

N° d'ordre

THESE

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

Pierre ATTEN



DEUXIEME THESE

Les forces en électrohydrodynamique



soutenue le 12 novembre 1969. devant la Commission d'examen

MM. L. NEEL

Président

N. FELICI

Examineur

N. GASTINEL

Examineur

THESE

présentée

A LA FACULTE DES SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES PHYSIQUES

par

Pierre ATTEN



DEUXIEME THESE

Les forces en électrohydrodynamique



soutenue le 12 novembre 1969. devant la Commission d'examen

MM. L. NEEL

Président

N. FELICI

Examinateur

N. GASTINEL

Examinateur

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

Bien que l'on sache depuis longtemps qu'un champ électrique exerce des forces sur un liquide diélectrique, l'étude précise des phénomènes hydrodynamiques dus à l'action du champ électrique, à l'exclusion du champ magnétique, n'a guère commencé que depuis une dizaine d'années et la constitution de l'électrohydrodynamique (E.H.D.) en tant que branche autonome de la Physique est très récente. Ceci permet de comprendre pourquoi les connaissances acquises à ce jour sont fort peu répandues et pourquoi il existe certaines confusions concernant la génération des forces.

Après une période pendant laquelle des phénomènes variés, spectaculaires mais peu aisément interprétables furent mis en évidence (par exemple effet Sumoto), des travaux systématiques sur les effets de surface furent entrepris.

Une autre voie qui a mené à l'étude de problèmes électrohydrodynamiques est celle qui a trait aux propriétés de la conduction dans les diélectriques très faiblement conducteurs. Après divers travaux, différents auteurs ont mentionné des "effets" E.H.D. jouant un rôle dans le mécanisme de la conduction. Ainsi, au cours du Colloque sur les Phénomènes de conduction dans les Liquides Isolants qui s'est tenu à GRENOBLE en Septembre 1968, dans le tiers des communications il a été fait allusion à des "effets" E.H.D., ces effets n'étant pas, la plupart du temps, autrement caractérisés que par leur existence.

Lors du Symposium sur l'Electrohydrodynamique
du 31 mars au 2 avril 1969 qui s'est tenu
à CAMBRIDGE (U.S.A.) un vaste échantillonnage des problèmes
E.H.D. a été fourni.

Il est apparu à cette occasion qu'un certain
nombre d'auteurs n'ont pas des idées très claires sur
la nature et l'ordre de grandeur des forces qui agissent
et sur les mécanismes physiques qui engendrent ces forces.

Il paraît utile de faire une étude critique
pour mettre en évidence certaines confusions et insister
sur la nécessité d'avoir un problème bien défini
physiquement avant d'entreprendre des calculs parfois
complexes.

-I- CARACTERISATION DE L' E. H. D.

La délimitation du domaine de l'électrohydrodynamique est assez claire d'après son nom ; il s'agit de l'effet du champ électrique sur **un diélectrique** fluide. PICKARD [1] propose les restrictions suivantes :

i) On ne considère que les forces induites par le champ électrique et susceptibles de provoquer un mouvement macroscopique du fluide **diélectrique** (le champ magnétique étant supposé nul ou négligeable)

ii) Le milieu soumis **au champ** est un **liquide diélectrique de très faible conductivité**.

Le premier caractère n'est pas discutable. MELCHER [2] par exemple développe une étude des ondes **de surface** en considérant les deux cas extrêmes où c'est soit le champ magnétique qui est négligeable (E.H.D.) soit le champ électrique (M.H.D.)

La limitation introduite sur le milieu fluide considéré semble un peu sévère. En effet PICKARD élimine évidemment le mercure mais aussi les liquides moyennement conducteurs comme certaines solutions électrolytiques pour lesquelles OSTROUMOV [3] parle d'effet électrohydrodynamique. D'autre part PICKARD n'envisage pas le cas où le diélectrique fluide est un gaz.

Dans la suite de sa mise au point, cet auteur classe ainsi les principaux effets E.H.D. : phénomène d'électro-osmose, effet Sumoto, effet de rotation, diélectrophorèse, effet d'électroviscosité et pompage par injection.

Les travaux de symposium déjà mentionné [4] permettent de substituer d'autres subdivisions basées sur les caractères hydrodynamiques des problèmes ; schématiquement on peut distinguer les problèmes de volume (avec d'une part les écoulements stationnaires et d'autre part les problèmes de stabilité et de dynamique) et les problèmes concernant les surfaces : (stabilité et dynamique, problème des gouttes).

