

Effet du conditionnement sur la rigidité diélectrique des esters méthyliques d'huile de palmistes

Ghislain MENGATA MENGOUNOU* et Adolphe MOUKENGUE IMANO

*Laboratoire d'Électronique, Électrotechnique, Automatique et Télécommunication (LEEAT),
Université de Douala, BP 24157 Douala, République du Cameroun*

* Correspondance, courriel : mengounal@yahoo.fr

Résumé

La recherche de nouveaux substituts des huiles minérales se focalise sur des huiles végétales reconnues pour leur biodégradabilité et faible toxicité. La contribution du présent papier porte sur l'analyse de la rigidité diélectrique des Esters Méthyliques d'Huile de Palmistes (EMHP). Le conditionnement élaboré repose à cet effet sur deux opérations fondamentales : la méthanolyse de l'huile brute afin d'en extraire les esters naturels et le dégazage du mélange obtenu dans le but d'y éliminer progressivement les résidus d'impuretés (particules solides, humidité et gaz). La tension de claquage a été examinée selon les méthodes des normes CEI 60156 et ASTM D1816. Les résultats expérimentaux laissent apparaître l'influence du temps de traitement sur la rigidité diélectrique des EMHP observée à partir de trois types d'électrodes ayant des distances inter-électrodes variables. Cette contribution montre qu'à partir de 72 heures de dégazage, les deux méthodes d'analyse convergent vers une rigidité diélectrique des EMHP ($\approx 28,28$ kV / mm) meilleure que celle de certaines huiles minérales (≈ 26 kV / mm). L'huile de palmistes ainsi conditionnée pourrait en conséquence constituer une alternative intéressante de remplacement desdites huiles minérales destinées à l'isolation de certains équipements en haute tension.

Mots-clés : *huile de palmistes, transestérification, dégazage, rigidité diélectrique.*

Abstract

Conditioning effect on the dielectric strength of the methyl esters of palm oil

The search for new substitutes for mineral oils focuses on vegetable oils known for their biodegradability and low toxicity. The contribution of this paper lies in the analysis of the dielectric strength of Palm Kernel oil Methyl Esters (PKOE). The packaging developed for this purpose is based on two basic operations : the methanolysis of the crude oil in order to extract natural esters and the degassing of the mixture obtained so as to progressively eliminate impurities residues (solid particles, moisture and gas). The breakdown voltage was examined using the methods of IEC 60156 and ASTM D1816 standards. The experimental results reveal the influence of treatment time on the dielectric strength of PKOE observed from three types of electrodes having variable gaps. This contribution shows that from 72 hours of degassing, the two analysis methods converge towards a higher dielectric strength of PKOE up to 26 kV / mm. So, the palm kernel oil thus conditioned could constitute an interesting alternative to replace the mineral oils meant for the isolation of some equipment under high voltage.

Keywords : *palm kernel oil, transesterification, degassing, dielectric strength.*

1. Introduction

Les huiles isolantes jouent trois fonctions essentielles dans les équipements hautes tensions : le refroidissement, l'isolation [1] et l'élaboration d'un programme de maintenance. Elles sont à cet effet très utilisées dans les transformateurs de puissance ce d'autant plus qu'elles présentent de meilleures propriétés que les solides et les gaz [2]. Il en existe 3 grandes familles d'huiles isolantes. Les huiles minérales sont obtenues par raffinage du pétrole brut. Elles sont largement exploitées grâce à leur faible coût et leur faible viscosité gage d'une bonne évacuation de chaleur [3]. Elles posent néanmoins les problèmes suivants : faible résistance au feu, constituants cancérigènes (PCB) néfastes pour l'environnement et faible biodégradabilité responsable de la bioaccumulation [1 - 4]. Les esters synthétiques dérivent des procédés pétrochimiques. Cette catégorie d'huile isolante vient pallier aux lacunes des huiles minérales [1, 3]. Cependant, leur coût très élevé constitue un handicap pour la mise sur pied des transformateurs qui concilient les 3P (Prix, Planète et Peuple). Les esters naturels quant à eux proviennent des oléagineux reconnus pour leur faible toxicité et grande biodégradabilité. Ces derniers font donc l'objet des recherches contemporaines. De nombreux prototypes d'huiles végétales isolantes ont été expérimentés avec succès dans des transformateurs de moyenne puissance [4]. En France, l'huile RS50 développée par EDF à partir d'huile de colza.

