

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DE LA CONDUCTION ET VISUALISATION
DES COURANTS DE STREAMER DANS LES
DIELECTRIQUES LIQUIDES EN GEOMETRIE
POINTE - PLAN SOUS TENSION DE CHOC

Proposé par :
H. MOULAY

Etudié par :
Y. BOUCHENAF
L. KALOUN

Dirigé par :
H. MOULAY

PROMOTION : JANVIER 1988

وزارة التعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ETUDE DE LA CONDUCTION ET VISUALISATION
DES COURANTS DE STREAMER DANS LES
DIELECTRIQUES LIQUIDES EN GEOMETRIE
POINTE - PLAN SOUS TENSION DE CHOC

Proposé par :

H. MOULAY

Etudié par :

Y. BOUCHENAGA

L. KALOUN

Dirigé par :

H. MOULAY

PROMOTION : JANVIER 1988

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier vivement notre promoteur , Monsieur
H. MOULAY , pour ses conseils et son aide précieuse .

Sont également remerciés tous les enseignants qui ont contribué
à notre formation .

Nous remercions aussi ceux qui , de près ou de loin , ont aidé
à l'élaboration de ce projet .

DEDICACES

A MA FAMILLE

A MES AMIS

A RACHID

BOUCHENAFI YAHIA

A LA MEMOIRE DE MON PERE

A MA FAMILLE

A TOUS LES AMIS

KALOUN LAID

T A B L E D E M A T I E R E S



INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	GENERALITES SUR LES LIQUIDES DIELECTRIQUES
Introduction	3
I-1 Classification des liquides	3
I-2 Caracteristiques	
A - Caracteristiques électriques	4
B - Caracteristiques physiques	6
I-3 Utilisation	7
I-4 Choix des liquides	7
CHAPITRE II	LA CONDUCTION DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES
Introduction	8
II-1 Caracteristique de NIKURADSE	9
II-2 Les trois regimes de conduction	9
II-3 Interpretation de la caracteristique	9
II-4 Precisions apportées par l'experience	10
II-5 MODES de création de porteurs de charges	10
II-6 Aspects modernes de la conduction dans les liquides ...	11
II-6-1 Conduction volumique	
II-6-1-1 Modele de THOMSON	12
a) Regime stationnaire	12
b) Regime transitoire	14
II-7 Injection de porteurs de charges dans un liquide	15
II-7-1 Injection de porteurs dans un liquide isolant ..	16
a) Regime stationnaire d'une injection unipolaire	16
b) Regime transitoire d'une injection unipolaire	18
II-7-2 L'effet de l'eau sur l'injection de porteurs ...	19
II-8 Conduction des liquides et regime de la double couche..	20
II-8-1 Regime des champs et des charges au voisinage d'une électrode en contact avec une solution ...	20
II-8-2 Les interprétations à exlure	21
II-8-3 Effet électrostatique du champ sur la barrière de potentiel de la double couche	21

II-8-4	Evaluation de l'effet du champ extérieur sur la	
I	barrière de potentiel	22
II-8-5	Relation entre l'effet ionique et le champ.....	23
II-8-6	Influence de l'écartement des électrodes.....	23
II-9	Mécanisme de transport de charges.....	24
II-9-1	Transport de charges par conduction.....	25
II-9-2	Transport de charges par convection.....	26
II-9-3	Stabilité électrohydrodynamique et l'injection.....	26
II-9-4	Mécanisme de l'électroconvection par injection	
	unipolaire.....	28
	Conclusion.....	29
CHAPITRE III LE CLAQUAGE ET PRECLAQUAGE DANS LES LIQUIDES		
	Introduction.....	30
III-1	Déclenchement du claquage par des particules.....	31
III-2	Déclenchement du claquage par les bulles de gaz.....	33
III-3	Phénomène de streamer.....	36
III-3-1	Domaines de temps.....	36
III-3-2	Streamer sous tension alternative.....	37
III-3-3	Streamer sous creneau de tension.....	38
CHAPITRE IV PARTIE EXPERIMENTALE		
	Introduction.....	41
1-	Schema global du montage	42
2-	Schema du montage de mesure	42
3-	Resultats experimentaux	
4-	Interprétation des resultats.....	44
	Conclusion	45

INTRODUCTION

Tandis que divers gaz et solides sont utilisés comme isolants dans divers équipements électriques, les liquides diélectriques malgré l'avantage que présentent certains d'entre eux; cas des huiles isolantes qui présentent une grande rigidité diélectrique, de plus leur fluidité suffisante permette une bonne circulation dans les canaux de refroidissement et assure un bon refroidissement dans les appareils électriques. Les liquides diélectriques paraissent évités le plus possible par l'ingénieur ou le physicien soucieux de construire des appareils où des instruments dont les performances répondent aux besoins de plus en plus croissants en énergie électrique.

Une des raisons de ce handicap est la pauvreté au moins relative des connaissances sur les mécanismes de conduction, et que les diélectriques liquides présentent tous une certaine conductivité.

De façon générale, les diélectriques liquides sont caractérisés par leurs propriétés électriques, physiques, chimiques et thermiques.

Cette modeste mémoire se décompose en quatre chapitres se présentant de la manière suivante :

- Dans le premier chapitre, on définit brièvement quelques caractéristiques électriques et physiques, ainsi que le choix des diélectriques liquides en vue de leur utilisation comme isolants.

- Dans le deuxième chapitre de notre travail, nous exposons les idées les plus récentes sur les phénomènes de conduction dans les diélectriques liquides, ainsi que des théories unanimement reconnues.

Nous insistons particulièrement sur deux théories dont la validité qualitative n'est plus à démontrer :

- * La théorie de THOMSON
- * La théorie de l'injection unipolaire

Ce qui nous amène à distinguer

- 1°) La conduction volumique pure
- 2°) La conduction causée par le phénomène de création d'ions

Les porteurs de charges proviennent soit du liquide lui-même , soit par injection à l'interface liquide-métal par réaction électrochimique ; dans les deux cas il y a création de nouvelles charges .

L'étude de l'injection nous a amène à mettre en évidence les phénomènes électrohydrodynamiques qui sont en relation avec le transport de charges, le courant de conduction est transporté avant tout par convection surtout quand le mouvement du liquide devient turbulent .

- Le troisieme chapitre est consacré à l'étude théorique du claquage et le préclaquage dans les liquides diélectriques , en exposant deux théories du claquage dans les liquides

- . Théorie des ponts
- . Théorie des bulles

- Le quatrieme chapitre complete l'étude théorique par une verification expérimentale qui comporte la visualisation des courants de streamer et relevé des courbes courant-tension .

CHAPITRE I

=====

GENERALITES SUR LES LIQUIDES DIELECTRIQUES

=====

I- INTRODUCTION

◆=====◆

Les liquides , comme la plupart des matériaux - à l'exclusion des métaux , des alliages et des sels fondus - sont des diélectriques: leurs molécules forment un assemblage de charges électriques liées , retenues par des forces de rappel élastique ; le champ électrique peut déplacer faiblement les charges positives par rapport aux charges négatives de façon réversible .

Nous nous intéresserons , dans cet étude , essentiellement aux liquides isolants, qui connaissent une utilisation très importante dans la technique de la HAUTE - TENSION . Cette importance est due au fait que , dans les liquides isolant , les distances intermoléculaires sont faibles et alors ils présentent des rigidités diélectriques plus élevées que les gaz ; donc ils assurent un très bon isolement ,

I-1 CLASSIFICATION DES LIQUIDES

=====

En gros , on subdivise les liquides diélectriques en deux classes :

I-1-1 Les liquides polaires

Liquides dissociants , c'est- à - dire qu'en raison de leur constante diélectrique élevée , possèdent le pouvoir de dissocier la quasi - totalité des impuretés électrolytiques qu'ils peuvent contenir .

Certains liquides polaires peuvent être " autodissociés " c'est - à - dire qu'ils dissocient leurs molécules (cas du méthanol $\epsilon_r = 31$) , d'autres les dissocient peu ou pas du tout (cas nitrobenzène $\epsilon_r = 35$)

I-1-2 Les liquides non polaires

C'est avec ceux - là et , comme on peut prévoir , qu'avec une purification "classique" on peut obtenir les résistivités les élevées .

Leur permittivité est faible $\epsilon_r = 2$. leur conductibilité augmente généralement à cause de traces d'eau, qui peuvent dissocier les impuretés électrolytiques ; les liquides non polaires sont :

Les différentes huiles , le benzène , ect ...

I-2 CARACTERISTIQUES

A/ CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES

Les caractéristiques électriques des liquides diélectriques dépendent de leur formulation (composition, constitution moléculaire) et de leurs conditions d'utilisation (4).

Les caractéristiques électriques principales sont :

- la permittivité " ϵ "
- la conductivité " γ "
- la rigidité diélectrique " E_c "

1°) La Permittivité

C'est une caractéristique électrique liée à la formulation du liquide c'est - à - dire à la composition du liquide .

La permittivité absolue " ϵ " s'exprime en farad/metre ; elle définit la possibilité , sous l'action du champ électrique , de libérer des charges .

D'où le nom qu'on lui donnait autre fois : le pouvoir inducteur spécifique

La permittivité d'un liquide décroît avec la température à fréquence fixe et avec la fréquence à température donnée . Ainsi toutes les déterminations doivent -elles être faites à température constante .

A fréquence industrielle , on détermine la permittivité d'un par la méthode publiée dans la CEI 247 . Cette méthode consiste à mesurer la capacité C_v d'une cellule d'essai à vide dans des conditions bien définies , puis la capacité C_1 de cette cellule remplie du liquide en essai . Le rapport C_1 / C_v est appelé permittivité relative " ϵ_r " .

2°) La Conductivité

La conductivité des liquides est une caractéristique de conditionnement . La structure d'un liquide est à l'origine de substances étrangères considérés comme impuretés (poussières, particules, gaz dissous) qui, même en quantité aussi faible, ont une influence sur les valeurs mesurées .

Tout liquide isolant, soumis à une différence de potentiel, donne lieu à un courant de fuite caractérisant la conductivité électrique du liquide .

On détermine la conductivité d'un liquide en courant continu , selon la méthode publiée dans la CEI 247 , en appliquant un échelon de tension fixe à une cellule de condensateur et en mesurant au bout d'un temps de 60s le courant I et la tension U , on obtient alors :

$$\gamma = K U / I ; k: \text{étant la constante de la cellule}$$

L'intérêt de cette valeur conventionnelle de conductivité réside dans la possibilité qu'elle offre lors d'un contrôle de réception d'un suivi de traitement en fabrication ou de vérification d'un liquide en service .

3°) La Rigidité diélectrique

C'est la valeur du gradient de potentiel (intensité du champ électrique maximal) au-dessus de laquelle un diélectrique donne perd ses qualités d'isolement et se comporte alors comme un conducteur .

3.1 La Rigidité diélectrique à fréquence industrielle

Dans l'industrie , la rigidité diélectrique est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes .

3.2 La Rigidité diélectrique sous tension de choc

La rigidité diélectrique varie avec la nature de la tension . En effet , elle ne présente pas les mêmes valeurs suivant qu'on applique une tension continue, alternative ou impulsionnelle .

Dans le cas où il s'agit de tension de foudre , la polarité intervient directement sur le déroulement de phénomène de claquage d'un diélectrique liquide .

3.3 Facteurs influençant la rigidité diélectrique des liquides

a) humidité

La présence d'un peu d'humidité dans le liquide diminue considérablement sa rigidité diélectrique .

b) Pression hydrostatique

L'augmentation de la pression hydrostatique améliore la rigidité diélectrique du liquide ; cette amélioration dépend de la nature du champ appliqué ;

c) Température

L'influence de la température est double . En augmentant la température , la concentration des gaz et de l'humidité dans le liquide diminue et les conditions d'avoir un amorçage thermoélectrique s'améliorent .

B/ CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

L'ensemble des caractéristiques physiques permet de définir le domaine de l'emploi des liquides isolants .

Les caractéristiques physiques principales sont :

- la masse volumique
- la capacité thermique
- la viscosité

1°) La masse volumique

La masse volumique d'un liquide est une indication de sa nature et peut être un moyen d'identification et de contrôle . Elle est déterminée à 20°C selon la norme ISO 3675 . Elle diminue quand la température augmente .

2°) La capacité thermique

La capacité thermique d'un liquide isolant croît avec sa température . Elle est généralement d'autant plus élevée que la densité est plus faible .

La capacité thermique et la masse volumique permettent de définir la constante thermique des matériaux à plein charge, suivant le type de refroidissement .

3°) La viscosité

La viscosité d'un liquide est la propriété de ce liquide résultant de la résistance qu'oppose ses molécules à une force tendant à les déplacer par glissement au sein du liquide . Donc , elle gouverne l'évacuation de la chaleur dégagée dans les appareils électriques .

Elle est utilisée comme facteur important dans l'étude des phénomènes de transport (conduction électrique) et de relaxation (pertes diélectriques) .

I-3 UTILISATION

Les liquides isolants sont étudiés , soit en vue de leur utilisation en électrotechnique ou en électronique , soit comme matériaux modèles destinés à des expériences de recherche fondamentales .

Ils sont utilisés en électrotechnique pour l'imprégnation des câbles et des condensateurs de haute-tension et pour l'isolement des transformateurs, des disjoncteurs et des isolateurs de traversée ;

Dans quelques applications , les liquides diélectriques assurent d'autres fonctions non négligeables tels que : le refroidissement des transformateurs ou le soufflage des arcs dans les disjoncteurs . Car ces appareils présentent des pertes d'énergie qui , aussi faibles soient - elles , provoquent une élévation importante de température , qui est limitée par l'emploi des liquides de refroidissement . (5)

Les huiles de pétrole sont les plus couramment utilisées dans ces applications, comme on emploie aussi assez souvent des hydrocarbures synthétiques et des hydrocarbures aromatiques halogénés .

