

Etude Comparative de la Conduction Electrique dans Différents Liquides Diélectriques

L. HEROUS * et M. NEMAMCHA **

* - Université Badji Mokhtar ANNABA

** - Centre Universitaire 8 mai 45 GUELMA

Résumé

Tout liquide isolant soumis à une tension croissante est traversé par un courant qui croît fortement avec la tension jusqu'au claquage.

La conduction électrique des liquides non polaires très purs aux champs très intenses dans une géométrie pointe / plan en polarité négative se manifeste par un régime d'impulsions de courant observé à une tension de seuil V_s . Ce régime s'explique par une avalanche électronique en phase liquide dans la zone de champ intense près de la pointe. Dans une tentative de mieux comprendre l'évolution de ce phénomène, notre travail consiste à étudier les caractéristiques courant / tension pour les différents types de diélectriques liquides et clarifier l'influence de divers paramètres sur l'apparition et l'évolution de l'impulsion de courant pour des rayons de pointe supérieure à $0,5\mu\text{m}$.

Les diélectriques liquides ont été groupés en 3 familles. L'étude comparative a montré que qualitativement ce phénomène évolue d'une manière identique pour les 3 familles de liquides, cependant si nous examinons de plus près nos résultats, les propriétés physiques et électriques pour chaque famille amènent à des différences qu'il faut souligner.

Introduction

Les isolants liquides sont généralement utilisés en combinaison avec un diélectrique solide. Ils sont utilisés dans l'industrie des câbles et des condensateurs comme imprégnants solide. Ils ont pour rôle de se substituer aux vacuoles d'air qui sont sources de décharges partielles. Dans les appareils à haute tension, ils sont utilisés pour améliorer le pouvoir de coupure de certains appareils électriques par l'amélioration des conditions d'extinction de l'arc électrique et assurer une bonne isolation et un bon refroidissement (transformateur de distribution, etc...). Ils ont l'avantage d'être fluides, facilement renouvelables et possèdent une bonne rigidité diélectrique.

L'expérience a toujours montré que tout liquide isolant soumis à une tension croissante passe par un certain nombre de processus transitoires qui conduisent généralement au claquage. De nombreuses études ont été effectuées sur les phénomènes qui se développent dans les diélectriques liquides lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique intense.

Actuellement, on considère qu'avant le claquage, il existe une période de préclaquage qui comprend deux phases : Une phase de génération au cours de laquelle différents phénomènes se développent :

instabilité de courant, émission de lumière, émission d'ondes de choc et formation d'une phase gazeuse. Une phase de propagation où la phase gazeuse se développe et se transforme en un streamer d'une électrode à l'autre. Ces processus fondamentaux conduisant au claquage sont d'une grande complexité et sont dans leur majeure partie encore mal connus.

Ainsi, plusieurs travaux ont été effectués dans le but de mieux comprendre l'évolution de ces processus. Des investigations ont été faites sur différents liquides de différentes propriétés physiques et électriques.

Notre travail consiste à faire une étude comparative de l'influence de différents paramètres sur l'apparition et l'évolution de l'instabilité du courant dans différents liquides diélectriques.

Liquides diélectriques

Dans notre travail, nous avons regroupé les liquides diélectriques en trois (3) familles. Les hydrocarbures qui sont classés selon leur structure atomique en liquides Aliphatiques (cyclohexane, n-pentane, n-decane...) et liquides Aromatiques (toluène, benzyltoluène ...) ainsi que les fluides cryogéniques (Azote, Argon ...). Il est important de noter que lors de notre étude, nous avons constaté que les travaux sur la conduction électrique dans les liquides Aromatiques restent peu nombreux. Ceci est certainement dû à la difficulté du point de vue

technique à purifier ces liquides. Ce sont des liquides de pureté très réduite par rapport aux autres liquides.