Aux Etats Unis, les huiles Biotemp et Envirottemp FR3 développées en 1999 par les industries ABB et Cooper Power System respectivement, toutes les deux à partir d'huiles comestibles [1]. Tout récemment en Malaisie, les chercheurs ont mené une investigation sur l'huile de palme et de soja [6]. Toutes ces alternatives sont cohérentes sur la bonne tenue diélectrique et la forte capacité à absorber l'humidité des esters naturels [3 - 6]. Cependant, ne serait-il pas intéressant de mener des investigations sur des esters naturels issus des ressources non comestibles ? La contribution de ce papier porte à cet effet sur l'étude de faisabilité d'un prototype d'huile isolante à base d'une ressource non comestible largement disponible au Cameroun, pourtant mal connue et donc sous exploitée : l'huile de palmistes, à ne pas confondre avec l'huile de palme qui est une ressource comestible. Notre élaboration est quelque peu similaire à celle de [7] mais avec des particularités : le traitement commence par la séparation des esters naturels et du glycérol conformément à [8, 9]. Il se poursuit par le dégazage du mélange d'esters obtenus. La tenue diélectrique des échantillons est analysée par les méthodes des normes CEI 60156 et ASTM D1816, exécutées à des périodes spécifiques du dégazage afin de laisser transparaître clairement à partir de quelle phase les esters d'huile de palmistes peuvent être éligibles pour assurer l'isolation des équipements en haute tension.

2. Matériel et méthodes

2-1. Préparation des échantillons d'EMHP

Les Esters Méthyliques d'Huile de Palmistes proviennent d'une réaction de transestérification de l'huile de Palmistes brute, elle-même obtenue selon un procédé mécanique simple fondé sur le concassage des noix de palmistes, le séchage, le broyage et le pressage des amandes de palmistes (*Elaeis guineensis*). La transestérification quant à elle repose sur la réaction entre l'huile de palmistes obtenue (Triglycéride : $C_3H_5(OOCR)_3$ et le méthanol (CH_3OH) en présence d'un catalyseur (KOH). Elle permet alors de séparer les esters naturels (R-COO-R') du glycérol contenu dans l'huile de palmistes brute. Les dispositifs expérimentaux et les paramètres mis en jeu pour effectuer ce traitement sont clairement présentés dans [8]. En outre, il est démontré que cette réaction permet d'accroître les propriétés physico-chimiques des huiles isolantes végétales [8, 9].

2-2. Dégazage des EMHP

Le dégazage constitue le traitement le plus utilisé pour accroître les propriétés des huiles isolantes [1, 5 - 7, 10, 11]. La technique consiste à mettre le liquide sous vide après l'avoir fait passer à travers un filtre de faible porosité. Le vide, le chauffage et l'agitation de l'huile provoquent respectivement son filtrage, son séchage et son dégazage. La **Figure 1** présente la station de dégazage mise sur pieds pour effectuer le deuxièmement traitement du prototype d'huile de palmistes. Les échantillons d'EMHP sont ainsi introduits dans un filtre en verre fritté de faible porosité qui y élimine dans un premier temps les résidus de particules solides de taille supérieure à 10 μm . Après le filtrage, les échantillons sont ensuite recueillis dans une fiole à vide de capacité 1000 mL. Celle-ci repose sur une plaque chauffante qui porte les échantillons d'esters à une température de 80°C au maximum afin de ne pas les dégrader. La plaque chauffante incorpore un agitateur magnétique qui précipite également la montée des particules dissoutes d'eau et de gaz se trouvant dans les échantillons d'EMHP. La fiole à vide est reliée à un piège à eau, lui-même connecté à une pompe à vide qui engendre dans l'ensemble du dispositif une dépression de 10^{-3} bars environ, catalysant ainsi l'extraction des impuretés volatiles contenues dans les échantillons d'EMHP. Après le traitement, le refroidissement des échantillons se fait naturellement jusqu'à la température ambiante pendant 1 jour. La durée du traitement de l'huile varie en fonction de l'état de séchage des échantillons. L'effet du dégazage sur la couleur des EMHP est perceptible à la **Figure 2**.

