

Etude des phénomènes de pré-claquage et claquage de l'huile végétale à base de *Jatropha Curcas* comme substitut à l'huile minérale dans les équipements électriques haute tension

Henry B.H. Sitorus^{1,2,3}, Abderrahmane Beroual¹, Rudy Setiabudy², Setijo Bismo²

1. Ecole Centrale de Lyon, University of Lyon, Ampere CNRS UMR 5005, 36 avenue Guy Collongue, 69134 Ecully, France
2. Engineering Faculty, Universitas Indonesia (UI), Depok, Indonesia
3. Electrical Engineering Department, Engineering Faculty, Universitas Lampung (Unila), Bandar Lampung, Indonesia
hbh_sitorus@unila.ac.id

RESUME - Cet article porte sur une étude comparative d'une huile végétale à base de *jatropha curcas* (VO) et de l'huile minérale (MO) sur la base des tensions de claquage et des caractéristiques de génération et de propagation des streamers qui s'y développent. Nous montrons que les tensions de claquage de ce produit naturel et de l'huile minérale, déterminées selon la norme CEI 60156 et CEI 60897 en alternatif, continue et impulsionnel (choc foudre 1,2/50 μ s) sont très proches. Aussi, les longueurs finales des streamers dans ces deux huiles, mesurées en géométrie pointe – plan sous tensions impulsionnelle, sont également similaires.

Mots-clés—*huile de jatropha curcas; huile minérale ; tension de claquage ; le motif et la longueur final de streamers*

1. INTRODUCTION

L'huile minérale est largement utilisée dans l'industrie électrique en particulier dans les transformateurs de puissance. Elle présente une rigidité diélectrique élevée, une bonne stabilité à l'oxydation et une faible viscosité. Cette dernière caractéristique est importante pour le transfert de chaleur (refroidissement des bobinages). Cependant, l'huile minérale est issue du pétrole et donc d'une source non renouvelable. De plus, les huiles minérales sont peu biodégradables ; il leur faut beaucoup de temps pour se décomposer dans le sol. Le niveau de biodégradabilité de l'huile minérale est pas inférieur à 30% en 21 jours alors que celle de l'huile végétale atteint 97% pour la même période [1]. Par conséquent, il est impératif de trouver d'autres huiles de remplacement dans les transformateurs de puissance. Depuis une vingtaine d'années, les recherches se sont orientées vers les huiles végétales issues de graines de colza et de tournesol, de pépins de raisin, de soja, de palme et autres pour remplacer l'huile minérale dans les transformateurs.

C'est ainsi qu'on assiste au remplacement progressif de l'huile minérale par des huiles végétales dans les transformateurs de distribution. Parmi ces huiles, BIOTEMP®, fluide issu d'huiles riches en acide oléique, breveté aux

États-Unis par la société ABB en septembre 1999. Ce fluide est actuellement utilisé dans certains transformateurs de distribution et de réseau dans les zones critiques [2,3]. Un autre fluide à base de soja a été également breveté aux États-Unis en septembre 1999 par Waverly Light & Power dans l'Iowa [4] ; ce produit est aussi utilisé pour le remplissage de certaines unités.

La plupart des huiles végétales actuelles sont dérivées de produits alimentaires [1–7], ce qui dans le temps risque de générer de nouveaux problèmes d'ordre humanitaire et éthique. Il est donc nécessaire de trouver d'autres produits à moindre impact sur les ressources alimentaires. L'huile végétale de *jatropha curcas* en est un. Celle-ci est issue de graines de *jatropha curcas*, graines non alimentaires. Ces plantes sont très abondantes en Indonésie et peuvent être cultivées sur tous les types de sol même pauvres et arides.