Conduction électrique

La compréhension de la conduction électrique dans les différents liquides diélectriques en champ électrique très intense, permet d'une part de comprendre la nature des porteurs de charges (ions, électrons) ainsi que leurs mécanismes de génération et leur influence sur l'initiation du phénomène de prérupture (bulle et streamer) et éventuellement le claquage. Sur les figures 1,2,3, nous avons représenté les différentes caractéristiques courant/ tension [1,2,3,4] dans différents liquides diélectriques appartenant aux trois familles de liquides. Pour faire une étude comparative, on a jugé utile de considérer la caractéristique courant/ tension définie par trois (3) zones principales par rapport à la tension seuil V_s à laquelle apparaît le saut de courant :

- zone à faible courant $V < V_s$
- zone à courant impulsionnel $V = V_s$
- zone à fort courant $V > V_s$

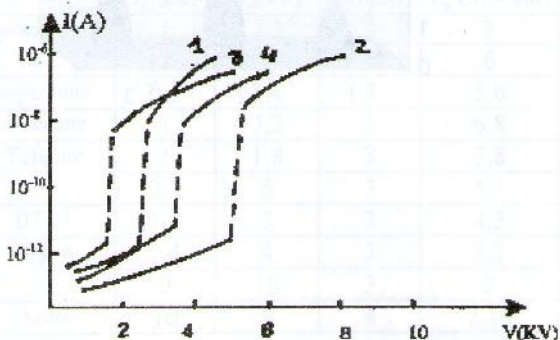


Fig.1 Caractéristique courant/tension des Liquides Aliphatiques ($T \approx 20^\circ C$) : 1-cyclohexane ($r_p = 1 \mu m$), 2-cyclohexane ($r_p = 2 \mu m$) 3-n-pentane ($r_p = 0,5 \mu m$), 4-n-decane ($r_p = 1 \mu m$)

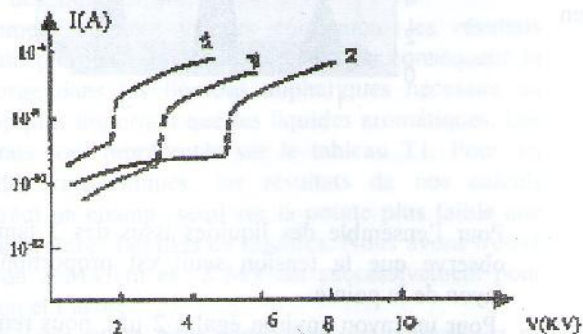


Fig.2 Caractéristiques courant/tension des liquides Aromatiques ($T \approx 20^\circ C$) : 1-Toluène ($r_p = 1 \mu m$), 2-toluène ($r_p = 2,2 \mu m$), 3-B'IOI ($r_p = 1,5 \mu m$)

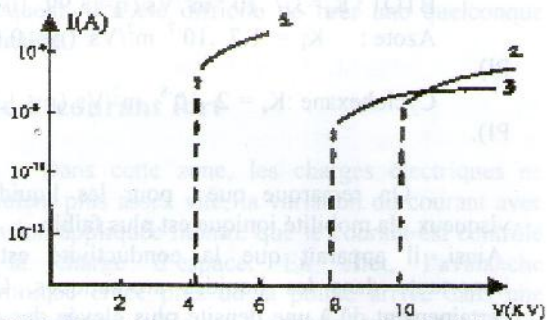


Fig.3 Caractéristiques courant/tension des liquides Cryogéniques : 1-Argon ($T=85K, r_p=2,4 \mu m$), 2-Argon ($r_p=9 \mu m$), 3-Azote ($T=83K, r_p=10 \mu m$)

Zone à faible courant

Dans cette zone, il apparaît pour tous les liquides un faible courant caractérisé par une certaine stabilité. Ces courants sont généralement appelés courants résiduels. Leurs intensités diffèrent d'un liquide à un autre. Pour les liquides cryogéniques, il n'apparaît aucun courant résiduel. Si un courant existe, sa valeur sera très faible ($< 10^{-14}$ A). Les valeurs relevées dans les deux autres familles sont plus importantes. Ainsi, à travers les liquides Aromatiques, elles sont de l'ordre de 10^{-8} à 10^{-10} A, et de 10^{-12} A dans les liquides Aliphatiques. Les ordres de grandeurs de ces courants résiduels sont représentés sur la figure.4.

