

T H E S E S

présentées

A L A F A C U L T E D E S S C I E N C E S D E

L ' U N I V E R S I T E D E G R E N O B L E

en vue de l'obtention du  
GRADE DE DOCTEUR-INGENIEUR

par

Robert TOBAZEON

Ingénieur I. E. G.

-oOo-

PREMIERE THESE

Etude du transfert convectif de charges électriques par un jet de liquide isolant et application à la génération de tensions élevées.

DEUXIEME THESE

Propositions données par la Faculté

Soutenues le 27-7-1966 , devant la Commission d'examen :

MM - N. FELICI	- Président
M. FALLOT	- Examineur
G. BRIERE	- Examineur

UNIVERSITE  
DE  
GRENOBLE

FACULTE DES SCIENCES

DOYEN HONORAIRE M. MORET L.

DOYEN M. WEIL L.

PROFESSEURS TITULAIRES

MM. NEEL L. ....	MAGNETISME ET PHYSIQUE DU SOLIDE
HEILMANN R. ....	CHIMIE ORGANIQUE
KRAVTCHENKO J. ....	MECANIQUE RATIONNELLE
CHABAUTY C. ....	CALCUL DIFFERENTIEL ET INTEGRAL
PARDE M. ....	POTAMOLOGIE
BENOIT J. ....	RADIOELECTRICITE
CHENE M. ....	CHIMIE PAPETIERE
BESSON J. ....	ELECTROCHIMIE
WEIL L. ....	THERMODYNAMIQUE
FELICI N. ....	ELECTROSTATIQUE
KUNTZMANN J. ....	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
BARBIER R. ....	GEOLOGIE APPLIQUEE
SANTON L. ....	MECANIQUE DES FLUIDES
OZENDA P. ....	BOTANIQUE
FALLOT M. ....	PHYSIQUE INDUSTRIELLE
GALVANI O. ....	MATHEMATIQUES
MOUSSA A. ....	CHIMIE NUCLEAIRE
TRAYNARD P. ....	CHIMIE
SOUTIF M. ....	PHYSIQUE
CRAYA A. ....	HYDRODYNAMIQUE
REULOS R. ....	THEORIE DES CHAMPS
AYANT Y. ....	PHYSIQUE APPROFONDIE
GALISSOT F. ....	MATHEMATIQUES
Mle LUTZ E. ....	MATHEMATIQUES
MM. BLAMBERT M. ....	MATHEMATIQUES
BOUCHEZ R. ....	PHYSIQUE NUCLEAIRE
LLIBOUTRY L. ....	GEOPHYSIQUE
MICHEL R. ....	GEOLOGIE ET MINERALOGIE
BONNIER E. ....	ELECTROCHIMIE
DESSAUX G. ....	PHYSIOLOGIE ANIMALE
PILLET E. ....	ELECTROTECHNIQUE
DEBELMAS J. ....	GEOLOGIE
GERBER R. ....	MATHEMATIQUES
PAUTHENET R. ....	ELECTROTECHNIQUE
VAUQUOIS B. ....	MATHEMATIQUES APPLIQUEES

	SILBER R. ....	MECANIQUE DES FLUIDES
	BARBIER J.C. ....	PHYSIQUE
	KOSZUL J.L. ....	MATHEMATIQUES
	BUYLE-BODIN M. ....	ELECTRONIQUE
	DREYFUS B. ....	THERMODYNAMIQUE
	KLEIN J. ....	MATHEMATIQUES
	VAILLANT F. ....	ZOOLOGIE
	ARNAUD P. ....	CHIMIE
	SENGEL P. ....	ZOOLOGIE
	BARJON R. ....	PHYSIQUE NUCLEAIRE
	BRISSONNEAU P. ....	PHYSIQUE
Mme	KOFLER L. ....	BOTANIQUE
MM.	BARNOUD F. ....	BIO-SYNTHESE DE LA CELLULOSE
	GAGNAIRE D. ....	CHIMIE PHYSIQUE
	GIRAUD P. ....	GEOLOGIE
	GIDON P. ....	GEOLOGIE ET MINERALOGIE
	PERRET R. ....	SERVOMECHANISMES
Mme	BARBIER M.J. ....	ELECTROCHIMIE
Mme	SOUTIF J. ....	PHYSIQUE
MM.	COHEN J. ....	ELECTROTECHNIQUE
	DEPASSEL R. ....	MECANIQUE
	ANGLES D'AURIAC ....	MECANIQUE DES FLUIDES
	DUCROS P. ....	MINERALOGIE ET CRISTALLOGRAPHIE
	GASTINEL A. ....	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	GLENAT R. ....	CHIMIE
	LACAZE A. ....	THERMODYNAMIQUE
	BARRA J. ....	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	COUMES A. ....	ELECTRONIQUE
	DEGRANGE C. ....	ZOOLOGIE
	PEBAY-PEROLA ....	PHYSIQUE
	PERRIAUX J. ....	GEOLOGIE
	RASSAT A. ....	CHIMIE SYSTEMATIQUE
	ROBERT A. ....	CHIMIE PAPETIERE

#### PROFESSEURS ASSOCIES

MM.	NAPP-ZINN .....	BOTANIQUE
	DUTTON G. ....	BIOSYNTHESE
	MATSUSHIMA Y. ....	MATHEMATIQUES PURES

#### MAITRES DE CONFERENCES

MM.	BIAREZ J.P. ....	MECANIQUE PHYSIQUE
	DODU J. ....	MECANIQUE DES FLUIDES
	HACQUES G. ....	CALCUL NUMERIQUE
	LANCIA R. ....	PHYSIQUE AUTOMATIQUE

Mme	KAHANE J. ....	PHYSIQUE
MM.	POLOUJADOFF M. ....	ELECTROTECHNIQUE
	DEPOMMIER P. ....	PHYSIQUE NUCLEAIRE
	DEPORTES C. ....	CHIMIE
Mme	BOUCHE L. ....	MATHEMATIQUES
MM.	SARROT-REYNAULD ....	GEOLOGIE
	CAUQUIS G. ....	CHIMIE GENERALE
	BONNET G. ....	PHYSIQUE EXPERIMENTALE
	BONNIER M.J. ....	CHIMIE
	KAHANE A. ....	PHYSIQUE GENERALE
	DOLIQUE J.M. ....	ELECTRONIQUE
	BRIERE G. ....	PHYSIQUE EXPERIMENTALE
	DESRE P. ....	METALLURGIE
	LAJZEROWICZ J. ....	PHYSIQUE GENERALE
	VALENTIN P. ....	PHYSIQUE GENERALE
	BERTRANDIAS J.P. ....	MATHEMATIQUES APPLIQUES
	BONNETAIN L. ....	CHIMIE MINERALE
	LAURENT P. ....	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	CAUBET J.P. ....	MATHEMATIQUES PURES
	PAYAN J.J. ....	MATHEMATIQUES
Mme	BERTRANDIAS F. ....	MATHEMATIQUES PURES
MM.	FONTANGES R. ....	PHYSIOLOGIE ANIMALE
	LONGEQUEUE J.P. ....	PHYSIQUE
	NIVAT M. ....	MATHEMATIQUES APPLIQUEES
	SOHM J.C. ....	ELECTROCHIMIE
	ZADWORNY F. ....	PHYSIQUE

#### MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

MM.	RADELLI ....	GEOLOGIE
	KEYSTON J. ....	THERMODYNAMIQUE
	WAKIYAMA T. ....	PHYSIQUE DU SOLIDE

J'exprime ma respectueuse reconnaissance et mes remerciements à M. le Professeur L. NEEL pour l'accueil bienveillant qui m'a été réservé au Laboratoire d'Electrostatique et de Physique du Métal, qu'il dirige à Grenoble.

Le sujet de cette thèse a été inspiré par M. le Professeur N. FELICI. La qualité de son enseignement, et la bienveillante sollicitude qu'il a bien voulu me témoigner, m'ont été précieuses dans l'accomplissement de ce travail, et ont été décisives dans mon orientation vers la recherche. Qu'il me permette de lui exprimer ici ma respectueuse admiration et mes remerciements sincères.

J'adresse mes remerciements à M. le Professeur H. FALLOT pour l'obligeance avec laquelle il s'est occupé de mon second sujet de thèse. Qu'il me permette aussi de lui exprimer toute ma gratitude pour l'enseignement qu'il m'a prodigué au cours de mes études à l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs.

Que M. G. BRIERE, Maître de Conférence, trouve ici l'expression de ma vive gratitude ; j'ai toujours trouvé en lui un conseiller éclairé ; son dynamisme et la cordialité de ses rapports ont stimulé mon travail d'initiation à la recherche.

J'adresse mes remerciements sincères à M. E. GARTNER, Chef de Laboratoire au C.N.R.S., qui par son aide bienveillante et ses conseils précieux a grandement contribué à l'accomplissement de ce travail.

Je remercie enfin tout le personnel du Laboratoire et particulièrement M. L. DEFILIPPI pour la qualité de son travail.

## I N T R O D U C T I O N

L'étude des diélectriques liquides soumis au champ électrique n'a pas toujours reçu toute l'attention qu'elle méritait ; des difficultés théoriques et pratiques ont motivé un tel désintérêt. Il n'existe pas de théories des liquides qui permette d'expliquer leurs propriétés physiques ni à l'échelle moléculaire, ni à l'échelle macroscopique ; or, l'étude des diélectriques fait intervenir leurs propriétés physiques, et pas seulement leur forme géométrique. On conçoit qu'il s'avère délicat de traiter des liquides diélectriques sur le plan fondamental. L'expérimentation, pour sa part, nécessite méthodes et appareillage dont l'élaboration soulève bien des difficultés ; elle se distingue notamment, par un manque de reproductibilité des mesures, insolite dans le domaine des sciences exactes.

Néanmoins, depuis une vingtaine d'années, des travaux suivis, relatifs à la conduction dans les liquides isolants, ont été effectués. Bien que les investigations demeurent généralement limitées à des liquides de structure chimique parfaitement définie, en dépit des progrès réalisés dans les moyens et les méthodes d'étude, on reste confondu devant la diversité des résultats et la variété des hypothèses émises : on est encore bien loin de comprendre les propriétés électriques intrinsèques des diélectriques liquides.

Les liquides organiques, qui passent généralement pour des isolants, sont en grande majorité bien trop conducteurs pour constituer des diélectriques de choix en électrotechnique. Pour un degré de pureté usuel, leur résistivité est d'autant plus faible

que leur permittivité est plus élevée, et l'écart joue sur plusieurs puissances de dix. Seuls les hydrocarbures, ou les mélanges d'hydrocarbures, comme les huiles minérales, certains carbures aromatiques chlorés, comme les "Pyralène" sont couramment employés. On sait, par ailleurs, quel problème pose la tenue des diélectriques présents dans tout appareillage électrique : pour leur utilisation, une extrême prudence est de rigueur, surtout en ce qui concerne les liquides ; leur intérêt, dans la plupart des cas, s'en trouve considérablement restreint.

La génération de hautes tensions continues appartient à ce domaine de l'Electrotechnique, où l'emploi des diélectriques revêt une importance particulière. Les machines électrostatiques ne sont utilisables que si elles fonctionnent dans un milieu où la densité d'énergie du champ électrique est élevée ; il s'agit de gaz comprimés, pour les deux types de générateur construits sur un plan industriel (générateurs à courroie et à cylindre tournant). Les liquides de grande permittivité sont susceptibles, à cet égard, de rivaliser avec les gaz comprimés, et même de les dépasser ; leur utilisation permettrait, en principe, d'améliorer la puissance spécifique des machines électrostatiques. L'idée de remplacer la courroie d'un générateur de Van de Graaf par une colonne de fluide en mouvement, est due à A.W. Simon (35), et date d'une trentaine d'années. Quelques expériences, orientées vers la construction de génératrices à transporteur liquide, ont été effectuées bien plus tard sans apporter de résultats convaincants, ni d'interprétation valable des phénomènes.

Nous avons pour notre part, délibérément écarté le désir de concevoir d'emblée une machine utilisable. Dans ce travail, nous nous proposons d'apporter une contribution à l'étude des possibilités d'injection et de transfert de charges électriques dans un

liquide diélectrique en mouvement. L'expérimentation portera sur deux types de liquide très différents : l'huile minérale pour transformateur, et le Pyralène, liquide polaire, dont l'épuration ionique a mérité une étude particulière. L'analyse des champs électriques mis en jeu sera faite à l'aide du phénomène électro-optique de KERR.

C H A P I T R E     I

PRINCIPE, HISTORIQUE ET GENERALITES SUR LE TRANSFERT DE CHARGES

I/ PRINCIPE DE L'ETUDE

=====

Une pompe centrifuge fait circuler le liquide diélectrique dans un circuit fermé. Création et séparation des charges électriques s'effectuent par ionisation dans le fluide lui-même, soumis au champ électrique fortement hétérogène qui règne à l'intérieur de l'ioniseur ; une charge globale d'une seule polarité est entraînée par le courant liquide jusqu'à une électrode collectrice placée en aval de l'ioniseur (figure 1).

Lorsque le collecteur est isolé, il est susceptible d'être porté à de hautes tensions : l'ensemble constitue une génératrice électrostatique à addition.

II/ HISTORIQUE

=====

L'injection des charges au sein du fluide peut se faire soit à l'aide du champ électrique, soit par irradiation, soit par frottement. Le fluide peut être liquide ou gazeux, mais on a également proposé ou essayé des aérosols, des brouillards électrisés, des fluides chargés de particules métalliques ou isolantes.

1°) Transporteur gazeux

a) Le transfert d'ions créés dans un fluide gazeux nécessite du fait de la grande mobilité des ions dans les gaz ( $k \approx 1 \text{ cm/s/V/cm}$ ), des vitesses d'entraînement très élevées,

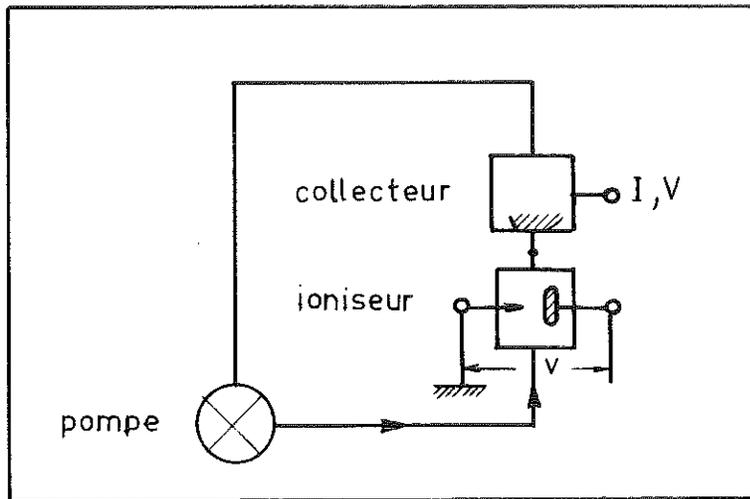


Fig. 1 : Schéma de principe d'une génératrice électrostatique à transporteur liquide

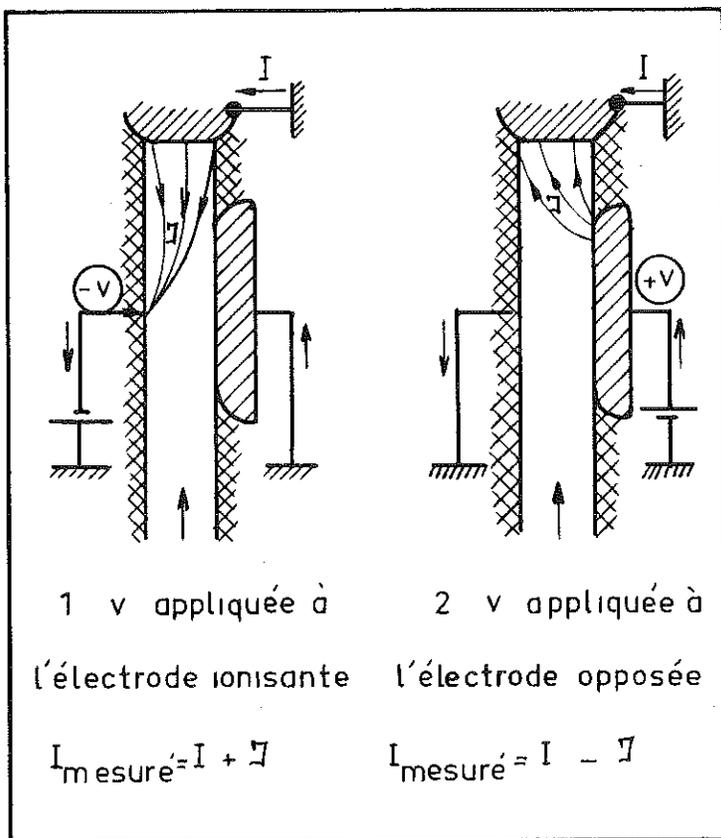


Fig. 2 : Courant de conduction  $J$  entre ioniseur et collecteur

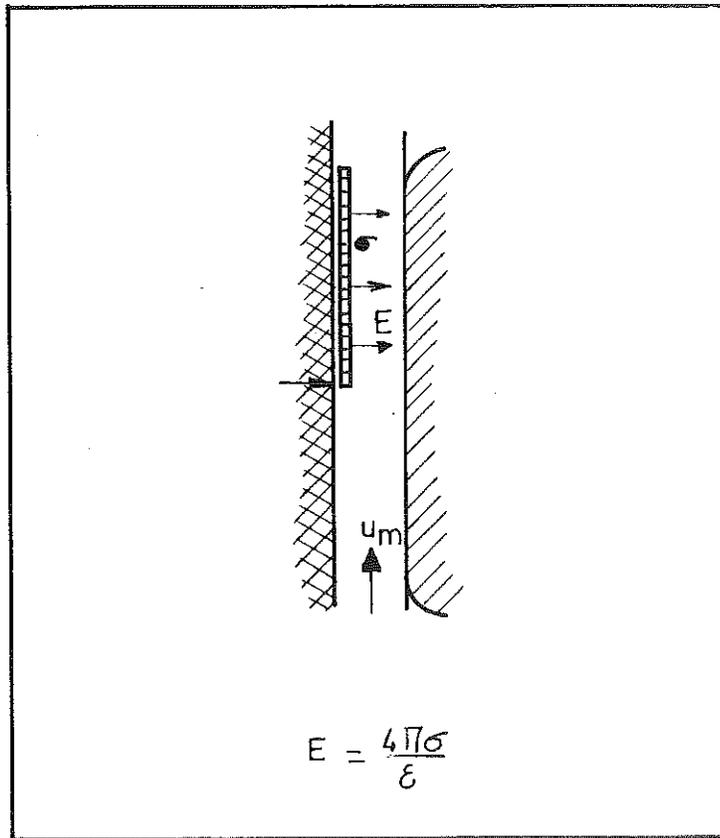


Fig. 3 : Champ électrique  $E$  dû aux charges transportées

que l'on ne peut produire dans dépenser une énergie considérable. Les courants transportés sont minimes (quelques  $\mu\text{A}$ ) (25) (35) (38) (40) (42).

b) Le courant gazeux peut entraîner des poussières isolantes, finement divisées. Vollrath (41) a construit en 1932 un générateur dans lequel la charge des poussières s'effectuait par frottement sur des parois métalliques : l'appareil fournissait 80  $\mu\text{A}$  en court circuit, et 260 kV sans débit.

Dans l'appareil construit par Pauthenier et Madame Moreau-Hanot (28), la charge des particules se fait dans un champ électrique ionisé ; ce générateur donne 35  $\mu\text{A}$  sous des tensions comprises entre 1 et 1,2 MV ; la vitesse des poussières est de 50 m/s, ce qui nécessite une soufflerie très puissante. En accroissant encore la puissance de cette dernière et avec quelques améliorations, des appareils de ce type ont fourni 800  $\mu\text{A}$  sous 400 kV, avec 4 ioniseurs (30). Une étude récente montre que le courant de débit croît linéairement avec la pression de fonctionnement ; on obtient 600 kV, et 100  $\mu\text{A}$  pour une pression de 10  $\text{kg}/\text{cm}^2$  (26).

Leur taille imposante, la faiblesse du rendement énergétique, un certain manque de sécurité dans le fonctionnement, sont les raisons pour lesquelles ce type de générateur n'a pas reçu d'application.

c) On a suggéré l'emploi de brouillards électrisés (13) ; ceci fait également l'objet d'un brevet récent (18), dans lequel on propose l'emploi d'huile ou d'eau projetées à très grande vitesse au moyen de pompes à haute pression.

## 2°) Transporteur liquide

a) Papkow (27) a réalisé un appareil dans lequel des particules métalliques, en suspension dans de l'huile de transformateur, sont chargées par contact sur une électrode haute tension, et entraînées par le courant liquide jusqu'au collecteur. Le courant débité est d'environ  $10 \mu\text{A}$  en court circuit ; la tension, sans débit, atteint 200 kV. Ni le débit, ni la vitesse du liquide ne sont donnés ; on ne parle pas non plus de la tenue mécanique de la pompe...

b) Boumans (2) constate que l'on peut obtenir des courants appréciables uniquement engendrés par le frottement du liquide sur les parois de tubes capillaires convenablement choisis. Avec de l'essence purifiée, dont la résistivité vaut  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ , il obtient :  $0,1 \mu\text{A}$  et 50 kV, et exceptionnellement  $0,2 \mu\text{A}$  et 70 kV, avec un débit de 3 l/s. Il envisage la possibilité d'un générateur donnant  $100 \mu\text{A}$ , 1 MV pour un débit de..... 150 l/s !

c) Les premières expériences sur l'injection de charges au sein du liquide lui-même, à l'aide d'un champ électrique, sont effectuées par Janner (21) en 1950. L'ioniseur, constitué par un dispositif fil et cylindre coaxiaux fournit  $6,5 \mu\text{A}$  pour une vitesse de 4,5 m/s (débit :  $240 \text{ cm}^3/\text{s}$ ) ; pour un système pointes-cylindre le courant transporté atteint  $20 \mu\text{A}$  pour 18 m/s (débit  $1\ 400 \text{ cm}^3/\text{s}$ ). Janner signale que l'on obtient plus aisément, dans l'huile de transformateur, des charges négatives que des charges positives. Les résultats sont très dispersés : le rôle de la vitesse du liquide, l'influence de la tension d'excitation, celle de la géométrie de l'ioniseur n'apparaissent pas clairement. Une partie des résultats obtenus est publiée en 1955 (22) ; dans cet article, est exposé un projet de générateur 1 MV, 1 mA utilisant

de l'huile de transformateur à la vitesse de 5 m/s (débit : 20,4 l/s). Certains points sont assez critiquables : rien ne permet d'affirmer que l'ioniseur proposé sera efficace ; le double transport, qui est envisagé, risque de ne pas se réaliser dans de bonnes conditions, puisqu'il est difficile d'obtenir des charges positives ; la "montée en tension" à l'intérieur de tubes isolants de 50 cm de longueur, paraît à priori problématique, avec un pareil débit (Janner a bien obtenu 120 kV, à 1 m de l'ioniseur, mais sans débit). Enfin, le rendement énergétique de l'appareil est grossièrement évalué à 60 %, ce qui paraît assez optimiste.

En 1961, Stuetzer (38) publie les résultats d'expériences qu'il a effectuées sur du kérosène. Avec un dispositif à pointes du même genre que celui de Janner, il obtient un courant de court circuit voisin de 25  $\mu$ A, avec un débit de 200 cm<sup>3</sup>/s (la vitesse n'est pas donnée) ; la densité volumique de charge est bien supérieure à celle qu'obtenait Janner : il semble qu'un meilleur dessin des ioniseurs et un système de collection plus efficace en soient responsables. Stuetzer signale également que les densités les plus élevées sont obtenues en polarité négative. Le fonctionnement d'un ioniseur n'est étudié que de façon sommaire ; le rôle de la pureté et de la nature du liquide n'est pas précisé. L'emploi d'un liquide de pureté ordinaire et le fait que la haute tension d'excitation est appliquée aux pointes laissent supposer qu'il peut exister un courant de conduction entre ioniseur et collecteur. Stuetzer établit des équations de fonctionnement sous tension dans certains cas particuliers, et en déduit une valeur théorique du rendement optimum du générateur, voisine de 20 %. Il ne publie aucune caractéristique courant-tension permettant de juger du fonctionnement de l'appareil, mais dit avoir obtenu des courants compris entre  $10^{-8}$  et  $10^{-4}$  A, des tensions allant de 4 à 500 kV, et avoir construit un générateur donnant 20  $\mu$ A, 400 kV, dont le

rendement est 10 % ; seule est donnée une courbe : tension du collecteur sans charge, en fonction du débit de liquide ; la tension maximale atteinte dans ces conditions est 275 kV.

III/ POSSIBILITES DE CREATION ET DE TRANSFERT DE CHARGES ELECTRIQUES  
=====

DANS UN DIELECTRIQUE LIQUIDE  
=====

1°) Séparation des charges

Considérons un système d'électrodes dissymétriques constitué par une électrode à grand rayon de courbure (plan, cylindre, sphère....) et une électrode à faible rayon de courbure (fil fin, lame, pointes....), entre lesquelles se trouve un liquide isolant. Lorsqu'on applique une différence de potentiel aux électrodes, un champ très intense apparaît au voisinage de l'électrode à faible rayon de courbure ; là, prévaut la conduction bipolaire : les charges d'un signe donné, migrent vers cette électrode ; elles n'ont qu'un court trajet à accomplir dans un champ d'intensité élevée et croissante ; les charges qui s'en écartent, au contraire, doivent parcourir une grande distance, dans un champ d'intensité décroissante. Ces charges, nous le prouverons, sont affectées de mobilités ioniques ; nous les appellerons porteurs (et quelquefois ions), sans préciser leur nature. L'électrode à faible rayon de courbure sera dite électrode ionisante.

Une charge d'espace du signe de l'électrode ionisante se trouve donc entre les électrodes ; voyons dans quelle mesure il est possible de l'entraîner par un courant liquide.

2°) Evaluation de la vitesse d'entraînement

La rigidité des liquides isolants à un niveau usuel de pureté n'excède pas 150 à 200 kV/cm. Si l'on applique un

champ moyen raisonnable au système précédent, de l'ordre de 100 kV/cm, compte tenu de la mobilité des porteurs (qui est voisine de  $10^{-4}$  cm/s/V/cm), ceux-ci vont acquérir une vitesse moyenne de quelques cm/s ou quelques dizaines de cm/s. Dès lors, une vitesse du liquide de quelques m/s paraît suffisante pour entraîner les charges hors de l'ioniseur.

Bien entendu, les paramètres géométriques sont à préciser, une partie des charges pouvant être captée par l'électrode à grand rayon de courbure.

### 3°) Détermination du niveau de pureté du liquide

Deux sortes de considérations président à une telle détermination.

#### a) Temps de relaxation

Il est indispensable que les charges injectées dans le liquide possèdent une "durée de vie" suffisante pour que leur transfert jusqu'au collecteur soit possible. Le temps de relaxation  $\tau = \frac{\epsilon \rho}{4\pi}$  est le temps au bout duquel la charge totale est divisée par e du fait de la conduction propre du liquide. Si l'on veut recueillir la majeure partie des charges injectées, il faut que le temps de transfert  $t$  de l'électrode ionisante au collecteur soit petit devant  $\tau$  ; par exemple, si  $\tau = 10 t$ , on perd environ 10 % des charges. Si ces dernières ont quelques centimètres à parcourir, étant donné les vitesses envisagées,  $t$  est voisin du centième de seconde.  $\tau$  devra donc valoir au moins 0,1 sec.

Pour un liquide non polaire ( $\epsilon \approx 2$ ), la résistivité minimale sera de l'ordre de  $10^{12}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui doit être réalisé assez aisément. Pour un liquide polaire, dont la permittivité serait 10 fois plus élevée par exemple, une résistivité de  $10^{11}$   $\Omega \cdot \text{cm}$  devrait suffire.

### b) Courant de conduction

La résistivité du liquide devra en outre être suffisante pour que le courant de conduction directe entre ioniseur et collecteur soit négligeable devant le courant transporté.

Dans le cas du fonctionnement en court-circuit, lorsque la tension d'excitation  $v$  est appliquée à l'électrode ionisante, il existe un courant de conduction  $J$  entre cette électrode et le collecteur ; ce courant s'ajoute au courant transporté  $I$ . Il se retranche de  $I$ , lorsque la haute tension est appliquée à l'autre électrode (figure 2).

Lors du fonctionnement en générateur, le courant de conduction pourra devenir important si le collecteur est porté à de très hautes tensions.

### 4°) Champ électrique dû aux charges entraînées

Si la vitesse du liquide est grande par rapport à celle des porteurs dans le champ électrique de l'ioniseur - ce qui doit être réalisé à très faible distance de l'électrode ionisante -, ceux-ci seront en grande majorité entraînés selon une bande étroite, dont la longueur  $l$  est celle de cette électrode. Ainsi, dans le cas d'un fil ou d'une lame faisant face à une électrode plane, la bande chargée est assimilable à un plan qui serait recouvert d'une densité de charge  $\sigma$ , supposée uniforme ; le champ a pour expression :  $E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon}$  (figure 3).

Les considérations générales sur les machines à transporteur isolant demeurent donc valables, dans leurs grandes lignes : "la densité maximale sur le transporteur est proportionnelle à l'induction maximale que peut admettre le milieu fluide, donc à

$\epsilon E_{\max}$ .... La forme idéale du transporteur isolant est une surface plane ou faiblement courbée, recouverte uniformément d'une densité  $\sigma$ , non due à la polarisation" (14).

Le courant transporté  $I$  est égal au produit de la densité de charge  $\sigma$  par la surface qui défile devant l'électrode ionisante, de longueur  $l$ , par unité de temps :  $I = \sigma \cdot u \cdot l$ , ( $u$  : vitesse du liquide au voisinage de l'électrode ionisante).

On peut donc évaluer, d'après le courant collecté, le champ dû aux charges entraînées :

$$E = \frac{4\pi I}{\epsilon \cdot u \cdot l}$$

Il est intéressant de rappeler que ce champ peut au maximum atteindre le champ disruptif du gaz comprimé dans les génératrices à cylindre tournant ; l'emploi de l'hydrogène sous pression (10 à 15 atm.) permet en particulier d'obtenir de fortes densités de charge sur le rotor. Un critère essentiel qui permet de juger l'efficacité de la conception et de la réalisation d'une machine est le rendement en densité  $\eta\sigma$  : c'est le rapport de la densité utile  $\sigma$  (déduite à partir du courant fourni) et de la densité maximale  $\sigma_m$  définie par :

$$\sigma_m = \frac{\epsilon \cdot E_m}{4\pi} \quad E_m : \text{champ disruptif du gaz}$$

Ce rendement est égal à l'unité pour les génératrices à cylindre fonctionnant dans l'hydrogène, mais ne dépasse pas 0,23 pour les meilleures génératrices à courroie (16). Par ailleurs, la densité  $\sigma$  déposée sur le rotor d'une génératrice cylindrique reste sensiblement constante dans une gamme très étendue de vitesses (de quelques m/s à plusieurs dizaines de m/s).

Dans le cas d'un transporteur liquide, rien ne permet de prévoir si l'on obtiendra des densités importantes, et si celles-ci seront fonction ou non de la vitesse. Il ne sera pas possible, d'autre part, de parler de rendement en densité, la rigidité d'un liquide n'étant pas spécifique (elle varie considérablement selon l'état de pureté).

#### 5°) Pertes par conduction

Toutes les charges ne sont pas entraînées hors de l'ioniseur si la vitesse est insuffisante, ou celui-ci mal dessiné. Il s'ajoute une autre cause de pertes : les pertes par conduction propre du liquide, qui n'est pas parfaitement isolant et soumis au champ E sensiblement uniforme, dû aux charges. Si le fluide reste ohmique, la densité de courant est donnée par :

$$j = \frac{E}{\rho}$$

Pour les résistivités envisagées - soit  $10^{11}$  à  $10^{12}$   $\Omega \cdot \text{cm}$  - des champs de quelques dizaines de kV/cm ne peuvent donner naissance qu'à de faibles courants ; la densité de courant n'excède pas, en effet, quelques dixièmes de  $\mu\text{A}$  par  $\text{cm}^2$ .

Il est fondamental de souligner que les résistivités qu'il faut prendre en considération pour l'évaluation du temps de relaxation et des courants de conduction, sont des résistivités sous champ fort continu (quelques dizaines de kV/cm) : elles peuvent être 2 à 3 fois plus faibles que celles qui sont mesurées sous champ faible.

On conçoit que l'existence de champs locaux très intenses donne lieu à un accroissement des pertes par conduction.

#### IV/ APPAREILLAGE ET METHODES DE MESURE

=====

##### 1°) Circuits d'étude du transfert de charges

Nous avons réalisé deux montages distincts, qui permettent de couvrir commodément deux gammes de vitesse. (cf. figures 4 et 5 - photographies 1 et 2).

Le premier autorise des débits maximums de 1 100 à 1 500 l/h, selon la nature et la température du liquide ; la variation de débit s'obtient en agissant sur la vitesse du moteur-shunt qui entraîne la pompe.

Quant au second, il permet d'atteindre des débits compris entre 15 et 19 m<sup>3</sup>/h ; l'entraînement de la pompe se fait par un moteur asynchrone triphasé à démarrage statorique. Le réglage du débit s'effectue par action sur deux vannes : une vanne série et une vanne parallèle. Ce circuit est doté d'un échangeur de température capable d'évacuer 2 kW environ : avec un débit d'eau de refroidissement de l'ordre de 10 l/min., la température du liquide s'établit aux alentours de 40° C.

Les pompes sont des pompes SIHI autoamorçantes, à anneau liquide, construites en acier inoxydable ; elles peuvent fonctionner sans dommage, même si le liquide contient des poches de gaz ; de plus, elles sont capables de tenir un vide de quelques centimètres de mercure, ce qui est indispensable pour effectuer le dégazage des liquides.

Les matériaux employés pour la réalisation des circuits sont strictement sélectionnés pour éviter la pollution des liquides : pratiquement, ceux-ci n'entrent en contact qu'avec des métaux (en majorité, les parties métalliques sont en acier inoxydable), du verre pyrex, du nylon, de l'analdite pure ou du téflon.

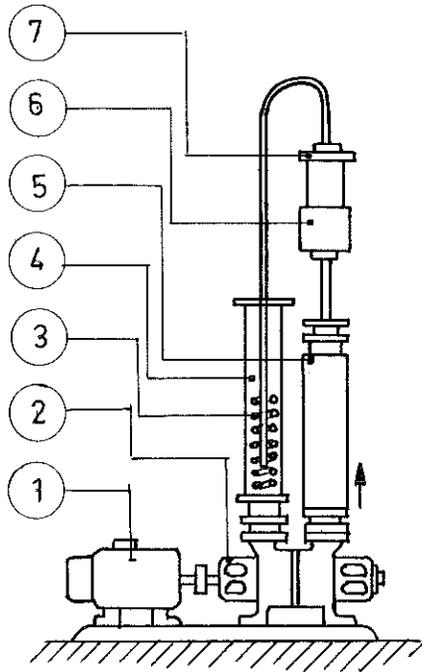


Fig. 4 : Montage I

- 1- Moteur
- 2- Pompe
- 3- Echangeur de température
- 4- Réservoir
- 5- Débitmètre à flotteur rotatif
- 6- Ioniseur
- 7- Collecteur

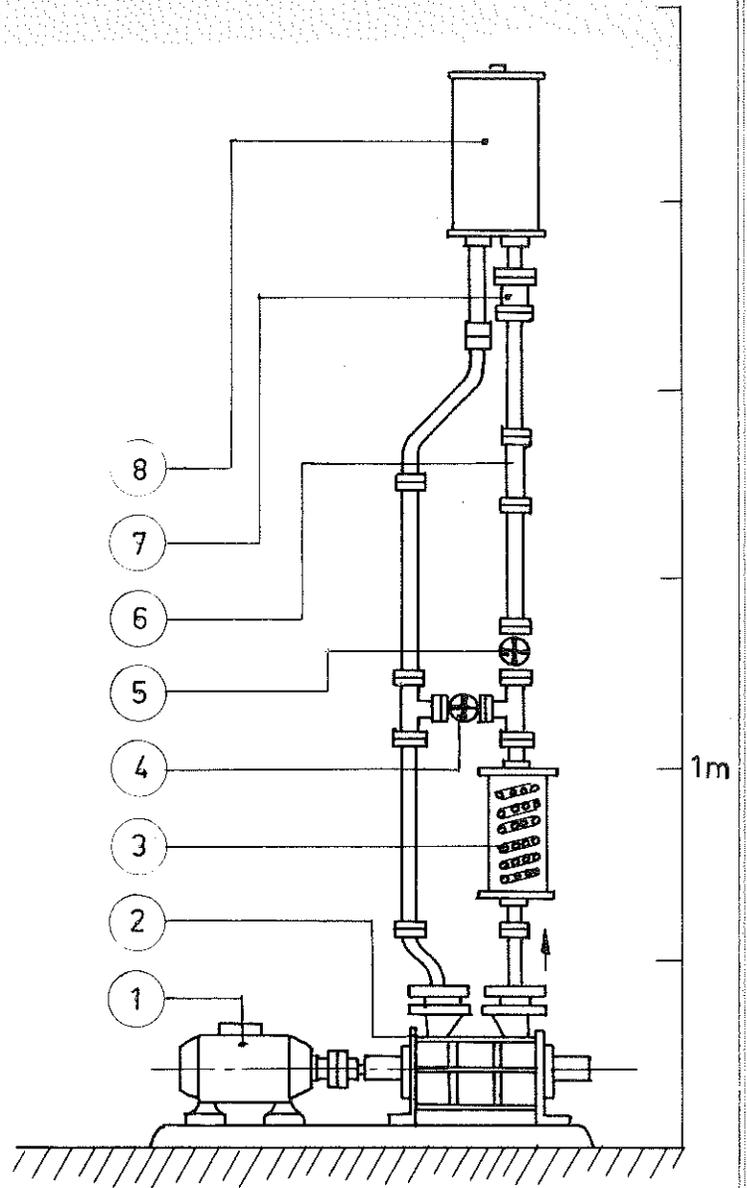


Fig. 5 : Montage II

- 1- Moteur
- 2- Pompe
- 3- Echangeur de température
- 4- Vanne-parallèle
- 5- Vanne-série
- 6- Débitmètre électronique
- 7- Ioniseur
- 8- Collecteur

Les hautes tensions d'excitation sont fournies, soit par des tripleurs de tension du type GREINACHER, 45 kV, 700  $\mu$ A, soit par des machines électrostatiques SAMES, 90 kV, 200  $\mu$ A.

## 2°) Appareillage de mesure

### a) Mesure des vitesses

La vitesse moyenne du liquide dans un ioniseur est le quotient du débit par la section de passage au niveau de l'électrode ionisante. Les débitmètres fournissent, par lecture directe, la valeur du débit instantané.

Pour le circuit n° I, il s'agit d'un débitmètre à flotteur rotatif HEINRICHS ; nous avons procédé à l'étalonnage direct de cet appareil avec de l'huile de transformateur. A partir de courbes de correction fournies par le constructeur, pour des liquides de viscosité et de densité différentes, nous avons tracé les courbes d'étalonnage pour les "Pyralène". La vitesse moyenne est obtenue, au mieux, à 5 % près.

La mesure du débit, sur le circuit n° II, est effectuée avec un débitmètre électronique FAURE-HERMAN. La précision sur la mesure des vitesses est voisine de 3 %.

### b) Mesure des grandeurs électriques

La mesure des tensions est effectuée soit avec un électromètre TRÜB-TAUBER (20 - 50 - 100 kV, précision : 1 %), soit avec un voltmètre rotatif SAMES (40 - 80 - 120 kV, précision : 2 %), soit en utilisant un système résistance-microampèremètre, soigneusement étalonné.

La mesure des courants est généralement faite avec des appareils à cadre mobile (précision : 1 à 2 %).

### 3°) Méthodes de mesure

#### a) Mesure des résistivités

- Les résistivités sous champ faible (quelques centaines de V/cm) sont mesurées dans des cellules en téflon, à l'électrodes planes et parallèles de platine ou d'acier inoxydable, dont le coefficient géométrique est mesuré avec exactitude par une méthode conductimétrique.

