

CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

TOULOUSE, LE 17 novembre 1981

N° 0273 CT/GEPAN

**NOTE
TECHNIQUE**

N° 9

**LA MAGNETOHYDRODYNAMIQUE,
ÉTAT DE L'ART ET
PREMIERES EXPÉRIENCES PROBATOIRES
D'APPLICATION PROPULSIVE**

Bernard ZAPPOLI



GROUPE D'ETUDES

DES PHENOMENES AÉROSPATIAUX NON IDENTIFIÉS

SOMMAIRE

INTRODUCTION

CHAPITRE 1 - TOUR D'HORIZON SUR LA M.H.D.

1. - LA CONVERSION MHD

1.1. - ASPECT TECHNIQUE : PRINCIPE ET INTÉRÊTS

1.2. - LA POLITIQUE DE LA CONVERSION MHD AUX USA ET EN URSS

1.3. - SES LABORATOIRES ET ÉTUDES SUR LA CONVERSION MHD DANS LE MONDE

1.3.A. - URSS

1.3.A.1. - Études sur le cycle ouvert

1.3.A.2. - Études sur le cycle fermé

1.3.B. - USA

1.3.B.1. - Etudes sur le cycle ouvert

1.3.B.2. - Études sur le cycle fermé

1.3.C. - JAPON

1.3.D. - AUTRES PAYS

1.4. - PROBLÈMES RENCONTRÉS ET SOLUTIONS

1.4.A. - CYCLES OUVERTS

1.4.B. - CYCLES FERMES

2. LA FUSION THERMONUCLÉAIRE

2.1. - ASPECT TECHNIQUE : PRINCIPES ET INTÉRÊTS

2.1.A. - LA FUSION : GÉNÉRALITÉS

2.1.B. - LA FILIÈRE MHD

2.2. - HISTORIQUE DES RECHERCHES

2.3. - PROBLÈMES RENCONTRÉS

3. - LA MÉTALLURGIE PANS LES MÉTAUX LIQUIDES

3.1. - LES APPLICATIONS A LA MÉTALLURGIE

- 3.1.A. - MESURES DU DÉBIT DE COULES DES MÉTAUX EN FUSION
- 3.1.B. - POMPAGE DE MÉTAUX LIQUIDES
- 3.1.C. - PURIFICATION DES MÉTAUX
- 3.1.D. - BRASSAGE ÉLECTROMAGNÉTIQUE
- 3.1.E. - AUTOMATISATION DES COULÉES

3.2. - APPLICATION À L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

4. - LA PROPULSION MHD ET LES APPLICATIONS AÉRONAUTIQUES

4.1. - APPLICATIONS NAVALES

4.2. - APPLICATIONS AÉRONAUTIQUES

- 4.2.A. - PROPULSION PAR RÉACTION
- 4.2.B. - PROPULSION PAR ACTION SUR LE FLUIDE AMBIANT
- 4.2.C. - FREINAGE MHD

5. - L'OPTION MHD

CHAPITRE 2 - ACTION MHD SUR L'ONDE D'ÉTRAVE D'UN CYLINDRE

1. - PRINCIPE

2. - ACTION SUR LA VAGUE D'ÉTRAVE

- 2.1. - DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL
- 2.2. - EXPÉRIMENTATION
 - 2.2.A. - PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES
 - 2.2.B. - GRANDEURS CARACTÉRISTIQUES
 - 2.2.C. - CONSTATATIONS
- 2.3. - ESSAI DE MODÉLISATION

3. - VISUALISATION DES LIGNES DE COURANT

- 3.1. - DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL
- 3.2. - EXPÉRIMENTATION
 - 3.2.A. - CONSTATATIONS
- 3.3. - ESSAI DE MODÉLISATION

CONCLUSION
RÉFÉRENCES
ANNEXES

INTRODUCTION

Jusqu'à présent, les Notes Techniques éditées par le GEPAN ont toutes porté sur les analyses effectuées sur les données relatives aux phénomènes aérospatiaux non-identifiés. Dans la pratique, il s'agissait de résultats d'enquêtes spécifiques, soit de résultats d'analyses statistiques effectuées sur l'ensemble des témoignages.

Ce travail s'est effectué sur certains principes méthodologiques exposés dans la Note Technique N°3 (Chap. 2) et représentés par un schéma tétraédrique. Désignant clairement les différents éléments (discours, choses, personnes) disponibles pour les études, ces principes ont mis l'accent sur les relations à explorer entre ces discours, ces choses et ces personnes si l'on veut arriver à comprendre chacun d'eux et finalement l'événement (les stimuli) à la source première de l'information.

Ces principes ne se sont fondés sur aucune hypothèse posée a priori sur la nature de ces stimuli, hypothèses qui ont entraîné une orientation particulière de la recherche.

Ce choix (ou plutôt cette absence de choix) a été volontaire car il allait de pair avec l'intuition que les stimuli en cause n'avaient aucune raison, a priori, d'être tous de même nature. A posteriori, les résultats des enquêtes n'ont fait que confirmer cette intuition.

Cependant, les résultats obtenus jusqu'à présent, tant sur le plan des analyses spécifiques (études de cas) que sur celui des traitements globaux, ont fait émerger un certain nombre d'idées susceptibles d'être traduites sous forme de modèles théoriques, dans les domaines les plus divers tels que la physique ou la psychologie de la perception (des réflexions concernant la psychologie de la perception seront présentées dans la Note Technique N°10). Pour chaque modèle théorique ainsi conçu, le travail devait consister d'abord à explorer les connaissances déjà acquises dans le domaine considéré, à y situer les idées proposées afin d'en déceler la compatibilité et l'originalité vis-à-vis de recherches antérieures, et à élaborer quelques expériences probatoires. A partir de ce moment là, un tel modèle théorique peut devenir une hypothèse de travail et rentrer dans une démarche de recherche scientifique plus classique, c'est-à-dire s'appuyer sur le développement simultané et complémentaire de la théorie et de sa confirmation expérimentale.

Ne cherchant pas à se justifier par des observations occasionnelles dont les conditions précises sont difficiles à contrôler, de telles théories pourront acquérir un poids scientifique plus grand mais en retour, ne pourront pas nécessairement être utilisées pour interpréter des observations antérieures.

Au chapitre des caractéristiques que l'on rencontre fréquemment dans des descriptions de phénomènes aérospatiaux non-identifiés, certaines concernent leurs déplacements présentés comme rapides, silencieux et saccadés sans qu'ils soient pour autant accompagnés des effets aérodynamiques classiques (effet de souffle, turbulences, ondes de choc, etc.).

La question se pose donc de savoir s'il serait possible d'envisager un système physique solide ayant le même type de comportement et des interactions analogues avec le fluide ambiant. Plusieurs théories ont été proposées dans ce sens ; en particulier, M. JP. PETIT a suggéré un modèle fondé sur les principes de la magnétohydrodynamique.

Tout en situant ces idées nouvelles dans le cadre d'un tour d'horizon historique et technique de la MHD, cette note en rappelle les principes fondamentaux et présente quelques constatations expérimentales qualitatives et phénoménologiques.

CHAPITRE 1 - TOUR D'HORIZON SUR LA MHD

La magnétohydrodynamique (MHD) est un domaine très vaste de la physique qui concerne l'interaction entre un champ électromagnétique et un fluide conducteur de l'électricité. Ainsi, on conçoit aisément que, suivant le type d'interaction, on puisse trouver la MHD liée aux problèmes apparemment disjoints de la couronne solaire, de la magnétosphère, de la conversion d'énergie fossile en énergie électrique, de la fusion thermonucléaire de la propulsion ou encore aux techniques industrielles de la métallurgie.

Cependant, la MHD est plus connue pour son application à la conversion d'énergie fossile en énergie électrique sans pièces mobiles ou tournantes qui a suscité, dans les années 60, beaucoup d'espoirs malheureusement déçus. Bien que les recherches entreprises alors aient donné lieu à des retombées technologiques dans d'autres domaines et en particulier celui des Hautes Températures, il n'en demeure pas moins que ces espoirs ont été déçus, d'autant plus amèrement que les capitaux investis dans ces recherches n'ont pu déboucher sur des applications au bilan industriel franchement positif. C'est sans doute pourquoi la conscience collective de la communauté scientifique et industrielle, se focalisant sur l'aspect conversion et ses problèmes, perçoit la MHD de façon généralement restrictive et négative.

Le but de ce tour d'horizon de la MHD n'est pas de lever les tabous si tant est qu'il y en ait, ni de se poser en avocat de la défense, si tant est qu'il y ait procès, mais au contraire de rappeler la grande diversité des domaines d'intérêts de la MHD, des intérêts relatifs qu'on leur a accordé dans différents pays, et enfin, d'examiner pour chacun d'eux, et notamment pour la conversion et la fusion, les difficultés technologiques et les solutions qui peuvent être envisagées, compte tenu des nouvelles techniques existantes.

C'est aussi dans cet esprit que sont exposées par la suite certaines idées nouvelles concernant l'analogie hydraulique de l'interaction d'un champ de forces de Laplace avec l'onde de choc en régime d'écoulement supersonique.

1. - LA CONVERSION MHD

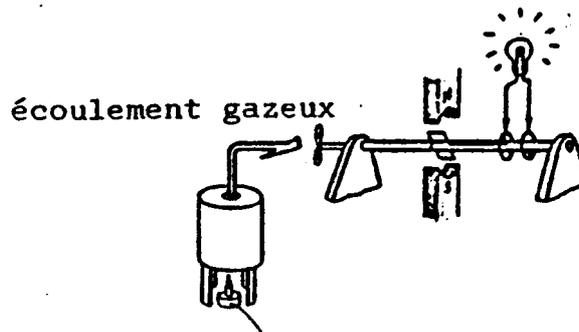
1.1. - ASPECT TECHNIQUE : PRINCIPES ET INTÉRÊTS, DIFFÉRENTES SOLUTIONS

La notion de conversion MHD remonte à FARADAY qui, en plaçant des électrodes dans une rivière d'eau saumâtre, convenablement orientée par rapport au champ magnétique terrestre, recueille un faible courant induit.