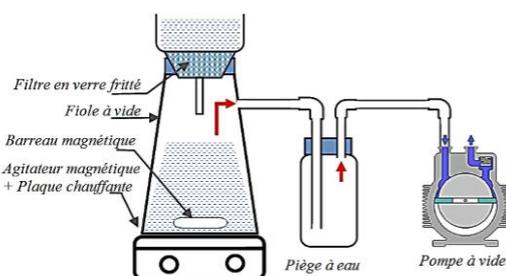


Figure 1 : Principe de la station de dégazage



Figure 2 : Echantillons d'huile de palmistes brute (a), Séparation des esters naturels du glycérol après réaction de transestérification (b) et échantillons d'EMHP dégazés (c)

2-3. Mesure de la tension de claquage

La tension de claquage des échantillons d'EMHP dégazés a été mesurée à la pression atmosphérique et à la température ambiante grâce au diélectromètre automatique de type "HYYJ-502" de Wuhan Huaying Power dont le schéma de principe est illustré à la **Figure 3**. Il est capable de fournir une tension 50 Hz, variable de 0 à 100 kV avec des rampes de 0,5 à 5k Vs⁻¹. Il est constitué d'une cellule de mesure en plexi-glace de capacité 400 mL, de 3 paires d'électrodes en laiton de profil sphériques, VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker) et Rogowski qui soumettent le liquide à un champ électrique quasi-uniforme. Nous supposons que les dérivées de température et de pression n'influencent pas de façon significative les mesures. Le **Tableau 1** présente les spécificités des méthodes de mesure (le type d'électrode, la distance inter-électrode, la rampe de tension, le temps d'agitation et le nombre de claquage) conformes aux normes les plus utilisées notamment la CEI 60156 et ASTM D1816. L'humidité relative des échantillons d'EMHP a été estimée grâce à l'hydromètre "MF-100" de VOLTCRAFT.

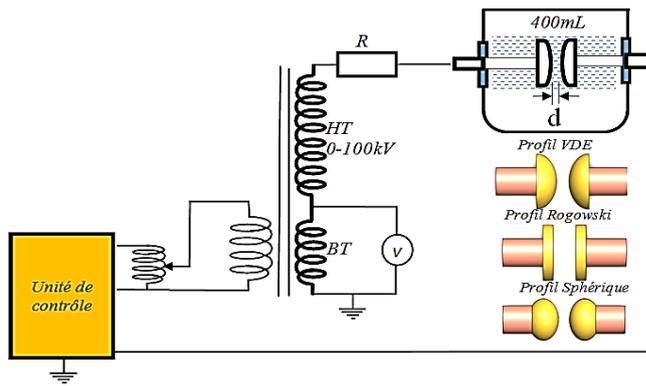


Figure 3 : Schéma de principe du diélectromètre HYYJ - 502

Tableau 1 : Normes de mesure de la tension moyenne de claquage

Paramètres	Unités	CEI 60156	ASTM D1816
Profil des électrodes	-	Sphérique ou VDE	VDE
Inter-électrodes	mm	2,5	1 ou 2
Temps d'attente	s	300	180
Rampe tension	kVs ⁻¹	2	0,5
Temps d'agitation	s	60	Continu
Temps d'attente	s	60	60
Nombre de claquages	-	6	5