Les mesures effectuées sous tension alternative, avec un pont GENERAL RADIO (précision : 1 %), fournissent la tangente de l'angle de perte  $\delta$  ; la résistivité, déduite de :

$$\rho = \frac{18 \cdot 10^{11}}{\varepsilon \cdot f \cdot \text{tg } \delta} \quad (f : \text{fréquence de mesure})$$

correspond, lorsque  $f < 10^3$  Hz, à la valeur mesurée sous tension continue en inversant plusieurs fois la polarité avant la mesure du courant, afin d'éviter une polarisation des électrodes. Une telle concordance est également signalée par Coquillion (10)(12), qui adopte pour résistivité sous tension continue, la valeur extrapolée au temps  $t = 0$  où l'on applique la tension à la cellule de mesure.

- Les résistivités sous champ intense (25 à 50 kV/cm) sont également mesurées entre électrodes planes et parallèles ; les tensions continues sont appliquées pendant un laps de temps aussi court que possible (1 à 2 s) ; les valeurs obtenues concordent avec celles que l'on déduit des mesures de l'angle de perte sous champ alternatif intense (mesures faites à 50 Hz avec un pont de Schering TETTEX ; précision : 1 %).

#### b) Procédé de mesure et notations

La tension d'excitation est notée  $v$  ;  $I$  désigne le courant transporté,  $i_0$  le courant capté par l'électrode à grand rayon

de courbure,  $i$  le courant total. Selon la polarité de la source d'excitation, on peut réaliser différents montages (figure 6). On doit avoir la relation :

$$i = I + i_0$$

Lorsque la tension d'excitation est appliquée à l'électrode à grand rayon de courbure, nous avons vu (§ 3°) b) que le courant de conduction  $J$  se retranchait du courant transporté ; les valeurs mesurées du courant transporté  $I$  sont donc des valeurs par défaut. Ce type de montage, que nous employerons en règle générale, évite à la source d'excitation d'avoir à supporter le courant total  $i$ . Dans le cas d'un fonctionnement idéal, cette dernière ne doit fournir que le courant - minime en principe -  $i_0$ , et :  
 $I \rightarrow i$ .

#### V/ CONCLUSIONS =====

Nous étudierons, en premier lieu, le transporteur liquide, afin d'en préciser les qualités. Nous traiterons ensuite du fonctionnement d'un ioniseur ; enfin, nous analyserons le champ électrique dans le liquide porteur de charges, par l'effet électro-optique de KERR.

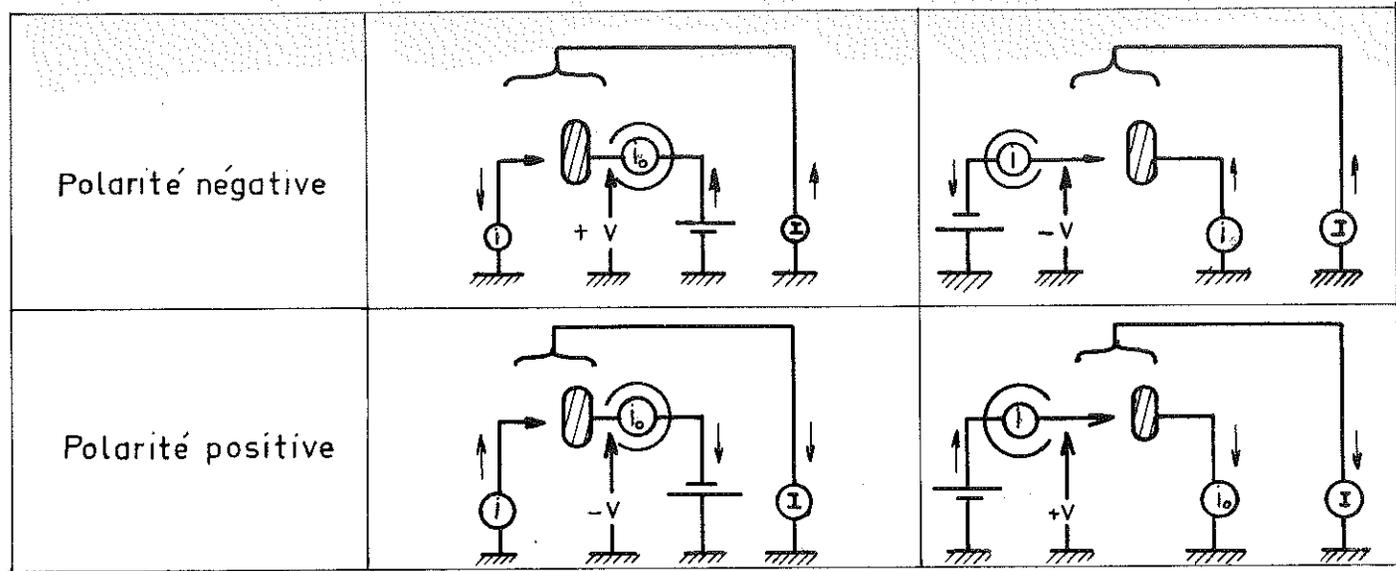


Fig. 6 : Schémas relatifs aux mesures :  $i = I + i_0$

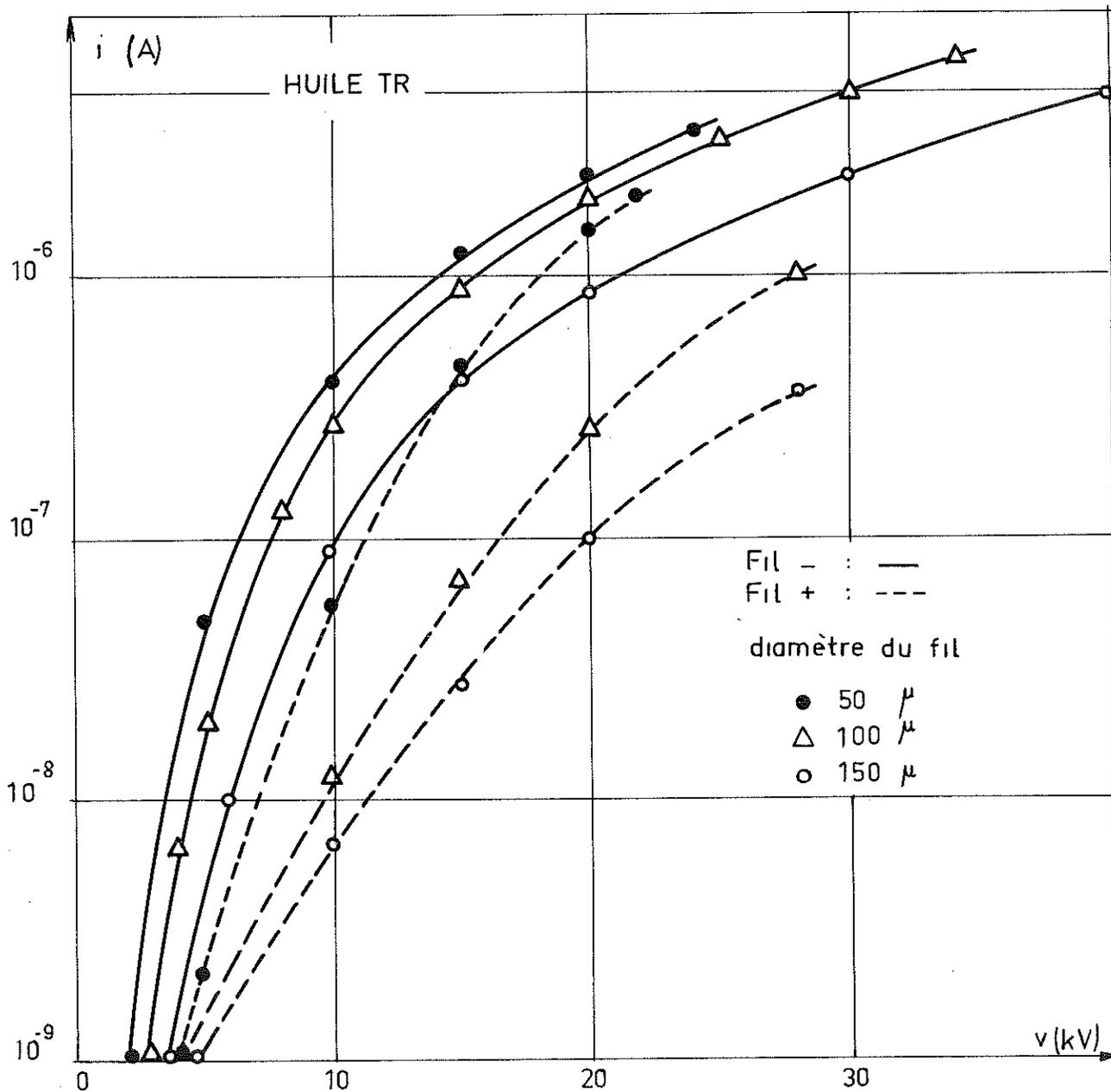


Fig. 7 : courbes courant-tension relevées entre fil et cylindre

C H A P I T R E                    II

ETUDE DU TRANSPORTEUR LIQUIDE - PURIFICATION IONIQUE DU PYRALENE

I/ GENERALITES SUR LES LIQUIDES DIELECTRIQUES  
=====

1°) Introduction

Avant d'aborder une étude relative aux champs intenses qui apparaissent entre électrodes dissymétriques au sein d'un liquide en mouvement, il convient de faire brièvement le point sur le comportement de liquides isolants, au repos, que l'on soumet au champ électrique entre électrodes planes et parallèles.

Les solutions électrolytiques donnent, dans ces conditions, une courbe courant-tension rectiligne et reproductible ; le comportement ohmique devient de plus en plus difficile à mettre en évidence lorsque diminue la concentration ionique, et, dès que la résistivité atteint environ  $10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ , on note l'apparition de phénomènes aberrants dans tous les liquides : le courant qui les traverse, sous tension constante, n'est pas stable ; il subit des variations brutales, imprévisibles ; sa valeur moyenne a généralement tendance à décroître dans le temps, sans que disparaissent pour autant les fluctuations erratiques.

La plupart des recherches ont été consacrées à la même classe de liquides, les liquides non polaires, dont la conductibilité naturelle est théoriquement nulle ; d'infimes concentrations en ions occasionnent une conduction résiduelle qui n'est pas propre au liquide lui-même. Aux très hauts niveaux de pureté, l'influence d'un rayonnement ionisant peut être déterminante.

D'autre part, les interfaces métal-liquide sont susceptibles de modifications notables (formation d'oxydes par exemple) lors du passage du courant électrique : il peut y avoir blocage partiel des électrodes. Ainsi, des phénomènes secondaires sont capables de réagir sur le mode de conduction initial.

On conçoit que des résultats reproductibles sous tension continue soient difficiles à obtenir, d'où l'extrême variété des interprétations que l'on donne du mécanisme de conduction.

## 2°) Aperçu des théories de la conduction dans les liquides diélectriques et discussion sommaire

Les idées sont partagées sur l'origine et la nature des porteurs de charge ; on a invoqué des processus de conduction variés, dont les principaux sont les suivants : (23)  
(34)

- dissociation, renforcée par le champ électrique, des molécules d'impuretés présentes dans le liquide, ou des molécules du liquide lui-même.

- émission d'électrons (émission du type Schottky ou émission froide) de la cathode, donnant des ions négatifs ou des électrons libres.

- multiplication d'électrons par avalanches, analogue à celle qui a lieu dans les gaz.

Toutes ces hypothèses aboutissent à une variation de type exponentiel du courant avec le champ.

Nous donnons l'allure des courbes courant-tension relevées en utilisant une cellule constituée par un fil de tungstène

tendu dans l'axe d'un cylindre de laiton, de diamètre  $2R = 1$  cm, et de longueur  $l = 10$  cm (figure 7). Avec un tel dispositif, on peut obtenir des champs théoriques très intenses au voisinage du fil, avec des tensions modestes (en l'absence de charge d'espace, le champ sur le fil - de rayon  $r_0$  - ;  $E_0 = \frac{V}{r_0 \text{ Log } \frac{R}{r_0}}$  peut valoir

quelques MV/cm) ; on peut également espérer séparer, dans une certaine mesure, les phénomènes d'électrodes de ceux qui se produisent au sein du liquide. La cellule est remplie d'huile de transformateur soigneusement déshydratée, puis distillée sous atmosphère d'argon ; sa résistivité, sous champ faible, est voisine de  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ . Ces courbes ont été tracées sans conditionnement des électrodes ; le relevé des points a été effectué après un laps de temps constant qui suit l'application de la tension.

L'allure des courbes est en accord avec celle que prévoient les théories précédentes sans en vérifier une plus particulièrement. On remarque la variation extrêmement rapide du courant avec la tension, et le niveau plus élevé des courants lorsque la polarité du fil est négative. Des résultats comparables ont été obtenus avec des systèmes d'électrodes dissymétriques dans de l'huile de transformateur (7) (32), et dans d'autres liquides (8) (9).

Lorsque le fil est négatif, on peut penser qu'il émet des électrons ; cependant, l'ionisation persiste lorsque le fil est anode, et la similitude des courbes pour les deux polarités, est en faveur d'un processus indépendant de la polarité, en première approximation ; des distorsions locales du champ, au voisinage des électrodes (aspérités sur la surface du fil, charges d'espace) peuvent se produire ; mais l'origine des porteurs se trouve là où le champ est très intense, c'est-à-dire dans le voisinage immédiat du fil.

### 3°) Mobilité des ions dans les liquides isolants

La connaissance de l'ordre de grandeur des mobilités ioniques est indispensable pour l'étude du transfert de charges. La valeur  $k = 10^{-4}$  cm/s/V/cm est communément admise dans les liquides organiques. Sato, Nagao et Toriyama (32) ont mesuré :  $0,6 \cdot 10^{-4} < k < 1,1 \cdot 10^{-4}$  cm/s/V/cm, dans l'huile de transformateur. Des valeurs comparables sont acceptées par Zaky et House (43) pour le pyralène.

On peut évaluer la mobilité des porteurs en utilisant les résultats que donne la cellule cylindrique. En effet, si la conduction est unipolaire, la valeur du champ entre fil et cylindre, tend vers une limite (39) :

$$E_i \approx \sqrt{\frac{2i}{\epsilon k l}} \quad \text{u.e.s.c.g.s.} \quad \text{si } R \gg r_0,$$

limite voisine du champ moyen appliqué ( $\frac{V}{R}$ ).

La formule est valable quel que soit le mécanisme de conduction unipolaire, pourvu que les mobilités soient petites, et d'autant meilleure que l'on opère plus près de la tension de claquage.; on peut supposer de plus que le régime de charge d'espace est atteint instantanément. Cependant, cette formule suppose que la décharge des ions s'effectue dès qu'ils atteignent les électrodes, hypothèse exacte s'il s'agit d'un diélectrique gazeux ; dans le cas des liquides, il existe une cinétique de décharge des porteurs sur les électrodes, qui laisse supposer que la décharge n'est pas instantanée.

A température ordinaire, on obtient :

$$\begin{aligned} 0,7 \cdot 10^{-4} < k_- < 1,2 \cdot 10^{-4} & \quad \text{cm/s/V/cm} \\ 0,3 \cdot 10^{-4} < k_+ < 0,9 \cdot 10^{-4} & \quad \text{cm/s/V/cm} \end{aligned}$$

Par ailleurs, pour une faible variation de la température, la mobilité varie sensiblement comme la fluidité du liquide.

#### 4°) Classification des liquides diélectriques

##### a) Liquides non polaires

Ces liquides sont à la fois non ionisés et non ionisants ; la dissociation naturelle y est nulle s'ils sont à l'abri des rayonnements ionisants. Le moment dipolaire de leur molécule est nul, et leur constante diélectrique faible : elle est voisine de 2. La conductibilité ionique résiduelle est due à la présence d'eau, impureté universelle, seule capable d'ioniser les impuretés dissoutes. La purification de ces liquides est aisée ; une déshydratation énergique et une distillation soignée suffisent généralement à l'obtention de résistivités supérieures à  $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ .

A l'état brut, ces liquides offrent le plus souvent une résistivité qui dépasse  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  ; à un niveau de pureté usuel ( $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ), ils sont assez peu sensibles aux pollutions ; en revanche, une résistivité très élevée ( $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ ) se conserve très difficilement.

##### b) Liquides polaires

L'asymétrie des molécules de certains liquides leur confère un moment dipolaire permanent et une permittivité élevée.

On distingue les liquides polaires ionisés, susceptibles d'ionisation spontanée (comme l'eau :  $\epsilon = 80$ , et les alcools), et les liquides polaires dont l'ionisation n'a pu encore être mesurée et dont la conductibilité ne résulte que de la présence d'impuretés électrolytiques qu'ils sont capables d'ioniser, et auxquelles ils se montrent excessivement sensibles (exemples : nitrobenzène :  $\epsilon = 36$ , sulfolane :  $\epsilon = 44$ ).

Ces derniers ne dépassent guère  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ , même après une épuration chimique soignée. Seule une purification ionique est capable de leur conférer des résistivités élevées ( $> 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ), qui ne se conservent, dans un appareillage donné - construit en matériaux inertes vis à vis du liquide -, que dans la mesure où l'épuration est permanente ; si l'épuration cesse, la résistivité s'abaisse, en quelques heures, jusqu'à  $10^8 - 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ .

#### 5°) Conclusions

Un liquide non polaire sera d'étude commode ; nous avons utilisé de l'huile de transformateur ( $\epsilon = 2,2$ ) pour réaliser les premières expériences. L'huile minérale est le diélectrique liquide le plus couramment utilisé dans l'industrie électrique.

La résistivité d'une huile neuve, filtrée et déshydratée sous vide (à  $80^\circ\text{C}$ ) excède toujours  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  ; elle diminue très peu, même au cours d'une utilisation prolongée. De l'huile distillée sous vide, avec entrée d'argon, atteint environ  $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ . En revanche, la rigidité est assez variable : elle est affectée par nombre de facteurs (chaleur, lumière, champ électrique, etc...) qui entraînent une oxydation de l'huile, avec formation de composés divers - polaires le plus fréquemment - et une augmentation de son acidité et de son pouvoir hygroscopique. La présence d'eau dans l'huile est la cause principale de l'abaissement de la rigidité et de la résistivité.

Dans les circuits de transfert de charges, la résistivité de l'huile sous champ intense ( $50 \text{ kV/cm}$ ) dépasse  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ . La rigidité, sous tension continue est supérieure à  $140 \text{ kV/cm}$ .

L'emploi d'un liquide polaire ne peut être envisagé d'emblée, à cause de sa grande conductibilité ; aussi l'étude s'est-elle limitée à des corps peu polaires, les "Pyralène", dont la mise en oeuvre s'est cependant révélée assez délicate.

## II/ PURIFICATION IONIQUE DES "PYRALENE"

=====

### 1°) Généralités

Les diélectriques liquides "PYRALENE" répondent aux caractéristiques qui définissent les "ASKARELS" : ce sont des liquides synthétiques ininflammables, qui, décomposés par l'arc électrique, ne peuvent provoquer d'explosion. Ils se substituent peu à peu à l'huile minérale dans les transformateurs et les câbles ; on les utilise également pour l'imprégnation des condensateurs au papier, car ils possèdent une permittivité assez élevée (4,5 à 6,3), et des pertes acceptables.

Du fait de leur pouvoir ionisant, la mise en oeuvre de tels liquides doit être effectuée avec soin, sous peine de voir leurs qualités isolantes rapidement se dégrader. Lorsqu'ils sortent de fabrication, les "Pyralène" possèdent une résistivité voisine de  $10^{12}$   $\Omega \cdot \text{cm}$  ; elle s'abaisse jusqu'à  $10^9$   $\Omega \cdot \text{cm}$ , pour un Pyralène qui a séjourné quelques mois dans la cuve d'un transformateur, et il faut recycler le liquide pendant plusieurs mois sur une cartouche d'alumine activée pour obtenir  $10^{11}$   $\Omega \cdot \text{cm}$  (7). Malgré le soin que l'on peut apporter à l'élaboration et au remplissage des circuits d'étude du transfert de charges, il n'est pas possible de conserver la résistivité du liquide neuf ; après quelques minutes d'utilisation, la résistivité est 5 à 10 fois plus petite, et le temps de relaxation insuffisant, en général. De plus, à la suite d'opérations plus ou moins polluantes, - montages et

démontages des ioniseurs, par exemple - la résistivité s'abaisse encore, et la valeur finale est souvent voisine de  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ , valeur inacceptable pour les expériences que nous nous proposons d'effectuer.

Ceci nous a amené à réaliser un circuit de purification capable de conférer aux Pyralène les qualités isolantes exigées par leur utilisation pour l'étude du transfert de charges. Les travaux précédemment effectués au laboratoire sur la désionisation des liquides fortement polaires nous ont apporté une aide précieuse.

## 2°) Nature et propriétés des Pyralène -- Choix d'un type de Pyralène

Les Pyralène sont des diélectriques de synthèse, essentiellement des dérivés chlorés de molécules du type benzène. L'élément fondamental de la fabrication des diélectriques chlorés est le diphenyle ( $\text{C}_{12} \text{H}_{10}$ ). Si l'on substitue au moins cinq atomes d'hydrogène par du chlore, le corps obtenu, décomposé par la chaleur ou l'arc électrique, est incapable de libérer de l'hydrogène : le gaz de décomposition est le gaz chlorhydrique, très stable. D'une manière plus générale, il suffira donc que le corps contienne autant d'atomes de chlore que d'hydrogène pour qu'il soit incombustible.

Nous reproduisons (figures 8 à 10) quelques-unes des courbes données par le fabricant pour deux types très répandus de Pyralène : Pyralène 1467, pour transformateur ; Pyralène 1499, pour condensateur (29). Une augmentation de la température provoque un accroissement des pertes par diminution de la résistivité et de la permittivité, provoquées par la présence de faibles quantités d'impuretés ionisables. D'après J. Coquillion (10), une pollution, ou une purification du liquide entraîne un déplacement de la courbe

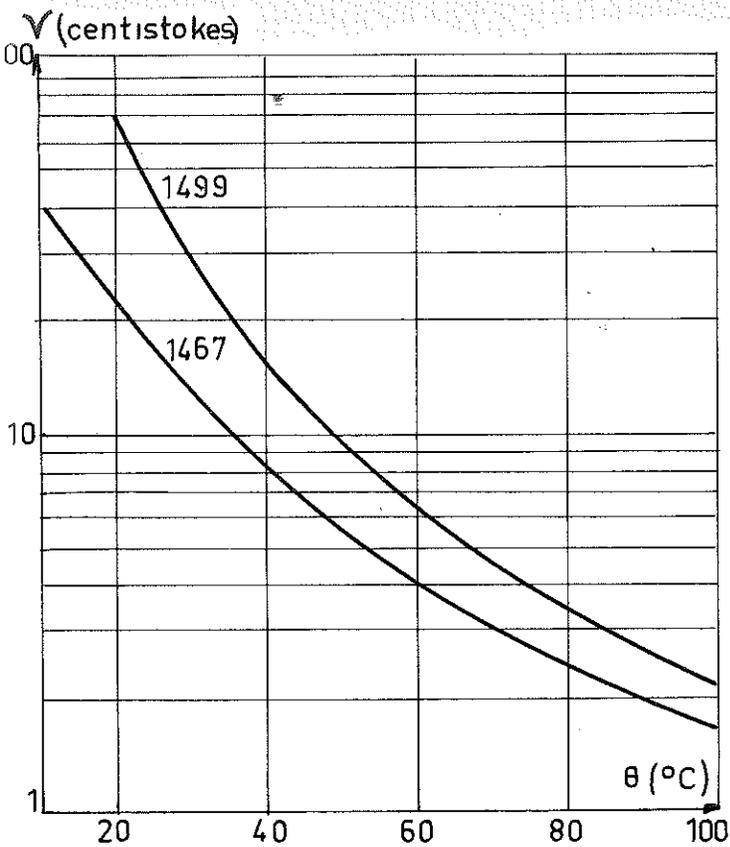


Fig. 8 : Viscosité cinématique de deux types de Pyralène en fonction de la température

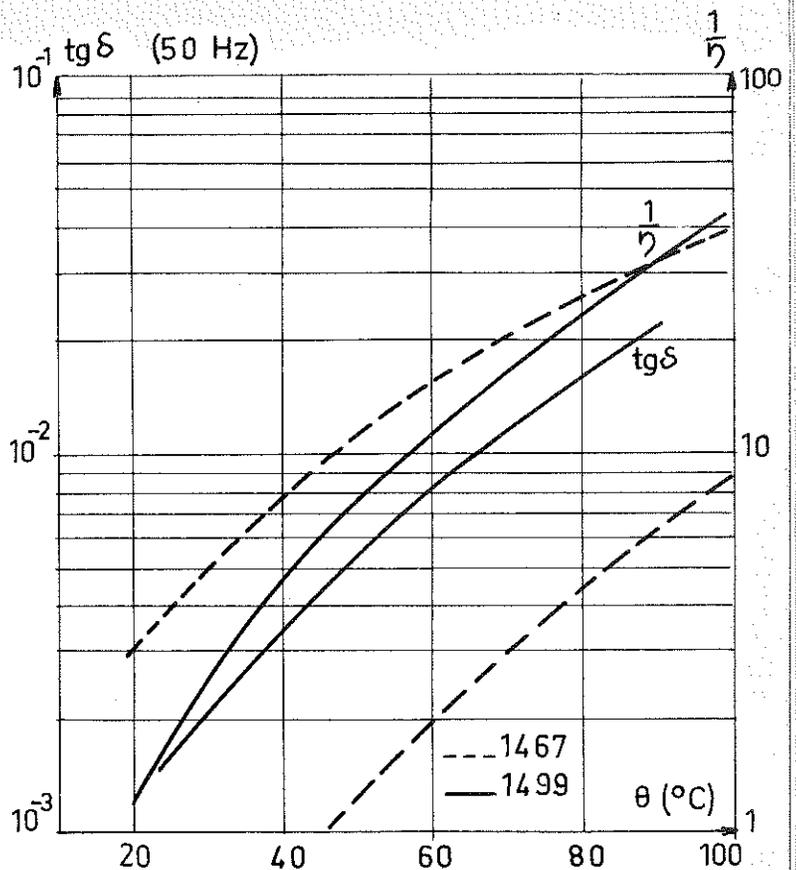


Fig. 9 : Pertes diélectriques et fluidité de Pyralène en fonction de la température

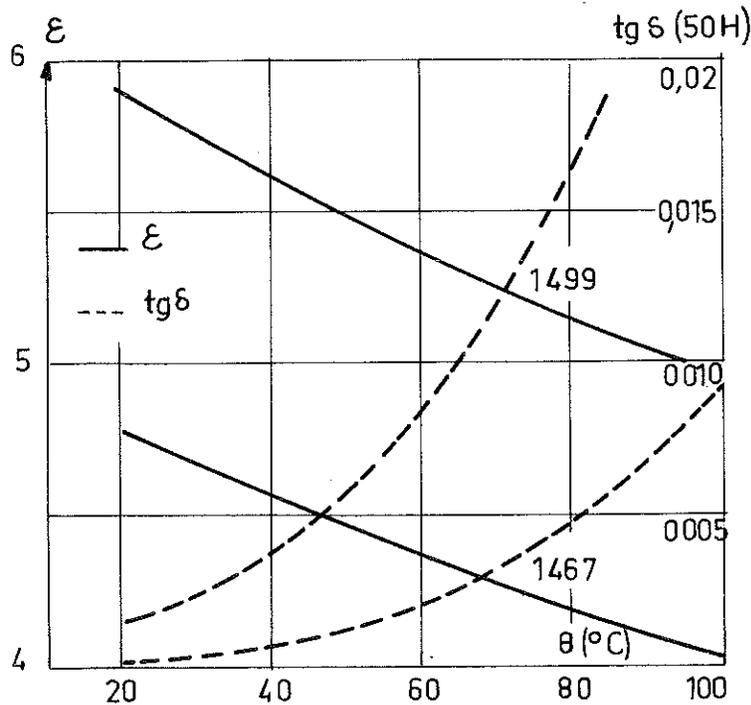


Fig. 10 : Permittivité et pertes diélectriques de Pyralène en fonction de la température

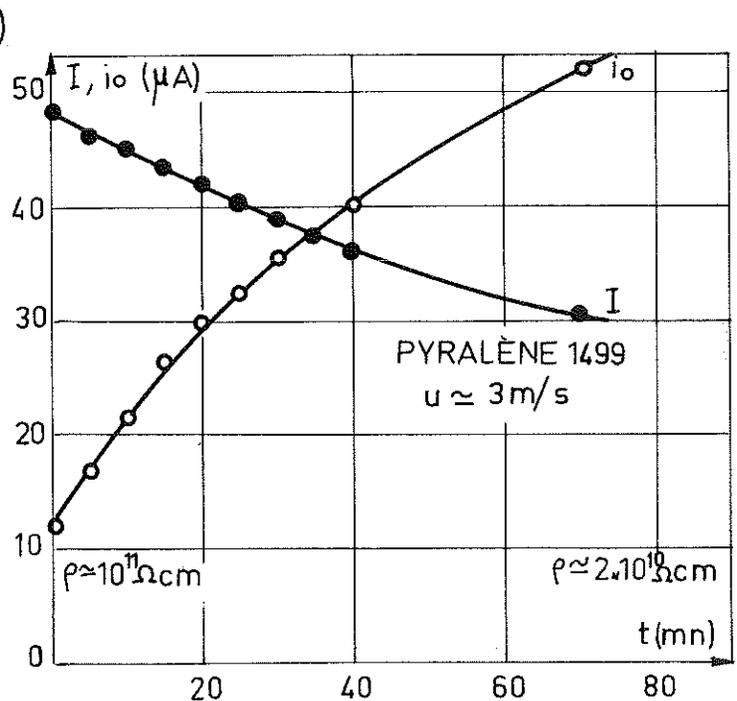


Fig. 11 : Evolution du courant transporté  $I$  et du courant  $i_0$  lorsque la résistivité du liquide décroît (ioniseur, fil-plans)

$\log (\operatorname{tg} \delta) = f(\theta)$  parallèlement à elle-même (figure 9) ; la quantité d'impuretés est donc en relation directe avec la valeur de  $\operatorname{tg} \delta$ , mais n'affecte pas son taux de variation avec la température. On remarque une certaine analogie entre les deux familles de courbes  $\log (\frac{1}{\eta})$  et  $\log (\operatorname{tg} \delta)$  en fonction de la température (figure 9). Les Pyralène sont d'autant plus sensibles à la pollution que leur fluidité et leur permittivité sont plus élevées ; nous aurons donc intérêt à utiliser un liquide assez visqueux et à opérer à température ordinaire pour bénéficier des plus hautes valeurs de résistivité et de constante diélectrique (figure 10). La viscosité cependant, ne doit pas être trop grande, sinon le débit des pompes serait réduit de manière considérable. Notre choix s'est porté sur le Pyralène 1499 (à 20°C :  $\epsilon \approx 5,9$  ;  $\nu \approx 60$  cst.).

La figure 11 est significative quant à l'évolution des performances d'un ioniseur lorsque la résistivité du liquide varie. Le circuit est préalablement rincé avec le Pyralène à utiliser ; après quelques minutes de circulation dans le circuit d'utilisation, la résistivité sous champ intense (50 kV/cm) est de l'ordre de  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ , valeur acceptable pour le bon fonctionnement d'un ioniseur. Mais, dès lors, un apport d'impuretés ou une augmentation de la température entraînent une chute de la résistivité et une diminution du temps de relaxation ; le courant transporté  $I$  décroît rapidement, tandis que  $i_0$  augmente de manière considérable. Au bout de quelques heures de fonctionnement, on constate que la résistivité (sous champ intense) est voisine de  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ .

Le liquide doit alors être changé ou purifié chimiquement ; le traitement d'épuration conventionnel des Pyralène consiste à fixer à chaud (100° C) les impuretés électrolytiques par de la terre à Foulon et de l'alumine activée. Le procédé est difficile à mettre en oeuvre, mais conduit à de bons résultats ; même

si le liquide est fortement pollué ( $\rho \approx 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ), on obtient après traitement une valeur élevée de la résistivité ( $\rho \approx 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ ). Nous n'avons effectué ce traitement que dans le cas précis d'une grande pollution.

Il est donc indispensable de réaliser un circuit d'épuration capable de porter et de maintenir, dans le circuit d'utilisation, la résistivité du Pyralène, sous champ intense, à une valeur supérieure à  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ . Nous allons étudier les possibilités d'obtention de résistivités élevées, et définir les conditions optimales de désionisation du Pyralène.

### 3°) Méthodes d'épuration -- Résultats expérimentaux

L'utilisation de techniques modernes d'échange d'ions sur résines synthétiques rend possible une désionisation très poussée de nombreux liquides polaires ; dès 1959, de remarquables résultats sont obtenus pour l'acétone et le nitrobenzène (15). Les modalités de fonctionnement dans les conditions les meilleures ont, par la suite, été précisées (3) (4). Plus récemment, la désionisation des liquides polaires par électrodialyse a permis d'atteindre des résistivités encore plus élevées.

Les deux procédés d'épuration ont fait l'objet d'une étude systématique dans le cas particulier du Pyralène.

#### a) Désionisation du Pyralène par électrodialyse

##### - Généralités \_o\_o\_o\_o\_o\_

L'électrodialyse utilise la sélectivité ionique de membranes hémiperméables, à travers lesquelles on effectue une



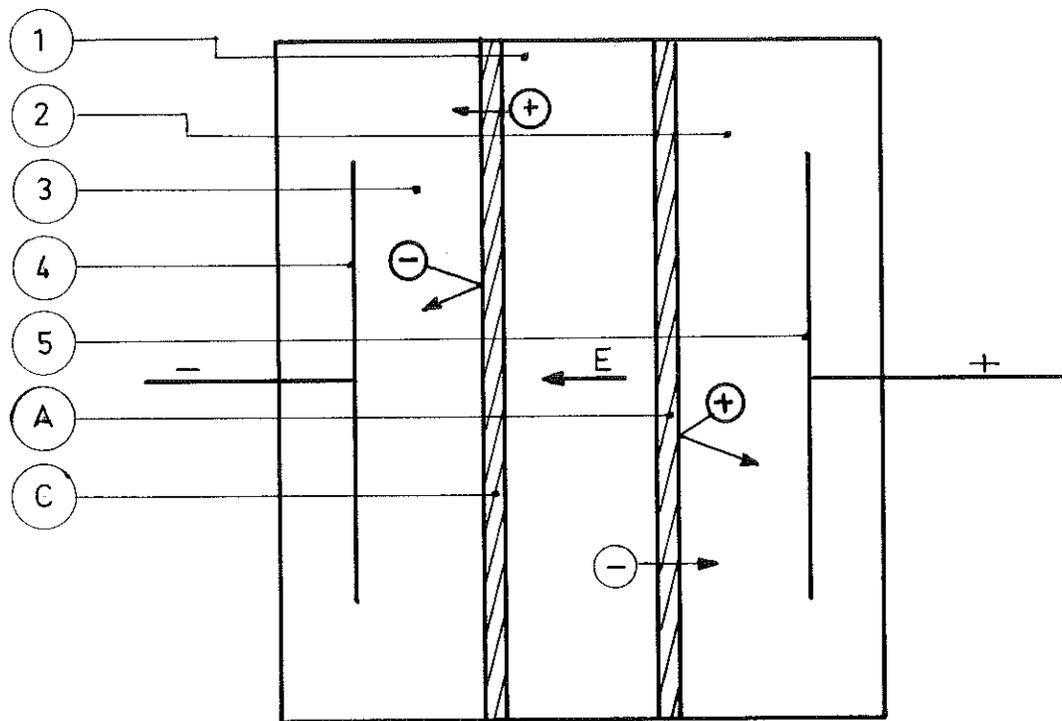


Fig. 12 : Schéma d'un électrodialyseur

- 1- Compartiment central
- 2- Compartiment anodique
- 3- Compartiment cathodique
- 4- Cathode
- 5- Anode
- A- Membrane anionique, basique, perméable aux anions
- C- Membrane cationique, acide, perméable aux cations



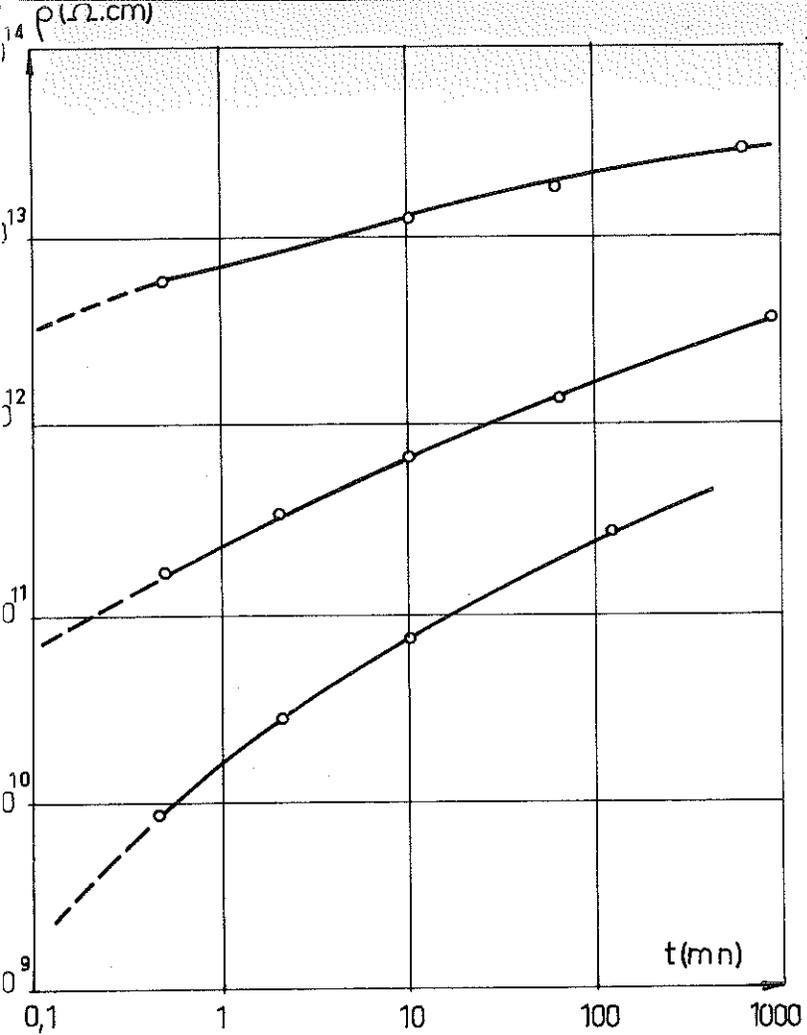


Fig. 13 : Epuration statique du Pyralène 1499 par électrodialyse ; le liquide à épurer est à divers stades de pollution ( $E=30$  kV/cm)

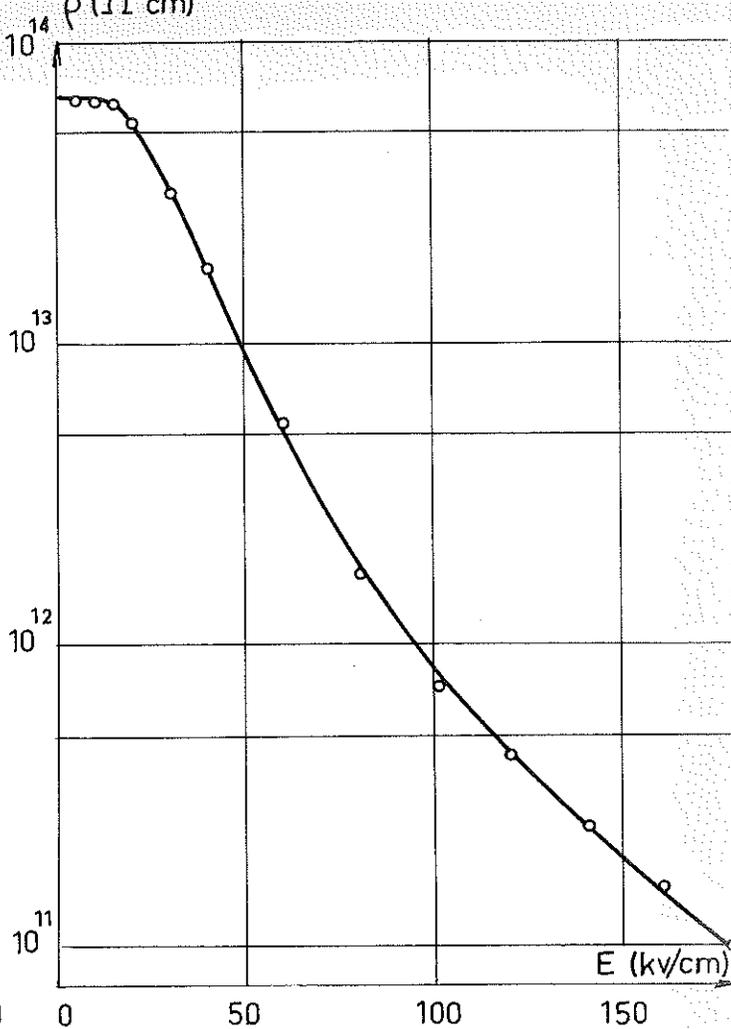


Fig. 14 : Résistivité apparente entre membranes en fonction du champ électrique moyen appliqué

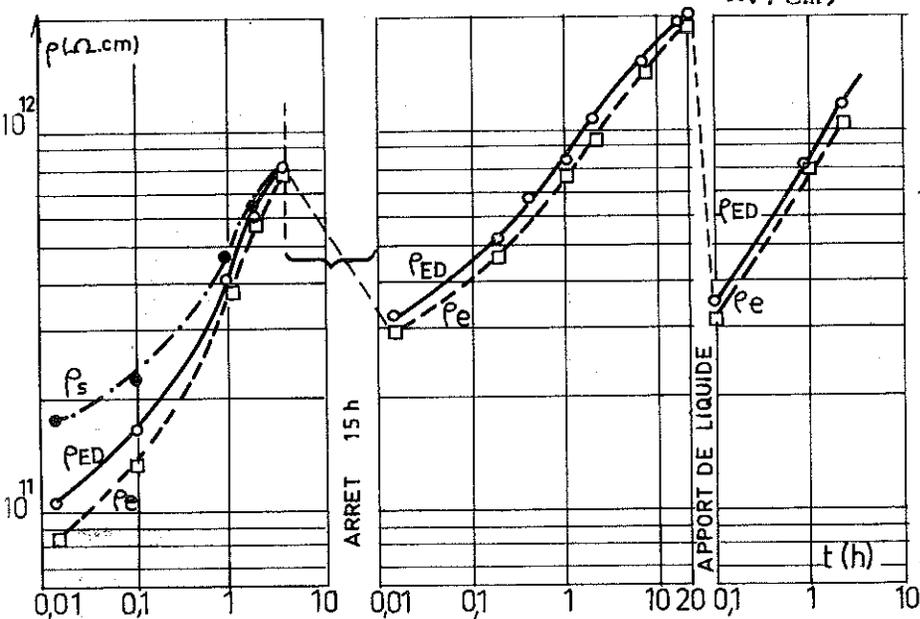


Fig. 15 : Epuration dynamique du Pyralène 1499 par électrodialyse - Influence d'un arrêt prolongé et d'un apport de liquide impur.