C'est selon cette classification que sera abordée la discussion critique.

II - LES FORCES

L'expression de la densité de force exercée par le champ électrique E est [1] :

$$F = q E + \frac{1}{2} (\epsilon - \epsilon_0) \text{ grad } E^2$$

q étant la densité volumique de charge et ϵ la permittivité du fluide.

Suivant la terminologie introduite par POHL [5] les forces dues aux charges libres dans le fluide sont appelées électrophorétiques et celles dues à la polarisation, diélectrophorétiques. PICKARD [1] a souligné un certain nombre de caractères qui différencient ces forces. Il montre que dans un volume occupé par un fluide homogène tout travail effectué par les forces électriques est essentiellement d'origine électrophorétique. Les forces diélectrophorétiques, poussant les particules vers les endroits où le champ croît (ou décroît selon les valeurs respectives de ϵ), provoquent au plus un réarrangement et ne peuvent pas fournir un travail continu.

Par exemple, des particules de constante diélectrique supérieure à celle du fluide subissent une force dirigée vers les zones de champ croissant, quelle que soit la direction de ce champ. Lorsqu'elles ont atteint une électrode, elles ne peuvent plus se mouvoir. Il subsiste une force due au gradient du champ électrique ; mais cette force est compensée par un gradient de pression et ne peut pas provoquer un mouvement macroscopique du fluide.

MIDDENDORF et BROWN [6] ont pourtant invoqué ces forces diélectrophorétiques pour expliquer une circulation constante de liquide : il y aurait une association de molécules assez bien ordonnées

de sorte que la constante diélectrique de ce groupe de molécules serait supérieure à celle du liquide environnant. On ne voit cependant pas de quelle manière l'énergie électrique (en tension continue) peut être transférée et ce mécanisme apparaît très discutable.

En tension continue, il apparaît donc qu'un travail permanent ne peut être produit que par les forces électrophorétiques. Par exemple, une particule chargée se dirige vers l'une des électrodes sous l'action du champ. Le contact avec cette électrode peut provoquer la décharge de la particule et une charge de signe opposé qui engendre alors un nouveau mouvement. D'autre part, les mécanismes de création et d'annihilation d'ions sur les électrodes (dans les gaz aussi bien que dans les liquides) permettent "l'injection" d'ions dans le milieu, le passage d'un courant de façon continue et la formation éventuelle d'une charge d'espace ; l'action de la force qE peut provoquer un mouvement.

Il existe une différence entre les phénomènes ayant lieu à une interface (liquide-liquide ou liquide-gaz) et ceux se produisant dans un volume. Alors que sur une interface les forces diélectrophorétiques jouent un grand rôle dans les problèmes de stabilité et de dynamique, rôle équivalent à celui des charges libres, dans la masse du fluide la force essentielle dont il faut tenir compte est celle relative à la charge d'espace. Ce point sera examiné en détail ultérieurement.

On peut obtenir une autre expression de la force utilisée couramment dans la mise en équation (voir par exemple DURAND [7])

$$F = qE - \frac{1}{2} E^2 \text{ grad } \epsilon + \text{grad} \left(\rho \frac{d\epsilon}{d\rho} \frac{E^2}{2} \right)$$

où ρ représente la masse volumique.

Le 3^e terme, lié à l'électrostriction, se combine avec les autres termes de pression.

En plus des forces électriques, il faut tenir compte des forces mécaniques : force de gravitation :

$$F = \rho g$$

g : accélération de la pesanteur

tension superficielle et tensions visqueuses.

Les forces de diffusion sont en général négligées.

L'effet d'un gradient de température est exprimé par les modifications qu'il apporte aux différentes forces examinées (par exemple modification de ρ , ϵ et q).

III - REALISATION PHYSIQUE DES FORCES

Une des difficultés fondamentales de l'électrohydrodynamique réside dans le fait que l'on ne maîtrise pas très bien les forces. PICKARD [1] indique que dans un grand nombre de cas la distinction entre forces électro- et diélectrophorétiques est théorique car pratiquement les 2 types de force interviennent comme par exemple dans l'effet SUMOTO. POHL [8] a rapporté certaines expériences où manifestement les 2 forces agissent de façon simultanée. On peut remarquer que l'effet recherché, celui de la force diélectrophorétique est perturbé par l'action de charges libres créées par un mécanisme non contrôlé.