2-4. Détermination de la rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique moyenne E_c d'une huile désigne la valeur maximale du champ électrique auquel l'isolant est soumis avant l'apparition soudaine d'une décharge (arc électrique) entre les deux électrodes [1, 12]. Elle constitue l'une des propriétés les plus employées en alternatif pour apprécier l'isolation assurée par les huiles dans les transformateurs. Elle est déduite de la tension moyenne de claquage U et de la distance inter-électrode d grâce à l'Equation 1. Quand on mesure plusieurs fois la tension de claquage U , on constate que sa valeur varie d'un essai à l'autre. Cette dispersion en fonction de la géométrie et de l'état de la surface des électrodes, mais surtout des impuretés dont la présence ne peut jamais être totalement éliminée. Dans un champ uniforme ou quasi-uniforme, la rigidité diélectrique des huiles isolantes destinées aux transformateurs est de l'ordre de l'ordre de 0,1MV / cm à 1MV / cm [1].

$$E_c \approx \frac{U}{d} \quad \text{où} \quad \begin{cases} E_c \left[\frac{kV}{mm} \right] = \text{rigidité diélectrique} \\ U [kV] = \text{tension de claquage} \\ d [mm] = \text{distance inter-électrodes} \end{cases} \quad (1)$$

3. Résultats et discussion

Les résultats du calcul de la rigidité diélectriques des échantillons d'EMHP sont présentés dans le **Tableau 2**. Ils découlent de la tenue diélectrique résultant de la moyenne de 6 à 5 claquages mesurés selon les exigences des normes CEI 60156 et ASTM D1816 respectivement. Les plages d'erreurs sont déterminées à 95 % de confiance autour des valeurs moyennes.

Tableau 2 : Rigidité diélectrique et humidité relative des EMHP

Temps de dégazage (H)	Ec (kV / mm)						Humidité relative (%)
	CEI 60156				ASTM D1816		
	VDE / 2,5 mm		Sphérique / 2,5 mm		VDE / 1 mm		
	Moy.	σ	Moy.	σ	Moy.	σ	
0	5,78	1,52	4,68	0,44	4,3	0,4	33,6
1	6,48	1,76	5,28	0,16	5,3	3,1	32,7
4	3,92	0,48	5	1,6	3,7	0,7	31,4
8	4,16	1,36	4,36	0,4	4,4	0,1	30,8
12	3,96	0,64	3,4	0,44	5,5	0,3	27,6
24	5,88	0,36	5,12	0,64	7,7	0,3	19,9
48	27	0,52	20,8	0,72	10	0,4	16,0
72	28,28	1,04	32,24	0,16	31,2	2,1	14,8
96	24,92	0,72	30	1,496	37,7	4,1	13,9

3-1. Comportement de la rigidité diélectrique des EMHP par rapport aux méthodes d’investigations

La **Figure 4** présente le comportement de la rigidité diélectrique des EMHP en fonction du temps de dégazage. Les paramètres mis en jeu pour déterminer la tenue diélectrique des échantillons sont présentés dans le **Tableau 1**. On observe que pendant les 12 premières heures de traitement la tenue diélectrique des échantillons est relativement constante et concentrée autour de 4k V / mm environ quelque soit la méthode expérimentale. L’augmentation considérable de la rigidité diélectrique des EMHP se produit à partir de 48 heures où elle atteint 10 kV / mm environ pour la ASTM D1816 et 26 kV / mm environ pour la CEI 60156. La grande dispersion des résultats observée pendant cette période témoigne de la présence considérable d’impuretés qui, plus encore, sont responsables de l’apparition des ponts de carbone observés sur les axes des électrodes lors des claquages tel que l’illustre la **Figure 5**. A 72 heures de dégazage, l’apparition de ponts de carbone s’estompe lors des claquages et les deux méthodes expérimentales convergent à peu près vers le même résultat qui est largement supérieur au seuil d’éligibilité des huiles isolantes minérales qui est de 0,1 MV / cm [1] soit 10 kV / mm et comparable à celle de l’huile isolante végétale homologuée Envirotemp FR3 \approx 28 kV / mm. Après ce traitement, les EMHP présentent alors une tenue diélectrique de 70,7 kV / 2,5 mm pour la CEI 60156 et 59,1 kV / 2 mm pour la ASTM D1816 ; soit une dispersion de 1,27 kV / mm, laquelle engendre une plage d’erreurs équivalente à 4 % approximativement autour de la rigidité moyenne obtenue. Pour la norme ASTM cette dispersion ne doit pas être au-delà de 10 %.