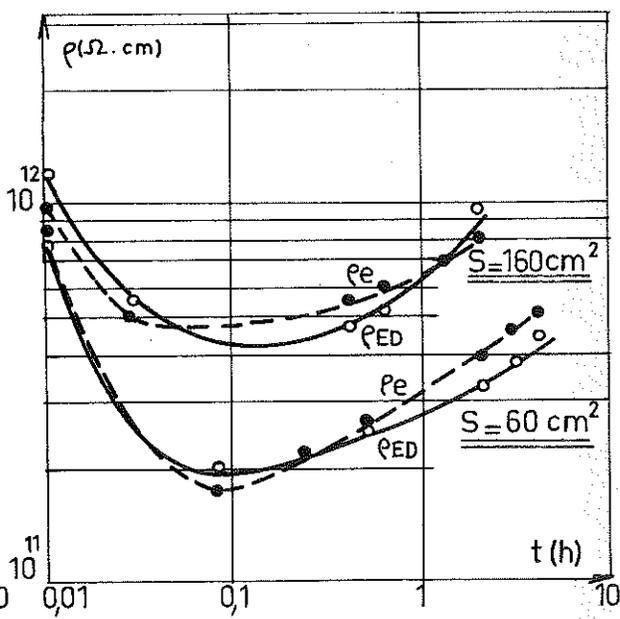


Fig. 16 : Influence d'une pollution identique sur la résistivité, suivant la surface active des membranes

platine permettent de mesurer la résistivité en amont ( $\rho_e$ ) et en aval ( $\rho_s$ ) de l'électrodialyseur. Les membranes ont une surface de  $60 \text{ cm}^2$  ; le volume initial de liquide est voisin de 1,5 l.

Avec un débit de  $2 \text{ cm}^3/\text{s}$ , en appliquant un champ de 25 kV/cm à l'électrodialyseur, la résistivité est multipliée par dix en 4 heures. Il est remarquable de constater qu'un arrêt d'une quinzaine d'heures entraîne une chute notable de la résistivité (pollutions dues aux parois et à l'action de la lumière). Si l'on ajoute un litre de liquide identique au liquide initial, la résistivité tombe à une valeur assez basse, et on observe que l'électrodialyseur réagit lentement devant cet apport d'impuretés. Le niveau de résistivité atteint au bout d'une dizaine d'heures est intéressant : il excède  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  (figure 15)

Afin d'obtenir plus rapidement une haute valeur de la résistivité, il est nécessaire d'augmenter la surface active des membranes ; de plus, le niveau final en régime dynamique sera plus élevé (20).

Nous avons donc réalisé un électrodialyseur dont les membranes possèdent une grande surface utile ( $160 \text{ cm}^2$ ) ; leur longueur est voisine de 25 cm, aussi a-t-il été indispensable de les tendre et de les maintenir en position par des dispositifs appropriés (figure 17).

Avec cet appareil, nous avons pu atteindre en une quinzaine d'heures une résistivité voisine de  $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$  dans un circuit contenant près de 4 litres de Pyralène. L'expérience montre que le champ optimum à appliquer à l'électrodialyseur doit être compris entre 30 et 50 kV/cm ; ces valeurs correspondent à celles

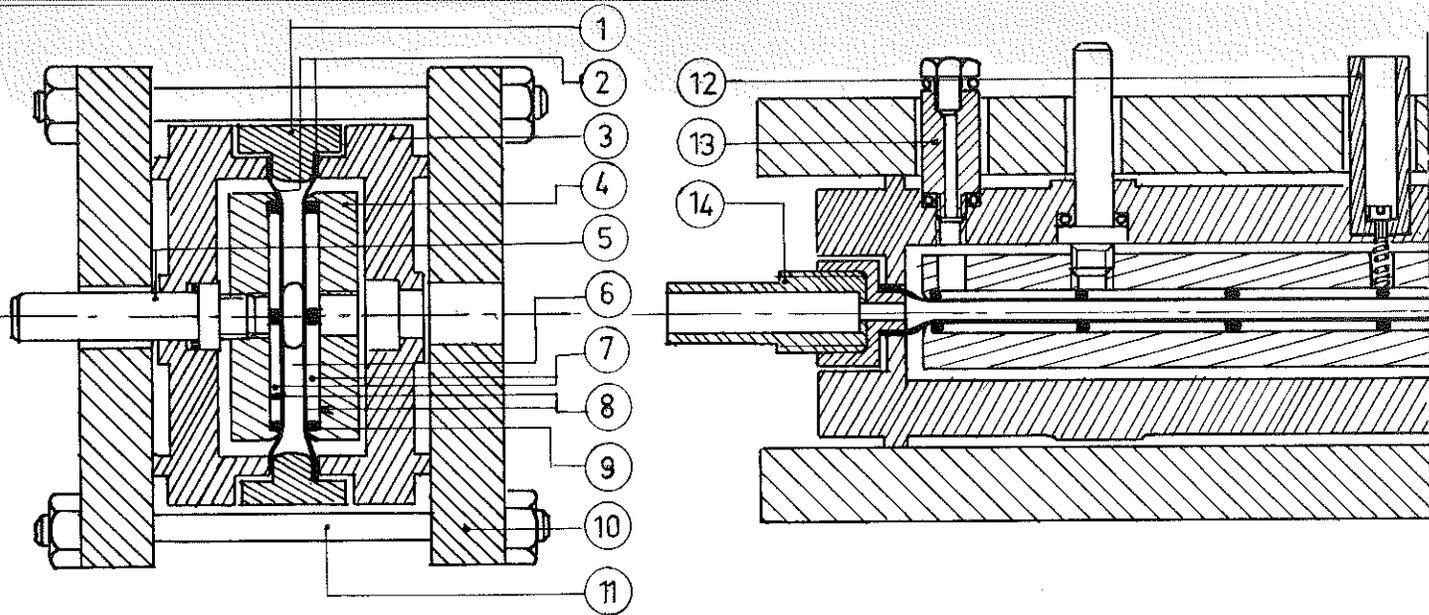
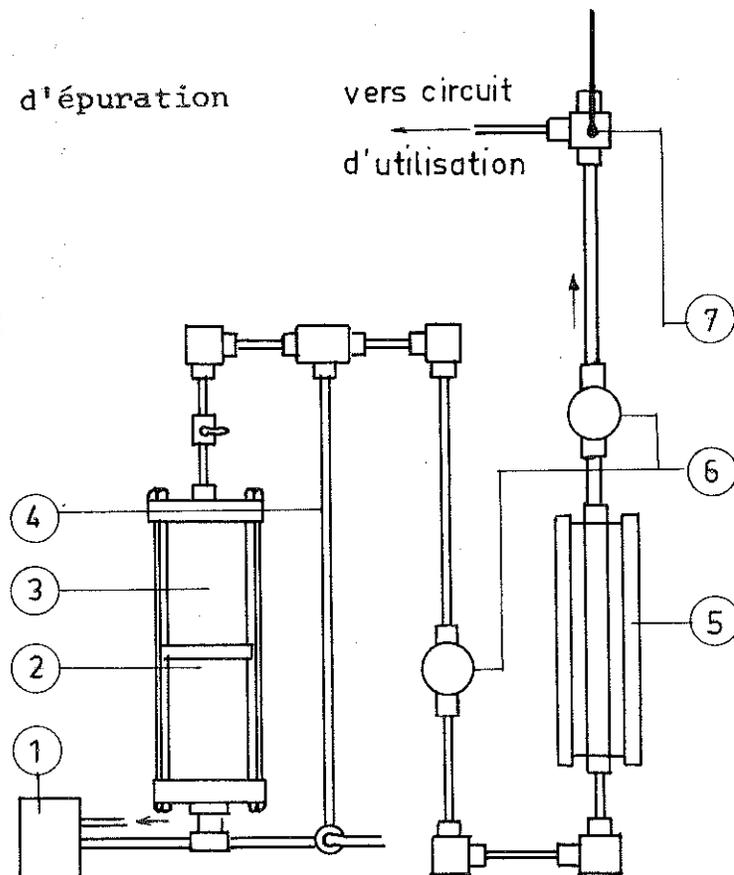


Fig. 17 : Electro-dialyseur de grande surface active - Ech : 1/2

- |   |   |
|---|---|
| 1- Corps du compartiment central (téflon) | 11- Tirants (nylon)                                   |
| 2- Membranes AMF A60 et C60               | 12- Sortie H.T.                                       |
| 3- Flasques (nylon)                       | 13- Orifice de remplissage des compartiments latéraux |
| 4- Tendeurs (nylon)                       | 14- Ajustage d'amenée du liquide à épurer             |
| 5- Poussoirs (nylon)                      |   |
| 6- Compartiment central                   |   |
| 7- Compartiments latéraux                 |   |
| 8- Electrodes (platine)                   |   |
| 9- Treillis (téflon)                      |   |
| 10- Brides (permali)                      |   |

Fig. 18 : Schéma du circuit d'épuration  
Ech : 1/10

- |  |
|--|
| 1- Pompe VARY-PUMP                     |
| 2- Résine déshydratante DOWEX          |
| 3- Résines désionisantes AMBERLITE     |
| 4- By-pass                             |
| 5- Electro-dialyseur                   |
| 6- Cellules de contrôle de résistivité |
| 7- Thermomètre                         |



pour lesquelles on observe un comportement du liquide sensiblement ohmique dans l'électrodialyseur (figure 14).

Il n'a pas été fait d'étude systématique de la cinétique d'épuration en fonction de la vitesse du liquide dans l'électrodialyseur ; pour que l'électrodialyseur fonctionne convenablement, la vitesse du liquide doit être comparable à celle qu'acquerraient les ions les plus lents dans le champ électrique, soit  $w = kE \approx 3 \text{ cm/s}$  (avec  $k = 10^{-4} \text{ cm/s/V/cm}$  et  $E = 30 \text{ kV/cm}$ ). La section de l'électrodialyseur valant quelques centimètres carrés, le débit de liquide doit être de quelques centimètres cubes par seconde. Pour les volumes de liquide à traiter, on obtient 3 à 4 recyclages par heure.

La nécessité d'une grande surface active des membranes apparaît sur la figure 16 : à la suite d'une pollution comparable (mise en route du circuit d'utilisation), la résistivité dans le circuit d'utilisation est moins affectée lorsque la surface active des membranes est importante, et on retrouve bien plus rapidement un niveau élevé de résistivité.

#### b) Désionisation du Pyralène sur résines échangeuses d'ions

La désionisation s'effectue par élution du liquide sur un lit de résines constitué d'un mélange à parts égales d'échangeur de cations (fortement acide) et d'échangeur d'anions (fortement basique). En solution aqueuse, les variétés acides libèrent des protons en absorbant les cations, tandis que les variétés basiques libèrent des ions oxydriles en absorbant les anions. Tout se passe comme si les résines cédaient de l'eau en échange d'une impureté saline. Il est souhaitable que le pH moyen soit proche de la neutralité pour obtenir une utilisation meilleure des sites actifs.

Quoique les résines soient préalablement déshydratées énergiquement (traitement sur dioxanne, puis alcool éthylique absolu), elles cèdent de l'eau au liquide à épurer, et il est indispensable d'introduire dans le circuit une colonne de résine déshydratante. L'échange d'ions s'effectue généralement d'autant mieux que la température est plus basse, et que le liquide est plus polaire. Nous avons cependant obtenu, à température ordinaire, de hautes valeurs de résistivité (figure 19).

La quantité de liquide est de l'ordre de 2 litres : la courbe n° 1 est obtenue après 2 rinçages du circuit, la courbe n° 2 après 5 nouveaux rinçages (les résines retiennent de l'alcool éthylique, liquide conducteur, qui a servi à les déshydrater et qu'il est difficile d'éliminer).

Le débit est voisin de  $4 \text{ cm}^3/\text{s}$  ; la hauteur de la colonne de résines échangeuses d'ions est voisine de 15 cm ; le liquide y circule très lentement : le temps de séjour du liquide sur le lit de résines est de l'ordre de 2 à 3 minutes.

Signalons que la résine déshydratante a toujours été efficace ; la teneur en eau du Pyralène est demeurée inférieure à 30 p.p.m.

c) Réalisation pratique d'un circuit d'épuration du Pyralène - Résultats

Il semble que les deux procédés d'épuration n'éliminent pas les mêmes types d'impuretés ; les résines sont capables d'en absorber de fortes quantités sans donner les très hautes résistivités que l'électrodialyse permet d'atteindre, à condition toutefois qu'elle soit pratiquée sur un liquide relativement pur.

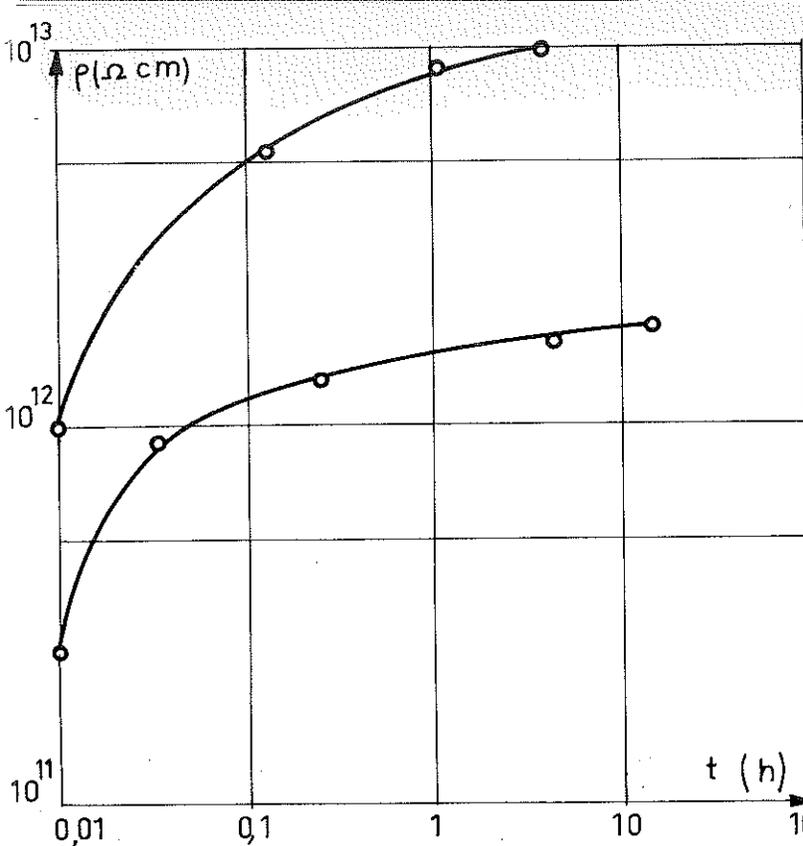


Fig. 19 : Désionisation du Pyralène 1499 par résines échangeuses d'ions et à température ordinaire sur résines échangeuses d'ions

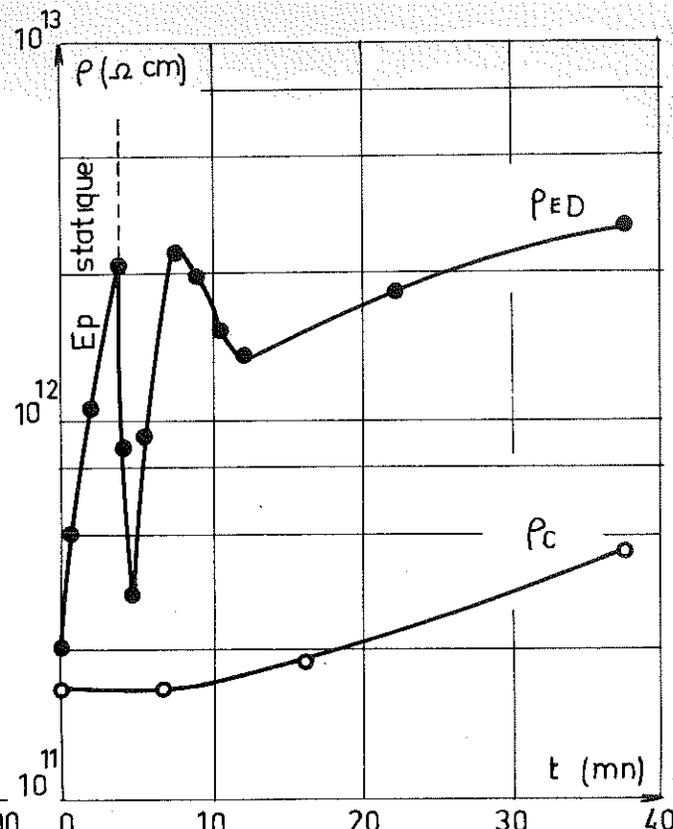


Fig. 20 : Epuration du Pyralène 1499 à température ordinaire sur résines échangeuses d'ions et à température ordinaire sur résines échangeuses d'ions

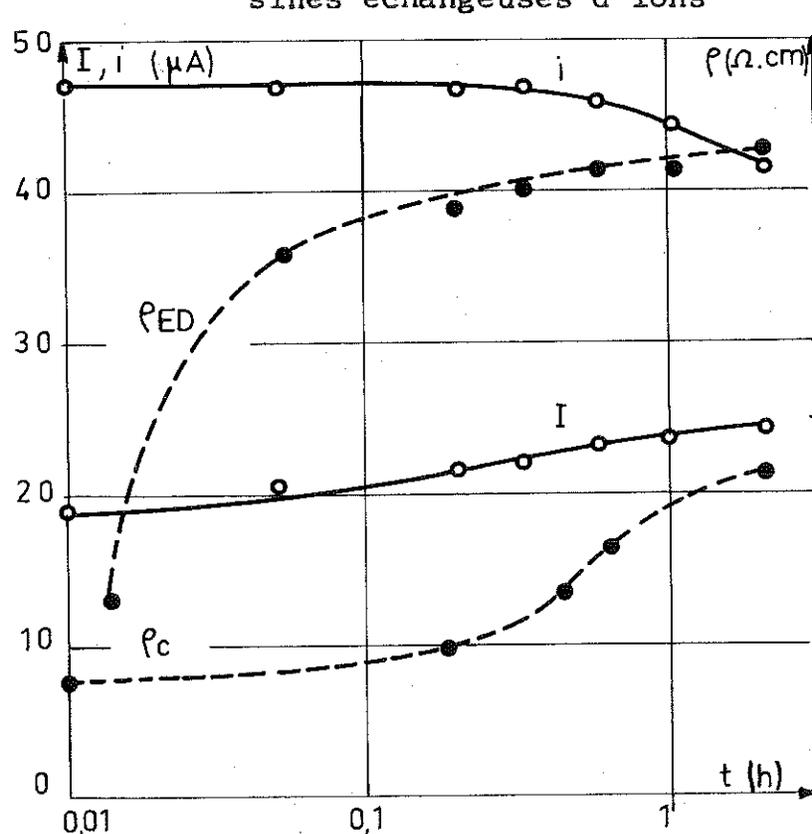


Fig. 21 : Evolution des performances d'un ioniseur en fonction de la pureté du liquide

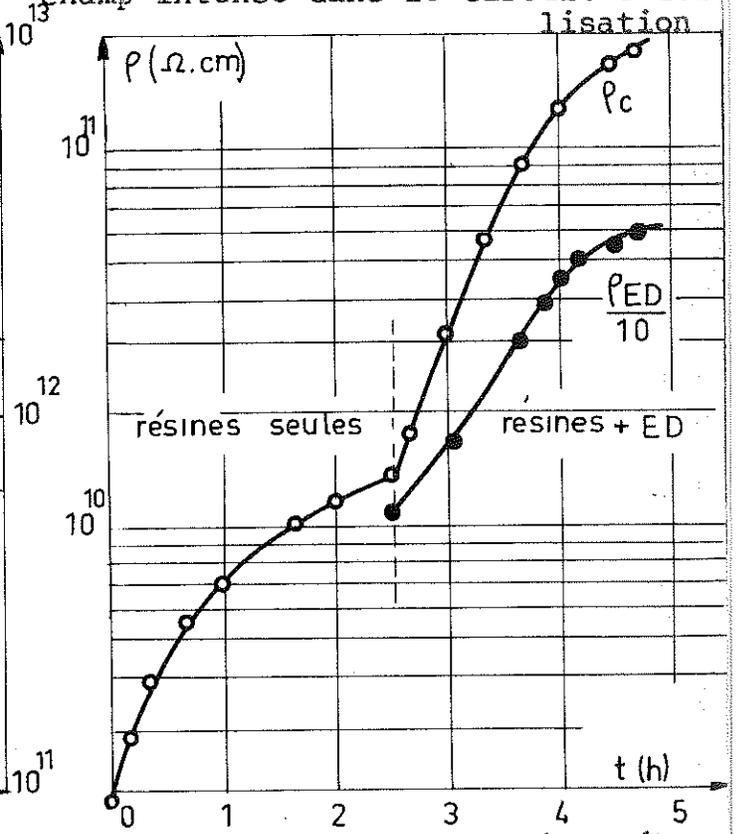


Fig. 22 : Désionisation d'un mélange Pyralène-Nitrobenzène (15 %) : résistivité sous champ intense dans le circuit d'utilisation

Electrodialyse et échange d'ions se complètent donc harmonieusement ; nous employerons les deux méthodes d'épuration : le circuit de purification du Pyralène comprend une colonne de résines déshydratantes et désionisantes ainsi qu'un électrodialyseur (figure 18).

Ce circuit fonctionne en parallèle sur le circuit d'utilisation, il autorise des débits de l'ordre de 15 l/h (le liquide du circuit d'utilisation est ainsi recyclé 4 à 5 fois par heure). Il est en majeure partie réalisé en téflon ou acier inoxydable (cf. photographie 3). Notons que la pompe n'est pas indispensable : on pourrait en effet prélever une fraction du débit du circuit d'utilisation.

La figure 20 résume le fonctionnement du circuit d'épuration ; le circuit d'utilisation fonctionne (débit 500 à 600 l/h) : la résistivité du Pyralène est :  $\rho_c \approx 1,5 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  (sous 50 kV/cm) ; au temps  $t = 0$ , l'électrodialyseur est mis sous tension : au bout de 3 minutes d'épuration statique,  $\rho_{ED} \approx 2,5 \cdot 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ . On établit alors la circulation dans le circuit d'épuration ; l'électrodialyseur est traversé par le liquide qui contient les conduits qui le séparent de la colonne de résine ; la résistivité décroît donc, puis augmente quand arrive le liquide ayant séjourné sur le lit de résines (la colonne constitue un "volant" de liquide pur : elle contient quelques centaines de  $\text{cm}^3$  de liquide désionisé, même quand le circuit de purification ne fonctionne pas ; ceci est très précieux, car, dès la mise en route du circuit d'épuration, du liquide très pur est injecté dans le circuit d'utilisation). La résistivité diminue ensuite légèrement - lorsque le liquide pur que contenait la colonne est remplacé par celui qui provient du circuit d'utilisation - et croît à nouveau régulièrement quand l'épuration se poursuit. Parallèlement, la résistivité  $\rho_c$ , dans le

circuit d'utilisation augmente : pour une vitesse constante dans l'ioniseur, le courant transporté  $I$  tend vers un maximum alors que  $i_0$  diminue (figure 21).

#### d) Conclusion

Le circuit d'épuration réalisé permet d'obtenir des résistivités sous champ intense (50 kV/cm) qui peuvent atteindre 4 à  $7 \cdot 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  dans le circuit d'utilisation au bout de 1 à 3 h de fonctionnement ; ces valeurs sont maintenues quand l'ioniseur fonctionne, à condition que la température n'excède pas  $20^\circ\text{C}$ , et qu'il ne se produise pas de claquages trop fréquents dans le Pyralène (sinon, la résistivité peut devenir inférieure à  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ , mais la résistivité initiale se retrouve au bout de 4 à 7 h d'épuration, sans claquages nouveaux).

Des valeurs comparables ont été obtenues avec un Pyralène de fabrication récente (Pyralène 1500), un peu plus fluide que le Pyralène 1499, et de permittivité plus élevée ( $\epsilon = 6,3$  à  $20^\circ\text{C}$ ) (11).

Enfin, il semble qu'il soit possible d'amener à un niveau de pureté intéressant de fortes quantités de liquides très polaires ; des résultats encourageants ont été obtenus avec un mélange de permittivité  $\epsilon = 9$  à  $10$  (Pyralène 1499 + 15 % de nitrobenzène). Avec le circuit d'épuration précédemment décrit, les temps d'épuration sont assez longs (figure 22) ; il est permis d'espérer des résultats meilleurs encore, en augmentant le volume des résines, la surface active des membranes et en utilisant un liquide moins fluide.

C H A P I T R E                    I I I

CREATION ET TRANSFERT DE CHARGES DANS UN DIELECTRIQUE LIQUIDE

ETUDE EXPERIMENTALE

Ce chapitre est divisé en deux parties : fonctionnement en court-circuit, fonctionnement en générateur. Il convient de séparer les problèmes : en premier lieu, il faut étudier les possibilités d'injection de charges en fonction de la vitesse du liquide, de la géométrie de l'ioniseur, préciser le rôle de la constante diélectrique. On conçoit qu'il doit se produire, entre ioniseur et collecteur, des modifications affectant la direction et l'intensité du champ électrique ; afin de minimiser le rôle des phénomènes perturbateurs qui peuvent prendre naissance dans cette zone de transition, celle-ci sera réduite au minimum : sa longueur sera déterminée à partir des données expérimentales concernant l'apparition d'un courant de conduction ioniseur-collecteur, et la tenue de l'isolant qui sépare ces deux organes (en pratique, cette longueur n'excèdera pas 5 mm). Le collecteur restant relié à la terre, on accroîtra ensuite la distance qui le sépare de l'ioniseur ; enfin, on étudiera le fonctionnement quand on laisse s'élever le potentiel du collecteur.

A/ ETUDE DU FONCTIONNEMENT EN COURT-CIRCUIT

I/ CRITERES QUI PRESIDENT A L'ELABORATION ET AU CHOIX D'UN IONISEUR  
=====

1°) Critères hydrauliques

Nous avons estimé à quelques mètres par seconde, la vitesse nécessaire à l'entraînement des charges (Ch. I § III, 2°).

Pour obtenir une vitesse moyenne  $u_m \approx 4$  m/s, avec un débit  $Q \approx 1\ 500$  l/h, la section  $S$  de l'ioniseur doit être voisine du centimètre carré : l'ioniseur constitue un étranglement dans le circuit. Afin de réduire les pertes de charge hydrauliques et d'éviter les phénomènes de cavitation, l'ioniseur devra se présenter sous la forme d'un convergent-divergent. Remarquons que la section de l'étranglement ne peut être réduite au-delà d'une certaine limite, à partir de laquelle il n'y a plus de gain possible sur la vitesse, car le débit décroît très rapidement quand augmentent les pertes de charge.

a) Écoulement laminaire - écoulement turbulent

Dans une conduite fermée, lorsque le régime est établi, la répartition de la vitesse du liquide est profondément modifiée quand on passe du régime laminaire au régime turbulent.

Lorsque l'écoulement est laminaire, la répartition des vitesses est parabolique :

$$\begin{aligned} \text{pour une conduite circulaire : } u_{\max.} &= 2 u_m \\ \text{entre parois parallèles : } u_{\max.} &= \frac{3}{2} u_m \end{aligned}$$

Le passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent - sans précautions spéciales - a lieu pour un nombre de Reynolds  $R$  de l'ordre de 2 000 dans une conduite circulaire, 1 000 dans le cas d'un canal rectangulaire (33).

$$R = \frac{u_m \times D_h}{\nu}$$

$$u_m = \frac{Q}{S}, \text{ vitesse moyenne du fluide, quotient du débit } Q \text{ par la section } S \text{ du canal}$$

$$D_h = \frac{4S}{p}, \text{ diamètre hydraulique}$$

$p$  : périmètre mouillé

$$\nu = \frac{\eta}{\delta} \quad , \text{ viscosité cinématique}$$

$\eta$  : viscosité dynamique  
 $\delta$  : poids spécifique

Lorsque le régime est turbulent, le profil des vitesses est relativement plat (figure 23), et l'on a :

$$u_{\max.} \approx 1,2 u_m \quad (31)$$

b) Couche limite

Aucun résultat sur la répartition des vitesses en régime établi ne peut s'appliquer dans une région voisine de l'entrée du canal. L'allure des distributions de vitesse au niveau de l'entrée est donnée par la figure 24. La vitesse devrait être uniforme en tout point de la section du canal ; d'après le principe de continuité, sa valeur serait celle de la vitesse moyenne  $u_m$ , dans le cas d'une répartition parabolique. Mais l'action de la viscosité se traduit par l'établissement sur les parois d'une couche limite qui s'étend progressivement au sein du liquide ; la partie centrale du fluide, non affectée par l'action de la viscosité, subit une accélération progressive ; lorsque la couche limite atteint le centre du liquide, la vitesse est passée de  $u_m$  à  $u_{\max.}$ . L'apparition d'une distribution de vitesse parabolique en régime établi s'effectue de manière asymptotique ; la longueur  $L$  de la zone de transition est fonction du diamètre de la conduite et du nombre de Reynolds (figure 24).

Dans le cas de conduites circulaires :

$$\frac{L}{D} = 0,07 R \quad (31)$$

Le coefficient numérique serait 0,029 d'après Goldstein (19).

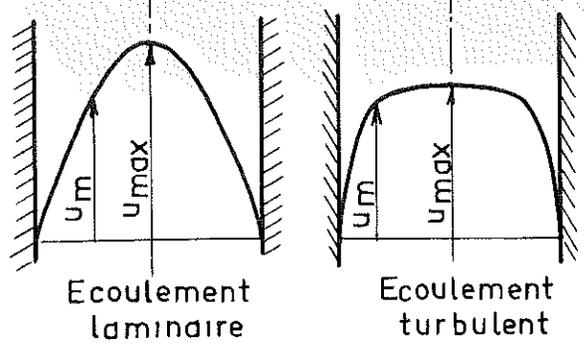


Fig. 23 : Profil des vitesses en régime établi

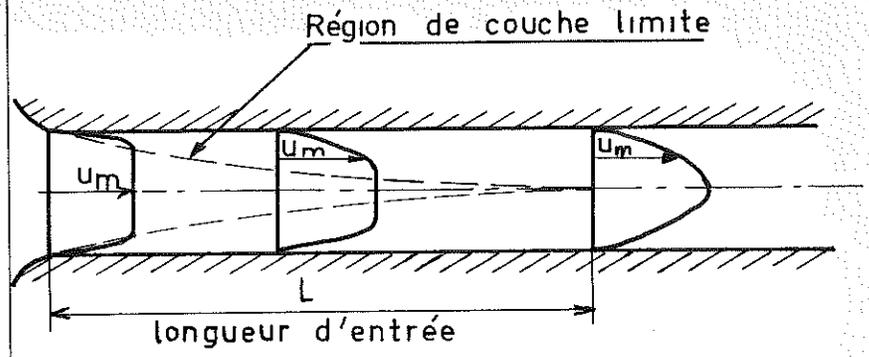
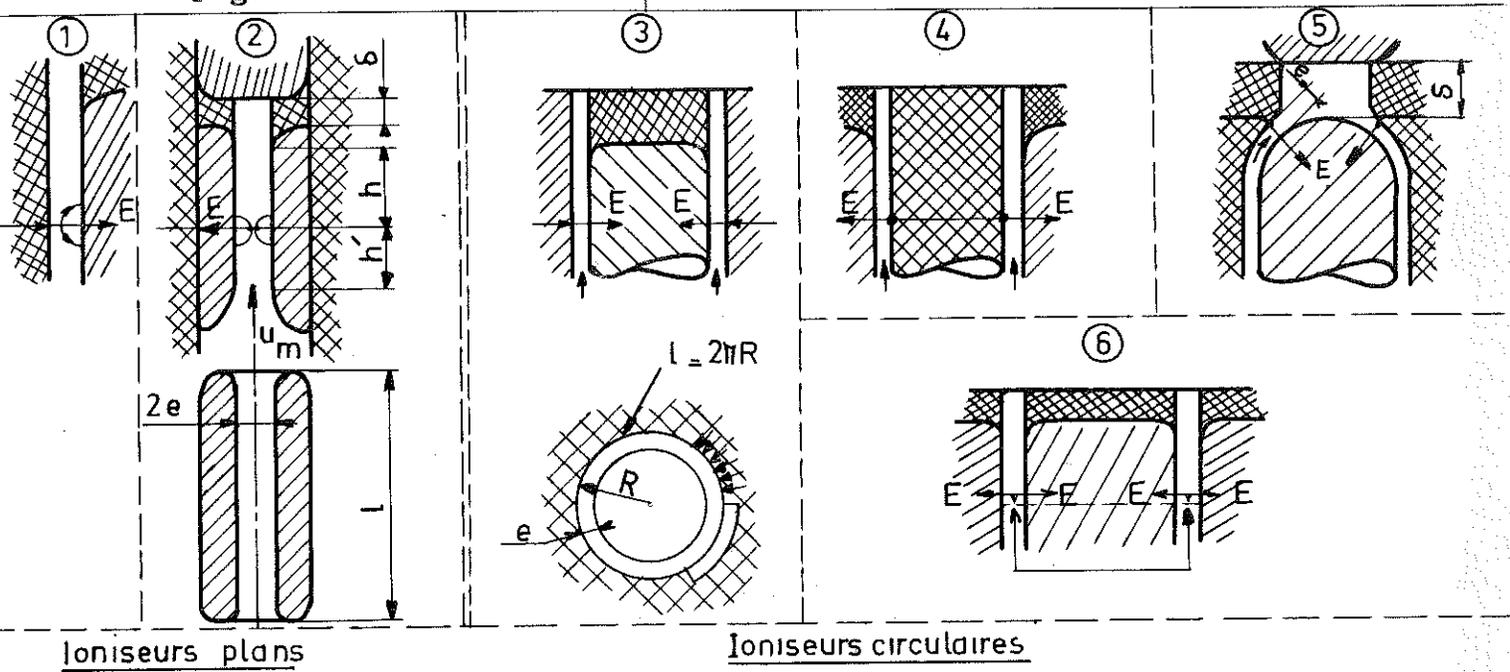


Fig. 24 : Distribution des vitesses au voisinage de l'entrée d'un canal



Ioniseurs plans

Ioniseurs circulaires

Fig. 25 : Exemples d'ioniseurs où E est en moyenne perpendiculaire à  $u_m$

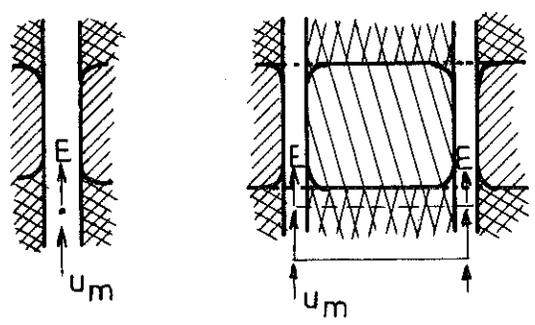


Fig. 26 : Exemples d'ioniseurs où E et  $u_m$  ont même direction et même sens

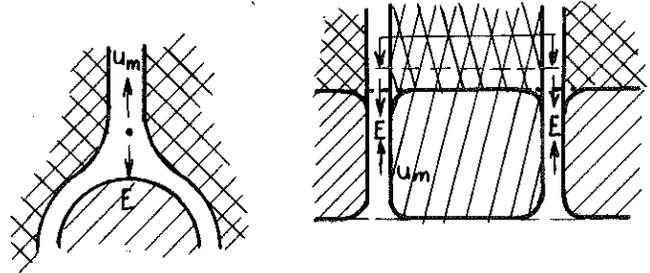


Fig. 27 : Exemples d'ioniseurs où E et  $u_m$  ont même direction et des sens opposés

Dans le cas de parois parallèles :

$$\frac{L}{D} = 0,04 R \quad (33)$$

Pour les grandes valeurs de R, il y a transition entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent dans la couche limite à une distance proche de l'entrée ; cette couche limite turbulente s'étend ensuite vers l'intérieur, et on obtient la répartition de vitesses du régime turbulent.

Donc, pour être certain d'obtenir le régime établi, avec les vitesses que nous avons envisagées et compte tenu des nombres de Reynolds qui leur correspondent, il faudrait se placer à plusieurs centimètres ou quelques décimètres de l'entrée, selon la viscosité du liquide employé ( $10 \text{ cst} < \nu < 60 \text{ cst.}$ ). Près de l'entrée du canal, le profil de vitesse est assez plat : pratiquement, sur toute la largeur du canal, la vitesse doit être peu différente de la vitesse moyenne  $u_m$ .

L'ioniseur constituant un étranglement local dans le circuit, on opérera presque toujours au voisinage immédiat de l'entrée : en l'absence de champ électrique, le profil de vitesse est donc connu. Remarquons que le champ électrique est susceptible d'occasionner des perturbations dans l'écoulement ; on observe en effet, entre électrodes planes et parallèles, l'apparition de tourbillons. Il est donc permis de penser qu'en présence de champs électriques intenses le régime ne sera jamais laminaire.

## 2°) Critères électriques

L'hétérogénéité du champ électrique dépend en premier lieu de paramètres géométriques ; en première approximation, pour obtenir un champ fortement hétérogène, la distance

des électrodes ( $e$ ) doit être grande devant le rayon de courbure ( $r_0$ ) de l'électrode ionisante :  $e \gg r_0$  (dans le cas d'une pointe ou d'une lame, intervient l'acuité de l'électrode : l'angle d'ouverture par exemple doit être petit).