Dans cet article, nous nous intéressons aux potentialités de l'huile végétale à base de *jatropha curcas* en tant que fluide de remplacement de l'huile minérale dans les transformateurs de puissance. Nous nous étudierons plus particulièrement la rigidité diélectrique de cette huile végétale et comparons ses caractéristiques à celles de l'huile minérale (MO) sous tensions alternative (AC), continue (DC) et choc de foudre. Nous comparons par la suite la morphologie et la longueur d'arrêt (ou finale) des streamers dans les deux types de l'huile sous tension impulsionnelle (choc de foudre).

2. TECHNIQUE EXPERIMENTALE

2.1. Propriétés Physico-Chimiques

Les propriétés physico-chimiques de l'huile à base de *jatropha curcas* (VO) ne sont pas éloignées de celles de l'huile minérale (MO), et répondent aux exigences de la norme IEEE C57.147 [11] à l'exception de l'acidité qui est légèrement supérieure à celle requise par la norme, soit 0,0708 mg de KOH/g au lieu de 0,06 g de KOH/g maximum. Aussi, pour répondre aux

exigences de la norme du point de vue de l'humidité, nous avons procédé au séchage de l'huile végétale, l'humidité initiale de cette dernière étant de 1159,78 ppm. Pour ce faire, nous avons choisi un processus d'absorption/séchage à l'aide de Tamis Moléculaires 3A. Selon la norme IEEE 637, plusieurs types de matériaux peuvent être utilisés comme adsorbant ; on peut citer la terre de foulon, l'attapulgite, l'alumine activée et les tamis moléculaires [12]. Ce processus nous a permis de réduire considérablement l'humidité et d'avoir des valeurs entre 60 et 75 ppm. Selon la norme IEEE C.57.147, l'humidité maximale est de 300 ppm pour des nouveaux équipements soumis à une tension inférieure à 69 kV. Elle est de 150 ppm pour les équipements soumis à des tensions de 69 kV à 230 kV ; et 100 ppm pour des tensions supérieures à 230 kV.

2.2. Mesure de la tension claquage

La mesure de la tension claquage est effectuée sous les trois types de tension (alternative, continue et impulsionnelle (choc de foudre)) en utilisant une cellule standard de 400 ml de volume. Le système d'électrodes est constitué de deux électrodes sphériques en laiton de 12,5 mm de diamètre ; l'intervalle inter électrodes étant de $2,5 \pm 0,05$ mm. Les électrodes sont nettoyées et traitées avant les tests selon la norme CEI 60156.

La tension alternative est fournie par un transformateur d'essai haute tension de 200 kV - 50 Hz - 60 kVA (type Hipotronic) connecté à un diviseur de tension capacitif de rapport 1:10000. La mesure de la tension claquage est réalisée selon la norme CEI 60156 [10]. La tension est augmentée progressivement avec une vitesse de montée de $2 \pm 0,2$ kV/s jusqu'au claquage. Les mesures de tension sont visualisées à l'aide d'un oscilloscope de type Maxtron 60 MHz. Pour une évaluation fiable de la tension de claquage, une série de 40 mesures est effectuée sur chaque type d'huile. La norme CEI 60156 n'exige que 24 mesures.

Pour ce qui est de la tension continue (DC), elle est fournie par un générateur continu de type Spellman 200 kV - 2 mA. La méthode utilisée pour déterminer la tension de claquage est celle préconisant d'augmenter la tension appliquée par paliers, jusqu'à ce que le claquage se produise. Dans la gamme 0 - 40 kV, la tension est appliquée par palier de 5 kV. Chaque niveau de tension appliquée est maintenu pendant 60 secondes. Au-dessus de 40 kV, la tension est augmentée par palier de 2 kV pour avoir une meilleure précision.

Les essais en tension de choc de foudre standard ($1,2\mu s \pm 30\%$ / $50\mu s \pm 20\%$) sont exécutés selon la norme CEI 60897 [11]. La tension est fournie par un générateur de Marx 200 kV - 2 kJ. La tension de claquage $V_{50\%}$ est déterminée par la méthode montée et descente (*up and down*) [12] sur une série de 50 à 100 chocs. Le temps de repos entre deux chocs successifs est de 90 secondes.