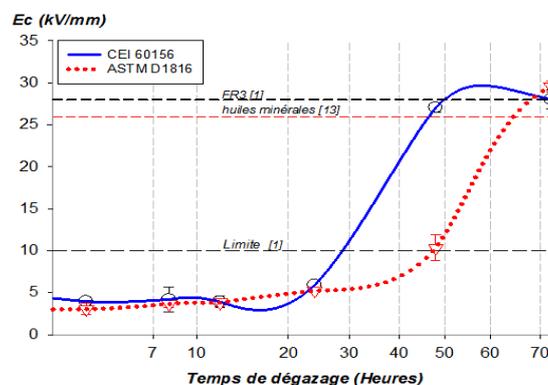


Figure 4 : Influence dégazage sur la rigidité diélectrique des EMHP

3-2. Influence de l'humidité relative sur la rigidité diélectrique des EMHP

Nonobstant la maîtrise des teneurs en particules et gaz inhérent au traitement, la **Figure 5** montre le comportement de l'humidité des échantillons en rapport avec le dégazage. Elle montre que l'humidité relative des échantillons décroît lentement pendant les 9 premières heures de dégazage, puis elle chute véritablement de 30 % à 15 % environ dans la période comprise entre 12 et 72 heures de traitement. A partir 72 heures de dégazage, on observe une faible diminution du taux d'humidité des échantillons des EMHP autour de 14 %. Le séchage des échantillons d'EMHP contribue donc à faire croître la rigidité diélectrique de 5,78 kV / mm à 28,28 kV / mm approximativement telle que l'illustre la **Figure 6**. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par [1, 5, 13] qui montrent que la tenue diélectrique est fortement influencée par la teneur en eau des échantillons.

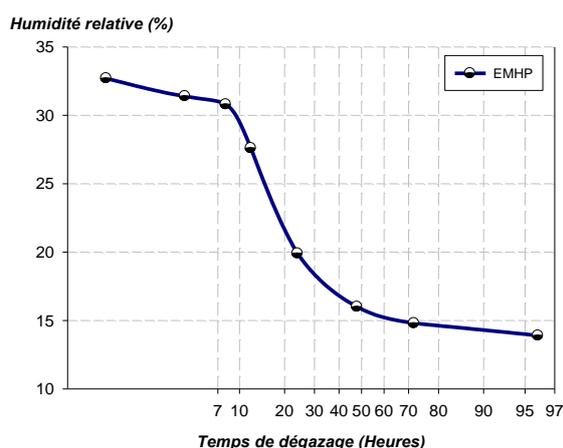


Figure 5 : Influence du dégazage sur l'humidité relative des EMHP

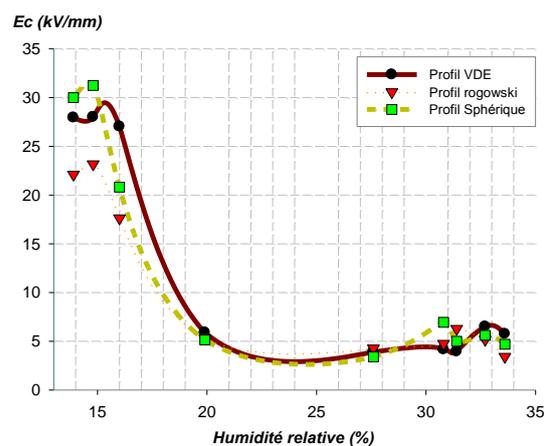


Figure 6 : Influence de l'humidité relative sur la rigidité diélectrique des EMHP