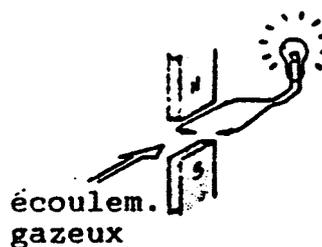
Le remplacement de l'eau saumâtre par un gaz conducteur à très grande vitesse dans un champ magnétique intense a transformé rapidement l'idée de FARADAY en générateur électrique dans lequel les pièces tournantes étaient remplacées par un fluide conducteur et pour lequel les prévisions théoriques de rendement sont très élevées ($\approx 60\%$).

Le schéma est donc le suivant :

TURBO GÉNÉRATEUR



GÉNÉRATEUR MHD



L'intérêt de ce procédé réside essentiellement dans le rendement qui a priori est très élevé, car le principe MHD supprime deux étapes intermédiaires pleines d'irrégularités et croqueuses de rendement la production de vapeur d'eau et la mise en rotation de turbines.

Cependant, la réunion des deux procédés est tout à fait séduisante les gaz chauds ayant cédé une part de leur énergie cinétique servent de source chaude à un turbo-générateur conventionnel.

On distingue deux grandes classes de générateurs MHD :

- les générateurs à cycle ouvert pour lesquels le fluide qui provient de la combustion du charbon, du fuel ou du gaz naturel, est libéré dans l'atmosphère après passage dans le convertisseur MHD,
- les générateurs à cycle fermé pour lesquels le fluide de conversion (gaz ou métal liquide) est réutilisé et qui se prêtent bien à l'utilisation de l'énergie de refroidissement des réacteurs nucléaires.

1.2. - POLITIQUE MHD AUX USA ET EN URSS (G. RUDINS, 1974)

Les pays occidentaux et surtout européens ont considérablement ralenti (FR) même arrêté (GB) leur programme MHD à la fin des années 60, en raison des difficultés rencontrées et du faible coût des hydrocarbures.

Seuls les Soviétiques ont poursuivi la mise en oeuvre d'un programme ambitieux avec, comme centre principal, l'Institut des Hautes Températures et sont ainsi parvenus à construire une centrale expérimentale de 25 MW. Or, depuis la sensibilisation des Gouvernements aux problèmes de l'énergie et de la pollution, il s'est produit un renversement d'attitude vis-à-vis de la MHD.

Les Etats-Unis, qui disposent, comme l'URSS, de vastes réserves de charbon et de gaz naturel, ont relancé très vigoureusement leur programme ; ainsi, l'ERDA (Ministère de l'Energie) a débloqué 40 millions de \$ en 1971 pour la construction d'une centrale de 50 MW dans le MONTANA. Cette centrale à cycle ouvert utilise comme combustible du charbon gazéifié provenant de très riches gisements de charbon de cette région.

D'autre part, une collaboration soviéto-américaine s'est développée sous le patronage, en URSS, de l'Institut des Hautes Températures et aux Etats-Unis, de la Division du Charbon du Ministère de l'Intérieur.

Les principaux points portent sur l'échange d'information, la réunion de colloques, des recherches théoriques et expérimentales communes (en particulier sur les tenues de matériaux et des essais d'équipements).

Toutefois, en 1981, l'Administration du Président REAGAN a décidé de diminuer le financement fédéral des recherches fondamentales en conversion MHD, confiant ainsi aux industries privées le soin de développer les applications à partir des connaissances déjà acquises.

1.3. - LES LABORATOIRES ET LES ÉTUDES MHD DANS LE MONDE

1.3.A. - URSS (S. WHITE, 1975)

1.3.A.1. - Etudes sur le cycle ouvert

L'Institut de Physique des Hautes Températures avec ses 2500 chercheurs est, à MOSCOU, le grand centre de la MHD en cycle ouvert.

Deux installations expérimentales ont été construites près de MOSCOU par cet Institut :

- **U02** : installation maquette, la plus ancienne, construite pour expérimenter divers types de conversions et pour étudier les matériaux (céramiques) constituant les électrodes. La puissance maximale du générateur est de 75 KW et la durée maximale de fonctionnement continu 300 heures.
- **U25** : véritable usine pilote, fonctionnant au gaz naturel. Le carburant est de l'air atmosphérique enrichi à 40 % en oxygène et porté à la température de 1200°C avant d'être mélangé dans la chambre de combustion avec le gaz naturel et la semence (à base de potassium) destinée à augmenter la conductivité des produits de combustion. Après leur passage dans la tuyère, où ils sont soumis à l'action des aimants et fournissent la majeure partie de leur énergie, ces derniers sont épurés et rejetés dans l'atmosphère.

L'installation a été prévue pour fournir 25 MW, puissance nominale qui a été atteinte au milieu de l'année 1976. Jusqu'en 1977, 60 cycles de fonctionnement en régime MHD ont été réalisés (durée maximale atteinte = 100 heures). La durée totale de fonctionnement (en 1977) était de 400 heures dont 200 consacrées à la fourniture d'énergie électrique sur le réseau d'alimentation de MOSCOU. Les Soviétiques ont annoncé la mise au point d'une centrale commerciale pour 1981.

1.3.A.2. - Etudes sur le cycle fermé

Le cycle fermé utilise comme fluide conducteur un métal liquide porté à une température comprise entre 800° et 1150°C. La chaleur peut être fournie par la combustion de fuel, ou par un réacteur nucléaire. Toutefois, il n'existe pas encore de réacteur nucléaire dont la température caractéristique (température du fluide refroidisseur) soit aussi élevée. Le réacteur de fusion, quand il fonctionnera, pourra vraisemblablement utiliser le procédé MHD comme technique de conversion de sa chaleur en électricité.

Tous ces éléments font que la MHD à cycle fermé est un sujet d'études à plus long terme que la MHD à cycle ouvert.

Les Soviétiques mènent des recherches à ce sujet à l'Institut des Hautes Températures et à l'Institut KRZHIZHANOVSKY.

1.3.B. - USA

1.3.B.1. - Etudes sur le cycle ouvert (US CONGRES REPORT, 80)

Les USA sont intéressés par le cycle ouvert, procédé particulièrement adapté à l'utilisation de leurs importantes réserves de charbon. La construction de l'usine expérimentale du MONTANA en est l'illustration.

Les premiers à travailler sur la MHD aux USA furent WESTINGHOUSE et AVCO. Le programme actuellement en cours chez AVCO comporte l'étude, du générateur MHD et des éléments annexes d'une usine MHD. Le générateur expérimental Mark VI a été construit pour déterminer les paramètres du canal d'une usine pilote. Il comporte deux canaux : A et B.

L'un a fourni en 75 heures une puissance moyenne de 300 KW, l'autre a fonctionné 36 heures à la puissance de 350 KW.

Des aimants supraconducteurs très puissants sont également expérimentés.

Des études sur la MHD sont également en cours à l'Université du TENNESSEE (Space Institute) où un générateur MHD expérimental a été construit.

Enfin, le DOE (Department of Energy) a demandé en 1976 à AVCO Général Electric et Westinghouse de préparer un projet de grande installation pilote (de 200 à 300 MW thermiques).

1.3.B.2. - Etudes sur le cycle fermé (M. M. SHRYTER)

Des laboratoires de recherches de "Général Electric" travaillent sur un type de générateur MHD en cycle fermé (utilisant un fuel fossile).

La MHD à métal liquide est étudiée au laboratoire d'Argonne et on doit songer à son application à la propulsion de sous-marins nucléaires (G. RUDINS, 1974).

1.3.C. - JAPON (S. SHIODA)

Les japonais sont, eux aussi, très intéressés par la MHD, dont le rendement élevé est susceptible de permettre des économies de combustible. D'autre part, la faible teneur en soufre des gaz brûlés lève un des obstacles s'opposant à l'utilisation du charbon dans un pays aussi atteint par la pollution.

Le projet global établi par le MITI (Ministère de l'Industrie et du Commerce) met l'accent sur le "cycle ouvert". Le Laboratoire National Electronique appartenant au MITI assure la direction d'ensemble des recherches auxquelles participent des compagnies privées (HITACHI, TOSHIBA, MITSUBISHI DENHSI, FUJI DENHSI). Six installations (Mark 1 à Mark 6) ont été réalisées, certaines étant destinées à des essais de courte durée à forte puissance, d'autres à des essais de longue durée à faible puissance.

- Mark 6, la plus récente, a été conçue pour produire une forte puissance sur une longue durée. Fonctionnant au fuel, c'est une installation complète dotée de tous les éléments de base.

Après une phase d'études qui s'est terminée en 1975 sur de bons résultats, le MITI a décidé de passer à une deuxième phase en 1976. Le coût prévisionnel du programme établi pour sept ans sera de 12 milliards de yens (100 Yens = 1 F 50). Il comprend la construction de deux installations expérimentales Mark 7 et Mark 8.

- Mark 7 (champ magnétique 2.5 T, puissance 100 KW) doit permettre d'éprouver l'endurance des canaux MHD lors de fonctionnements continus de 200 heures.
- Mark 8 (4.5 T, 100 KW) sera une installation beaucoup plus complète, avec réchauffeur d'air.

Les étapes suivantes prévoient la construction d'une unité pilote de 10 MW, puis d'une usine expérimentale de 100 à 2000 MW.

1.3.D. - AUTRES PAYS

La RFA a constamment maintenu un haut niveau de recherches en MHD et sa démarche paraît calquée, avec cinq ans de retard, sur celle de l'URSS.