La vitesse du liquide et la section de l'ioniseur étant fixées, on accroîtra le courant transporté en augmentant  $l$ , longueur de l'électrode ionisante, ce qui conduit à réduire  $e$  ; mais on doit respecter la relation :  $e \gg r_0$  : on conçoit qu'il existe des conditions optimales de fonctionnement que seule l'expérience permettra de déterminer.

Notons que le rapprochement des électrodes permet en général d'accroître le champ disruptif ; cela permet d'autre part d'utiliser des tensions d'excitation plus faibles.

Enfin, l'entraînement des charges se fera d'autant mieux que la vitesse sera plus élevée au voisinage immédiat de l'électrode ionisante ; on aura donc intérêt à placer celle-ci au centre du canal, où la vitesse est maximale.

### 3°) Examen des diverses possibilités de systèmes-ioniseurs

Le champ d'excitation peut être dirigé de plusieurs manières par rapport à la direction de la vitesse du liquide.

#### a) Le champ appliqué est en moyenne sensiblement perpendiculaire à la vitesse

Un certain nombre d'exemples d'ioniseurs sont donnés figure 25. L'ioniseur peut être plan ou circulaire ; en aval de l'électrode ionisante, lorsque la vitesse est suffisante, la région

chargée est assimilable à une surface plane ou faiblement courbée, recouverte sur l'une ou ses deux faces d'une densité de charge  $\sigma$ , supposé uniforme. On a :

Ioniseur plan : champ sur une face :  $E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} = \frac{4\pi I}{\epsilon u_m l}$

champ bilatéral (2 faces):  $E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon} = \frac{2\pi I}{\epsilon u_m l}$

Ioniseur circulaire : champ sur une face :  $E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon} = \frac{2I}{\epsilon u_m R}$

champ bilatéral :  $E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon} = \frac{I}{\epsilon u_m R}$

2R : diamètre de l'ioniseur au niveau de l'électrode ionisante.

Dans le cas de l'ioniseur circulaire, l'évaluation du champ dû aux charges entraînées n'est valable que dans la mesure où le rayon du cylindre chargé n'est pas trop petit.

- b) Le champ d'excitation au voisinage de l'électrode ionisante a sensiblement même direction et même sens que la vitesse (figure 26)

En aval de l'électrode ionisante, l'interprétation demeure la même que précédemment.

- c) Le champ d'excitation au voisinage de l'électrode ionisante et la vitesse du liquide ont sensiblement même direction, mais des sens opposés (figure 27)

L'entraînement des charges doit également s'effectuer suivant une bande étroite, mais, les lignes de force du champ ne

pouvant se refermer sur les parois isolantes, doivent se concentrer dans le liquide et le champ disruptif peut être rapidement atteint.

#### 4°) Choix d'un ioniseur

Nous avons réalisé et expérimenté un grand nombre d'ioniseurs de géométrie différente. Aucun n'a permis d'obtenir d'emblée des densités de charge aussi élevées que l'ioniseur fil-plans schématisé figure 25, 2 : il s'agit d'un fil fin, tendu entre deux plaques planes et parallèles. C'est un dispositif d'étude très commode ; tous les paramètres géométriques peuvent aisément être modifiés : hauteur et écartement des plaques, diamètre du fil, nombre de fils ; en outre, réalisation, montages et démontages sont aisés.

#### 5°) Réalisation pratique d'un ioniseur fil-plans

Le dessin d'ensemble de l'ioniseur (figure 28) rend compte de la disposition et du montage des différents organes. Le corps de l'ioniseur est en araldite pure, ou en nylon, selon la nature du liquide utilisé ; ces matériaux possèdent d'excellentes qualités mécaniques et isolantes. Le parallélisme des électrodes a été particulièrement soigné, grâce à un usinage précis ; le centrage du fil est assuré par des guides-fil, à l'intérieur desquel le jeu est minime ( $\frac{2}{100}$  mm) ; la longueur utile de fil est :  $l = 3,3$  cm. Les électrodes planes ne possèdent aucun angle vif et les extrémités qui constituent l'entrée de l'étranglement sont profilées, pour réduire les phénomènes de cavitation (pour les faibles variations de section, un profil circulaire suffit ; dans le cas contraire, l'entrée est constituée d'arcs d'ellipse ou de cubiques (31)).

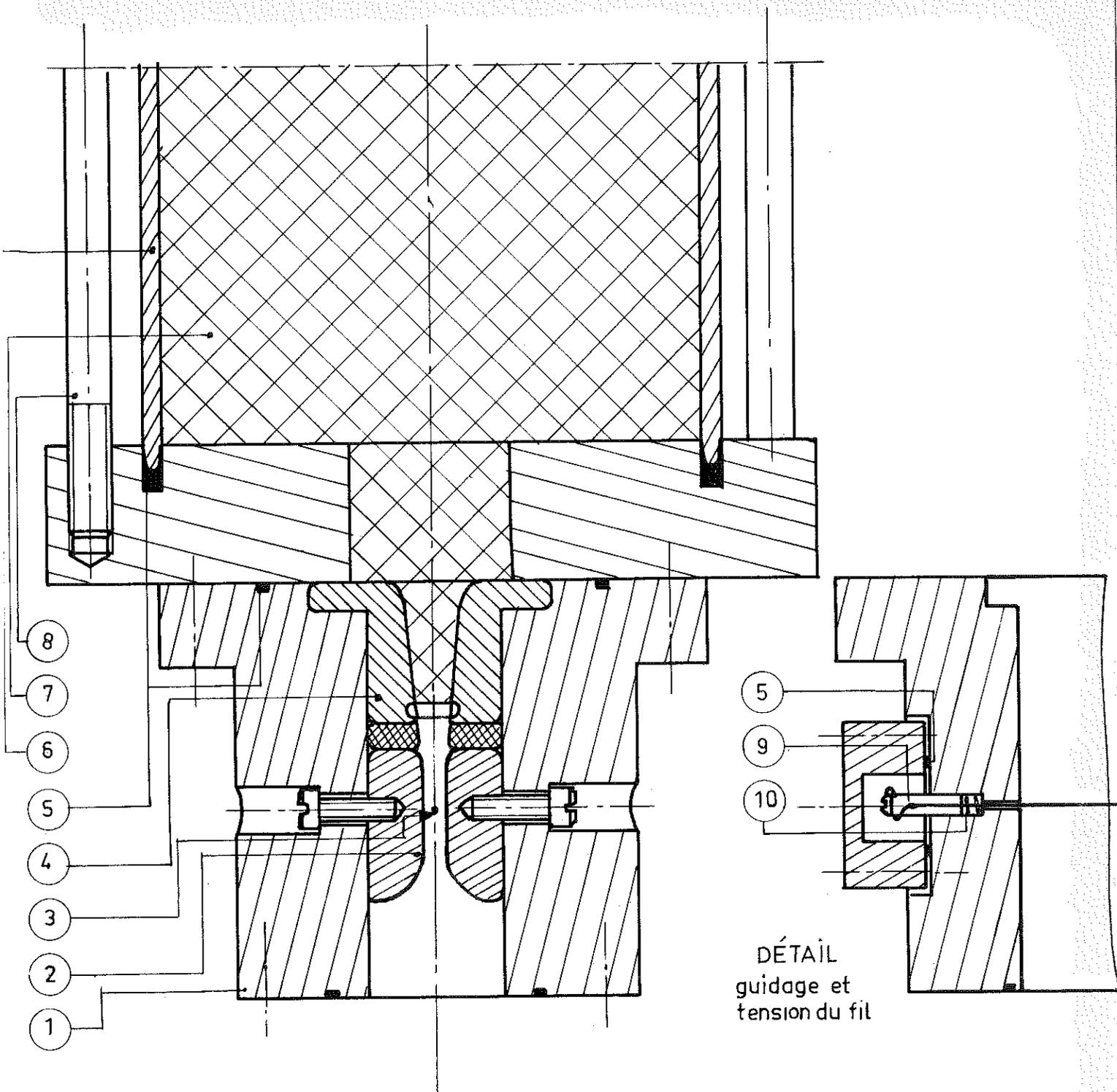


Fig. 28 : Dessin d'ensemble : ioniseur et système de collection

Ech : 1

- 1- Corps de l'ioniseur
- 2- Plaques
- 3- Fil
- 4- Dispositif de collection
- 5- Joints téflon

- 6- Tube-collecteur
- 7- Grillage métallique
- 8- Tirant
- 9- Guide-fil
- 10- Ressort de tension

La haute tension d'excitation peut être indifféremment appliquée au fil ou aux plaques. Le corps de l'ioniseur monté sur le circuit à fort débit ne diffère que par son système de fixation.

#### 6°) Le système de collection

Le collecteur doit réaliser une décharge aussi complète que possible du liquide ; la collection des charges d'autre part, doit se faire très près de l'ioniseur. La solution adoptée consiste à loger dans le corps de l'ioniseur une pièce métallique (figure 28), électriquement reliée à un cylindre de fort diamètre ( $\emptyset$  100 pour le montage I,  $\emptyset$  250 pour le montage II). Les ions se déchargent plus ou moins rapidement au contact du métal ; pour accroître l'efficacité du système de collection, on dispose une grande surface de grillage métallique à maille fine dans tout le volume du collecteur. L'augmentation de la surface métallique en contact avec le liquide et l'accroissement de la turbulence, concourent à réaliser rapidement et efficacement la décharge. De plus, on donne au collecteur un volume important, de sorte que le temps de séjour  $T$  y soit grand :  $T \gg \tau$ . Pour les débits les plus élevés,  $T$  est voisin de 2 secondes ; on constate que moins de 2 % des charges échappent à la collection.

Pour réduire les pertes de charge hydraulique, on réalise un élargissement graduel entre ioniseur et collecteur, élargissement dont l'angle d'ouverture est voisin de  $16^\circ$  (31).

## II/ ETUDE EXPERIMENTALE DU FONCTIONNEMENT D'UN IONISEUR =====

Les caractéristiques géométriques de l'ioniseur seront précisées ultérieurement ; le diamètre du fil employé est de 0,1 mm ; sur les graphiques est indiqué l'écartement des plaques (2e).

L'huile de transformateur est utilisée à une température de l'ordre de 40 à 45° C, le Pyralène à 20° C ; les résistivités de ces liquides sous champ fort ( $\approx 50$  kV/cm) sont respectivement supérieures à  $10^{12}$   $\Omega \cdot \text{cm}$  et  $2 \cdot 10^{11}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ .

1°) Rôle de la vitesse, de la tension d'excitation et de la nature du liquide

Le courant transporté  $I$  croît avec la vitesse, mais tend vers une limite pour les faibles tensions d'excitation ; cependant, plus la tension d'excitation est élevée, moins la saturation est accentuée et, aux fortes tensions d'excitation, le courant varie de manière sensiblement linéaire avec la vitesse (figure 29).

Pour une tension donnée, le fonctionnement de l'ioniseur apparaît clairement sur les figures 30 à 32. La relation  $i = I + i_0$  est bien vérifiée, et quand la vitesse est assez grande :

$$I \rightarrow i$$

$i_0 \rightarrow$  limite, qui, pour une tension donnée, est d'autant plus faible que la vitesse et la résistivité du liquide sont élevées.

Un effet remarquable de polarité apparaît, pour les liquides étudiés ; le liquide étant au repos, le claquage se produit plus aisément entre fil et plans, lorsque la polarité du fil est positive : l'écart avec la polarité opposée est de 30 à 50 %. D'autre part, les courbes statiques courant-tension ont une position inversée selon qu'il s'agit d'huile ou de Pyralène (figure 33) : à tension égale le courant est plus intense quand la polarité est positive pour le Pyralène, lorsqu'elle est négative pour l'huile ;

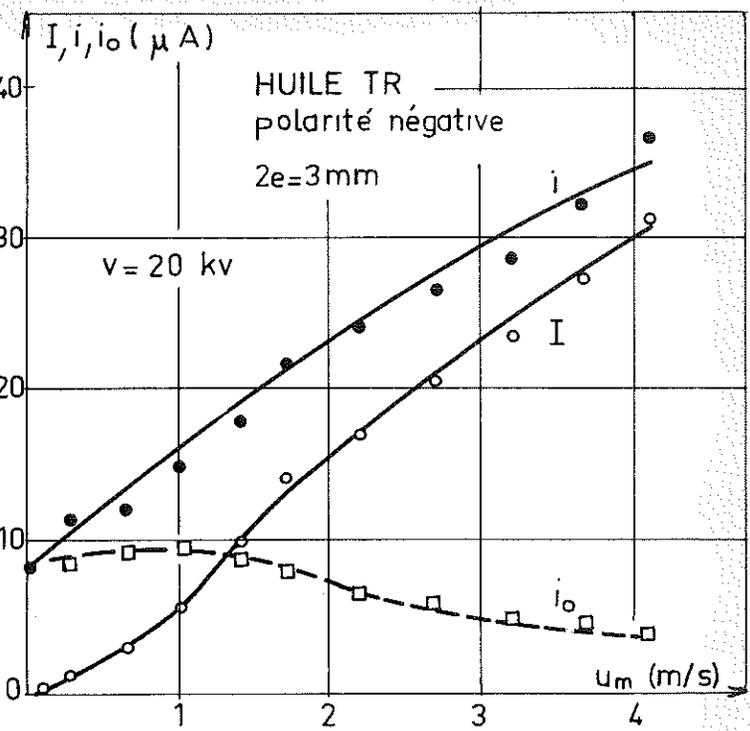
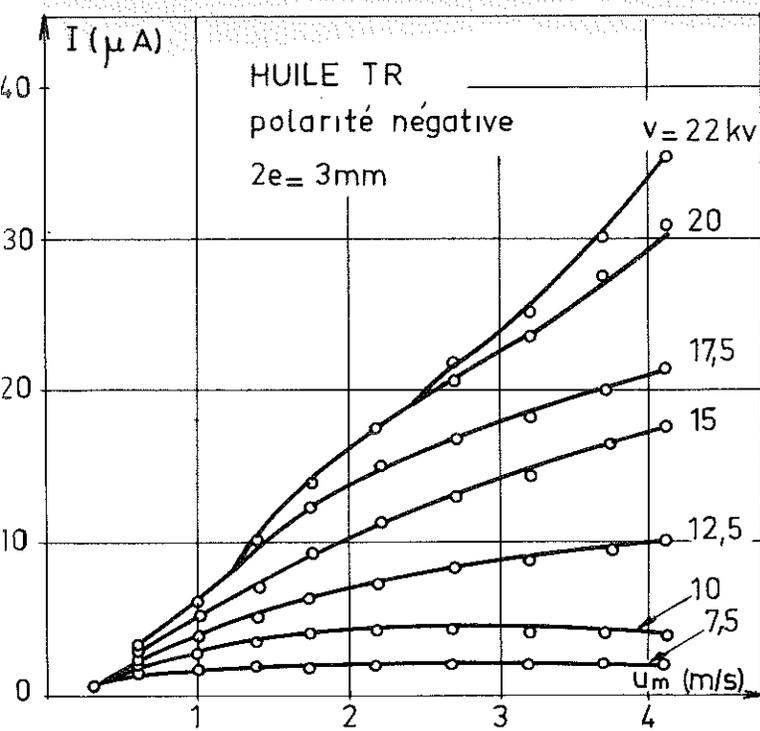


Fig. 29 : Variation du courant transporté en fonction de la vitesse du liquide pour différentes valeurs de la tension d'excitation

Fig. 30 : Fonctionnement d'un ioniseur : influence de la vitesse sur les courants  $i$ ,  $I$ ,  $i_0$ . ( $i = I + i_0$ )

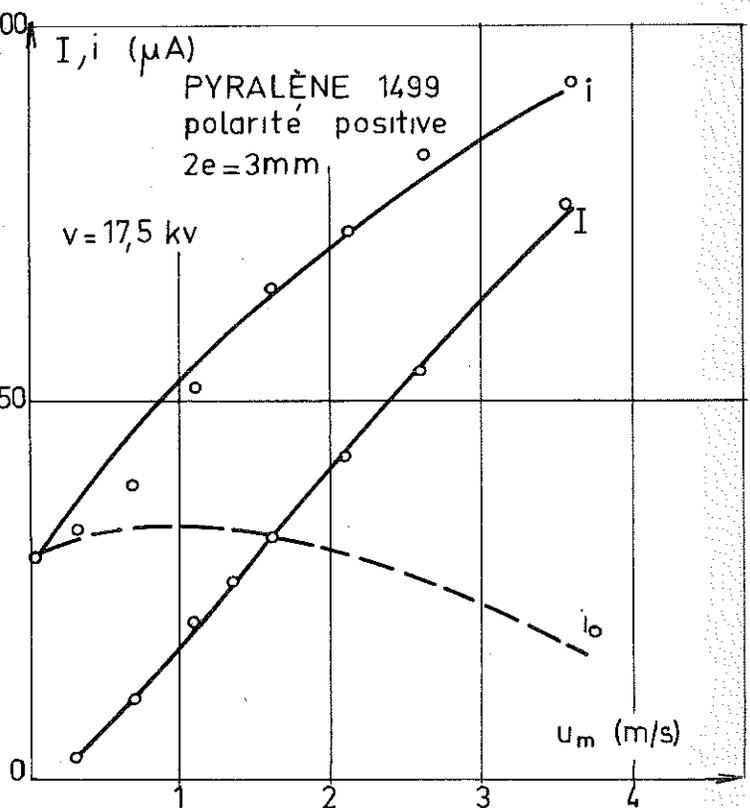
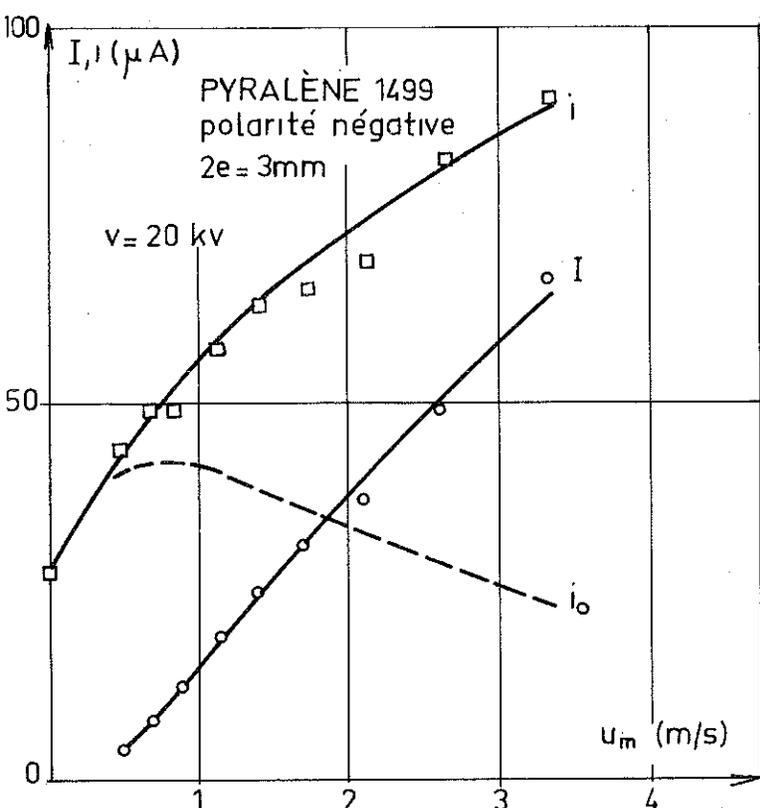


Fig. 31 : Fonctionnement d'un ioniseur : cas du Pyralène (polarité négative)

Fig. 32 : Fonctionnement d'un ioniseur : cas du Pyralène (polarité positive)

Il en est de même quand le liquide circule ; dans le cas de l'huile, les tensions maximales que l'on peut appliquer lorsque la polarité est positive sont si faibles que le palier de saturation est atteint pour de très faibles vitesses : les courants transportés sont inférieurs à  $5 \mu\text{A}$ , et toujours moindres que les courants négatifs entraînés dans les mêmes conditions ; dans le cas du Pyralène, les courants positifs sont toujours plus intenses (figure 34).

- Lorsque la polarité est négative, les courants transportés sont sensiblement dans le rapport des constantes diélectriques (figure 35) : l'excellent accord numérique est probablement fortuit, mais la similitude des courbes est remarquable. En revanche, pour la polarité opposée, les courants ne sont pas du même ordre de grandeur ; ainsi, des considérations élémentaires ne permettent pas de prévoir ce qu'il sera possible d'obtenir dans tel ou tel liquide, même quand on dispose de résultats expérimentaux concernant un liquide donné. Cependant, lorsqu'il s'agit de corps de structure chimique comparable, les courants transportés sont approximativement dans le rapport des constantes diélectriques. Ainsi avec un mélange de Pyralène 1499 et du nitrobenzène R.P., mélange de permittivité  $\epsilon \approx 9$  à  $10$ , les courants transportés augmentent environ de  $50 \%$  quelle que soit la polarité ; pour une vitesse de l'ordre de  $4,2 \text{ m/s}$ , on obtient en polarité positive :  $I \approx 150 \mu\text{A}$ . Lorsqu'on ajoute progressivement du nitrobenzène au Pyralène, ou de l'acétone à l'huile de transformateur, on observe que le courant transporté croît, quelle que soit la polarité.

- La variation des courants  $i$  et  $I$ , à vitesse constante, est représentée sur les figures 34 et 36. Remarquons que, contrairement à ce que l'on observe en l'absence de circulation, le courant total fléchit légèrement aux fortes tensions d'excitation.

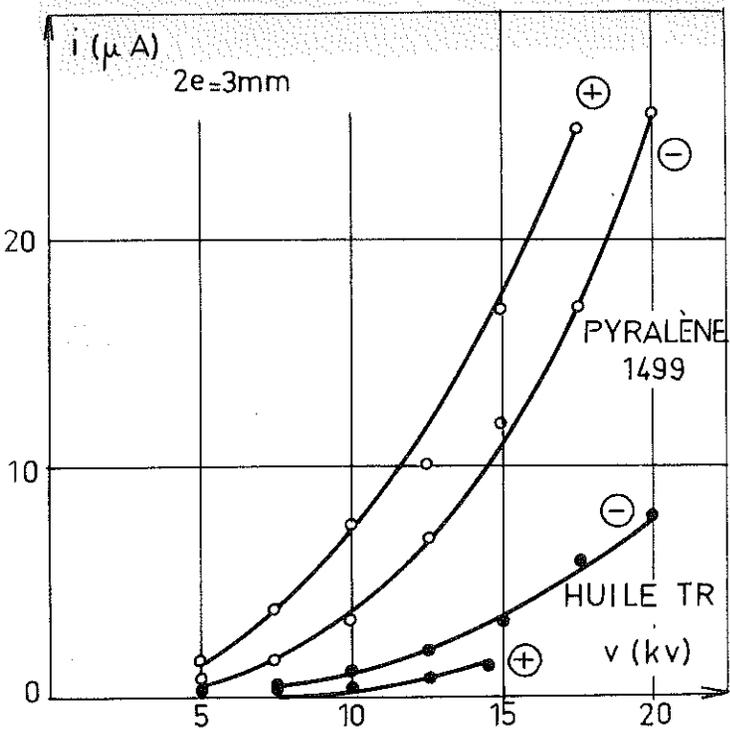


Fig. 33 : Courbes statiques courant-tension : influence de la polarité selon la nature du liquide

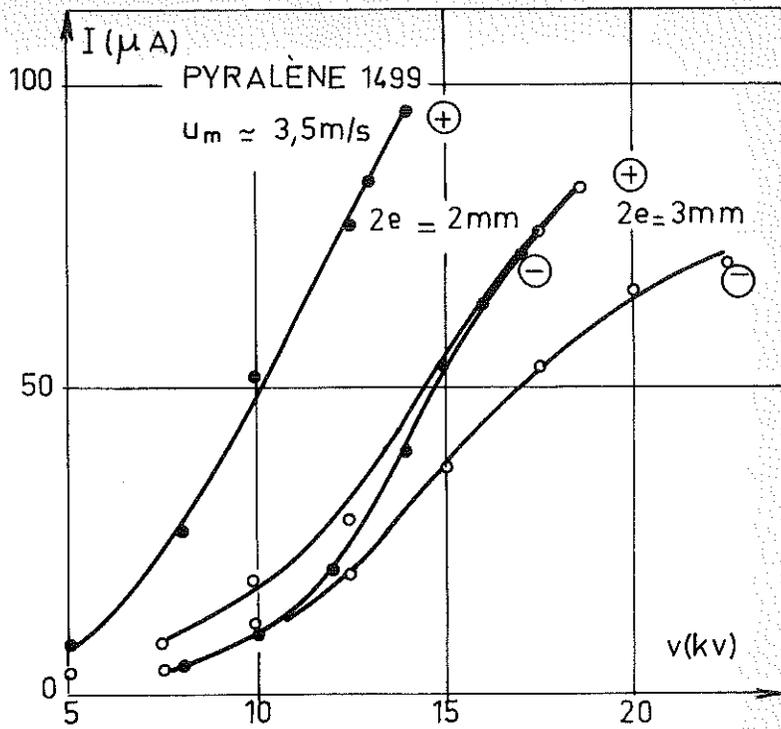


Fig. 34 : Influence de la polarité pour une vitesse constante (fils de même diamètre : 10/100)

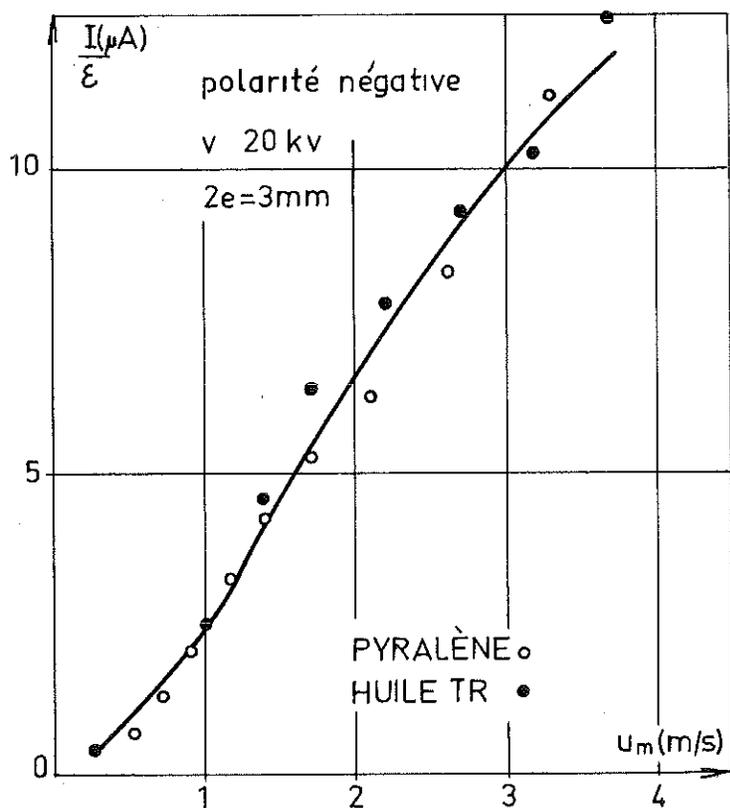


Fig. 35 : Courants négatifs rapportés à la constante diélectrique : huile ( $\epsilon = 2,2$ ) et Pyralène ( $\epsilon = 5,9$ )

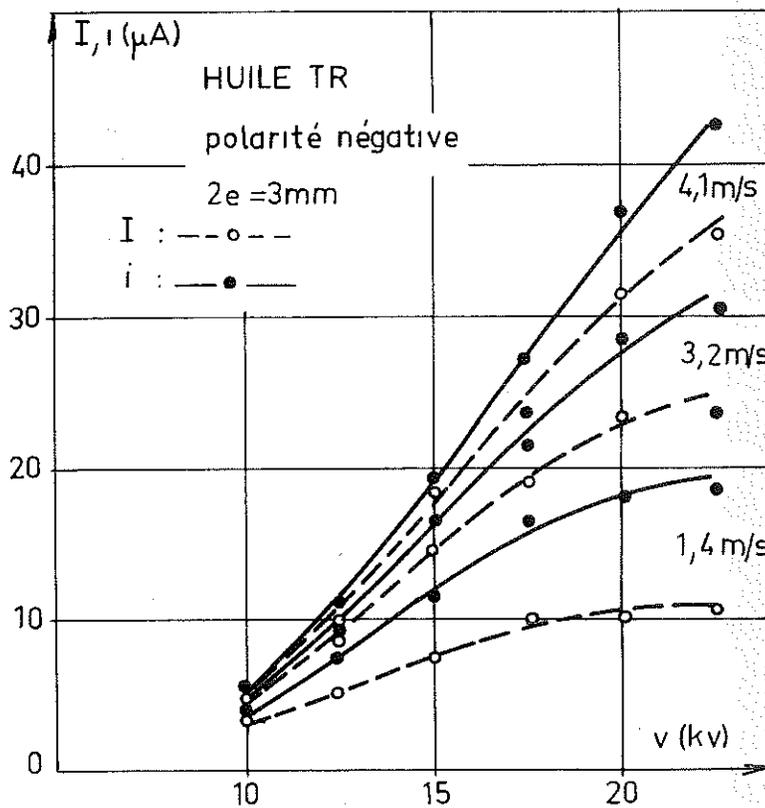


Fig. 36 : Variation du courant total  $i$  et du courant transporté  $I$ , en fonction de la tension d'excitation, pour différentes vitesses du liquide.

## 2°) Densité de charge

La densité utile de charge  $\sigma$  est déduite de l'expression :  $\sigma = \frac{I}{u_m l}$  ; aux très faibles vitesses ( $u_m < 1\text{m/s}$ ), une fraction notable des charges est captée par les plaques : la densité utile est donc assez faible ; elle est ensuite sensiblement constante puis décroît aux fortes vitesses, quand la saturation du courant apparaît (figures 37 à 39). On obtient :

- dans l'huile :  $60 < \sigma < 80$  u.e.s. et exceptionnellement 90 u.e.s. (polarité négative)
- dans le Pyralène :  $180 < \sigma < 220$  u.e.s. et exceptionnellement 250 u.e.s. (polarité positive)
- dans un mélange de Pyralène et de nitrobenzène :  $\sigma \approx 320$  u.e.s.

Le champ bilatéral correspondant :  $E = \frac{2\pi\sigma}{\epsilon}$ , demeure donc inférieur à 80 kV/cm ; ce champ est environ 3 fois plus faible que le champ normal au rotor d'une génératrice cylindrique, mais supérieur à celui des génératrices à courroie de conception récente.

## 3°) Cas des grandes vitesses (> 5 m/s)

Il convient d'élargir le domaine d'investigation afin d'étudier l'évolution de la densité de charge avec la vitesse du liquide. Au-delà de 5 m/s, la saturation du courant apparaît, même pour les plus fortes tensions d'excitation qu'il est possible d'obtenir (figure 40) ; la densité de charge décroît avec la vitesse.

Il est possible d'atteindre des vitesses plus élevées encore : avec des plaques dont l'écartement est  $2e = 5$  mm, nous

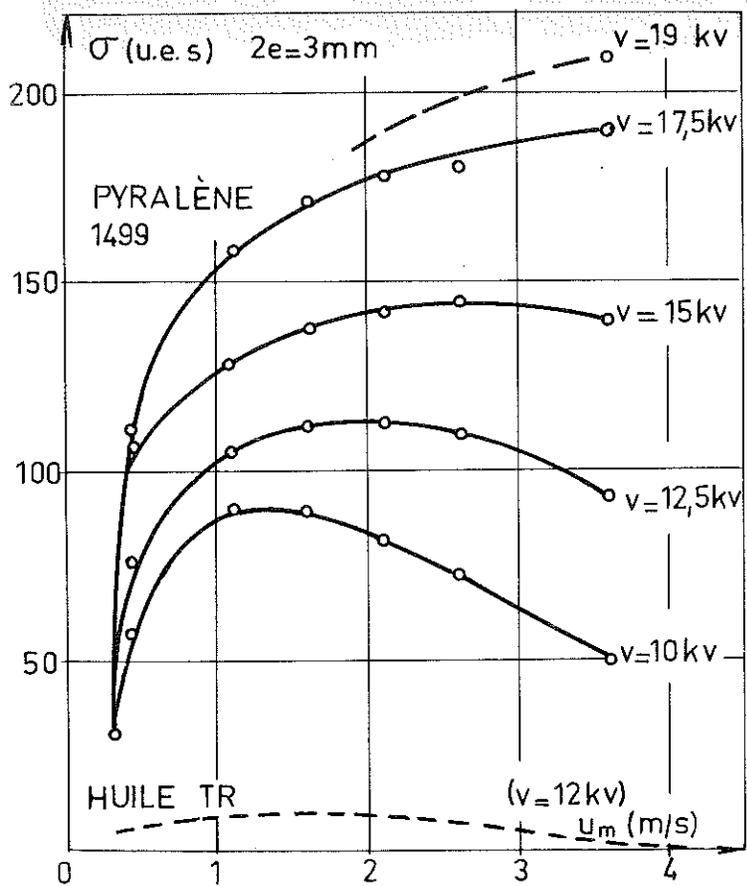


Fig. 37 : Densité de charge calculée d'après le courant transporté (polarité positive)

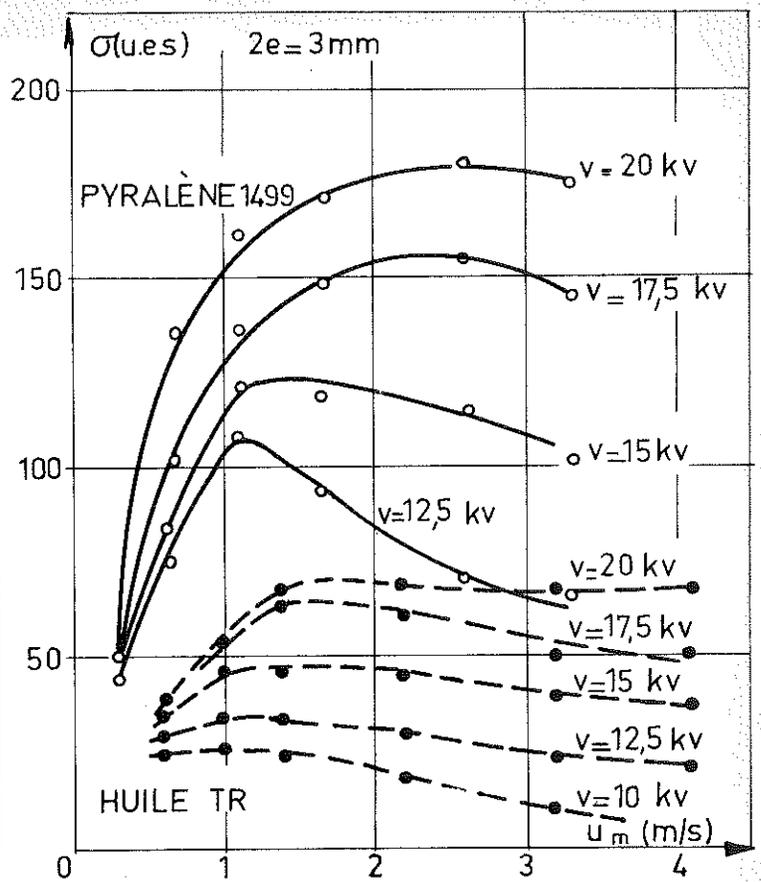


Fig. 38 : Densité de charge calculée d'après le courant transporté (polarité négative)

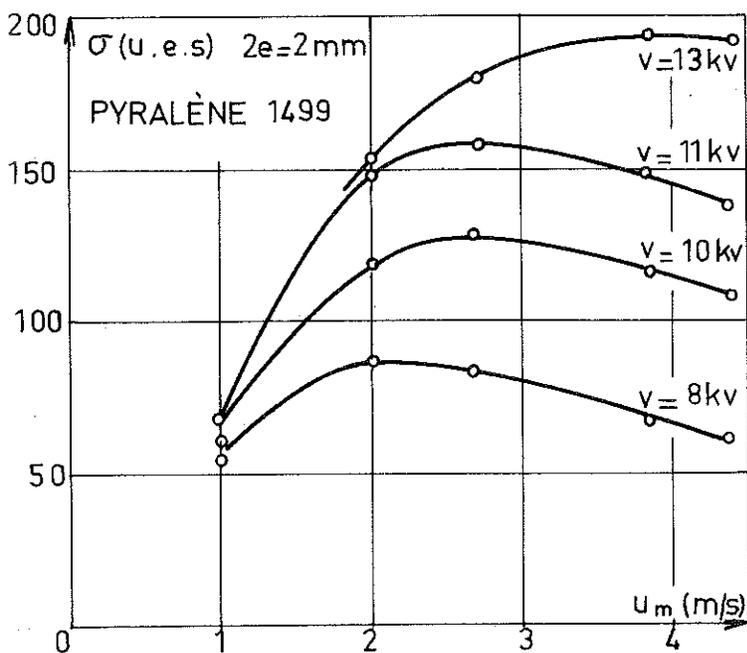


Fig. 39 : Densité de charge calculée d'après le courant transporté (polarité positive)

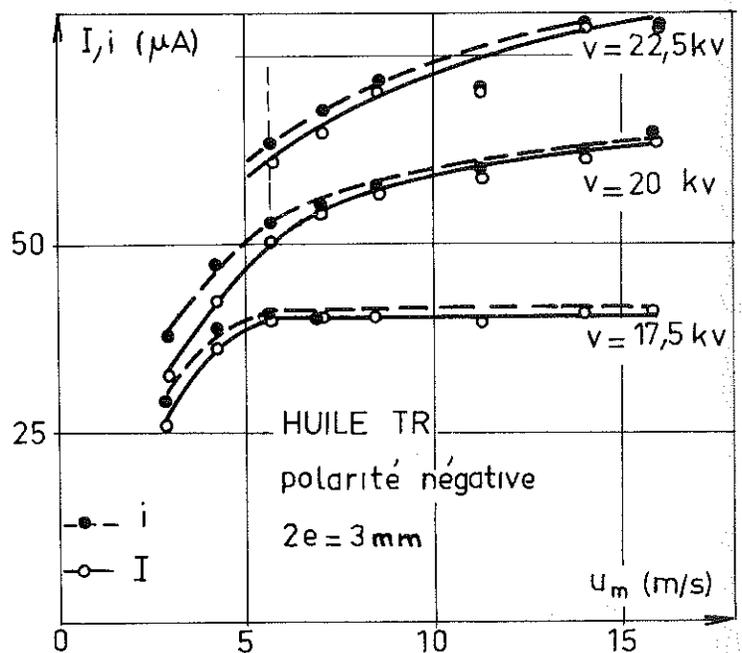


Fig. 40 : Courbes montrant le fléchissement des courants aux très grandes vitesses

avons pu réaliser des vitesses de l'ordre de 25 m/s. Il apparaît alors un phénomène nouveau : le courant transporté croît brusquement au-delà d'une certaine vitesse (figure 41) ; le "seuil" de vitesse est d'autant plus flou et d'autant moins éloigné que la tension d'excitation est plus élevée ; la densité de charge croît alors très rapidement, mais dès qu'elle atteint 80 à 90 u.e.s. il se produit des claquages au sein de la région chargée ; au-dessus de 100 u.e.s. ces claquages sont pratiquement permanents. Le courant transporté atteint exceptionnellement 320  $\mu$ A et  $\sigma \approx 110$  u.e.s.

Des considérations purement hydrauliques ne permettent pas de justifier cet accroissement brutal du courant transporté ; l'écoulement, en régime établi, est tourbillonnaire dès que  $u > 3,5$  m/s ; d'autre part, le nombre de Reynolds du fil employé, pour les vitesses comprises entre 13 et 25 m/s, vaut de 85 à 135 ; or, on observe déjà un écoulement tourbillonnaire en aval d'un corps cylindrique de révolution immergé dans un fluide dont l'écoulement est laminaire pour  $R = 30$ , et pour les valeurs précédemment indiqués, il n'apparaît pas de bouleversement dans l'écoulement (33) ; la présence du fil dans le canal perturbe certainement très peu l'écoulement. Si l'on déplace le fil dans le plan médian du canal, si l'on modifie le diamètre et le nombre de fils, l'allure du phénomène reste la même (figures 43 et 44).