I-4 CHOIX DES LIQUIDES

Le choix d'un liquide diélectrique pour une application bien déterminée tient compte essentiellement des propriétés électriques suivantes:

- La permittivité du liquide
- La conductivité et les pertes diélectriques en courant continu
- la rigidité diélectrique à fréquence industrielle

Et cela contrairement à une situation antérieure , où les propriétés physiques étaient les seules utilisées pour sélectionner les liquides d'imprégnation .

Un ensemble de propriétés diverses et complémentaires sont accessibles pour choisir le liquide , le mieux adapté pour un type de matériel donné :

Pour les appareils de très haute tension tels que: les transformateurs , les bobines d'inductance shunt ; les tenues diélectriques à fréquence industrielle où au tension défoudre apparaissent comme les critères électriques les mieux appropriées pour qualifier l'imprégnant liquide ;

Dans le cas des condensateurs de puissance , où les liquides doivent supporter des contraintes électriques très élevées, le seuil d'apparition des décharges partielles et l'absorption des gaz produits sous l'action de ces charges sont des caractéristiques déterminantes dans le choix des liquides

CHAPITRE II

LA CONDUCTION DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES

INTRODUCTION

La conduction électrique des liquides diélectriques retient l'attention des chercheurs depuis de nombreuses années, malgré son importance, ce phénomène a été beaucoup moins étudié que la conduction dans les gaz étudiée par J.J THOMSON et dans les solides. Et son interprétation est restée longtemps qualitative et parfois erronée.

Les liquides étudiés étaient essentiellement des hydrocarbures saturés comme n - hexane dont la conduction est faible.

La connaissance du mécanisme de la conduction des liquides diélectriques s'est améliorée quand les liquides polaires tel que le nitrobenzène ($\epsilon_r = 35$) ont été étudiés et la binifrérence de ces liquides rendait possible la mesure du champ électrique entre les électrodes par une méthode optique; l'interprétation de leur conduction amenèrent les chercheurs à s'inspirer des théories de physico-chimie des solutions et de l'électrochimie organique.

L'aspect chimique des phénomènes de conduction et ses relations avec l'électrochimie furent les premiers compris plus récemment les notions de cinétique électrochimique furent appliquées avec succès aux liquides polaires et non polaires ($\epsilon < 2,5$).

II - 1 CARACTERISTIQUE DE NIKURADSE

=====

Le livre D'ALEXANDRE NIKURADSE " le diélectrique liquide " paru à BERLIN en 1934 c'était le premier ouvrage de référence pour les mécanismes de conduction dans les diélectriques liquides , on y trouvé deux idées :

- a) Les caractéristiques tension - courant des divers diélectriques liquides se ressemblent et se rattachent toutes à un même type que l'on peut appeler " idéal " ou " limite " .
- b) Les diverses parties de la caractéristique correspondent à différents mécanismes de conduction .

II - 2 LES TROIS ZONES DE LA CARACTERISTIQUE

=====

NIKURADSE distingue trois zones bien différenciés dans sa caractéristique (fig 1)

- Zone(1)

Pour les champs faibles , le courant est proportionnel au champ (rapport V/I constant), la conductivité est définie (conduction ohmique) .

- Zone(2)

Pour les champs plus forts , la caractéristique présente un plateau de saturation parfois très long auquel correspond à un courant de saturation .

- Zone(3)

Cette zone est caractérisée par une croissance rapide du courant aboutissant au claquage , et la résistance passe par un maximum lorsque débute la croissance rapide . Ce maximum a été appelé "épuration électrique " .

II - 3 INTERPRETATION DE LA CARACTERISTIQUE

=====

NIKURADSE a été influencé par les travaux sur la conduction des gaz soumis à un rayonnement ionisant , son interprétation de la caractéristique est copié sur le cas des gaz .

Il en résulte que les deux premiers segments de la caractéristique (tension - courant) sont dus à la dissociation et à la recombinaison des charges ; et la saturation a lieu quand le champ est assez fort pour collecter tous les porteurs produits en empêchant cette recombinaison .

En fin la croissance rapide du courant avec la tension serait due à une ionisation par choc créant des avalanches comme le font les électrons dans un gaz .

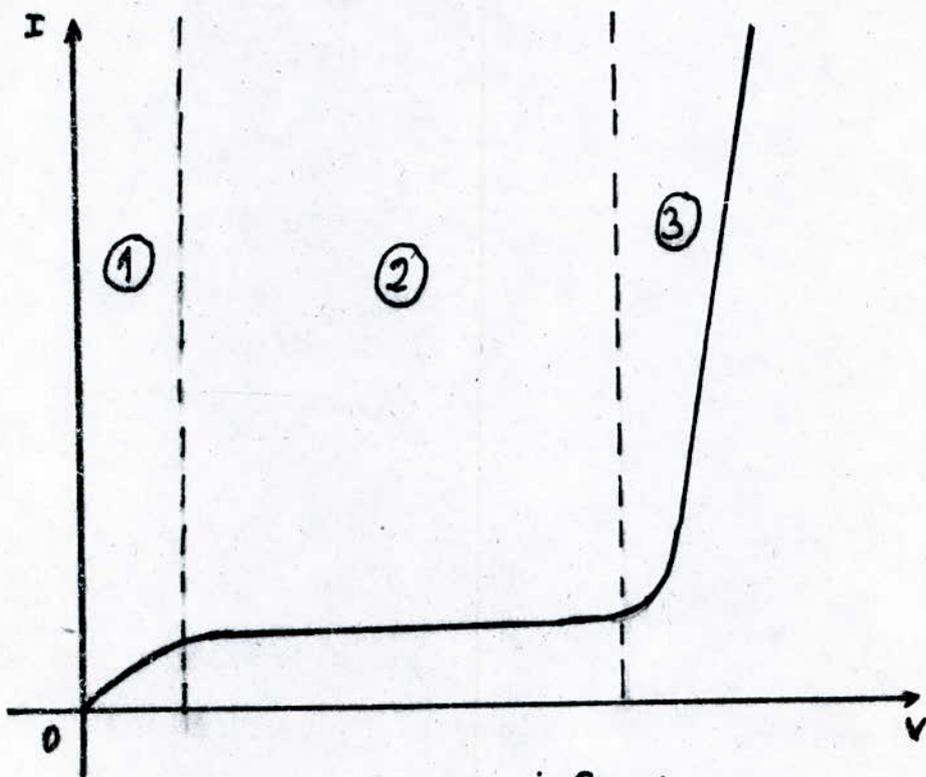


FIG-1-

Caractéristique idéale courant / tension
pour un liquide diélectrique selon

NIKURADSE

II - 4 PRÉCISIONS APPORTÉES PAR L'EXPERIENCE

=====

De nombreuses expériences bénéficiant des progrès de la chimie ont apporté les précisions suivantes :

- La conduction dans toutes les parties de la caractéristique est en relation avec la présence d'électrolytes , et la dissociation de ces dernières n'est pas le mécanisme de conduction .
- Le rôle principal est joué par l'injection (création d'ions), c'est elle qui est responsable de la croissance rapide du courant avec la tension , ces ions injectés résultent d'une réaction électrochimique .
- La croissance rapide du courant avec la tension a lieu pour des champs modérés presque toujours inférieurs à 50KV/Cm . Dans ces conditions , une ionisation par choc est impossible, donc sans doute la croissance rapide du courant n'est pas due à une ionisation par choc .
- Il faut noter aussi le caractère non reproductible de la caractéristique . Cependant les cas ne sont pas rares où le point d'inflexion disparaît , mais la croissance rapide du courant est toujours observée ce qui est bien dommage car dès que le courant augmente si rapidement la distorsion du champ et l'échauffement local conduisent au claquage .

II - 5 MODES DE CREATION DE PORTEURS DE CHARGES

=====

Les formulations les plus modernes concernant la conduction électrique dans les liquides diélectriques consistent à dire qu'il existe deux modes de création de porteurs de charges au sein du liquide :

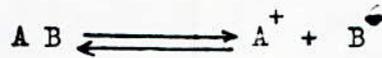
- Porteurs de charges résultant de l'équilibre dissociation - recombinaison de molécules au sein du liquide (conduction volumique) .
- Porteurs de charges issus de phénomènes d'interface entre l'électrode métallique et le liquide (phénomène d'injection) .

II - 6 ASPECTS MODERNES DE LA CONDUCTION DANS LES DIELECTRIQUES LIQUIDES

II - 6 - 1 Conduction volumique

Elle est le fait de la dissociation puis recombinaison de molecules électro - lytiques existant au sein du liquide (molecules de corps étrangers ou du liquide lui-même) . Ce type de conduction est observé dans les zones (1) et (2) de la fameuse courbe de NIKURADSE (voir fig 1) .

L'equation regissant l'equilibre est :



K_d : constante de vitesse de dissociation (s^{-1})

K_r : constante de vitesse de recombinaison ($m^3 s^{-1}$)

Considerons d'abord le cas où en l'absence de champ électrique extérieur il y a équilibre thermodynamique qui se traduit par :

$$K_d \nu = K_r n_{A_0} n_{B_0} \dots\dots\dots (*)$$

Considerons que l'equilibre électrique est réalisé (pas d'effet extérieur) qui se traduit par :

$$n_{A_0} = n_{B_0}$$

On deduit :

$$n_{A_0} = n_{B_0} = \sqrt{\frac{K_d \nu}{K_r}}$$

D'après la definition de la mobilité , la conductivité (γ_0) du liquide va s'ecrire :

$$\gamma_0 = (n_{A_0} k_A + n_{B_0} k_B) e \quad \text{puisque } (n_{A_0} = n_{B_0}) \text{ on aura}$$

$$\gamma_0 = n_{A_0} (k_A + k_B) e$$

Et de l'équation (*) on écrit :

$$\gamma_0 = (K_A + K_B) e \sqrt{\frac{K_d \nu}{K_r}}$$

Avec :

n_{A_0}, n_{B_0} : concentrations en cations et en anions en l'absence de champ électrique extérieur

K_A, K_B : mobilités des cations et des anions ($\frac{cm^2}{V \cdot s}$)

ν : nombre de molécules dissociables par unité de volume

e : charge électronique

γ_0 est donc la conductivité du liquide en l'absence de champ électrique .
De quelle manière l'application d'un champ électrique extérieur va-t-elle agir sur γ_0 ?

Nous allons exposer la théorie de THOMSON (3) à ce sujet .

II - 6 - 1 - 1 MODELE DE THOMSON

a) Régime stationnaire

Ce modèle a été appliqué par plusieurs auteurs aux liquides (4, 5, 6) .

Dans ce modèle , il est supposé que la décharge des ions au niveau des électrodes ne donne lieu à aucun autre phénomène et que les grandeurs suivantes sont constantes :

- nombre de molécules non dissociées
- constantes de vitesse K_d et K_r
- mobilité des ions

Avec ces considérations , les équations de base relatives au modèle sont les suivantes :

1°) La conservation des charges électriques s'écrit :

$$\frac{d(K_A n_A E)}{dx} = - \frac{d(K_B n_B E)}{dx} = K_d \nu - K_r n_A n_B$$

2°) La loi de Poisson :

$$\frac{dE}{dx} = - \frac{n_A - n_B}{\epsilon}$$

ϵ : permittivité du liquide

n_A, n_B : concentrations des cations et des anions en présence de champ électrique

3°) La loi d'OHM :

$$j = (n_A K_A + n_B K_B) e E$$

De ces équations THOMSON aboutit à l'équation différentielle non linéaire suivante :

$$\frac{d^2 E^2}{dx^2} = \frac{2e}{\epsilon} \left(\frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} \right) \left[K_d V - \frac{K_r}{e^2 E^2 (K_A + K_B)} \left(\gamma - \frac{\epsilon K_A d E^2}{2 dx^2} \right) \left(\gamma - \frac{\epsilon K_B d E^2}{2 dx^2} \right) \right]$$

THOMSON (3) et d'autres auteurs (MIE, SEELIGER) ont donné une solution approchée de cette équation sont les suivantes :

- Aux faibles tensions appliquées, l'équilibre thermodynamique et l'électroneutralité ne sont pas rompus et la caractéristique courant-tension sera linéaire (régime ohmique)

$$j = n_{A_0} (K_A + K_B) e E = \gamma_0 E$$

Au dessus d'une certaine tension dite de saturation, l'électroneutralité est rompue ; il y a saturation du courant dont la valeur est :

$$j_s = K_d \gamma e d$$

d : distance entre les électrodes

La tension de saturation est :

$$V_s = (K_d \gamma K_r)^{\frac{1}{2}} e d^2 / (K_A + K_B)$$

Il est devenu usuel d'introduire le nombre adimensionnel C_0 défini comme suit

$$C_0 = \frac{q_0 d^2}{\epsilon V} \quad \text{avec : } q_0 = n_{A_0} e = n_{B_0} e$$

$C_0 = 1$, marque la transition du régime ohmique au régime de saturation.

b) Regime transitoire

Le regime transitoire dure le temps qu'il faut à un ion à partir de l'instant d'application du champ électrique, pour parcourir la distance separant les deux électrodes ce temps est appelé " temps de transit " on le note T_t .