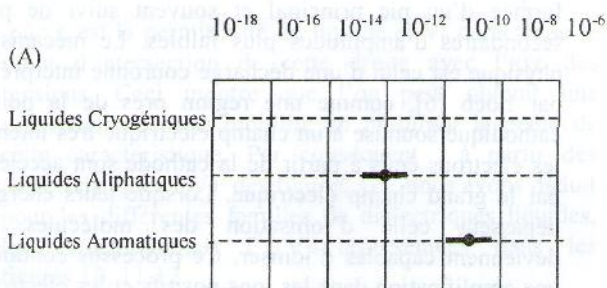


Fig.4 Courants résiduels dans les 3 Familles de liquides.

La différence du niveau de ces courants dépend du nombre et de la nature des pièges qui en captant les électrons forment des ions négatifs. Les capteurs peuvent être un gaz dissous, une substance liquide ou un solide. Dans les liquides de pureté moyenne (liquides aromatiques) et en particulier dans les liquides utilisés dans la pratique industrielle, la conduction ionique étant plus élevée donnant ainsi une plus grande conductivité. Selon la loi de Walden [5], la mobilité ionique définie par K_i varie en raison inverse de la viscosité. Par exemple, pour les liquides :

BTO1 : $K_i = 3,7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{Vs}$ ($\eta = 3,99 \cdot 10^{-3} \text{ PI}$).

Azote : $K_i = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{Vs}$ ($\eta = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ PI}$).

Cyclohexane : $K_i = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{Vs}$ ($\eta = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ PI}$).

On remarque que pour les liquides plus visqueux, la mobilité ionique est plus faible.

Ainsi, il apparaît que la conductivité est plus importante dans les liquides aromatiques. Ceci est certainement dû à une densité plus élevée des porteurs de charges qui sont généralement des impuretés.

En conclusion, nous constatons dans cette zone que les phénomènes physiques observés sont qualitativement les mêmes pour les différentes familles de liquides et que seules les valeurs quantitatives des courants diffèrent selon la nature du liquide.

Zone de courant impulsionnel

Cette zone est caractérisée par une forte instabilité du courant. Selon les différentes caractéristiques $I(V)$, il apparaît qu'en augmentant progressivement la tension, on arrive dans cette zone où le courant subit un saut brusque à une tension définie comme tension de seuil V_s .

Dans notre étude, nous pouvons dire dans un premier temps que cette instabilité est observée dans les trois familles de liquides. Par conséquent, les mécanismes précurseurs du développement de ce phénomène sont physiquement identiques. En effet, ce saut brutal est défini comme une impulsion de courant très brève formée d'un pic principal et souvent suivi de pics secondaires d'amplitudes plus faibles. Le mécanisme physique est celui d'une décharge couronne interprétée par Loeb [6], comme une région près de la pointe cathodique soumise à un champ électrique très intense, les électrons émis à partir de la cathode sont accélérés par le grand champ électrique. Lorsque leurs énergies dépassent celle d'ionisation des molécules, ils deviennent capables d'ioniser. Ce processus conduit à une amplification dans les ions positifs et les électrons, en d'autres termes, une avalanche électronique en phase liquide.

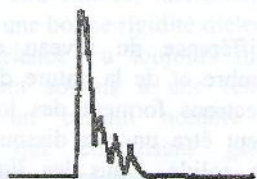
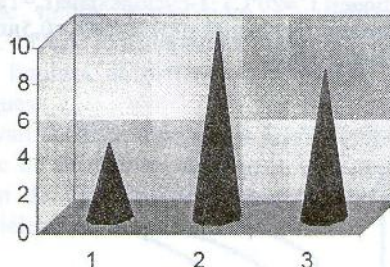
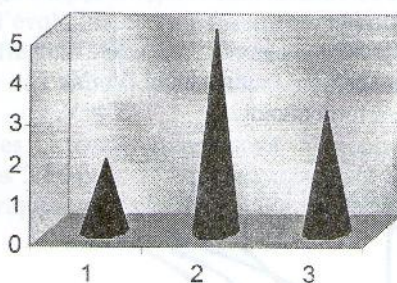
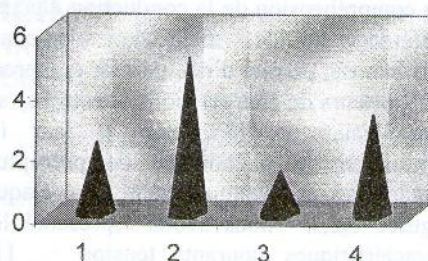