2.3. Caractérisation des streamers

Le dispositif expérimental utilisé pour l'étude de propagation des streamers est représenté sur la figure 1. Il est constitué d'une cellule d'essais contenant le liquide et le système d'électrode pointe – plan, de la source de tension et du

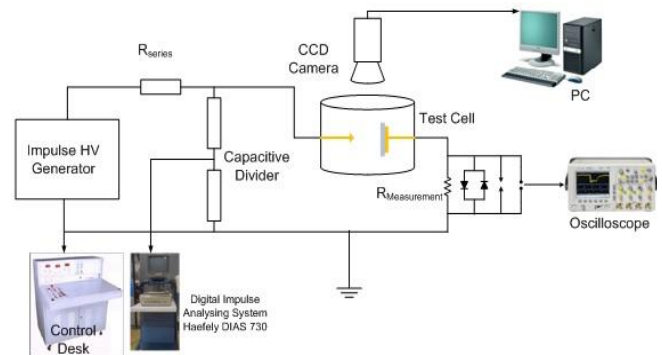


Fig. 1. Dispositif expérimental

diviseur associé, et du système de visualisation des streamers (forme et longueur d'arrêt).

La cellule d'essai est constituée d'un corps cylindrique en Téflon de 112 mm de diamètre interne et de 80 mm de hauteur. Elle est munie de deux couvercles transparents en plexiglas servant à la visualisation des streamers.

Le système d'électrodes utilisé est un système pointe – plan. L'électrode pointe est en tungstène de 15 μm de rayon de courbure. L'électrode plane est un disque en laiton de 40 mm de diamètre ; cette dernière est recouverte par une barrière isolante en Téflon de 4 mm d'épaisseur pour éviter un claquage et protéger ainsi l'entrée de l'oscilloscope. Trois distances inter électrodes sont considérées: 20, 25 et 30 mm.

Les mesures ont été réalisées sous tension de foudre, fournie par le même générateur décrit précédemment. La valeur de la longueur d'arrêt des streamers représente une moyenne de cinq mesures.

Le système de visualisation est constitué d'une caméra CCD de type SVGA "SONY XC-HR58" de haute résolution (767x580 pixels), installé au-dessus du couvercle supérieur de la cellule d'essai. La capture d'images est contrôlée par ordinateur via une carte vidéo Meteor-II/Multichannel à une vitesse de 50 images/seconde.

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1. Tension de claquage

La figure 2 montre la variation de la tension de claquage en tension alternative de l'huile végétale à base de jatropha curcas VO-BT avant le traitement (séchage) et VO-AT après le traitement, et de l'huile minérale MO sur une série de 40 mesures. Les teneurs en eau de l'huile végétale avant séchage (VO-BT) et après séchage (VO-AT) sont respectivement de 1159,78 ppm et 64,91 ppm. La tension de claquage moyenne de VO-BT, VO-AT et MO est de 42,55, 87 et 78,5 kV respectivement. On remarque que le processus du séchage permet d'améliorer considérablement la rigidité diélectrique de VO : la tension de claquage de VO-BT augmente de plus de 100%. Les résultats obtenus montrent également que la tension de claquage de VO-AT est légèrement supérieure à celle d'huile minérale. Ainsi, l'huile végétale à base de jatropha curcas (VO) présente des caractéristiques permettant

de la considérer comme candidat potentiel pour remplacer l'huile minérale dans les équipements électriques haute tension.