T_t est donné en fonction du champ (champ uniforme) et la distance entre les électrodes comme suit :

$$V_{ion} = KE, \text{ et } d = V_{ion} T_t = KE T_t \text{ d'où}$$

$$T_t = \frac{d}{KE}$$

L'étude du courant transitoire peut se faire simplement dans le cas où $C_0 \ll 1$ (C_0 : faible), cela veut dire sans distorsion du champ électrique.

C'est - à - dire qu'on a peu de charges pour un champ appliqué élevé.

Dans le cas où C_0 n'est pas négligeable devant 1, il nécessite le recours au calcul numérique pour obtenir $J(t)$ (7).

La variation de la densité de courant au cours du temps vaut :

$$j(t) = \frac{1}{d} \int_0^d j(x,t) dx$$

$$\text{et } j(x,t) = 2K n_{A_0} e E$$

$K = (K_A + K_B) / 2$: mobilité moyenne des porteurs d'où.

$$j(t) = 2K n_{A_0} e E \left(1 - \frac{t}{T_t} \right)$$

$$\text{avec } T_t = \frac{d}{KE}$$

Ainsi, pour $C_0 \ll 1$ et $K_A = K_B$ la densité de courant décroît linéairement dans le temps, pour une tension donnée jusqu'à atteindre la valeur de la densité de saturation. voir fig (2)

En relevant par un moyen approprié (oscilloscope à mémoire ou table trépanante) de la courbe $J(t)$ (fig 2) ; on peut déduire la valeur du temps de transit et par suite la mobilité moyenne des porteurs de charges.

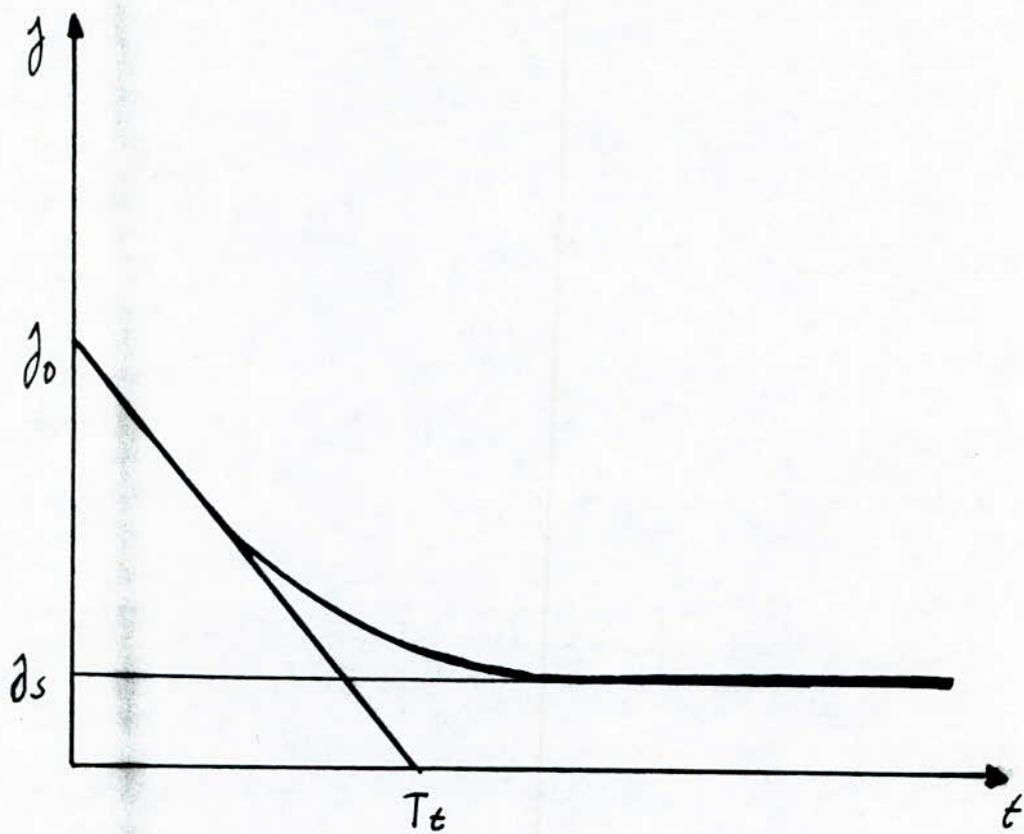


Fig-2-

Régime transitoire selon THOMSON
 Lors de l'application d'une tension
 continue supérieure à la tension
 de saturation

II - 7 INJECTION DE PORTEURS DE CHARGES DANS UN LIQUIDE

L'étude de la repartition du champ électrique le long du liquide par effet KERR (fait expérimental) montre que le champ n'est pas uniforme , ce qui indique la présence de nouvelles charges d'espace au sein du liquide . Ces charges résultent de la réaction d'ions au niveau des électrodes à la suite de réactions de natures électrochimiques .

Autre preuve de la présence de nouvelles charges au sein du liquide est l'augmentation très rapide du courant lorsque le liquide est soumis à des champs très élevés (voir courbe de NIKURADSE) .

ROBAZEON (8) a montré l'universalité de ces phénomènes qui peuvent se manifester aussi bien sur la cathode où l'anode (cas d'injection unipolaire) que sur les deux électrodes à la fois (cas d'injection bipolaire) .

L'injection dépend de la nature du contact entre liquide et électrode .

Il existe trois types de contacts :

a) Contact ohmique

Dans ce cas , l'injection est de l'électrode vers le liquide . Car le travail d'extraction d'un électron du métal est inférieur à celui nécessaire à l'extraction d'un électron de l'isolant (cas d'injection négative) .

b) Contact neutre

Dans ce cas , l'équilibre thermique s'établit sans aucun transfert entre l'électrode et l'isolant . Ce serait le cas si l'électrode et le liquide étaient deux isolants de mêmes caractéristiques . Lors d'application d'une tension la conduction à l'interface devrait être ohmique .

c) Contact bloquant

Dans ce cas , le travail d'extraction du liquide est inférieur à celui du métal . Les électrons passent de l'isolant vers le métal (cas d'injection positive) .

II - 7 - 1 INJECTION DE PORTEURS DANS UN LIQUIDE ISOLANT PARFAIT

En général la contribution du courant de diffusion est négligée dans le cas d'un contact ohmique, on utilise une conduction limite idéalisée ; le champ est nul au niveau de l'électrode injectrice, cas traité par MANY et RAKAVY (9).

Ma que le contact n'est jamais parfaitement ohmique ; FELICI (10) a montré qu'il fallait substituer à la condition sur le champ une condition sur la densité de charge volumique injectée par l'électrode.

Ainsi à la condition idéale d'un champ nul sur l'électrode correspond une densité de charges injectées (q_i) infinie.

Nous traitons l'injection unipolaire (cas plus simple ; une électrode injecte et l'autre collecte).

a) Régime stationnaire d'une injection unipolaire

Les équations de base sont :

L'équation de la conservation d'électricité

L'équation de POISSON

$$j = K q_i E$$

$q_i :$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q_i}{\epsilon}$$

$$\frac{d(K q_i E)}{dx} + \frac{dq_i}{dt} = 0$$

q_i : densité volumique des charges émises

Dans le cas où ce sont des conditions limites sur les champs qu'on se fixe ; la solution de ce système donne :

$$E(x) = \left(E_0^2 + j^x / \epsilon K \right)^{1/2}$$

$$q_i(x) = j / K \left(E_0^2 + j^x / \epsilon K \right)^{1/2}$$

$$j = \epsilon K \left(E_1^2 - E_0^2 \right) / 2d$$

Avec :

E_0 : champ au niveau de l'électrode émettrice

E_1 : champ au niveau de l'électrode réceptrice

Pour le cas où l'on se fixe plutôt des conditions limites sur la densité de charge injectée on introduit le nombre adimensionnel : $C_i = q_i \cdot d / \epsilon V$.

L'expression de la densité du courant devient :

$$j = \alpha(C_i) \frac{\epsilon K E^2}{d}$$

ou encore :

$$j = \alpha(C_i) \epsilon K \frac{V^2}{d^3}$$

$\alpha(C_i)$ n'est pas absolument définie ; mais pour C_i faible ($C_i < 0,3$) on note que $\alpha(C_i) = C_i$ quand q_i devient infinie (contact ohmique) , le courant limité seulement par la charge d'espace est :

$$j_{LCE} = \frac{9}{8} \epsilon K \frac{V^2}{d^3}$$

j_{LCE} : courant limité par la charge d'espace .

— Cas d'une densité de charge donnée (qui n'est pas infinie) ; si le contact n'est pas parfaitement ohmique , le courant n'est plus limité par la charge d'espace mais par la caractéristique de l'injecteur .

La densité de courant peut s'écrire :

$$j(t) = \alpha(C_i) \epsilon K \frac{V^2}{d^3}$$

La courbe de la figure(3) représente la variation de la densité réduite de courant d'injection en fonction du paramètre C_i ; elle s'interprète de la façon suivante :

- Pour $C_i \ll 1$ $j \propto V$
- Pour $C_i \approx 1$ $j \propto V^2$
- Pour $C_i \gg 1$ $j_{LCE} = \frac{9}{8} \epsilon K \frac{V^2}{d^3}$

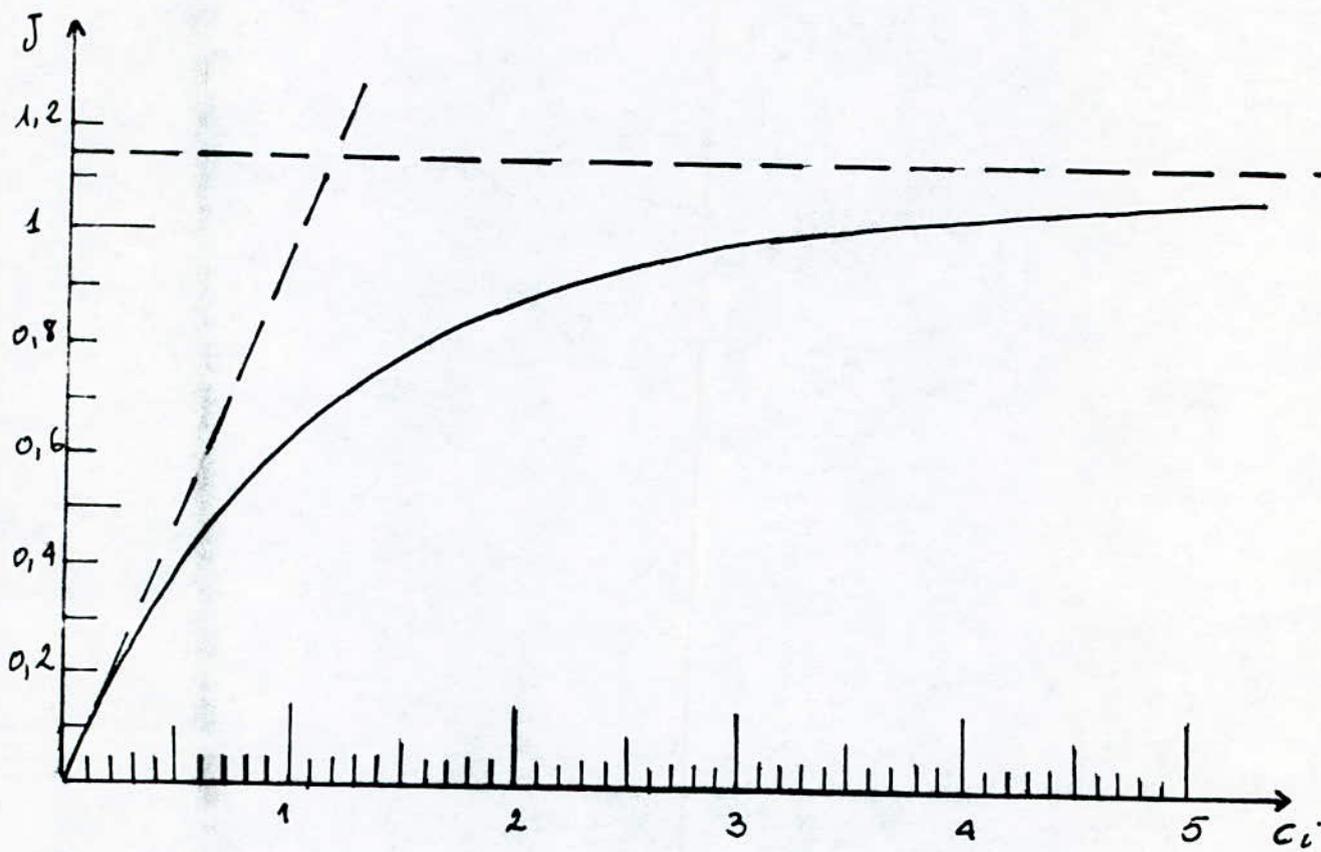


FIG - 3 -

Densité de courant en fonction du paramètre c_i en injection unipolaire

b) Régime transitoire d'une injection unipolaire

Dans le cas d'une injection faible ($C_i \ll 1$), le champ électrique entre les électrodes est pratiquement constant le long du liquide. On obtient la variation de la densité de courant $J(t)$ pendant le régime transitoire (q_i supposée constante)

$$j(t) = \frac{1}{d} \int_0^{X(t)} j(x,t) dx$$

et

$$j(x,t) = K_i q(x,t) E(x,t)$$

K_i : mobilité des porteurs injectés

$$E(x,t) \simeq E = V/d$$

$$q(x,t) = q = q_i \text{ indépendante de } x$$

On aura :

$$j(t) = K_i^2 E^2 q_i \frac{t}{d}$$

Et on introduisant les variables réduites :

$$j' = j \frac{d^3}{\varepsilon K V^2}, \quad t' = t K V / d^2$$

La relation précédente devient :

$$j' = C_i t' \text{ si on pose } j' = j \text{ et } t' = t$$

Cette relation devient

$$j = C_i T$$

On constate que pour C_i constante, le courant augmente linéairement avec le temps de la mesure du temps de transit on déduit la valeur de la mobilité K des porteurs et la mesure de J donne q_i et C_i . Ces valeurs ne sont valables que pour $C_i < 0,3$. Pour des valeurs de C_i plus élevées, les calculs numériques sont les seules approches possibles.