Il apparaît ici une différence fondamentale avec la situation rencontrée en M.H.D. Alors que les forces magnétiques dues à l'aimantation sont aisément mises en évidence et peuvent être dissociées de l'action des courants, en électrohydrodynamique la production de charges libres est un phénomène très général aussi bien dans les liquides que dans les gaz pour des valeurs moyennes du champ électrique et l'effet des forces diélectrophorétiques est rarement dissociable de celui des forces électrophorétiques.

De plus, la force qE devient très rapidement dominante dès qu'il y a des charges libres. Ce fait est mis en évidence par l'expérience suivante : en approchant une pointe portée à un potentiel pas trop élevé, de poudre d'oxyde de titane dans l'air, on observe une attraction de la poudre (force diélectrophorétique). Si la tension est un peu plus forte, l'effet couronne provoque la création d'ions ; les particules d'oxyde de titane sont alors chargées et repoussées violemment par la force électrophorétique.

A la différence des cas où l'on a des particules dans un fluide ou des problèmes d'interface, les problèmes de volume apparaissent plus simples dans la mesure où les forces diélectrophorétiques sont pratiquement toujours négligeables devant celles dues à la charge d'espace. Ce point très important ne semble pas être perçu par la totalité des auteurs comme en témoigne la courte étude de GELMONT et IOFFE [9] où une étude est entreprise pour montrer qu'une instabilité peut être due à la force diélectrophorétique dans un cas où l'expérience démontre manifestement l'existence d'une charge d'espace [36].

Dans l'expérience examinée par GROSS et PORTER [36] on peut évaluer l'ordre de grandeur de la force due au gradient de ϵ ; les principales caractéristiques sont :

$$E = 1,8 \text{ kV/cm} \quad \Delta T = 12^\circ\text{C} \quad \frac{d\epsilon_r}{dT} \approx 10^{-4}$$

En supposant l'écartement des électrodes égal à 0,5 cm on obtient :

$$|F| = \frac{1}{2} E^2 \text{ grad } \epsilon \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ N/m}^3$$

Calculons le courant dû à des charges unipolaires injectées qui donneraient la même force ; on aurait :

$$F = q E \quad q = \frac{F}{E}$$

La densité de courant correspondant à q (supposé constant dans tout l'intervalle) est :

$$j = K q E$$

la mobilité K est de l'ordre de $10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ pour une huile de viscosité $\eta \sim 0,5$ poise.

D'où :

$$j = 10^{-9} q E \approx 10^{-12} \text{ Amp/m}^2 = 10^{-16} \text{ Amp/cm}^2$$

Ce courant est extrêmement faible si on le compare au courant de conduction ; pour l'huile étudiée on peut estimer que σ est de l'ordre de $10^{-13} \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}$ ce qui donne un courant :

$$i_c = 2 \cdot 10^{-10} \text{ Amp/cm}^2$$

Ainsi, pour une charge d'espace faible, qui par exemple donnerait un courant 100 plus faible que i_c (en admettant que q provienne d'une injection), la force $q E$ serait de l'ordre de plusieurs milliers de fois supérieure à la force due au gradient de σ .

On peut remarquer que ce raisonnement n'est pas généralisable sans précautions au cas des liquides polaires pour lesquels ϵ_r varie rapidement avec la température. Cependant on peut conclure que lorsque la charge d'espace est moyenne, la seule force importante est $q E$.

Le fait de reconnaître l'importance de la force $q E$ ne résoud pourtant pas le problème de l'origine physique des charges.

Alors que dans le cas des gaz l'effet couronne apparaît comme la source pratiquement unique des charges unipolaires, la situation est plus complexe dans le cas des liquides.

Les mécanismes de conduction dans les liquides "isolants" sont encore mal connus. En particulier ces liquides ne présentent pas de conduction ohmique (voir OSTROUMOV [10]).

L'injection de porteurs résultant de phénomènes complexes aux électrodes apparaît comme un mécanisme général pour les liquides diélectriques (voir FELICI [10]) et apporte une contribution non négligeable au courant. En l'état actuel de nos connaissances, il semble pour le moins hasardeux de parler de conductivité et encore plus de gradient de conductivité comme le font certains auteurs qui déduisent de ce gradient l'expression de la charge d'espace.