Les recherches se sont déroulées en POLOGNE de 1964 à 1980. Un des éléments importants du programme Polonais a été la construction à Swieck d'un réchauffeur d'air en collaboration avec le CEN de Saclay.

En INDE, le Gouvernement a adopté un ambitieux programme de recherches sur la conversion MHD que justifient les perspectives d'emploi d'importantes réserves de charbon : recherches fondamentales sur les cycles ouverts et construction d'une unité pilote.

L'AUSTRALIE, l'AUTRICHE, la SUEDE, la SUISSE et l'ITALIE ont des programmes de recherches en conversion MHD.

1.4. - PROBLÈMES RENCONTRÉS ET SOLUTIONS

(D.E. THOMSEN, 1972, J. FABRE et al, 1971)

1.4.A. - CYCLE OUVERT

Les problèmes rencontrés par ces générateurs en cycle ouvert sont essentiellement d'ordre technologique relatif à la durée de vie de différents organes (M. GUILLOU, 1969). Les développements se sont ainsi heurtés au problème de mise au point de matériaux réfractaires, à la conception d'électrodes ayant une durée de vie acceptable, au recyclage de la semence alcaline, etc. Ce sont ces difficultés technologiques qui ont conduit de nombreux pays occidentaux à cesser l'effort de recherche en MHD de conversion (FRANCE, GRANDE BRETAGNE, HOLLANDE)

dans les années 69/70. Seuls les américains et les soviétiques, et plus particulièrement ces derniers, ont continué cet effort, motivés par l'existence chez eux de réserves importantes d'énergie fossile (charbon aux USA et gaz naturel en URSS).

Actuellement, l'effort d'amélioration technologique porte essentiellement sur la diminution de la corrosion et de l'érosion des chambres de combustion et des électrodes.

Ainsi, l'AVCO développe aux USA un système de vaporisation continue de zirconium liquide dans la chambre de combustion qui recouvre et protège les parois de la chambre et les électrodes.

Cependant, il faut aussi signaler que les progrès technologiques faits dans le domaine de la production de forts champs magnétiques supraconducteurs dans de grands volumes (6 Tesla dans plusieurs dizaines de m³) autorisent le DOE (Department of Energy, USA) à projeter des centrales MHD en cycle ouvert de puissance unitaire de 1000 MW (J. PERROT, 1981 - E. LEVI, 1976).

1.4.B. - LES CYCLES FERMES

Les espoirs fondés sur les générateurs à cycle fermé fonctionnant avec un fluide de conversion gazeux et régime hors d'équilibre thermodynamique (plasma bi-température) ont été rapidement déçus par les instabilités liées au déséquilibre (instabilités d'ionisation, instabilités magnéto-acoustiques).

Ces générateurs se prêtent aussi très mal aux techniques d'ensemencement car il y a pollution rapide des organes par dépôt de la semence.

Actuellement la technique des convertisseurs MHD en cycle fermé a pratiquement abandonné la filière gazeuse pour se consacrer à la filière utilisant un métal liquide comme fluide de conversion.

Cette solution présente actuellement l'intérêt d'être une des possibilités d'extraction d'énergie du futur réacteur de fusion thermonucléaire et a donc à ce titre le caractère de technique d'avenir.

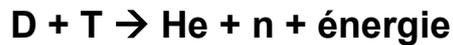
2. - LA FUSION NUCLEAIRE

Outre l'idée d'utiliser des convertisseurs MHD à cycle fermé pour récupérer l'énergie obtenue dans les futurs réacteurs de fusion nucléaire, on retrouve les principes et les techniques de la MHD directement impliqués dans les projets de mise au point de cette fusion elle-même.

2.1. - PRINCIPES PHYSIQUES ET TECHNIQUES (BAMIERES, 1978)

2.1.A. - LA FUSION

Les réactions de fusion font intervenir deux atomes isotopes de l'hydrogène (deutérium 1 neutron et 1 proton et tritium 2 neutrons et 1 proton) pour produire 1 atome d'hélium, 1 neutron et de l'énergie :



Mais cette réaction est très difficile à réaliser car il faut surmonter les très fortes répulsions des noyaux porteurs de charges électriques de même signe.

En effet, les interactions nucléaires ne peuvent intervenir qu'à très courtes distances ; il convient donc de doter les noyaux du milieu réactif d'une énergie cinétique suffisante pour les amener à proximité l'un de l'autre au cours de leurs collisions, c'est-à-dire de porter le milieu ambiant à une température extrêmement élevée. En outre, pour que l'opération présente un bilan énergétique positif, il faut satisfaire à une autre condition concernant la densité du milieu et la durée pendant laquelle ces conditions de confinement sont réalisées ; elle s'exprime par le critère de LAWSON qui fixe pour chaque réaction nucléaire la valeur minimum que doit atteindre le produit $n t$ entre la densité de plasma n et le temps de confinement t .

Pour la réaction deutérium -tritium, ce critère exige que :

$n t \geq 10^{14}$ particules sec./ cm³ une température de 100 millions de degrés (ou 10 kev).

Le projet* de fusion contrôlée doit passer par les étapes suivantes :

- "faisabilité scientifique" c'est-à-dire obtenir autant d'énergie thermonucléaire émise par le plasma qu'il a fallu en fournir, pour déclencher la réaction (auto-entretenu par les particules alpha émises par la réaction) ;
- "démonstration expérimentale" d'un réacteur opérationnel devant correspondre aux configurations futures des réacteurs industriels.

* L'intérêt de ce projet est considérable en raison des avantages de ce type d'énergie :

- sécurité en raison de la très faible quantité de combustible présent dans le réacteur,
- très faible radioactivité provenant essentiellement des parois du réacteur (le tritium est radioactif mais de faible durée de vie),
- surabondance du combustible, en particulier du deutérium, présent à l'état naturel dans l'eau de mer.

2.1.B. - FILIERE MHD (BAMIERES, 1978 - POST, 1973)

Pour satisfaire aux critères énoncés ci-dessus, plusieurs solutions ont été proposées. La principale (la plus ancienne, la mieux financée, et celle qui est à l'heure actuelle la plus proche du but) consiste à confiner le plasma dans un champ magnétique. L'autre filière, celle du confinement inertiel, ne sera pas ici discutée en détail (elle consiste à apporter et très brutalement une grande quantité d'énergie, à l'aide de lasers ou de faisceaux d'électrons relativistes, à une pastille formée de matériaux combustibles, pour la comprimer très fortement et provoquer la fusion).

Le confinement magnétique consiste à piéger les ions du plasma (à ces températures, les atomes sont toujours dissociés) dans un champ magnétique : les ions s'enroulent autour des lignes de champ en décrivant des hélices (forces de Laplace). Pour contrôler ce mouvement hélicoïdal, deux solutions ont été proposées :

- soit des hélices formées sur elles-mêmes dans un système toroïdal (système "Tokamak" proposé par les soviétiques),
- soit des rebonds magnétiques à l'aide de miroirs magnétiques aux deux bouts d'un segment constitué d'un solénoïde.

(voir figures 1.1. et 1.2.)

Les systèmes "Tokamak" nécessitent un chauffage du plasma pour compléter l'élévation de température résultant des courants induits (effet Joule) : ces chauffages peuvent provenir de compression adiabatique (étudié à Princeton, USA), de faisceaux d'atomes neutres, ou d'onde électromagnétique (radiofréquence).

2.2. - HISTORIQUE DES RECHERCHES (BAMIERES, 1980 a - b - c)

Abordées il y a donc une trentaine d'années dans le plus grand secret, les recherches sur la fusion se font maintenant un peu partout et suscitent une large coopération internationale (la filière de "confinement inertiel" reste cependant classifiée, en particulier aux USA).

Il n'y a pas eu, comme en conversion MHD, un abandon partiel ou total dans certains pays. Bien au contraire, l'effort s'accroît avec le temps (bien que paradoxalement, les chercheurs soient plus loin du but qu'en conversion, la "faisabilité" de la fusion n'étant pas encore atteinte et aucun prototype préindustriel n'étant en chantier).

L'avantage prodigieux d'une source d'énergie sûre, très peu radioactive, et pratiquement illimitée, explique cet effort.

Une installation se juge ainsi d'après le produit $n \cdot t$ (aussi proche que possible de 10^{14}) et la température T du plasma (aussi proche que possible de 100 millions de degrés). Un autre paramètre important est β , rapport de la densité d'énergie du plasma à la densité du champ magnétique appliqué. C'est un peu le rapport qualité/prix de l'installation. Les systèmes à miroir ont un meilleur β que les "Tokamak" et pourraient les supplanter une fois la faisabilité obtenue.

En 1973, le plus grand "Tokamak" était français, c'était TFR. Depuis cette date, des installations plus récentes ont atteint des performances meilleures.