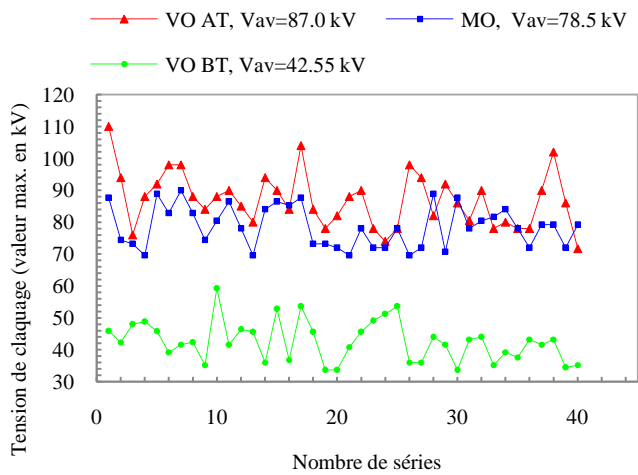


Fig. 2. Distribution de la tension de claquage des huiles VO-BT, VO-AT et MO en tension alternative (AC)

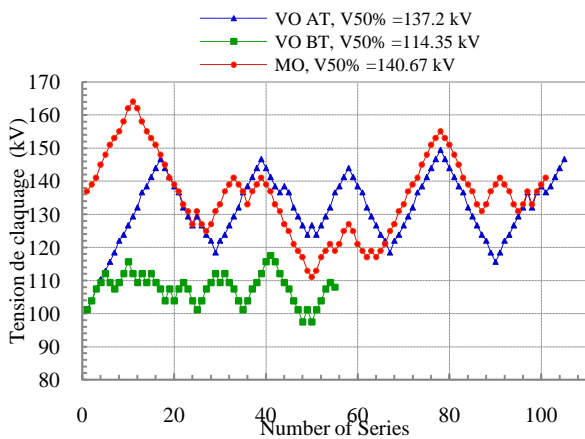


Fig. 3. Tension de claquage des huiles VO et MO en choc foudre

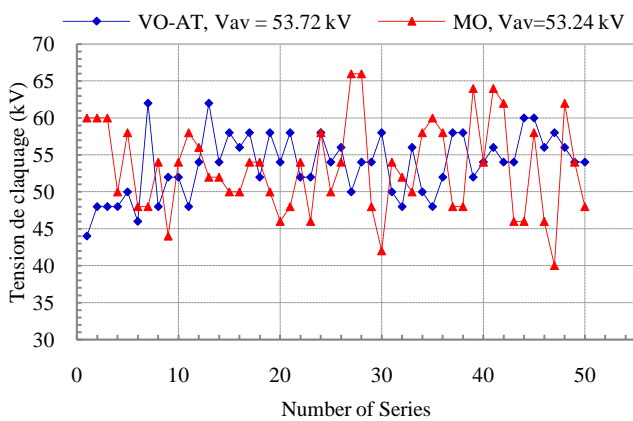


Fig. 4. Tension claquage des huiles VO-AT et MO en tension continue (DC)

De même, la tension de claquage de VO-BT sous tension de foudre est inférieure à celle de la VO-AT. Elle est de 114.35 kV avant traitement alors qu'elle est de 137,2 kV après

traitement. Cette dernière est proche à celle de l'huile minérale (140,67 kV). Les distributions de la tension de claquage en choc de foudre des huiles considérées (VO-BT, VO-AT, et MO) sont données en figure 3.

La figure 4 montre la distribution statistique de la tension de claquage de VO après traitement et MO sous tension continue. Les tensions de claquage moyennes obtenues avec les deux types d'huile VO-AT et MO sous tension continue sont similaires à savoir 53,72 kV et 53,24 kV respectivement.

Il ressort des résultats ci-dessus que les tenues diélectriques en tension alternative, choc de foudre et continue de VO-AT et de MO sont très proches. Dans le cas de la tension alternative, on observe même une tension de claquage avec VO-AT supérieure à celle avec MO.

3.2. Caractérisation des streamers

3.2.1. La forme des Streamers

Les figures 5 et 6 montrent des exemples de streamers positifs et négatifs se propageant dans les huiles VO-AT et MO à différentes valeurs de la tension.