Fig.5 Impulsion de courant : Cyclohexane[7]

Pour les différents liquides que nous avons étudiés, nous avons noté que la tension d'apparition de cette instabilité est différente. Elle dépend d'une part du rayon de courbure de la pointe r_p et d'autre part des propriétés physiques et électriques des différents liquides Fig.6, 7,8.



Pour l'ensemble des liquides issus des 3 familles, on observe que la tension seuil est proportionnelle au rayon de la pointe.

Pour un rayon environ égal à $2 \mu\text{m}$, nous remarquons que l'impulsion de courant apparaît dans l'argon à des niveaux de tension seuil plus faibles que dans les liquides aliphatiques et aromatiques comme nous le montrons sur le tableau 1.

Dans l'approximation hyperboloïde/plan [7], l'expression qui donne la valeur du champ électrique

sur l'axe du système dont l'origine se trouve à l'extrémité de la pointe est :

$$E(X) = \frac{2d \cdot V_s}{\ln \frac{4d}{r_p} (2xd + dr_p - x^2)}$$

Où : d : est la distance inter électrode

x : distance axiale mesurée à partir du bout. A x=0, le champ seuil sur la pointe sera égal à :

$$E_p^s = \frac{2 V_s}{r_p \ln \frac{4 d}{r_p}}$$

Cette expression est celle que nous allons employer pour l'estimation du champ électrique à partir des caractéristiques I(V) pour les différents liquides (Tableau T1). Cette valeur est supposée être constante pour des rayons de pointe compris entre 0,5 et 10 µm [1,7,8].

	r _p (µm)	V _s (kV)	d(mm)	E _p ^s (MV/cm)
Cyclohexane	1	2,3	3	3
	2	5	3	6
n-pentane	0,5	1,4	3	5,6
n-décane	1	3,2	3	6,8
Toluène	1	1,8	3	3,8
	2,2	5	3	5,1
BTO1	1,5	3	3	4,5
Argon	2,4	4	3	3,3
	9	10	3	3
Azote	10	8	4	2,16

Tableau T1 : Tension et champ seuil sur la pointe pour les Pour les différents liquides.

Les résultats obtenus, montrent que les champs seuil pour les liquides aliphatiques sont plus importants que ceux des liquides aromatiques.

Autrement dit, ces valeurs confirment les résultats obtenus pour les tensions de seuil et par conséquent, la décharge dans les liquides aliphatiques nécessite un champ plus important que les liquides aromatiques. Les résultats sont représentés sur le tableau T1. Pour les liquides cryogéniques, les résultats de nos calculs montrent un champ seuil sur la pointe plus faible que les deux autres familles de liquides. Nous avons trouvé environ 3 MV/cm et 2 MV/cm successivement pour l'argon et l'azote.

Selon notre étude, nous constatons que ces valeurs ne coïncident pas d'un auteur à un autre et particulièrement pour l'azote ou selon certains auteurs, le champ seuil sur la pointe est égal à 12 MV/cm [2,4,9,10]. Ceci suppose que le champ seuil diffère d'un liquide à un autre pour cette famille. Par

conséquent, il a été difficile de tirer une quelconque conclusion.