Très vraisemblablement, le phénomène de cavitation est présent dans l'ioniseur ; le champ électrique est capable de l'aggraver, et il suffit sans doute de peu de choses pour qu'il y parvienne ; comme il existe toujours de l'air au sein du liquide, il peut se former des poches gazeuses, dans lesquelles l'ionisation est aisée, ce qui permet d'expliquer l'augmentation rapide du courant. Cette interprétation trouve dans une certaine mesure sa justification dans la variation sensiblement quadratique du courant avec la tension appliquée (figure 42).

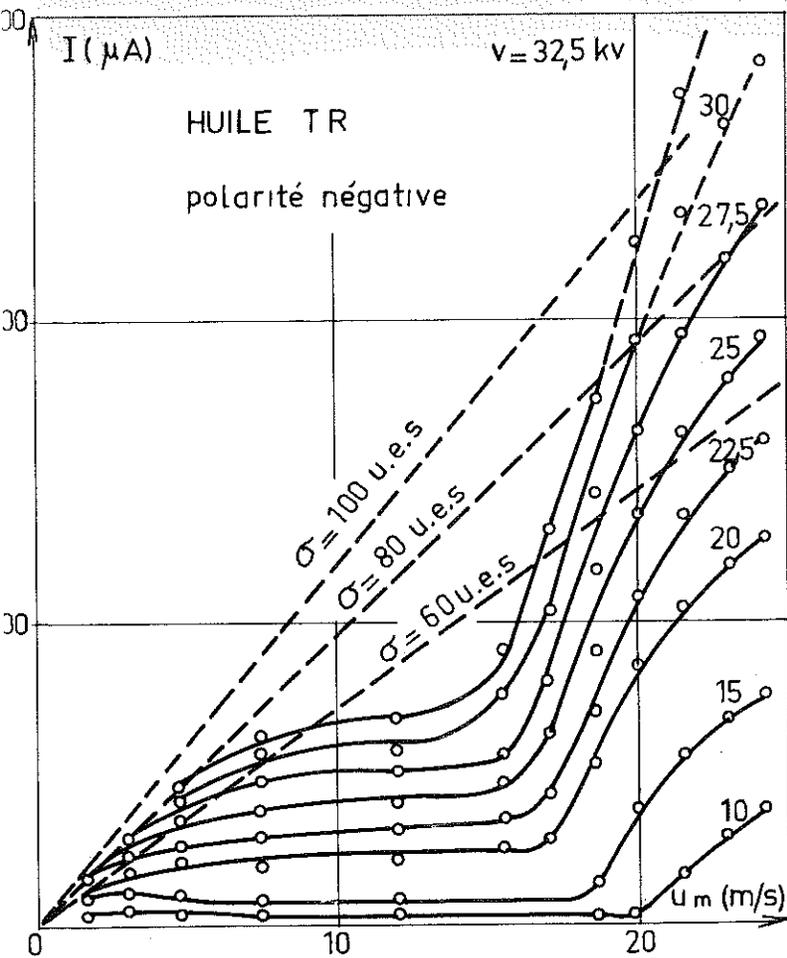


Fig. 41 : Variation du courant transporté en fonction de la vitesse moyenne du liquide : apparition d'un "seuil" aux vitesses très élevées

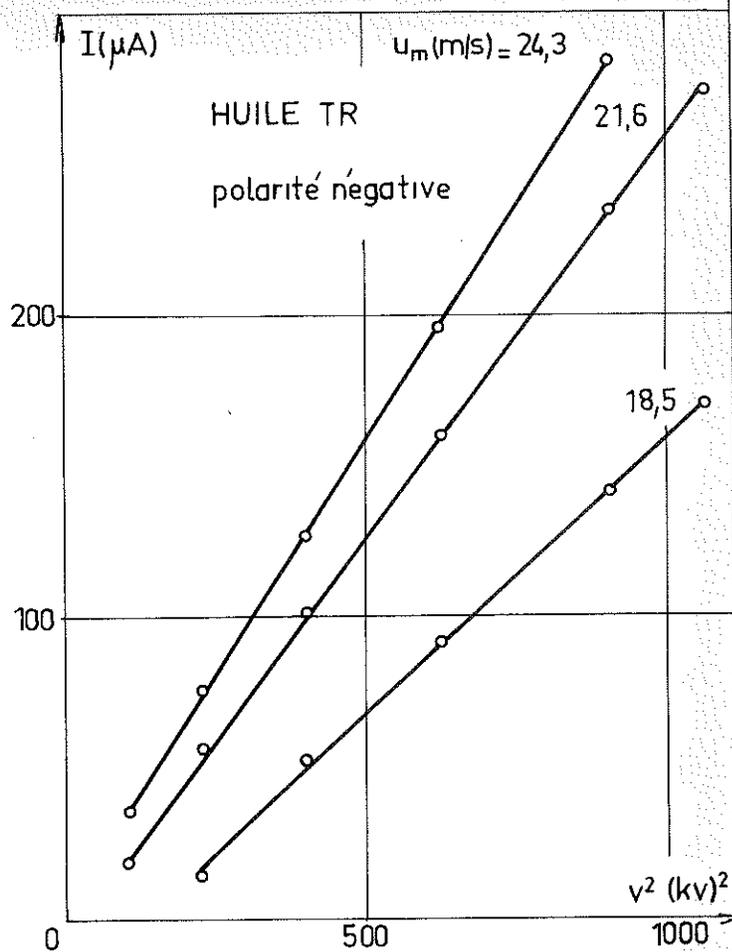


Fig. 42 : Variation du courant transporté en fonction de la tension d'excitation, au-delà du "seuil" de vitesse

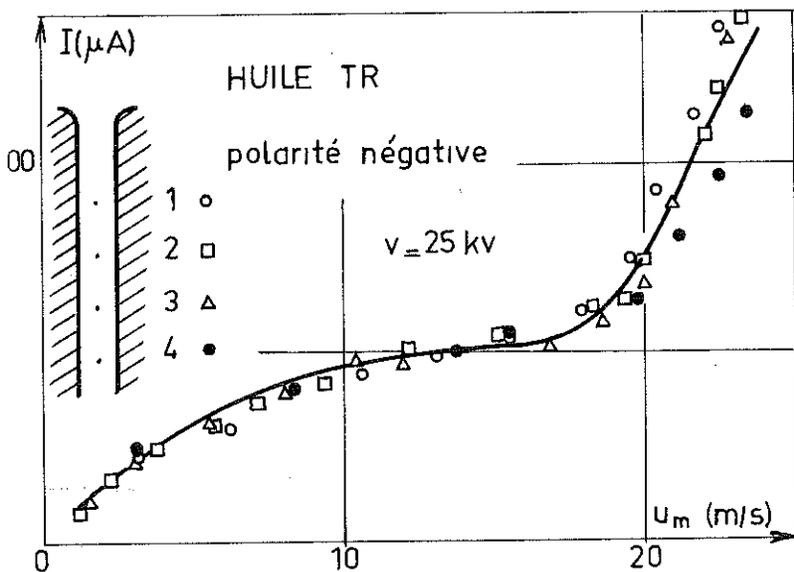


Fig. 43 : Persistance du "seuil" de vitesse quand varie la position du fil par rapport aux plaques

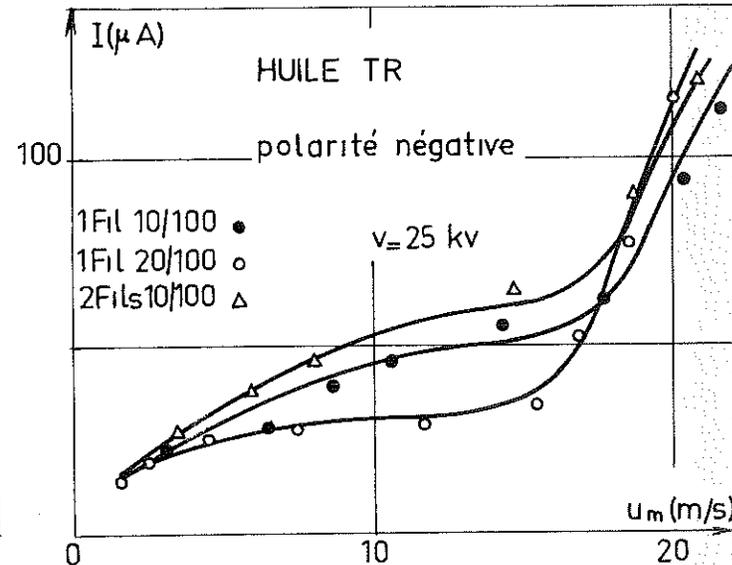


Fig. 44 : Persistance du "seuil" quand varient le diamètre et le nombre de fils

Donc, si l'on ne tient pas compte des phénomènes d'ionisation gazeuse, la densité de charge décroît aux très grandes vitesses, quelle que soit la géométrie de l'ioniseur (figure 45).

Dans le cas du Pyralène, l'étude des grandes vitesses n'a pu être faite que très sommairement, le montage à fort débit ne pouvant recevoir de circuit d'épuration à sa mesure. On observe également un fléchissement du courant transporté aux grandes vitesses, moins prononcé cependant que dans l'huile :

$$I \approx 200 \mu\text{A} \quad , \quad u \approx 9,5 \text{ m/s} \quad , \quad \sigma \approx 175 \text{ u.e.s.}$$

$$I \approx 330 \mu\text{A} \quad , \quad u \approx 15,5 \text{ m/s} \quad , \quad \sigma \approx 180 \text{ u.e.s.} \quad (\text{même réserve que}$$

$$I \approx 500 \mu\text{A} \quad , \quad u \approx 20 \text{ m/s} \quad , \quad \sigma \approx 210 \text{ u.e.s.}$$

précédemment, concernant les phénomènes d'ionisation gazeuse).

#### 4°) Influence de la géométrie de l'ioniseur

- Pour un fil de rayon donné ( $r_0$ ), à champ moyen égal appliqué à l'ioniseur ( $E_m \approx \frac{V}{e}$ ), le courant transporté est d'autant plus élevé que la distance fil-plans ( $e$ ) est plus grande (figure 46) ; c'est une vérification de la condition :  $r_0 \ll e$  donnée au Ch. I. Lorsque la distance  $e$  est petite, le claquage entre fil et plans intervient moins rapidement ; on peut atteindre des champs moyens plus grands, et finalement obtenir des densités de charge supérieures. De même, pour une distance donnée  $e$ , plus le fil est fin, plus la densité de charge est grande ; pour du Pyralène par exemple, avec  $e = 2 \text{ mm}$ , les courants maxima valent près du double quand le diamètre du fil passe de 25/100 mm à 8/100 mm.

- Si  $h$  désigne la hauteur active des plaques en aval du fil (figure 25, 2), nous avons déterminé expérimentalement que les courants transportés les plus intenses étaient obtenus

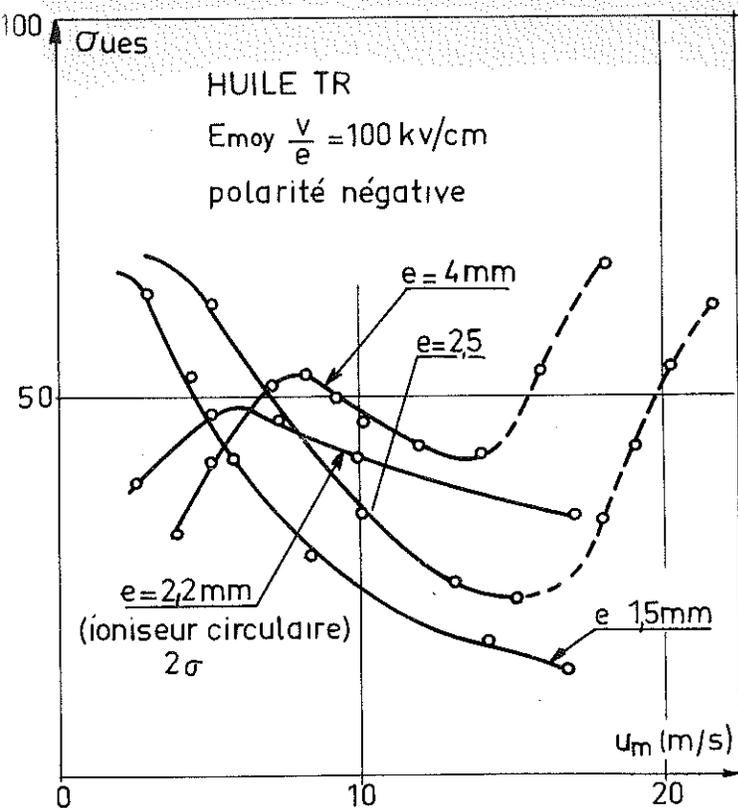


Fig 45 : Variation de la densité de charge en fonction de la vitesse pour différentes géométries d'ioniseur

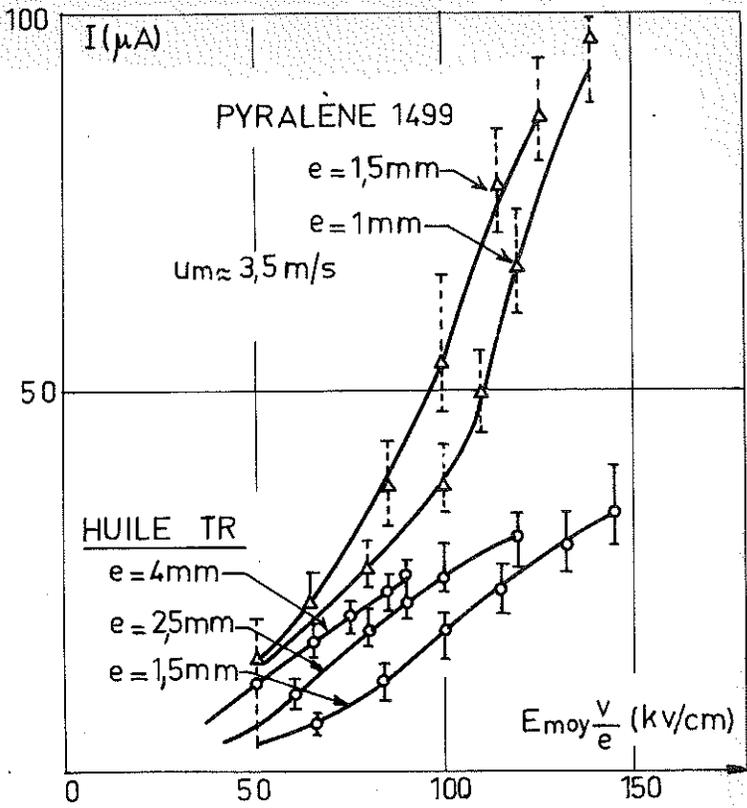


Fig. 46 : Influence de l'écartement des électrodes pour un même diamètre du fil (10/100 mm) ; cas de l'huile (polarité négative) et du Pyralène (polarité positive).

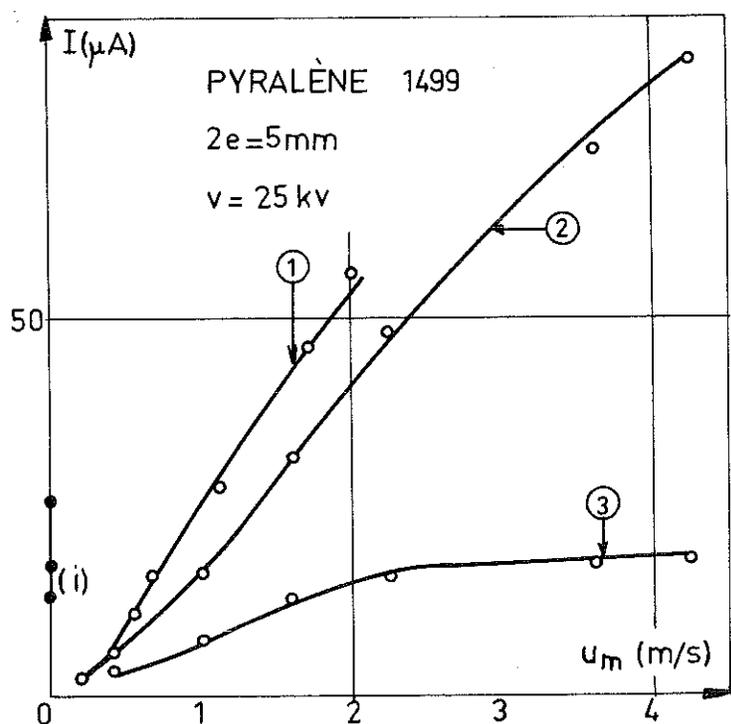
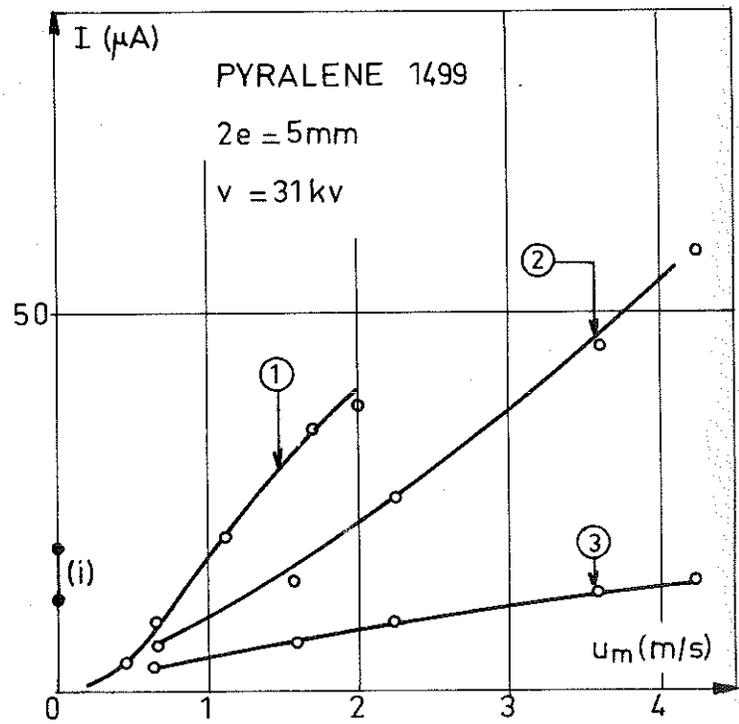
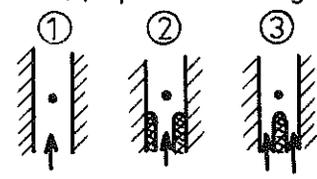


Fig. 47 : d) polarité positive



b) polarité négative

- 1- le liquide balaye tout l'ioniseur
- 2- le jet liquide est dirigé sur le fil
- 3- le jet liquide est dirigé sur les plaques



dès que :  $h \geq 4e$  ; cette relation approximative peut se justifier par des considérations simples sur le flux du champ électrique dans l'ioniseur et sur la densité de charge spatiale, qui dépend de l'angle  $\alpha$  ( $\text{tg } \alpha = \frac{h}{e}$ ) : au-delà d'une certaine hauteur, leur variation doit devenir très faible. Les ioniseurs utilisés sont dessinés de manière à respecter la condition précédente ; d'autre part, la hauteur  $h'$  des plaques en amont du fil a été choisie égale à  $4e$ .

#### 5°) Remarques sur le fonctionnement de l'ioniseur

##### a) Nécessité d'obtenir la vitesse maximale sur l'électrode ionisante

Lorsque le jet de liquide est dirigé sur les plaques, le courant total n'augmente pratiquement pas : on ne provoque qu'une simple déviation du courant. Au contraire, quand le jet est dirigé sur le fil, il y a création de charges nouvelles : le courant total est multiplié par un facteur 3 à 5 selon la vitesse (figure 47).

##### b) Répartition de la densité de courant capté par les plaques

Si l'entraînement des charges s'effectue selon une bande étroite, en aval du fil le liquide est soumis à un champ uniforme  $E$  ; le liquide n'étant pas parfaitement isolant, il existe un courant de conduction dont la densité est  $j = \frac{E}{\rho} = \text{constante}$ . Nous avons fractionné les plaques en éléments isolés et mesuré les courants captés par chaque élément ; on constate que les courants partiels croissent un peu lorsqu'on s'éloigne du fil : l'entraînement n'est pas parfait ; cependant les courants mesurés sont sensiblement en accord avec les valeurs calculées ; en revanche, on

recueille sur les derniers éléments des courants anormalement élevés, alors que la lame chargée ne devrait pas avoir sensiblement divergé. Cet accroissement local du courant de conduction est dû par conséquent à une augmentation du champ électrique ; si le champ est plus intense, la résistivité est plus faible d'une part, et la lame chargée peut diverger plus rapidement d'autre part : ceci permet de justifier cet accroissement de la densité de courant, et on voit qu'il est nécessaire de doter l'extrémité des plaques d'arrondis importants.

c) Possibilité de transfert de charges à grande distance du fil

Supposons que :  $u_m \approx 4$  m/s,  $E \approx 70$  kV/cm,  $k \approx 10^{-4}$  cm/s/V/cm,  $2e = 2$  mm ; les porteurs devraient atteindre les parois conductrices pour  $h \approx 6$  cm ; au-delà de cette valeur, on ne devrait recueillir aucun courant sur le collecteur ; or, pour  $h = 10$  cm, une proportion considérable de charges est entraînée hors de l'ioniseur (figure 48) : ceci suggère que les porteurs ne se déchargent pas instantanément au contact du métal ; cette cinétique lente de décharge favorise le transfert de charges à grande distance. Lorsque la vitesse est supérieure à 1 m/s, le courant transporté vaut sensiblement les  $\frac{2}{3}$  du courant que l'on obtient avec des plaques courtes ( $h \approx 5$  mm), ce qui est remarquable (figure 49).

d) Efficacité du système de charge

Nous avons indiqué au Ch. I, § III, 4° qu'il ne serait pas possible de parler de rendement en densité comme on le fait dans le cas des gaz, puisque la rigidité des liquides n'est pas spécifique. En revanche, on peut avoir une idée de l'efficacité du système de charge et des possibilités d'injection de porteurs

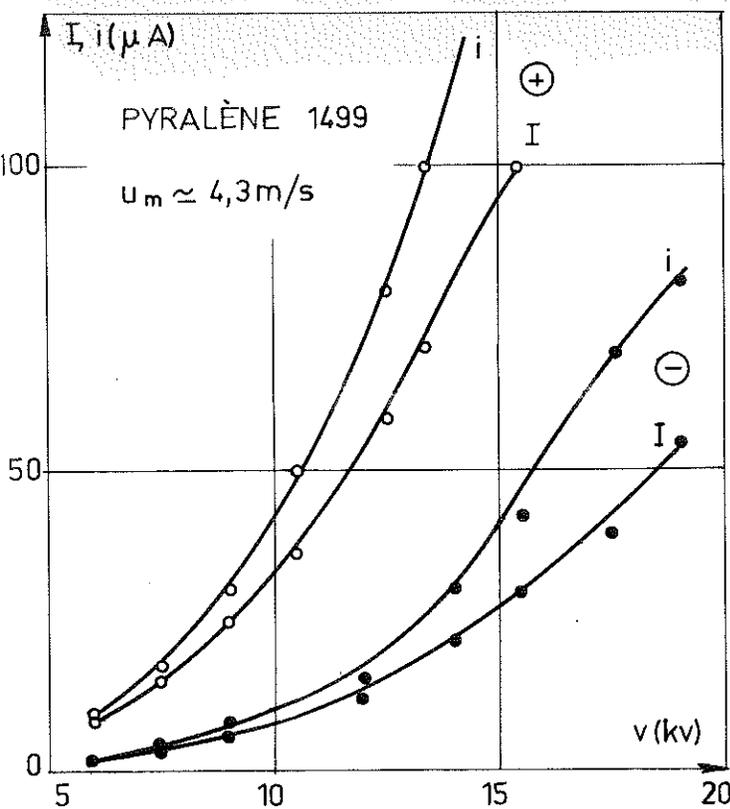


Fig. 48 : Transfert de charges dans le cas de plaques de hauteur 100 mm, d'écartement 2 mm (fil : 10/100 mm)

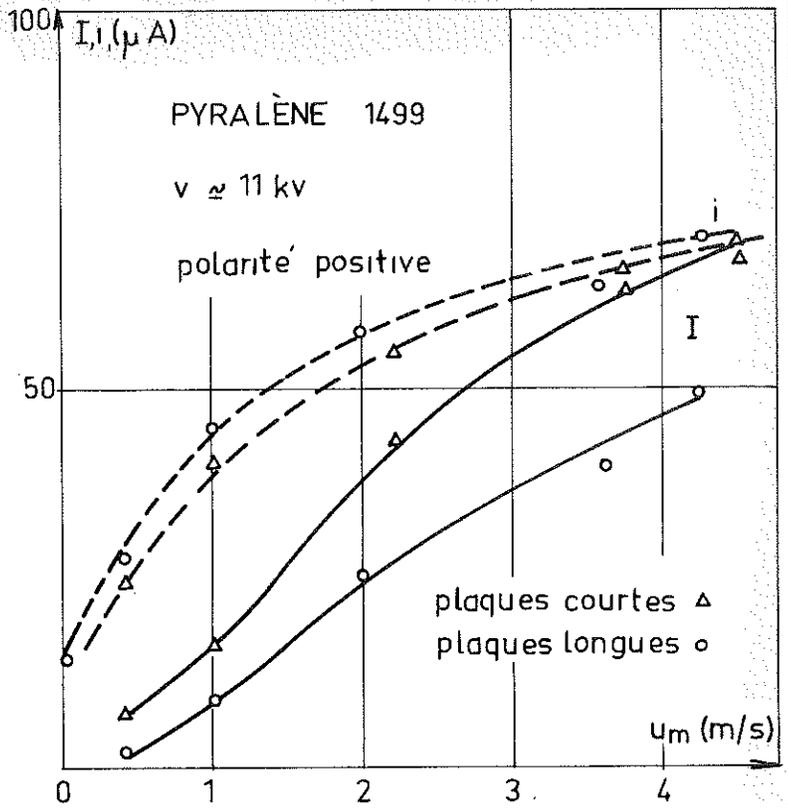


Fig. 49 : Transfert de charges dans le cas de plaques de hauteur utile 100 mm et 5 mm

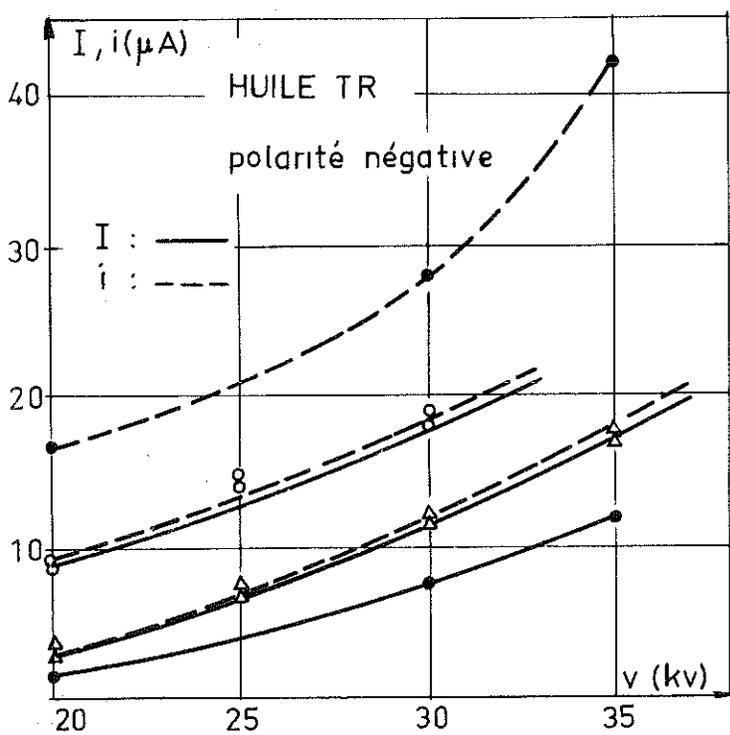


Fig. 50 : Influence de la pureté du liquide  $\rho = 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  (■) ;  $\rho = 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  (○) ;  $\rho = 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$  (Δ)

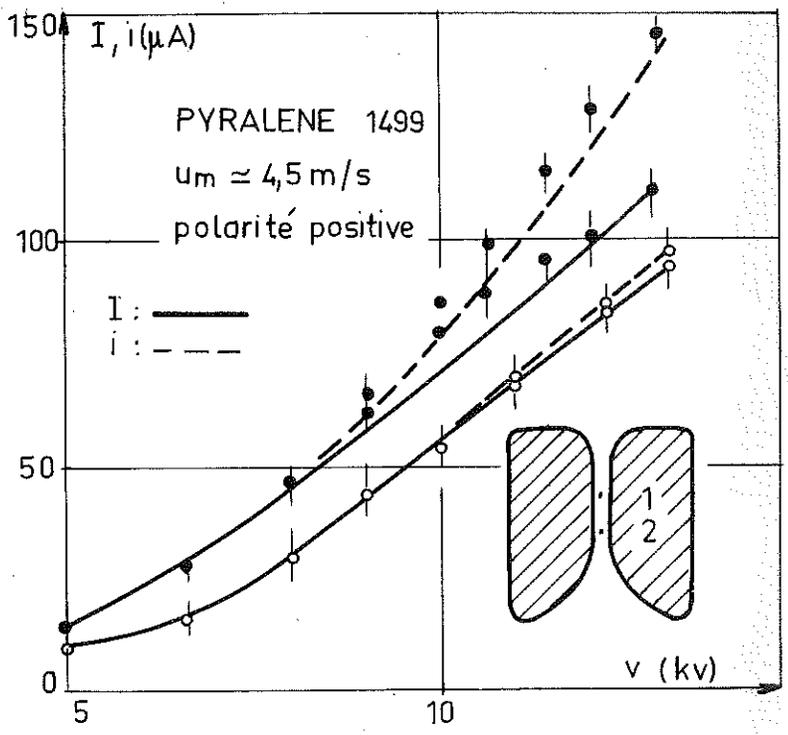


Fig. 51 : Variation des courants I et i dans le cas où seul fonctionne le fil 1 (○) et dans le cas où fonctionnent 1 et 2 (■)

au sein d'un liquide particulier, en considérant le rapport :

$$\gamma = \frac{E}{E_m} \quad ; \quad E : \text{champ calculé d'après le courant transporté.}$$

$$E_m \approx \frac{V}{e}, \text{ champ moyen appliqué à l'ioniseur}$$

On obtient par exemple :

- pour l'huile de transformateur,  $u_m \approx 4,1 \text{ m/s}$ ,  $2e = 3 \text{ mm}$ , fil :  $0,1 \text{ mm}$

	Polarité négative					Polarité positive
$E \text{ (kV/cm)}$	5,1	10,2	34	60	67	5,5
$E_m \text{ (kV/cm)}$	50	66,5	100	133,5	150	90
$\gamma = \frac{E}{E_m}$	0,1	0,15	0,34	0,45	0,45	0,06

- pour le Pyralène 1499,  $u_m \approx 4,5 \text{ m/s}$ ,  $2e = 2 \text{ mm}$ , fil :  $0,1 \text{ mm}$

	Polarité positive				Polarité négative			
$E \text{ (kV/cm)}$	19,5	37,5	54,5	61	2,9	7,8	13,6	35,5
$E_m \text{ (kV/cm)}$	80	100	120	130	80	100	120	160
$\gamma = \frac{E}{E_m}$	0,24	0,375	0,45	0,47	0,036	0,078	0,113	0,22

On peut également juger de la qualité d'un ioniseur et du fluide employé, en calculant le rendement en courant  $\eta = \frac{I}{I_0}$  ; on obtient :

tillons d'huile différents, on observe des écarts importants dans les résultats (pouvant dépasser 30 %). Il semble donc qu'il existe une résistivité optimale pour l'injection de porteurs au sein de corps non polaires : GAVIS (17) obtient un résultat analogue, dans le cas plus particulier où le liquide est chargé par frottement.

### 7°) Les limitations

Aux fortes tensions d'excitation, des claquages se produisent au sein du liquide, soit entre fil et plaques, soit entre la région chargée et les plaques, et c'est le cas le plus fréquent lorsque la densité de charge est élevée ; l'observation visuelle montre que ces claquages ont lieu à la sortie de l'ioniseur, au voisinage de l'extrémité des plaques. En aval de l'ioniseur en effet, les lignes de force qui partent de la région chargée ne peuvent se refermer sur les parois isolantes et se concentrent dans le liquide : le champ disruptif peut être atteint ; les claquages se produisent d'autre part plus aisément dans cette zone car l'écoulement est perturbé. La présence du fil augmente la turbulence et accroît les risques d'étincelle entre fil et plaques ; si la surface du fil paraît peu affectée par les claquages, il se forme en revanche sur les plaques des cratères dont le diamètre varie de 10 à 50  $\mu$ . Les claquages entraînent quelquefois la rupture du fil que l'on protège efficacement en plaçant une résistance de quelques centaines de  $M\Omega$  côté plaques.

La présence de bulles de gaz au sein du liquide accroît les risques de claquage ; même après un dégazage énergétique, il doit subsister de toutes petites bulles qu'il est pratiquement impossible d'éliminer. Dans certaines conditions d'ailleurs, ce sont des bulles chargées que le liquide entraîne et on obtient des courants intenses avec de faibles tensions d'excitation ; ainsi, dans du Pyralène,

pour  $2e = 2 \text{ mm}$ , et  $v = 5 \text{ kV}$ , le courant transporté peut passer de  $8 \text{ } \mu\text{A}$  à  $60 \text{ } \mu\text{A}$  : ceci vient encore à l'appui de ce qui a été dit au sujet des phénomènes d'ionisation gazeuse dans le cas des très grandes vitesses.

#### 8°) Dispersion des résultats

Les résultats ne sont pas reproductibles malgré les précautions prises : la dispersion peut atteindre 30 %. L'exemple suivant en témoigne : si on laisse fonctionner un ioniseur pendant plusieurs heures, la densité de charge peut varier entre 60 et 88 u.e.s. ; des claquages se produisent parfois pour des champs calculés voisins de  $60 \text{ kV/cm}$  alors qu'ils n'ont pas lieu pour des valeurs de l'ordre de  $80 \text{ kV/cm}$ .

Aussi conviendra-t-il de retenir surtout l'aspect qualitatif des phénomènes et de tenir compte seulement de l'ordre de grandeur des résultats quantitatifs.

#### 9°) Conclusion : obtention de courants intenses

La vitesse optimum de fonctionnement se situe aux environs de 4 à 5 m/s ; du fil de diamètre inférieur à  $8/100$  ou  $10/100$  de mm se révèle trop fragile, et la distance fil-plans ne peut guère être inférieure à 1 mm ; on peut augmenter de 15 à 20 % le courant transporté en utilisant 2 fils ioniseurs (figure 51), mais l'ioniseur fonctionne moins bien (le rendement en courant  $n$  est plus faible). Pour obtenir des courants intenses, il faut augmenter la longueur  $l$  de l'électrode ionisante, donc réduire  $e$  en respectant la condition :  $r_0 \ll e$  ; si les problèmes de centrage ne sont pas trop ardu, l'interstice peut alors être abaissé à quelques dixièmes de millimètres, et si les densités de charge per-

mises demeurent les mêmes, on devrait pouvoir gagner un facteur 2 ou 3 sur les courants transportés ; d'autre part, les distances de transfert et les tensions d'excitation nécessaires seraient plus faibles, ce qui constitue deux avantages supplémentaires. Remarquons enfin que l'on peut placer dans le circuit plusieurs ioniseurs et accroître ainsi le courant transporté.

## B/ ETUDE DU FONCTIONNEMENT SOUS TENSION

Cette étude a pour but de mettre l'accent sur les difficultés qui surgissent lorsque le transfert de charges s'effectue à l'intérieur d'un isolant, et lorsque croît le potentiel du collecteur. Dans le cas du fonctionnement en générateur, le collecteur devra être d'autant plus éloigné de l'ioniseur que les tensions de débit seront élevées.

### I/ INFLUENCE DE LA DISTANCE IONISEUR-COLLECTEUR =====

#### 1°) Fonctionnement en court-circuit

La vitesse du liquide est sensiblement la même dans l'ioniseur et entre l'ioniseur et le collecteur ;  $\delta$  désigne la distance qui sépare ces deux organes. La haute tension d'excitation est appliquée à l'électrode à grand rayon de courbure. Nous avons utilisé pour cette étude, outre des ioniseurs fil-plans, un ioniseur circulaire schématisé figure 25, 5, dont l'électrode acérée est commodément accessible (cette électrode est constituée par une multitude de pointes fines, que l'on obtient en pratiquant à l'emporte-pièce un trou dans du grillage à mailles très serrées).

Quel que soit le type d'ioniseur et le liquide utilisé, lorsque  $\delta$  croît :

- le courant transporté  $I$  et le courant total  $i$  décroissent d'autant plus que la densité de charge est plus grande

- le courant  $i_0$  augmente (figures 52 et 53)

Quand  $\delta > 2$  cm, il apparaît dans l'huile, à la sortie de l'ioniseur et quelquefois au voisinage du collecteur, des aigrettes lumineuses permanentes ; de temps à autre, se produisent de violents claquages entre collecteur et ioniseur. Au-delà de 4 à 5 cm, les courants deviennent très instables et pour les fortes tensions d'excitation, les amorçages ont lieu de façon pratiquement permanente. Des rampages se produisent à la surface des isolants et le résultat final est quelquefois un court-circuit entre l'ioniseur et le collecteur. S'il existe des joints d'étanchéité entre ces deux organes, il se produit des décharges dans l'air à leur voisinage, d'où une perte de courant supplémentaire.

On n'observe pas de tels phénomènes avec le Pyralène, plus conducteur ; si le collecteur est trop éloigné, aucun courant ne parvient plus jusqu'à lui.

La nécessité d'une vitesse élevée entre collecteur et ioniseur apparaît sur la figure 53 ; à partir d'une certaine valeur de la tension d'excitation, le courant transporté n'augmente plus.

Nous avons montré précédemment, qu'entre limites isolantes les lignes de force du champ devaient se concentrer dans le liquide à la sortie de l'ioniseur ; il doit donc exister de très grands gradients de potentiel : nous avons en effet relevé à l'aide de sondes, des tensions de l'ordre de 100 kV à quelques millimètres de l'ioniseur.