FIGURE 1.1. - SYSTEME "TOKAMAK" (BOUTEILLE MAGNETIQUE FERMEE)
(PERROT, 1981)

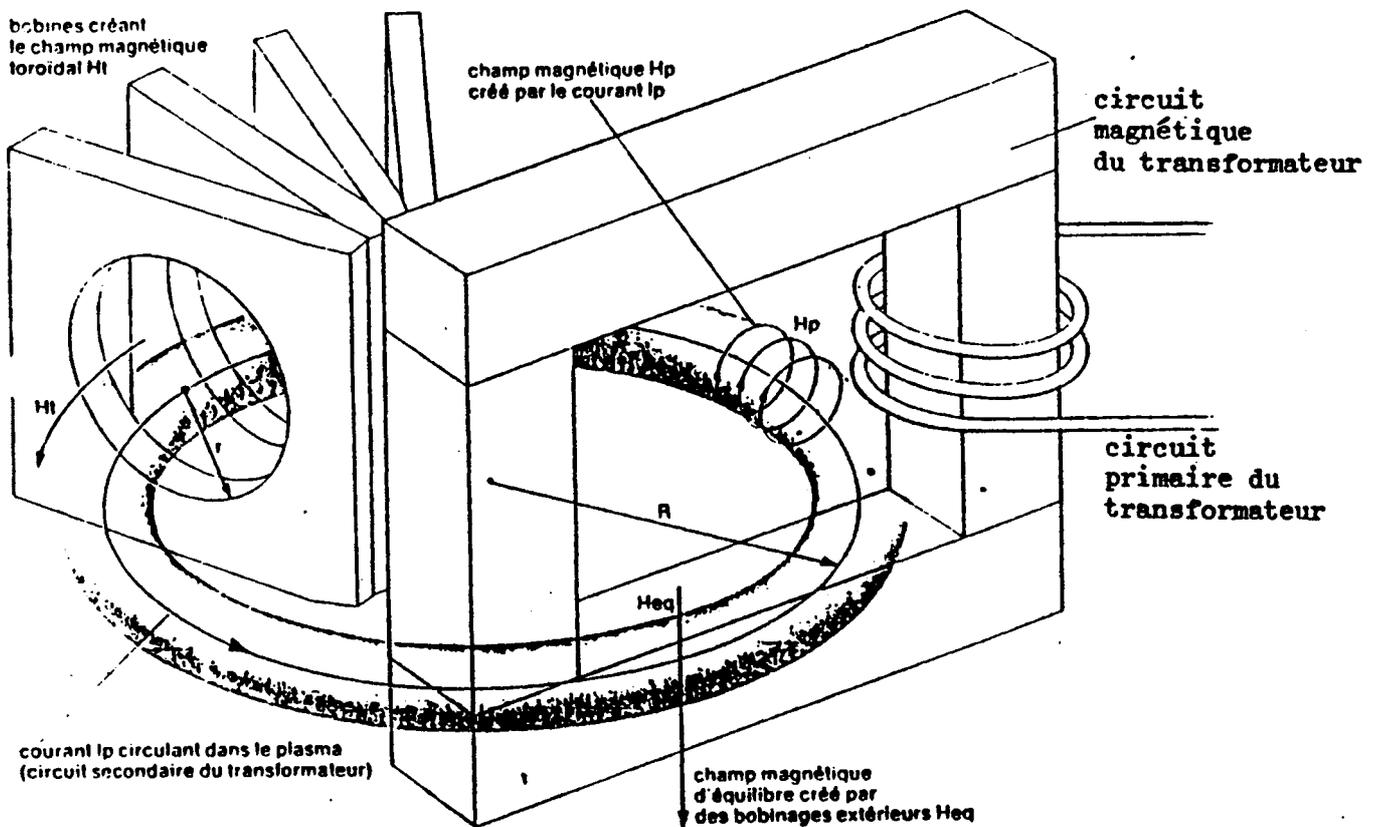


FIGURE 1.2. - SYSTEME A MIROIR (BOUTEILLE MAGNETIQUE OUVERTE)
(BAMIERES, 1980 a),

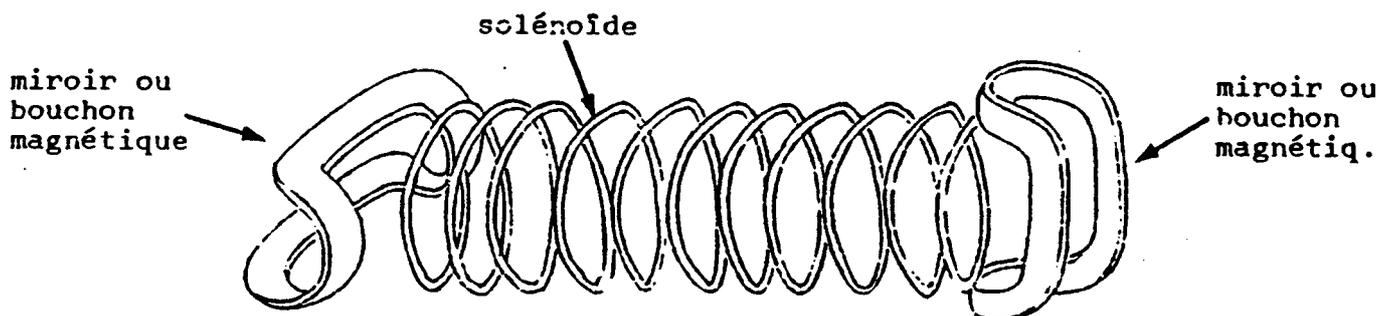
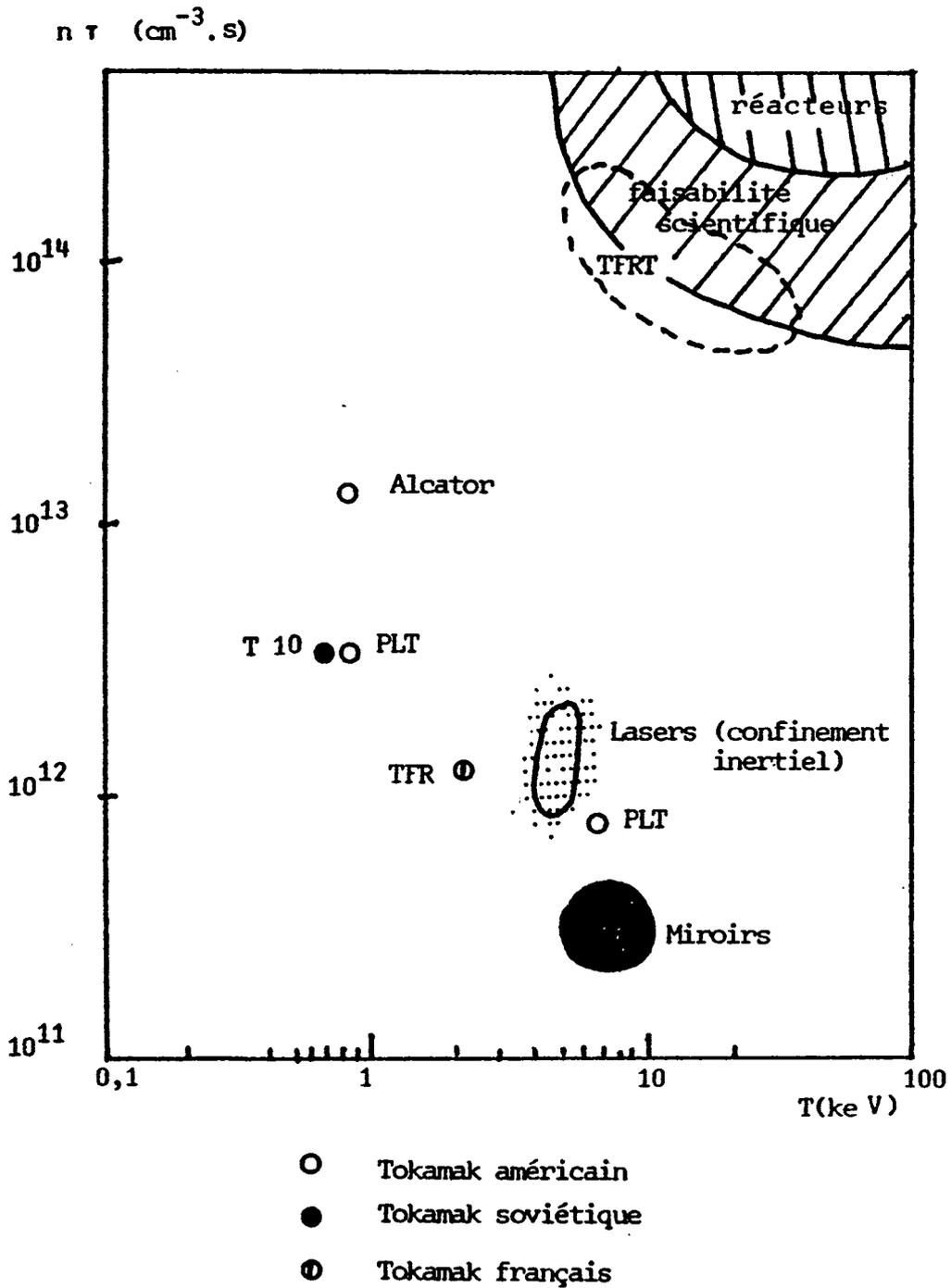


FIGURE 1.3. - PRINCIPAUX PARAMETRES EXPERIMENTAUX DES EXPERIENCES DE FUSION (octobre 1980)
(BAMIERES, 1980 c)



Un groupe de travail international (américain, soviétique, japonais, européen) a étudié un projet de TOKAMAK géant international (INTOR), qui reste cependant soumis à des considérations d'ordre politique.

(INTOR pourrait être relayé par un projet américain équivalents, ETF, au Laboratoire National d'OAK RIDGE).

Il est utile de comparer ce projet aux Tokamak actuellement en cours de construction.

MACHINE	JET (Europe)	JT 60 (Japon)	T 15 (URSS)	TFTR (USA) Princeton	INTOR Projet international
Gand rayon m	2,96	3	2,4	2,48	5,2
Petit rayon m	1,25	1	0,70	0,85	1,6
Courant dans le plasma MegaAmpères	2,6 à 4,8	3	?	2,5	6,4
Energie produite/ Energie dépensée	1	?	?	1	> 1
Température des ions	10 kev	?	?	10 ke	10 keV (20 keV au centre)
Durée de la décharge	?	?	?	1 s	100 s
n t	$6 \cdot 10^{13}$			$6 \cdot 10^{13}$	10^{14}

(d'après BAMIERES, 1980 b et c)

Trois pays semblent capables à eux seuls de mener à bien ces recherches : l'URSS, les USA, mais aussi le JAPON, dépourvu par ailleurs d'énergie et de matière première. La nouvelle génération de Tokamak devrait permettre d'établir la faisabilité scientifique dans le courant des années 1980.

