

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Ecole Nationale Polytechnique
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

THESE DE MAGISTER

Présentée par : HAMIMI Amina Nadhra
Ingénieur d'Etat en Génie Electrique

THEME

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DES
PHENOMENES DE PRECLAQUAGE DANS
UNE HUILE DE TRANSFORMATEUR SOUS
CHAMP ALTERNATIF DIVERGENT**

Présentée devant le Jury :

Président : Mr M. BENDAOUD (Professeur)
Rapporteur : Mr A. BOUBAKEUR (Maître de Conférences)
Examineurs : Mr S. BOUZABIA (Chargé de Cours)
Mr H. MOULAI (Chargé de Cours)
Mr A. HELLAL (Chargé de Cours)
Invité : Mr M. LEBID (SONELGAZ)

Octobre 1997

10, Avenue Hassen Badi, El-Harrache, Alger

DEDICACES

*A la mémoire de ma grand-mère dont le souvenir restera à jamais
gravé dans ma mémoire,*

A mes très chers parents pour leur abnégation,

A Slimane, le lion indomptable,

A mon unique sœur N'fissa, mon modèle d'altruisme,

Au pétulant Mourad, le petit chéri de la famille.

REMERCIEMENTS



J'exprime toute ma gratitude à Monsieur Ahmed BOUBAKEUR, Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui m'a fait l'honneur d'encadrer mon travail et mes remerciements pour son aide si précieuse.

Monsieur Slimane BOUAZABIA, Chargé de cours à l'USTHB, fût, durant toute l'élaboration de cette thèse, une source intarissable de conseils et d'encouragements. Qu'il accepte ma reconnaissance profonde et mes sincères remerciements.

Mes vifs et sincères remerciements à :

*Monsieur Le Professeur Mohamed BENDAËUD, Président du Jury,
Messieurs Abdelhamid HELLAL, Hocine MOULAI et Slimane BOUAZABIA,
membres du Jury
pour l'honneur qu'ils me font d'accepter de juger cette thèse..*

*Une partie de ce travail a été réalisée dans les Laboratoires de SONELGAZ/
EL-HAMMA et ENICAB/GUE DE CONSTANTINE. Que Messieurs LEBID et KHALIL,
Responsables de Laboratoires ainsi que l'ensemble des techniciens acceptent l'expression
de mes remerciements pour leur aide significative.*

*Je tiens, également, à exprimer ma reconnaissance à R. GUEDOUANI, Y.
YEDDOU, A. NAIT SEGHIR, H. HENICHE, K. KADI, F. GUERBAS et N. KHALECHE pour
l'ambiance chaleureuse et amicale qu'ils ont su créer tout au long de mes travaux.*

Sommaire



Introduction Générale

Chapitre 1 : Synthèse Bibliographique

I-1	Introduction	3
I-2	Conduction dans les diélectriques liquides purs	4
I-3	Conduction dans les diélectriques contenant des impuretés	4
I-3.1	Dissociation renforcée par le champ	5
I-3.2	Production de charges aux interfaces	6
I-4	Conséquence du transfert de charges	6
I-5	Effet de l'eau sur la conduction	7
I-6	Génération de cavités gazeuses	7
I-7	Modèles pour la quantification de l'énergie injectée dans le liquide	8
I-8	Tension de génération	9
I-8.1	Définition de la tension de génération U_g	9
I-8.2	Effet de la distance inter-électrodes sur U_g	10
I-8.3	Effet de la pression sur U_g	10
I-8.4	Effet du rayon de courbure de la pointe sur U_g	10
I-8.5	Temps de génération	10
I-9	Dynamique de la bulle	11
I-9.1	Dynamique contrôlée par l'inertie du liquide.	12
1.	Modèle de Rayleigh	12
2.	Modèle de Watson	13
I-9.2	Dynamique contrôlée par le transfert thermique.	14
I-10	Effet de certains facteurs sur la phase de génération dans l'huile de transformateur	15
I-10.1	Effet des additifs et/ou contaminants	15
I-10.2	Effet de la forme du champ	15
I-11	Propagation des décharges dans les diélectriques liquides	15
I-11.1	Propagation en pointe positive	16
I-11.2	Propagation en pointe négative	16
I-12	Vitesse des streamers	16

I-12.1	Modèle de Watson	19
I-12.2	Modèle de Devins, Rzad et Schawabe	19
I-12.3	Modèle de Bérroual	20
I-12.4	Modèle de Bérroual et Brosseau	21
I-13	Charge des streamers	19
I-14	Courant transitoire des streamers	20
I-15	Effet de certains paramètres sur la propagation des streamers dans l'huile de transformateur	21
I-15.1	Effet de la distance	21
I-15.2	Effet de la polarité	22
I-15.3	Effet de la pression	22
I-15.4	Effet de la température	22
I-15.5	Effet de la viscosité	22
I-15.6	Effet des impuretés ou additifs	22
I-16	Propagation des streamers dans les grands intervalles d'huile	23
I-17	Evolution de quelques caractéristiques d'une huile de transformateur	24
I-17.1	Variation de la viscosité en fonction de la tension	24
I-17.2	Variation des pertes diélectriques	24
I-17.3	Effet des additifs et contaminants	24
I-17.4	Profil du champ électrique	24
I-17.5	Effet de l'eau sur l'huile de transformateur	25

Chapitre II : Techniques Expérimentales

II-1	Introduction	26
II-2	Huile utilisée	26
II-3	Propriétés mesurées de l'huile	27
II-3.1	Mesure du facteur de pertes diélectriques "tg δ " et de la permittivité relative " ϵ_r "	27
II-3.2	Mesure de la résistivité " ρ " :	27
II-3.3	Mesure de la viscosité cinématique " η "	27
II-3.4	Mesure de la teneur en eau	27
II-3.5	Mesure de la densité	27
II-4	Mesure du courant et de la charge électriques	27
II-4.1	Circuit d'essais	27

II-4.2 Cellule de mesure	28
II-5 Mode opératoire	30
II-5.1 Préparation de la cellule	30
II-5.2 Conduite des essais	30

Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Commentaires

III-1 Introduction	32
III-2 Propriétés de l'huile de transformateur	32
III-2.1 Facteur de pertes diélectriques "tg δ "	32
1. Effet de la température	33
2. Effet de la tension	33
III-2.2 Permittivité relative " ϵ_r "	35
1. Effet de la température	35
2. Effet de la tension	35
III-2.3 Résistivité transversale " ρ "	37
III-2.4 Viscosité cinématique " η "	37
III-2.5 Teneur en eau	39
III-2.6 Densité	39
III-2.7 Conclusion	40
III-3 Mesure du courant de préclaquage	41
III-3.1 Description des phénomènes	41
III-3.2 Caractéristique courant-tension I(U)	42
1. Effet du rayon de courbure de la pointe (r_p)	43
2. Effet de la distance inter-électrodes (d)	44
3. Effet de l'état de pureté de l'huile	45
III-3.3 Caractéristiques des pics de courant	45
1. Effet de la tension	46
2. Effet de l'alternance	47
3. Effet de l'état de pureté de l'huile	48
III-4 La charge totale injectée Q_i	48
1. Effet de la distance inter-électrodes	48
2. Effet du rayon de courbure de la pointe (r_p)	49
3. Effet de l'état de pureté de l'huile	50
III-5 L'énergie totale du système W_t	50
III-5.1 Couplage énergie totale (W_t)-énergie de la perturbation (W_p)	51

III-6 Estimation du rayon moyen de la bulle générée	52
III-7 Conclusion	56

Conclusion Générale

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

58

Références Bibliographiques

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

C'est en 1891 que, pour la première fois et à titre expérimental, fut utilisée une huile de pétrole comme matériau isolant dans un transformateur triphasé. Il va falloir attendre le début de ce siècle, en 1905, pour assister à une généralisation de l'emploi de l'huile minérale [1].

Utilisée comme produit de remplissage de matériels électriques (transformateurs, condensateurs, disjoncteurs, câbles...) ou imprégnants d'isolants solides, elle devra s'adapter à des contraintes de plus en plus sévères. C'est la raison pour laquelle les études et recherches portant sur les huiles isolantes et, plus globalement, sur les diélectriques liquides constituent, jusqu'à nos jours, un sujet toujours d'actualité.

La contrainte diélectrique ayant été la principale exigence d'une huile de transformateur, les premières études se sont principalement intéressées aux phénomènes de claquage. Mais, on s'est vite aperçu, qu'en réalité la rupture diélectrique n'était que l'ultime étape d'un ensemble d'événements auquel un intérêt particulier devait être porté afin de comprendre les phénomènes qui initient et entretiennent la perturbation jusqu'au claquage.

Ainsi, l'étude des phénomènes de préclaquage englobe-t-elle l'ensemble des processus électriques, optiques et hydrodynamiques qui prennent naissance dans le liquide suite à l'application d'une contrainte électrique.

C'est vers l'étude des liquides de formulation chimique simple et dépourvus d'impuretés (n-héxane, cyclohexane...), que la majorité des efforts s'est orientée[2,3]. Grâce aux nouvelles techniques ultra-rapides d'investigations, de nombreux progrès ont été accomplis, notamment dans la compréhension des mécanismes de conduction dans les diélectriques liquides ainsi que la détection, l'identification et le suivi du développement des perturbations qu'engendre la contrainte électrique.

Cependant, la transposition des résultats obtenus à partir de liquides simples à des liquides d'application industrielle, dont la composition peut être très complexe et souvent mal connue, s'accompagne inévitablement de lacunes.

C'est la nature complexe des huiles diélectriques industrielles, rajoutée aux différentes interactions avec des facteurs externes, qui rendent, laborieuses, l'étude et l'interprétation des résultats qui en découlent.

Nous avons tenté, à notre échelle et par les moyens qui ont été mis à notre disposition, d'effectuer une étude sur le comportement, en phase de préclaquage, d'une huile minérale isolante d'application industrielle. Notre choix s'est porté sur une huile de transformateur, utilisée par la Sonelgaz et commercialement dénommée 'Borak 22'. Nous avons mené notre travail en utilisant un système d'électrodes pointe-plan auquel une contrainte alternative de fréquence industrielle (50Hz) est appliquée.

Afin d'identifier l'huile utilisée, nous avons établi un certain nombre de propriétés physico-chimiques de l'huile de transformateur. Ces propriétés sont : le facteur de pertes diélectriques, la permittivité relative, la résistivité transversale, la viscosité cinématique, la densité et la teneur en eau. Nous avons observé l'influence de la température et de la tension sur chacune des caractéristiques.

Nous nous sommes intéressés, par la suite, à la variation du courant, de la charge et de l'énergie mises en jeu dans le système, et ce sous l'effet de différents facteurs: distance inter-électrodes, rayon de courbure de la pointe, état de pureté de l'huile.

Tout au long de notre travail, nous comparons nos résultats avec ceux obtenus par d'autres auteurs dans le cas de liquides diélectriques simples.

CHAPITRE I

Synthèse Bibliographique

I-1 INTRODUCTION

Le claquage d'un diélectrique liquide est précédé d'une phase de préclaquage. Durant celle-ci, une perturbation prend naissance dans une région de champ élevé et se propage ensuite vers l'électrode opposée.

Vu la complexité des phénomènes y prenant part, l'étude de l'évolution de la perturbation a été divisé en deux étapes:

- une étape traitant des premières réactions du liquide après application de la contrainte électrique: c'est ' **LA PHASE DE GENERATION** '.

- une étape caractérisée par le développement de la perturbation : c'est ' **LA PHASE DE PROPAGATION** '.

L'étude de la phase de génération est primordiale pour la maîtrise du comportement global du diélectrique liquide vu qu'elle s'intéresse aux tout premiers instants pendant lesquels des phénomènes complexes, rapides et interdépendants ont lieu. En effet, sur une durée estimée à quelques nanosecondes pour les hydrocarbures[4], le liquide est le lieu de manifestations diverses: électrique (création de charges), optique (émissions lumineuses), hydrodynamique (mouvement du liquide, cavitation), apparition de bulles....

Le phénomène initiateur de toutes ces manifestations et qui a fait l'objet de nombreuses études est défini par ' **LES MECANISMES DE CREATIONS DE CHARGES** '.

Abordé sous le thème de la ' **CONDUCTION DANS LES LIQUIDES** ', il est largement traité dans la littérature. Cependant, les théories qui existent jusqu'à l'heure actuelle, sont exclusivement établies pour des liquides purs et de formulation simple. Cela rend difficile et incomplète la transposition de ces théories à des liquides complexes qui renferment des impuretés et/ou des additifs tels que les huiles de transformateurs, objet de la présente étude. Toutefois, la connaissance du comportement d'un diélectrique liquide qu'il soit de pureté chimique ou technique demeure indispensable.

La conduction est assurée par des porteurs de charges dont l'origine dépend du degré de pureté du liquide et du champ électrique appliqué.

I-2 CONDUCTION DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES PURS

Dans les diélectriques liquides purs, c'est à dire qui ne possèdent pas d'ions à l'état libre, les mécanismes de création de charges envisageables sont l'émission électronique ou l'ionisation des molécules du liquide, par effet de champ, suivi par un processus d'avalanches électroniques. Ces faits ont été enregistré pour des champs électriques très élevé ($>20\text{MV/cm}$), dans des gaz liquéfiés[5] et des hydrocarbures purs[5,6,]. Des études ultérieures[6,7], moyennant des analyses spectrales et chromatographiques, ont pu certifier l'existence d'un processus d'avalanches électroniques.

La manifestation de ces phénomènes se traduit, à l'échelle macroscopique, par une augmentation rapide du courant lors de l'application d'une tension croissante.

Effet du rayon de courbure (r_p) dans le cas d'une pointe cathode

En champ non uniforme et pour des pointes très fines ($r_p < 0.2\mu\text{m}$), on observe un courant par effet de champ[8]. Il présente une très grande dépendance de la tension appliquée et suit la loi de Fowler-Nordheim avant d'être limité par la charge d'espace. Un champ $E_{FN} > 10\text{MV/cm}$ est nécessaire pour un courant $I > 10^{-12}$ A. La valeur de la tension à partir de laquelle le courant croît rapidement dépend de l'énergie nécessaire aux électrons pour passer de la cathode au liquide.

Pour des pointes moins fines ($r_p > 0.4\mu\text{m}$), un régime régulier d'impulsion de courant, pareil au régime de Trichel observé dans l'air, est détecté à partir d'une tension seuil U_s . U_s est la valeur de la tension à laquelle une instabilité de courant a lieu. Dans ce cas la caractéristique courant-tension ne peut plus être décrite par l'équation de Fowler-Nordheim. La valeur du champ, déduite de U_s , est 3 à 4 fois plus faible que E_{FN} dans le même liquide.

I-3 CONDUCTION DANS LES DIELECTRIQUES CONTENANT DES IMPURETES

Dans les diélectriques liquides contenant des impuretés, la création des porteurs de charges a lieu pour des champs ne dépassant quelques centaine de kilovolts par centimètre. Ils sont le résultat d'une dissociation des molécules du liquide laquelle est renforcée par la présence d'un champ électrique ou encore d'une injection à l'interface électrodes-liquide.

I-3.1 Dissociation renforcée par le champ

Il existe une réaction d'équilibre entre les molécules neutres AB d'un liquide et les ions A⁺ et B⁻ [9], qui s'écrit:



avec:

K_d : constante de vitesse de dissociation.

K_r : constante de vitesse de recombinaison.

L'application d'un champ électrique, au liquide, abaisse l'énergie de liaison de ses molécules neutres AB. En conséquence de quoi, le nombre des ions dissociés devient supérieur au nombre des ions recombinaison.

La dissociation se fait à la vitesse:

$$K_d = K_d(E=0) F(b) \quad (I-2)$$

où:

K_d(E=0) est la constante de dissociation en absence du champ électrique.

$$F(b) = 1 + b + \frac{b^2}{3} + \frac{b^3}{18} + \dots$$

$$b = 2\beta l_b$$

$$2\beta = \frac{|E(e_1\mu_1 + e_2\mu_2)|}{kT(\mu_1 + \mu_2)} \quad (I-3)$$

$$l_b = \frac{|e_1 e_2|}{8\pi\epsilon_0\epsilon_r kT}$$

k : constante de Boltzman.

T : température.

μ₁, μ₂ : mobilités ioniques.

La constante de vitesse de dissociation est une fonction croissante de la valeur absolue du champ.

A champ nul, il est à noter qu'une faible variation de la permittivité provoque une grande variation de K_d, d'où l'importance de l'exactitude de la valeur de la permittivité.

A l'opposé de K_d , la constante de recombinaison K_r est une grandeur indépendante du champ électrique.

I-3.2 Production de charges aux interfaces

La création d'ions aux électrodes a pour origine des réactions électrochimiques résultant de la mise en contact de l'électrode et du diélectrique. Des échanges électroniques ont lieu lorsque l'ion pénètre dans une zone de 10^{-7} cm d'épaisseur, où règne un champ très intense ($\sim 10^7$ V/cm). Cette région est formée par des ions non déchargés fixés à la surface du métal en permanence (ces ions et leurs images forment la double couche)[10,11,12,13].

On dit qu'il y a *injection*, lorsque les ions qui sont maintenus dans cette zone parviennent à se libérer. Le transfert de charge peut être décrit par le schéma suivant:



avec:

k_r : constante de recombinaison.

k_f : constante de formation.

k_{ex} : constante d'extraction.

