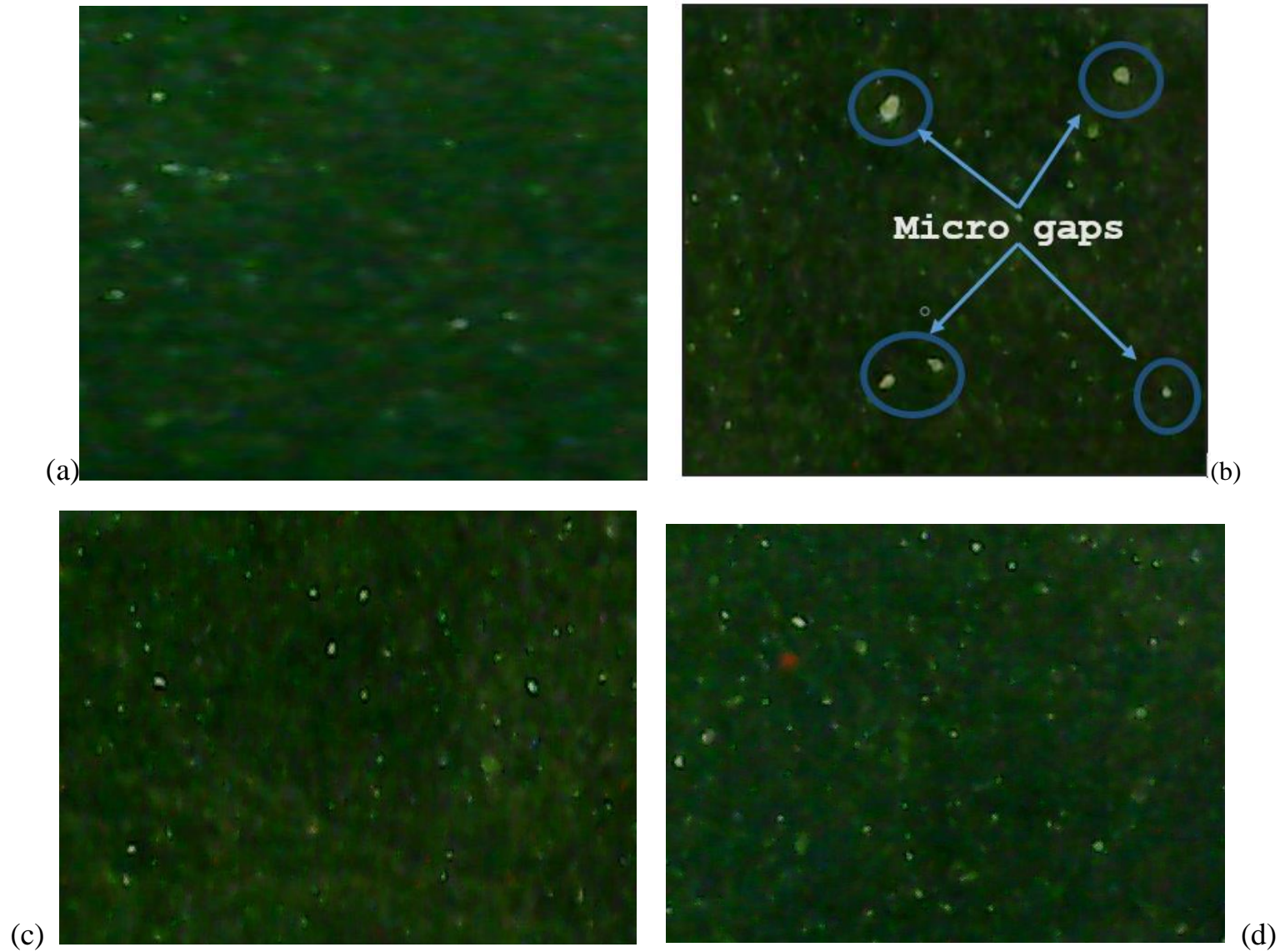
**Tableau 2** : Numéros de couleurs des liquides isolants déterminés à partir de leurs DDP respectives

isolant Durée de vieillessement	Liquide		
	Huile minérale	Ester méthylique d'huile de palmiste	Ester méthylique d'huile de ricin
0 h	2	2	3
100 h	4	4	6