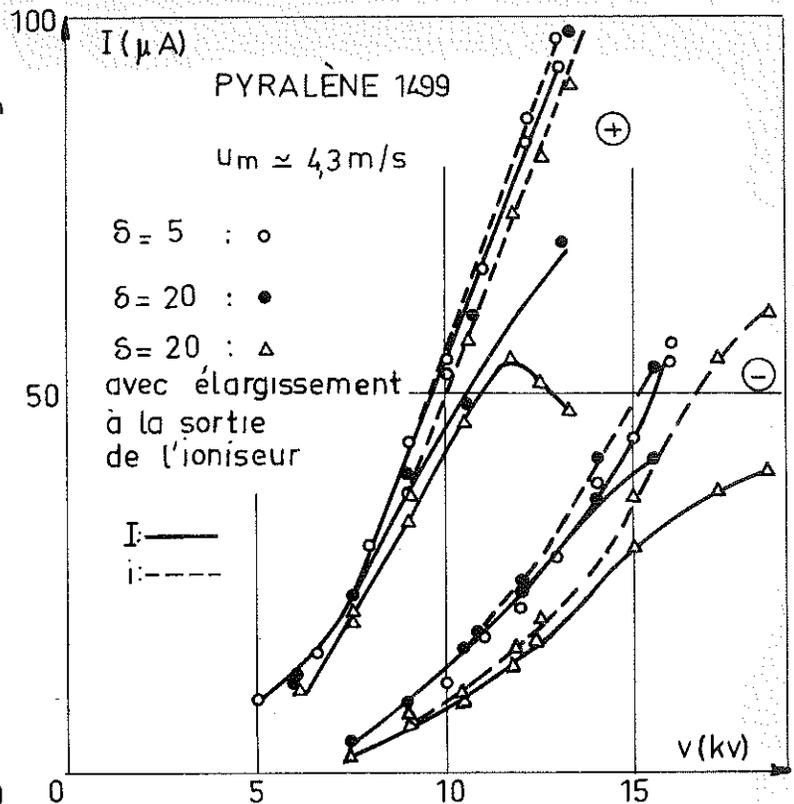
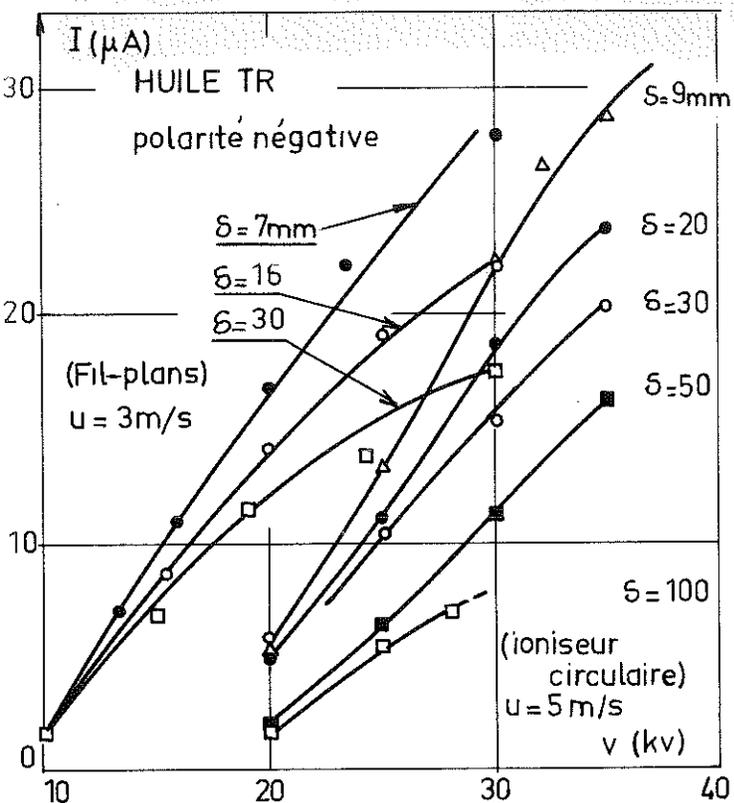


Fig. 52 : Influence de la distance ioniseur-collecteur pour deux géométries différentes

Fig. 53 : Ioniseur fil-plans : influence de la distance plaques-collecteur ; influence de la diminution de la vitesse due à un élargissement brusque en aval de l'ioniseur

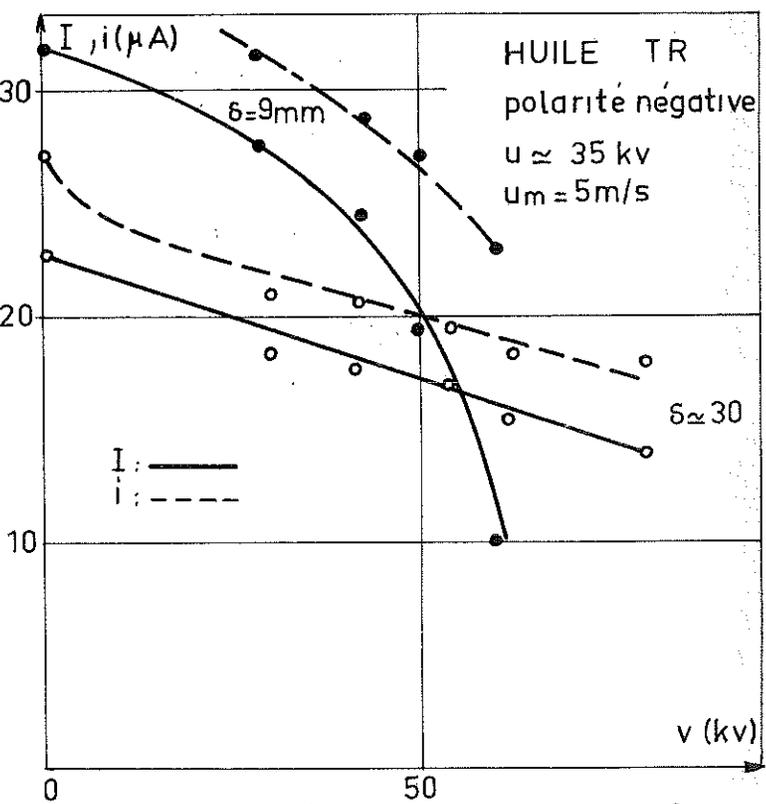
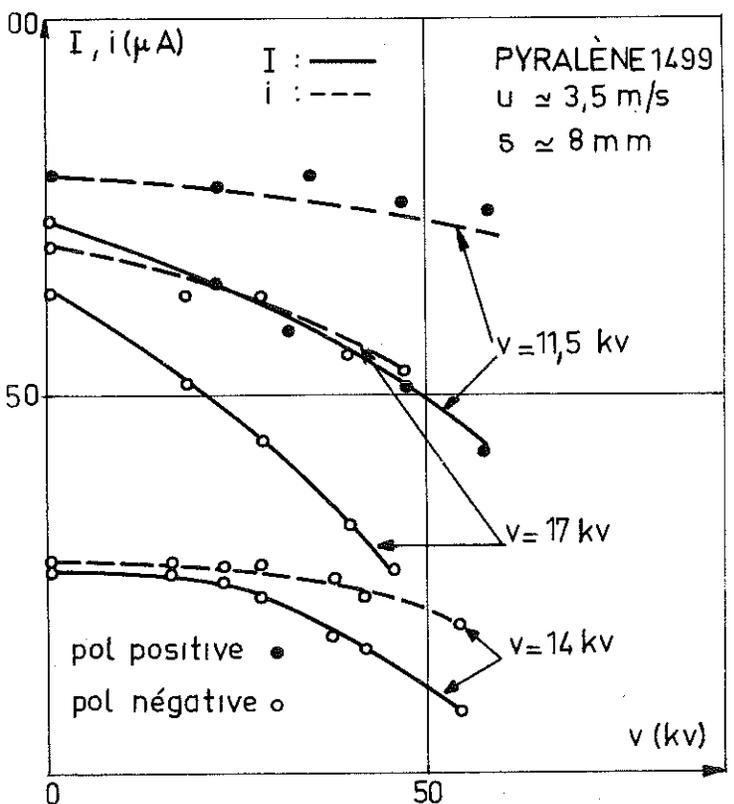


Fig. 54 : Variation du courant débité I et du courant total i en fonction de la tension du collecteur V

Fig. 55 : Fonctionnement sous tension : influence de la distance ioniseur-collecteur

## 2°) Fonctionnement sous tension

Pour les faibles distances  $\delta$ , on observe une forte réaction de la tension de débit  $V$  sur le courant  $I$  (figures 54 et 55) ; on ne peut dépasser 50 à 60 kV sinon, il se produit de violents claquages entre ioniseur et collecteur. Le champ moyen antagoniste :  $\epsilon_m = \frac{V}{\delta}$  n'excède pas 100 kV/cm et ne peut être invoqué pour expliquer pareil recul du courant devant la tension ; en effet,  $k \epsilon_m \approx 10 \text{ cm/s} \ll u_m$ .

Si l'on accroît la distance  $\delta$ , le courant de court-circuit est bien plus faible, mais d'une part on peut atteindre des tensions de débit plus grandes, d'autre part le recul du courant lorsque la tension croît est moins prononcé (figure 55). Dans le cas de l'huile, il y a cependant de petits amorçages permanents à la sortie de l'ioniseur.

Nous avons pu atteindre exceptionnellement :

- avec de l'huile :  $V = 100 \text{ kV}$ ,  $I \approx 20 \text{ } \mu\text{A}$  (polarité négative  
 $\delta \approx 20 \text{ mm}$ )
- avec du Pyralène :  $\begin{cases} V = 60 \text{ kV}, I \approx 70 \text{ } \mu\text{A} & \text{(polarité positive)} \\ V = 50 \text{ kV}, I \approx 80 \text{ } \mu\text{A} & \delta \approx 8 \text{ mm} \end{cases}$

## II/ TENTATIVE DE CONTROLE DU POTENTIEL ENTRE IONISEUR ET COLLECTEUR =====

Pour améliorer le fonctionnement sous tension, on peut envisager de contrôler le potentiel au sein du liquide à l'aide d'un dispositif de polarisation approprié ; en prélevant une fraction du courant débité, il semble qu'à l'aide d'un diviseur de tension, on puisse imposer des potentiels croissants de l'ioniseur au collecteur (figure 56). Nous avons placé des grilles, des anneaux ou des lames au sein du liquide ; tous ces dispositifs

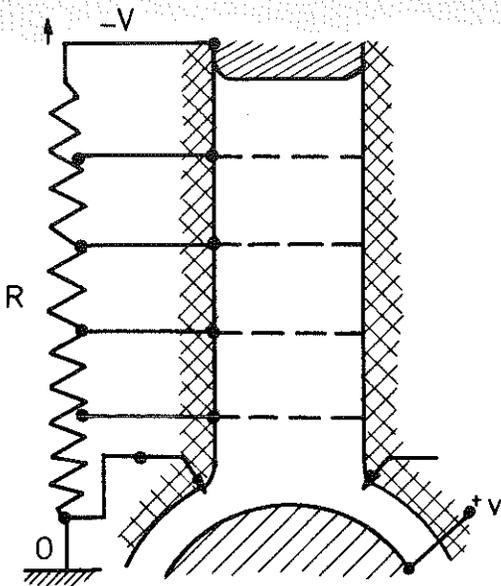


Fig. 56 : Dispositif de contrôle discontinu du potentiel

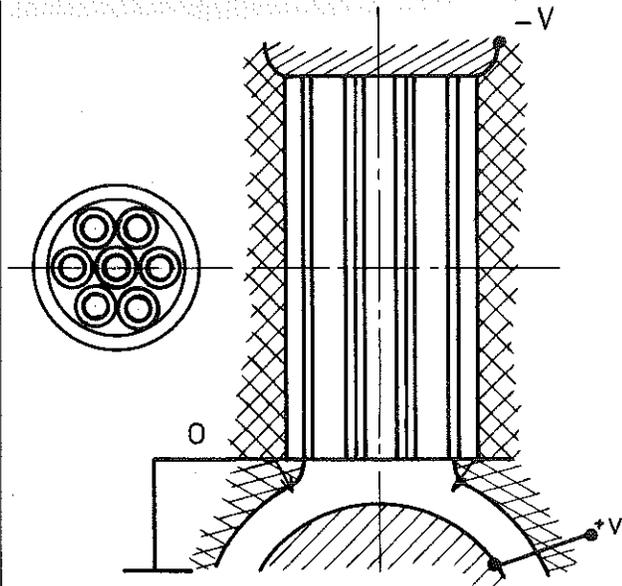


Fig. 57 : Dispositif de contrôle continu du potentiel

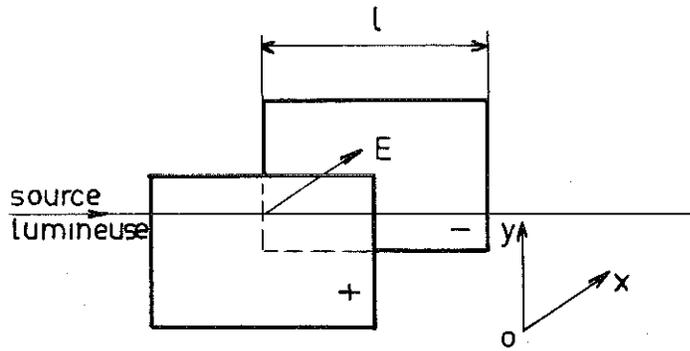


Fig. 58 : Système de coordonnées et disposition du condensateur à liquide

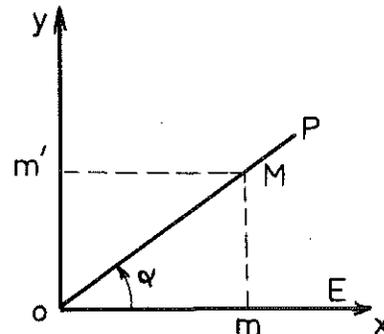


Fig. 59 : Vibration rectiligne OM fournie par le polariseur P

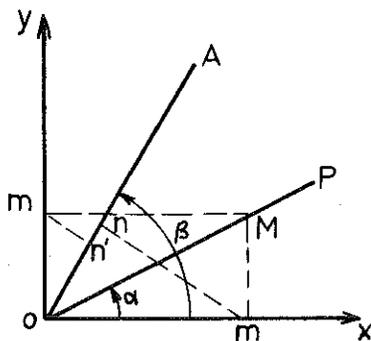


Fig. 60 : Détermination des composantes de la vibration transmise par l'analyseur A

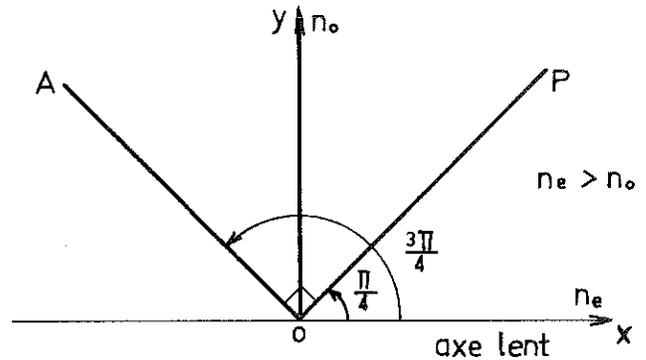


Fig. 61 : Analyseur et polariseur sont croisés ( $\alpha - \beta = \frac{\pi}{2}$ ); le phénomène a sa visibilité maximale ( $\alpha = \frac{\pi}{4}$ ;  $\beta = \frac{3\pi}{4}$ )

captent des charges, et il est pratiquement impossible d'ajuster convenablement les résistances de polarisation. De plus, des claquages se produisent entre l'ioniseur et le premier élément du système de polarisation, et quelquefois entre les divers éléments eux-mêmes.

Un système de polarisation continu paraît préférable au système de contrôle discontinu ; il devrait permettre de contrôler le potentiel immédiatement en aval de l'ioniseur. La difficulté consiste à trouver un matériau peu conducteur de résistivité définie comprise entre  $10^{11}$  et  $10^{12}$   $\Omega \cdot \text{cm}$ , et inerte vis-à-vis du liquide utilisé. Certains verres répondent à ces conditions.

L'expérience montre qu'il ne suffit pas d'utiliser comme tube de transfert un simple tube de verre ; en effet, les amorçages persistent au sein du liquide, et bien souvent le verre est brisé. Il faut contrôler l'élévation du potentiel dans tout le volume du liquide : sans doute y parvient-on grossièrement en utilisant un faisceau de tubes de petit diamètre (figure 57) puisque, avec un tel dispositif, nous avons obtenu, en court-circuit :  $15 \mu\text{A}$  à 10 cm de l'ioniseur, et  $30 \mu\text{A}$  à 4 cm, dans l'huile de transformateur, soit près du double des courants permis en l'absence de contrôle du potentiel. Le fonctionnement sous tension est également amélioré : les amorçages violents disparaissent et la réaction de la tension de débit sur le courant diminue. Cependant, aux fortes tensions de débit, de petites aigrettes lumineuses apparaissent immédiatement en aval de l'ioniseur ; peu à peu les tubes de verre sont détériorés. Sans doute le système est-il perfectible ; le fonctionnement en générateur mérite à lui seul une étude particulière.

### III/ REMARQUES SUR LE RENDEMENT ENERGETIQUE =====

Lorsque le collecteur débite un courant  $I$ , sous une tension  $V$ , la puissance utile est :  $P_u = V \cdot I$  ; quand on passe du

fonctionnement en court-circuit ( $V = 0$ ,  $I = I_{ec}$ ) au fonctionnement sous tension, on constate que la puissance supplémentaire demandée au moteur d'entraînement de la pompe est comparable à la puissance utile  $P_u$ . Mais, en court-circuit, le transfert de charges jusqu'au collecteur réclame une certaine énergie ; par exemple, pour obtenir  $I_{ec} \approx 80 \mu A$  (dans le Pyralène), il faut fournir une puissance  $P \approx 2$  à  $2,5$  w ; la puissance utile est nulle, la puissance absorbée est donc dissipée en chaleur dans le liquide. Il existe probablement une double cause, à la fois électrique et mécanique, à cette dissipation d'énergie dans le transfert de charges où interviennent des processus irréversibles : il peut se produire un certain "glissement" des charges, d'où un freinage de celles-ci à la sortie de l'ioniseur, qui n'est pas compensé par l'accélération qu'elles subissent au voisinage du collecteur ; le champ électrique d'autre part, accroît la turbulence, ce qui augmente les pertes hydrauliques.

On voit donc que le rendement énergétique - sans tenir compte des pertes de charge dues aux frottements du liquide sur les parois - peut être de l'ordre de 50 %. Il est difficile de donner une expression générale des pertes de charge, car elles dépendent de la forme des divers éléments du circuit hydraulique et des matériaux employés ; rappelons qu'elles croissent comme la longueur du circuit et le carré de la vitesse ; on voit donc l'intérêt qu'il y a à fonctionner avec de faibles vitesses. Signalons enfin que les meilleurs groupes moteur-pompe ont un rendement voisin de 60 % ; le rendement global d'un générateur à jet de liquide sera donc très médiocre.

C H A P I T R E      I V

ETUDE DU CHAMP ELECTRIQUE DANS UN LIQUIDE ISOLANT PORTEUR DE CHARGES  
PAR L'EFFET ELECTRO-OPTIQUE DE KERR

I/ INTRODUCTION

=====

Le phénomène électro-optique de KERR permet d'accéder de manière directe à la mesure du champ électrique ; c'est le seul procédé commode de mesure directe de cette grandeur dans un milieu liquide.

Peu de liquides possèdent une constante de KERR élevée ; il s'agit de corps polaires, de conduction résiduelle élevée, ce qui permet de comprendre que l'on ne possède pas encore de valeur précise de cette constante physique, dont l'intérêt est pourtant très grand ; le nitrobenzène est le plus connu d'entre eux. L'une des rares valeurs données avec grande précision est celle du sulfure de carbone -liquide non polaire- : cette valeur est très faible (environ 100 fois plus petite que celle du nitrobenzène), et il est difficile d'obtenir des différences de marche notables. Il en est de même dans le cas de l'huile de transformateur, avec laquelle nous n'avons pu effectuer d'observations utiles.

Les "Pyralène", en revanche, possèdent une constante de KERR appréciable ; de plus, étant incolores, ils se prêtent parfaitement à une étude en lumière blanche qui permet d'accroître la précision par l'usage de compensateurs à teinte sensible.

La transformation d'un ioniseur en cellule de KERR nous a permis d'effectuer un nombre d'observations qui ont confirmé le bien-fondé des hypothèses émises précédemment et ont apporté des précisions sur quelques points particuliers.

III/ ETUDE THEORIQUE (6)  
=====

Certains milieux anisotropes, le plus souvent des milieux cristallins, sont biréfringents : ils possèdent une certaine anisotropie due à leur structure propre. On peut observer des phénomènes optiques analogues dans des milieux naturellement isotropes, lorsqu'on y fait apparaître une dissymétrie par une action extérieure : cette biréfringence est dite accidentelle.

En grande majorité, les liquides deviennent biréfringents quand on les soumet à un champ électrique ; la biréfringence électrique est aussi nommée phénomène de KERR, ou, plus simplement, effet KERR. La direction du champ électrique E est une direction privilégiée, autour de laquelle le phénomène présente la symétrie de révolution : les propriétés optiques du liquide sont celles d'un cristal uniaxe, dont l'axe optique est la direction du champ électrique.

1°) Loi de KERR

Considérons un condensateur plan entre les armatures duquel se trouve un liquide diélectrique. Le faisceau lumineux, parallèle aux électrodes, traverse le condensateur suivant sa longueur l (figure 58).

L'expérience montre que, pour la radiation de longueur d'onde  $\lambda$  :

$$\boxed{n_e - n_o = B \lambda E^2} \quad (1)$$

$n_o$  : indice ordinaire, correspondant aux vibrations perpendiculaires au champ

$n_e$  : indice extraordinaire, relatif aux vibrations parallèles au champ

B : constante de KERR du liquide pour la longueur d'onde  $\lambda$

Le signe de  $(n_e - n_o)$  est indépendant du sens du champ ; les liquides acquièrent en général les propriétés d'un cristal uniaxe positif, et  $B > 0$

2°) Emploi de lumière polarisée

Une source de lumière naturelle fournit des ondes lumineuses dont les plans de polarisation prennent successivement toutes les orientations possibles : le faisceau lumineux est isotrope en moyenne. Si l'on intercale un polariseur entre la source et le plan d'observation, on isole les ondes dont les plans de polarisation ont une orientation donnée : on dispose alors d'un faisceau lumineux polarisé rectilignement.

Soit  $\alpha$ , l'angle de la vibration OM fournie par le polariseur P avec la direction Ox du champ électrique (figure 59). Si OM a pour expression :

$$s = A \cos \omega t$$

ses composantes selon Ox et Oy valent :

$$x = s \cos \alpha = A \cos \omega t \cdot \cos \alpha = a \cos \omega t ; a = A \cos \alpha$$

$$y = s \sin \alpha = A \cos \omega t \cdot \sin \alpha = b \cos \omega t ; b = A \sin \alpha$$

Celles-ci franchissent le chemin l en des temps :

$$t_o = \frac{l}{v_o} = \frac{n_o l}{c}$$

$$t_e = \frac{l}{v_e} = \frac{n_e l}{c}$$

c: vitesse de la lumière dans le vide

A la sortie de la cellule de KERR, le déphasage entre les deux vibrations est :

$$\varphi = \omega(t_e - t_o) = 2\pi \frac{n_e - n_o}{\lambda} l$$

Compte tenu de la loi de KERR (1), on obtient :

$$\boxed{\varphi = 2\pi B l E^2} \quad (2)$$

Le retard introduit entre les deux vibrations privilégiées, après polarisation du faisceau est :

$$\boxed{\delta = (n_e - n_o) l} \quad (3)$$

Les deux composantes ne sont plus proportionnelles à chaque instant, la résultante ne décrit plus un segment de droite, mais une ellipse : la lumière est polarisée elliptiquement et l'on peut écrire :

$$\begin{aligned} x &= a \cos \omega t \\ y &= b \cos(\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

Si l'on place un analyseur à la sortie de la cellule de KERR, il ne laisse passer que les composantes  $O_n$  et  $O_{n'}$  dirigées suivant une direction  $OA$ , qui fait un certain angle  $\beta$  avec  $Ox$  (figure 60). Leurs expressions s'écrivent :

$$\begin{aligned} x' &= a \cos \beta \cos \omega t \\ y' &= b \sin \beta \cos(\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

La vibration totale transmise par l'analyseur est :

$$\begin{aligned} s' &= x' + y' = (a \cos \beta + b \sin \beta \cos \varphi) \cos \omega t + b \sin \beta \sin \varphi \sin \omega t \\ &= A \cos \omega t + B \sin \omega t \end{aligned}$$

Son intensité vaut :  $I = A^2 + B^2$ . Si l'intensité incidente est  $I_0$ ,

$$I = I_0 \left[ \cos^2(\alpha - \beta) - \sin 2\alpha \sin 2\beta \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right] \quad (4)$$

3°) Discussion et choix d'un mode opératoire

Le terme  $\cos^2(\alpha - \beta)$  est nul pour  $\alpha - \beta = \pm \frac{\pi}{2}$ , c'est-à-dire entre analyseur et polariseur croisés. L'oeil appréciant avec plus de précision un minimum qu'un maximum d'éclairement, on a intérêt à opérer entre analyseur et polariseur croisés : on repère ainsi avec exactitude l'extinction en l'absence de champ électrique appliqué. D'autre part, le phénomène a sa visibilité maximale lorsque le produit  $\sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta$  est maximum, c'est-à-dire lorsque les angles  $\alpha$  et  $\beta$  prennent les valeurs  $\frac{\pi}{4}$  ou  $\frac{3\pi}{4}$  (figure 61).

En opérant de la sorte, l'expression (4) devient :

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (5)$$

La radiation de longueur d'onde  $\lambda$  est éteinte lorsque :

$\sin^2 \frac{\varphi}{2} = 0$ , soit pour  $\varphi = 2K \pi$  ( $K$ , entier positif) et d'après (2) lorsque :  $B \cdot l \cdot E^2 = K$ .

a) Lumière monochromatique

En chaque point du liquide où  $E^2 = \frac{K}{B \cdot l}$ , il y a extinction de la lumière ; lorsque le champ croît, on observe des apparitions et extinctions successives de la lumière ; les extinctions se produisent pour des champs dans les rapports  $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt{3}$ ,  $2$ ,  $\sqrt{5}$  etc...

Si le champ est uniforme dans le liquide, l'extinction sera totale ; au contraire, à un champ hétérogène ne correspondra qu'une disparition locale de la lumière : on observera des franges sombres en nombre plus ou moins élevé selon l'ordre auquel on opère et selon le degré d'hétérogénéité du champ. Il suffira de compter les franges lors de leur apparition, leur numéro d'ordre correspondant à un champ défini là où elles se trouvent au sein du liquide.

b) Lumière blanche

Chacune des radiations monochromatiques qui constitue la lumière blanche donne dans le plan d'observation le système de franges dont nous venons de parler ; mais l'interfrange varie proportionnellement à la longueur d'onde ; deux radiations de longueurs d'onde différentes ne pouvant pas interférer, l'intensité lumineuse observée sera la somme des intensités correspondant aux différentes radiations.

Le terme  $\cos^2(\alpha - \beta)$  représente la lumière incidente affaiblie dans un rapport qui ne dépend pas de la longueur d'onde ; c'est le "terme blanc" : il représente un éclaircissement général du plan d'observation en lumière blanche, qui disparaît si polariseur et analyseur sont croisés.

Le deuxième terme de la formule (4), en revanche, dépend de la longueur d'onde : c'est le "terme coloré" ; quand le champ électrique croît, il apparaît des colorations différentes, avec

une intensité lumineuse mesurée par le coefficient  $\sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta$ , qui est indépendant de la longueur d'onde. En disposant analyseur et polariseur à  $45^\circ$  du champ électrique, on rend ce terme égal à 1 ; on obtient alors les teintes les plus vives : les couleurs sont saturées.

Ces couleurs, appelées couleurs des lames minces, ont été classées en un tableau nommé échelle des teintes de Newton. A chaque couleur correspond une différence de marche  $\delta$ , donc une valeur du champ électrique. Si l'on opère sur fond noir, toutes les radiations sont éteintes ; l'échelle débute donc par le noir ; quand le retard  $\delta$  augmente, les couleurs du spectre correspondant aux courtes longueurs d'onde sont rétablies plus rapidement que les autres, et les premières teintes sont bleues. Lorsque  $\delta = 0,560 \mu$ , il y a extinction du jaune moyen : on observe une teinte pourpre. Un très faible déplacement de la radiation éteinte fait rapidement passer du pourpre au rouge ou au violet ; c'est pour cette raison que la teinte pourpre est appelée "teinte sensible". De telles teintes sensibles se retrouvent chaque fois qu'il y a extinction du jaune moyen ; elles séparent les différents ordres de teintes. Mais, quand le retard augmente, les couleurs deviennent moins reconnaissables, car il y a extinction simultanée en plusieurs points du spectre : après le 3ème ordre, on ne voit plus que du rose et du vert.

L'emploi de la lumière blanche est d'un grand intérêt lorsqu'on ne peut provoquer que d'assez faibles différences de marche, c'est-à-dire quand le produit  $B \cdot l$  est petit. Supposons que l'on ne puisse obtenir que la lère extinction, en lumière monochromatique ; la mesure du champ électrique ne peut s'effectuer de manière précise en tout point du liquide que par une méthode photométrique ou par une méthode optique ; l'une et l'autre nécessitent un appareillage élaboré, dont la mise en oeuvre peut-être longue

et délicate. En lumière blanche au contraire, on dispose, pour les 2 premiers ordres, de nombreuses teintes répertoriées que l'on peut reconnaître par observation directe : il est alors aisé d'apprécier immédiatement la valeur du champ électrique. De plus, on augmente la sensibilité de la méthode en utilisant une lame à teinte sensible.

Emploi d'une "teinte sensible"  
\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o

En interposant une lame mince cristalline entre cellule de KERR et analyseur, on introduit une différence de marche supplémentaire. Nous avons vu l'intérêt qu'il y avait à se placer sur une teinte sensible ; la lame à utiliser doit donc provoquer une différence de marche égale à une ou plusieurs fois la longueur d'onde du jaune moyen. Une telle lame est dite onde, ou lame à teinte sensible ou plus simplement "teinte sensible". La vibration émergente est identique à la vibration incidente. On a :

$$\delta = K\lambda$$

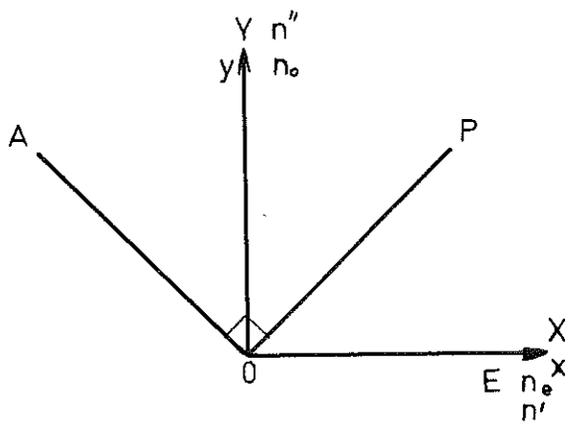
$$\varphi = 2K\pi$$

L'action de la lame est entièrement définie par l'orientation des vibrations privilégiées rectangulaires D' et D" , et la valeur de la différence de marche. Pour étudier la propagation d'une vibration lumineuse, nous la rapporterons à deux axes rectangulaires OX et OY parallèles aux directions D' et D" , lignes neutres de la lame. L'axe OY correspondra, pour fixer les idées, à l'indice le plus grand (n"), donc à la vitesse la plus faible : cet axe est dit axe lent de la lame. La différence de marche produite par la lame d'épaisseur e, vaut :

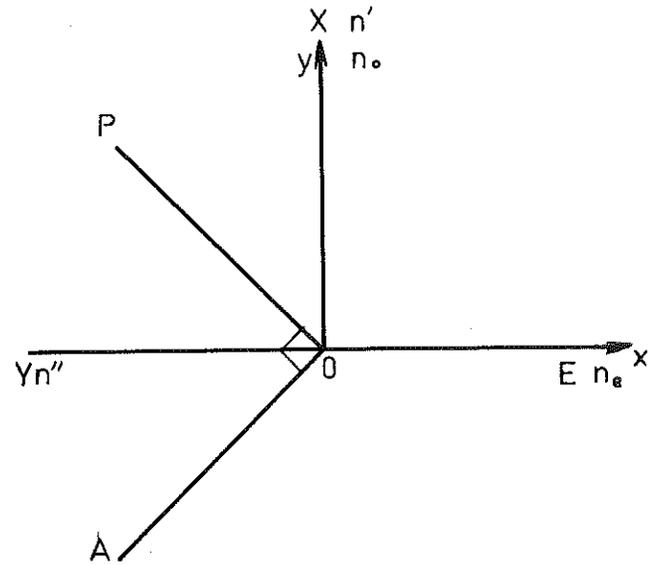
$$\delta = (n'' - n') e$$

Supposons que la lame et les polariseurs sont orientés de manière quelconque. La discussion est semblable à celle qui a été précédemment faite au § II, 3° (cf. figure 60).





Effet soustractif



Effet additif

Fig. 62 : Schémas montrant les deux possibilités d'observation avec la lame à teinte sensible

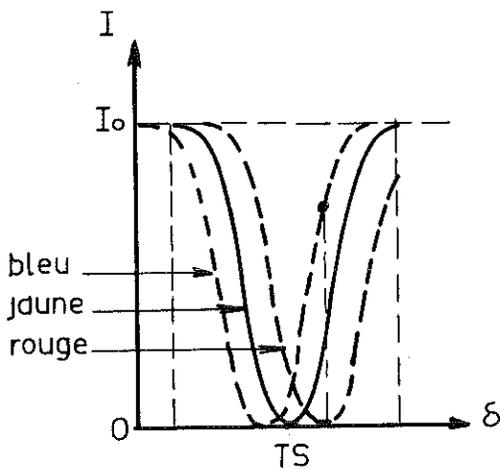


Fig. 63 : Réduction de l'extrêmité rouge du spectre visible : la teinte sensible vire au bleu quand  $\delta$  croît

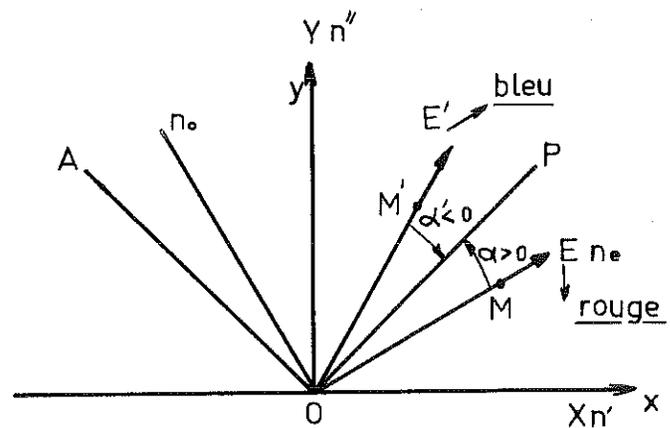


Fig. 64 : Cas où le champ électrique  $E$  n'est plus dirigé selon  $Ox$

champ fait un angle  $\alpha$  avec celle du polariseur (figure 64), l'effet est soustractif par exemple ; mais, le terme  $\sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta = -\sin^2 2\alpha$  est différent de l'unité. Suivant la valeur de  $\alpha$ , la teinte observée va perdre de l'éclat ; pour  $\alpha = 0$  ou  $\pi$ , il y aura extinction au point M considéré, car  $\sin^2 2\alpha = 0$ . Si  $\alpha$  devient négatif, l'effet est additif, et l'on observera, pour un champ de même intensité, une couleur différente ; quand  $\alpha$  augmente, cette couleur prend de l'éclat.

Ainsi, on peut déterminer la direction du champ électrique en un point quelconque du liquide ; il suffit de rechercher le contraste maximum au point considéré, en faisant tourner l'ensemble polariseur - lame - analyseur. La direction du champ est celle de l'une ou l'autre bissectrice de l'angle (OP, OA), selon que l'effet est additif ou soustractif. Des considérations simples permettent alors de préciser le sens du champ électrique.

#### 4°) Conclusion

Les deux méthodes d'étude - en lumière monochromatique et en lumière blanche - se complètent harmonieusement. Nous utiliserons la première pour évaluer des champs locaux intenses : il sera facile d'observer des franges sombres sur fond clair nous employerons la seconde pour évaluer les champs de valeur moyenne.

### III/ ETUDE EXPERIMENTALE ET DISCUSSION DES RESULTATS

=====

#### 1°) Evaluation de la constante de KERR du Pyralène 1499

Une mesure précise de la constante de KERR du Pyralène nécessiterait la construction d'une cellule de KERR très élaborée ; une valeur approchée suffit pour l'étude que nous avons à faire. Le liquide est placé dans une cellule d'électrodialyse à électrodes planes et parallèles recouvertes de membranes sélectives ;

il est amené à un haut niveau de pureté, et ne s'échauffe pas pendant les mesures, ce qui est indispensable car la constante de KERR décroît quand la température s'élève. De plus, le champ est uniforme, ce dont on s'assure par observation directe et en vérifiant que la loi quadratique est bien suivie jusqu'à un ordre élevé.

D'après les cotes de la cellule de KERR et les courbes expérimentales des valeurs du champ correspondant aux extinctions successives, on obtient pour la raie jaune du Sodium ( $\lambda = 0,589 \mu$ ):

$$B = 16 \cdot 10^{-7} \text{ uescgs} \pm 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ uescgs à } 20^{\circ}\text{C}$$

L'erreur la plus importante porte sur la longueur  $l$  réellement soumise au champ électrique car on doit se contenter de longueurs modestes ( $\approx 3 \text{ cm}$ ), pour des raisons technologiques, imposées par la nature même des membranes.

Notons que les mêmes expériences effectuées dans le nitrobenzène, conduisent à la valeur :  $B' \approx 340 \cdot 10^{-7} \text{ uescgs}$  à  $20^{\circ}\text{C}$  pour  $\lambda = 0,589 \mu$  ; cette valeur est en accord avec celles que donnent l'American Institute of Physics Handbook (1) ( $326 \cdot 10^{-7} \text{ uescgs}$ ) et Möller (24) ( $348 \cdot 10^{-7} \text{ uescgs}$  calculée pour  $\lambda = 0,589 \mu$  à l'aide de la formule de Havelock :  $\frac{B \cdot \lambda \cdot n}{(n^2 - 1)^2} = \text{cste}$  ;  $n$  : indice de réfraction).

## 2°) Description et étalonnage de la cellule de KERR

Cette cellule doit présenter toutes les caractéristiques d'un ioniseur et posséder en outre les qualités optiques d'une cellule de KERR conventionnelle. La difficulté majeure est d'éliminer du champ d'observation toute pièce autre que les électrodes ; la figure 65 montre la disposition adoptée. La réalisation de cette cellule ne demande que des usinages classiques ; montage et démontage des différents organes sont aisés.

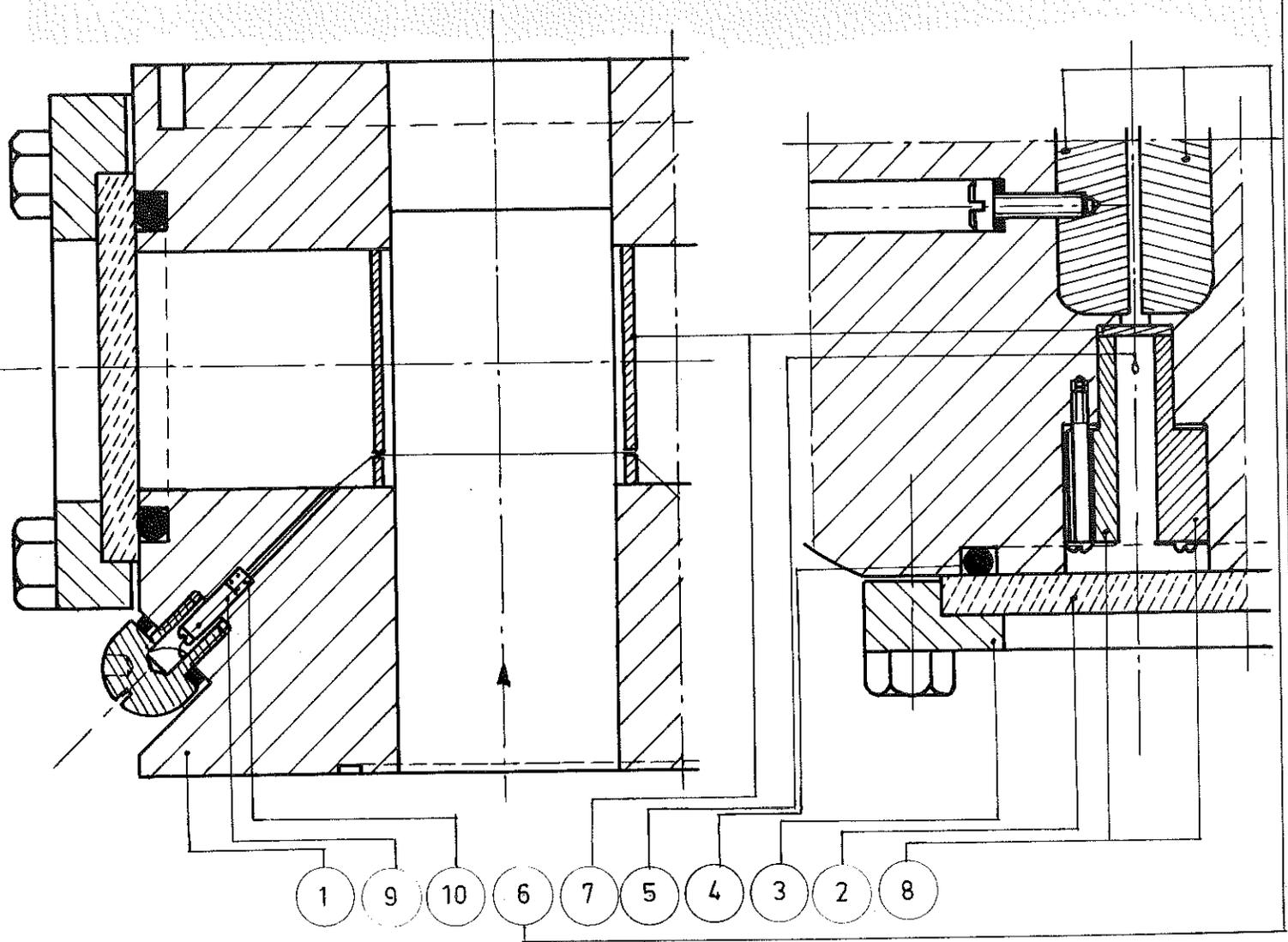


Fig. 65 : Cellule de KERR pour transfert de charges

Ech : 1

- 1- Corps (nylon)
- 2- Glace
- 3- Bride
- 4- Joint torique
- 5- Fil
- 6- Plaques
- 7- Glaces
- 8- Cales (nylon)
- 9- Guide-fil
- 10- Ressort

Certains points appellent quelques commentaires :

- L'étanchéité générale de la partie optique est assurée par des joints toriques dont la souplesse ne nécessite qu'un serrage modéré, absolument indispensable pour éviter la biréfringence du verre par compression ; le parallélisme des glaces est réalisé lorsqu'elles viennent plaquer sur le corps de la cellule.
- Les glaces sur lesquelles repose le fil-ioniseur doivent être aussi proches que possible de l'évidement central où circule le liquide, afin que la section de passage du liquide soit sensiblement constante ; on doit éviter cependant de les mettre en contact avec les électrodes planes, sinon des rampages risquent de se produire sur la surface du verre.
- Le centrage du fil s'effectue de manière convenable, car il est maintenu dans le plan médian sous l'action des ressorts qui le tendent.
- Les cotes de la cellule sont telles que les électrodes et les systèmes de collection de charges précédemment décrits (Ch. II) peuvent lui être adaptés.
- L'observation est possible 5 mm en amont du fil et 31 mm en aval, sur une largeur de 5 mm

Pour l'observation à très grande distance du fil, une cellule du même genre peut être adaptée à la précédente ; la fenêtre d'observation possède une hauteur de 34 mm et une largeur de 5 mm (photographie n° 4).