I-4 CONSEQUENCES DU TRANSFERT DE CHARGES

Le transfert de charge s'accompagne d'une augmentation ou d'une réduction de la résistivité du liquide selon que l'élément qui réagit est un ion ou une espèce neutre[13].

a- Cas d'un ion :

Il peut s'agir d'une réduction de l'ion A^+ : $A^+ + e^- \rightarrow A$

ou de l'oxydation de l'ion B^- : $B^- \rightarrow B + e^-$.

Toutes deux conduisent à une élimination d'ions. Par conséquent, la résistivité du liquide va augmenter.

b- Cas d'une espèce neutre:

Qu'il s'agisse de réduction : $N + e^- \rightarrow N^-$ ou de d'oxydation : $N \rightarrow N^+ + e^-$,

on est toujours en présence d'une injection (production) d'ions provoquant une baisse de la résistivité

I-5 EFFET DE L'EAU SUR LA CONDUCTION

Il est connu que l'eau réduit la rigidité diélectrique de l'huile. Cependant son influence dépendra principalement des formes d'association de l'eau avec les molécules du liquide. Plus précisément, il s'agira des liaisons hydrogènes établies entre les molécules d'eau et les molécules du liquide. Plus l'énergie de ces liaisons est grande, plus la structure formée est droite et plus la conduction est facilitée[14,15,16].

I-6 GENERATION D'UNE CAVITE GAZEUSE

La perturbation qui prend naissance après application d'une tension seuil est caractérisée par un courant et une émission lumineuse.

Sous créneau de tension [17], le courant détecté et la lumière émise dans une huile de transformateur, dans le cas d'une pointe négative, sont constitués de pics très rapprochés les uns des autres, dont l'amplitude augmente en fonction du temps. Tandis qu'avec une pointe positive, ils ont une allure régulière et continue.

Sous tension alternative 50 Hz [19,20], le courant a deux composantes:

- une composante d'allure continue, indépendante de la tension.
- une composante constituée de pics qui prend naissance après une valeur seuil de la tension. Cette composante apparaît lors de l'arche croissant de la sinusoïde et disparaît au moment ou juste après que la tension ait atteint sa valeur maximale. Ceci est valable dans les deux alternances.

Ce courant est décalé de 90° par rapport à la tension. Il reflète le caractère capacitif du courant de conduction.

Il est aujourd'hui prouvé[21,22,23,24] que l'injection de courant dans un diélectrique liquide donne naissance à une cavité gazeuse. Le changement de phase local qui se produit est dû soit à une augmentation de la température à pression constante (vaporisation) ou à une baisse de pression à température constante (cavitation) (Figure I-1)

Vaporisation

Lorsque la température, en un point du liquide est supérieure à la température d'ébullition, une ébullition locale se produit donnant naissance à une bulle de vapeur.

Cavitation

Un liquide, soumis à une dépression à température constante donnera naissance à une bulle si la pression devient inférieure à sa pression de vapeur saturante.

L'application d'un champ électrique au liquide peut engendre une dépression :

- par le phénomène d'électrostriction du liquide , là où le champ est renforcé.
- par la mise en mouvement du liquide.

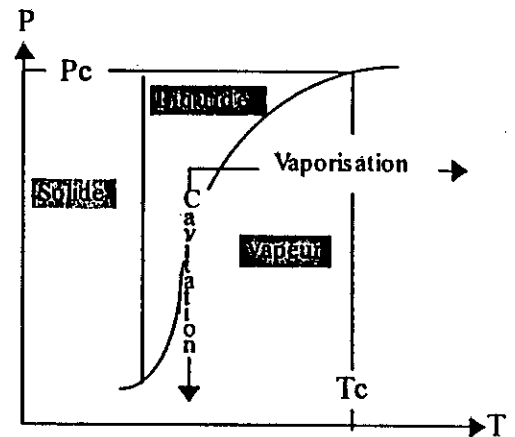


Figure I-1: Diagramme de phase d'un liquide.

I-7 MODELES POUR LA QUANTIFICATION DE L'ENERGIE INJECTEE DANS LE LIQUIDE

La majorité des modèles existant se basent sur un même critère:

Il y a formation de bulle gazeuse quand l'énergie injectée devient suffisante pour vaporiser une quantité du liquide.

Watson et Sharbaugh[25] proposent, dans le cas d'une tension impulsionnelle, un modèle faisant intervenir la température, la pression et les caractéristiques thermiques du liquide, en excluant le caractère transitoire du processus. Ce modèle a été corrigé, par la suite, par Kao[26].

Il existe, aussi, un modèle plus général dit de "vaporisation" [27], établi pour tous les types de tension. Il permet, en particulier, le calcul du rayon de la bulle en la supposant sphérique.

Modèle de vaporisation

L'énergie W injectée dans le système vaut:

$$W = Q.U \tag{I-5}$$

Q : la charge injectée.

U : la tension appliquée.

La quantité d'énergie nécessaire, W_{eb} , pour vaporiser une môle du liquide vaut:

$$W_{eb} = L_v + \int_{T_{amb}}^{T_{eb}} C_p(T) dT \quad (1-6)$$

L_v : chaleur latente.

T_{eb} : température d'ébullition.

T_{amb} : température ambiante.

C_p : capacité calorifique.

Le nombre de mûles de vapeur générée suite à un dépôt W est:

$$N = \frac{W}{W_{eb}} = \frac{PV}{RT_{eb}} \quad (1-7)$$

P : presssion.

R : constante des gaz parfaits.

V : volume de vapeur générée. Il est défini par :

$$V = \frac{4}{3} \pi R_m^3 \quad (1-8)$$

R_m étant le rayon maximum de la bulle. Il est donné par:

$$R_m^3 = \left[\frac{3RT_{eb}}{4\pi \int_{T_{amb}}^{T_{eb}} C_p(T) dT + L_v} \right] \left[\frac{W}{P} \right] \quad (1-9)$$

Kattan [22] a mesuré le rayon maximum de la bulle dans le cyclohexane et l'a trouvé 10 à 15% inférieur au rayon calculé par la formule ci-dessus. Il attribue cela au fait que l'énergie injectée, en plus de vaporiser le liquide, va servir à l'ioniser, l'exciter et fournir le travail contre la force de pression et la tension superficielle.

1-8 TENSION DE GENERATION

1-8.1 Définition de la tension de génération U_g :

Il n'existe pas jusqu'à l'heure actuelle de définition communément adoptée concernant la tension de génération.

Selon les auteurs, il sera fait référence à :

- La taille de la bulle : En effet, Béréal [17] définit la tension de génération comme étant le niveau de tension auquel une bulle de 10 μm de diamètre apparaît.
- L'indice de réfraction : Dans ce cas, la détection de la perturbation est basée sur la variation de l'indice de réfraction dans le liquide [22,28].
- Premier pic du signal courant : Au premiers niveaux de tension, le courant présente une allure continue. A partir d'un certain seuil, on note l'apparition de pics indiquant qu'une génération a eu lieu [20,27].

1-8.2 Effet de la distance inter-électrodes sur U_g :

Aucune influence de l'écartement des électrodes n'a été observé sur U_g dans les hydrocarbures sous contrainte alternative [20] et continue [28] pour des distances n'excédant pas 7mm.

1-8.3 Effet de la pression sur U_g

Sous créneau de tension [17], la tension de génération dans une huile de transformateur augmente linéairement en fonction de la pression aussi bien en polarité positive que négative.

1-8.4 Effet du rayon de courbure de la pointe r_p sur U_g

Dans les hydrocarbures, sous tension continue positive [28], la tension de génération augmente en fonction du rayon de courbure de la pointe. Par contre, on note l'effet inverse en polarité négative.

1-8.5 Temps de génération

Il existe trois méthodes pour la détermination du temps de génération [9].

- Méthode de Von Laue: Elle consiste à déterminer les n_i essais de tenue sur les n essais effectués. Si les temps de génération t_g et de propagation t_p ne sont pas négligeables, alors ils pourront être déduits de la relation:

$$\frac{n_i}{n} = e^{-\frac{(t-t_p)}{t_g}} \quad (1-10)$$

- Méthode de variation du rayon de courbure de la pointe: Il est possible de séparer la phase de génération de celle de la propagation en faisant varier le rayon de la pointe et la tension. En effet, plus ces derniers sont faibles, plus t_g est grand.

Pour des tensions élevées, le temps de génération devient négligeable [9].

- Méthode de variation du temps de montée de la tension: Elle consiste à faire varier le temps de montée t_m d'une tension en créneau et à déterminer le temps t_{app} nécessaire à l'apparition d'une perturbation de quelques μm . Le temps de génération va correspondre au temps d'apparition lorsque t_m tend vers zéro [9]

1-9 DYNAMIQUE DE LA BULLE

Plusieurs chercheurs ont distingué quatre stades de l'évolution d'une bulle dans un liquide surchauffé[21,28].

- Une phase initiale, de très courte durée, pendant laquelle la tension superficielle est dominante.
- Suivi d'une phase durant laquelle le grossissement est contrôlé seulement par l'inertie du liquide.
- Une phase intermédiaire où la diffusion thermique devient importante.
- Enfin, une phase pendant laquelle les phénomènes thermiques sont prédominants.

Il existe deux cas limites pour lesquels des formules ont été établies pour décrire l'évolution temporelle du rayon de la bulle:

- 1- Dynamique contrôlée par l'inertie du liquide.
- 2- Dynamique contrôlée par le transfert thermique

La forme complète de l'équation différentielle qui détermine l'évolution d'une bulle sphérique dans un liquide est donnée, pour l'instant t , par[29]:

$$2R \left[P_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 + P_v - P_a - P_{es} \right] = 4\sigma + 3\rho R \dot{R} + 2\rho R^2 \ddot{R} \quad (I-11)$$

R : rayon de la bulle.

P_{g0} : pression partielle initiale.

R_0 : rayon initiale de la bulle.

\dot{R} : vitesse de croissance du rayon de la bulle à l'interface.

\ddot{R} : l'accélération.

P_v : pression de vapeur saturante.

P_a : pression ambiante.

P_{es} : pression électrostatique.

σ : tension superficielle.

ρ : masse volumique du liquide.

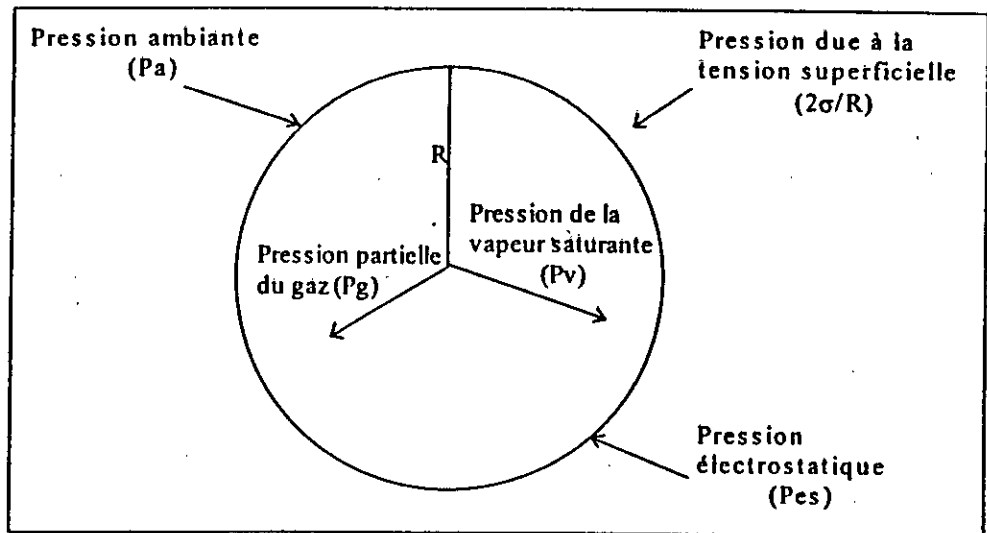


Figure I-2: Pressions appliquées à la surface d'une bulle sphérique

I-9.1 Dynamique contrôlée par l'inertie du liquide

I-9.1.1 Modèle de Rayleigh

Dans l'hypothèse d'une bulle vide, dans un liquide parfait, incompressible, soumis à une pression constante et négligeant l'effet de la viscosité et de la tension superficielle[22], l'équation (I-11) se réduit à:

$$\ddot{R}R + \frac{3}{2}\dot{R}^2 + \frac{1}{\rho}Pa = 0 \quad (\text{I-12})$$

L'intégration de cette équation donne l'expression de la vitesse à l'interface en fonction du rayon durant la phase de l'implosion.

$$\dot{R}^2 = \frac{2Pa}{3\rho} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right] \quad (\text{I-13})$$

$$\text{avec à } t=0 \quad \begin{cases} R = R_0 = R_{\max} \\ \dot{R} = 0 \end{cases}$$

Le temps total de l'implosion t_i pendant lequel le rayon passe de sa valeur maximum à la valeur zéro est obtenu par l'intégration de l'équation de la vitesse.

$$t_i = 0.915R_0 \sqrt{\frac{\rho}{P_a}} \quad (I-14)$$

Les résultats trouvés par Kattan[22] et Kattan et al[31] dans le cyclo-héxane, le n-décane et n-heptane sont en bonne concordance avec le modèle de Rayleigh. Ce qui n'est pas le cas pour l'iso-octane, le néo-héxane et le TMS qui sont des liquides à faibles mobilités électroniques.

L'hypothèse d'une bulle vide ne peut expliquer l'apparition des rebondissements suite à la première implosion. D'où la nécessité de tenir compte de la présence de gaz ou de vapeur qui empêche le rayon de s'annuler et la vitesse de devenir infiniment grande lorsque le rayon tend vers zéro.

En considérant, à chaque fois, un ou plusieurs paramètres qui ont été négligés par Rayleigh, nous aboutissons à différents modèles connus, dans la littérature sous le nom de : Rayleigh et Plesset, R-N-N-P, Gilmore, Herring, Fujikawa et Akamatsu [22].

1-9.1.2 Modèle de Watson

C'est un modèle établi dans le cas d'une pointe cathode.

Watson et al [32] supposent que l'expansion de la bulle est uniquement contrôlée par le champ électrostatique. A ce travail, le liquide oppose une énergie cinétique, s'il a une faible viscosité, et une énergie due aux frottements visqueux dans le cas contraire (Les travaux pour contrer la pression ambiante, et la tension superficielle étant négligeables).

Liquides à faible viscosité

La bulle est de forme sphérique. Elle est supposée être au même potentiel que la cathode. Le champ calculé par une approximation hyperboloïde-plan est:

$$E(R) = \frac{V}{R \ln 2 \sqrt{d/R}} \quad (I-15)$$

V : potentiel électrique.

R : rayon de la cavité.

d : distance.

En égalant le travail de la pression électrostatique à l'énergie cinétique, et après intégration, on trouve la variation temporelle du rayon de la bulle.

$$R(t) = \left[\frac{2\varepsilon_r V^2 t^2}{\rho \sqrt{d}} \right]^{2/7} \quad (I-16)$$

ρ : densité du liquide

Les auteurs[30] trouvent une bonne corrélation entre les résultats théoriques et expérimentaux des essais effectués dans le silicone DC-200 pour des viscosités allant de 1+10 cSt, tandis que pour le n-héxane et le DC-200 (0.65, 100 et 1000 cSt) les rayons expérimentaux sont plus grands. Dans le premier cas les auteurs attribuent cette différence à la non prise en compte du travail de la pression de vapeur et dans le second à la non prise en compte des frottements. C'est ce qui sera corrigé dans le modèle suivant

Liquides à forte viscosité

L'énergie dissipée due aux frottements visqueux vaut:

$$W_d = 32\pi\eta R \frac{V^2}{3} \quad (\text{par unité de temps}) \quad (I-17)$$

En égalisant le travail de la pression électrostatique à celui du frottement, on obtient:

$$R(t) = \left[\frac{3\varepsilon_r V^2 t}{10\eta \sqrt{d}} \right]^{2/3} \quad (I-18)$$

L'équation ci-dessus est vérifiée dans le Silicone DC-200 (1000 cSt).

I-9.2 Dynamique contrôlée par le transfert thermique

C'est le cas de la croissance d'une bulle de vapeur dans un liquide uniformément surchauffé[21].

Dans son stade final de grossissement:

- l'effet de refroidissement de la bulle devient important,
- sa vitesse d'expansion diminue pendant que son rayon continue d'augmenter,
- sa température baisse mais ne descendra pas en dessous de la température d'ébullition (à la pression appliquée).
- L'inertie du liquide devient négligeable.

- L'inertie du liquide devient négligeable.

Durant cette phase, la croissance de la bulle dépend essentiellement de la vitesse à laquelle la chaleur est fournie à sa surface pour évaporer le liquide.

On admet que la vapeur dans la bulle est à la température d'ébullition T_{eb} , et le liquide est à la température T .

$(T-T_{eb})$ définit la valeur de surchauffe.

$$\frac{dR}{dt} = \left(\frac{3}{\pi}\right)^{1/2} \frac{K(T-T_{eb})}{L\rho_v D^{1/2}} \frac{1}{t^{1/2}} \quad (I-19)$$

K : conductivité thermique du liquide.

L : chaleur latente du liquide.

ρ_v : la densité de vapeur dans la bulle.

$D = K/\rho$ où C_p est la capacité calorifique du liquide.