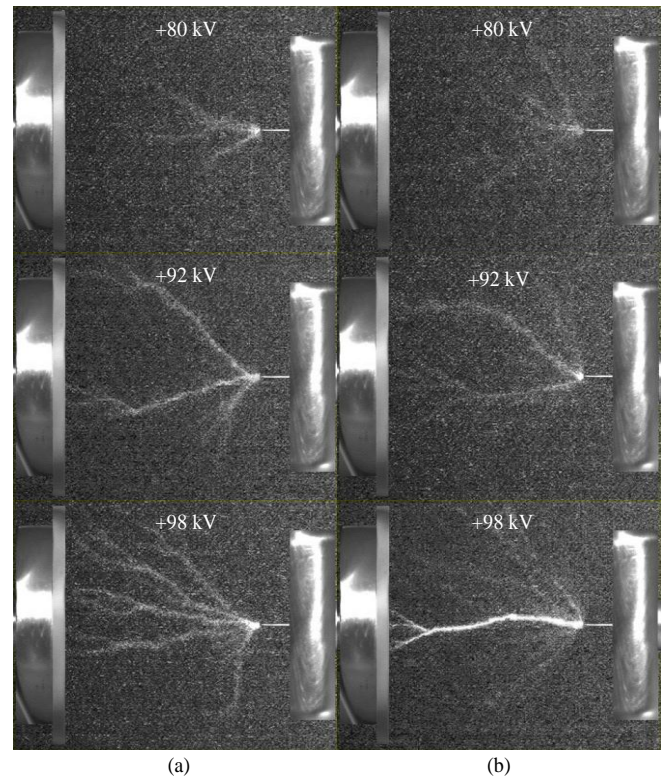


Fig. 5. Exemples de streamers dans VO-AT (a) et MO (b) sous tension de choc de foudre positive, $d = 30$ mm

Nous remarquons que dans les deux huiles, les streamers négatifs sont généralement plus lumineux que les streamers positifs. Ces formes sont similaires à celles observées par d'autres auteurs [13]. Les streamers négatifs dans MO sont plus filamentaires et lumineux que ceux dans VO-AT. Le début des ramifications des branches de streamers est également différent. Pour une polarité négative, la ramification des branches secondaires dans l'huile végétale apparaît juste au

début de la propagation alors que dans l'huile minérale, les ramifications apparaissent au niveau de la tête du streamer.

Il n'y a aucune différence évidente entre les formes des streamers positifs dans les deux huiles. Néanmoins les branches dans MO sont moins lumineuses que celles dans VO-AT. La grande luminosité du streamer témoigne d'une intense activité d'ionisation. Une fois que le streamer ait atteint le plan, le canal devient plus lumineux (conducteur), comme le montre la figure 3b dans le cas de l'huile minérale sous une tension de 98 kV. Les streamers positifs dans les deux huiles ont des formes similaires à celles observées par N.V. Dung et al [14].