### 3.3.2. Examen du papier d'isolation au microscope digital.

L'observation microscopique du diélectrique solide après vieillissement thermique est illustrée dans la Figure 7(a) - (d). La Figure 7(a) représente le papier nouvellement imprégné, 7(b) le papier imprégné de MO, 7(c) le papier imprégné de MEPKO et enfin 7(d) le papier imprégné de MECO. En examinant ces résultats, on peut observer que globalement le papier conserve sa résistance et que très peu de fissures ou de micro-trous sont apparus. Cependant, le papier imprégné d'huile minérale est plus dégradé que celui imprégné d'esters méthyliques, la Figure 8(b) présente quelques micro-trous apparus au cours du processus de vieillissement. Ceci indique que la durée de vie réelle du papier pourrait être prolongée par l'utilisation d'esters. Le ralentissement du processus de vieillissement du papier imprégné d'esters méthyliques pourrait être attribué à une réaction de transestérification entre les esters naturels et le papier. Au cours de cette réaction, les acides gras (-COOR) remplacent le groupe OH réactif dans le cinquième atome de carbone de la cellulose. Cela bloque le groupe réactif (-CH<sub>2</sub>OH), et empêche donc la scission de la chaîne de cellulose (Sari, 2019 ; Rapp et al., 2005).

Nous avons présenté dans cet article les valeurs de DDP, l'étude de l'évolution de l'acidité des diélectriques liquides, mais aussi l'examen visuel du complexe huile/papier. Les différents résultats obtenus au cours de ce travail de recherche sont en harmonie entre eux. Plus important encore, ces résultats sont conformes aux études comparatives précédentes effectuées entre les esters naturels et les huiles minérales, indiquant que durant les premières heures de vieillissement, le taux de dégradation des esters naturels est supérieur à celui de l'huile minérale. Pour étudier l'interaction entre les huiles isolantes et le papier diélectrique, différentes techniques physicochimiques et diélectriques ont été proposées et utilisées dans des études précédemment effectuées par d'autres auteurs et largement disponibles dans la littérature scientifique (Mariprasath et al., 2021 ; Ridzuan et al., 2019 ; Fernández -Diego et al., 2018). Les résultats obtenus dans notre étude sont en parfaite concordance avec les résultats obtenus par ces auteurs.



**Figure 7 :** Images de l'examen microscopique du papier d'isolation après 100h de vieillissement thermique à 110 °C : (a) papier neuf imprégné ; (b) papier imprégné d'huile minérale ; (b) papier imprégné d'ester méthylique d'huile de palmiste ; (c) papier imprégné d'ester méthylique d'huile de ricin

Dans l'optique d'avoir une compréhension complète du comportement du complexe ester méthylique/papier, de futures recherches pourraient être menées sur des études de vieillissement accéléré atteignant le point de perte de vie totale de l'isolation mixte huile/papier (Polanský et al., 2020 ; Bandara et al., 2016 ; Rapp et Luksich, 2011 ; Loïselle et al., 2020 ; Wang et al., 2020 ; Hosseinkhanloo et al., 2020)). Les résultats présentés dans cet article nous permettent de conclure que les esters méthyliques d'huile de palmiste et de ricin possèdent les caractéristiques nécessaires pour remplacer l'huile minérale comme diélectrique liquide dans les transformateurs de distribution et de puissance.

#### **4. CONCLUSION**

Dans cet article, nous avons présenté les résultats d'une étude de la phase initiale du vieillissement thermique du complexe ester méthylique/papier. Deux esters méthyliques ont été utilisés, ceux à base d'huiles de palmiste (MEPKO) et de ricin (MECO). Les résultats obtenus ont été comparés aux performances du complexe huile minérale/papier. Les critères de performances ont été définis en se basant sur les normes et protocoles en vigueur. Concernant l'inspection visuelle, le MEPKO conserve une coloration plus proche de l'huile minérale, comparativement au MECO ; en se basant sur le numéro de couleur, les trois liquides isolants peuvent toujours être considérés comme neufs après 100 h de vieillissement thermique à 110 °C. Le papier diélectrique conserve mieux ses propriétés initiales dans le MEPKO, suivi du MECO et enfin l'huile minérale. La spectroscopie UV-vis a démontré que durant le vieillissement initial, la quantité de produits de dégradation dissous (DDP) par les esters méthyliques est supérieure à celle produite par l'huile minérale. Une comparaison entre les esters méthyliques permet d'attester que durant la phase initiale du vieillissement thermique, le MEPKO génère moins de produits de dégradation dissous comparativement au MECO. La DDP générée par le MEPKO est très proche de celle de l'huile minérale. Ces résultats, en accord avec les résultats obtenus par les auteurs précédents, permettent d'affirmer que les esters méthyliques des huiles végétales font partie des candidats potentiels présentant les caractéristiques nécessaires pour remplacer l'huile minérale en tant que diélectrique liquide dans les transformateurs de distribution et de puissance.