I-10 EFFET DE CERTAINS FACTEURS SUR LA PHASE DE GENERATION DANS L'HUILE DE TRANSFORMATEUR

I-10.1 Effet des additifs et/ou contaminants

L'introduction d'air et d'oxygène dissous ou de particules d'aluminium n'a engendré qu'un effet insignifiant sur l'initiation de la perturbation dans une huile de transformateur soumise à une tension de choc 0.25/1000 μ s[33].

I-10.2 Effet de la forme du champ

A 50 Hz, il a été observé [20] que le champ uniforme donnait lieu à un nombre de pics de courant plus important qu'en champ non uniforme. Les amplitudes de courant (mesurées de pic à pic) sont plus fortes en champ divergent. Elles dépendent de l'intervalle inter-électrodes, du matériau de l'électrode et de l'état de l'huile (neuve ou usagée).

I-11 PROPAGATION DES DÉCHARGES DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES

La propagation des décharges (streamers) dans les diélectriques liquides a été principalement étudiée sous tension impulsionnelle, en champ non uniforme, ces conditions offrant une relative facilité d'enregistrement du phénomène. Les différentes études[35,36,37] ont abouti aux caractéristiques globales suivantes:

- ◆ L'indice de réfraction dans une zone délimitée du liquide devient différent de celui du volume environnant.
- ◆ La décharge se propage dans un plus grand espace et se déplace à une plus grande vitesse lorsque la pointe est positive.
- ◆ Le développement de la décharge est suivi d'un phénomène mécanique appelé onde de choc.
- ◆ Une corrélation existe entre la forme du streamer et sa vitesse de propagation indépendamment de la polarité et de la nature du liquide (avec ou sans additifs).

Les streamers existent sous deux formes selon qu'ils évoluent à des vitesses subsoniques ou supersoniques

En mode subsonique, les streamers ont une forme de buisson. Ils se composent de plusieurs canaux qui émergent d'un point commun de l'électrode. Les courants et lumières qu'ils produisent sont formés de pics discrets.

En mode supersonique, ils sont filamenteux. Ils se composent d'un canal principal qui émerge de la pointe et de fins canaux tout autour. Ils donnent lieu à des courants et lumières de variation assez régulière.

I-11.1 Propagation en pointe positive

En augmentant la tension, un streamer de structure filamenteuse se développe à partir de la pointe. Sa vitesse initiale, le nombre de branches qui le composent et la distance maximale parcourue augmentent. A certaines valeurs élevées de la tension, la vitesse diminue et passe par un minimum non nul, après lequel elle augmente de nouveau[23].

I-11.2 Propagation en pointe négative

Les streamers négatifs sont moins filamenteux que les streamers positifs. Ils sont en forme de buisson. Ils évoluent moins rapidement. Aux faibles tensions, ils cessent de croître après avoir parcouru une partie de l'intervalle, alors qu'aux tensions élevées ils décèlent approximativement au milieu de l'intervalle pour accélérer de nouveau[33].

I-12 VITESSE DES STREAMERS

Dans le cas des deux polarités, les streamers traversent l'intervalle inter-électrode à vitesse quasi-constante, sauf à proximité des électrodes où elle est plus grande[17,33,37,38]. Dans l'huile de transformateur, comme pour d'autres diélectriques, la vitesse du streamer positif est

supérieure à celle du streamer négatif bien qu'elles soient du même ordre de grandeur ($v_{min} \sim 2 \cdot v_{min}$) [17]. Cependant son minimum n'est pas aussi prononcé que dans d'autres liquides [17,37].

Il existe plusieurs modèles pour l'évaluation de la vitesse du streamer.

I-12.1 Modèle de Watson

Watson [39] utilise un critère énergétique pour déterminer la vitesse de la perturbation. Il suppose que la cavité, de faible densité, est de forme sphérique et au même potentiel que la cathode.

En égalisant le travail de la pression électrostatique à l'énergie cinétique, il trouve:

$$v = \sqrt{\frac{\epsilon}{3\rho}} E(R) \tag{I-20}$$

avec:

ϵ et ρ : permittivité et densité du liquide.

$E(R)$: champ électrostatique sur le front de la sphère conductrice. Il est calculé par approximation hyperboloïdale et donné par:

$$E(R) = \frac{V}{R\sqrt{2}} \tag{I-21}$$

V : tension appliquée.

R : rayon de la cavité.

La vitesse, calculée par ce modèle, ne peut excéder 30 m/s alors que les valeurs expérimentales peuvent être de deux ordres de grandeurs supérieures. De plus, ce modèle ne prévoit pas de minimum.

I-12.2 Modèle de Devins, Rzad et Schwabe

Pour interpréter les mécanismes qui sont à l'origine de la propagation des streamers positifs, Devins et al [38] supposent qu'une ionisation par champ a lieu dans le liquide. Ils utilisent la théorie de Zener pour les solides, pour calculer la concentration des porteurs positifs et négatifs contenus dans un conducteur cylindrique de rayon r_c . Ils aboutissent à l'expression suivante de la vitesse [38].

$$v = \left[\frac{ae^3 E_0^3}{\pi m V_i^2} \right]^{1/2} \frac{n}{c} r_c \operatorname{erfc} \left[\frac{\pi^2 m a V_i^2}{h^2 e E_0} \right]^{1/2} \tag{I-22}$$

- a : distance inter-moléculaire.
- e : charge de l'électron.
- E_0 : champ à l'extrémité du streamer de rayon r_s .
- m : masse de l'électron.
- V_i : potentiel d'ionisation de la phase liquide.
- n : nombre de molécules par m^3 .
- c : concentration des porteurs positifs et négatifs contenus dans un canal cylindrique de rayon r_s .
- h : constante de Planck

Ce modèle permet d'établir une relation entre la vitesse du streamer et les propriétés physico-chimiques du liquide. Cependant les valeurs de vitesse qui en découlent ne correspondent pas aux observations expérimentales.

I-12.3 Modèle de Béréal

Béréal[40] suppose qu'une fraction de l'énergie totale (électrique) dont dispose le système va servir au déplacement du streamer.

$$W_d = \beta W_t \quad 0 < \beta \leq 1 \quad (I-23)$$

W_d : énergie servant au déplacement du streamer.

W_t : énergie totale du système.

En supposant que le streamer comporte n branches assimilables chacune à un canal cylindrique, l'égalité de l'énergie cinétique et du travail de déplacement donne:

$$\sum_{j=1}^n \frac{1}{2} (\rho \pi r_j^2 dl_j) v_j^2 = \beta \sum_{j=1}^n q_j E_j dl_j \quad (I-24)$$

où r_j , dl_j , v_j , q_j , E_j sont respectivement le rayon de la branche j, son déplacement, sa vitesse, sa charge et le champ à son extrémité.

ρ est la masse volumique de la phase gazeuse.

Si on considère que toutes les branches ont le même rayon et qu'elles se déplacent à la même vitesse, la vitesse aura pour expression:

$$v^2 = \left(\frac{2}{\rho \pi r^2} \right) \left(\frac{\beta}{n} \right) \sum_{j=1}^n \left(\int_0^{l_j} i_j dt \right) E_j \quad (I-25)$$

C'est un modèle qui décrit aussi bien le mode continu que par pas.

Appliqué au n-décane sous tension constante, il donne des résultats qui coïncident bien avec les résultats expérimentaux.

I-12.4 Modèle de Bérroual et Brosseau

Pour estimer la vitesse de propagation dans le cas général, Bérroual et Brosseau[41] tiennent compte des deux modes de propagation continu et par pas.

Un streamer lent engendre un courant composé d'impulsions, lesquelles tendent à disparaître quand le streamer acquiert plus de vitesse, conférant l'aspect continu que l'on connaît au courant.

Si t_{pj} est la durée d'une impulsion, t_{oj} la durée qui sépare deux impulsions consécutives et v_{pj} , v_{oj} les vitesses durant ces deux intervalles, la longueur de propagation l_j vaut:

$$l_j = v_{pj} t_{pj} + v_{oj} t_{oj} \quad (I-26)$$

En considérant que la longueur totale du streamer est la somme des longueurs partielles, la vitesse moyenne du streamer est:

$$v = \frac{l}{\sum t_j} \sum [v_{pj} t_{pj} + v_{oj} t_{oj}] \quad (I-27)$$

- quand t_{oj} / t_{pj} diminue: La fréquence des impulsions augmente, le courant tend vers un aspect continu et la propagation devient rapide. Ceci est le cas quand la tension augmente ou/et un capteur d'électrons est introduit dans le liquide.
- quand t_{oj} / t_{pj} augmente: L'intervalle entre deux impulsions consécutives augmente, la fréquence des impulsions diminue et le streamer se propage par pas. Il prend l'aspect d'un buisson. Sa vitesse moyenne diminue.
- quand le nombre de branches et t_{oj} diminuent: La vitesse augmente en fonction de la charge, le streamer est plus filamentaire et sa vitesse tend vers une valeur maximale. La propagation tend à être continue.

I-13 CHARGE DES STREAMERS

Cas des streamers rapides

Bérroual[40] assimile l'enveloppe du streamer rapide à une sphère conductrice qui grossit en restant concentrique à la pointe. La charge d'un tel système vaut, à tension constante U :

$$Q = C.U = 4\pi\epsilon L \frac{x}{1-x} U \quad (1-28)$$

U : tension appliquée à la pointe.

L : distance pointe-plan.

$x = \frac{l_s}{L}$, avec l_s : longueur du streamer.

Cette équation donne une variation similaire à celle de la charge mesurée.

Cas des streamers lents

La charge, dans ce cas, se présente sous forme de paliers.

Béréal[40] considère que chaque charge élémentaire se trouve à la tête vive d'une branche du streamer dont la forme est celle d'un cylindre terminé par une demi-sphère.

$$Q_j = 2\pi\epsilon r_s \left[1 + \frac{r_s}{L - l_s} \right] U \quad (1-29)$$

Ce modèle donne des valeurs de charges du même ordre de grandeur que les résultats expérimentaux mais représente une limite supérieure de Q puisque, en réalité, l'angle solide est inférieur à (2π) .

Pour cette raison, Béréal et Brosseau[41] proposent de remplacer cet angle par l'angle Γ_j constitué par la tête du streamer et ayant pour base l'électrode plane. Cet angle est donné par :

$$\Gamma_j = 2\pi(1 - \cos\theta_j) = 2\pi\alpha_j \quad (1-30)$$

$$\text{avec : } \theta_j = \left[1 + \left[\frac{D}{2L} \frac{1}{1 - l_s/L} \right]^2 \right]^{1/2} \quad (1-31)$$

D : diamètre de l'électrode plane.

L : distance pointe-plan.

l_s : longueur du streamer.

I-14 COURANT TRANSITOIRE DES STREAMERS

Dans l'hypothèse d'un streamer parfaitement conducteur, le courant engendré est le résultat de la variation du condensateur C streamer-plan, soumis à une tension constante U.

$$I = U \frac{dC(t)}{dt} \quad (1-32)$$

Modèle de Béréal**Cas des streamers filamenteux**

En supposant le rayon r_s du streamer constant durant sa propagation et en assimilant le système à deux sphères concentriques, Béréal[40] trouve:

$$I_f(t) = 4\pi\epsilon v U \left[\frac{r_s}{L} \right]^2 \left[\frac{1}{1-x} \right]^2 \quad (I-33)$$

ϵ : permittivité du canal.

L : distance pointe-plan.

$x = \frac{l_s}{L}$, avec l_s : longueur du streamer

Cas des streamers en buisson

Béréal[40] suppose que le rayon de la sphère externe grossit en restant concentrique à la pointe.

$$I_b(t) = 4\pi\epsilon v \frac{1+m}{(1-x)^2} U \quad m = r_p/L \quad (I-34)$$

La variation du courant I_b est tout à fait différente de celle obtenue expérimentalement. De plus, pour les mêmes paramètres, on obtient I_b quatre fois plus élevé que I_f . Ce qui est en contradiction avec l'expérience puisque les courants enregistrés dans le cas des streamers filamenteux sont plus forts que dans le cas des streamers en buisson.

I-15 EFFET DE CERTAINS PARAMETRES SUR LA PROPAGATION DES STREAMERS DANS L'HUILE DE TRANSFORMATEUR

I-15.1 Effet de la distance

Pour un même champ électrique, le temps d'apparition des streamers augmente et leur vitesse diminue quand les électrodes se rapprochent[33].

I-15.2 Effet de la polarité

La perturbation en pointe positive apparaît après la perturbation en pointe négative et se propage plus rapidement[33].

En pointe cathode, la probabilité du mode subsonique augmente lorsque la tension et/ou la pression hydrostatique sont abaissées (ou que la température est accrue).

I-15.3 Effet de la pression

Le streamer disparaît progressivement lorsque la pression augmente. Il apparaît alors un chapelet de bulles plus visible à l'extrémité des filaments qu'au voisinage des pointes. Parallèlement, l'amplitude des pics de courant présents à pression ambiante sous créneau de tension, ainsi que la lumière émise; s'en trouvent réduits jusqu'à totale disparition. La disparition des pics, donc l'annulation du courant, lorsque la pointe est cathode, nécessite une pression moins importante qu'en pointe anode. Ceci rend évident la nature gazeuse du streamer, même si les mécanismes de génération diffèrent d'une polarité à l'autre[17].

La vitesse des streamers dans l'huile de transformateur étant comparable en polarité positive et négative ($v_+ = 2.5$ km/s, $v_- = 1.5$ km/s), la pression nécessaire à leur disparition est du même ordre[35].

I-15.4 Effet de la température

La vitesse des streamers positifs augmente en fonction de la température alors qu'elle reste inchangée pour les streamers négatifs[38].

I-15.5 Effet de la viscosité

Le changement de la viscosité n'a apparemment aucune influence sur les streamers positifs dont la forme demeure filamentaire dans la plupart des cas. Toutefois la composition chimique de l'huile affecte l'apparence globale et le nombre de branches du streamer[23].

I-15.6 Effet des impuretés ou additifs

Alors que les impuretés ne semblent pas avoir d'influence sur la génération des perturbations, leur vitesse de propagation en est quelquefois affectée. La présence de particules d'aluminium accélère les streamers. Cet effet est renforcé lorsque la concentration et la taille des particules augmentent[33].

En pointe cathode, l'ajout d'un additif capteur d'électrons décuple la vitesse et elle devient presque indépendante de la tension dans une huile contenant une grande concentration d'aromatiques[24].

Afin d'étudier l'effet d'additifs aromatiques, Devins et al[38] ont ajouté un constituant diaromatique typique d'une huile de transformateur à une huile minérale sans additifs. Ils ont relevé une accélération aussi bien des streamers positifs que négatifs, et ceci même à de faibles concentrations.

Effet du type d'huile

Dans un but comparatif, Devins et al [38] ont observé le comportement des streamers dans différents types d'huile: une huile de transformateur composée d'une base naphénique et de 20-30% d'aromatiques, une huile minérale hautement raffinée(c'est à dire dépourvue d'additifs - Marcol 77-), une huile silicone et des hydrocarbures.

D'une façon générale, il a été constaté que les streamers positifs évoluent plus rapidement dans l'huile silicone que dans l'huile de transformateur. Alors que l'effet est inversé en pointe cathode.

Effet de l'écartement des électrodes

Dans l'huile de transformateur et l'huile silicone, la vitesse des streamers positifs est essentiellement indépendante de l'intervalle inter-électrodes. Alors qu'elle est inversement proportionnelle à la racine carrée de cet intervalle dans le Marcol 77 et les hydrocarbures.

Effet de la tension

La vitesse des streamers positifs, dans l'huile de transformateur, est moins dépendante de la tension que dans l'huile silicone. Cependant, elle en est totalement indépendante dans le Marcol 77 et les hydrocarbures.

I-16 PROPAGATION DES STREAMERS DANS LES GRANDS INTERVALLES D'HUILE

Immédiatement après l'application de la tension, un streamer filamentaire émerge de la pointe cathode[42,43]. Il présente toutes les caractéristiques d'un streamer se développant dans une huile minérale aux faibles distances. Il est composé d'un grand nombre de filaments. Il se propage d'une manière continue à une vitesse quasi-indépendante de la tension (2.5 km/s). Il est de nature gazeuse. Les signaux de courant et de lumière ont un aspect continu. Mais, après avoir parcouru une certaine distance, un grand nombre de ces filaments s'éteint. Les filaments restants ne sont en contact avec la pointe que lors des réilluminations. Ceci se traduit par des pics de courant intermittents et un aspect discontinu de la propagation.

I-17 EVOLUTION DE QUELQUES CARACTERISTIQUES D'UNE HUILE DE TRANSFORMATEUR

I-17.1 Variation de la viscosité en fonction de la tension

L'application d'une tension croissante à une huile de transformateur engendre une augmentation de sa viscosité. Ceci pourrait être expliqué par la formation, au sein du liquide, de molécules complexes causant un changement dans la structure du liquide et par conséquent dans sa viscosité[44].

I-17.2 Variation des pertes diélectriques

Le facteur de pertes diélectriques des fluides silicone et ester est indépendant du champ électrique dans la gamme 10-60 kV/cm pour des températures allant de 0 à 120°C. Aucune influence de l'eau n'a été notée (jusqu'à une concentration de 140 ppm pour l'huile silicone et 850 ppm pour l'ester). Ceci exclut, donc, le facteur de pertes comme paramètre de vérification de l'humidification de l'huile[14].