La figure (4) donne les variations dans le temps de la densité de courant réduite $J = j / \varepsilon K V d^{-3}$ obtenues par Atten et Gosse

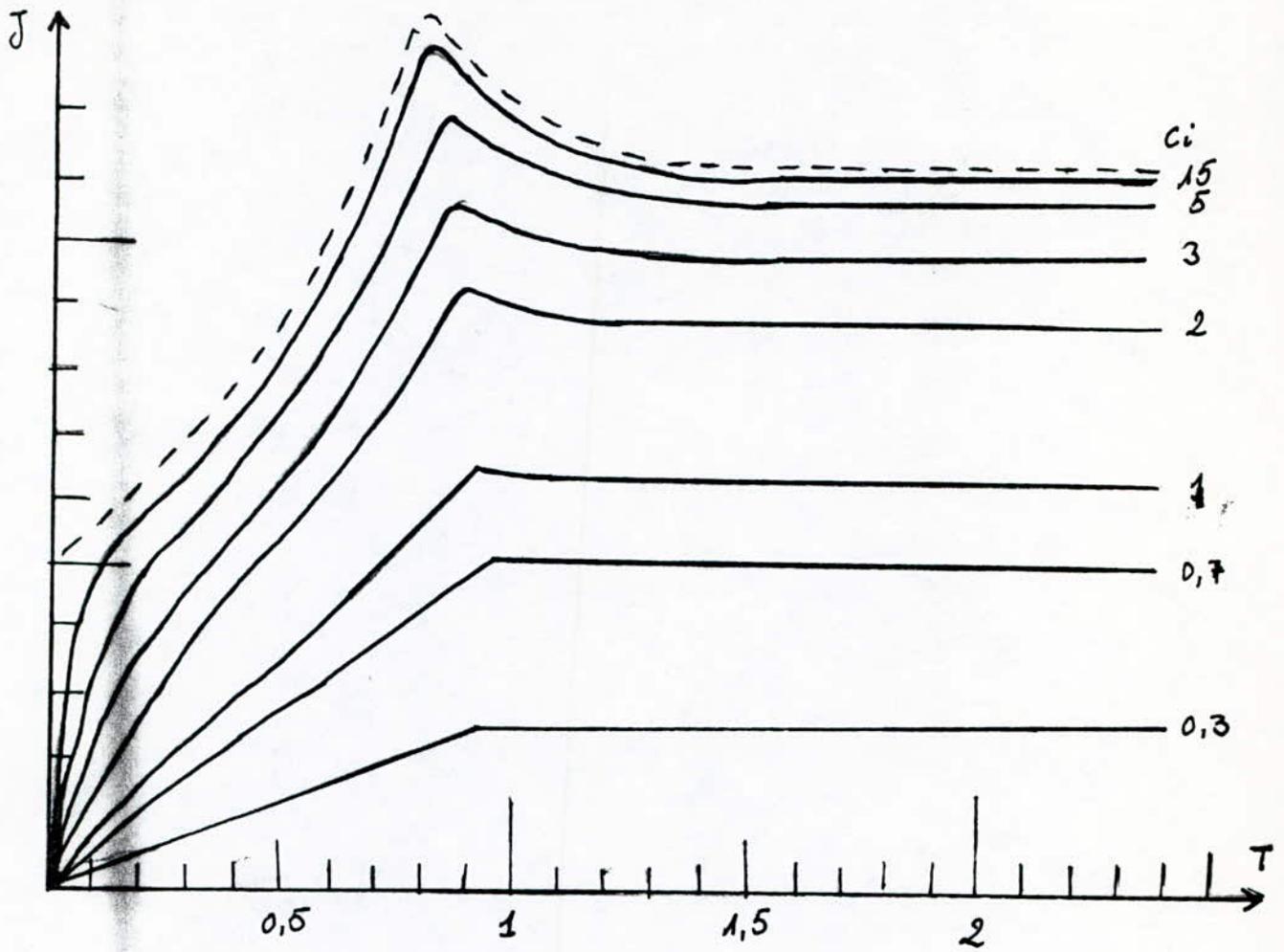


FIG-4-

Regime transitoire d'une injection unipolaire selon ATTEN et GOSSE

II - 7 - 2 L'EFFET DE L'EAU SUR L'INJECTION DE PORTEURS
=====

L'eau joue un rôle essentiel dans l'injection de courant sous champ fort en géométrie divergente . Il est en effet plausible que l'eau qui tend à s'accumuler aux arêtes par effet diélectrophoretique augmente suffisamment la permittivité au contact de l'injecteur pour favoriser l'injection .

Il est établi que la présence d'eau a une influence notable sur l'effet de la polarité , c'est à dire sur le rapport entre les courants mesurés pour les deux polarités opposées .

En outre , si un liquide pur est mis en mouvement entre cathode et anode , le courant observé ne change pas .

En revanche , si le liquide contient une faible teneur en eau , un balayage dans le sens cathode anode produit un accroissement du courant , alors qu'un balayage en sens inverse (anode - cathode) produit une diminution du courant .

Cela confirme que l'eau joue entre autre le rôle de vecteur de charges négatives piégées ; le phénomène d'injection dépend de la teneur en eau du liquide .

II - 8 CONDUCTION DES LIQUIDES DIELECTRIQUES ET REGIME DE LA DOUBLE COUCHE

II - 8 - 1 Regime des champs et des charges au voisinage d'une électrode en contact avec une solution électrolytique

- D'habitude solution la distribution des ions est isotrope et homogène dans chaque élément de volume .

C'est l'électroneutralité , le champ électrique dans la solution est très faible (fraction de V / cm) .

- sur l'électrode au contraire règne une " double couche " très compliquée faite d'ions et de molécules adsorbés où un des signes est dominant .

Il en résulte des champs électriques locaux extrêmement intenses établissant des différences de potentiel de l'ordre du volt entre metal et solution .

a) Lorsque la solution a un caractère conducteur

La tension appliquée aux électrodes se retrouve presque entièrement dans les couches doubles qui se comportent comme des condensateurs C_1 et C_2 en serie reliés par une faible résistance r (solution) (fig 5.a) .

b) Lorsque le liquide est presque isolant

La double couche persiste sous forme peut être modifiée , la relation entre la tension appliquée et différences de potentiel dans les couches doubles disparaît , les condensateurs C_1 et C_2 sont couplés par une petite capacité Γ (liquide isolant) avec en dérivation une très forte résistance R (conductibilité résiduelle)(fig 5.b) .

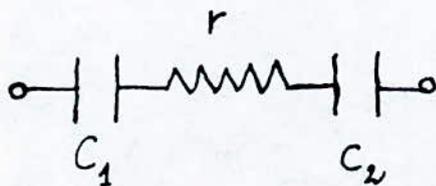


Fig - 5.a

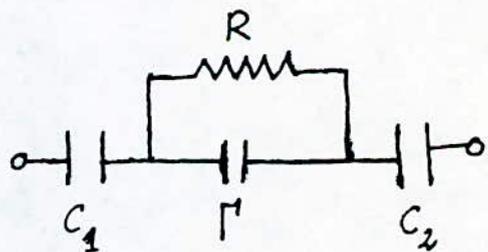


Fig - 5.b

II - 8 - 2 LES INTERPRETATIONS A EXCLURE

=====

Avant de faire la discussion de l'effet du champ sur le regime de la double couche qui sera le sujet central de la présente note , il convient d'ecarter certaines interpretations plus anciennes de la croissance rapide du courant avec la tension (voir courbe de NIKURADSE) qui ne sont plus tenables aujourd'hui on peut les classer sous les rubriques suivantes :

- a) Ionisation par choc et formation d'avalanches
- b) Emission électronique de la cathode
- c) Accroissement de la mobilité par le champ
- d) Dissociation électrolytique renforcée par le champ

II - 8 - 3 EFFET ELECTROSTATIQUE DU CHAMP SUR LA BARRIERE DE POTENTIEL

=====

DE LA DOUBLE COUCHE

←=====

Les ions créés à la surface de l'électrode par réaction électrochimique doivent franchir une barrière de potentiel importante (plusieurs électrons-volts) pour pénétrer dans le liquide libre . Le sommet de cette barrière est à une distance environ $d / 2$ de cette surface ; l'action du champ électrique E (qui devient ηE dans la couche double) abaisse cette barrière de $\eta E d / 2$.

avec :

E : champ électrique

d : l'épaisseur de la double couche

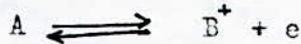
$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} : \quad \begin{array}{l} \epsilon_c : \text{permittivité de la double couche} \\ \epsilon : \text{permittivité du liquide en masse} \end{array}$$

Dans tout cela , on a supposé que les éléments constitutifs de la couche double (ions , molécules) n'étaient pas modifiés par le champ . Cette hypothèse est valable aux temps courts dans unliquide très peu conducteur .

II - 8 - 4 ÉVALUATION DE L'EFFET DU CHAMP EXTERIEUR SUR LA BARRIERE

Dans la zone de croissance rapide (voir fig 1), le courant est à peu près exclusivement un courant d'injection.

Rappelons que le courant d'injection i dû à une réaction d'électrode, par exemple l'oxydation de l'espèce neutre A en ions positifs B^+ :



est la différence d'un courant direct \vec{i} ($A \longrightarrow e + B^+$) et d'un courant inverse \overleftarrow{i} ($A \longleftarrow e + B^+$):

$$I = \vec{i} - \overleftarrow{i}$$

avec:

$$\vec{i} = k_1 n_A e \exp(-V_1/u)$$

$$\overleftarrow{i} = k_2 n_B e \exp(-V_2/u)$$

Lorsque i croît très vite avec E , le courant inverse \overleftarrow{i} est négligeable devant \vec{i} et l'on a pratiquement :

$$I = k_1 n_A e \exp(-V_1/u)$$

Pour n_A constant, i est déterminé par le changement ΔV de V_1 lorsque E est appliqué; pour l'effet " électrostatique ", (liquide bien isolant, temps court) :

$$\Delta V = -(1 - \beta) \eta E d$$

Nous prenons $\beta = 0,5$ faute de connaissance plus précises, ce qui donne :

$$\Delta V = -(1 - \frac{1}{2}) \eta E d = -\frac{\eta E d}{2} \quad \text{d'où}$$

$$I \propto \exp\left(-\frac{\Delta V}{u}\right) \text{ ou encore}$$

$$I \simeq \exp\left(\frac{\eta E d}{2u}\right) \quad \text{--- (a)}$$

avec:

k_1, k_2 : étant deux constantes cinétiques

n_A, n_B : les concentrations de A et B^+

V_1, V_2 : les barrières pour les réactions directe et inverse

- Sous tension continue la croissance observée est beaucoup plus rapide que ce qui est prévu par (a) . Donc il faut que V varie avec E d'une quantité :

$$\Delta V > \eta E d / 2 \quad (\text{fig 6}) .$$

II - 8 - 5 RELATION ENTRE L'EFFET "IONIQUE " ET LE CHAMP

Quand le champ apporte à la couche double des ions supplémentaires qui modifient la structure et la hauteur de la barrière c'est l'effet "ionique".

Pour avoir l'effet ionique , il faut que la couche double compacte s'accroisse de Δq lorsque le champ varie de ΔE . On peut poser la question comment une variation ΔE du champ "révèle " seulement une fraction de la densité de charges présentes ? Cela est certainement dû à une restructuration de la double couche analogue à celle qui a lieu en électrochimie classique lorsque le potentiel l'électrode varie (fig 7) .

II - 8 - 6 INFLUENCE DE L'ECARTEMENT DES ELECTRODES

Le courant pour un champ donné croît avec l'écartement des électrodes qualitativement , la chose est naturelle si on pense aux ions , plus il y a de liquide plus on peut en rassembler sur les électrodes . Si on imagine que la quantité d'ions est proportionnelle au volume soumis au champ ; cela voudrait dire que les ions sont proportionnels à la distance entre les électrodes , ce qui explique la relation exponentielle entre i et l parfois rencontrés (7) .