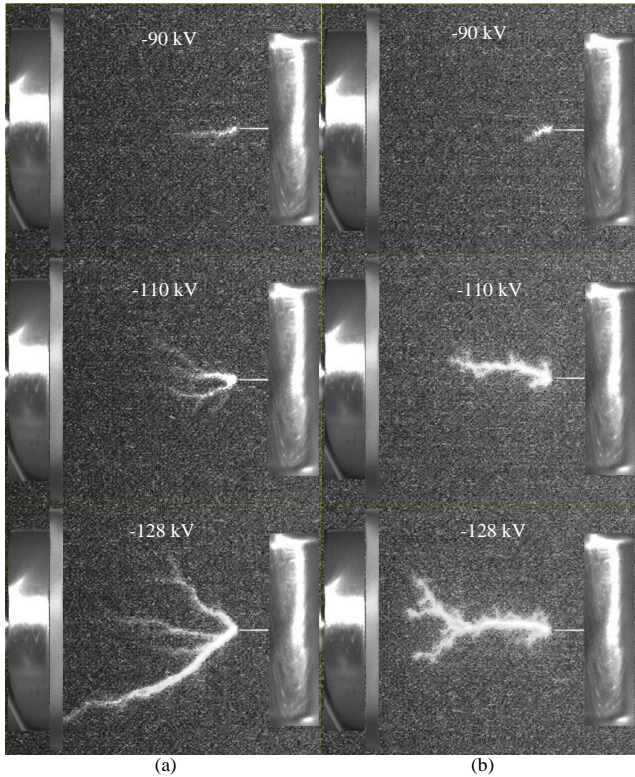


Fig. 6. Exemples de streamers dans VO-AT (a) and MO (b) sous tension de choc de foudre négative, $d = 30$ mm

3.2.2. Longueur d'arrêt des streamers

Les figures 7 et 8 montrent la variation de la longueur d'arrêt des streamers (L_f) dans VO-AT et MO. Chaque point de la figure représente une moyenne de cinq essais. On remarque que L_f augmente avec la tension, et elle est légèrement plus longue avec VO-AT qu'avec MO.

A partir des caractéristiques $L_f(U)$, on peut estimer le champ longitudinal moyen E_l dans le canal du streamer : $E_l = \Delta U / \Delta L_f$ (ΔU étant la chute de tension correspondante à une longueur finale du streamer ΔL_f). A titre d'exemple, pour une distance entre des électrodes de 30 mm, E_l estimé est d'environ 14 kV/cm pour les streamers positifs et 18 kV/cm pour streamers négatifs pour les deux liquides. Ainsi, les streamers positifs sont légèrement plus conducteurs et seront donc légèrement plus rapides que les négatifs confirmant ainsi les résultats rapportés par ailleurs [15–18].

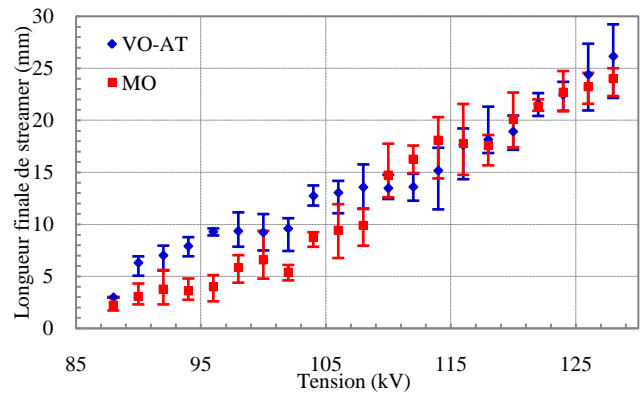


Fig. 7. Longueur finale de streamers dans VO-AT et MO avec une distance inter électrodes de 30 mm, sous tension de choc de foudre négative

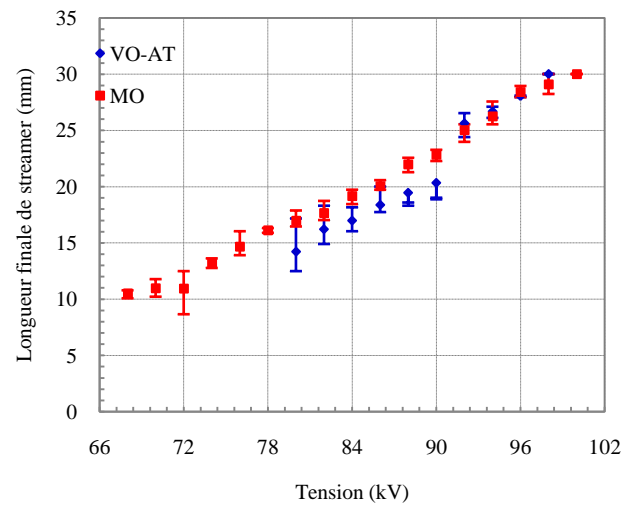


Fig. 8. Longueur finale des streamers dans VO-AT et MO avec une distance inter électrodes de 30 mm, sous tension de choc de foudre positive

4. CONCLUSIONS

Ce travail montre que : (1) les tensions de claquage sous les trois types de tensions AC, DC et impulsionnelle de l'huile végétale à base de jatropha curcas et de l'huile minérale sont très proches ; et (2) les caractéristiques optiques des streamers (forme et longueur d'arrêt) dans les deux huiles sont similaires. Par conséquent, l'huile végétale à base de jatropha curcas constitue un fluide potentiel de remplacement de l'huile minérale dans les transformateurs de puissance.