3-3. Comportement de la rigidité diélectrique des EMHP par rapport à la géométrie des électrodes, la distance inter-électrode et le temps de dégazage

Outre les spécifications des normes ASTM D1816 et CEI 60156, des investigations supplémentaires ont été effectuées à partir des électrodes rogowski et sphériques positionnées à des distances variables de 1 à 4 mm. Les **Figures 7 et 8** présentent à cet effet l'influence du profil d'électrode sur la rigidité diélectrique des EMHP. La rigidité diélectrique des EMHP augmente considérablement avec du temps de dégazage. Cette augmentation est d'autant plus importante que la concentration des impuretés dans l'huile est faible. Il est important de remarquer que les champs électriques entretenus par les électrodes VDE, rogowski et sphériques sont quasi uniformes et vraisemblables pour les deux méthodes expérimentales. Toutefois, le profil rogowski présente le plus vulnérabilité au claquage. L'explication la plus plausible vient du fait que ce dernier met en jeu une surface d'échange beaucoup plus grande qui augmente la probabilité de claquage des échantillons. Plusieurs travaux publiés [1, 5, 12 - 14] démontrent d'ailleurs que les pertes diélectriques augmentent en fonction de la surface mise en jeu, ce qui provoque la diminution de la tension de claquage avec l'augmentation de la surface des électrodes.

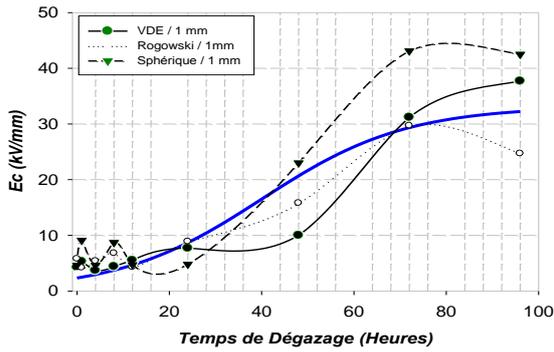


Figure 7 : Influence de la géométrie des électrodes sur la rigidité diélectrique des EMHP par la méthode ASTM D1816

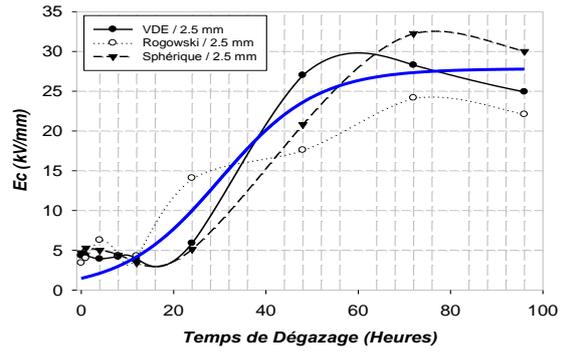


Figure 8 : Influence de la géométrie des électrodes sur la rigidité diélectrique des EMHP par la méthode CEI 60156