I-17.3 Effet des additifs et contaminants

Il est possible d'améliorer certaines caractéristiques d'une huile de transformateur par l'adjonction d'additifs. A titre d'exemple, l'adjonction du perchloroéthylène provoque [45]:

- un abaissement de la viscosité,
- un renforcement du transfert thermique,
- une diminution des décharges partielles,
- une élévation de la tension de claquage,

mais provoque une augmentation du facteur de pertes diélectriques.

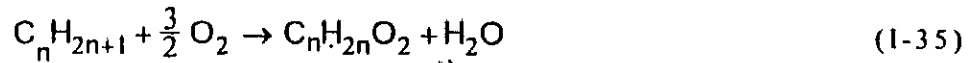
I-17.4 Profil du champ électrique

La modification du profil du champ électrique dans une huile de transformateur, soumise à une tension continue, va dépendre des produits de la dégradation[46].

Ainsi, les premiers résidus de dégradation et les acides n'affectent pas le profil du champ. A l'opposé, la présence de sels minéraux ou une détérioration très prononcée de l'huile vont conduire à une création de charges d'espace qui modifient la répartition du champ électrique.

I-17.5 L'eau dans l'huile de transformateur

L'eau normalement trouvée dans l'huile de transformateur peut y avoir été introduite soit par équilibre physico-chimique avec l'air atmosphérique, soit par réaction d'oxydation de l'huile suivant le schéma :



soit encore par une réaction de condensation[47].

Cette eau peut se trouver sous diverses formes, liée ou libre, intervenant différemment sur le comportement électrique du liquide. L'eau libre, dissoute dans une huile neuve, se fixerait progressivement à l'huile en cours de dégradation, par un processus radicalaire. La fixation de l'eau libre en eau liée augmenterait l'angle de pertes diélectriques du fait des insaturations et des radicaux polaires, mais elle aurait plutôt tendance à améliorer la rigidité diélectrique, car c'est l'eau libre qui, en produisant des charges d'espaces, serait la plus dangereuse du point de vue de la rigidité.

CHAPITRE II

Techniques Expérimentales

II-1 INTRODUCTION

Le présent travail se compose de deux parties :

La première consiste à mettre en relief l'influence de la température sur certaines caractéristiques de l'huile utilisée, à savoir: le facteur de pertes diélectriques " $\text{tg } \delta$ ", la permittivité relative " ϵ_r ", la résistivité " ρ " et la viscosité cinématique " η ". Nous avons, également, mesuré la teneur en eau et la densité de l'huile.

Nous avons conduit ces mesures sur un même type d'huile, dans différents états de pureté: neuf, usagé et régénéré.

Dans la deuxième partie, nous nous sommes intéressés au comportement de l'huile en phase de préclaquage, lorsqu'elle est soumise à une tension alternative (50Hz), dans un système d'électrodes pointe-plan. Nous avons étudié, en particulier, l'effet de la distances inter-électrodes, du rayon de courbure de la pointe ainsi que l'état de pureté de l'huile sur le courant injecté et la charge mise en jeu.

II-2 HUILE UTILISEE

L'huile utilisée, dénommée Borak 22, est une huile minérale employée par la SONELGAZ pour le remplissage des transformateurs. Dans notre étude, nous avons étudié cette même huile dans trois états de pureté différents : neuve, usagée et régénérée.

L'huile usagée est récupérée à partir de transformateurs de 3kV, après une durée de service de 5 années. Elle est filtrée et dégazée avant les essais.

L'huile régénérée est obtenue à partir d'une huile usagée que nous avons régénérée suivant le procédé acide-terre adopté par la SONELGAZ, tout en apportant certaines modifications.

Ce procédé se présente en 6-étapes :

étape 0 : Elimination des impuretés mécaniques par filtration puis dégazage.

étape 1 : Traitement de l'huile à l'acide sulfurique à 95% , à raison de 5% en volume.

étape 2 : Première décantation d'une durée de 24 heures, à l'issue de laquelle, on obtient un dépôt de boues acides et une huile acidifiée.

étape 3 : Neutralisation de l'huile acidifiée avec de la potasse (KOH).

étape 4 : Traitement de l'huile à la bentonite de Maghnia, à raison de 3% en masse.

La bentonite est préalablement activée à une température de 100°C.

étape 5 : Deuxième décantation.

étape 6 : Filtrage de l'huile.

II-3 PROPRIETES MESUREES DE L'HUILE

Les mesures ci-dessous ont été effectuées au niveau du Laboratoire 'Essais, Contrôle et Mesures' de Hamma/SONELGAZ à l'exception de la mesure de la résistivité qui a été réalisée au Laboratoire de Mesures de l'ENICAB/Gué de Constantine.

II-3.1 Mesure du facteur de pertes diélectriques " $\text{tg } \delta$ " et de la permittivité relative " ϵ_r " :

Nous avons mesuré le facteur de pertes diélectriques " $\text{tg } \delta$ " et la permittivité relative " ϵ_r " avec un pont de Schering TETEX 2801 selon la norme CEI-250[48]. Les mesures ont été effectuées sous une tension alternative (50Hz) de 2kV, une distance inter-électrodes de 5mm et sous une température variant de 23°C à 100°C.

II-3.2 Mesure de la résistivité " ρ " :

La résistivité " ρ " est mesurée à l'aide d'un mégohmmètre selon la norme CEI-93[49]. Les mesures ont été effectuées sous une tension continue de 500V, appliquée durant 10mn, et sous une température variant de 23°C à 100°C.

II-3.3 Mesure de la viscosité cinématique " η " :

La viscosité cinématique " η " a été mesurée selon la norme NFT 60-100[50]. Pour des températures variant de 30°C à 100°C, on procède à la mesure du temps d'écoulement d'un volume du liquide dans un viscosimètre à capillaire en verre de type ATPEM 14760 BREVILLE. La viscosité cinématique est le produit de ce temps par la constante de temps d'étalonnage de l'appareil.

II-3.4 Mesure de la teneur en eau :

La teneur en eau a été mesurée selon la norme ISO.R.760[51].

II-3.5 Mesure de la densité

La densité a été mesurée avec un densimètre à colonne étalonné.

II-4 MESURES DE COURANT ET DE CHARGE ELECTRIQUES

Les mesures de courant et de charge électrique sont réalisées au Laboratoire de Haute de Tension de l'ENP moyennant un dispositif de mesures composé d'un circuit d'essais (Figure II-1) et d'une cellule de mesures :

II-4.1 Circuit d'essais :

Le circuit d'essais (Figure II-1) est constitué d'une source de tension et d'un dispositif de mesure.

Source de tension : Un transformateur, de type WALTER (100 kV-2 kVA), délivre une tension alternative de fréquence 50Hz.

Dispositif de mesure : On procède à des mesure de courant et de charge.

La mesure du courant est déduite de la tension relevée aux bornes d'une résistance de 110 k Ω placée en série avec la cellule ($I=U/R$).

La charge (Q) mise en jeu dans le système est déduite de la mesure de la tension U_c aux bornes d'un condensateur C placé en série avec la cellule ($Q=C U_c$). La capacité du condensateur est de 0.1 μ F.

L'énergie totale du système est déduite de la mesure de charge, par la relation $W=Q.U$ (U étant la tension appliquée).

Les signaux du courant et de la charge sont visualisés au moyen d'un oscilloscope à mémoire de type PHILLIPS PM 3305 35 Mhz.

II-4.1 Cellule de mesures :

La cellule de mesure est constituée d'un corps en Téflon et comporte:

- deux hublots en Pyrex permettant la visualisation d'éventuels phénomènes.
- deux bouchons en Téflon permettant le remplissage et la vidange.
- une électrode plane en Duralumin de 25mm de diamètre et une électrode pointe amovible de rayon de courbure variable ($r_p=19.1\mu\text{m}$, $27.5\mu\text{m}$ et $360\mu\text{m}$).

Les rayons de courbure des pointes sont mesurées à l'aide d'un microscope optique permettant un grossissement de 100 fois.

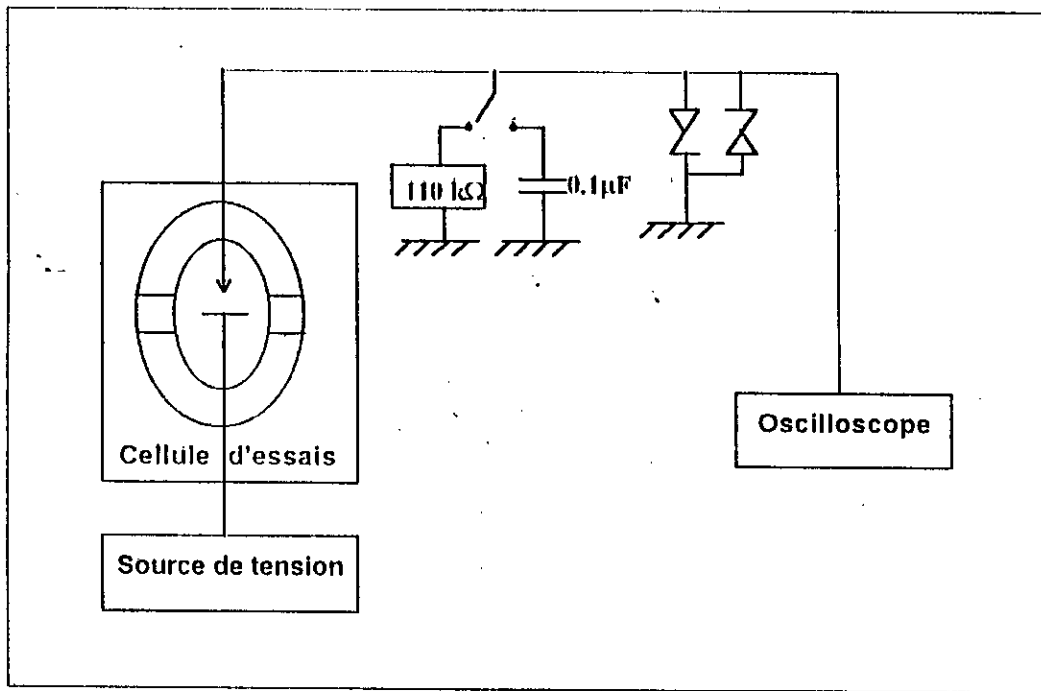


Figure II-1 : Circuit d'essais

II-5 MODE OPERATOIRE

Pour une meilleure fiabilité des résultats, une certaine série d'étapes à suivre s'impose.

II-5.1 Préparation de la cellule

Avant chaque série d'essais, la cellule est nettoyée avec de l'acétone puis séchée dans une étuve, en présence de silica gel, à 70°C , pendant une heure, afin d'éliminer toute trace d'humidité.

On procède, avec une pipette, à un remplissage laminaire de la cellule en évitant toute formation de bulle d'air dans le liquide.

II-5.2 Conduite des essais

Une série de mesures est obtenue en faisant varier la tension de 0 à $\sim 5\text{ kV}$, avec un pas de 600V. Pour chaque niveau de tension, le signal est figé sur l'oscilloscope et les mesures sont notées.

L'opération est répétée une dizaine de fois.

La valeur de chaque mesure est la moyenne arithmétique de ces 10 essais.

Après chaque série, le liquide est laissé au repos pendant 3mn; c'est le temps minimum pour avoir une bonne reproductibilité des résultats .

A chaque changement de distance ou de pointe, l'échantillon d'huile est changé.

CHAPITRE III

*Résultats Expérimentaux
Et
Commentaires*

III-1 INTRODUCTION

Nous présentons, en première partie, les résultats expérimentaux sur l'évolution de quelques caractéristiques de l'huile de transformateur neuve, usagée, régénérée. Celle-ci concerne l'influence de la température sur le facteur de pertes diélectrique, la permittivité relative, la résistivité, la viscosité cinématique ainsi que la détermination de la teneur en eau et la densité.

En seconde partie, nous nous intéressons à l'évolution du courant, de la charge et de l'énergie sous l'influence des paramètres suivants: le rayon de courbure de la pointe, la distance inter-électrodes ainsi que l'état de pureté de l'huile, et ce dans un champ divergent alternatif de fréquence 50 Hz.

En dernier lieu, nous tentons d'évaluer le rayon moyen de la perturbation générée suite à l'application de cette contrainte électrique.

III-2 PROPRIETES DE L'HUILE DE TRANSFORMATEUR

III-2.1 Facteur de pertes diélectriques ' $\text{tg}\delta$ '

1. Effet de la température

Le facteur de pertes diélectriques augmente, en exponentiel, en fonction de la température pour l'huile neuve, usagée et régénérée (Figure III-1). Ce résultat est similaire à celui obtenu par d'autres auteurs dans des hydrocarbures simples[12], des huiles silicones [14], l'huile minérale neuve [45,51] ainsi qu'usagée et régénérée [52].

Cette évolution est due en même temps à la réduction de la viscosité causant une augmentation de la mobilité des porteurs de charges et à l'augmentation du nombre des porteurs par une plus grande dissociation thermique.

Nous remarquons, par ailleurs, qu'une régénération de l'huile usagée engendre une nette amélioration du facteur de pertes diélectriques en raison de l'élimination de produits catalytiques tels que l'eau ou les particules métalliques (cuivre, fer). Son facteur de pertes est plus faible que celui de l'huile neuve. Ceci pourrait s'expliquer, en particulier, par de mauvaises conditions de stockage de cette dernière.

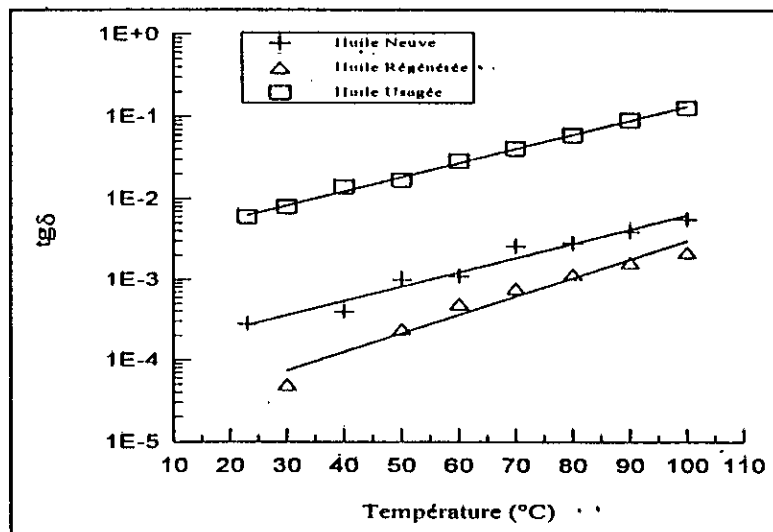


Figure III-1: Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la température.

2. Effet de la tension

En appliquant une tension variable de 0 à 2kV (ce qui correspond à un champ maximal de 10kV/cm), aucune variation de $tg\delta$ n'est observée pour des températures variant de 23 à 100°C et ce quelque soit l'état de pollution de l'huile (Figure III-2,3).

Ce résultat est semblable à celui obtenu par d'autres auteurs dans le cas des huiles neuves avec et sans additifs [51,52]. Il pourrait s'expliquer, pour notre cas, par le fait que le niveau de champ atteint (10kV/cm) n'est pas suffisant pour provoquer une quelconque variation de la conduction.

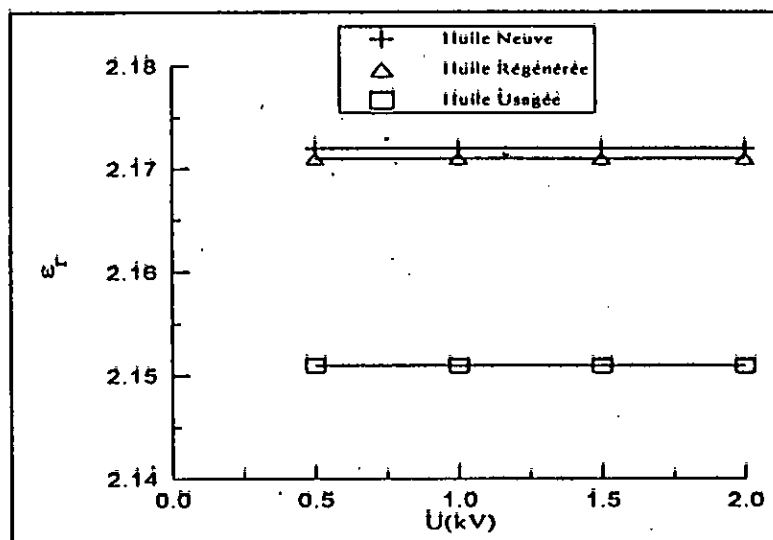


Figure III-2 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension à $T=40^\circ\text{C}$.

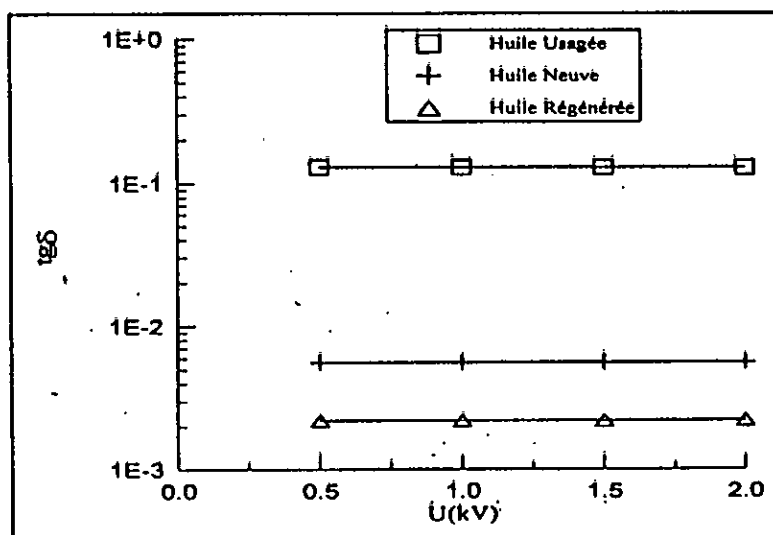


Figure III-3 : Variation du facteur de pertes diélectriques en fonction de la tension à $T=100^\circ\text{C}$.