Zone à courant fort

Dans cette zone, les charges électriques ne s'écoulent plus assez vite, la variation du courant avec la tension appliquée montre que le courant est contrôlé par la charge d'espace. En effet, l'avalanche électronique créée près de la pointe arrive dans une région de champ faible, les électrons sont captés par les atomes ou par les molécule

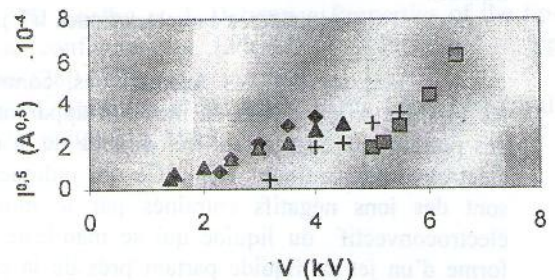
neutres du milieu et créent ainsi une charge d'espace négative. Cette dernière finira par abaisser le champ sur la pointe, la décharge s'arrête pendant que les ions négatifs sous l'influence du champ sont balayés vers l'anode. Dès qu'ils auront parcouru une certaine distance, leur influence diminue sur le champ à la pointe qui regagne alors un niveau suffisant au démarrage d'une nouvelle avalanche. Il est ainsi important de connaître la valeur de la mobilité des charges électriques dans ces différents liquides afin de déduire la nature des porteurs de charges.

Dans les liquides, Coelho et Debeau [11], ont montré qu'en utilisant une approximation hyperboloïde-plan, il est possible de tirer la mobilité K de la caractéristique I(V) ou plus exactement, de la pente de la droite que représente I^{0,5} en fonction de la tension appliquée. L'expression de ce courant est donnée par :

$$I^{0,5} = P(V - V_0) \quad \text{avec : } P = 2,01(\epsilon K/d)^{0,5}$$

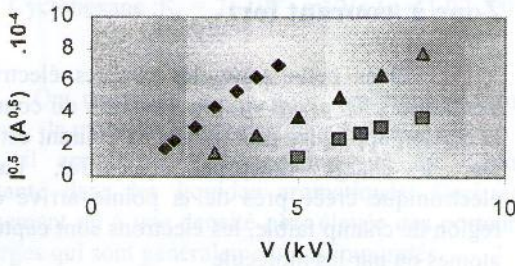
où : ε est la permittivité du liquide et V₀ caractérise le point d'intersection de cette droite avec l'axe des tensions. Ceci montre que l'on peut obtenir une estimation de cette mobilité en mesurant la pente de cette caractéristique. Par conséquent, à partir des caractéristiques I(V) des figures 1-3, nous avons déduit pour les différentes familles de diélectriques liquides, les caractéristiques I^{0,5}(V) représentées dans les figures.10, 11,12.

Fig 10, I^{0,5} (v):Liquides Aliphatiques



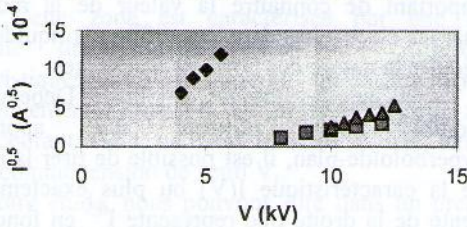
Cyclohexane : ◆ r_p = 1µm v ▲ r_p = 2µm
 n-pentane : ■ r_p = 0,5µm
 n-décane : + r_p = 1µm

Fig 11, $I^{0.5}$ (v):liquides Aromatiques



Toluène : \blacklozenge $r_p = 1\mu\text{m}$ \blacktriangle $r_p = 1,5\mu\text{m}$
 BTO 1 : \blacksquare $r_p = 1,5\mu\text{m}$

Fig 12: $I^{0.5}$ (v):Liquides Cryogéniques



Azote \blacktriangle $r_p = 10\mu\text{m}$
 Argon \blacklozenge $r_p = 2,4\mu\text{m}$ \blacksquare $r_p = 9\mu\text{m}$

Les valeurs des mobilités apparentes déduites sont données dans le tableau T2

Liquides	cyclohe	n-pen	n-decane	toluène	BTO	Argon
Azote	xane	ne				
Kapp					18($r_p=9\mu\text{m}$)	
10^{-7}					5($r_p=2.4\mu\text{m}$)	0,9
m^2/vs	4	2	3	3	3	

Tableau T2 : Mobilités apparentes des différents liquides

Déduites des caractéristiques I(V).