La **Figure 9** montre le comportement de la tenue diélectrique des EMHP en fonction de la distance inter-électrodes. On observe un accroissement significatif de la tension de claquage des échantillons en fonction du temps de dégazage et de la distance inter-électrodes. Les mêmes comportements ont été observés par les auteurs [2, 4]. Ces résultats démontrent la tenue diélectrique des EMHP atteint un seuil éligible aux applications escomptées à partir de 48 heures de dégazage où elle est de 52 kV environ pour des électrodes sphériques distantes de 2,5 mm. En outre il apparaît que la rigidité diélectrique diminue avec la distance inter-électrodes. Pour nos échantillons à base d'huile de palmistes, nous obtenons une variation de 266 kV / cm pour 1 mm à 174 kV / cm pour 4 mm telle que l'illustre la **Figure 10**. Plus encore, cette dernière établit une comparaison entre la rigidité diélectrique de l'huile de palmistes brute et celle de ses esters méthyliques. Ces résultats laissent donc transparaître l'apport du conditionnement dans l'amélioration de la rigidité diélectrique du prototype expérimental soit un changement de 50 kV / cm à 250 / cm environ. Il est important de remarquer que la rigidité diélectrique des EMHP dégazés pendant 72 heures est au-dessus de celle de certaines huiles minérales ≈ 26 kV / mm [1, 5, 7, 9, 14].

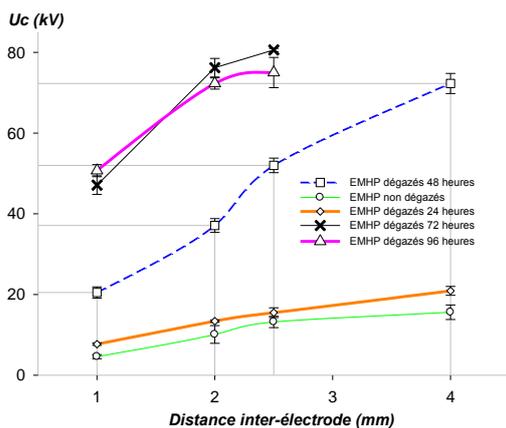


Figure 9 : Variation de la rigidité diélectrique des EMHP par rapport à la distance inter-électrode

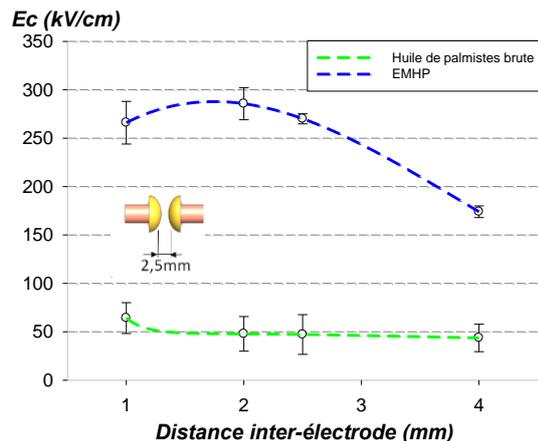


Figure 10 : Influence des traitements et de la distance inter-électrode sur la rigidité de l'huile de palmistes brute et des EMHP

4. Conclusion

Ce travail a permis de mener une investigation sur l'analyse de la rigidité diélectrique de l'huile de palmistes conditionnée à la température ambiante et à la pression atmosphérique. Les mesures ont été effectuées suivant les méthodes des normes CEI 60156 et ASTM D1816. Les résultats expérimentaux montrent que :

- les opérations, de transestérification (élimination du glycérol) et de dégazage (élimination des particules d'eau dissoute, de solides et gaz résiduels) contribuent successivement à accroître la tension de claquage et la rigidité diélectrique des esters naturels d'huile de palmistes ;
- La teneur en eau des échantillons d'EMHP affecte de façon très significative leur rigidité diélectrique. Le temps de traitement y afférant dépend à cet effet de l'état de séchage des échantillons considérés ;
- La rigidité diélectrique est influencée par la géométrie et l'état de la surface des électrodes, la rampe de tension, la distance inter-électrode mais surtout des impuretés se trouvant dans les échantillons d'EMHP et dont la présence ne peut jamais être totalement éliminée ;
- Au bout de 72 heures de traitement, l'humidité relative des échantillons d'EMHP chute de 33,6 % à 14,8 % inversement à leur rigidité diélectrique qui s'améliore de 5,78 kV / mm à 28,28 kV / mm et devient comparable à celle de l'huile végétale homologuée FR3.