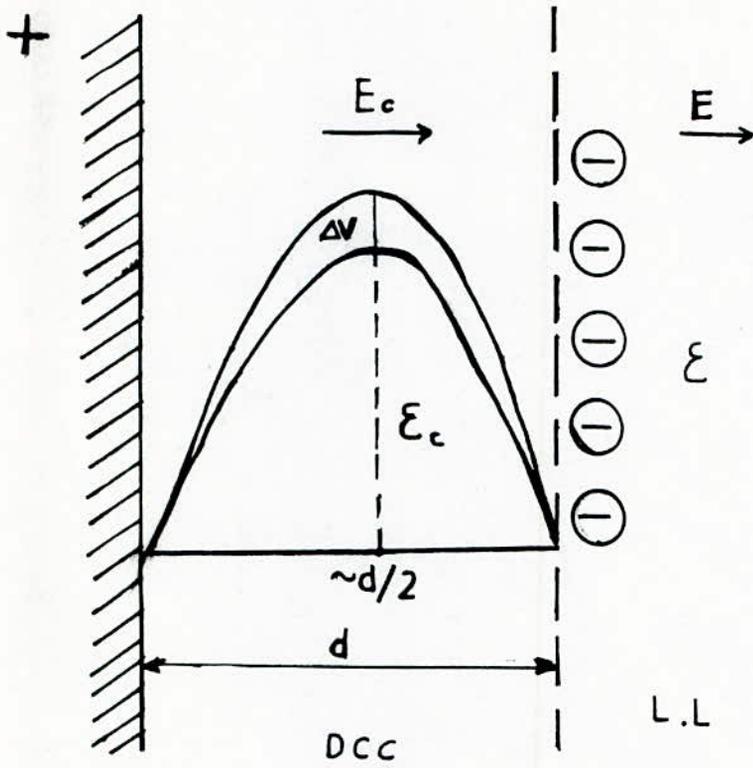


FIG-6-

Champ électrique et barrière de potentiel
près d'une électrode injectrice

D.C.C : Double couche compacte

L.L : Liquide libre

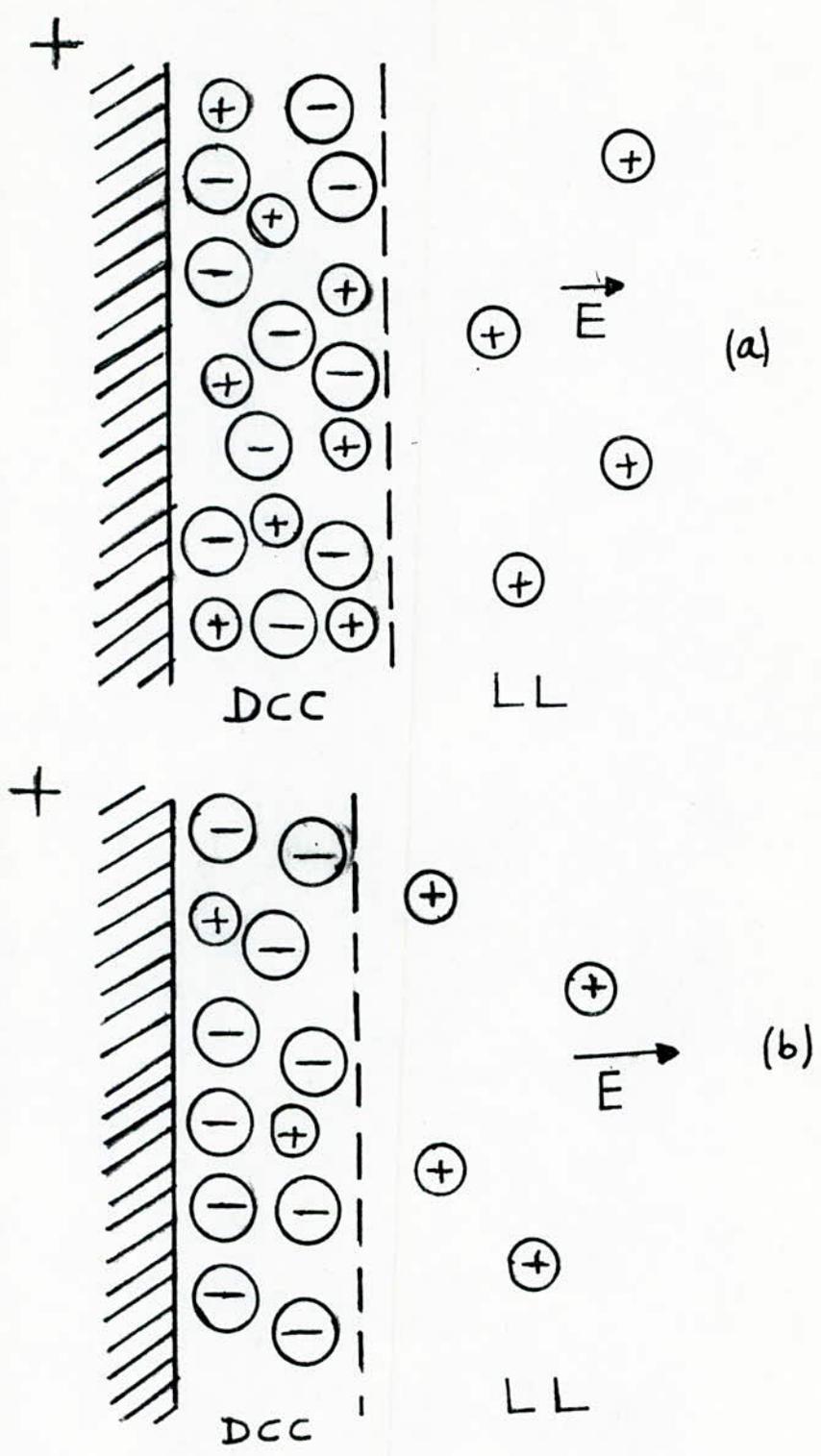


FIG-7-

Distribution des ions dans la double couche compacte

(a) : champ faible

(b) : champ fort

II - 9 - MECANISME DE TRANSPORT DE CHARGES

Le mécanisme de transport de charges par conduction est le plus simple à appréhender sous l'effet d'un champ électrique ; les ions se déplacent dans un milieu visqueux à vitesse constante proportionnelle au champ , le déplacement d'ensemble des ions est caractérisé par la mobilité .

Dans les liquides , ce mécanisme est souvent dominé pour le transport de charges par convection ; depuis une dizaine d'années il a été montré le caractère très générale de l'agitation hydrodynamique causée par un champ électrique dans un liquide contenant une charge d'espace .

En fin les réactions d'électrodes qui assurent le transport de charges entre le liquide et le metal mettent en jeu des espèces qui atteignent où quittent le metal par diffusion .

II - 9 - 1 TRANSPORT DE CHARGES PAR CONDUCTION

Le champ électrique appliqué facilite très faiblement le saut de l'ion d'un site à un autre dans le sens du champ (\vec{k}_s) et gene son saut dans le sens opposé (\vec{k}_s^{\leftarrow}). Ainsi la fréquence K_s du saut aidé par le champ s'écrit :

$$\vec{K}_s = K_{s_0} \exp \left(\frac{\Delta W_{el}}{KT} \right)$$

avec :

$$\Delta W_{el} = e_0 E \frac{l}{2} \quad ; (\text{energie libre de l'ion})$$

alors que la fréquence \vec{K}_s^{\leftarrow} du saut dans le sens opposé du champ est :

$$\vec{K}_s^{\leftarrow} = K_{s_0} \exp \left(- \frac{\Delta W_{el}}{KT} \right)$$

Un facteur ($\frac{1}{2}$) est introduit dans (ΔW_{el}) car l'ion pour passer dans l'état final doit arriver au sommet de la barrière de potentiel . Il a alors parcouru ($\frac{1}{2} l$) si l'on suppose la barrière symétrique , la vitesse moyenne de l'ion est :

$$v = \frac{l}{t} = l (\vec{K}_s - \vec{K}_s^{\leftarrow})$$

avec:

$$\Delta W_{el} = \rho_0 \frac{E l}{2} \quad \text{il vient}$$

$$v = 2 l K_{s_0} \operatorname{sh} \left(\rho_0 \frac{E l}{2 K T} \right) \quad \text{ou encore}$$

$$v = 2 l K_{s_0} \operatorname{sh} \left(\frac{E l}{2 U} \right)$$

avec: $U = \frac{K T}{\rho_0}$

K : constante de BOLTZMAN

ρ_0 : masse volumique du liquide

Aux champs électriques faibles on retrouve :

$$v = 2 l^2 K_{s_0} \frac{E}{2 U} \quad (**)$$

le terme $\frac{2 l^2 K_{s_0}}{2 U}$ à la dimension d'une mobilité ($\text{cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$)

Donc l'équation (**) s'écrit :

$$v = 2 l^2 K_{s_0} \frac{E}{2 U} = K E$$

K : mobilité ionique

E : le champ électrique

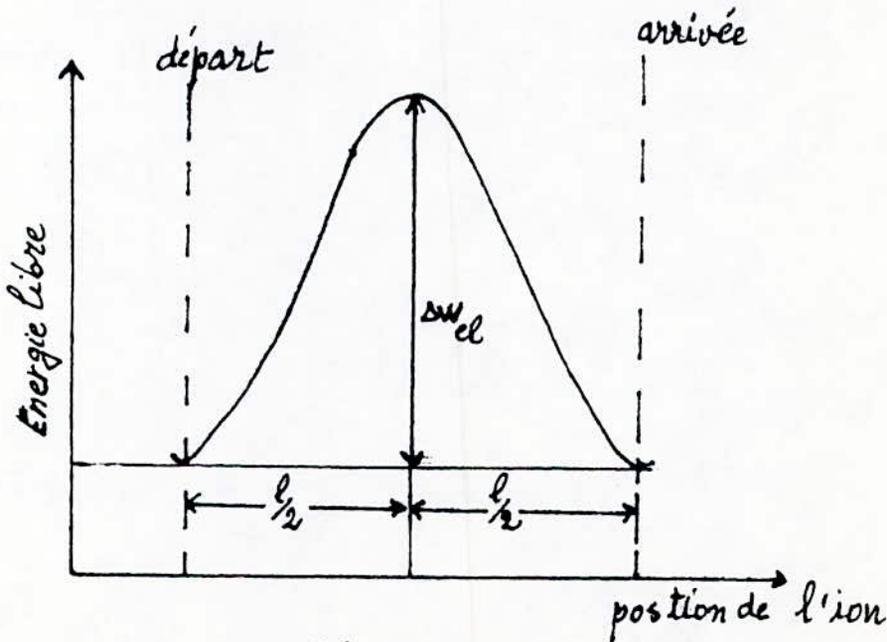


FIG - 8.

II - 9 - 2 TRANSPORT DE CHARGES PAR CONVECTION

L'effet principal du mouvement est de faciliter le transport de charges et de façon importante .

Il a été constaté expérimentalement que lorsque la tension appliquée au liquide dépasse une valeur critique (seuil d'instabilité) il apparaît toujours une agitation du liquide facilitant le transport de la charge . Cette valeur critique a été étudiée théoriquement et sa valeur est assez correctement ^{prévue} à (50 % présenviron)

II - 9 - 3 STABILITE ELECTROHYDRODYNAMIQUE ET INJECTION UNIPOLAIRE

a) Regime stationnaire

Les conditions de stabilité électrohydrodynamique d'un liquide soumis à une injection unipolaire ont été étudiées par ATTEN et MOREAU (11) ; le calcul fait apparaître le nombre adimensionnel

$$T = \frac{\epsilon V}{\eta k}$$

(η : viscosité du liquide)

Dans le cas d'une injection unipolaire , dans un liquide isolant parfait , le liquide reste immobile tant que T est inférieur à une certaine valeur critique T_c donc V est inférieur à une tension critique V_c .

Dans le cas d'une injection unipolaire limitée par la charge d'espace la condition s'écrit :

$$T < 161 \text{ d'où}$$
$$\epsilon V / \eta k < 161$$

Les valeurs de la tension critique V_c sont généralement faibles .

Exemple :

Lors de l'injection d'ion Cl dans le chloro biphényle à 20°C , la tension critique est environ 100V

Remarque :

C'est la tension et non le champ qui détermine la stabilité du liquide fait surprenant l'écartement des électrodes n'influe pas sur le déclenchement des phénomènes électrohydrodynamiques .

b) Regime transitoire

Lors de l'application d'une tension supérieure à la tension critique V_c à un liquide au repos, les expériences montrent qu'il y a deux phases distinctes lors du premier transit des ions à travers le liquide.

- Tant que la différence de potentiel existant dans le nuage de charge spatiale reste inférieure à V_c le liquide demeure immobile.

Le temps de retard T_r est égal dans le cas d'une densité de charge infinie sur l'injecteur à :

$$T_r = CSt_c \frac{\eta}{\epsilon E^2} \quad \epsilon: \text{permittivité du liquide}$$

La constante dépend du liquide et de son état de pureté ; pour le nitrobenzène bien purifié elle est de l'ordre de 100 (12).

L'agitation du liquide commence et augmente très rapidement quand la différence de potentiel dans la couche de charges d'espace devient supérieure à V_c .

- En suite le mouvement du liquide devient turbulent et gagne de proche en proche tout le volume du liquide, d'où l'apparition d'une différence de pression de l'ordre $(\frac{\epsilon E^2}{2})$; de son côté l'hydrodynamique enseigne qu'une différence de pression (ΔP) peut créer une vitesse \vec{u} telle que :

$$\frac{1}{2} \rho u^2 = \Delta P = \frac{\epsilon E^2}{2}$$

et par suite
$$u = \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} E$$

La quantité $\sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}}$ est appelée mobilité électrodynamique (K_h), dans la plupart des liquides elle est considérablement plus grande de la mobilité vraie des ions.

L'expérience montre que la vitesse turbulente lorsque l'injection et la tension sont suffisamment fortes est de l'ordre $\sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} E$.

Il y a donc un rapport constant entre la vitesse du liquide et celle des ions. Considerons le nombre sans dimension $M = \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} / K$, le nombre est dans les liquides presque toujours plus grand que l'unité ; généralement plus grand (voir tableau des valeurs).

Cela signifie que le transport de charges par convection est plus efficace que celui par migration d'ions.