Dans les liquides Aromatiques, comme dans les liquides Aliphatiques, la mobilité apparente Kapp des porteurs de charges est très voisine de la mobilité électrohydrodynamique K_{EHD} . Ce qui indique que ce sont des ions négatifs entraînés par le mouvement électroconvectif du liquide qui se manifeste sous la forme d'un jet de liquide partant près de la pointe et s'écrasant sur le plan opposé [12].

Pour les liquides cryogéniques et particulièrement l'Argon, la mobilité apparente est aussi voisine de la mobilité EHD. Cependant dans

l'Azote, nous constatons que les valeurs de Kapp varient dans une gamme où il est possible d'obtenir deux types de mobilités (EHD, électronique) [11]. Dans notre calcul, $K_{app} \approx 0,9 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{Vs}$, ce qui correspond à une mobilité EHD.

Discussion

Pour les 3 familles de liquide étudiées, on constate d'abord un faible courant puis un saut brusque et enfin un courant limité par la charge d'espace. De ce fait, nous pouvons dire que le mécanisme précurseur de ce comportement est physiquement identique. Il est défini comme une avalanche électronique en phase liquide. La différence constatée sur ces différents liquides est plutôt quantitative. La comparaison entre ces trois familles dans la zone à faible courant montre que l'existence des porteurs de charges dépend essentiellement de la pureté du liquide et probablement de certaines propriétés électriques des liquides et de leur structure moléculaire. En effet, dans les liquides de pureté moyenne, la conduction ionique étant plus élevée, les électrons étant captés rapidement. Selon les propriétés électriques, la permittivité ϵ_r est une caractéristique des liquides qui dépend généralement de leur structure moléculaire.

Elle définit la possibilité de libérer des charges sous l'action du champ électrique. La permittivité ϵ_r est plus importante dans les liquides Aromatiques que dans les liquides Cryogéniques. La différence de conduction peut aussi être expliquée par le fait que l'aromaticité est liée à la délocalisation des électrons donc à leur facilité de circulation dans les molécules. Par conséquent, nous pouvons supposer que dans les liquides Aromatiques, une probable formation d'ions peut avoir lieu sous un champ faible, d'où la quantité de porteurs de charges sous forme d'ions sera plus importante et par conséquent, un courant à champ faible plus élevé.

La conductivité est aussi une caractéristique électrique des liquides et est due à des substances étrangères considérées comme impuretés. Par conséquent, nous pouvons dire que les liquides Aromatiques ont une conductivité plus élevée que les deux autres familles de liquides.

Dans la zone à courant impulsif, le saut brusque du courant est plus important dans les liquides Aliphatiques et Cryogéniques. Ceci peut être expliqué par le fait que le coefficient de multiplication électronique est généralement assez faible dans les liquides Aromatiques et que le coefficient d'attachement est plutôt élevé. Nous remarquons aussi que la tension d'apparition de l'instabilité de courant est plus élevée dans les liquides Aliphatiques et Cryogéniques. La faible tension de seuil dans les liquides Aromatiques est certainement expliquée par la propriété particulière de ces liquides qui est le faible potentiel d'ionisation. Le champ de claquage dans les liquides dépend de la structure moléculaire. Les hydrocarbures saturés présentent des valeurs bien

supérieures à celles des corps Aromatiques. Il est suggéré donc une production d'électrons (avalanche électronique) plus difficile. D'autre part, selon certains travaux [4], souvent la tension de seuil dans les liquides Aromatiques n'est pas nettement caractérisée. Elle est souvent due à un dépôt organique sur la pointe relatif à une polymérisation du liquide sur les molécules qui sont ionisées par les électrons libres émis de la pointe. Ce dépôt constitue alors une barrière de potentiel de l'extraction des électrons. A partir de cette analyse, il nous apparaît donc que la rigidité diélectrique des liquides Aliphatiques est plus élevée que celles des liquides Aromatiques. Dans les liquides Cryogéniques et particulièrement dans l'Azote, les valeurs sont assez hétérogènes pour pouvoir tirer une quelconque conclusion.