L'étalonnage de la cellule est réalisé de la manière suivante : un champ électrique connu est appliqué aux plaques de l'ioniseur, le fil n'étant pas monté ; lorsque le liquide est pur, ce

champ est sensiblement uniforme. Pour chaque couleur caractéristique, on relève la valeur du champ (on néglige les effets de bord). Comparons les valeurs des champs observés, à celles que l'on calcule d'après les différences de marche données pour chaque couleur caractéristique de l'échelle des teintes de Newton ; la lame utilisée est une lame onde, qui donne par conséquent la première teinte sensible. Le tableau a été établi pour l'effet additif :

Différence de marche $\delta$ ( $m\mu$ )	Couleurs de l'échelle des teintes de Newton	E calculé (kV/cm)	Couleurs observées	E correspondant (kV/cm)
0	teinte sensible	0	teinte sensible	0 - 12
5	pourpre	12,7	pourpre	12 - 25
15	violet	22	violet bleuâtre	25 - 40
29	indigo	30,5	bleu	40 - 57
104	bleu de ciel	57,9	bleu clair	57 - 70
187	vert	74,5	bleu vert	70 - 80
350	jaune pur	106	vert jaunâtre	80 - 90
438	orange rougeâtre	118,5	jaune	90 - 115
560	orange rougeâtre	118,5	orangé jaunâtre	115 - 130
	teinte sensible	134	teinte sensible	135 - 138

La concordance est bonne, quoique les couleurs observées soient des teintes plates, dont la coloration n'évolue que lentement quand augmente la différence de marche. Cependant, les couleurs sont quelque peu altérées pour deux raisons : en premier lieu, les polariseurs sont de simples feuilles de polaroid, de teinte verdâtre ; en second lieu, la source de lumière blanche est une lampe à incandescence ordinaire. L'altération des couleurs est surtout sensible lorsque l'effet est soustractif, notamment dans le rouge.

Remarque : La biréfringence d'écoulement est faible même aux très grandes vitesses, et ne gêne pas les observations.

3°) Etude de la répartition du champ électrique entre fil et plans lorsque le liquide est au repos

Les observations sont généralement effectuées avec un écartement des plaques :  $2e = 2 \text{ mm}$  ; les phénomènes sont analogues lorsque l'écartement est plus grand.

a) Etude expérimentale

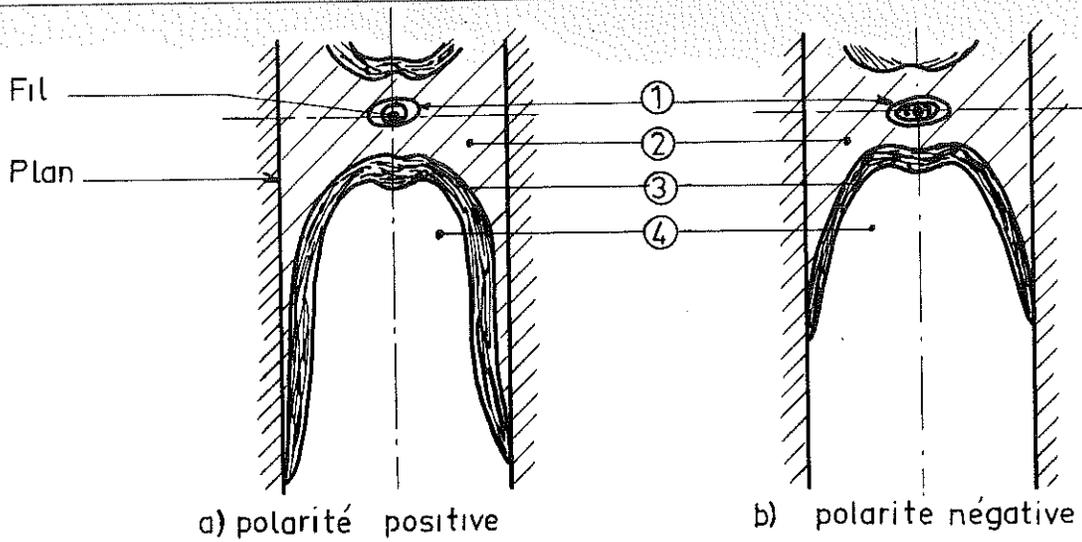
Lorsque croît progressivement la tension entre fil et plaques, une zone de champ intense apparaît, en premier lieu, au voisinage du fil ; elle s'étend ensuite jusqu'aux plaques ; au voisinage du claquage, le champ détectable par effet KERR, ne s'étend pas le long des plans au-delà d'une distance sensiblement égale à 10 fois le demi-écartement  $e$  ; la hauteur de liquide soumise à un champ intense n'excède pas 4 à 7 fois le demi-écartement  $e$  ; ceci justifie la condition  $h > 4e$  établie expérimentalement (cf. Ch. III § II, 4°).

Pour une même tension appliquée aux électrodes, l'effet marqué de polarité souligné précédemment, apparaît ici de manière spectaculaire.

Polarité positive  
..o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o

Rappelons que l'on obtient, dans le cas du Pyralène, les courants les plus intenses pour cette polarité. La répartition du champ électrique est illustrée par la photographie en couleur n° 1, et schématisée sur la figure 66 a. Pour fixer les idées, lorsque le champ moyen appliqué  $E_m$  vaut  $100 \text{ kV/cm}$ , le courant qui traverse la cellule est voisin de  $10 \mu\text{A}$ .

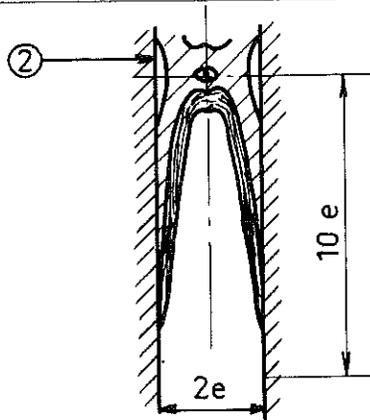
Dans la zone (1), qui s'étend sur quelques dixièmes de



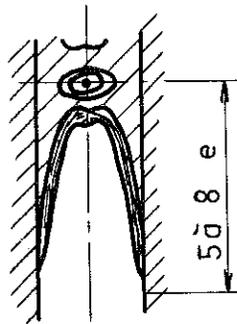
- 1- Zone de champ très intense
- 2- Zone de champ intense

- 3- Zone où le champ décroît rapidement
- 4- Zone de champ faible ou nul

Fig. 66 : Répartition schématique du champ électrique entre fil et plans

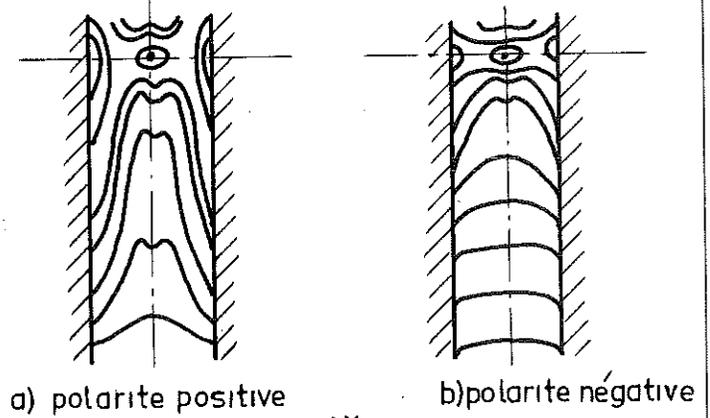


a) polarité positive



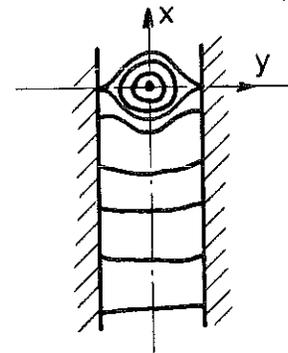
b) polarité négative

Fig. 67 : Répartition du champ au voisinage du claquage



a) polarité positive

b) polarité négative



c) répartition harmonique

Fig. 68 : Représentation schématique des lignes équipotentiels

millimètres autour du fil, le champ est très intense : il vaut plusieurs fois le champ moyen\*. Dans la zone (2), le champ est comparable au champ moyen ; le maximum du champ se situe sur les plaques, au droit du fil en (2') (figure 67). Au voisinage du claquage, soit pour  $E_m \approx 140$  à  $160$  kV/cm, on voit apparaître dans cette zone la 2ème teinte sensible ; une telle augmentation du champ sur les plaques semble indiquer la présence d'hétérocharges : l'accumulation d'ions, dont la cinétique de décharge n'est pas instantanée, renforce le champ au voisinage des électrodes planes.

Polarité négative  
-o-o-o-o-o-o-o-o-

Pour un même champ appliqué, le courant est 2 à 3 fois plus faible. Les points suivants sont remarquables (figure 66 b) :

- le volume de liquide soumis à un champ notable est moins important
- la zone de champ intense au voisinage du fil est plus étendue
- le champ est moins intense sur les plaques, même à courant égal, ce qui nécessite un champ moyen bien plus élevé.

Influence de la matière des élec-  
-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-o-  
trodes  
-o-o-o-

Nous avons utilisé des plaques en laiton ou en acier inoxydable, et du fil d'acier ou de tungstène : les phénomènes restent identiques. Nous avons tenté de perturber la cinétique de décharge sur les plaques en les recouvrant, l'une d'une membrane perméable aux anions, l'autre d'une membrane perméable aux cations. Quelle que soit la polarité, nous n'avons pu déceler de modification nota-

\* Même avec un fort grossissement, il n'est pas possible de discerner plus de 3 ou 4 franges ; en effet, si l'on admet que le champ varie sensiblement en  $\frac{1}{r}$ , les rayons des franges seront dans les rapports 1,  $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt{3}$ , 2... : les franges d'ordre élevé seront de plus en plus rapprochées.

ble dans l'allure du champ (les électrodes-membranes sont cependant des électrodes presque parfaites -d'est-à-dire parfaitement ouvertes ou bloquantes -, lorsqu'elles reçoivent un apport d'ions qui n'est pas excessif).

b) Interprétation et discussion

Il est intéressant de comparer les distributions précédentes du champ électrique, à celle du champ harmonique, en l'absence de charge d'espace, c'est-à-dire à l'instant initial.

Le problème du fil entre deux plans parallèles et infinis peut se traiter mathématiquement par transformation conforme.

Un quadrillage régulier (intérieur d'un rectangle) du plan  $z$  est transformé dans le plan  $\xi$  en un fil en présence d'un plan, à la distance  $l$  par :

$$e^z = \frac{\xi + 1}{\xi - 1} \quad \text{d'où :} \quad \xi = \frac{1 + e^z}{e^z - 1}$$

Considérons la transformation :  $Z = \log \frac{1 + e^z}{e^z - 1}$

La transformation inverse :  $e^z = \frac{1 + e^Z}{e^Z - 1}$  fait passer du plan  $z$  au plan  $Z$ ,

$$\text{et } z = \log \frac{e^Z + 1}{e^Z - 1} \quad ; \quad \begin{aligned} z &= x + iy \\ Z &= X + iY \end{aligned}$$

Tous calculs faits, il vient :

$$x = \frac{1}{2} \log \frac{\text{ch } X + \cos Y}{\text{ch } X - \cos Y}$$

$$y = - \text{Arctg} \frac{\sin Y}{\text{sh } X}$$

Les droites  $y = \text{cste}$  dans le plan  $z$  sont transformées en lignes de force dans le plan  $Z$  soit :

$$\boxed{\sin Y = \lambda \operatorname{sh} X}$$

Les droites  $x = \text{cste}$ , donnent les équipotentiellles :

$$\boxed{\cos Y = \mu \operatorname{ch} X}$$

Pour obtenir les équichamps, on écrit :

$$E_Z = E_z \left| \frac{dz}{dZ} \right| = \text{cste} \quad , \quad \text{d'où} : E_Z = E_z \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\operatorname{ch} 2X - \cos 2Y}} = \text{cste}$$

L'équation des lignes de champ constant s'écrit :

$$\boxed{\cos 2Y = \operatorname{ch} 2X + \eta}$$

L'allure des équichamps est donnée figure 68 c.

Remarquons que pour  $X$  et  $Y$  petits :

$X^2 + Y^2 = \text{cste}$  : les lignes de champ constant sont des cercles centrés sur le fil.

$$\begin{aligned} \text{D'autre part, sur la droite } X = 0 \quad , \quad E &= \frac{A}{\sqrt{1 - \cos 2Y}} \\ \text{sur la droite } Y = 0 \quad , \quad E &= \frac{B}{\sqrt{\operatorname{ch} 2X - 1}} \approx Be^{-X} \end{aligned}$$

Les équichamps ont même allure, au voisinage du fil, qu'en présence de charge d'espace ; ailleurs la répartition est sensiblement différente (figure 68) .

Par ailleurs, on peut en première approximation, assimiler le système fil-plans, à un dispositif fil et cylindre coaxiaux, dont le diamètre de l'électrode externe est égal à l'écartement des plaques. On peut alors obtenir l'expression du champ en présence de

charge d'espace, en faisant les hypothèses suivantes :

- on suppose que la conduction est unipolaire
- on néglige les courants de diffusion
- on suppose que les ions se déchargent instantanément sur les électrodes

Si  $k$  désigne la mobilité des ions,  $E$  le champ sur un cylindre de rayon  $r$ ,  $\rho$  la densité de charge, la densité de courant  $j$  s'écrit :

$$j = k \rho E$$

Le courant qui traverse tous les cylindres axés sur le fil de longueur  $l$ , de rayon  $r_0$  est :  $I = 2\pi r l j$ .

Par application de l'équation de Poisson, on obtient (39) :

$$E^2 = E_m^2 \frac{r_0^2}{r^2} + \frac{2I}{\epsilon k l} \left( 1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad (6)$$

$E_m$  : champ sur le fil

D'autre part, on a :

$$\int_{r_0}^R E(r) dr = v \quad (7)$$

A partir de ces deux relations, on peut faire un certain nombre de remarques intéressantes.

Si l'on suppose que les mobilités des porteurs positifs ou négatifs selon la polarité sont comparables, si le courant  $I$  est élevé, la répartition du champ aura l'allure (1) schématisée sur la figure 69 ; dans le cas où le courant est petit, on obtiendra la

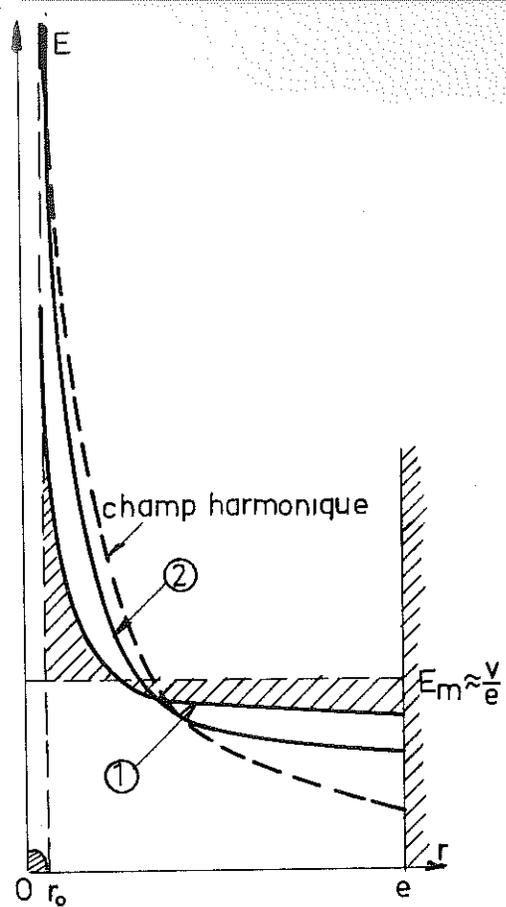


Fig. 69 : Répartition schématique du champ en présence de charge d'espace

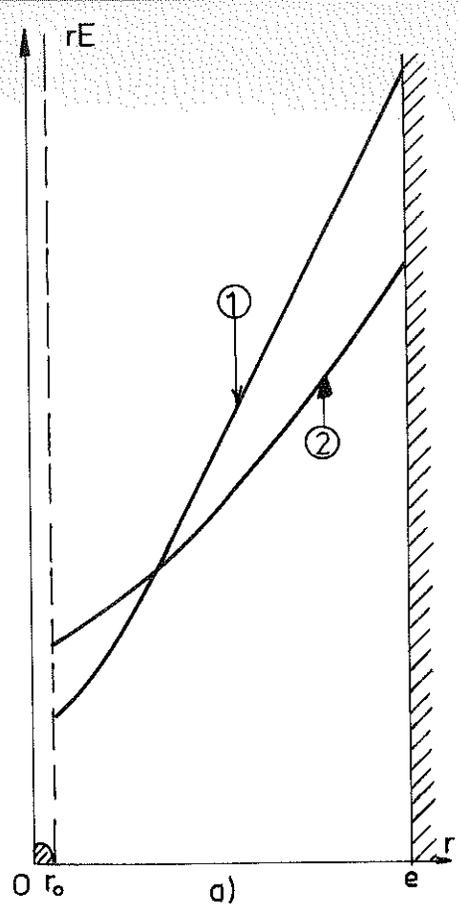


Fig. 70 : Représentation schématique du produit  $rE$  et de la charge d'espace

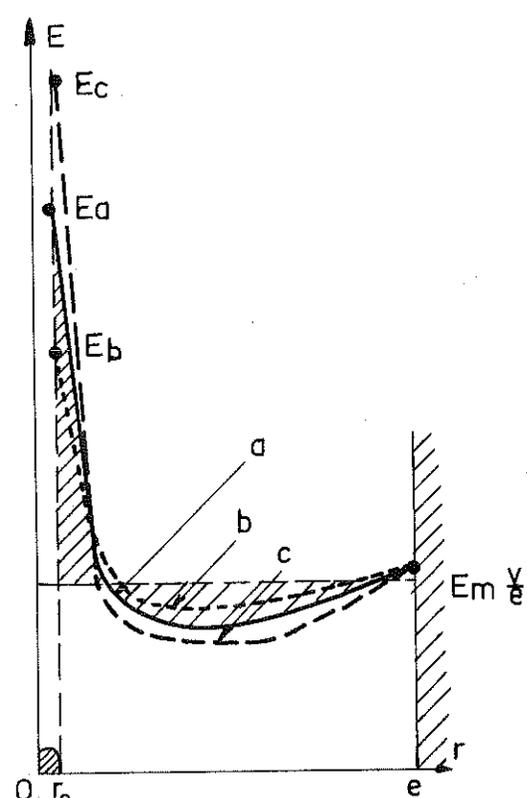
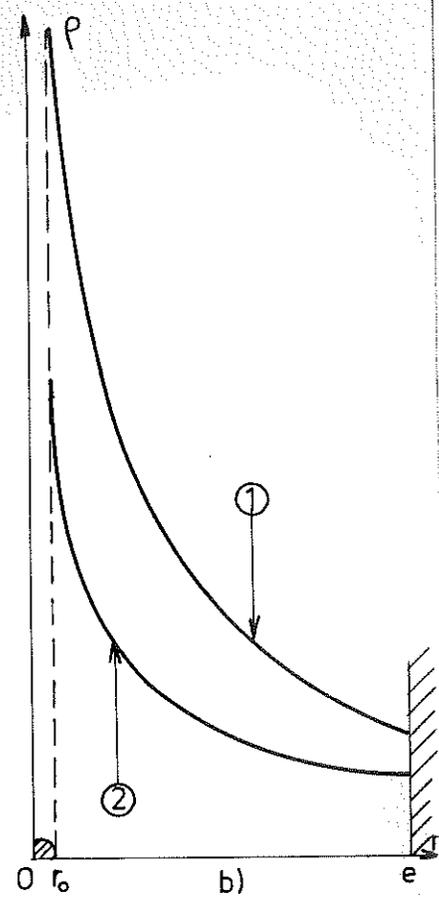


Fig. 71 : Présence d'hétérocharges au voisinage des plaques : répartitions possibles du champ électrique

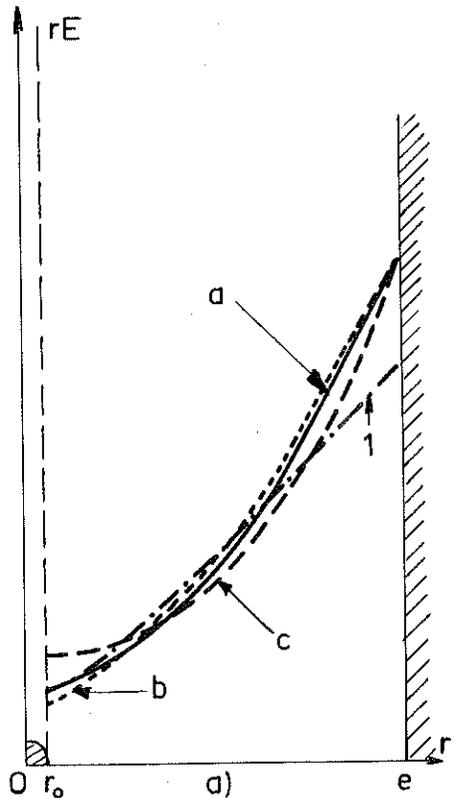
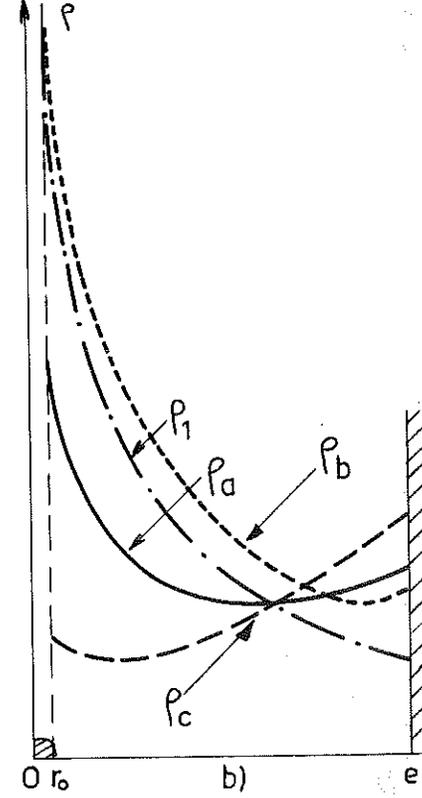


Fig. 72 : Présence d'hétérocharges au voisinage des plaques : représentations possibles du produit  $rE$  et de la charge d'espace



répartition (2) .

Ceci est conforme aux observations que l'on fait dans le Pyralène.

La densité de charge  $\rho$  s'écrit :

$$\rho = \frac{I}{2\pi l k \left[ r_0^2 \left( E_m^2 - \frac{2I}{\epsilon k l} \right) + \frac{2I}{\epsilon k l} r^2 \right]^{1/2}} ; \text{ pour } r = r_0 :$$

$$\rho_0 = \frac{I}{2\pi l k E_m r_0}$$

Au voisinage du fil, la densité de charge est maximale ; elle décroît jusqu'aux plaques ; cette répartition est favorable à un entraînement des charges par circulation du liquide, puisque la vitesse du liquide est la plus élevée au voisinage du fil.

L'allure de la charge d'espace déduite des répartitions de champ (1) et (2) est donnée sur la figure 70 b ; la charge spatiale est plus élevée quelle que soit la distance  $r$ . S'il n'apparaît pas de perturbation imprévisible, le courant entraîné lorsque le liquide circule, doit être plus intense : c'est ce que l'on constate effectivement dans le cas du Pyralène (polarité positive) et de l'huile (polarité négative).

Remarque : L'expression de la densité de charge est :

$$\rho = \frac{\epsilon}{4\pi} \cdot \frac{1}{r} \frac{d(rE)}{dr}$$

Pour obtenir l'allure de  $\rho(r)$ , il faut tracer les courbes  $(rE) = f(r)$  à partir des répartitions de champ (1) et (2) (figure 70 a).

Lorsque la pureté du liquide croît, le courant qui traverse la cellule diminue ; on devrait assister à une diminution du champ sur les plaques. Or, on observe au contraire que celui-ci augmente : tout se passe comme si la mobilité des ions avait décréu ; en fait,  
la purification du liquide fait

disparaître des ions de petite taille dont la mobilité est grande - et la cinétique de décharge vraisemblablement rapide -. D'autre part, si le liquide est trop conducteur, la conduction n'est pas exclusivement unipolaire, et la formule (6) ne s'applique pas.

Ainsi, quand le liquide est très pur, il ne reste que des ions de grande taille, qui se déchargent difficilement sur les électrodes. Voyons dans quelle mesure on peut tenir compte de la cinétique de décharge de ces ions dans l'étude de la répartition du champ électrique et de la charge spatiale.

Influence de la cinétique de décharge des ions sur les électrodes

Les ions qui s'accumulent sur les plaques provoquent un renforcement du champ dans leur voisinage ; l'intégrale du champ devant demeurer constante (relation (7)), on peut avoir l'une des trois répartitions schématisées sur la figure 71, selon que le champ au voisinage du fil reste le même (a), décroît (b) ou augmente (c). Les répartitions des densités volumiques de charge correspondantes sont indiquées sur la figure 72 b. Il est vraisemblable que le champ sur le fil varie peu ; en effet, lorsqu'on balaye les plaques par un jet de liquide, le courant total ne varie pratiquement pas ; d'autre part, quand on balaye tout le volume, on obtient, à vitesse égale, plus de courant qu'en "soufflant" sur le fil lui-même (figure 47, Ch. III). La répartition de la densité de charge est donc probablement du type a, et demeure favorable à un entraînement par le courant liquide.

Notons que ces observations ne permettent pas d'apporter de précisions sur le mécanisme de création des charges. Il paraît peu vraisemblable qu'il s'agisse d'une ionisation du liquide lui-

même, quand il s'agit d'huile de transformateur ; en effet, une énergie d'une vingtaine d'électron-volt est nécessaire pour scinder une molécule d'hydrocarbure ; il est difficile d'admettre qu'une telle énergie puisse être mise en jeu dans les phénomènes étudiés. Dans le cas du Pyralène, il se peut qu'une énergie environ dix fois plus petite suffise ; mais il n'est pas possible de trancher, car on peut également supposer que le liquide accepte, où cède des électrons au métal du fil. Les observations ne permettent pas non plus de préciser la raison pour laquelle le claquage se produit plus facilement lorsque la polarité est positive, pour les deux liquides utilisés.

Les phénomènes propres au liquide lui-même sont probablement masqués par des phénomènes d'électrodes ; ces derniers interviennent également pour modifier la cinétique de décharge des ions sur les électrodes, qui semble, dans le cas du Pyralène, assez différente suivant le signe des ions : avant que l'ion ait échangé un électron avec le métal, il se produit une succession de transformations chimiques où peuvent intervenir les propriétés du liquide d'une part, et celles du métal d'autre part.

#### 4°) Cas où le liquide circule

##### a) Plaques dont la longueur est très grande devant leur écartement

La hauteur des plaques en aval du fil est voisine de 10 cm, leur écartement  $2e = 2$  mm ; ainsi, même à grande distance du fil - quelques centimètres par exemple -, les phénomènes liés à la création et à l'entraînement des charges ne seront pratiquement pas perturbés par la présence du système de collection. Le collecteur est mis à la terre ; les plaques sont portées à la haute tension d'excitation. Pour fixer les idées et alléger l'exposé, nous donnerons des valeurs numériques.

Polarité positive  
\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_o\_

Influence de la vitesse du liquide

Le liquide étant au repos, on établit un champ moyen constant :  $E_m = \frac{V}{e} = 100 \text{ kV/cm}$  ; il passe un courant  $i \approx 10 \text{ } \mu\text{A}$  entre fil et plaques. Le champ détectable par effet KERR s'étend jusqu'à 8 mm en aval du fil (cf. figure 72 a). Cette distance est portée à 2 cm lorsque la vitesse moyenne du liquide atteint 10 cm/s et le courant passe à 16  $\mu\text{A}$ . Dès que la vitesse atteint 20 cm/s, le champ s'étend sur toute la longueur des plaques, en une bande fine dont la largeur n'excède pas 2 à 3 dixièmes de millimètre ; le champ est maximum sur l'électrode et décroît rapidement quand on s'en écarte. Face au fil, le champ sur les plaques vaut de 70 à 90 kV/cm ; à l'extrémité des plaques, il vaut de 30 à 50 kV/cm. En amont du fil, il ne s'étend plus au-delà de 2 à 3 mm. On relève alors  $i = 17,5 \text{ } \mu\text{A}$ .

Une partie notable des charges est entraînée hors des plaques dès que la vitesse atteint 30 cm/s et :  $I = 1,5 \text{ } \mu\text{A}$  ;  $i = 19 \text{ } \mu\text{A}$ . Quand la vitesse croît, la bande fine qui longeait les électrodes s'élargit peu à peu, sa coloration devient uniforme ; lorsque la vitesse est suffisante, on observe de part et d'autre d'une fine languette pourpre - la teinte sensible - située dans le plan médian, une coloration uniforme bleue (figure 73 a et photographie en couleur n° 2) ; immédiatement en aval du fil, le champ est pratiquement uniforme de part et d'autre d'une bande étroite à l'intérieur de laquelle il est faible ou nul.

Ainsi l'hypothèse émise au Ch. I se trouve confirmée par cette observation ; le champ croît du plan médian jusqu'aux bords de la lame chargée ; il est ensuite sensiblement uniforme (figure 73 b).

En outre, la valeur du champ observé par effet KERR est en accord avec celle que l'on peut calculer d'après le courant entraîné : immédiatement en aval du fil, l'entraînement s'effectue bien, et l'on

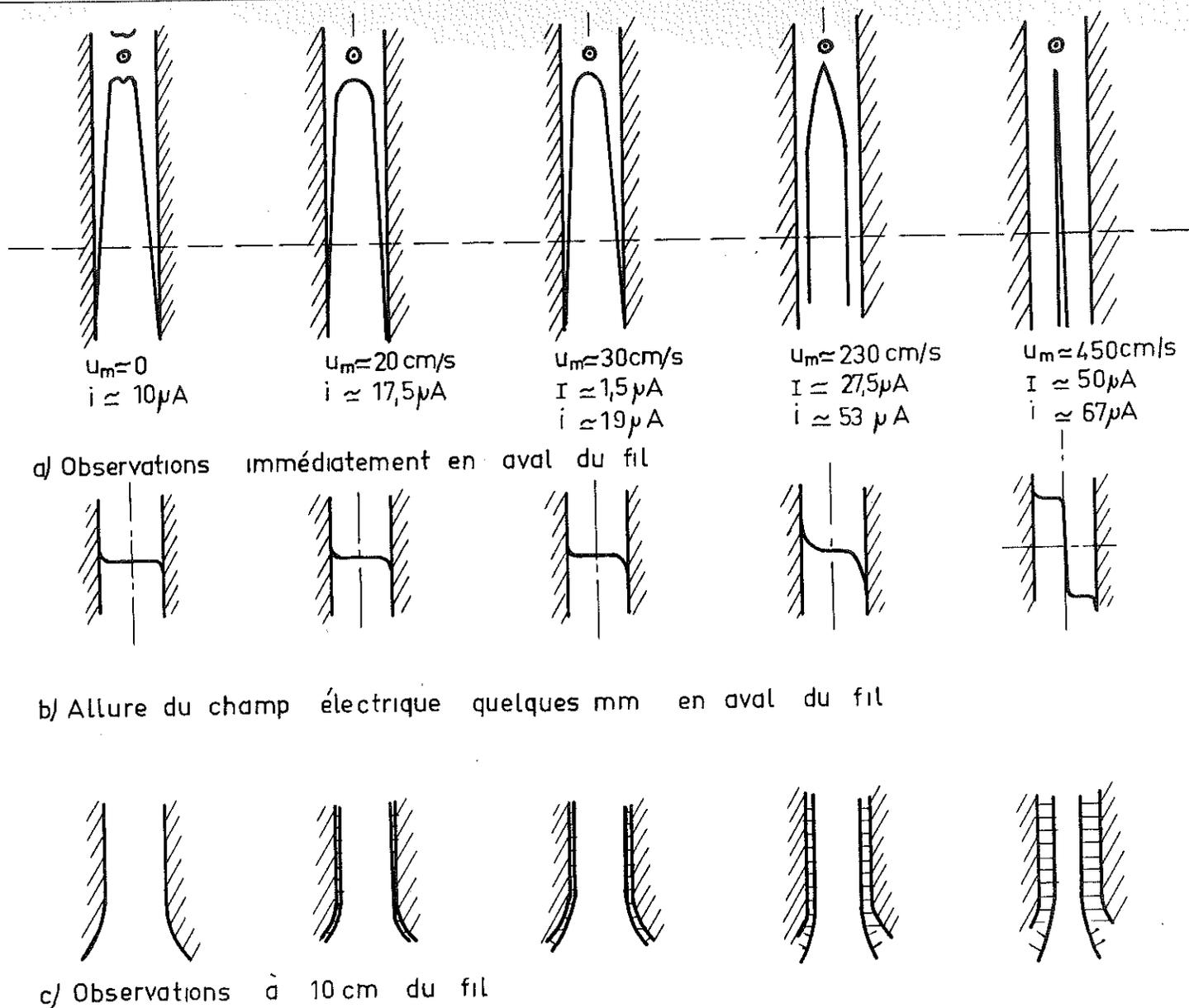


Fig. 73 : Influence de la vitesse du liquide ( $v = \text{cste}$ )

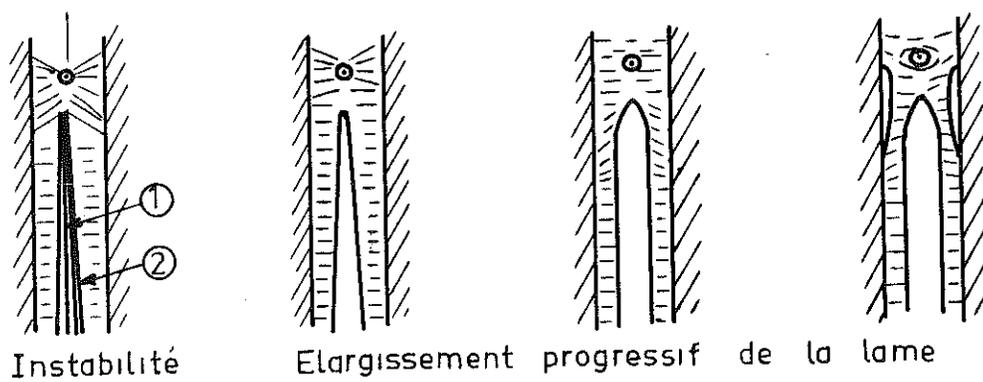


Fig. 74 : Influence de la tension d'excitation ( $u_m = \text{cste}$ )

peut considérer qu'une fraction infime du courant total est capté par les plaques. Le champ bilatéral vaut alors :  $E_N = \frac{2\pi i}{\epsilon u_m l}$  ; avec :  $i = 67 \mu A$  et  $u_m \approx 450 \text{ cm/s}$ , on obtient  $E_N = 43,5 \text{ kV/cm}$ . Or, la couleur bleue observée correspond à un champ compris entre 40 et 50 kV/cm.

Lorsqu'on s'éloigne du fil, on constate que la lame diverge : les ions, soumis à un champ uniforme acquièrent une vitesse  $w = kE$  de direction perpendiculaire à celle de la vitesse du liquide. Un pointé précis permet de déterminer la largeur de la lame à une certaine distance du fil ; on peut en déduire la mobilité des porteurs ; nous avons obtenu avec des vitesses et des champs différents :

$$0,7 \cdot 10^{-4} < k < 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s/V/cm}$$

Remarquons l'excellente concordance de ces valeurs avec celles qui sont généralement admises pour des liquides isolants comparables au Pyralène. Ceci constitue une justification supplémentaire de l'interprétation donnée de l'entraînement des charges.

Pour la vitesse considérée (450 cm/s), à une distance de 2 à 3 cm du fil, la bande de champ nul s'est sensiblement élargie ; le champ de part et d'autre n'est plus uniforme : il est plus intense sur les plaques, car une fraction des charges atteint les parois, et la présence d'une hétérocharge renforce le champ. A très grande distance du fil, c'est-à-dire près de l'extrémité des plaques, on n'observe plus de lame fine, mais une bande de champ faible ou nul, dont la largeur est voisine de 1 mm, de part et d'autre de laquelle règne un champ hétérogène ; ce champ est décroissant en moyenne, lorsqu'on s'éloigne du fil, car une fraction notable des charges est collectée par les plaques (figure 73 c). Près de l'extrémité des plaques on observe une couleur violette bordée de bleu (photographie en couleur n° 3) : le champ moyen est donc compris

entre 30 et 40 kV/cm. Or, le champ calculé d'après le courant recueilli vaut 32,5 kV/cm ; l'accord numérique est encore satisfaisant.

### Influence de la tension d'excitation

Conservons une vitesse constante  $u_m = 450$  cm/s. Si l'on augmente la tension d'excitation, le champ dû aux charges entraînées croît ; la lame diverge plus rapidement ; une observation précise montre qu'elle est également plus large immédiatement en aval du fil, car le champ sur le fil est plus grand. Pour une tension donnée, on observe une instabilité, un "battement" de la lame ; en même temps, on constate une certaine fluctuation des courants. La largeur de la lame à une distance donnée du fil oscille du simple au double, avec une fréquence variable (2 à 3 fois par seconde, ou de temps à autre, au bout de quelques secondes). Les courants  $I$  et  $i$  peuvent varier de 15 % ; on remarque que le rapport  $\frac{I}{i}$  reste sensiblement constant, quoique l'entraînement s'effectue dans des conditions différentes, ce qui montre encore le rôle essentiel de la cinétique de décharge sur les électrodes.

Une telle instabilité peut être observée pour différentes valeurs de la vitesse. Une variation de la tension d'excitation de l'ordre de 5 %, ou une variation de la vitesse de 15 à 20 % ramène à un état stable : ceci se justifie par des considérations sur la pente des courbes  $I(v)_u = \text{cste}$  et  $I(u)_v = \text{cste}$  (cf. Ch. III). Cette instabilité de nature électrohydrodynamique doit résulter de phénomènes d'interaction complexes entre les effets du champ électrique et de l'écoulement. Selon les valeurs relatives des forces hydrodynamiques et des forces électriques, on observera une lame de largeur différente.

Lorsque la tension croît, on n'observe plus de lame fine (figure 74 et photographie en couleur n° 4) l'entraînement s'effectue moins bien : le champ intense sur les parois apparaît à quelques mil-

limètres en aval du fil. Cependant, au voisinage du claquage, on entraîne près de 100  $\mu$ A hors des plaques et le courant total atteint 150  $\mu$ A.