On voit que la connaissance de la répartition de la densité de charge et par conséquent de la force $q E$ qui s'exerce est très imprécise dans la majorité des cas ; ce fait conduit à des problèmes mal définis d'un point de vue physique et on peut ainsi comprendre que l'étude des phénomènes de volume soit moins avancée que celle des effets de surface.

L'importance du mécanisme d'injection de porteurs dans les liquides permet d'expliquer qualitativement ce qui se passe lorsque la tension est alternative.

Pour des fréquences basses le mécanisme d'injection n'est pas affecté. Au fur et à mesure que la fréquence augmente, la tension moyenne restant la même, la charge d'espace envahit de moins en moins l'espace entre les électrodes et l'effet de la force $q E$ diminue globalement.

Lorsque la fréquence devient suffisamment grande, il semble que le mécanisme d'injection lui-même soit affecté. Ceci se comprend si l'on fait l'hypothèse que le phénomène d'injection demande la formation préalable d'une couche double. Pour de grandes fréquences, cette couche double n'a pas le temps de se former et l'injection n'a plus lieu.

En résumé, lorsque la fréquence augmente, l'effet des charges injectées diminue et disparaît pour de grandes fréquences. Les forces électrophorétiques sont alors éliminées et seules les forces diélectrophorétiques subsistent, ce qui recoupe les observations généralement faites [1] .

IV - STABILITE ET DYNAMIQUE D'INTERFACES -

Les problèmes de stabilité d'interfaces et d'ondes de surface sont étudiés de façon approfondie depuis 1960 environ.

MELCHER [2] a effectué une étude comparative des ondes de surface en électro- et magnéto-hydrodynamique.

Ces problèmes font intervenir les deux types de forces, celles dues à la polarisation et celles résultant de la présence de charges superficielles. Les problèmes sont en général bien définis physiquement et les théories effectuées sont vérifiées de manière tout-à-fait satisfaisante par l'expérience (voir par exemple MELCHER [12 à 15], TAYLOR et MAC EWAN [16] SCHNEIDER, LINDBLAD, HENDRICKS, CROWLEY [17]).

-V- PROBLEMES DE VOLUME : STABILITE

Contrastant avec l'étude des problèmes d'interfaces, l'investigation des effets d'un champ électrique dans la masse d'un fluide se heurte à des difficultés dues à la médiocre définition physique des problèmes. Certains travaux vont être examinés ci-dessous d'un point de vue critique.

a) STABILITE D'UN FLUIDE

Les premières observations de mouvements dus à l'action d'un champ électrique sont dues à VETTIN [21] qui travaillait dans l'air avec de la fumée de tabac. En 1936 AVSEC et LUNTZ [22] ont obtenu des tourbillons électroconvectifs stables dans l'huile. D'autres expériences furent effectuées en soumettant soit de l'huile, soit de l'air à un champ électrique dans des configurations électriques diverses [23 à 27]. La mise en mouvement fut attribuée aux ions existant dans le liquide comme semblaient le prouver les expériences de tourbillons "instantanés" (selon la terminologie de AVSEC) obtenus lorsque les électrodes sont isolées du liquide ou du gaz. Cette interprétation ne peut pas être retenue pour l'état stationnaire, la conductibilité de l'air ou de l'huile apparaissant bien faible. D'autre part la force qui s'exerce n'est pas mentionnée. Ce alors que l'expérience d'injection d'ions par une pointe ionisant l'air au dessus de la surface de l'huile [23] indique l'existence d'une charge d'espace.

MALKUS et VERONIS [28] ont repris les expériences précédentes en signalant l'importance de la force due à la présence d'une charge d'espace; ils se sont ensuite limités à l'interprétation de l'électroconvection en surface.

WATSON et SCHNEIDER ([4] p. 74) ont repris l'expérience consistant à injecter des charges sur la surface libre d'une couche de liquide. En opérant avec un faisceau d'électrons (dans le vide) ils ont obtenus des résultats expérimentaux en bon accord avec la théorie ce qui montre expérimentalement que c'est la force $q E$ qui est essentielle.

Une théorie plus générale a été faite par ATTEN et MOREAU [29,30,31]. Cette étude a été motivée par la définition précise du problème physique; en effet les techniques utilisées au Laboratoire l'Electrostatique permettent de contrôler les phénomènes parasites d'injection par électrodes dans les liquides polaires et de réaliser une injection unipolaire. La théorie a pris en compte un paramètre mesurant l'importance de l'injection. Les résultats expérimentaux [32,33], en accord satisfaisant avec la théorie, montrent que sous forte injection, la tension critique est faible ($V_c \simeq 20 V$ pour le nitrobenzène, $V_c \simeq 200-300 V$ pour liquides non polaires).