III-2.2 Permittivité relative ' ϵ_r '

1. Effet de la température

La permittivité relative décroît faiblement avec la température, et ce pour les 3 huiles. Cette diminution est pratiquement de 1‰ (Figure III-4).

Les permittivités de l'huile neuve et usagées demeurent inchangées. Ceci permet de dire que la permittivité est un paramètre très peu affecté par l'usage, à l'opposé du facteur de pertes diélectriques.

Nous constatons aussi que l'huile régénérée a une constante diélectrique plus faible que celle de l'huile neuve. Cependant, l'écart est faible et diminue lorsque la température augmente. Ceci revient à l'élimination de l'eau qui s'évapore de l'huile neuve.

2. Effet de la tension

De même que pour $\text{tg}\delta$, la permittivité relative ne subit pas de variation lorsque le champ varie de 0 à 10 kV/cm (Figure III-5,6).

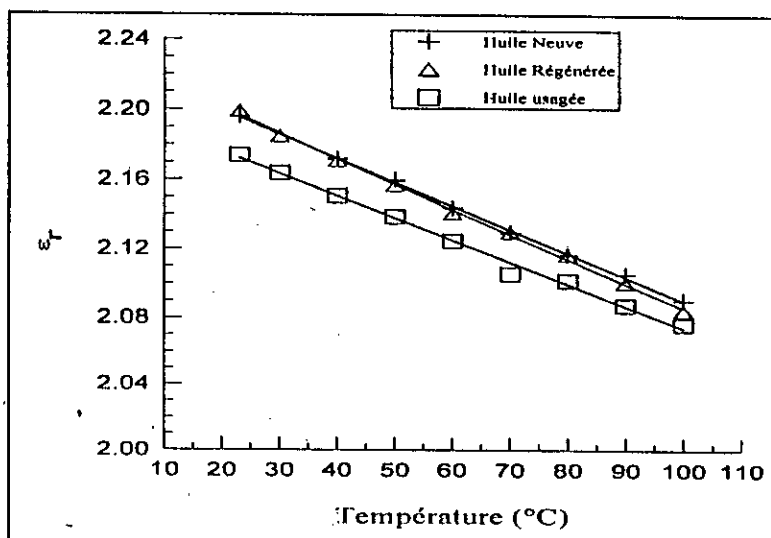


Figure III-4 : Variation de la permittivité relative ' ϵ_r ' en fonction de la température.

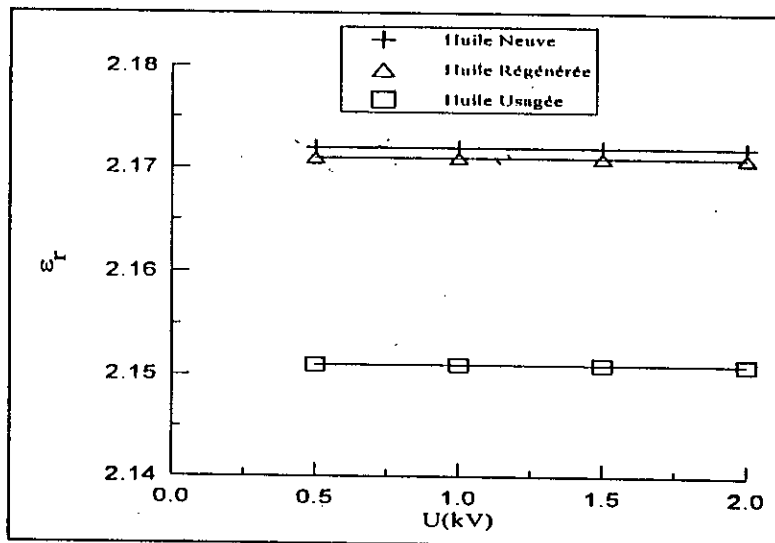


Figure III-5 : Variation de la permittivité relative 'εr' en fonction de la tension à T=40°C.

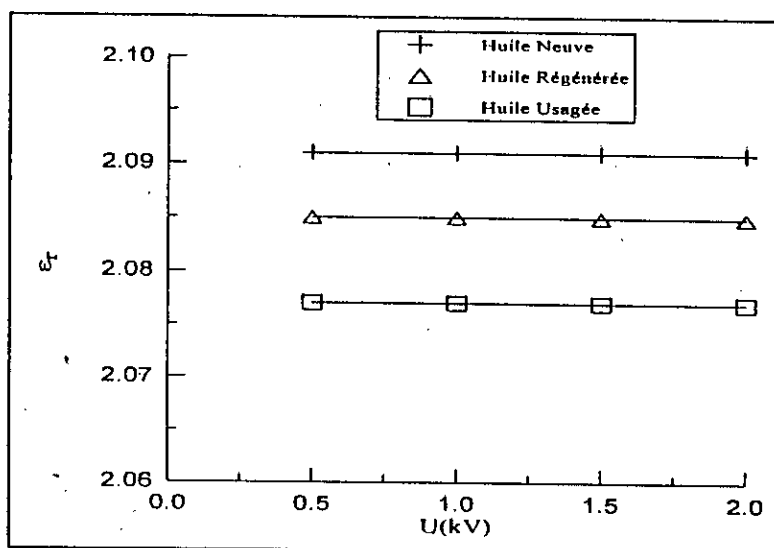


Figure III-6 : Variation de la permittivité relative 'εr' en fonction de la tension à T=100°C.

III-2.3 Résistivité transversale ' ρ '

La résistivité décroît en fonction de la température selon une loi du type $\log \rho = A.T$ (Figure III-7).

Une amélioration de cette propriété est obtenue après la régénération de l'huile. Toutefois cette opération n'a pas permis d'atteindre les performances de l'huile neuve pour des températures supérieures à 36 °C.

III-2.4 Viscosité cinématique ' η '

La viscosité diminue quand la température augmente (Figure III-8, 9). Elle est la même pour les 3 huiles. Toutefois, au delà de 90°, la viscosité de l'huile régénérée, comme celle de l'huile usagée, chute brusquement ; elle passe d'environ 3cSt à 90° à 10⁻²cSt à 100°C.

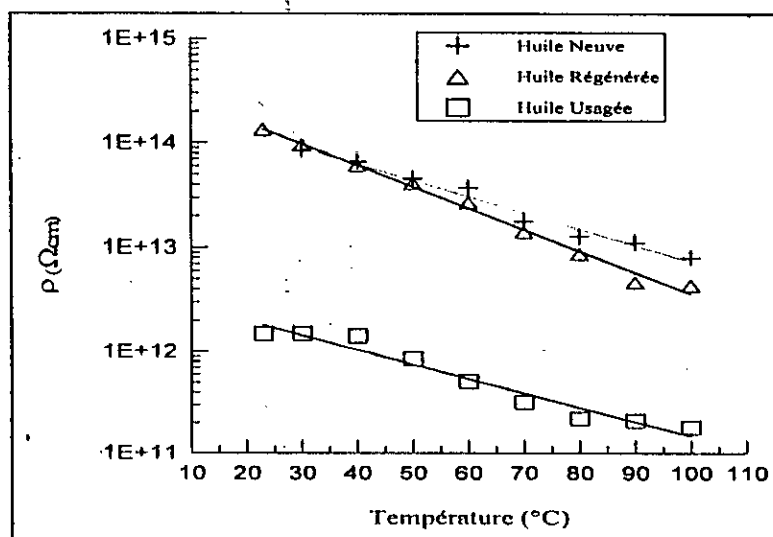


Figure III-7: Variation de la résistivité ' ρ ' en fonction de la température.

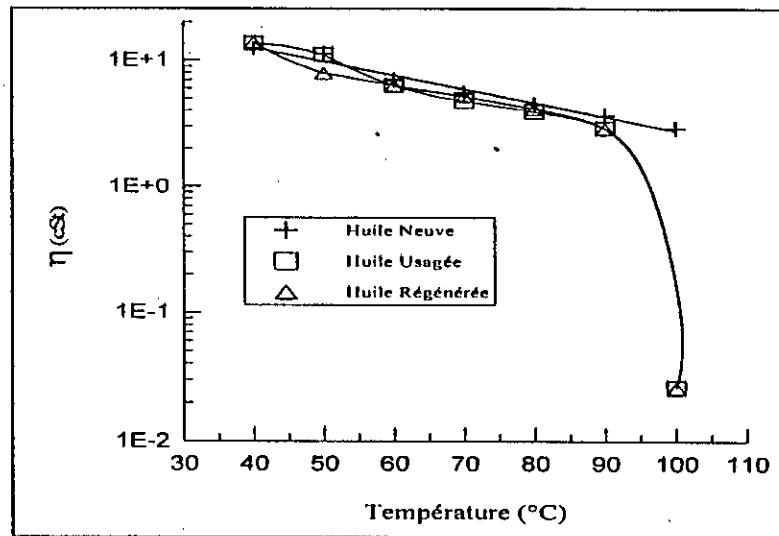


Figure III-8 : Variation de la viscosité η en fonction de la température.

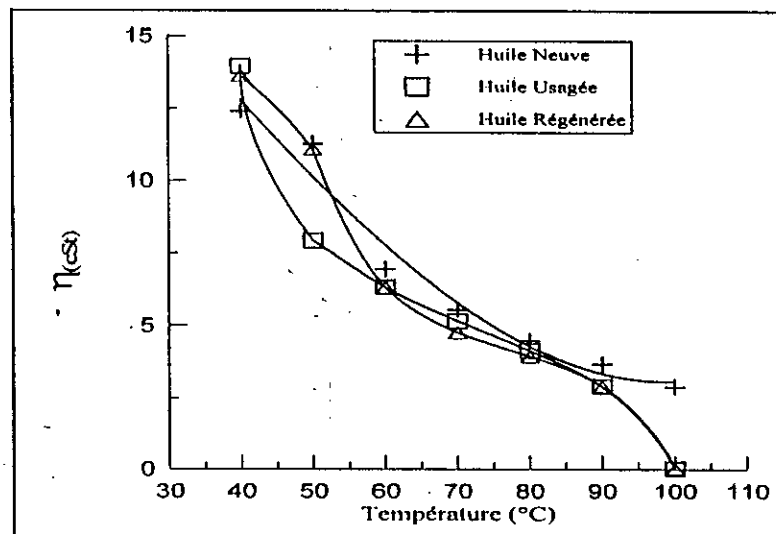


Figure III-9 : Variation de la viscosité η en fonction de la température.

III-2.5 Teneur en eau

La mesure de la teneur en eau, dans chaque huile, a donné les résultats suivants (Tableau III-1):

Etat de l'huile	Teneur en eau (p.p.m)
Neuf	27.75
Usagé	40.37
Régénéré	16.23

Tableau III-1 : Teneur en eau de l'huile de transformateur.

Nous voyons bien (Tableau III-1) que le vieillissement de l'huile à provoquer une augmentation de la teneur en eau qui est passée de 27.75 p.p.m pour l'huile neuve à 40.37 p.p.m pour l'huile usagée. La présence de cette eau peut être la conséquence du contact de l'huile avec l'atmosphère ou le produit d'une oxydation de l'huile selon la réaction suivante :



III-2.6 Densité

La mesure de densité a donné:

Etat de l'huile	Teneur en eau (p.p.m)
Neuf	0.850
Usagé	0.962
Régénéré	0.960

Tableau III-2 : Densité de l'huile de transformateur.

La densité de l'huile neuve, égale à 0.850, est passée à 0.962 pour l'huile usagée. Cependant, la régénération n'a pas provoqué de variation appréciable de la densité.

II-2.7 Conclusion

L'ensemble des mesures entreprises a permis d'apprécier l'effet, en chaîne, de la température sur l'huile de transformateur. En effet, le chauffage de cette dernière conduisant à l'affaiblissement des forces d'adhésion des molécules du liquide, il s'en suit une baisse de la viscosité. Le milieu, plus fluide, va permettre un déplacements beaucoup plus rapide des porteurs de charges dont le nombre s'est accru à cause de la dissociation thermique.

La combinaison de tous ces phénomènes se traduit par une détérioration globale de la qualité du diélectrique.

Une amélioration de ces propriétés a été réalisée par une régénération de l'huile. Il est à noter, toutefois, que si un bon résultat a été enregistré pour des caractéristiques aussi importantes que le facteur de pertes diélectriques et la teneur en eau, il n'en demeure pas moins que d'autres paramètres (viscosité, résistivité) n'ont fait l'objet que d'une amélioration restreinte dans une certaine plage de température[55].

III-3 MESURE DU COURANT DE PRECLAQUAGE

III-3.1 Description des phénomènes

Le courant est un signal alternatif qui présente des 'déformations'. Ces déformations se présentent sous la forme de pics et se situent dans le deuxième quart de chaque alternance. Le même phénomène a été constaté dans des diélectriques liquides purs soumis à une contrainte alternative (50Hz) [20].

Ces chutes de courant pourraient être dues à la diminution de la capacité du système.

En effet, des travaux antérieurs [19,20,53,54] ont montré que l'application d'une tension alternative à un liquide isolant engendre un courant de type capacitif. En reportant le signal de la tension sur l'oscillogramme du courant, il s'avère que les chutes n'ont lieu que lors de l'arche croissant de la tension. Ce fait a été également relevé par d'autres auteurs aussi bien dans les faibles intervalles d'huile [19,55] que les grands [56].

L'application d'une tension engendre un courant dont l'expression est la suivante [57]

$$i = \frac{d}{dt}(CU) = U \frac{dC}{dt} + C \frac{dU}{dt} \quad \text{(III-2)}$$

Les pics ont lieu sur un intervalle de temps assez faible [4,9] pour que la tension puisse être considérée constante. Par conséquent, le pic de courant résulte de la variation de la capacité du système.

$$i = U \frac{dC}{dt} = i_p \quad \text{(III-3)}$$

En approximant le système pointe-plan par deux sphères concentriques de rayons (r_p) et (r_p+d), on a:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon}{\frac{1}{r_p} + \frac{1}{r_p+d}} \approx 4\pi\epsilon_0\epsilon_r r_p \quad (r_p + d \gg r_p) \quad \text{(III-4)}$$

d'où:

$$i_p = 4(\pi\epsilon_0\epsilon) \frac{d(\epsilon_r r_p)}{dt} U \quad \text{(III-5)}$$

Des analyses de l'état de surface de la pointe [22] révèlent qu'à cause de l'érosion, le rayon de courbure a tendance à s'agrandir. Donc r_p ne peut qu'augmenter.

Par ailleurs, le passage d'un courant dans le diélectrique liquide va provoquer le chauffage de ce dernier conduisant à une diminution de la permittivité du milieu (Figure III-4).

Par conséquent, les pics observés seraient dus à la diminution de la capacité du système par suite de la baisse de permittivité de l'huile.

III-3.2 Caractéristique courant-tension I (U)

Dans ces caractéristiques, nous nous intéressons aux valeurs maximales positive et négative du courant (Figure III-9). Nous constatons que la variation est linéaire pour les deux cas. Les amplitudes positives du courants sont, généralement, les plus grandes.

La même allure de variation et les mêmes ordres de grandeurs sont retrouvés dans les hydrocarbures de structure simples sous contrainte alternative [20].

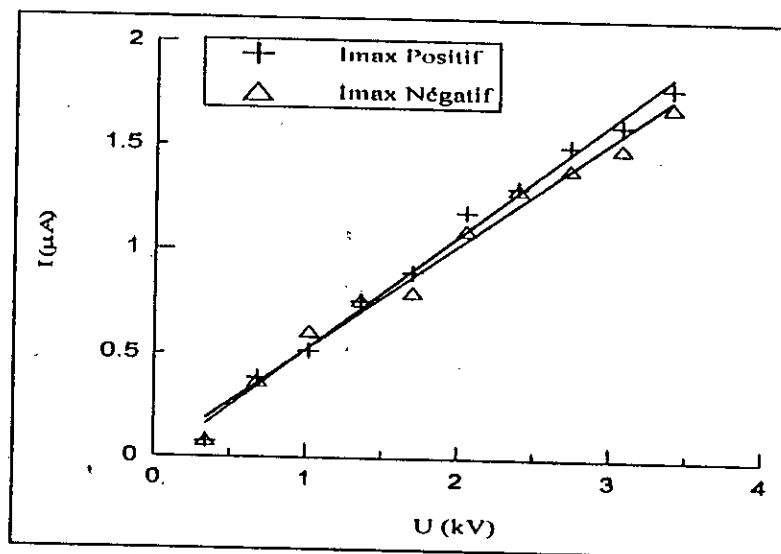


Figure III-9: Evolution des valeurs maximales positive et négative du courant dans l'huile neuve en fonction de la tension ($r_p=360\mu\text{m}$, $d=2\text{mm}$).