2.3. - LES PROBLÈMES RENCONTRÉS (POST, 1973 - BAMIERES 1978 et 1980 c)

Les premières difficultés rencontrées dans les années 60 et 70 étaient celles des diverses formes d'instabilité des plasmas, en particulier les instabilités MHD qui font glisser les plasmas le long des gradients magnétiques et les repoussent vers les parois les plus éloignées du centre des Tokamak. Ces problèmes ont été résolus en introduisant des torsions des lignes de champ magnétique et des puits magnétiques.

A l'heure actuelle, il est apparu que les temps de confinement augmentaient avec la taille des installations (d'où les dimensions croissantes des projets). Les principales questions portent maintenant sur les modes de chauffage complémentaire et les méthodes d'épuration des plasmas.

Le chauffage complémentaire peut être obtenu, sans perturbation de la décharge ; par faisceaux d'atomes neutres [2,2 MW de deutérium de 40 keV d'énergie sur le PLT (Princeton), 20 MW à 120 keV sur le TFRT (Princeton), 1 MW à 40 keV sur le ISX (Oak Ridge)] ou par faisceaux d'ondes (fréquence cyclotronique ionique de 5 MW de puissance sur PLT, radiofréquences sur TFRT, fréquences cyclotroniques par tube gyrotron sur ISX, etc.).

Quant à l'épuration du plasma, plusieurs configurations "d'écrèmeurs" sont à l'étude sur le PDX de Princeton. Sur le PLT on utilise des diaphragmes de carbone, on procède au nettoyage des parois avant les décharges, au dépôt d'une couche de titane à l'intérieur de la chambre à vide, etc.

Pour l'avenir, les problèmes qui se présentent pour la construction des premiers réacteurs opérationnels sont multiples. Par exemple :

- Combustibles : si le deutérium est abondant à l'état naturel dans l'eau de mer, le tritium n'est pas un élément naturel ; il peut être produit par réaction de capture neutronique dans une enveloppe fertile contenant du lithium et entourant la bouteille magnétique ;
- La première paroi du réacteur soumise à des contraintes et des érosions considérables (interactions entre les neutrons de 14 MeV et les matériaux). Ces parois devront vraisemblablement être démontées et chargées régulièrement.

Finalement, les aspects très particuliers des problèmes de magnétohydrodynamique qui apparaissent dans les projets de fusion par confinement magnétique, n'ont pas pour autant entraîné l'arrêt des recherches et, à l'heure actuelle, il semble acquis que la faisabilité scientifique de la fusion sera prochainement obtenue par cette voie là.

Les autres filières (confinement inertiel par lasers, faisceaux de particules, électrons relativistes) sont restées pour l'instant moins efficaces.

3. - LA MHD DANS LES MÉTAUX LIQUIDES

Cette voie d'application concerne l'action de très forts champs magnétiques sur un métal liquide. On peut ainsi exercer des forces sur les coulées de métal en fusion. Les techniques qui en découlent peuvent être utilisées en métallurgie, ainsi que dans le réacteur surgénérateur et peut être même dans le futur réacteur thermonucléaire (BAMIERES, 1976).

3.1. - LES APPLICATIONS À LA MÉTALLURGIE

3.1.A. - MESURE DE DEBIT DE COULES DE MÉTAUX EN FUSION

La méthode de mesure avec électrode consiste à placer des électrodes dans une direction perpendiculaire au plan défini par le champ magnétique appliqué orthogonalement à la vitesse du fluide et celle-ci, et à mesurer la différence de potentiel qui est reliée à la vitesse.

Les méthodes de mesures sans électrodes sont basées sur l'entraînement par le fluide en mouvement d'un courant appliqué qui provoque une réaction magnétique mesurable.

Les expériences faites en laboratoire ainsi que les mesures effectuées dans le chenal de coulée d'un haut fourneau montrent que les méthodes utilisées sont tout à fait valables.

3.1.B. - POMPAGE DES MÉTAUX LIQUIDES

Aux États-Unis, l'Université de l'Illinois à Urbana a étudié les pompes électromagnétiques.

On distingue actuellement deux types de pompes :

- les pompes à conduction dont le principe est l'accélération du fluide par les forces de Laplace produites par action d'un champ magnétique sur un courant injecté dans le métal ;
- les pompes à induction : le courant qui traverse le fluide est ici induit par un champ magnétique variable dans le temps. L'aluminium et le sodium qui ont une conductivité électrique élevée sont les plus aptes à ce genre de pompage qui est utilisé dans le réacteur surgénérateur et dans la métallurgie de ces métaux.

3.1.C. - LA PURIFICATION DES MÉTAUX

L'application d'un champ magnétique peut aussi servir à séparer des impuretés isolantes ou plus conductrices que le métal lui-même (Institut de Mécanique de Grenoble - Laboratoire de MHD de la Faculté des Sciences d'Avignon).

3.1.D. - BRASSAGE ELECTROMAGNETIQUE

L'IRSID (Institut de Recherches de la Sidérurgie Française) net en oeuvre à l'échelle industrielle un brasseur électromagnétique pour le refroidissement des produits de coulée longs. Cette méthode permet d'obtenir une amélioration importante de la finesse de grain des produits obtenus. Les figures 1.4. et 1.5. (tirées de J. DELASSUS et al, 1979) de la page suivante explicitent le procédé utilisé.

3.1.E. - AUTOMATISATION DES COULÉES

La MHD permet d'automatiser les coulées du métal fondu en agissant sur les paramètres magnétiques et ainsi autoriser en continu la surveillance du débit, de la vitesse, de la forme des jets de métal, etc., en fonction des impératifs de la production. Des études de ce type d'application ont été faites à l'Institut Polytechnique de Leningrad Kalénine en URSS.

3.2. - APPLICATION À L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Certaines techniques utilisées en métallurgie ont des applications intéressantes dans les réacteurs surgénérateurs et dans le futur réacteur de fusion thermonucléaire.

Ainsi, dans les réacteurs surgénérateurs, la MHD fait circuler le sodium liquide qui est le fluide de refroidissement du réacteur, et permet de faire passer l'efficacité du pompage par rapport à un pompage conventionnel, de 50 à 70 % (United Kingdom Atomic Energy Authority).

L'application de la MHD des métaux liquides à la fusion thermonucléaire constitue une étude dont les applications sont à beaucoup plus long terme. Les techniciens commencent à s'intéresser à ce titre aux écoulements bidimensionnels des métaux liquides placés dans des champs magnétiques variant brutalement dans le temps (réacteur Tokamak, Université de l'Illinois), aux écoulements diphasiques, et au difficile problème des instabilités magnétohydrodynamiques.

FIGURE 1.4.

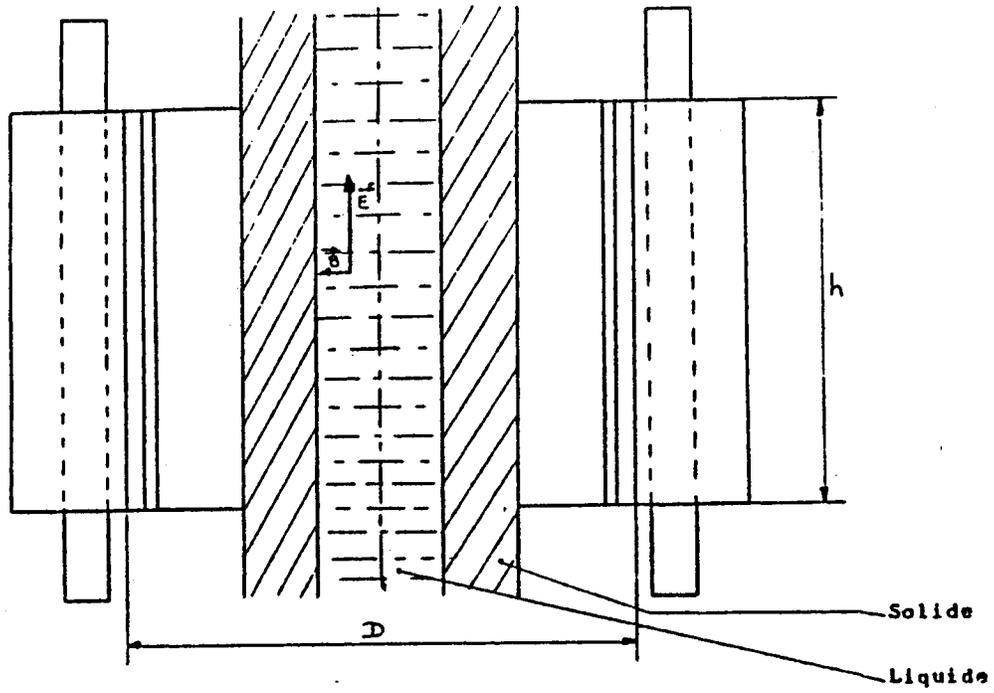
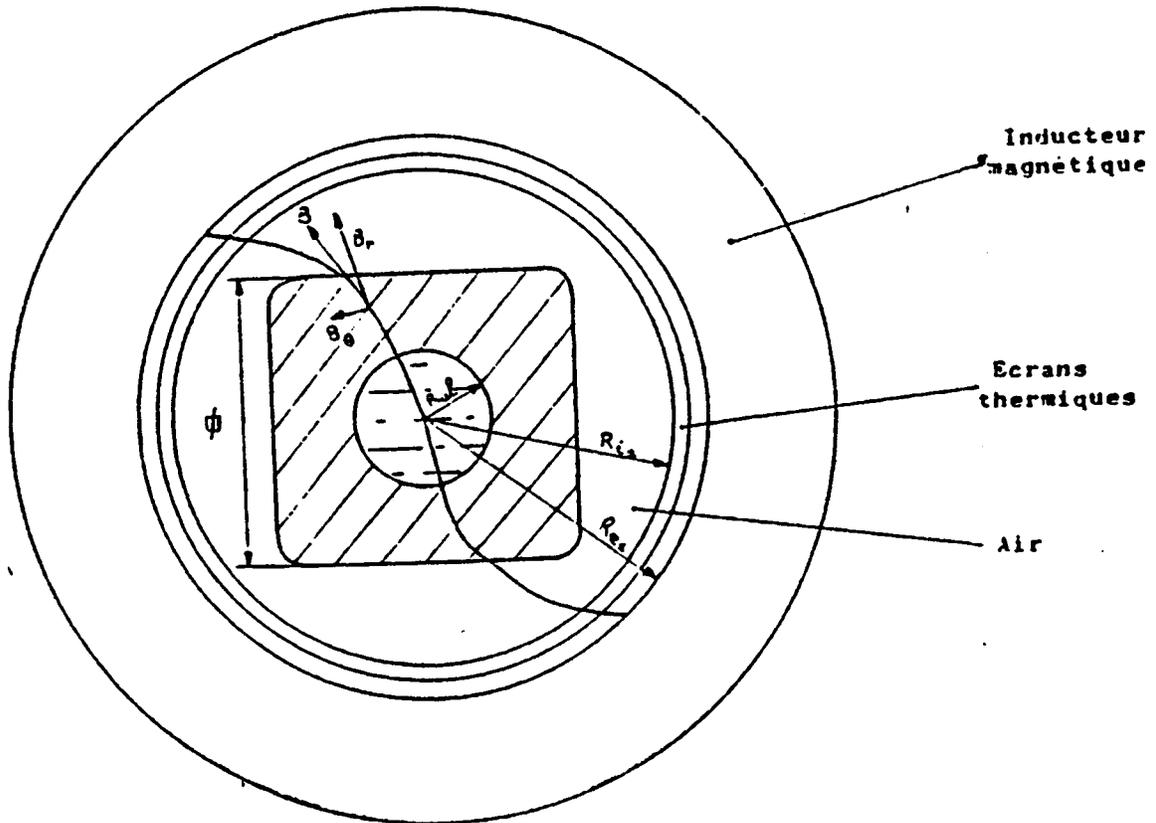