Cependant lorsque l'injection est faible, cette tension critique peut prendre des valeurs élevées.

Cette étude permet d'interpréter les expériences d'AVSEC et LUNDTZ [22]. L'injection étant un phénomène très courant dans les liquides [11] il est probable qu'il existe un mécanisme^{de} création de charges sur les électrodes, même dans l'huile. Si l'importance de ce phénomène dépend de

la polarité de l'électrode, une charge d'espace est créée et la force $q E$, pour $V > V_c$, est responsable du mouvement du fluide.

Cette étude montre donc l'importance de l'action d'une charge d'espace et la nécessité de connaître avec précision les mécanismes de création de cette charge d'espace.

b) STABILITE D'UN FLUIDE SOUMIS A UN CHAMP E ET A UN GRADIENT DE TEMPERATURE.

Des études systématiques sur l'utilisation de champs électriques pour améliorer les échanges thermiques ont été effectuées par divers auteurs [34, 35].

Nous nous proposons ici de discuter certains travaux relatifs à la stabilité hydrodynamique et de mettre en évidence le fait que la force $q E$ joue un rôle prépondérant.

GROSS et PORTER [36] ont montré, en chauffant l'électrode supérieure (électrodes planes parallèles et horizontales), que l'huile de transformateur est le siège de mouvements cellulaires bien marqués lorsqu'on applique un champ électrique.

Il a été montré précédemment que la force due au gradient de ϵ résultant du gradient de température est négligeable de vant la force $q E$.

Ce fait est démontré expérimentalement : lorsqu'une tension alternative est appliquée, aucun mouvement cellulaire n'est observé, la force E^2 grade, étant beaucoup trop faible et la charge d'espace ne se développant pas suffisamment.

GROSS et PORTER attribuent la charge d'espace au gradient de la conductivité. En plus des réserves que l'on peut faire sur la définition de la conductibilité pour les liquides diélectriques, il existe un fait qui suggère l'existence d'un phénomène supplémentaire : pour une même valeur de la tension appliquée, l'action de la force électrique est plus intense pour la polarité négative que pour la polarité positive. Ceci indique que la charge d'espace est différente dans les 2 cas. Comme les mobilités des ions positifs et négatifs sont en général très peu différentes, cette observation amène à supposer qu'il existe une injection par les électrodes dont l'effet est différent selon la polarité.

Il apparaît donc que pour pouvoir interpréter de façon satisfaisante les observations, il faudrait connaître de façon plus précise les mécanismes de formation de la charge d'espace.

Des observations du même ordre sont valables pour la critique de l'étude de TURNBULL [37, 38]. Cet auteur examine l'action de la force qE dans un liquide où l'on crée un gradient de température stabilisant. La charge d'espace est attribuée au gradient de conductivité. Si l'étude expérimentale révèle un comportement qualitativement conforme aux prévisions théoriques, l'accord est très médiocre en ce qui concerne les valeurs numériques. TURNBULL fait allusion à des fluctuations de conductivité et aux propriétés peu reproductibles des liquides diélectriques.

Il indique de plus qu'on peut observer une électroconvection sans qu'il existe de différence de température entre les deux électrodes. D'après ce que l'on sait, ceci semble attribuable

à des phénomènes d'injection qui créent une charge spatiale.

Il ressort donc que le problème étudié par TURNBULL est mal défini d'un point de vue physique car les propriétés de la conduction dans le fluide ne sont pas bien connues ni, par conséquent, contrôlées.

VI - PROBLEMES DE VOLUME : DYNAMIQUE

a) EFFET DE POMPAGE

STUETZER [18, 19, 20] a étudié l'effet de pompage obtenu lorsqu'il existe une charge d'espace ; l'action du champ électrique engendre une pression supplémentaire utilisable :

$$P = \int_{r_1}^{r_2} q E \quad ds$$

Les expériences concordent de façon satisfaisante avec la théorie et des pompes basées sur ce principe ont été construites.

PICKARD [39] a repris la théorie en introduisant un paramètre supplémentaire lié aux phénomènes d'injection de porteurs de charge sur une électrode et aux propriétés de conduction du fluide. Il a ainsi indiqué que la pression engendrée peut ne pas dépendre de façon quadratique de la tension.