#### **5. REMERCIEMENTS**

Nous tenons à remercier tous les membres de l'Equipe de Recherche en Systèmes d'Energie Electrique (ERSEE) pour leur contribution à ce travail, notamment la réalisation des différents tests et la relecture du manuscrit final.

#### **6. DÉCLARATION D'ABSENCE DE CONFLIT D'INTÉRÊT**

Les auteurs de cet article déclarent n'avoir aucun intérêt financier, ou de nature similaire, directement ou indirectement lié à la publication du présent article. Ils affirment également qu'il n'existe aucun élément dans cet article susceptible de créer un conflit d'intérêt quelconque avec leurs activités scientifiques.

## 7. RÉFÉRENCES

- Alshehawy A.M., Mansour D.E.A., Rezk A. and Ghali M., 2016. Impact of thermal aging of transformer oil on UV-Vis optical spectrum and dielectric properties. *Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*, *IEEE*, 860–865.
- ASTM Standard, 2010. D6802, Test Method for Determination of the Relative Content of Dissolved Decay Products in Mineral Insulating Oils by Spectrophotometry. *ASTM International*.
- ASTM Standard, 2011. D974, Standard test method for acid and base number by color-indicator titration. *Annual Book of Standards*.
- Azis N. and Wang Z., 2011. Acid generation study of natural ester. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, 22–26.
- Baka N.A., Abu-Siada A., Islam S., and El-Naggar M., 2015. A new technique to measure interfacial tension of transformer oil using UV-Vis spectroscopy. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **22**(2), 1275–1282, 2015.
- Bandara K., Ekanayake C., Saha T. and Annamalai P.K., 2016. Understanding the ageing aspects of natural ester-based insulation liquid in power transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **23**(1), 246–257.
- Bandara K., Ekanayake C., Saha T. and Ma H., 2016. Performance of natural ester as a transformer oil in moisture-rich environments. *Energies*, **9**(4), 258, 13p.
- Bertrand Y. and Hoang L., 2004. Vegetables oils as substitute for mineral oils in medium voltage equipment. *CIGRÉ*, D1-201.
- Bertrand Y. and Lauzevis P., 2013. Development of a low viscosity insulating liquid based on natural esters for distribution transformers, *CIREN*, *22nd International Conference on Electricity Distribution*.
- Chouhan A., Jarial R.K. and Rao U.M., 2020. Thermal Performance of Nomex-910 and TUK Insulating Papers in Soya-based Natural Ester Oil. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, **12**(1), 59–71.
- Fernández -Diego C., Ortiz A., Fernández I., Carrascal I., Renedo C.J. and Delgado F., 2018. Assessment of the effect of commercial vegetal oils on Kraft paper ageing through mechanical characterization. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**(5), 1880–1887.
- Fernández-Diego C., Fernández I., Ortiz F., Carrascal I., Renedo C. and Delgado F., 2018. Assessment of dielectric paper degradation through mechanical characterization, Chapter 1, in book: *Simulation Modelling of Electrical Insulation Weaknesses in Electrical Equipment*.
- Fofana I., Bouaïcha A. and Farzaneh M., 2011. Characterization of aging transformer oil–pressboard insulation using some modern diagnostic techniques. *European Transactions on Electrical Power*, **21**(1), 1110–1127.
- Fofana I., Wasserberg V., Borsi H., and Gockenbach E., 2002. Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. II. Investigations of mixed liquid impregnated paper insulation. *IEEE Electrical insulation magazine*, **18**(4), 5–16.
- Gupta M., Practical guide to vegetable oil processing. Elsevier, 2017.
- Hadjadj Y., Fofana I., Sabau J. and Briosso E., 2015. Assessing insulating oil degradation by means of turbidity and UV/VIS spectrophotometry measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **22**(5), 2653–2660.
- Hosseinkhanloo M., Motlagh S.H.M., Jahromi A.N. and Kalantari N.T., 2020. Improving the ageing rate of transformer fleet using imperialist competitive algorithm. *IET Generation, Transmission and Distribution*, **14**(20), 4363–4370.
- IEC, 2000. International Electrotechnical Commission, IEC 60216, Guide for the Determination of Thermal Endurance Properties of Electrical Insulating Materials.
- IEEE Standard, 2010. IEEE C57.12.00-2010 - for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers.
- IEEE Std C57-147, 2008. IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers. *IEEE Std C57.147-2008*, 1–31.
- Logan A., 2002. Degumming and Centrifuge Selection, Optimization and Maintenance, IUPAC-AOCS Workshop on Fats, Oils and Oilseeds Analysis and Production.
- Loiselle L., Rao U.M. and Fofana I., 2020. Influence of ageing on oil degradation and gassing tendency under high-energy electrical discharge faults for mineral oil and synthetic ester. *High Voltage*, **5**(6), 731-738.