Aux premiers niveaux de tension, l'amplitude maximale du courant (I_{max} positif) correspond à l'alternance négative de la tension. Par la suite, une inversion s'opère et c'est lors de l'alternance positive de la tension que l'on relève la plus grande amplitude de courant. Cela signifierait que les premières perturbations, qui correspondent à la phase de génération, ont lieu lorsque la pointe est négative par contre leur propagation se fait plus aisément quand la pointe est positive.

En effet, en se référant à d'autres travaux menés sous tension continue [21,27], il s'avère que la génération dans les diélectriques liquides purs a lieu d'abord en pointe cathode. Par contre le développement des perturbations, dans une huile de transformateur, est plus facile quand la pointe est anode[17].

i. Effet du rayon de courbure de la pointe (r_p)

Quel que soit le rayon de courbure de la pointe, le courant augmente linéairement en fonction de la tension (Figure III-10). Il est d'autant plus fort que la pointe est fine. Ceci confirme l'effet du champ électrique sur l'amplitude du courant.

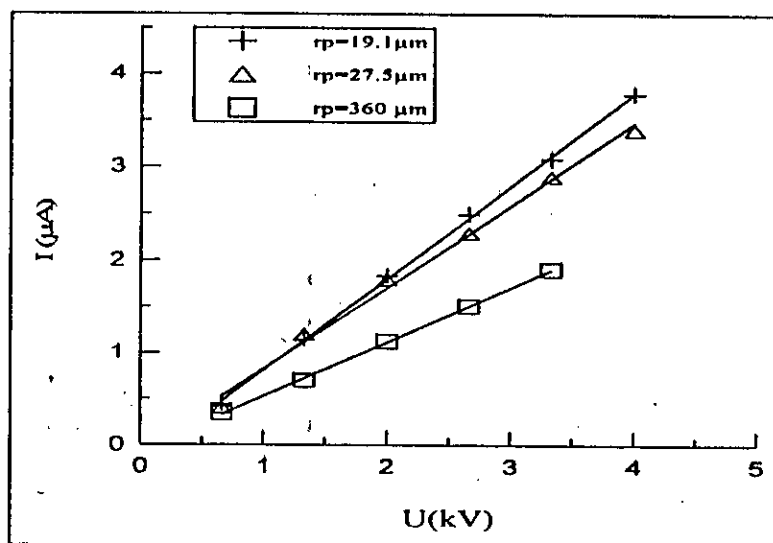


Figure III-10 : Variation du courant en fonction de la tension dans l'huile neuve, pour différents r_p , ($d=2\text{mm}$).

2. Effet de la distance inter-électrodes (d)

Les courants relevés pour la plus grande distance (d=6mm) sont supérieures à ceux mesurés pour (d=2mm) (Figure III-11,12).

Le même effet est également retrouvé dans les hydrocarbures simples sous tension continue [26] et alternative[20].

Il est à noter, dans notre cas, qu'une multiplication par 3 de l'intervalle inter-électrodes n'engendre pas d'importantes variations sur le courant.

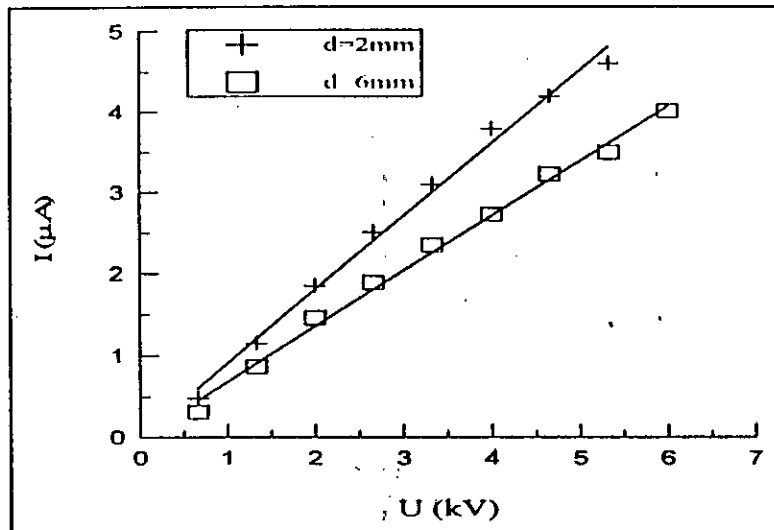


Figure III-11 : Variation du courant en fonction de la tension dans l'huile neuve, pour différents d, ($r_p=19.1\mu\text{m}$).

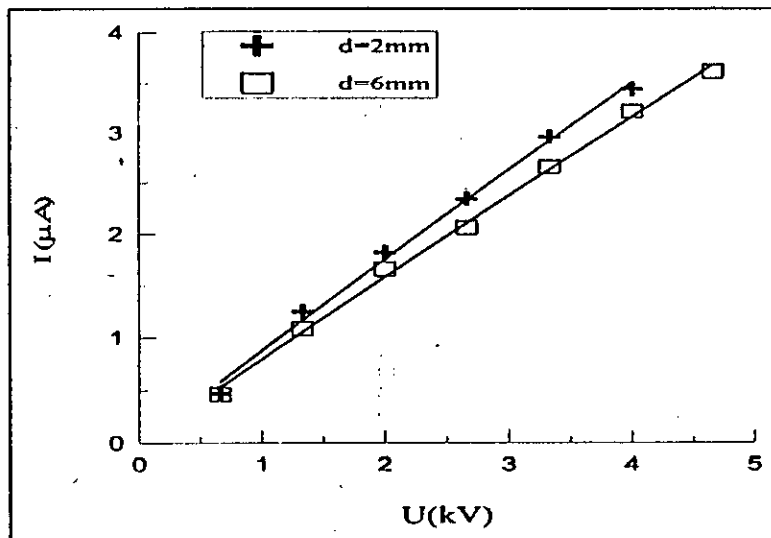


Figure III-12 : Variation du courant en fonction de la tension dans l'huile neuve, pour différents d, ($r_p=27.5\mu\text{m}$).

3. Effet de l'état de pureté de l'huile

On trace, pour les deux huiles, la variation de la valeur maximale du courant en fonction de la tension.

A distance inter-électrodes et rayon de courbure de la pointe fixés, le courant mesuré dans l'huile usagée est plus important que dans la neuve avec, toutefois, la même allure de variation (Figure III-13).

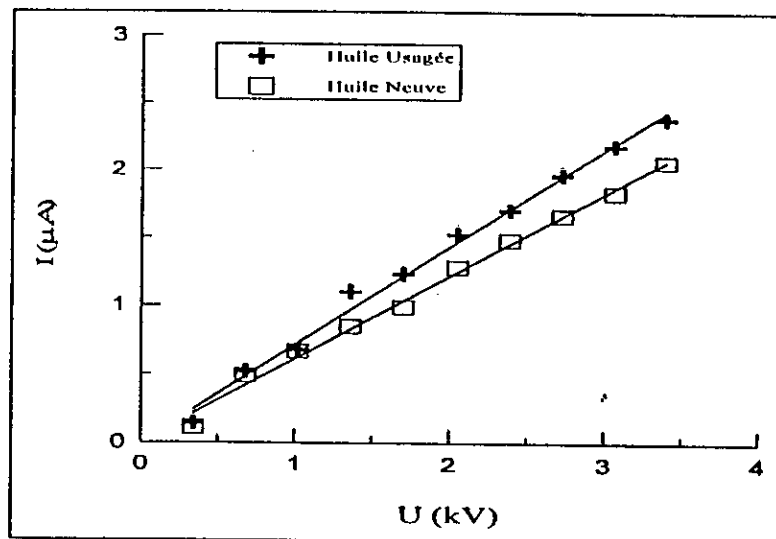


Figure III-13: Variation du courant en fonction de la tension dans l'huile neuve et usagée ($r_p=360\mu\text{m}$, $d=2\text{mm}$).

Nous constatons que, pour les niveaux de tension auxquels nous nous sommes intéressés, la différence de courant, en passant de l'huile neuve à l'huile usagée n'est pas importante.

III-3.3 CARACTERISTIQUES DES PICS DE COURANT

Après avoir identifié les perturbations au niveau du signal de courant, il est intéressant de suivre leur évolution en fonction de la tension ainsi que l'effet de l'alternance.

On définit la chute de courant (ΔI) comme étant la différence entre la valeur maximale et minimale de la perturbation du courant dans une même alternance.

ΔI^- : correspond à la chute du courant dans l'alternance négative.

ΔI^+ : correspond à la chute du courant dans l'alternance positive.

1. Effet de la tension

Pour observer cet effet, nous avons pris en considération la chute de courant de l'alternance négative ΔI . Nous comparons, par la suite les résultats obtenus pour les deux alternances.

La courbe donnant l'évolution de la chute de courant (Figure III-14) peut être subdivisée en deux parties:

- aux premiers niveaux de tension (jusqu'à environ 2kV), l'évolution est linéaire.
- pour $U > 2kV$, l'évolution devient exponentielle. Ce changement d'allure pourrait être expliqué par la génération, au sein du liquide, d'une perturbation.

Il est connu que l'application d'une contrainte électrique à un diélectrique liquide donne naissance à une bulle [21,22,23,24]. Cette génération se produit à un certain niveau de tension. Sous tension continue[21], la perturbation est détectée grâce aux émissions lumineuses qu'elle provoque et les impulsions de courant qui accompagnent chaque naissance de bulle. Par analogie à ces travaux, nous avons associé le niveau de génération à la tension à laquelle une transition a lieu dans l'évolution des chutes de courant.

En effet, en calculant, pour ce cas de figure ($r_p=27.5\mu m$, $d=6mm$) le champ au niveau de la pointe correspondant à la tension de transition (équation III-6), on trouve: $E_p=20MV/m$. Des champs de génération du même ordre de grandeur sont retrouvés en tension alternative, dans des hydrocarbures tels que: le benzène ($E_p=30.75MV/m$) et le cyclohexane ($E_p=30.5MV/m$) [20].

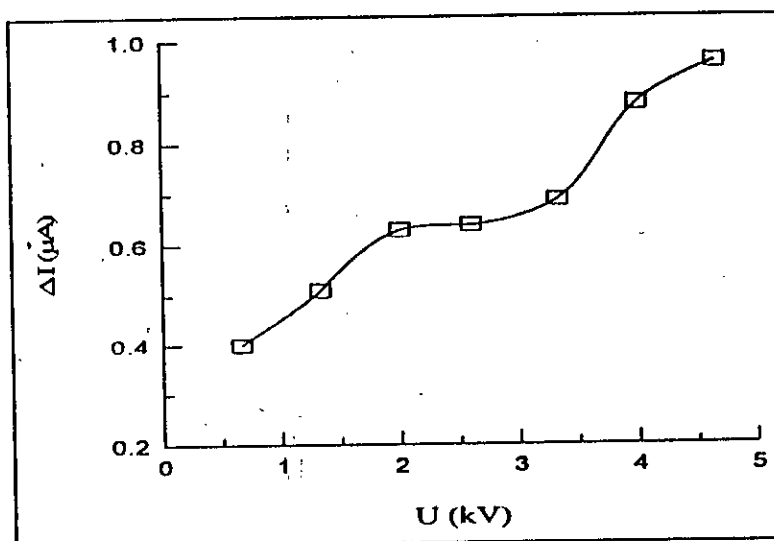


Figure III-14: Chute de courant positif en fonction de la tension dans l'huile neuve ($r_p=27.5\mu m$, $d=6mm$).

2. Effet de l'alternance

Les chutes de courants négatifs (ΔI^-) sont supérieures aux chutes de courants positifs (ΔI^+) (Figure III-15). Ce qui revient à dire que les perturbations les plus importantes sont enregistrées quand la pointe est négative.

Par ailleurs, en mesurant l'amplitude du premier pic de courant généré suite à l'application d'une tension continue à des diélectriques liquides purs, Guerbas[27] retrouve le même résultat, à savoir que le courant est plus important quand la pointe est négative.

Ce fait suggère que les mécanismes de génération diffèrent d'une polarité à l'autre. Ce résultat a été obtenu par Bérroual(55) dans une étude sur les mécanismes de génération dans les diélectriques liquides et leur rapport avec la polarité de la tension appliquée.

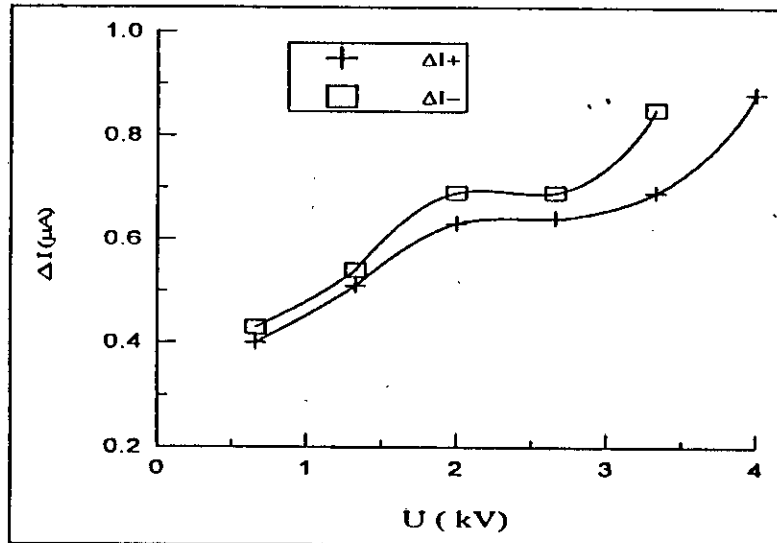


Figure III-15: Evolution des chutes de courant positif et négatif dans l'huile neuve ($r_p=27.5\mu m$, $d=6mm$).

3. Effet de l'état de pureté de l'huile

Dans le cas de l'huile usagée (Figure III-16), les chutes de courant négatif (ΔI^-) adoptent un caractère très oscillant. Néanmoins, elles demeurent toujours supérieures aux chutes de courant positif.

Les chutes de courant positif (ΔI^+) conservent la même allure de variation que dans le cas d'une huile neuve.

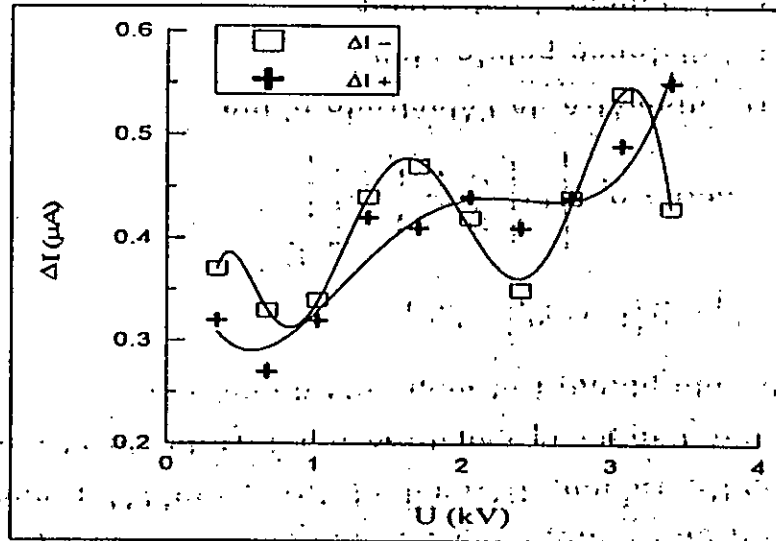


Figure-III-16 : Evolution des chutes de courant dans l'huile usagée ($r_p=360\mu\text{m}$, $d=2\text{mm}$).

III-4 LA CHARGE TOTALE INJECTEE Q_t

La charge Q_t mesurée représente la charge totale injectée dans le système pour un niveau de tension donné.

Le signal $Q_t(t)$ est une sinusoïde dont l'amplitude augmente en fonction de la tension d'une façon linéaire (Figure-III-17; 18).

1. Effet de la distance inter-électrodes

La charge injectée pour un écartement de 2 mm est supérieure à celle correspondant à un écartement de 6 mm (Figure III-17). Ceci pourrait être dû à la réduction du champ appliqué à la pointe suite à l'écartement des électrodes.

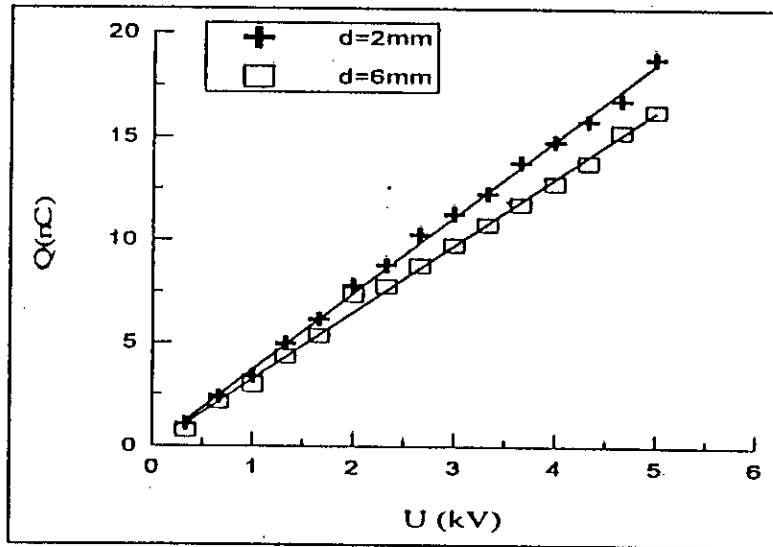


Figure III-17: Effet de la distance sur la charge injectée dans l'huile neuve ($r_p=27.5\mu\text{m}$).