FIGURE 1.5.



4. - LA PROPULSION MHD ET APPLICATIONS AÉRONAUTIQUES

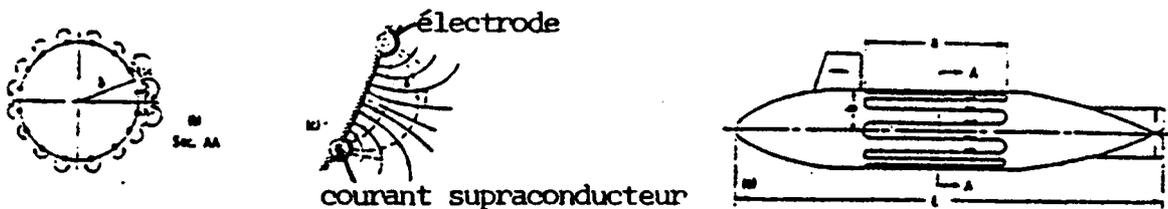
Ce domaine de la MHD a fait l'objet d'un certain nombre de recherches sans cependant dépasser le cadre de l'expérience de laboratoire ou du projet de prototype.

On peut ainsi citer à ce titre le projet de mini-convertisseur MHD à cycle fermé pour l'alimentation en électricité des moteurs d'un sous-marin nucléaire en autorisant une très grande souplesse de fonctionnement.

Dans un ordre d'idées tout à fait différent, dans lequel la MHD n'est pas un intermédiaire dans l'alimentation de moteurs classiques, électriques ou autres, se situe la propulsion (ou le freinage MHD) MHD par forces de Lorentz qui agissent directement sur le fluide qui entoure l'engin à propulser. Le fluide peut être compressible ou incompressible et les applications navales ou aéronautiques.

4.1. APPLICATIONS NAVALES

On peut citer pour exemple le travail de S. WAY (S. WAY, 1964) dans lequel l'action d'un champ magnétique supraconducteur sur un courant crée une force propulsive volumique. Le schéma de principe très simple est le suivant : (figure 1.6.)



Dans une configuration géométrique appropriée, le champ magnétique est orthogonal aux lignes de courant, et la force volumique dirigée vers l'arrière du sous-marin. D'après les calculs de l'auteur, le rendement serait de l'ordre de 50 % pour des vitesses de 15 m/s. Il faut bien remarquer, et ceci est un aspect important, que la configuration des forces de Laplace en question propulse le sous-marin sans modifier profondément le champ des pressions autour du profil par rapport à un système conventionnel. La valeur du coefficient de traînée est d'ailleurs considérée à juste titre par l'auteur dans son calcul comme étant celui d'un profil mû par un dispositif traditionnel.

4.2. - APPLICATIONS AÉRONAUTIQUES

Les projets MHD en aéronautique concernent la propulsion et le freinage MHD.

4.2.A. - PROPULSION PAR RÉACTION

On trouve dans ce mode de propulsion MHD, les propulseurs ioniques consistant à accélérer des ions césium dans un champ électrique qui ont été étudiés en France dans les années 60 par la SEPR (Société d'Études de la Propulsion par Réaction), ainsi que des projets d'accélérateurs à plasma (R.L. LEONARD et al, 1965).

4.2.B. - PROPULSION PAR ACTION SUR LE FLUIDE AMBIANT

Il s'agit de l'analogie aéronautique du projet de sous-marin de S. WAY, à la différence près que la distribution des forces de Laplace proposée (PETIT, 1980) permet, non seulement de produire une force propulsive, mais, ce qui est nouveau, d'agir profondément sur les caractéristiques aérodynamiques de l'écoulement (tramée, onde de choc, etc.).

C'est cet aspect de la propulsion MHD qui sera abordé dans la dernière partie, au moyen d'une analogie hydraulique, en tant qu'action possible sur l'onde de choc par des moyens MHD.

4.2.C. - FREINAGE MHD

S'il est possible de créer des forces de Laplace accélératrices en injectant de l'énergie dans le fluide par champ électrique extérieur appliqué, on peut tout aussi bien créer des forces de Laplace décélératrices par création de courants induits. C'est ce principe qui fit naître le projet de freinage MHD des capsules spatiales lors de leur rentrée dans l'atmosphère (A.R. KANTROWITZ, 1959), ce procédé permettant par ailleurs de mieux protéger la paroi de l'intense échauffement, créé par les courants induits dans le fluide ionisé. De nombreuses études expérimentales et théoriques ont été menées dans les années 60 sur ce sujet, mais cela n'a jamais dépassé l'échelle du laboratoire.

5. - L'OPTION MHD

Parmi les nombreux domaines d'application de la MHD, il est à remarquer que chacun d'eux a suivi, au cours des vingt ou trente dernières années, une trajectoire bien particulière.

Ainsi, la conversion MHD (rendue crédible dans les années 50/60 par le développement des propulseurs fusée donnant des gaz à très grande vitesse) qui a donné lieu à de nombreuses recherches de par le monde jusque dans les années 70 sans vraiment réaliser de percée technologique, ne figure plus à l'heure actuelle parmi les recherches prioritaires.

Par contre, la fusion thermonucléaire par confinement magnétique, bien que connaissant ou ayant connu des difficultés technologiques et fondamentales au moins aussi importantes que celles rencontrées* par la conversion MHD, est l'objet d'efforts constants et réguliers dans de nombreux pays. Bien sûr, s'il est certain que l'enjeu de la fusion thermonucléaire est bien plus considérable pour l'humanité que celui de la conversion d'énergie fossile en énergie électrique, il ne faut pas en oublier pour autant que si la faisabilité de la fusion est à brève échéance, il semble peu probable que la maîtrise totale de cette technique au sens industriel ne puisse intervenir avant les années 2000, 2010.

* Il ne faut pas oublier que la faisabilité de la fusion n'est pas démontrée expérimentalement.

C'est sans doute ce raisonnement qui, conjointement aux progrès technologiques accomplis et à accomplir, et au besoin d'établir une transition continue entre les différentes sources d'énergie, a pu maintenir l'intérêt que montrent encore pour la conversion MHD certains grands pays industrialisés pour, d'une part, la conversion gazeuse et pour, d'autre part, à horizon 2000, la conversion par métal liquide pour les futurs réacteurs de fusion.

Ainsi, pour résumer en deux mots la situation dans laquelle se trouvent la conversion MHD et la fusion par confinement magnétique, la première a déçu et présente un intérêt dans un avenir proche, et la seconde, qui n'a pas encore déçu, apparaît dès maintenant comme la solution d'avenir au problème d'énergie.

Pour ce qui concerne la propulsion MHD, la trajectoire est différente ni espoirs déçus ni projets grandioses mais quelques projets d'application aéronautique encore dans un nombre restreint de pays avec des moyens limités sans dépasser l'échelle du laboratoire. Une des raisons de cet état de fait peut être une réticence des scientifiques défavorablement impressionnés par les difficultés de la conversion. Il ne faut pas oublier les circonstances économiques qui ont fait porter les choix sur d'autres procédés que les procédés MHD (rentrée dans l'atmosphère).

Cependant, à l'heure actuelle, existent quelques idées en matière de propulsion, qui, n'ayant suscité ni l'engouement, ni les déceptions d'autres applications MHD, sont restées largement inexplorées. Il est donc difficile d'en jauger la valeur et la portée avant d'avoir obtenu un minimum de confirmations expérimentales.

A ce titre, l'expérience présentée dans la deuxième partie de cette note constitue, au vu des résultats obtenus, un encouragement à la continuation des recherches dans la voie d'expériences probatoires.