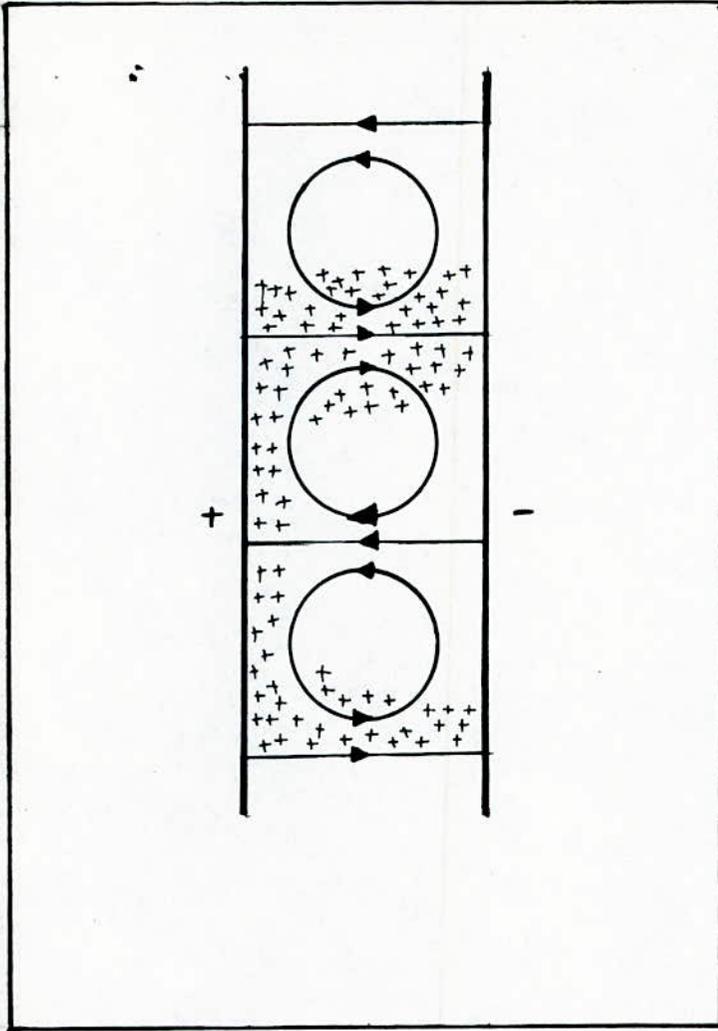
Valeurs de M pour différents liquides

liquides	ϵ/ϵ_0	$M = K_R / K$
Hexane	1,9	2
Chlorobenzène	6,0	5
Pyralène 1460	5,9	60
Pyralène 1500	6,4	290
Nitrobenzène	35	22
Carbonate de propylène	69	51

Notons que dans le cas des gaz on a la situation inverse $M \ll 1$

II - 9 - 4 MECANISME DE L'ELECTROCONVECTION PAR INJECTION UNIPOLAIRE

Lorsque le liquide est en mouvement tourbillonnaire entre deux électrodes , cela favorise le transport des ions là où ce mouvement va de l'injecteur au collecteur et s'y oppose dans le cas inverse . Si la vitesse du liquide dépasse celle des ions (KE) au moins en certains points , les ions injectés seront bloqués là où le liquide revient vers l'injecteur (fig 9) .



Mécanisme de l'électroconvection
par injection unipolaire

FIG-9-

CONCLUSION

Nous avons dans ce chapitre exposé les idées modernes concernant le phénomène de conduction dans les liquides isolants que nous les citerons comme suit :

- 1°) La dissociation et la recombinaison d'impuretés électrolytiques existant initialement dans le liquide où les molécules du liquide lui-même sont la cause de la conduction volumique et les deux premières parties de la fameuse courbe de NIKURADSE sont dues à ce type de conduction .
- 2°) Les phénomènes d'injection dépendent de la nature du contact entre le liquide et l'électrode , ces phénomènes ne sont sensibles qu'aux champs moyens . La densité de courant injectée est une fonction de C_2 (le nombre adimensionnel

$$J = f(C_2) \frac{\epsilon K V^2}{d^3}$$

Le courant dans la zone de croissance rapide de la courbe de NIKURADSE est exclusivement un courant d'injection .

- 3°) Les phénomènes électrohydrodynamiques et les phénomènes d'injection sont étroitement liés .

Le courant électrique est transporté avant tout par convection et bien peu par conduction (migration des ions par mobilité) .

La principale remarque à faire est que la tension qui gouverne les phénomènes électrohydrodynamiques et non le champ , et par suite la distance entre les électrodes n'influe pas sur ces phénomènes .

- 4°) L'application d'un champ électrique constant ne conduit pas à une valeur constante du courant sauf pendant le court intervalle de temps (seconde) où la densité de charge ne varie pas trop .

- 5°) L'effet électrostatique du champ sur la barrière de la double couche ne suffit pas . Il faut que la couche double s'accroisse quand le champ varie de ΔE (effet ionique du champ) .

CHAPITRE III

LE CLAQUAGE ET LE PRECLAQUAGE DANS LES LIQUIDES DIELECTRIQUES

INTRODUCTION

Le problème de la conduction des liquides diélectriques dans les champs forts , jusqu'au claquage est un phénomène très complexe ; un grand nombre de processus nouveaux et mal connus interviennent .

Il existe de nombreuses interprétations de l'apparition du claquage dans les diélectriques liquides .

Certains l'attribuent à des phénomènes macroscopiques , telle que la concentration d'une grande quantité de chaleur en un point particulier (le plus souvent près de la cathode) , la présence d'impuretés , de particules en suspension , de bulles de gaz ... Par contre , autres pensent que ce phénomène est strictement lié à la microstructure du liquide .

D'une manière générale , les théories émises pour expliquer le mécanisme du claquage peuvent être classées en deux groupes :

La première dite électronique , la seconde liée à des processus de collisions et d'ionisation pouvant se produire dans les bulles de gaz est dite théorie des bulles .

La théorie électronique de claquage n'est qu'une extension de la théorie de TOWNSED sur la décharge dans les gaz appliquée à un liquide . Cette théorie ne s'applique qu'au cas des champs particulièrement élevés (quelques MV/Cm) . Par contre le mécanisme des bulles a essentiellement pour but d'expliquer l'influence de la pression sur le claquage des liquides diélectriques ; car l'apparition d'une bulle conductrice instable est un événement catastrophique qui peut conduire au liquide au claquage du liquide .

III-1 DÉCLENCHEMENT DU CLAQUAGE PAR DES PARTICULES

=====

L'emploi de techniques impulsives élaborées (impulsions de très courte durée) a permis d'obtenir des valeurs reproductibles de la tension disruptive dans des conditions expérimentales bien précises ; mais il est apparu que les défauts microscopiques tels que ; les aspérités sur la surface des électrodes , des particules en suspension dans le liquide ; jouent un rôle qui peut être prépondérant dans le déclenchement du claquage .

La cause extrinsèque la plus fréquemment invoquée pour la rupture diélectrique est la présence , pratiquement inévitable , de particules en suspension dans le liquide . Ces particules se chargent sur une électrode et transportent leurs charges sur l'autre électrode où elles reprennent une charge de signe opposé et ainsi de suite .

1°) Particules non conductrices

L'influence de particules isolantes en suspension dans un liquide diélectrique est très importante dans le déclenchement du claquage . Car ces particules seraient attirées par l'effet diélectrophorétique lié à leur moment dipolaire induit , vers les régions de champ intense .

Il résulte de cette attraction , une formation de ponts entre les électrodes (13). La rupture résulterait alors , soit de l'échauffement produit par effet joule dans le pont , qui est plus conducteur que le liquide dans ce cas , soit de la valeur très élevée que peut prendre localement le champ avant l'achèvement du pontage .

2°) Particules conductrices

Les particules conductrices , constituées par exemple des fragments d'électrodes , peuvent également se trouver en suspension dans un liquide . Ces particules métalliques peuvent se charger au contact d'une électrode , transportent leurs charges sur l'autre électrode et ainsi de suite .

La charge acquise par une particule métallique conductrice de rayon R dans un liquide de permittivité ϵ , au contact d'une électrode soumise initialement à un champ électrique E est :

$$Q = 6,58\pi\epsilon R^2 E_0 ; ; \quad (13)$$

Plusieurs auteurs ont vérifié la validité de cette relation, en déterminant expérimentalement la valeur minimale du champ électrique E_0 nécessaire pour décoller une particule sphérique d'une électrode horizontale sur laquelle elle repose. Les particules peuvent acquérir une charge au sein du liquide, soit spontanément par effet électrophorétique, soit sous l'influence du champ électrique appliqué (A3) ;.

On distingue deux types de charge des particules :

a) Charge électrophoretique : (due au potentiel électrochimique)

Lorsqu'un liquide neutre est en contact avec une surface solide, cette surface capte des charges au liquide ou au contraire y injecte des ions. Cet échange de charges à l'interface a pour effet de la polariser, transformant celle-ci en double couche électrique.

Selon le cas des électrons tendent à quitter le solide (auquel cas, le processus est équivalent à une émission électronique créant dans le liquide une charge négative répartie conformément à la loi de Poisson et laissant à la surface du solide une charge positive opposée), soit à échapper du liquide et se fixer à la surface du solide (auquel cas, le processus est équivalent à une capture d'électrons par le solide, donnant à celui-ci une charge superficielle négative, et chargeant le liquide d'une charge égale et de signe opposé) (A3)

A cause de la taille des ions, dont les rayons sont de quelques Angströms, le potentiel à travers la double couche n'est pas discontinu. Ce processus de charge n'est efficace que dans le cas d'un liquide contenant des ions en concentration suffisante, qui peut le cas d'un liquide relativement à isolant.

b) Charge acquise dans un champ

Si la particule, supposée initialement neutre, se trouve dans un liquide en présence d'un champ électrique appliqué, elle peut se charger. Par analogie avec le cas d'une particule dans un gaz, on aura trois mécanismes de charge :

- Charge par ionisation
- Charge par diffusion
- Charge par émission électronique

III-2 DECLENCHEMENT DU CLAQUAGE PAR LES BULLES DE GAZ

Le fait que la pression hydrostatique semble avoir une grande influence sur le disruptif d'un liquide isolant, on constate que les petites bulles jouent un rôle dans l'amorçage du claquage.

Plusieurs théories supposent qu'une fois le mécanisme précurseur amorcé, il conduit irrémédiablement au claquage. Il est donc nécessaire de discuter de la formation éventuelle de telles bulles et de la propagation de ces bulles.

III-2-1 Formation de bulles dans le liquide

On peut envisager essentiellement deux mécanismes de génération de bulles.

D'une part, la cavitation hydrodynamique, qui se produit lorsque la pression en un point du liquide s'abaisse au dessous de la pression du liquide;

D'autre part, l'ébullition locale que peut produire la dissipation d'énergie associée à des fortes densités de courant. (14)

1°) CAVITATION

On définit la cavitation comme étant la formation de cavités remplies de vapeur ou de gaz au sein d'un liquide en mouvement, lorsque la pression en un point du liquide devient inférieure à la pression de la vapeur saturante du liquide.

Elle s'amorce préférentiellement sur les germes microscopiques; une telle dépression peut être engendrée par: (14)

— L'action du champ électrique, provoquant l'électrostriction de liquide: les forces électrostatiques s'exerçant entre les couches interfaciales auraient tendance à écraser le liquide.

— L'action directe du champ électrique entraînant le mouvement du liquide.

2°) MECANISME THERMIQUE (EBULLITION)

Un autre mécanisme du claquage des liquides diélectriques, qui est basé sur l'ébullition de liquide, de telle sorte que la densité de courant peut être élevée en certains points de l'électrode pour y porter le liquide à l'ébullition. Donc l'échauffement du liquide pourrait résulter de l'effet joule, dû surtout au courant d'injection.

L'énergie ΔH nécessaire à produire l'ébullition d'un liquide peut être reliée au champ électrique E en géométrie plane par :

$$\Delta H = k E Z ; \text{ avec } k: \text{ étant une constante}$$

Z : temps de séjour du liquide dans la région de champ fort, au voisinage d'une aspérité sur la cathode à partir de laquelle le courant est limité par la charge d'espace. L'expérience donne la forme de courant $I \propto V^n$ avec $n=1,5$ (13).

III-2-2 Propagation des cavités

Dès qu'une bulle de gaz se forme dans un liquide, elle s'allonge dans la direction du champ électrique et son volume reste constant. Le claquage a lieu quand la chute de tension dans la bulle atteint le minimum de PASCHEN.

1°) BULLE ISOLANTE

Sous l'action d'un champ électrique uniforme E_0 , la bulle prend l'allure d'une ellipsoïde allongée; elle est stable et ne s'allonge pas indéfiniment.

Le champ dans le gaz, uniforme si l'élongation est modérée est :

$$E_G = \frac{3 \epsilon_r}{2 \epsilon_r + 1} E_0 \quad (14)$$

Il est très peu supérieur à E_0

$$E = 1,2 E_0 \quad \text{pour } \epsilon_r = 2 \quad \text{cas typique d'un hydrocarbure}$$

Si R désigne le rayon de la bulle et σ la tension superficielle, il y a allongement notable si :

$$\epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E_0^2 / 2 \gg 2 \sigma / R$$

On a alors sensiblement :

$$a^2 / R^2 = (\epsilon_r^2 E_0^2 / 4 \sigma) (\epsilon_r - 1)^2 / 2 \epsilon_r \quad ; a : \text{ le grand axe de l'ellipsoïde} \\ b : \text{ le petit axe}$$

D'autre part, le volume de la bulle est peu modifié car l'accroissement de la pression dans le gaz est minime.