On peut examiner un autre point dont l'importance semble avoir échappé à la quasi-totalité des auteurs. Dès qu'il existe une charge d'espace notable la tension critique correspondant à la stabilité hydrodynamique est très faible. Dans la pratique la force $q E$ crée un mouvement turbulent très fin du fluide (voir [32] . [40]). Ce fait est mentionné par STUETZER qui néglige son effet en particulier pour l'évaluation du rendement maximum d'une pompe E.H.D. Ce mouvement du fluide qui apparaît comme un phénomène parasite difficilement évitable semble imposer des limites au taux de conversion d'énergie, qu'il s'agisse de pompes (transformation

d'énergie électrique en énergie mécanique) ou de générateurs (transformation inverse). Ce point mériterait une étude précise.

b) EFFETS DIVERS

SOLODOVNICHENKO [41] a rapporté des observations sur un effet de vibration de l'électrode centrale d'un système coaxial; bien qu'aucune interprétation ne soit fournie, les indications **diverses sur l'influence de la nature** l'électrode ainsi que de la polarité de la tension appliquée, permettent de supposer que des phénomènes d'injection ont lieu.

Un autre effet E.H.D. qui souligne l'importance de l'action de la charge d'espace et la nécessité de connaître avec précision les mécanismes d'émission a été étudié par LACROIX [42] .

Un champ tournant de basse fréquence réalisé par un dispositif à six électrodes alimenté par une tension triphasée, engendre dans le nitrobenzène une rotation de la masse du fluide dans le sens inverse à celui du champ.

Cet effet ne peut manifestement pas s'expliquer par l'existence d'un couple du à la conduction propre du liquide.

Une étude expérimentale très précise a permis à LACROIX de montrer que ce sont les phénomènes d'injection sur les électrodes qui sont à l'origine de cette rotation.

L'injection étant différente en tension positive et en tension négative, il est produit une certaine charge d'espace au bout d'une alternance complète, et un mouvement du liquide est engendré au voisinage de l'électrode. Si la fréquence est suffisamment faible, les charges peuvent envahir une grande partie de l'espace soumis au champ.

Si la fréquence est plus élevée, la charge d'espace est confinée au voisinage des électrodes et la mise en mouvement de la masse du liquide se fait par entraînement visqueux.

Signalons enfin que divers auteurs (par exemple CALDERWOOD [43] ont observé des effets E.H.D. accompagnant les phénomènes prédisruptifs et ont indiqué l'importance de ces effets dans le mécanisme du claquage dans les liquides.

Cependant les études ne sont guère développées et il est impossible de dire de quelle façon le mouvement du liquide peut intervenir et s'il faut tenir compte ou non de forces autres que la force $q E$.

Dans les gaz, les effets E.H.D. jouent un rôle minime dans le mécanisme du claquage, ce qui n'est pas surprenant étant donné la différence complète de comportement des liquides et des gaz soumis à la force $q E$ (voir FELICI [44]).

C O N C L U S I O N

En électrohydrodynamique on rencontre 2 catégories de forces d'origine électrique, les forces électrophorétiques dues à l'existence de charges libres et les forces diélectrophorétiques provenant de la polarisation des diélectriques. Dans la pratique les effets des forces diélectrophorétiques, faibles, sont presque toujours masqués par les effets plus importants produits par la force $q E$; ceci est dû d'une part aux grandes valeurs des forces s'exerçant sur les charges libres et d'autre part à la relative facilité avec laquelle des porteurs de charge sont créés aux électrodes. En haute fréquence ce phénomène d'injection ne se produisant plus, les forces diélectrophorétiques subsistent seules comme l'indiquent certaines expériences. En basse fréquence et en tension continue on peut conclure que la force $q E$ exerce une influence prépondérante dans la plupart des problèmes et que l'on peut, par conséquent, négliger les autres forces.

L'examen de quelques problèmes a montré qu'il est nécessaire de connaître les mécanismes de création de charges d'espace afin d'examiner des problèmes bien définis d'un point de vue physique.