### Analyse fine du champ au voisinage du fil

Pour effectuer cette étude, nous opérons en lumière monochromatique. La visibilité des franges n'est pas très bonne, et on n'retiendra que le caractère qualitatif de l'analyse. Lorsque le liquide est au repos, le champ intense est confiné au voisinage du fil ; quand la vitesse augmente, ce champ s'étend peu à peu à un volume plus important, quand la charge d'espace est entraînée (cf. figure 75).

#### Polarité négative

—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—

Les observations que l'on peut faire sont dans leur ensemble identiques à celles que l'on effectue lorsque la polarité est positive : entraînement des charges sous forme d'une lame étroite, champ intense sur les plaques, etc.... Cependant, pour obtenir les mêmes valeurs des courants qu'en polarité positive, il faut des tensions supérieures : à courant égal, le champ n'est pas uniforme même immédiatement en aval du fil. La zone de champ intense située autour du fil est plus étendue ; l'entraînement s'effectue moins bien et une partie des charges migre rapidement vers les électrodes ; on constate que le rapport  $\frac{I}{I_0}$  est moins élevé - pour un même courant transporté  $I$  - (il se peut également que la cinétique de décharge des ions sur les électrodes soit plus rapide).

La mobilité des ions négatifs évaluée de la même manière que précédemment est  $k_- \approx 10^{-4}$  cm/s/V/cm.

#### Répartition du champ électrique

—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—

dans l'espace ioniseur-collecteur

—o—o—o—o—o—o—o—o—o—o—

Dès que l'on s'éloigne quelque peu du fil, le champ est dirigé selon  $Ox$  ; la composante selon  $Oy$  peut être négligée. Quand

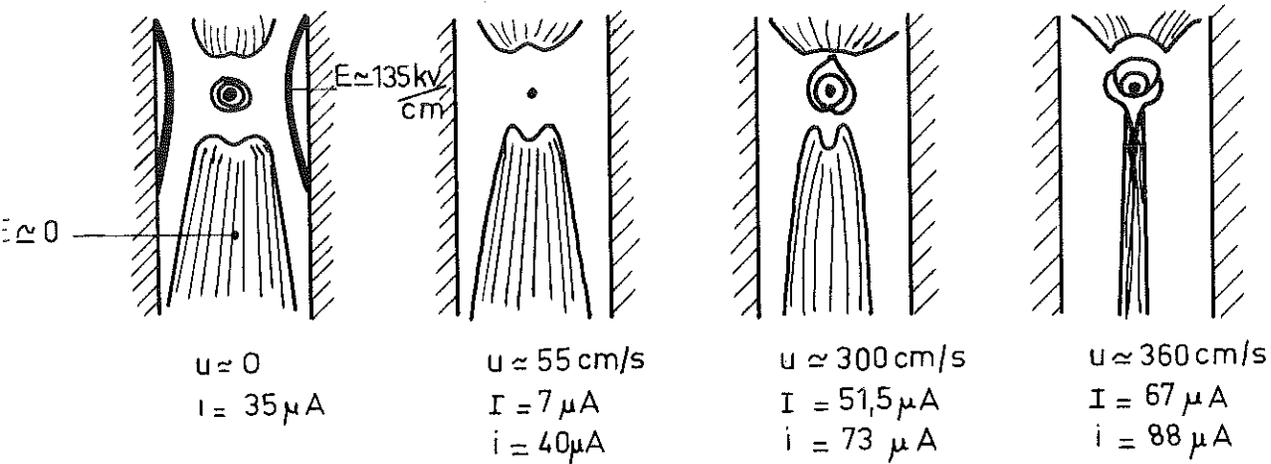


Fig. 75 : Analyse fine du champ au voisinage du fil

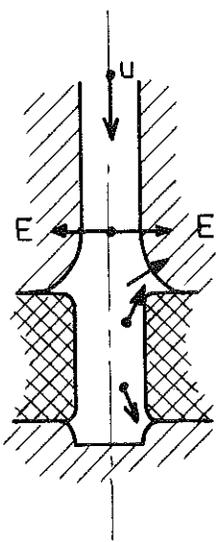


Fig. 76 : Variation de la direction du champ en aval de l'ioniseur

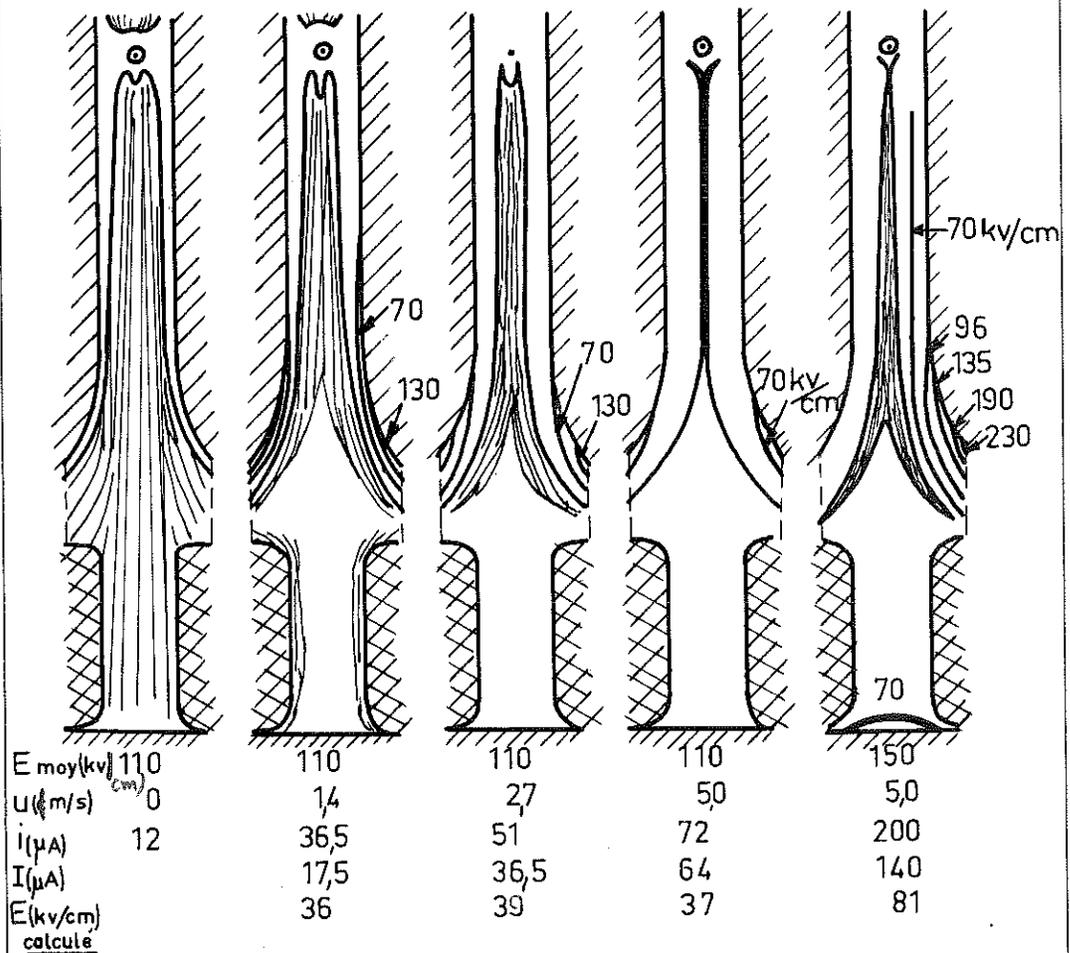


Fig. 77 : Analyse fine du champ à la sortie de l'ioniseur





$j = (u + kE)\rho$  (8), où  $E$  et  $\rho$  sont fonction de  $z$  seul ;  
par ailleurs :

$$\frac{dE}{dz} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (9) \quad (\text{M.K.S.A.})$$

pour  $z = 0$ ,  $\rho = \rho_0$  imposée par l'ioniseur. Le champ  $E$  s'oppose au transfert des porteurs de charge ; à partir de (8) et (9) on peut calculer  $\rho(z)$  et  $E(z)$ . STUETZER distingue deux régimes de fonctionnement ; il introduit un paramètre sans dimension :  $y = \frac{j\epsilon}{2kz_1\rho_0^2}$ .

Lorsque  $y < 0,05$ , la densité de courant  $j$  est limitée par le champ qui s'oppose au transfert de charges (régime I). Lorsque  $y > 0,2$ , la densité de courant  $j$  est limitée par les performances de l'ioniseur, c'est-à-dire par la valeur de  $\rho_0$  (régime II). Il obtient :

$$V_1 \approx \frac{u}{k} z_1 - \left(\frac{8}{9} \frac{j z_1^3}{\epsilon k}\right) \frac{1}{2} \quad (10) : \text{régime I}$$

$$V_1 \approx \frac{u}{k} z_1 - \frac{\rho_0 z_1^2}{3\epsilon} - \frac{j z_1}{\rho_0 k} \quad (11) : \text{régime II}$$

Les calculs sont faits en supposant que  $\rho_0$  demeure constante. Lorsque  $z_1 \rightarrow 0$ ,  $y$  est grand : le régime de fonctionnement est le régime II ; en court-circuit,  $V_1 = 0$  et :

$$j = \rho_0 \cdot u \quad \text{d'où} \quad I = \rho_0 \cdot Q$$

En relevant expérimentalement  $I(Q)$ , Stuetzer observe que  $I$  tend vers une limite pour les faibles tensions d'excitation, donc que  $\rho_0$  n'est pas constante ; cependant, lorsque la tension d'excitation est assez grande,  $\rho_0$  reste sensiblement constante dans la gamme de débits étudiée : ce seul cas de fonctionnement est envisagé.

$$\text{Lorsque } z_1 \neq 0, \quad j \approx \rho_0 u - \frac{k z_1}{3\epsilon} \rho_0^2 \quad (12)$$

Si  $\rho_0 = \text{cste}$ ,  $j$  décroît lorsqu'on éloigne le collecteur de l'ioniseur ; expérimentalement, les résultats le confirment. Cependant les valeurs théoriques et expérimentales sont en désaccord ; pour du kérosène ( $\epsilon = 20 \cdot 10^{-12}$  A.s./V.m.), Stuetzer donne :

$$\rho_0 \approx 0,14 \text{ A.s/m}^3 \quad \text{et} \quad k \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{V.s.}$$

et d'après (10),  $j = 0$  dès que  $z_1 = 1,4$  cm avec  $u = 10\text{m/s}$

Il convient de souligner les points suivants :

1°) La mobilité  $k$  annoncée paraît bien élevée pour un hydrocarbure comme le kérosène, ce qui laisse supposer que ce liquide est assez impur ; en effet, il s'agit d'un produit de pureté ordinaire ("industrial grade"), dont la résistivité n'est pas donnée.

2°) La haute tension d'excitation est appliquée aux pointes des ioniseurs ; si le liquide ne présente pas une résistivité suffisante, il peut exister un courant de conduction pointes-collecteur, et  $\rho_0$  n'est pas réellement la densité de charge transportée.

3°) Les ioniseurs utilisés par Stuetzer sont schématisés figure 79 a et b. D'après ce que nous savons sur le processus d'entraînement des charges, on voit qu'à l'intérieur des ioniseurs, le champ radial est certainement prépondérant ; il ne devient négligeable qu'à une certaine distance en aval de l'ioniseur et non pas pour  $z = 0$ .

4°) L'expression (12), donnant la densité de courant en court-circuit, est déduite de l'expression (10), établie pour le fonctionnement sous tension en supposant que  $V_0$  est négligeable devant  $V_1$  ; en court-circuit,  $V_1 = 0$  ; cette approximation n'est plus valable.

Nous allons reprendre cette étude dans le cas d'un ioniseur fil-plans ; intéressons-nous au fonctionnement en court-circuit, dans le cas où le liquide entraîne des charges positives ; supposons que la composante  $E_y$  prévale entre le collecteur ( $V_c = 0$ ) et une surface au potentiel  $V_e$  que nous supposerons plane et perpendiculaire à  $Oy$  (figure 80). A la sortie de l'ioniseur, le champ est en moyenne dirigé vers les plaques, qui sont à un potentiel négatif par rapport à la terre ; il est ensuite dirigé vers le collecteur : il y a inversion du champ au point d'ordonnée  $-m$ . Dans la région 1, la vitesse relative des porteurs à même sens que celle du liquide ; dans la région 2, elle est de sens contraire. Si l'on suppose que la densité de courant est constante entre ioniseur et collecteur, on a :

$$j = \rho(u + kE)$$

c.g.s.

$$\frac{dE}{dy} = \frac{4\pi\rho}{\epsilon}$$

$$\text{d'où :} \quad E = -\frac{u}{k} + \sqrt{\frac{u^2}{k^2} + \frac{8\pi j}{\epsilon}} (y + m) \quad (13)$$

$$\text{avec la condition :} \quad \frac{u^2}{k^2} + \frac{8\pi j}{\epsilon k} (y + m) \geq 0 \quad (14)$$

indiquant qu'il existe une densité de courant limite pour une vitesse et une distance ioniseur-collecteur données.

$$\text{D'autre part :} \quad V_e - V_c = \int_{-\delta}^0 E(y) dy$$

Tous calculs faits, on obtient :

$$V_e - V_c = -\frac{u}{k} \delta + \frac{2}{3} \left(\frac{u}{k}\right)^3 \frac{\epsilon k}{8\pi j} \left\{ \left[ 1 + \frac{8\pi j}{\epsilon k} \left(\frac{k}{u}\right)^2 m \right]^{\frac{3}{2}} - \left[ 1 + \frac{8\pi j}{\epsilon k} \left(\frac{k}{u}\right)^2 (m - \delta) \right]^{\frac{3}{2}} \right\}$$

Si l'on suppose que :

$$\frac{8\pi j}{\epsilon k} m \ll \frac{u^2}{k^2} \quad \text{et} \quad \frac{8\pi j}{\epsilon k} (m - \delta) \ll \frac{u^2}{k^2}, \quad \text{conditions vérifiées pour}$$

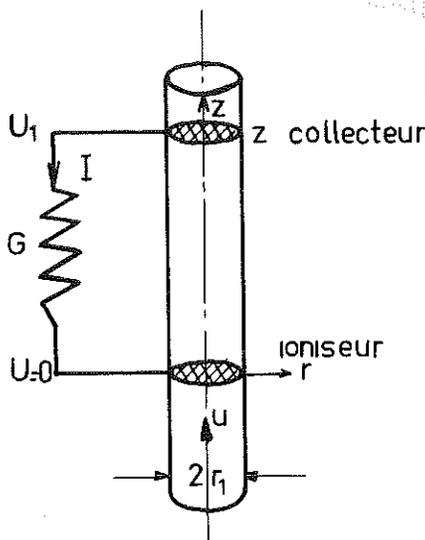


Fig. 78 : Représentation schématique utilisée par O.M. STUETZER (38)

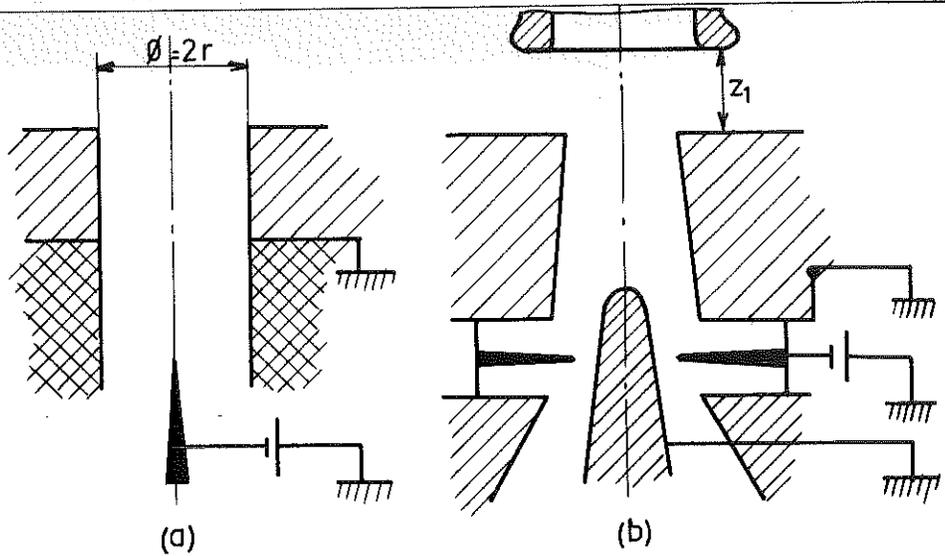


Fig. 79 : Schémas des ioniseurs utilisés par O.M. STUETZER (38)

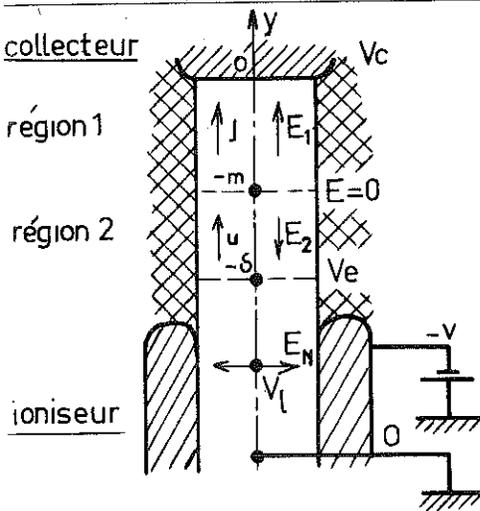


Fig. 80 : Définition des divers paramètres

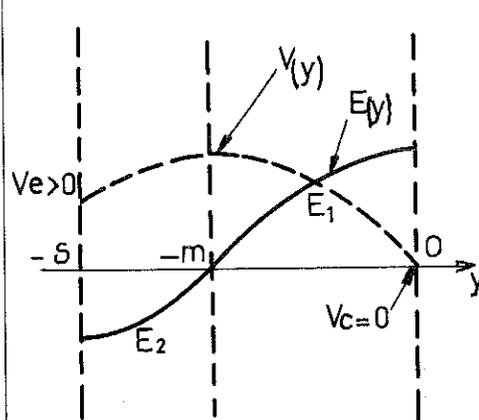


Fig. 81 : Fonctionnement en court-circuit : répartition du champ et du potentiel entre ioniseur et collecteur

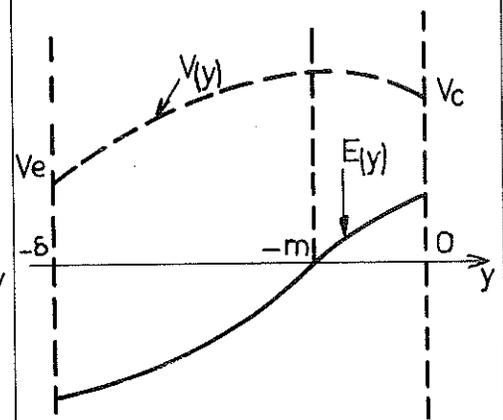
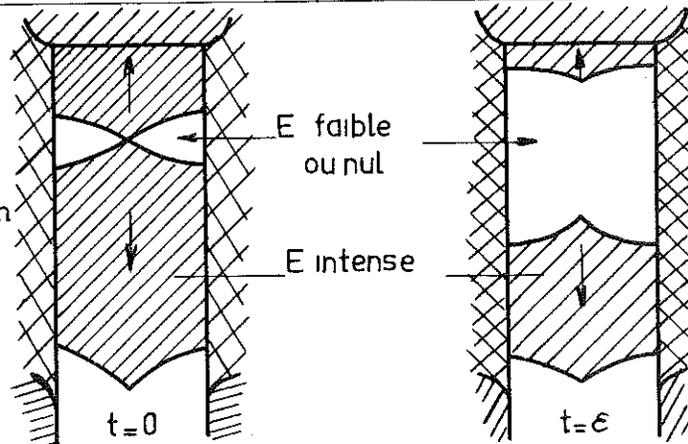


Fig. 82 : Fonctionnement sous tension  $V_c$  : répartition du champ et du potentiel entre ioniseur et collecteur

Fig. 83 : Redistribution du champ électrique entre ioniseur et collecteur après l'application de la tension d'excitation



les valeurs relevées expérimentalement, on a :

$$V_e - V_c \approx \frac{2\pi j}{\epsilon u} \left[ m^2 - (m - \delta)^2 \right]$$

et 
$$j \approx \frac{\epsilon u}{2\pi} \frac{V_e - V_c}{m^2 - (m - \delta)^2} \quad (15)$$

Discussion : Bien entendu, il ne faut retenir que l'aspect qualitatif de cette étude ; les valeurs de  $m$  et  $\delta$  ne peuvent être précisées, mais on peut cependant faire un certain nombre de remarques.

Fonctionnement en court-circuit :  $V_c = 0$

On a alors :

$$j \approx \frac{\epsilon u}{2\pi} \frac{V_e}{m^2 - (m - \delta)^2}$$

Or,  $j$  est positif ; on doit donc avoir :  $\frac{V_e}{m^2 - (m - \delta)^2} > 0$

Si  $V_e > 0$ ,  $m > \frac{\delta}{2}$  ; si  $V_e < 0$ ,  $m < \frac{\delta}{2}$

Pour déterminer le signe de  $V_e$ , on peut s'appuyer sur les remarques suivantes :

- lorsque la tension d'excitation est appliquée au fil, les plaques sont mises à la terre ; le champ normal  $E_N$  dû à la lame chargée est sensiblement uniforme à l'intérieur des plaques : le potentiel de la lame est donc  $V_1 = e \cdot E_N$ , potentiel positif par rapport à la terre ; lorsqu'on s'éloigne de l'ioniseur, ce potentiel croît et  $V_e > V_1$  ; donc  $V_e > 0$ .
- lorsque l'excitation se fait par les plaques, celles-ci sont portées à un potentiel négatif par rapport à la terre ; compte tenu des valeurs expérimentales des champs  $E_N$  que l'on peut obtenir

pour des tensions d'excitation  $v$ , le potentiel  $V_1$  de la lame chargée à l'intérieur des plaques est toujours négatif par rapport à la terre ; cette valeur est peu élevée (quelques kV) et lorsque l'on s'écarte de l'ioniseur le potentiel monte rapidement.

Suivant le montage, les valeurs de  $m$  et  $\delta$  seront différentes et la répartition du champ et du potentiel ne seront pas identiques ; mais qualitativement les phénomènes demeurent analogues : les champs intenses sont localisés au voisinage du collecteur et immédiatement en aval de l'ioniseur (figure 81).

#### Fonctionnement sous tension : $V_c \neq 0$

Nous avons envisagé le cas de charges positives, donc  $V_c > 0$ . Lorsque  $V_c$  croît,  $j$  décroît ; si  $V_e$  reste sensiblement constant,  $m$  doit diminuer ; en fait il est probable que  $V_e$  varie avec  $V_c$  : il est permis de penser que  $V_e$  croît avec  $V_c$ , et que la variation de  $V_c$  est plus rapide que celle de  $V_e$  ;  $m$  doit alors diminuer. Les répartitions du champ et du potentiel dans le cas du fonctionnement sous tension sont schématisées sur la figure 82.

On obtient ainsi, avec certaines hypothèses simplificatrices, une interprétation des phénomènes observés :

a) dans le cas du fonctionnement en court-circuit

- présence d'un champ intense en aval de l'ioniseur et au voisinage du collecteur, champ faible ou nul entre ces deux organes (observations effectuées par effet KERR).

- fléchissement du courant transporté quand la densité de charge est élevée et quand augmente la distance ioniseur-collecteur (Ch. III).

- accroissement des pertes hydrauliques (Ch. III).

b) dans le cas du fonctionnement sous tension

- diminution du champ sur le collecteur et accroissement du champ en aval de l'ioniseur, quand augmente la tension de débit (observations faites par effet KERR).

- fléchissement du courant débité et claquages dans la région chargée à la sortie de l'ioniseur (Ch. III).

Les champs calculés d'après les résultats expérimentaux à l'aide de l'expression (13) sont supérieurs aux champs observés par effet KERR ; l'accord numérique est cependant acceptable, puisqu'il n'y a pas un facteur 2 entre ces valeurs. D'après les remarques que nous avons faites sur la valeur de  $V_e$  lors du fonctionnement en court-circuit (alinéa 1 de la discussion), la puissance absorbée dans le fonctionnement en court-circuit doit être moindre quand l'excitation se fait par le fil, parce que, qualitativement, le champ maximum dans la région 2 est moins élevé ; en effet à vitesse et tension d'excitation égales, la puissance absorbée est inférieure de 30 % environ, à celle que l'on mesure lorsque la tension d'excitation est appliquée aux plaques.

#### d) Autres observations

- Lorsque l'électrode ionisante se trouve contre une paroi du canal, on observe que l'entraînement des charges ne s'effectue pas très bien, car la vitesse du liquide n'est pas assez grande près de cette électrode ; le champ dû aux charges n'est pas uniforme.

- Si, dans le cas d'un ioniseur fil-plans, on ne porte qu'une seule plaque à la haute tension d'excitation, on observe que le champ dû aux charges entraînées est uniforme et dirigé d'un seul côté : la région chargée est assimilable à un plan qui serait recouvert sur une seule de ses faces d'une densité uniforme de charge  $\sigma$  et,  $E = \frac{4\pi\sigma}{\epsilon}$  ;

les champs calculés d'après le courant transporté et les champs observés par effet KERR sont en accord.

- Une différence de potentiel de l'ordre de 5 kV appliquée à un ioniseur fil-plans pour lequel  $2e = 2 \text{ mm}$ , ne permet d'obtenir que de très faibles courants ( $I < 10 \text{ }\mu\text{A}$ ) ; les champs correspondants ne sont pas détectables par effet KERR ; pour une même tension d'excitation, le courant transporté est dans certaines conditions 8 à 10 fois plus grand ; c'est le cas lorsque le liquide entraîne de petites bulles de gaz : on voit alors virer la teinte sensible ; les champs observés correspondent à ceux que l'on calcule d'après les courants recueillis.

- La répartition du champ électrique dans l'espace ioniseur-collecteur n'est pas la même en régime permanent qu'à l'instant initial : en effet, lorsqu'on applique brutalement la tension d'excitation à l'ioniseur le champ est distribué d'une certaine manière ; quelques dixièmes de seconde après l'application de la tension, on assiste à une redistribution du champ électrique : le champ intense est localisé au voisinage de l'ioniseur et du collecteur (figure 83). Cette distribution est moins favorable à l'entraînement des charges car le courant transporté diminue de 20 à 30 % ; la modification du champ est due vraisemblablement à l'apparition sur les parois, par influence, de charges de polarité opposée à celle des charges transportées.

## C O N C L U S I O N

Nous avons montré qu'il était possible d'injecter des charges électriques dans un diélectrique liquide à l'aide d'un champ électrique fortement hétérogène. Les conditions optimales de fonctionnement d'un ioniseur ont été définies. Lorsque la vitesse est suffisante, il a été prouvé que le liquide chargé était assimilable à la courroie ou au rotor d'un générateur à transporteur isolant ; le champ normal au transporteur liquide, calculé d'après le courant recueilli est en accord avec celui que l'on observe par effet KERR.

L'influence de la vitesse du liquide et celle de la tension d'excitation ont été mises en évidence : la densité utile de charge, pour une tension donnée est fonction de la vitesse : les densités maximales que l'on peut obtenir sont atteintes pour des vitesses de rotation raisonnables, voisines de 5 m/s. Ces densités sont intéressantes : 60 à 80 ues pour l'huile de transformateur, ( $\epsilon \approx 2,2$ ), 200 à 250 ues pour le Pyralène 1 499 ( $\epsilon \approx 5,9$ ), plus de 300 ues pour un mélange de nitrobenzène et de Pyralène ( $\epsilon \approx 10$ ) ; cependant, des phénomènes de claquages parasites, engendrés par l'influence des perturbations réciproques du champ électrique et de l'écoulement, limitent les valeurs maximales des densités de charge : ainsi la présence de cavitation ou de bulles de gaz dans le liquide, rend parfois le fonctionnement instable.

Le rôle de la nature et de la pureté du liquide a été souligné : ce dernier doit présenter un temps de relaxation au moins 10 fois supérieur au temps de transfert et une rigidité la plus élevée possible ; celle-ci est fonction de la polarité, et peut être si petite que les densités de charge obtenues sont très faibles (cas de l'huile en polarité positive). Les courants transportés sont plus élevés quand la permittivité est plus grande ; cependant, il apparaît que les courants ne sont dans le rapport des

constantes diélectriques que s'il s'agit de liquides de structure chimique comparable. Dans le cas des liquides polaires, il est difficile d'opérer avec des résistivités très élevées, et plus celles-ci sont élevées meilleur est le fonctionnement. Dans le cas de l'huile minérale, il semble qu'il y ait un optimum de résistivité, au-delà duquel l'injection des charges s'effectue moins bien; ceci suggère que dans le cas d'un liquide polaire, il y a ionisation des molécules du liquide lui-même, tandis que dans le cas d'un liquide non polaire, il s'agit de l'ionisation de molécules d'impuretés que contient le liquide.

L'utilisation de liquides polaires n'est possible qu'en procédant à une purification permanente de ces liquides. Nous avons montré qu'il était possible de maintenir une résistivité élevée ( $> 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ) dans des volumes importants de liquide, en associant résines échangeuses d'ions et électrodialyse. Les investigations ont été faites sur des liquides peu polaires ( $\epsilon \approx 6$  à  $10$ ) ; il est permis de penser que des résultats satisfaisants peuvent être également obtenus avec des liquides de permittivité plus grande.

L'emploi de liquides de haute permittivité pour la génération de hautes tensions continues semble donc possible ; cependant les champs normaux que l'on peut atteindre par injection de charges au sein du liquide ne sont pas très grands ( $< 100 \text{ kV/cm}$ ) ; de plus, les difficultés de contrôle du champ, la nécessité d'employer un grand volume de liquide, la faiblesse du rendement énergétique, rendent assez peu intéressants les générateurs à courant de liquide. Des expériences récentes montrent que dans certaines conditions, on peut obtenir dans des liquides très polaires, des champs de plusieurs centaines de  $\text{kV/cm}$  avec des résistivités supérieures à  $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$  ; ceci permet d'espérer en la réalisation de générateurs électrostatiques à liquide d'un type nouveau, de forte puissance spécifique.

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

- 1 AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS HANDBOOK  
2nd Edition - Mc Graw Hill Book Company Inc. (1963)
- 2 BOUMANS (A.A.)  
Physica XXIII, 1957, 1007
- 3 BRIERE (G.)  
Journ. Phys. et le Rad., 22, 1961, 500
- 4 BRIERE (G.)  
Thèse, Grenoble, 1963, n° 344
- 5 BRIERE (G.) et FELICI (N.)  
C.R. Acad. Sci., 259, 1964, 3237
- 6 BRUHAT (G.)  
Cours de Physique Générale - Optique -  
Masson et Cie, 1959.
- 7 CLARK (F.M.)  
Insulating materials for design and engineering practice.  
J. Wiley and Sons, Inc, 1962, Ch. VIII
- 8 COELHO (R.)  
Bull. Soc. Fr. Elect., 1962, III, 8ème série, 13
- 9 COELHO (R.) and BONO (M.)  
J. Electrochem. Soc., 107, 1960, 2, 94
- 10 COQUILLION (J.)  
Electricité, 1951, n° 170, 63
- 11 COQUILLION (J.)  
Rev. Gen. Elect., 73, 1964, n°11, 565
- 12 COQUILLION (J.)  
Rev. Gen. Elect., 73, 1964, n°12, 603
- 13 CRAGGS (J.D.) and MEEK (J.M.), cités par (38)  
High Voltage Laboratory Technique  
Butterworths Scientific Publications, Ltd, London, 1954, 53
- 14 FELICI (N.)  
Journ. Phys. et le Rad., Vlll, 1947, Série Vlll, 1.
- 15 FELICI (N.)  
C.R. Acad. Sci., 249, 1959, 654
- 16 GARTNER (E.)  
Rev. Gen. Elect., 62, 1953, 71 et 136
- 17 GAVIS (J) and KOSZMAN(I)  
Chem. Engng. Sci., 17, 1962, 123
- 18 GIANNINI (G.M.) and DUCATI (A.C.)  
U.S. Patent Office 1964, 3. 122: 660.
- 19 GOLDSTEIN (S.)  
Modern Developments in fluid dynamics  
Oxford University Press, 1938

- 20 GUILLOU (J.-M.)  
D.E.S., Grenoble, 1964
- 21 JANNER (K.)  
Diplom Arbeit. - Physikalisches Institut des Technischen  
Hochschule - Stuttgart, 1950
- 22 JANNER (K.), MAGUN (S.) und SCHÖPPER (E.)  
Zeit. f. ang. Phys., 7, 1955, 9, 446
- 23 LEWIS (T.J.)  
Progress in Dielectrics  
J. Wiley and Sons, Inc., 1959, 1, 99
- 24 MÖLLER (R.)  
Phys. Zeitsch., 32, 1931, 18, 697.
- 25 MOREAU-HANOT (M.)  
C.R. Acad. Sci., 206, 1938, 1168.
- 26 NGUYEN-TRINH DZOANH.  
Thèse, Paris, 1961, n°4589.
- 27 PAPKOW (A)  
Zeit. f. ang. Phys. , 15, 1963, 2, 170
- 28 PAUTHENIER (M.) et MOREAU-HANOT (M.)  
Journ. Phys. et le Rad., 8, 1937, 193
- 29 PRODELEC , 77 Rue de Miromesnil, PARIS 8e  
Diélectrique PYRALENE, Notices P<sub>10</sub> et P<sub>20</sub>, 1960
- 30 RASKIN (A)  
C. R. Acad. Sci., 208, 1939, 170
- 31 ROUSE (H.)  
Engineering Hydraulics  
J. Wiley and Sons, Inc., 1950.
- 32 SATO (T.) , NAGAO (S.) and TORIYAMA (Y.)  
Brit. J. Appl. Phys., 7, 1956, 297.
- 33 SCHLICHTING (H.)  
Boundary Layer Theory  
Pergamon Press Ltd, 1955.
- 34 SHARBAUGH (A.H.) and WATSON (P.K.)  
Progress in Dielectrics  
J. Wiley and Sons, Inc., 1962, IV, 201.
- 35 SIMON (A. W.)  
Rev. Sci. Instr., 32, 1961, 6, 758.
- 36 STUETZER (O.M.)  
Phys. Fluids, 2, 1959, 642.
- 37 STUETZER (O.M.)  
J. Appl. Phys., 31, 1960, 136
- 38 STUETZER (O.M.)  
Rev. Sci. Instr., 32, 1961, 1, 16

- 39 THOMSON (J.J.)  
Conduction of electricity through gases,  
Cambridge University Press, 1928, I.
- 40 VIRGITTI (J.)  
C. R. Acad. Sci., 206, 1938, 1367.
- 41 VOLLRATH (R. E.)  
Phys. Rev., 42, 1932, 298
- 42 WHITBY (K.T.)  
Rev. Sci. Instr., 32, 1961, 12, 1351
- 43 ZAKY (A.A.) and HOUSE (H.)  
Dielectrics, 1, 1963, 3, 140

## TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>INTRODUCTION</u> .....	1
<u>CHAPITRE I : Principe, Historique et Généralités sur le transfert de charges</u> .....	4
I. Principe de l'étude .....	4
II. Historique .....	4
1°/ Transporteur gazeux .....	4
2°/ Transporteur liquide .....	6
III. Possibilités de création et de transfert de charges électriques dans un diélectrique liquide .....	3
1°/ Séparation des charges .....	8
2°/ Evaluation de la vitesse d'entraînement .....	8
3°/ Détermination du niveau de pureté du liquide .....	9
a) Temps de relaxation .....	9
b) Courant de conduction .....	10
4°/ Champ électrique dû aux charges entraînées .....	10
5°/ Pertes par conduction .....	12
IV. Appareillage et méthodes de mesure .....	13
1°/ Circuits d'étude du transfert de charges .....	13
2°/ Appareillage de mesure .....	14
a) Mesure des vitesses .....	14
b) Mesure des grandeurs électriques .....	14
3°/ Méthodes de mesure .....	15
a) Mesure des résistivités .....	15
b) Procédé de mesure et notations .....	15
V. Conclusions .....	16
<u>CHAPITRE II : Etude du transporteur liquide- Purification ionique du Pyralène</u> .....	17
I. Généralités sur les liquides diélectriques .....	17
1°/ Introduction .....	17
2°/ Aperçu des théories de la conduction dans les liquides diélectriques et discussion sommaire .....	18
3°/ Mobilité des ions dans les liquides isolants .....	20
4°/ Classification des liquides diélectriques .....	21
a) Liquides non polaires .....	21
b) liquides polaires .....	21
5°/ Conclusions .....	22

II. Purification ionique des "Pyralène".....	23
1/ Généralités.....	23
2/ Nature et propriétés des Pyralène - Choix d'un type de Pyralène.....	24
3/ Méthodes d'épuration. Résultats expéri- mentaux.....	26
a) Désionisation du Pyralène par électro- dialyse.....	26
b) Désionisation du Pyralène sur rési- nes échangeuses d'ions.....	30
c) Réalisation pratique d'un circuit d'épuration du Pyralène - Résultats.....	31
d) Conclusion.....	33

CHAPITRE III : Création et transfert de charges dans un  
diélectrique liquide - Etude expérimentale 34

A - Etude du fonctionnement en court-circuit..... 34

I. Critères qui président à l'élaboration et au  
choix d'un ioniseur..... 34

1/ Critères hydrauliques.....	34
a) Ecoulement laminaire - Ecoulement turbulent.....	35
b) Couche limite.....	36
2/ Critères électriques.....	37
3/ Examen des diverses possibilités de sys- tèmes - ioniseurs.....	38
4/ Choix d'un ioniseur.....	40
5/ Réalisation pratique d'un ioniseur fil- plans.....	40
6/ Le système de collection.....	41

II. Etude expérimentale du fonctionnement d'un  
ioniseur..... 41

1/ Rôle de la vitesse de la tension d'exci- tation et de la nature du liquide.....	42
2/ Densité de charge.....	44
3/ Cas des grandes vitesses (>5 m/s).....	44
4/ Influence de la géométrie de l'ioniseur.....	46
5/ Remarques sur le fonctionnement de l'ioni- seur.....	47
a) Nécessité d'obtenir la vitesse maxi- male sur l'électrode ionisante.....	47
b) Répartition de la densité de courant capté par les plaques.....	47
c) Transfert de charges à grande distance du fil.....	48
d) Efficacité du système de charge.....	48

6/ Influence de la pureté du liquide .....	50
7/ Les limitations .....	51
8/ Dispersion des résultats .....	52
9/ Conclusion : obtention de courants intes .....	52
B - Etude du fonctionnement sous tension .....	53
I. Influence de la distance ioniseur - collecteur .....	53
1/ Fonctionnement en court-circuit .....	53
2/ Fonctionnement sous tension .....	55
II. Tentative de contrôle du potentiel entre ioniseur et collecteur. ....	55
III. Remarques sur le rendement énergétique .....	56
 <u>CHAPITRE IV - Etude du champ électrique dans un liquide</u> <u>porteur de charges par l'effet électro-</u> <u>optique de KERR</u> .....	58
I. Introduction .....	58
II. Etude théorique .....	59
1/ Loi de KERR .....	59
2/ Emploi de lumière polarisée .....	60
3/ Discussion et choix d'un mode opératoire .....	61
a) Lumière monochromatique .....	62
b) Lumière blanche .....	62
4/ Conclusion .....	66
III. Etude expérimentale et discussion des résultats .....	66
1/ Evaluation de la constante de KERR du Pyralène I499 .....	66
2/ Description et étalonnage de la cellule de KERR .....	67
3/ Etude de la répartition du champ électrique entre fil et plans lorsque le liquide est au repos .....	70
a) Etude expérimentale .....	70
b) Interprétation et discussion .....	72
4/ Cas où le liquide circule .....	77
a) Plaques dont la largeur est grande devant leur écartement .....	77
b) Cas des plaques courtes .....	82
c) Recherche d'une expression du champ élec- trique dans l'espace ioniseur-collecteur .....	83
d) Autres observations .....	89
 <u>CONCLUSION</u> .....	91
 <u>BIBLIOGRAPHIE</u> .....	93

VU

Grenoble, le

Le Président de la thèse

VU

Grenoble, le

Le Doyen de la Faculté des Sciences

VU, et permis d'imprimer,

Le Recteur de l'Académie de Grenoble