En ce qui concerne la stabilité de la bulle, FELICI () a montré qu'il est peu probable qu'elle ne maintienne au delà de $a/b > 4 \pi^2 \approx 40$ (14).

2°) BULLE CONDUCTRICE
=====

Dans ce cas , les conditions sont totalement différentes :

La bulle ne peut être stable que si $a / b < 1,85$ (A) X , le champ électrique sur les poles de l'ellipsoïde devient $(a^2 / b^2) E_0$, d'ou une pression

$$\epsilon_0 \epsilon_r (a^4 / b^4) E_0^2 / 2 \quad ; \text{ qui doit être équilibrée par } : 2 a \sigma / b^2$$

Si E_0 est constant , l'elongation s'accroît tant que :

$$\epsilon_0 \epsilon_r R E^2 / \sigma > 0,206 \quad (A')$$

Si la bulle conductrice est instable , le champ électrique sur les poles peut atteindre des valeurs très grandes , ce qui pourrait déclencher le claquage dans le liquide ; la bulle tend à se diviser en chapelet de petites bulles .
Donc , plusieurs séquences sont possibles pour une bulle initialement présente dans un liquide ; selon son rayon , la nature du gaz , la pression et la permittivité du liquide .

III - 3 PHENOMENE DE STREAMER

=====

On considère qu'avant le claquage proprement dit , il existe une période de préclaquage comprenant elle - même deux phases :

a) Phase de génération

Pendant cette phase peuvent se manifester simultanément ou successivement des phénomènes de divers natures : électrique (conduction , injection) , optique (émission lumineuse) , hydrodynamique (mouvement du liquide , cavitation) , apparition de bulles ; ils entraînent au bout d'un temps t_g (temps de génération) l'apparition , en général au voisinage d'une électrode .

b) phase de propagation

L'indice optique du streamer diffère de celui du liquide (il est inférieur) . Le streamer émet de la lumière , produit des ondes de choc et un courant généralement constitué de pics brèfs et irréguliers ($< 10^{-1}$ A) ; il progresse en se ramifiant plus ou moins ; la vitesse de la branche qui pousse le plus rapidement est très variable d'un liquide à l'autre (10^2 à 10^5 m/s) , contrairement aux gaz où elle varie peu .

Ces caractéristiques de propagation sont communes à toutes sortes de liquide (polaires , non polaires , gaz liquéfiés) quelles que soient la forme d'onde de tension et la configuration des électrodes .

III - 3 - 1 DOMAINES DE TEMPS

=====

- Les phénomènes de préclaquage ont le plus souvent été étudiés sous tension impulsionnelle de valeur maximale V_{max} , de durée brève ($< 10^{-4}$ s) , avec des surtensions importantes .

Les temps de génération des streamers sont alors très courts , bien inférieurs aux temps de propagation t_p , et le temps de retard du claquage t_r est tel que

$$t_r \approx t_p$$

- Aux temps longs ($\gg 1s$), ce qui correspond à la tension continue, on a :

$$t_p \ll t_g$$

$$t_T \approx t_g$$

Les travaux portent essentiellement sur l'injection de charges dans les liquides purs aux champs très intenses (pointe - plan) .

- Sous tension alternative, on note que les temps de propagation sont très inférieurs à la demi - période des tensions de fréquence industrielle ; les streamers se propagent donc sous tension constante .

III - 3 - 2 STREAMERS SOUS TENSION ALTERNATIVE

=====

En tension alternative à 60 HZ appliquée entre pointe et plan bloqué, un simple enregistrement oscilloscopique des courants transitoires a permis à HARROLD (16) de montrer que en général pour des distances inférieures ou égales à 1 cm, dans des liquides très variés, seuls les streamers positifs traverseraient l'interstice .

A partir des pics de courant, il a évalué leur vitesse moyenne et l'influence de la distance (d) entre pointe et plan bloqué . L'observation visuelle permet de déceler une émission lumineuse, dont l'intensité et la couleur sont variables d'un liquide à l'autre .

La présence de seuls courants positifs est attribuée aux effets de charge spatiale . En provoquant une surtension alternative d'une seule demi - période, il est possible d'engendrer des streamers négatifs ou positifs entre pointe et plan bloqué .

Dans l'huile minérale, les streamers ont même allure et des comportements analogues à ceux que l'on observe sous impulsion ; des corrélations précises entre le courant, l'émission lumineuse, la vitesse et la ramification des streamers ont été obtenues () .

III - 3 - 3 STREAMERS SOUS CRENEAU DE TENSION
=====

1°) Vitesses des streamers:

Les vitesses moyennes des streamers varient fortement selon la structure des liquides (les plus élevées étaient obtenues dans les corps renfermant des halogènes) et que les vitesses de streamers positifs (engendrés sur l'anode) sont supérieures ou très supérieures à celles des streamers négatifs , ce qui les rend plus dangereux .

Quelle que soit la polarité , les streamers de faible vitesse ($< 0,5 \text{ km /s}$) ont une forme touffue de buisson et plus la vitesse est grande , plus l'aspect devient filamentaire .

2°) Courants et intensité lumineuse produits par les streamers:

De façon générale , aux intervalles faibles , les courants négatifs sont , pour les streamers lents ($< 0,5 \text{ km /s}$) , constitués d'impulsions brèves ($< 10 \text{ ns}$) dont l'amplitude croît et l'espacement décroît au cours de la propagation . L'intensité lumineuse a une allure semblable à celle du courant ; les courants positifs croissent de façon assez régulière jusqu'à un maximum (lors de leur) arrivée sur le plan bloquant) ; l'intensité lumineuse varie de façon analogue .

(*) MESURES ELECTRIQUES

- La mesure des courants prédisruptifs s'effectue à l'oscilloscope en relevant la tension aux bornes de résistances non inductives en esrie avec la cellule de mesure .

L'emploi d'analyseur numérique de regime transitoire se développe actuellement . La charge totale correspondant au courant prédisruptif s'obtient avec un integrateur rapide .

- La mesure de décharges partielles se font avec divers types d'appareils qui permettent d'évaluer leur nombre , leur amplitude , leur energie et leur évolution temporelle .

(**) MESURES OPTIQUES

La visualisation des streamers ou des microbulles se fait par la méthode des ombres ou par STRIOSCOPIE (pour augmenter le contraste) .

L'espace inter-électrodes est éclairé , pendant un très bref instant (quelques nanosecondes à quelques microsecondes) , par une lampe à éclat , une étincelle dans un gaz comprimé où un laser déclencher et photographié où filmé à l'aide de caméras ultra rapides (on peut obtenir 18 images en 1us) .

- L'intensité lumineuse émise par les streamers est mesuré par un (où plusieurs) photomulticateur ; sa distribution spectrale peut être analysée .

On utilise aussi des tubes intensificateurs de brillance qui donnent une image du phénomène lumineux . Soit en permanance , soit pendant un laps de temps choisi (10 ns) .

des cameras à balayage à fente permettent d'enregistrer l'évolution spatio - temporelle du phénomène lumineux (vitesse de balayage 1cm /ns) directement où sur le tube intersificateur d'image .

- L'emploi de poudres déposées au dos d'une surface isolante frappée par un streamer permet de visualiser la distribution des charges .

- La mesure de la distribution spatiale et temporelle du champ électrique dans le liquide est accessible par une méthode fondée sur l'effet électro-optique de KERR . Celle - ci permettait de faire des progrès décisifs (évaluation du champ sur les branches du streamer et de la conductivité de celui - ci) ; elle n'a pour l'instant été mise en oeuvre que dans un liquide polaire possédant une grande constante de KERR . (17)

CHAPITRE IV

ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION

Dans cette partie de notre travail nous essayons de visualiser les courants de streamer dans les liquides isolants soumis à une onde de choc , et de tracer les courbes tension - courant pour les deux polarités de la pointe (positive et négative)

Les liquides utilisés :

1) Le n - hexane

- permittivité relative : 1,9

2) L'huile de transformateur (Berrak 22)

- Permittivité relative : 2,2

- Rigidité diélectrique : 70 kv /cm

- Masse volumique à 20°C : 0,872 kg/ dm

- Viscosité à 20°C : 38.10^{-3} pa.s

Nous avons utilisé l'huile de transformateur dans trois états :

a) L'huile neuve

b) L'huile régénérée par distillation fractionnée contenant 5% d'acide

c) L'huile non régénérée

I - SCHEMA GLOBAL DU MONTAGE (fig 10-a)

=====

Il comporte les éléments suivants :

- * Cellule d'essai en teflon
- * Objectifs servent à concentrer la lumière sur les lunettes de la cellule
- * Appareil à photo placé sur l'axe des lunettes de la cellule
- * Pont de mesure
- * Oscilloscope à mémoire

II - SCHEMA DU MONTAGE DE MESURE (fig 10-b)

=====

La mesure des courants de streamer se fait par relevé sur un oscilloscope (de type PHILIPS PM 3305) de la chute de tension créée aux bornes d'une résistance en série avec la cellule d'essai .

II - 1 Pont de mesure

=====

Le pont de mesure est constitué de deux diodes rapides montées en tête bêche servent à la protection de l'appareil de mesure (oscilloscope) en parallèle avec une résistance .

II - 2 Cellule de mesure

=====

La cellule de mesure est constituée d'un corps en teflon et de deux électrodes planes et parallèles en acier inoxydable , sur l'une des électrodes nous pouvons fixer la pointe ; l'écartement des électrodes est ajusté à l'aide d'un filtage .

Dans le cas d'un système pointe-plan , on recouvre en général l'électrode à grand rayon de courbure par un isolant solide (barrière) possédant une rigidité diélectrique suffisante pour ne pas claquer le liquide pendant l'expérience et pour éviter l'établissement direct de l'arc entre les électrodes .

II - 3 Enregistrement des signaux des courants de streamer

=====

Les courants de streamer sont enregistrés sur un oscilloscope à mémoire (de type TEKTRONIX), la tension appliquée est indiquée par le générateur de choc , ainsi que la polarité de choc .

ELEMENTS DE LA CELLULE

- Electrodes : sont en acier inoxydable (duralumin)

- La pointe : est en acier dur à 100 pcs, de rayon de courbure de 5 um

* Teflon : on utilise ce produit pour ces meilleurs qualités physiques ,
électriques , chimiques et thermiques .

- Propriétés physiques :

C'est un corps qui a une résistance aux intempéries excellente et une absorption d'eau très faible .

- Propriétés électriques :

Resistivité volumique : $10^{15} \Omega/\text{cm}$

Resistance en surface à 100% d'humidité : $3,6 \cdot 10^6 \text{ M}\Omega$

Tension de claquage : 16 à 20 KV/centimètre

Resistance à l'arc : ne se carbonise qu'après 420 secondes

- Propriétés chimiques :

C'est un résine qui est résistant aux solvants courants (Acétone, Benzène
Tetrachlorure de carbone , etc ...) , aux acides et aux bases

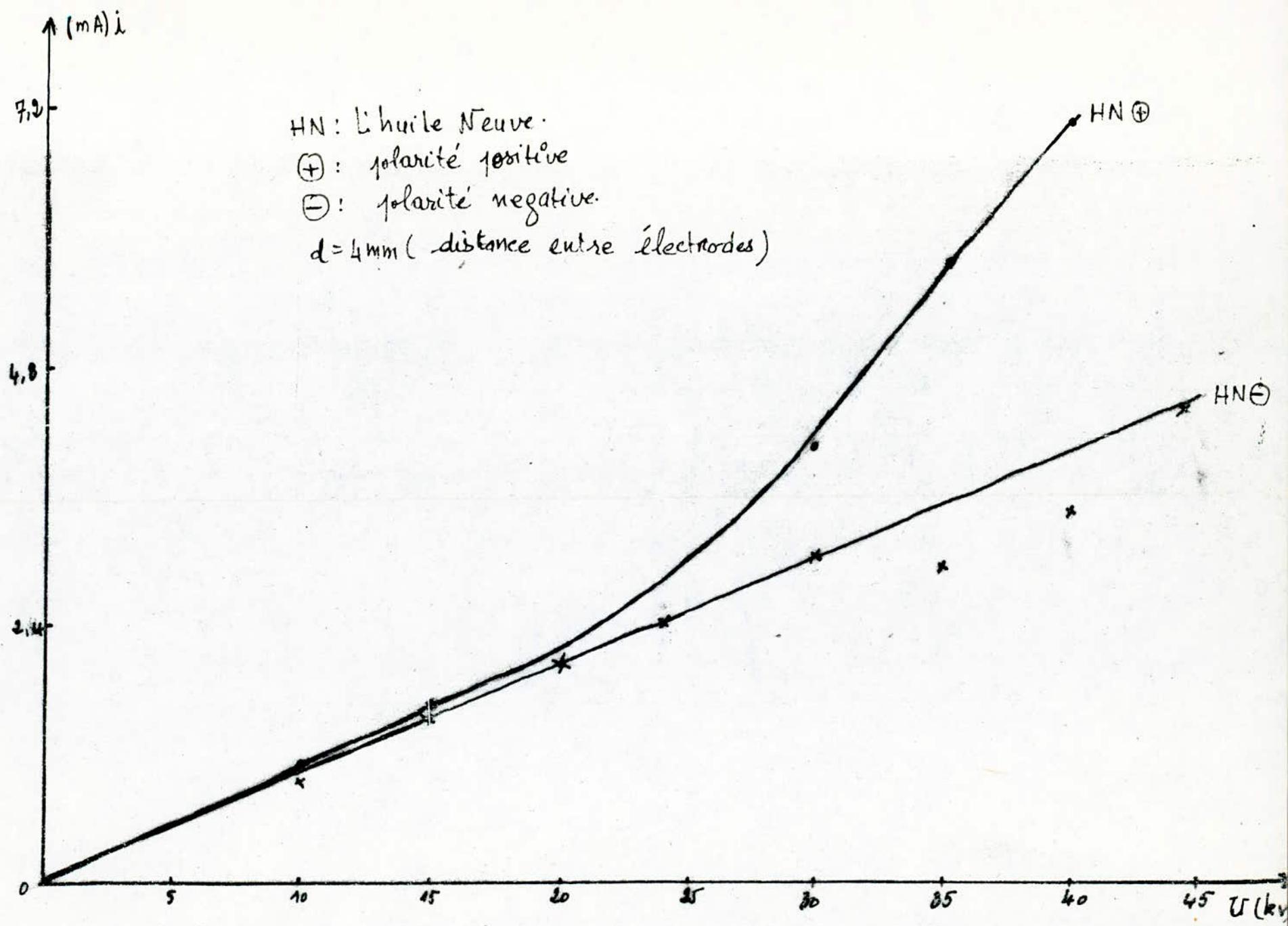
- Propriétés thermiques :