2. Effet du rayon de courbure de la pointe (r_p)

Les rayons de courbure utilisés ($r_p=27.5$ et $r_p=360\mu\text{m}$) n'ont pas permis d'obtenir une variation de charge observable sur les oscillogrammes (Figure III-18)

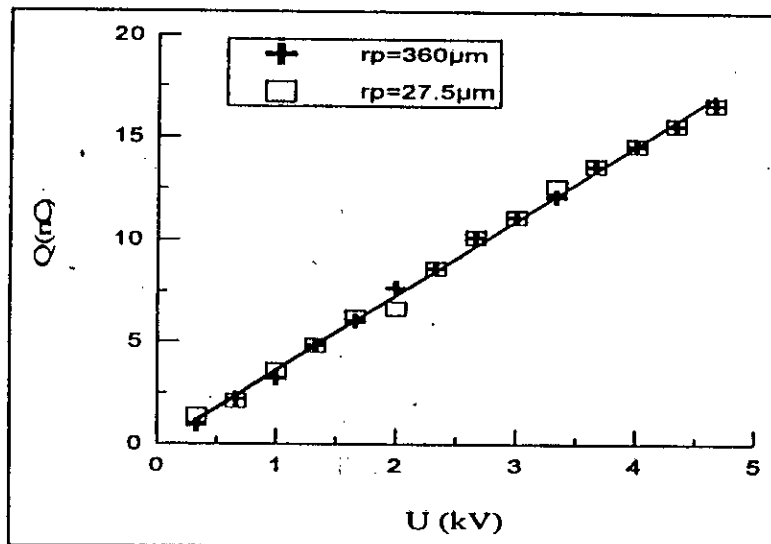


Figure III-18: Effet de r_p sur la charge injectée dans l'huile neuve ($d=2\text{mm}$).

3. Effet de l'état de l'huile

Nous constatons que les charges mises en jeu, lorsque l'huile est neuve ou usagée, sont identiques (Figure III-19).

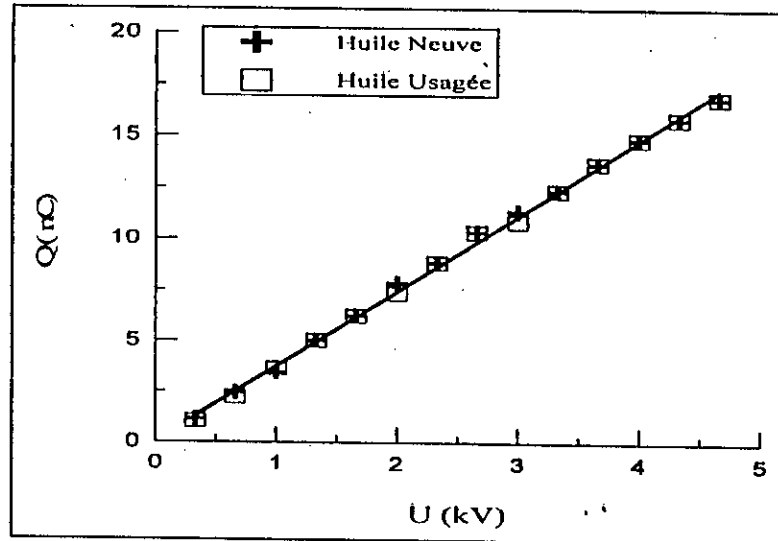


Figure III-19: Effet de l'état de l'huile sur la charge injectée ($d=2\text{mm}$, $r_p=360\mu\text{m}$).

En maintenant le même champ électrique ($r_p, d, =c^{st}$), la libération des électrons dans le liquide, par conséquent l'augmentation de la charge injectée, ne peut être traduite que par une diminution de la permittivité relative. Or, la Figure III-4 montre, qu'à température ambiante, les deux huiles conservent la même permittivité. Pour cette raison, les charges mises en jeu dans l'huile neuve et usagée demeurent, pratiquement, inchangées.

III-5 L'ENERGIE TOTALE DU SYSTEME W_t

L'énergie totale mise en jeu W_t , à un niveau de tension U , est déduite à partir de la mesure de charge, par la relation $W_t = Q_t \cdot U$ (Figure III-20). La caractéristique $W_t(U)$ est identique pour les deux types d'huile utilisées (neuve et usagée).

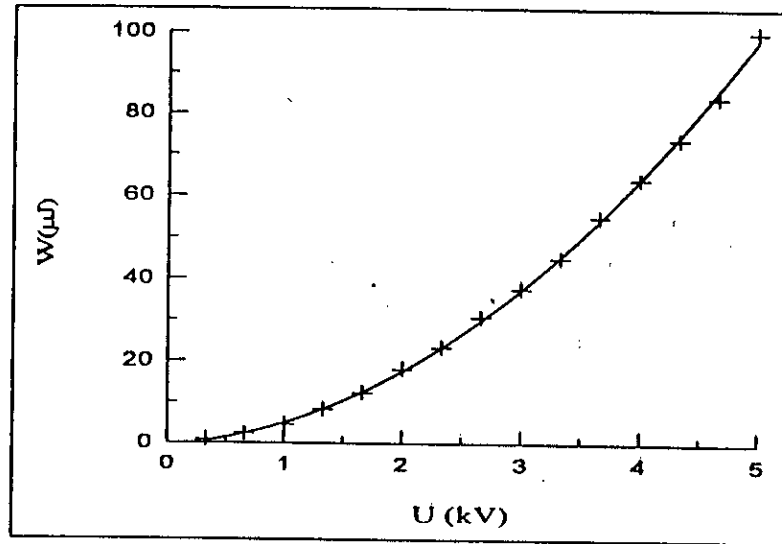


Figure III-20: Variation de l'énergie injectée en fonction de la tension dans l'huile neuve ($r_p=27.5\mu\text{m}$, $d=2\text{mm}$).

III-5.1 Couplage énergie totale (W_t)-énergie de la perturbation (W_p)

L'énergie W_p correspondant à une perturbation de courant est déduite à partir de l'oscillogramme du courant par le calcul de l'aire du triangle dont la base représente la durée de la perturbation " Δt " et la hauteur l'amplitude de la perturbation de courant " ΔI ".

c est une droite de pente égale à 3%. Ce rapport justifie le fait qu'on n'observe pas ces perturbations au niveaux des signaux $Q_i(t)$.

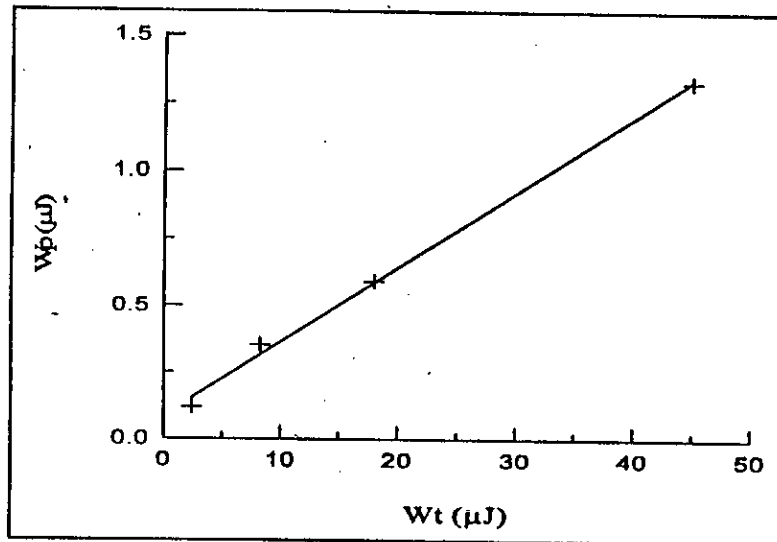


Figure III-21: Variation de l'énergie de la perturbation en fonction de l'énergie totale ($d=2\text{mm}$, $r_p=360\mu\text{m}$).

III-6 ESTIMATION DU RAYON MOYEN DE LA BULLE GENEREE

Nous tentons, dans cette partie, d'estimer le rayon moyen d'une bulle supposée sphérique et de comparer nos résultats avec les rayons calculés dans d'autres travaux concernant des hydrocarbures de structure simples soumis à une tension continue [21,26,27]. Le problème majeur que nous avons rencontré lors du déroulement de nos calculs, concerne la durée de la perturbation. Du fait que nous ne pouvions relever ce paramètre sur l'oscilloscope dont nous disposions (bande passante faible), et par manque de données à ce sujet, particulièrement celles relatives aux huiles minérales isolantes, nous avons porté notre choix sur trois valeurs de temps:

- $\Delta t_1 = 4 \text{ ns}$ par référence à la durée de la perturbation dans le cyclohexane pur sous tension continue [4].
- $\Delta t_2 = 40 \text{ ns}$ par référence aux travaux menés dans le laboratoire de Haute Tension de l'ENP [27,28].
- $\Delta t_3 = 1000 \text{ ns}$; valeur relevée sur nos oscillogrammes de courant et correspondant à la durée totale de la perturbation. Elle représente une limite supérieure que la durée du pic de courant n'atteindra jamais.

Le rayon moyen "Rm" de la bulle est estimé de deux manières différentes:

1^{ère} méthode :

Cette méthode se base sur l'énergie de vaporisation du liquide (§III-5.2). Pour le niveau de tension "Ug" où la génération a lieu (§III-3.3.1), une partie de l'énergie totale du système, notée "Wp" va servir à produire une bulle dont le rayon moyen Rm peut être déduit de la relation (I-9) que nous rappelons ici :

$$Rm = k \sqrt[3]{W_p} \quad (\text{III-7})$$

Le facteur k est une constante qui dépend des propriétés thermiques du liquide et de la pression. Il est donné par l'expression (III-8).

$$k = \left[\frac{3RT_{eb}}{4\pi \int_{T_{amb}}^{T_{cb}} C_p(T) dT + L_v} \frac{1}{P} \right]^{1/3} \quad (\text{III-8})$$

R : constante des gaz parfaits.

Lv : chaleur latente.

Teb : température d'ébullition.

Tamb : température ambiante.

Cp : capacité calorifique.

P : Pression

Nous obtenons dans notre cas, $k=3.44 \times 10^{-3}$.

W_p est l'énergie correspondant à la perturbation. Elle est déduite à partir des oscillogrammes de courant par le calcul de l'aire du triangle rectangle dont la base est la durée de la perturbation, et la hauteur son amplitude.

$$W_p = \frac{1}{2} \Delta t \Delta I U_g \quad (III-9)$$

Pour les 3 durées considérées, nous obtenons les valeurs d'énergie et rayons moyens correspondants suivants:

Δt (ns)	4	40	1000
W_p (J)	$2.36 \cdot 10^{-12}$	$2.36 \cdot 10^{-11}$	$5.9 \cdot 10^{-7}$
R_m (μm)	0.46	0.98	28.85

Tableau III-3: Energie de vaporisation et rayons moyens de la bulle.

2^{eme} méthode :

La génération d'une bulle, au sein du liquide, est accompagnée d'une diminution de la capacité globale du système. Comme les mesures de charges n'ont pas permis d'apprécier de telles variations, nous les déduisons à partir des chutes de courant.

A l'état initial, le système est constitué de la pointe et du plan. En considérant ce système pratiquement équivalent à un système de 2 sphères concentriques de rayons respectifs (r_p) et (r_p+d).

La capacité de ce système est :

$$C_i = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\frac{1}{r_p} - \frac{1}{r_p+d}} \quad (III-10)$$

Une fois que la bulle est générée, le système évolue vers le modèle ① ou ② suivants :

Modèle ① :

On considère que la bulle générée est conductrice.

Le système, ainsi formé, est la mise en parallèle des deux sphères de rayons (r_p+2R_m) et (r_p+d) (Figure III-22).

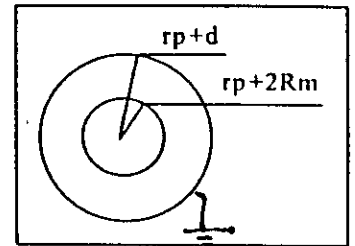


Figure III-22 : Cas d'une bulle conductrice

Modèle ② :

Dans ce second modèle, on considère que la bulle n'est pas conductrice. Le système est le résultat de la mise en parallèle de 3 sphères de rayons (r_p) , (r_p+2R_m) et (r_p+d) (Figure III-23).

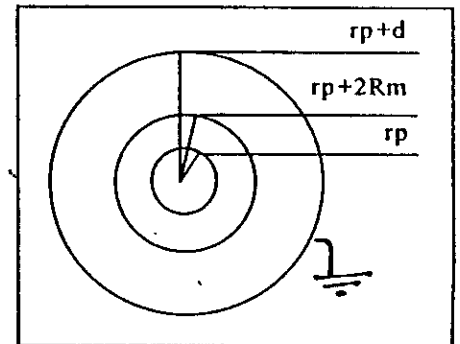


Figure III-23 : Cas d'une bulle non conductrice

L'application d'une tension engendre un courant dont l'expression est :

$$i = \frac{d(CU)}{dt} = U \frac{dC}{dt} + C \frac{dU}{dt} \quad (III-11)$$

La tension étant constante durant l'intervalle de génération et égale à U_g , l'expression du courant devient:

$$i = U_g \frac{dC}{dt} = i_p = U_g \frac{C - C_i}{\Delta t} \quad (III-12)$$

où :

i_p : l'amplitude de la perturbation de courant durant l'intervalle Δt .

C : la capacité du système après perturbation déduite des modèles ① et ②.

C_i : la capacité initiale du système avant perturbation.

Δt : durée de la perturbation de courant.

U_g : la tension de génération.

A partir des équations (III-10 et 12), on détermine le rayon moyen R_m de la bulle par les relations suivantes :

cas de la bulle conductrice:

$$R_{m2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_1} - r_p \right) \quad \text{avec : } k_1 = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r U_g}{ip\Delta t + C_i U_g} + \frac{1}{r_p + d} \quad \text{(III-13)}$$

cas de la bulle non conductrice:

$$R_{m3} = \frac{1 - \epsilon_r - k_2 \epsilon_r r_p}{2\epsilon_r k_2} \quad \text{avec : } k_2 = \frac{4\pi\epsilon_0 U_g}{ip\Delta t + C_i U_g} + \frac{1}{\epsilon_r (r_p + d)} - \frac{1}{r_p} \quad \text{(III-14)}$$

Pour les valeurs expérimentales suivantes: $r_p=27.5\mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.2$, $d=2\text{mm}$, et pour la tension de génération $U_g = 2\text{kV}$, on obtient:

Δt (ns)	4	40	1,000
$R_{m\textcircled{1}}$ (nm)	(-)2.34	(-)23.4	(-)1.42×10 ⁺⁶
$R_{m\textcircled{2}}$ (nm)	1.96	19.6	(-)6.28×10 ⁺³

Tableau III-4 Rayons moyens de la bulle dans le cas conducteur et non conducteur.

La première méthode aboutit à des rayons de même ordre de grandeur que les rayons rapportés par la littérature concernant les diélectriques liquides purs [21,26,27]. Cependant, pour $t=1\text{ms}$ il semble que l'on soit plutôt en présence d'un streamer vu le rayon ($R_m=28.85\mu\text{m}$) résultant [40,41].

Concernant la deuxième méthode, les rayons donnés par le modèle ① sont négatifs. Ceci exclut, comme il a été déjà rapporté par ailleurs [21], l'hypothèse d'une bulle conductrice.

Bien que le modèle ② donne un résultat plus cohérent, l'ordre de grandeur du rayon est du nm alors que les rayons rapportés par la littérature concernant les diélectriques liquides purs [21,26,27] sont de l'ordre du μm . Ceci pourrait être dû à l'hypothèse de la configuration sphérique adoptée pour le calcul des capacités.

En effet, pour les valeurs expérimentales adoptées ($\epsilon_0=2.2$, $r_p=27.5\mu\text{m}$, $d=2\text{mm}$), le modèle sphérique donne une capacité égale à $6.82 \cdot 10^{-15}\text{F}$, tandis que la mesure de charge (Figure III-12) aboutit à une capacité égale à $3.75 \cdot 10^{-12}\text{F}$.

Nous voyons bien que le modèle en soi introduit une erreur d'échelle de l'ordre de 10^{+3} qui va se répercuter sur les rayons calculés. En adoptant une correction égale à cet ordre de grandeur, nous obtenons un rayon qui concorde bien avec les résultats rapportés par la littérature. Pour ce cas là également, la durée 1ms est à écarter.

A partir des équations (III-10 et 12), on détermine le rayon moyen R_m de la bulle par les relations suivantes :

cas de la bulle conductrice:

$$R_{m2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_1} - r_p \right) \text{ avec : } k_1 = \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r U_g}{ip\Delta t + C_i U_g} + \frac{1}{r_p + d} \quad (\text{III-13})$$

cas de la bulle non conductrice:

$$R_{m3} = \frac{1 - \epsilon_r - k_2 \epsilon_r r_p}{2\epsilon_r k_2} \text{ avec : } k_2 = \frac{4\pi\epsilon_0 U_g}{ip\Delta t + C_i U_g} + \frac{1}{\epsilon_r (r_p + d)} - \frac{1}{r_p} \quad (\text{III-14})$$

Pour les valeurs expérimentales suivantes: $r_p=27.5\mu\text{m}$, $\epsilon_r=2.2$, $d=2\text{mm}$, et pour la tension de génération $U_g=2\text{kV}$, on obtient:

Δt (ns)	4	40	1000
$R_{m\textcircled{1}}$ (nm)	(-)2.34	(-)23.4	(-)1.42 $\times 10^6$
$R_{m\textcircled{2}}$ (nm)	1.96	19.6	(-)6.28 $\times 10^3$

Tableau III-4 Rayons moyens de la bulle dans le cas conducteur et non conducteur.