CHAPITRE 2

ACTION MHD SUR L'ONDE D'ETRAVE D'UN CYLINDRE

Le tour d'horizon sur la MHD a permis de faire le point sur "l'état de l'art" dans les divers domaines d'application de la MHD.

Ainsi, si parmi les études fondamentales faites par le passé, certaines peuvent présenter par certains aspects un intérêt dans le cadre des problèmes de l'étude actuelle (INGLESAKIS, 1968 - FONTAINE, 1968 - CARESSA, 1968 - PETIT, 1972), d'autres s'y rattachent plus particulièrement (KANTROWITZ, 1959 - ZIEMER, 1958 - STUBBE, 1965).

Entrepris dans les années 60 et concernant plus particulièrement l'action d'un champ magnétique seul sur l'écoulement fortement ionisé par l'augmentation de température consécutive à la présence de l'onde de choc, ces travaux, dont certains effectués chez AVCO, ont montré une forte interaction entre le champ magnétique et le choc (planches 1 et 2) dont l'épaisseur est considérablement augmentée avec le ralentissement progressif du fluide par les forces de Laplace. On peut remarquer à ce propos que les courants induits créent un champ de forces qui tendent à s'opposer au mouvement et provoquent une importante augmentation de la traînée sans accroissement considérable de la température paroi ; ce sont ces particularités qui ont orienté la solution au problème de la rentrée dans l'atmosphère des engins spatiaux vers un procédé MHD (un bilan masse défavorable semble avoir fait choisir par la suite la solution actuelle de matériaux ablatifs).

L'énergie électrique peut être ainsi extraite du fluide par induction, ou bien injectée dans le fluide comme dans le cas d'accélérateur à plasma (LÉONARD, 1965).

Actuellement, JP. PETIT propose un dispositif MHD en vue de supprimer l'onde de choc accompagnant un objet matériel se déplaçant à une vitesse supersonique. Ce dispositif consiste à combiner de manière adéquate (PETIT et al, 1980) les champs électriques et magnétiques autour d'un profil de façon à produire sur le fluide une action centrifuge à l'amont et centripète à l'aval de celui-ci. Ce procédé, utilisant les effets ralentisseur et accélérateur des forces de Laplace, se trouve au carrefour des deux applications citées plus haut (freinage et accélération MHD), et n'a pas, à notre connaissance, d'équivalent qui puisse être cité en référence. Seuls les travaux de C. VIVES (voir annexe) qui étudie les écoulements de mercure autour de profils conducteurs ou isolants avec ou sans apport d'énergie par champ électrique, se rapprochent de l'étude que le GEPAN a effectuée, consistant à reproduire l'analogie faite par JP. PETIT à l'observatoire de Marseille et de compléter cette expérience phénoménologique par une visualisation des lignes de courant dans le fluide en mouvement. Ces expériences ont fait l'objet de deux travaux d'étude personnels à

l'ENSAE(*) auxquels ont, participé quatre étudiants de l'École (**) et dont l'auteur de cette note a assuré l'encadrement.

(*) ENSAE : École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace

(**) Melle Valérie DENIS-MASSE, MM. Marc BELLO, Alain ESTIBALS, Hervé PAYAN

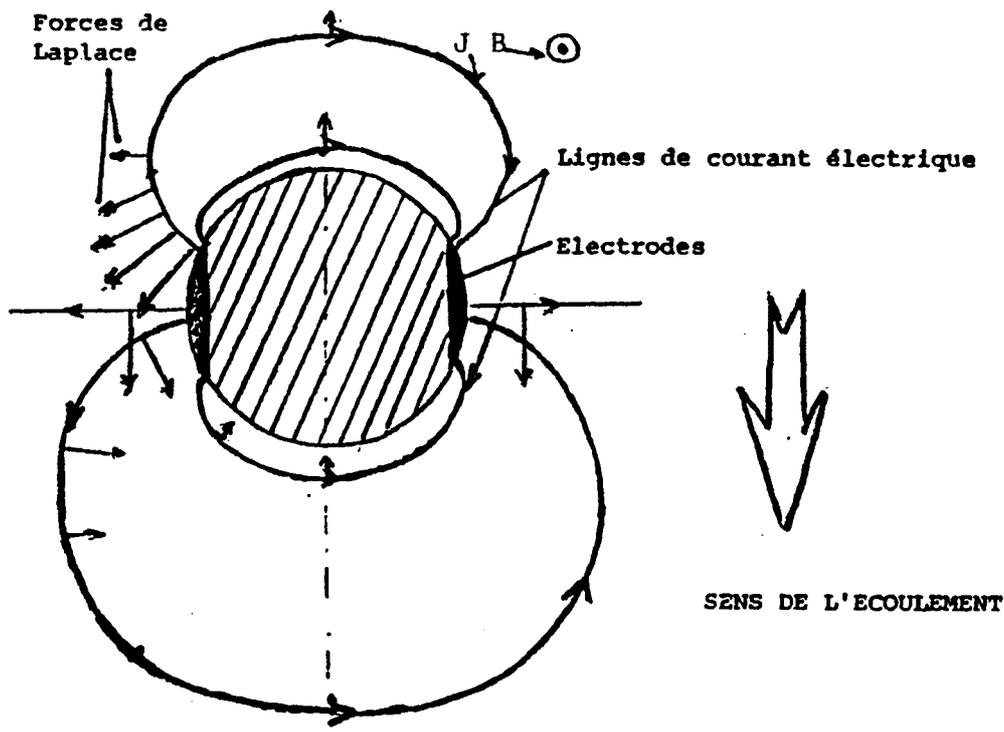
Cette note reprend les grandes lignes des rapports écrits par les étudiants en apportant d'une part quelques compléments théoriques ou expérimentaux et éliminant d'autre part certaines parties à caractère plus spécifiquement scolaire. Une annexe présente d'autre part quelques publications des travaux de C. VIVES dans lesquels sont présents d'intéressants résultats de mesures de pression dans des écoulements de mercure autour de profils en présence de champs électriques et magnétiques.

1. - PRINCIPE

Le principe de base exposé dans la référence ²² est le suivant :

On considère un cylindre de matériaux isolant et deux électrodes disposées suivant deux génératrices diamétralement opposées. Ce cylindre est plongé dans un fluide conducteur.

Si une différence de potentiel est établie entre les électrodes et un champ magnétique parallèle aux génératrices du cylindre est appliqué, le champ de forces de Laplace qui en résulte a la configuration indiquée sur la **FIGURE 2.1.** :



Si le fluide dans lequel est plongé le cylindre est animé d'un mouvement dont la vitesse à l'infini est parallèle à la flèche (figure 2.1.) les forces de Laplace créent :

- un ralentissement du fluide en amont du point d'arrêt et suivant l'axe de symétrie ;
- un effet centripète dans tout l'hémisphère aval,
- une accélération dans le sens de la vitesse initiale au voisinage des électrodes ;
- un effet centrifuge dans la zone de culot.

Les effets que l'on peut espérer produire sur l'écoulement sont les suivants :

- suppression de l'onde de choc ;
- modification des conditions de décollement par accélération de la couche limite ;
- création d'une dépression à l'avant et d'une surpression à l'arrière à l'origine d'une poussée par inversion de la traînée des pressions.

L'objet de l'expérience dont il est question est précisément d'examiner les deux premiers points dans le cadre d'une analogie hydraulique.

2. - ACTION SUR LA VAGUE D'ETRAVE (ANALOGUE DE L'ONDE DE CHOC)

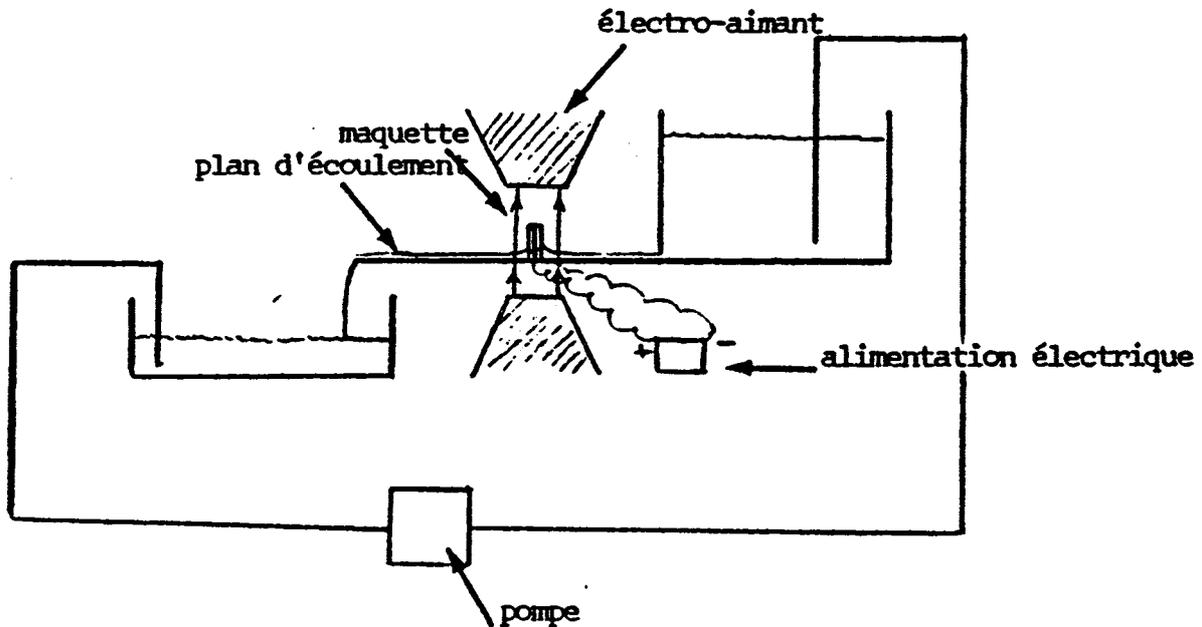
2.1. - DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le liquide conducteur qui est ici de l'eau acidulée s'écoule sur un plan horizontal entre le bassin amont et le bassin aval. Une pompe assure la fermeture du circuit. La hauteur d'eau h est proportionnelle à la vitesse et dépend de la hauteur d'eau H dans le bassin amont. La vitesse sur le plan d'écoulement est donc ajustée par la valeur du paramètre H .