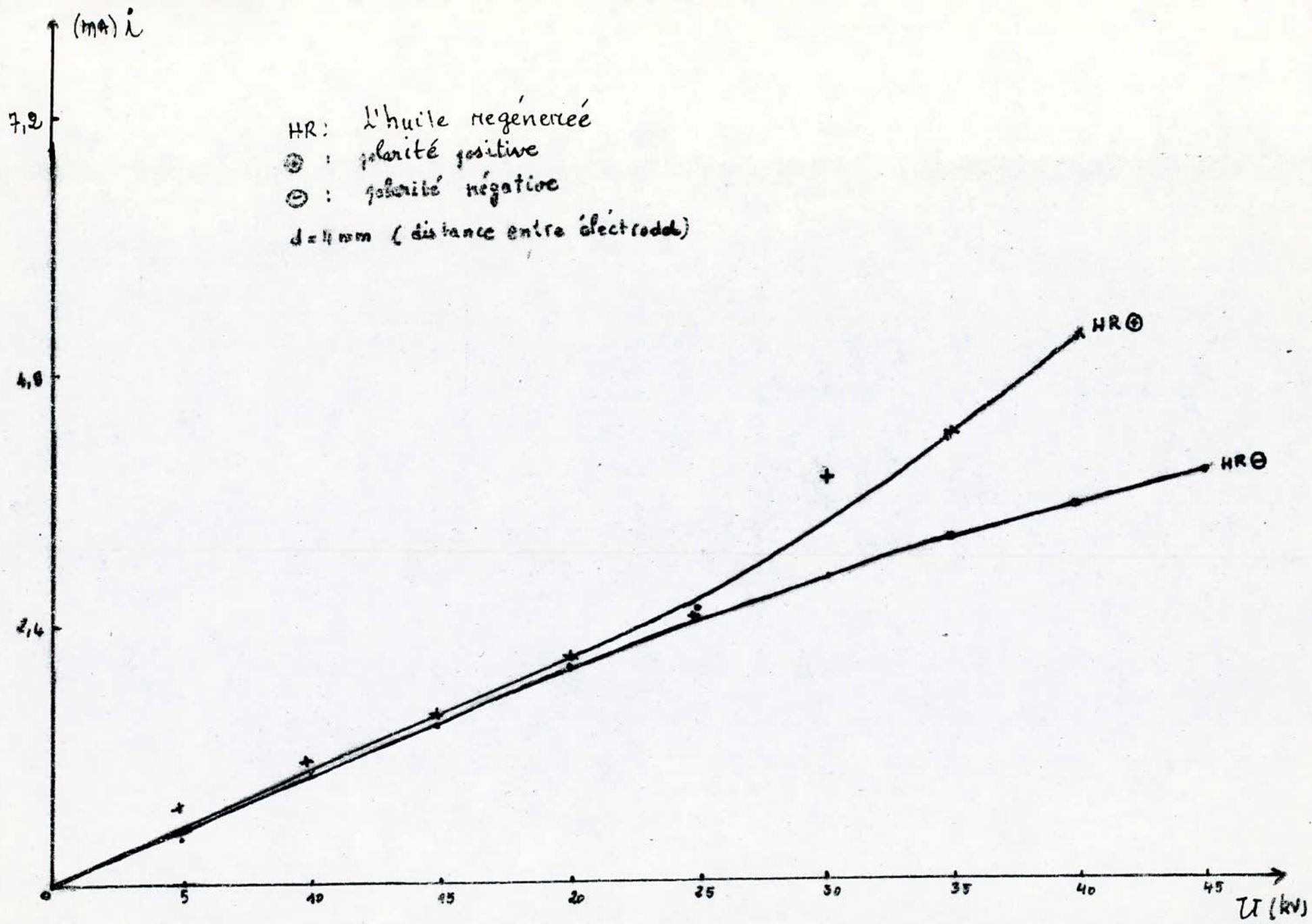
Coefficient de dilatation thermique : $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

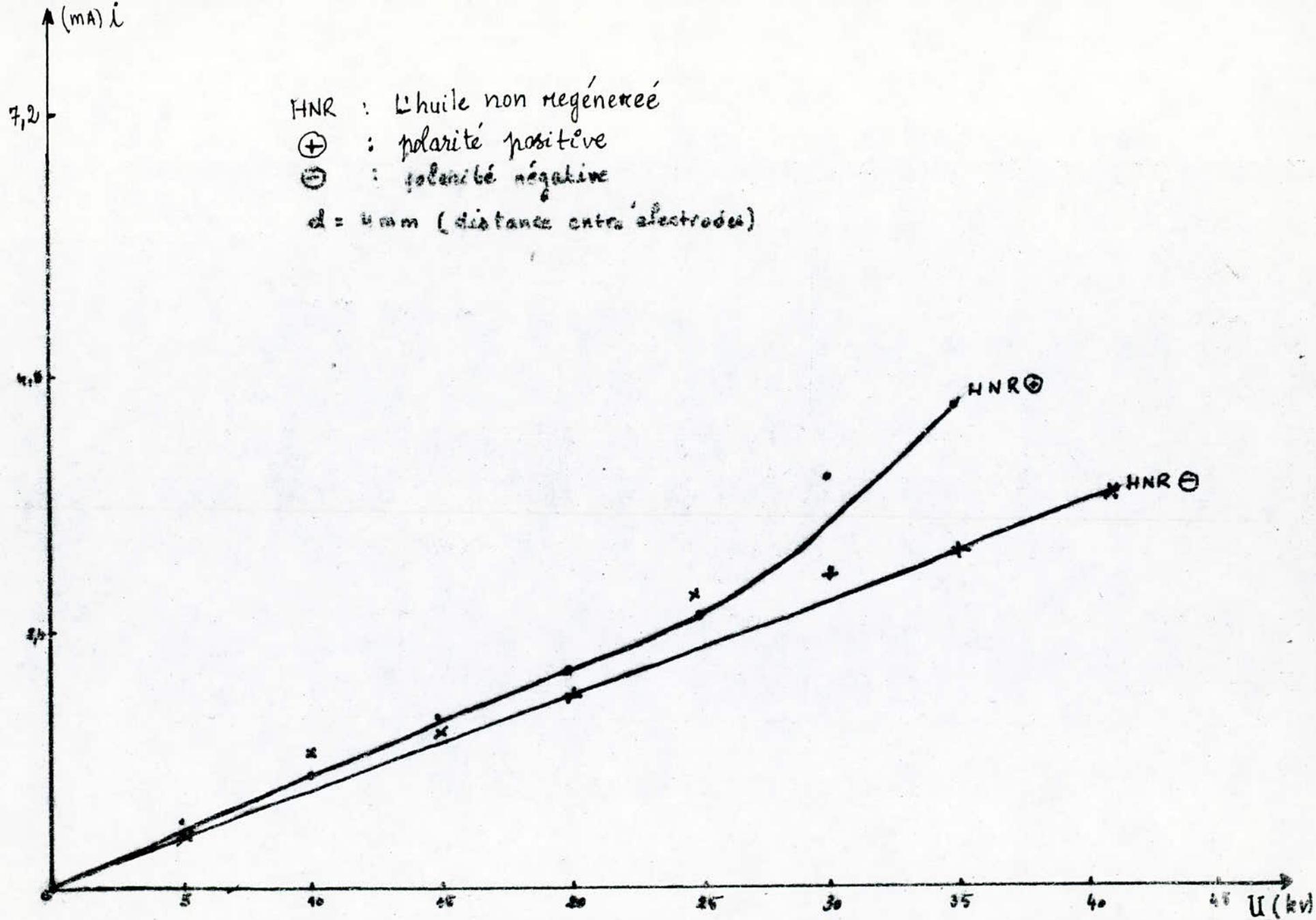
Température d'utilisation en continu : 250°C

Température de pseudo - fusion : 350°C

Ininflammable







INTERPRETATION DES RESULTATS

D'après notre visualisation aux courants des streamers , on peut remarquer en se basant sur les resultats publiés dans la littérature que :

- Pour les deux polarités , à la propagation du streamer correspond un courant comportant des pics plus ou moins nombreux et intense .
- L'amplitude et la forme des courants de streamers dependent de l'amplitude de la tension appliquée et de la polarité de la pointe .
- Pointe négative : le courant est constitué d'impulsions très brèves , irrégulièrement espacées .
- Pointe positive : la forme du courant comporte une composante continue .

Nous constatons qu'en polarité positive les valeurs des courants prédisruptifs sont plus grandes que celles en polarité négative . Ce qui explique l'effet dangereux des courants en polarité positive . L'ecart entre ces courants prédisruptifs est plus senti aux tensions élevées .

CONCLUSION

Ce travail que nous venons de faire nous a permis d'élargir nos connaissances sur le plan théorique aux questions posées sur les mécanismes de conduction dans les diélectriques liquides .

L'étude d'un tel phénomène est d'une extrême importance pour le calcul des pertes diélectriques dans les diélectriques liquides .

La conduction est de nature électrochimique , où le phénomène de création d'ions , soit au volume du liquide soit par injection de porteurs au niveau des électrodes , est le plus prépondérant . Ces ions créés doivent franchir une barrière de potentiel importante due à la formation d'une double couche .

Le mouvement du liquide lors d'application d'un échelon de tension contribue d'une façon importante au transport de charges , où le transport par effet électroconvectif est le plus dominant .

La tension critique pour laquelle le liquide est en mouvement est une fonction de la permittivité du liquide ; et sa valeur est faible pour les liquides polaires dont leur permittivité est élevée que celle des liquides non polaires .

Il est généralement admis que quelque soient la géométrie et la polarité des électrodes , le claquage des diélectriques liquides est précédé d'une phase de préclaquage durant laquelle un streamer prend naissance dans une région de champ élevé . Le courant de streamer que nous avons visualisé sur l'oscilloscope est fonction de la polarité et de l'amplitude de la tension appliquée .

En fin nous souhaitons qu'une étude expérimentale pour le phénomène de conduction soit faite au futur par des étudiants qui viennent de confirmer ce que nous venons de le faire théoriquement .

B I B L I O G R A P H I E

- (1) JOSEPH VUARCHEX : caracteristiques des liquides isolants , techniques de l'ingenieur , D230
- (2) A.R.VON HIPPEL : les diélectriques et leurs applications , Dunod 1961
- (3) J.J THOMSON , G.P THOMSON : conduction of electricity through gasses combrigre univ. PRESS .1928
- (4) M.SILVER : J.Chimie.Physique , 42,1011 ,1965
- (5) G.BRIERE , F.GASPARD : J.Chimie.Physique ,64,1071 , 1967
- (6) J.MALECKI , P.PIERANSKI : Acta phys ,POL.A ,50,581,597 , 1976
- (7) A.DENAT : Etude de la conduction électrique dans les solvants non-polaires ,Thèse d'etat , Grenoble ,1973
- (8) R.TOBAZEON : Etude des phénomènes d'interface au contact d'un liquide isolant , Thèse d'etat , Grenoble
- (9) A.MANY , G.RAKAVY : Phys .rev ,126,1989 , 1962
- (10) N.FELICI : comp.rend , 256,3254 , 1963
- (11) P.ATTEN , R.MOREAU : Jour.Meca ,II, 471 , 1972
- (12) N.FELICI , B.GOSSE , J.P.GOSSE : la conduction dans les diélectriques liquides , R.G.E ,t.85 , n°II , 1976
- (13) E.CORLHO et J.P.GOSSE :claquage des diélectriques liquides , Annales de physique , t.5,n°4 , 1970
- (14) J.P.GOSSE :claquage des diélectriques liquides , thèse de doctorat
- (15) R.TOBAZEON : preclaquage et claquage dans les diélectriques liquides techniques de l'ingenieur D226
- (16) Techniques de l'ingenieur D225
 - N.FELICI : la conduction électrique dans les diélectriques liquides sous haute tension et regime de la double couche aux électrodes physique de la matiere condensée
 - N.FELICI : la conduction électrique dans les diélectriques liquides phénomènes d'instabilité et de transport , mécanisme chimique et hydrodynamique , jour.phys , Col.C1 supplément au n°1,t37,C1 117 ,1976
 - N.FELICI : Mouvement d'un liquide en présence d'un champ électrique techniques de l'ingenieur D228
 - J.P.GOSSE et N.FELICI :Injection d'ions par des électrodes métalliques dans les hydrocarbures liquides de resistivité élevée , journal de physique appliquée ,p.629 ,mai1979