La première méthode aboutit à des rayons de même ordre de grandeur que les rayons rapportés par la littérature concernant les diélectriques liquides purs [21,26,27]. Cependant, pour $t=1\text{ms}$ il semble que l'on soit plutôt en présence d'un streamer vu le rayon ($R_m=28.85\mu\text{m}$) résultant [40,41].

Concernant la deuxième méthode, les rayons donnés par le modèle ① sont négatifs. Ceci exclut, comme il a été déjà rapporté par ailleurs [21], l'hypothèse d'une bulle conductrice.

Bien que le modèle ② donne un résultat plus cohérent, l'ordre de grandeur du rayon est du nm alors que les rayons rapportés par la littérature concernant les diélectriques liquides purs [21,26,27] sont de l'ordre du μm . Ceci pourrait être dû à l'hypothèse de la configuration sphérique adoptée pour le calcul des capacités.

En effet, pour les valeurs expérimentales adoptées ($\epsilon_0=2.2$, $r_p=27.5\mu\text{m}$, $d=2\text{mm}$), le modèle sphérique donne une capacité égale à $6.82 \cdot 10^{-15}\text{F}$, tandis que la mesure de charge (Figure III-12) aboutit à une capacité égale à $3.75 \cdot 10^{-12}\text{F}$.

Nous voyons bien que le modèle en soi introduit une erreur d'échelle de l'ordre de 10^3 qui va se répercuter sur les rayons calculés. En adoptant une correction égale à cet ordre de grandeur, nous obtenons un rayon qui concorde bien avec les résultats rapportés par la littérature. Pour ce cas là également, la durée 1ms est à écarter.

III-7 CONCLUSION

Trois principaux paramètres: le courant, les pics de courant et la charge, nous ont permis, tout au long de la seconde partie de notre travail, d'étudier le comportement, en phase de préclaquage, d'une huile minérale isolante lorsqu'elle est soumise à un champ alternatif (50Hz) divergent.

La forme d'onde du signal courant est une sinusoïde présentant des déformations. Ces déformations sont des chutes de courant. Elles ont lieu lors de l'arche croissant de la tension. Elles sont imputées à la variation de la capacité globale du système. Ce fait est dû à une diminution de la permittivité du liquide, suite à un fort apport local d'énergie.

L'étude de l'effet du champ électrique sur le courant a montré que les deux paramètres évoluaient dans le même sens.

Nous avons remarqué, par ailleurs, que l'huile usagée était le siège de courants plus grands que ceux enregistrés dans l'huile neuve.

L'évolution des pics de courants en fonction de la tension a révélé l'existence de deux phases: une phase précédant la naissance d'une perturbation et une seconde lui succédant.

Le niveau de tension, relevé sur la caractéristique $\Delta I(U)$, indique la tension de génération.

En calculant le champ, au niveau de la pointe, correspondant à cette tension[28], on trouve $E_p=20\text{MV/m}$. Des champs de génération du même ordre de grandeur sont retrouvés sous tension alternative, dans des hydrocarbures simples tels que: le benzène ($E_p=30.75\text{MV/m}$) et le cyclohexane ($E_p=30.5\text{MV/m}$) [20]

Par ailleurs, l'étude de l'influence de la polarité sur les pics de courant a montré que les perturbations les plus importantes ont lieu lorsque la tension est négative. Ce fait suggère que les mécanismes de génération diffèrent d'une polarité à l'autre.

En établissant les mêmes caractéristiques pour l'huile usagée, nous constatons que l'évolution adopte un caractère oscillant qui est beaucoup plus prononcé pour les pics négatifs.

Les mesures de charge nous ont permis, d'une part de conforter les résultats obtenus lors de la mesure de courant, et d'autre part, de déduire l'énergie totale du système. Cependant, il ne nous a pas été possible d'observer les variations au niveau de la charge au même titre que pour le courant. Et ce en raison des très faibles valeurs de charges mises en jeu.

En dernier lieu, nous avons tenter une estimation du rayon moyen de la bulle générée et ce sur la base des pics de courants mesurés, d'une part, et d'autre part, par l'évaluation de l'énergie de vaporisation. Nos résultats ont permis de confirmer la nature non conductrice de la bulle générée.

Le calcul du rayon moyen de la bulle, par l'estimation de l'énergie de vaporisation semble donner de meilleurs résultats que la modélisation sphérique adoptée.

CONCLUSION GENERALE

La recherche bibliographique, entreprise dans le cadre du présent travail, nous a permis de prendre connaissance de la complexité des phénomènes de préclaquage dans les diélectriques liquides. En effet, une bonne compréhension de ces derniers fait appel à des connaissances de disciplines diverses telles que: la chimie, l'électrochimie, la mécanique des fluides....

Un fait très important qui ressort de cette synthèse est le nombre restreint d'études effectuées sur les huiles de transformateur et principalement lorsque celles-ci sont soumises à des contraintes électriques alternatives de fréquence industrielle.

Les travaux expérimentaux que nous avons entrepris avaient pour principal objectif de voir le comportement d'une huile de transformateur, utilisée par Sonelgaz, lorsqu'une tension alternative lui est appliquée. Avant d'entamer nos essais, nous avons juger utile d'établir certaines propriétés caractéristiques de cette huile. Nous avons constater l'effet, en chaîne, de la température sur l'huile qui a pour conséquence une détérioration globale de la qualité de l'huile. Cette dégradation a pu être résorbé, partiellement, par une régénération. En effet, une amélioration n'a concerné que certains paramètres tels que le facteur de pertes diélectriques et la teneur en eau alors qu'elle a exclu la viscosité et la résistivité.

La seconde partie de notre travail a consisté à visualiser et à mesurer le courant et la charge électrique mise en jeu dans le système lorsqu'une tension alternative de fréquence 50Hz est appliquée à l'huile. Les oscillogrammes de courant révèlent des perturbations du signal lors de l'arche croissant de la tension. Ces perturbations seraient la conséquence d'une baisse de permittivité du liquide, suite à un apport local d'énergie. L'augmentation du courant, causée par la diminution du rayon de courbure de la pointe, l'écartement des électrodes ou encore par l'état usagé de l'huile révèle l'influence du champ électrique sur le courant. La tension de génération, déduite à partir de la mesure des pics de courant correspond à un champ de 20MV/m. Des niveaux de génération du même ordre sont retrouvés dans les hydrocarbures, sous tension alternative.

CONCLUSION GENERALE

Par ailleurs, il a été constaté que les pics de courant négatifs sont supérieurs aux pics positifs. Ce fait suggère que les mécanismes de génération diffèrent d'une polarité à l'autre.

De même que pour le courant, la charge mise en jeu dans le système augmente lorsque le rayon de courbure de la pointe diminue ou la distance inter-électrode croît, confirmant ainsi l'effet du champ électrique sur la charge.

En dernier lieu, nous avons procédé à une estimation du rayon moyen de la bulle générée que nous avons supposé sphérique.

Nos résultats ont confirmé la nature non conductrice de la bulle.

Au vu des rayons obtenus, l'approche, pour l'estimation du rayon moyen de la bulle, basée sur l'énergie de vaporisation semble aboutir à des résultats plus conformes à ceux donnés par la littérature.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P.J. VUARCHEX
Huiles et liquides isolants.
Techniques de l'ingénieur, D230 a, 1986.
- [2] R. FOURNIE
Les isolants en électrotechnique: Concepts et théories.
Edition Eyrolles, 1986.
- [3] R. FOURNIE
Les isolants en électrotechnique: Essais, mécanismes de dégradation, applications industrielles.
Edition Eyrolles, 1986.
- [4] R. KATTAN, A. DENAT, O. LESSAÏNT
Generation, growth and collapse of vapor bubbles in hydrocarbon liquids under a high divergent electric field.
Journal of Appl. Phys., vol. 66, n° 9, November 1989, pp 4062-4066.
- [5] A. DENAT
Etude de la conduction électrique dans les solvants non polaires.
Thèse d'Etat, Grenoble, Mars 1982.
- [6] A. BEROUAL
Spectral analysis of light emitted by streamers and gas chromatography in liquid dielectrics.
Jpn, Journal of Appl. Phys., vol.32 (1993), pp 5615-5620.
- [7] M. HAIDARA
Impulsions de Trichel dans le cyclohexane liquide et les gaz comprimés
Thèse d'Etat, Université J. FOURIER, Grenoble 1, Décembre 1988
- [8] N. BONIFACI, A.DENAT, V.M. ATRAZHEV
Work function for HV cathode in non polar liquids.
IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Ins., vol. 1, n° 4, August 1994, pp 657-662.
- [9] R. TOBAZEON
Liquides diélectriques: préclaquage et claquage.
Techniques de l'ingénieur, D226, 1986
- [10] A. DENAT, B. GOSSE
Réaction d'électrodes dans du nitrobenzène résistants soumis à une tension alternative.
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 290, 1980, série C, pp 227-230.
- [11] B. GOSSE, J.P. GOSSE, N. FELICI
Conduction électrique du carbonate de propylène en champs électriques élevés: mécanismes de création de porteurs de charges en liaison avec l'électrochimie.
Journal of Appl. Electrochemistry, vol. 5, 1975, pp 329-340
- [12] A.DENAT, B.GOSSE, J.P. GOSSE
Electrical loss caused by ionic conduction in hydrocarbons::theory and experiments.
4th ISH, Athena 1983.

- [13] N. FELICI, B. GOSSE, J.P. GOSSE
Conduction dans les diélectriques liquides: Idées modernes et progrès récents. Aspect électrochimique et électrohydrodynamique.
R.G.E., Novembre 1976, t. 85, n° 11.
- [14] H. BORSI
Dielectric behaviour of silicone and ester fluids for use in distribution transformers.
IEEE Trans. on Elect. Ins., vol 26, n° 4, August 1991, pp.755-762.
- [15] T.J. LEWIS
Basic electrical processes in dielectris liquids.
IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Ins., vol. 1, n° 4, August 1994, pp 630-643.
- [16] S.ITASHI et Al
The investigation for the microscopic state of water molecules in dielectrics materials.
CEIDP, October 22-25 1995, pp 604-608.
- [17] A. BEROUAL
Breakdown phenomena in transformer oil under step voltages.
Archiwum Elektrotechniki, Tome XLII, Zeszyst 1-4, 1993.
- [18] E.M. HIZAL
Breakdown time lags and prebreakdown phenomena in transformer oil. Effect of hydrostatic pressure.
Journal of Electrostatics, 12, 1982, pp 334-343.
- [19] M. ELSHAZLY-ZAGHLOUL
Conduction current in insulating oils: Components and Parameters.
IEEE Trans. on Elect. Ins., vol.26, n° 6, December 1991.
- [20] F. BITAM
Etude des mécanismes de préclaquage dans les diélectriques liquides sous tension alternative.
Thèse de Magister, Université M. Mammeri, Tizi-Ouzou, Juillet 1996.
- [21] A.BEROUAL
Phénomènes de propagation et de génération des streamers dans les diélectriques liquides en géométrie pointe-plan sous créneau de tension.
Thèse d'Etat, Grenoble, Janvier 1987.
- [22] R. KATTAN
Etude de la formation et de la dynamique de bulles dans les hydrocarbures liquides générées par les impulsions de courant en champ électrique intense.
Thèse d'Etat, Université J. Fourier, Grenoble 1, Novembre 1990.
- [23] W.G. CHADBAND
From bubbles to breakdown, or vice-versa.
A paraître.
- [24] R. TOBAZEON
Breakdown phenomena in dielectric liquids.
A paraître.

- [25] P.K. WATSON, A.H. SHARBAUGH
Bubble growth following a localised electrical discharges and its relationship to the breakdown.
Journal of Electrochem. Soc., 107, 1960.
- [26] K.C. KAO
Theory of high field electric conduction and breakdown in dielectric liquids.
IEEE Trans. on Elect. Ins., 11, 1976, 121.
- [27] F. GUERBAS
Etude de la génération des bulles gazeuses dans les diélectriques liquides et leur transition au streamer.
Thèse de Magistère, ENP, Mai 1994.
- [28] S. BOUAZABIA
Contribution à l'étude de la génération des bulles gazeuses en champ divergent.
Thèse de Magistère, ENP, Mai 1991.
- [29] M. SADEGHZADEM-ARAGHI, M.I. QURESHI, W.G. CHADBAND, P.K. WATSON
Measurement of the growth of cavities and of EHD instabilities during the negative-point breakdown of silicone fluids.
IEEE Trans. on Elect. Ins., vol. 26, n° 4, August 1991, pp 663-672.
- [30] J.K. NELSON, I.F.M. HASHAD
Cavitation dynamics in stressed dielectric liquids.
Journal of Electrostatics, 12, 1982, pp 334-343.
- [31] R. KATTAN, A. DENAT, N. BONIFACI
Formation of vapor bubbles in non-polar liquids initiated by current pulses.
IEEE Trans. on Elect. Ins., vol. 26, n°4, August 1991, pp 656-662.
- [32] P.K. WATSON, W.G. CHADBAND, M. SADEGHZADEH-ARAGHI
The role of electrostatic and hydrodynamic forces in the negative-point breakdown of liquid dielectrics.
IEEE Trans. on Elect. Ins., vol. 26, August 1991, pp 543-559.
- [33] R.N. ALLAN, E.M. HIZAL
Prebreakdown phenomena in transformer oil subjected to non uniform fields.
Proc. IEE, 121, 1974, pp 227-231.
- [34] A.N. LOBANOV et Al
Phenomenological view of pulse discharge in transformer oil.
9th ISH., August 28- September 1, 1995, p 1077.
- [35] A. BEROUAL, R. TOBAZEON
Phénomènes de transport: Propagation des streamers dans les diélectriques liquides.
C.R. Acad. Sc. Paris, t.303, Série 11, n° 12, 1986, pp 1081-1084.
- [36] D. LINJHELL, L. LUNDGARD, G. BERG
Streamer propagation under impulse voltage in long point-plan oil gaps.
IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Ins., vol. 1, n° 3, June 1994, pp 447-458.
- [37] W.G. CHADBAND
On variations in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicone fluids.
Journal of Phys. D: Appl. Phys., 13(1980), pp 1299-1307.

- [38] J.C. DEVINS, S.J. RZAD, R.J. SCHWABE
Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids.
Journal of Appl. Phys., vol. 52, July 1981, pp 4531-4545.
- [39] A. BEROUAL, R. TOBAZEON
Prebreakdown phenomena in liquids.
IEEE Trans. on Elect. Ins., vol. 21, n° 4, June 1986, pp.631-637.
- [40] A. BEROUAL
Relation entre courant, charge et vitesse de propagation des streamers dans les diélectriques liquides.
Arc. Elec., t.XLII, Zezyst 1-4, 1993, pp 45-56.
- [41] A. BEROUAL, C. BROSSEAU
Step propagation of filamentary streamers in dielectric liquids.
A paraître.
- [42] F.M.J. McCLUSKEY, A. DENAT, O. LESAINT
Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids under positive impulse voltages.
IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Ins., vol. 1, n°3, June 1994, pp 377-382.
- [43] P. RAIN, O. LESAINT
Prebreakdown phenomena in mineral oil under step and ac voltages in large-gap divergent.
IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Ins., vol. 1, n°4, August 1994, pp 692-701.
- [44] B.N. DIKAREV, A.A. OSTAPENKO, G.G. KARASEV
Viscosity dependance of dielectric liquids on electric field.
A paraître.
- [45] M.S.A. MINHAS, J.P. REYNDERS
Perchloroethylene as an additive in mineral oil with a view to the control of thermal ageing and partial discharge ageing.
9th I.S.H., Aug.28-Sept.1, 1995, pp 10781-10784.
- [46] M. HIKITA et Al.
Kerr electro-optic field mapping and charge dynamics in impurity-doped transformer oil.
IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Ins., vol. 3, n°4, February 1996, pp 80-85.
- [47] R. COELHO, W.H. VANDERSCHUEREN
Conduction électrique dans les liquides. "Influence de l'eau sur les propriétés électriques"
Techniques de l'ingénieur, D225,1, pp 1-4.
- [48] Recommandation CEI 250, édition 1969.
- [49] Recommandation CEI 93, 1958.
- [50] Norme NFT 60-100.
- [51] Norme ISO R 760
- [52] A. LABACI
Contribution à l'étude et à la régénération des huiles minérales isolantes
Thèse de Magistère, ENP, Décembre 1991.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[53] L.E. LUNDGAARD, E.ILDSTAD, A.VISTE

Discharge in AC-stressed oil gaps.

Conf. Rec. of Nord IS 92, Paper n°1.4, Væerstras, June 1992.

[54] S. BOUAZABIA, F. GUERBAS, A. BEROUAL

Identification de la perturbation générée dans les diélectriques liquides.

A paraître.

[55] A. HAMIMI, A BOUBAKEUR, M. LEBID

Influence de la température sur certaines propriétés de l'huile de transformateur.

2^{ème} CNHT, TIZI-OUZOU, Novembre 1997.