Bien que la rigidité diélectrique des échantillons d'huile de palmistes conditionnée soit rassurante, des investigations supplémentaires restent à approfondir pour l'apprécier comme huile isolante telles que : l'analyse des phénomènes de décharges partielles et des pertes diélectriques, l'analyse du vieillissement des prototypes d'EMHP, la maîtrise des teneurs en eau, en particules solides et en gaz dissous, l'interfaçage complexe EMHP / papier kraft, les propriétés thermiques, etc. Voilà autant de propriétés des EMHP encore mal connues et à explorer pour valider l'hypothèse d'une alternative de remplacement des huiles minérales destinées à l'isolation de certains équipements en haute tension.

Références

- [1] - X. WANG, "Partial discharge behaviors and breakdown mechanisms of ester transformer liquids under ac stress", thesis PhD, University of Manchester. USA, (2011).
- [2] - Z. D. WANG et al., "Ester Insulating Liquids for Power Transformers, Conseil International des Grands Réseaux Électriques", CIGRE A2-209, (2012).
- [3] - D. S. ROESSER et al., "Natural esters: Redefining transformers". Electricity and Control SPOT ON, (2015).
- [4] - R. LIAO, J. HAO1, G. CHEN, Z. MA1 and L. YANG1RUIJIN, "A Comparative Study of Physicochemical, Dielectric and Thermal Properties of Pressboard Insulation Impregnated with Natural Ester and Mineral Oil". IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, N°5 (2011) 1626 - 1637.
- [5] - A. A. ABDELMALIK, J. FOTHERGILL and S. J. DODD, "Electrical conduction and dielectric breakdown characteristics of alkyl ester dielectric fluids obtained from palm kernel oil". IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 19, N°5 (2012) 1623 - 1632.
- [6] - K. AZMI, A. AHMAD, M. KAMAROL, "Study of Dielectric Properties of a Potential RBD Palm Oil and RBD Soybean Oil Mixture as Insulating Liquid in Transformer". J Electr Eng Technol, (2015) 2105 - 2119.
- [7] - A. A. ABDELMALIK, J. FOTHERGILL and S. J. DODD, "Electrical breakdown strength characteristics of palm kernel oil ester-based dielectric fluids". Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. CEIDP, (2011) 183 - 186.

- [8] - G. MENGATA MENGOUNOU, A. IMANO MOUKENGUE et J. C. VARDAMIDES, "Caractérisation physico-chimique de l'huile de palmistes pour utilisation dans les transformateurs de distribution", *Afrique science*, Vol. 11, N°6 (2015) 105 - 114.
- [9] - Y. BERTRAND et P. LAUZEVIS, "Development of a low viscosity insulating liquid based on natural esters for distribution transformers". 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm, (2013).
- [10] - YI JING et al., "Dielectric Properties of Natural Ester, Synthetic Ester Midel 7131 and Mineral Oil". Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Strathclyde, (2013).
- [11] - J. HAJEK, "Considerations for the Design, Manufacture, and Retro - filling of Power Transformers with High Fire Point, Biodegradable Ester Fluids". Conseil International des Grands Réseaux Électriques CIGRE, (2012).
- [12] - P. ROZGA, "Properties of new environmentally friendly biodegradable insulating fluids for power transformers". 1st Annual International Interdisciplinary Conference, AIIC, (2013) 24 - 26.
- [13] - S. M. BASHII, U. ABDULLAHI, R. YUNUS and A. NORDIN, "Use Of Natural Vegetable Oils As Alternative Dielectric Transformer Coolants". *Journal - The Institution of Engineers, Malaysia*, Vol. 67, N°2 (2006).
- [14] - R. FROTSCHER et al, "Behaviour of Ester Liquids under Dielectric and Thermal Stress - From Laboratory Testing to Practical Use". Conseil International des Grands Réseaux Électriques, CIGRE D1-105, (2012).