Dans la zone à courant fort, nous avons noté pour les trois familles de liquides un courant limité par la charge d'espace. Selon les valeurs de la mobilité apparente, il apparaît que la conduction est expliquée par des ions entraînés par le mouvement électroconvectif du liquide. Dans les liquides Cryogéniques et selon notre calcul, la mobilité apparente correspond à une mobilité électrohydrodynamique. D'autres auteurs estiment que la mobilité est plutôt électronique [4].

- Différents paramètres (physiques et électriques) influent sur la conduction électrique et l'allure de l'impulsion de courant.

- la formation des porteurs de charges dans les liquides Aromatiques s'effectue sous un champ plus faible que les deux autres liquides.

- les liquides Aromatiques ont une conductivité plus élevée que les deux autres familles de liquides.

Par conséquent, cette étude nous a permis d'une part de constater l'influence de divers paramètres sur la conduction électrique dans les différents liquides diélectriques d'autre part, il apparaît selon cette étude que les liquides aliphatiques présentent des propriétés diélectriques intéressantes pour d'éventuelles utilisations. Cependant, une étude plus détaillée qui inclut les paramètres physiques tels que la température, la viscosité, etc... est indispensable pour mieux comprendre l'évolution de ce phénomène.

Références bibliographiques

- [1] M. Haïdara Thèse de Doctorat LEMD Université J. Fourier, Grenoble ; 1988.
- [2] R. Kattan Thèse de Doctorat LEMD Université J. Fourier, Grenoble ; 1996.
- [3] F. Huynh . DEA (LEMD), Grenoble ; 1993

Conclusion

- La caractéristique courant /tension est qualitativement identique pour les trois familles de liquides. La différence est plutôt quantitative.

- Les courants résiduels sont plus importants dans les liquides Aromatiques que dans les liquides Aliphatiques, alors qu'ils sont inexistantes dans les liquides Cryogéniques.

- Les champs d'apparition de la décharge sont plus importants dans les liquides Aliphatiques que dans les liquides Aromatiques, alors que dans les liquides Cryogéniques, ils sont plutôt dispersés.

- La mobilité apparente des porteurs de charge dans les liquides Aliphatiques et Aromatiques est voisine de la mobilité EHD. Pour les liquides Cryogéniques, elles varient dans un intervalle indiquant deux natures différentes de mobilité (EHD, électronique).

[4] F. Jomni Thèse Doctorat (LEMD) Université J. Fourier, Grenoble ; 1997.

[5] R. Tobazeon «Conduction électrique dans les liquides» T.Ing, D225 ;1984.

[6] L.B.Loeb « Electrical corona»,Univ.of California,Press.Berkley.California,1965.

[7] A. Denat, J.P. Gosse et B. Gosse« Electrical conduction of purified cyclohexane in divergent electric field» IEEE.Trans.Elec.Insul. v.23 N 4,1988

[8] M. Brouche et J.P. Gosse « High electric field conduction in aromatic hydrocarbon effets of the polymerisation » IEEE conf. Inter. of Elec. Insul. Quebec ; 1996.

[9] T. Takashima « characteristics liquids motion in needle-to-plane and razor blade-to-plane configurations in transformer oil and liquid Nitrogen» IEEE Trans. Elec. Insul. V 23 August 1988.

[10] J.L. Hernandez, N. Bonifaci et A. Denat « Hot electron phenomena in liquid and gaseous and Nitrogen in divergent electric field » IEEE Int.Conf. on Cond. And Break. In Diel. Liqu. Baden, 1993.

[11] R. Coelho et J. Debeau « Properties of the tip-plane configuration» J.Phys.D :Appl.Phys vol 4, pp 1266-1280 1971.

[12] M. Haïdara et P. Atten IEEE Trans.Elec.Insul. IA-21 p 709-714, 1985.