5. REFERENCES

- [1] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, and J. T. Mullen, « Biodegradable electrical insulation fluids », IEEE Conference on Electrical Insulation and Electrical Manufacturing Coil Winding, Rosemont, Illinois, USA, pp. 465 – 468, Sep. 1997.
- [2] C. P. McShane, « Natural and synthetic ester dielectric fluids: their relative environmental, fire safety, and electrical performance », IEEE Conference on Industrial and Commercial Power Systems Technical, Sparks, Nevada, USA, 1999.
- [3] C. P. McShane, « New dielectric coolant concepts for distribution and power transformers », Conference on Industry Technical, Seattle Washington, USA, pp. 55 – 62, 1999.

- [4] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, E. J. Walsh, and J. P. Baker, « A new vegetable oil based transformer fluid: development and verification », IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Victoria, BC, Canada, pp. 308 – 312 vol.1, 2000.
- [5] T. V. Oommen, « Vegetable oils for liquid-filled transformers », IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 6 – 11, Feb. 2002.
- [6] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, and E. J. Walsh, « Introduction of a new fully biodegradable dielectric fluid », IEEE Conference on Textile, Fiber and Film Industry Technical, North Carolina, USA, pp. 3/1 – 3/4, 1998.
- [7] C. P. McShane, « Vegetable-oil-based dielectric coolants », IEEE Industry Applications Magazine, pp. 34 – 41, Jun-2002.
- [8] IEEE Standard C57.147, « IEEE Guide for Acceptance and Maintenance of Natural Ester Fluids in Transformers ».
- [9] IEEE Standard 637, « IEEE Guide for the Reclamation of Insulating Oil and Criteria for Its Use ».
- [10] IEC 60156 Standard, « Insulating Liquids – Determination of the Breakdown Voltage at Power Frequency – Test Method ».
- [11] IEC 60897 Standard, « Method for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids ».
- [12] W. J. Dixon and A. M. Mood, « A Method for Obtaining and Analyzing Sensitivity Data », Am. Stat. Assoc., vol. Vol. 43, No. 241, pp. 109 – 126, Mar. 1948.
- [13] V.-H. Dang, A. Beroual, and C. Perrier, « Comparative study of streamer phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage », International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), New Orleans, Louisiana, USA, pp. 560 – 563, 2010.
- [14] N. V. Dung, H. K. Hoidalén, D. Linhjell, L. E. Lundgaard, and M. Unge, « A study on positive streamer channels in Marcol Oil », IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Montréal, Québec, CANADA, pp. 365 – 370, 2012.
- [15] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A. J. Schwabe, H. Yamashita, K. Yamazawa, M. Danikas, W. D. Chadband, and Y. Torshin, « Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics », IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 6 – 17, Apr. 1998.
- [16] E. F. Kelley and R. E. H. Jr, « The electric field distribution associated with prebreakdown phenomena in nitrobenzene », J. Appl. Phys., vol. 52, no. 1, pp. 191 – 195, Jan. 1981.
- [17] A. Beroual, « Electronic and gaseous processes in the prebreakdown phenomena of dielectric liquids », J. Appl. Phys., vol. 73, no. 9, pp. 4528 – 4533, May 1993.
- [18] A. Beroual and R. Tobazeon, « Prebreakdown Phenomena in Liquid Dielectrics », IEEE Transaction on Electrical Insulation, vol. EI-21, no. 4, pp. 613 – 627, Aug. 1986.