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

- [1] W.F. PICKARD - Progr. Dielectrics, Vol. 6 - Heywood London (1965)
- [2] J.R. MELCHER - Field-coupled surface waves - M.I.T. Cambridge (1963)
- [3] G.A. OSTROUMOV - Soviet Phys. J.E.T.P. 2, 428 (1956)
- [4] Proceedings International Symposium on Electrodynamics M.I.T. Cambridge (Mass.) (1969)
- [5] H.A. POHL - J. Appl. Phys. 29, 1182 (1958)
- [6] W.H. MIDDENDORF, G.H. BROWN - Trans. Amer. Inst. elect. Engrs 77 III, 795 (1958)
- [7] E. DURAND - Electrostatique, tome III, Masson et C^{ie} Paris (1964)
- [8] H.A. POHL - J. Appl. Phys. 29, 8, 1182 (1958)
- [9] B.L. GELMONT, IV. IOFFE - Phys. Letters 26 A, 6, 253 (1968)
- [10] G.A. OSTROUMOV - Sov. Phys. J.E.T.P. 14, 2, 317 (1962)
- [11] N. FELICI - Comm. au Colloque sur les phénomènes de conduction dans les liquides isolants, Grenoble (1968)
- [12] J.R. MELCHER - Phys. Fluids 4, 1348 (1961)
- [13] J.R. MELCHER - Phys. Fluids 8, 1668 (1965)
- [14] J.R. MELCHER - Phys. Fluids 9, 1548 (1966)
- [15] J.R. MELCHER - Phys. Fluids 10, 325 (1967)
- [16] G.I. TAYLOR, A.D. Mc EWAN - J. Fluid Mech. 22, part 1, 1 (1965)

- [17] J.M. SCHNEIDER, N.R. LINDBLAD, C.D. HENDRICKS, J.M. CROWLEY - J. Appl. Phys. 38, 2599 (1967)
- [18] O.M. STUETZER - J. Appl. Phys. 30, 7, 984 (1959)
- [19] O.M. STUETZER - J. Appli. Phys. 31, 1, 136 (1960)
- [20] O.M. STUETZER - Phys. Fluids 6, 190 (1963)
- [21] F. VETTIN - Meteor. Z. 3, 38 (1886)
- [22] D. AVSEC, L. LUNTZ - C.R. Acad: Sc. 203, 1140 (1936)
- [23] D. AVSEC, L. LUNTZ - C.R. Acad Sc. 204, 420 (1937)
- [24] D. AVSEC, L. LUNTZ - C.R. Acad. Sc. 204, 757 (1937)
- [25] L. LUNTZ - C.R. Acad. Sc. 208, 1886 (1939)
- [26] D. AVSEC - C.R. Acad. Sc. 209, 750 (1939)
- [27] D. AVSEC - C.R. Acad. Sc. 209, 869 (1939)
- [28] W.V. MALKUS, G. VERONIS - Phys. Fluids 4, 13 (1961)
- [29] P. ATTEN, R. MOREAU - C.R. Acad. Sc. 269 A, 433 (1969)
- [30] P. ATTEN, R. MOREAU - C.R. Acad Sc. 269 A, 469 (1969)
- [31] P. ATTEN, R. MOREAU - C.R. Acad. Sc. à paraître
- [32] J.C. FILIPPINI, J.P. GOSSE, J.C. LACROIX, R. TOBAZEON - C.R. Acad. Sci. 269 B, 167 (1969)
- [33] J.C. FILIPPINI, J.P. GOSSE, J.C. LACROIX, R. TOBAZEON - C.R. Acad. Sci. 269 B, Oct. (1969)

- [34] R. ASHMANN, R. KONIG - Appl. Sci. Res. A2, 235 (1950)
- [35] L. BOCHIROL, E. BONJOUR, R. LAGNIER, L. VERDIER, L. WEIL - Rapport C.E.A. n° 1857 (1961)
- [36] M.J. GROSS, J.E. PORTER - Nature 212, 1343 (1966)
- [37] R.J. TURNBULL - Phys. Fluids 11, 2588 (1968)
- [38] R.J. TURNBULL - Phys. Fluids 11, 2597 (1968)
- [39] W.F. PICKARD - J. Appl. Phys. 34, 246 (1963)
- [40] J.P. GOSSE - Thèse de Doctorat, Grenoble (1969)
- [41] I.M. SOLODOVNICHENKO, V.P. ZHMURO - Russien, J. Phys. Chem. 41, 8, 1086 (1967)
- [42] J.C. LACROIX - Thèse 3ème cycle Grenoble (à paraître)
- [43] C.W. SMITH, J.H. CALERWOOD - Communication au Colloque sur les Phénomènes de conduction dans les liquides isolants Grenoble (1968)
- [44] N. FELICI - R.G.E. 78, 717 (1969)