- Lombard A., 2009. Quality Assurance of Insulating Oil for Use in New Transformers, Paper P507, 6th Southern Africa Regional Conference. *CIGRÉ*, 8p.
- Mariprasath T., Kirubakaran V. and Kumar D.K., 2017. Feasibility analysis of Karanja oil as alternate liquid dielectrics for distribution transformers. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, **27**(8), e2345, 6p.
- Mariprasath T., Kirubakaran V., Madichetty S. and Amaresh K., 2021. An experimental study on spectroscopic analysis of alternating liquid dielectrics for transformer. *Electrical Engineering*, **103**(2), 921–929, <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01136-x>
- Mengata Mengounou G. and Moukengue Imano A., 2016. Effet du conditionnement sur la rigidité diélectrique des esters méthyliques d'huile de palmistes. *Afrique Science*, **12**(5), 157–165.
- Mengata Mengounou G., Moukengue Imano A. and Vardamides J.C., 2016. Analyse des propriétés physico-chimiques de l'huile de palmistes transesterifiée. *Sciences, Technologies et Développement, Edition spéciale*, 210–212.
- Montefrio M.J., Xinwen T. and Obbard J.P., 2010. Recovery and pre-treatment of fats, oil and grease from grease interceptors for biodiesel production. *Applied Energy*, **87**(10), 3155–3161.
- Munajad A., Cahyo Subroto and Suwarno, 2017. Study on the effects of thermal aging on insulating paper for high voltage transformer composite with natural ester from palm oil using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). *Energies*, **10**, 1857, 15p.
- Pearce H., 1988. Significance of Transformer Oil Properties. *Electrical Insulating Oils: ASTM International*, 47-55.
- Polanský R., Hahn P., Kadlec P., Moravcová D. and Prosr P., 2020. Quantifying the effect of catalysts on the lifetime of transformer oil, *Applied Sciences*, **10**(4), 1309, 15p.
- Rafiq M., Shafique M., Azam A., Ateeq M., Khan I.A., and Hussain A., 2020. Sustainable, Renewable and Environmental-Friendly Insulation Systems for High Voltages Applications. *Molecules*, **25**, 3901, 43p.
- Rao U.M., Sood Y. and Jarial R., 2015. Review on ester based dielectric liquids for transformer insulation technology, *International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, *IEEE*, 1–6.
- Rapp K., McShane C. and Luksich J., 2005. Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper. *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, ICDL 2005., 393–396.
- Rapp K.J. and Luksich J., 2011. Review of Kraft paper/natural ester fluid insulation system aging, *IEEE International Conference on Dielectric Liquids*, 1–4.
- Ravulapalli S., Kunta R. and Ramamoorthy M., 2019. Preparation, characterization and feasibility analysis of methyl ester of Sesbania seeds oil (MESSO) as alternate liquid dielectrics in distribution transformers. *RSC advances*, **9**(6), 3311–3319.
- Ridzuan N.L.M., Bakar N.A., Ghani S.A., Chairul I.S., Aziz N.H.A., 2019. Comparative study on the accelerated thermal aging behavior between palm and rapeseed natural ester oils. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, **8**(3), 735–743.
- Saha T.K., 2003. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **10**(5), 903–917.
- Sari Y.E. and Ritonga A.D., 2019. Comparative Study of Kraft Paper Aged in Natural Ester with XRD and TG/DTG Analysis. *International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, *IEEE*, 564–569.
- Sari Y.E., Al-Ghifary F. and Dewi T.I., 2019. Chemical and Physical Performance of Kraft Paper Immersed in Natural Ester from Palm Oil Under Accelerated Thermal Aging. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, **11**(2), 408–426.
- Tchamdjio Nkouetcha E., Mengata Mengounou G., Moukengue Imano A., 2019. Elaboration and Performance Analysis of a Bio-Based Insulating Liquid from Castor Oil for Power Transformers. *Open Access Library Journal*, **6**(5), e5404.
- Tenbohlen S. and Koch M., 2010. Aging performance and moisture solubility of vegetable oils for power transformers. *IEEE transactions on power delivery*, **25**(2), 825–830.
- Wang L., Zhang X., Villarreal R., Liu Q., Wang Z. and Zhou L., 2020. Top-oil temperature modelling by calibrating oil time constant for an oil natural air natural distribution transformer. *IET Generation, Transmission and Distribution*, **14**(20), 4452–4458.