Si la maquette cylindrique munie de ses électrodes est placée sur le plan d'écoulement, génératrices perpendiculaires à ce plan, les perturbations de la surface libre du liquide entraînent des modifications de la hauteur d'eau analogues des variations de densité dans un écoulement compressible bidimensionnel.

Il suffit de placer la maquette dans l'entrefer d'un électro-aimant et d'alimenter les électrodes en courant continu pour observer les effets du champ de forces de Laplace précédemment décrit sur la distribution des vitesses autour du cylindre, donc sur la hauteur d'eau.

FIGURE 2.2.



2.2. - EXPÉRIMENTATION

2.2.A. - PARAMETRES CARACTERISTIQUES

Pour qu'une action des forces de Laplace sur le fluide soit efficace, il faut qu'elles soient du même ordre de grandeur que les forces d'inertie.

Dans le cas présent, une force d'inertie caractéristique peut être obtenue comme suit :

Si la vitesse passe de la vitesse V à 0 au point d'arrêt sur une distance d , au saut de pression P correspond une force caractéristique :

$$F_i = P/d$$

Soit :
$$F_i = (\rho V^2) / 2d$$

D'autre part, la force électromagnétique caractéristique est :

$$F_m = J_o . B_o$$

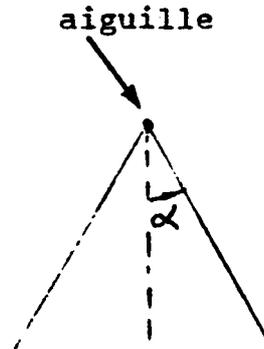
où J est la densité de courant et B le champ magnétique caractéristique.

Le paramètre d'interaction I s'écrit alors (PETIT, 1980)

$$I = F_m / F_i = (2J_0 B_0 d) / \rho V^2$$

L'autre paramètre caractéristique est le nombre de Mach simulé qui se déduit du demi-angle des ondes produites par une aiguille effleurant la surface libre du liquide qui s'écoule :

$$M = \frac{1}{\sin \alpha}$$



2.2.B. - GRANDEURS CARACTERISTIQUES

Les grandeurs caractéristiques de l'écoulement ont pour valeur :

- densité de courant $J = 10^4 \text{ A/m}^2$
- champ magnétique $B = 4000 \text{ G}(0,4 \text{ T})$
- diamètre cylindre $L = 10^{-2} \text{ m}$
- vitesse d'écoulement $V = 10^{-1} \text{ m/s}$
- densité du fluide $P = 10^3 \text{ Kg/m}^3$
- viscosité cinématique $\nu = \mu/\rho = 10^{-6}$

La valeur $I = 2,5$ obtenue pour le paramètre d'interaction permet d'envisager un effet des champs électriques et magnétiques sur l'onde d'étrave.

L'angle des lignes de Mach sur l'aiguillé donne un nombre de Mach simulé de l'ordre de 1,4 - 1,5.

2.2.C. - CONSTATATIONS

Lors de l'établissement du courant entre les électrodes, on constate :

- (1) la disparition de l'onde d'étrave ;
- (2) le creusement de la surface du liquide en amont ;
- (3) l'atténuation des ondes de surface et légère augmentation de la hauteur d'eau dans la zone de culot.

Les constatations (1) et (2) évoquent une accélération du liquide et l'établissement d'une dépression frontale.

Les deux dernières constatations évoquent une action sur le sillage ainsi qu'une augmentation de pression dans la zone de culot.

Cette expérience phénoménologique donne des signes indirects en faveur d'une inversion de traînée des pressions qu'il faudrait évidemment objectiver par des mesures de pression à la paroi ou par une mesure directe de la traînée (ou de la poussée).

Il faut signaler qu'un film vidéo de l'expérience a été réalisé à l'ENSAE.

2.3. - ESSAI DE MODÉLISATION

Les paramètres caractéristiques de l'écoulement ont les valeurs suivantes :

$$\text{Nombre de REYNOLDS } Re = \frac{\text{force d'inertie}}{\text{force visqueuse}} = \frac{vL}{\nu} = 1000$$

$$\text{Nombre de HARTMAN } Ha = \left[\frac{\text{force magnétique}}{\text{force visqueuse}} \right]^{\frac{1}{2}} \sqrt{ReI} = 20$$

$$\text{Paramètre d'interaction : } I = \frac{\text{force magnétique}}{\text{force d'inertie}} = \frac{2JBL}{\rho v^2} = 4$$

$$\text{Nombre de REYNOLDS magnétique} = Rm = 4.10^{-6}$$

La détermination du champ des vitesses autour du profil en présence de forces de Laplace peut se faire dans l'approximation du fluide parfait. La valeur du nombre de REYNOLDS indique que les effets visqueux sont limités au voisinage de la paroi et qu'on peut les négliger en première approximation.

L'étude du fluide au voisinage de la paroi nécessiterait de faire l'approximation de la couche limite et conduirait à la détermination théorique des critères de décollement sur un cylindre en présence des forces de Laplace.

Le système d'équation qui décrit l'écoulement bidimensionnel stationnaire du fluide parfait conducteur. incompressible s'écrit ainsi :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial x} + J_y (B_0 + b_z)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial y} - J_x (B_0 + b_z)$$

$$J_x = \sigma [E_x + v (B_0 + b_z)] \quad ; \quad J_y = \sigma [E_y - u (B_0 + b_z)]$$

$$\frac{\partial b_x}{\partial y} = \mu_0 J_x \quad ; \quad \frac{\partial b_y}{\partial x} - \frac{\partial b_x}{\partial y} = 0 \quad , \quad \frac{\partial b_x}{\partial x} + \frac{\partial b_y}{\partial y} + \frac{\partial b_z}{\partial z} = 0$$

auquel il faut évidemment adjoindre l'ensemble des conditions aux limites pour les variables hydrodynamiques et électromagnétiques qui dépendent du profil et de la disposition des électrodes.

3. - VISUALISATION DES LIGNES DE COURANT

3.1. - DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Mise à part une seringue munie d'une fine aiguille pour injecter du bleu de méthylène dans l'écoulement, le dispositif expérimental est strictement identique à celui décrit au paragraphe 2.1..

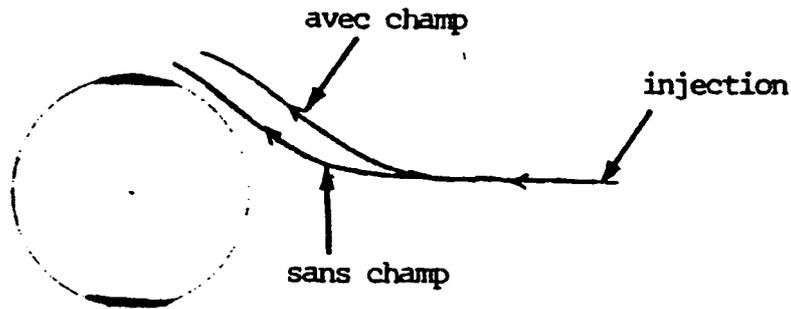
3.2. - EXPÉRIMENTATION

Des essais de visualisation ont été effectués en injectant le bleu de méthylène dans les conditions exposées au paragraphe précédent. Cependant, aux vitesses considérées, il est difficile d'obtenir un filet de bleu de méthylène pouvant montrer sans ambiguïté l'effet des forces de Laplace sur les lignes de courant à cause d'une rapide transition après injection. C'est pourquoi, il a été choisi de travailler avec un écoulement à basse vitesse, c'est-à-dire de l'ordre de 1 cm/s.

3.2.A. - CONSTATATIONS

L'injection de bleu de méthylène a permis de constater :

- (1) En amont : les filets fluide infléchissent plus tôt leur trajectoire initiale lorsqu'on établit les champs électriques et magnétiques.



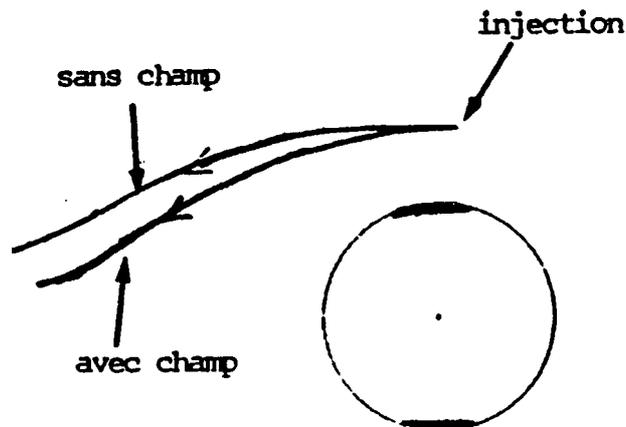
(2) En aval :

- Zone de proche sillage :

La présence de nombreuses bulles d'électrolysé, même à basse intensité, modifie considérablement la configuration de l'écoulement et rend impossible toute observation de l'effet MHD sur les lignes de courant dans la proche zone de culot et sur le recollement éventuel des filets fluides.

- Zone de sillage lointain :

Cette zone étant pratiquement exempte de bulles, il est possible de constater l'effet centripète MHD sur les lignes de courant.



3.3. - ESSAI DE MODÉLISATION

Compte tenu des conditions expérimentales, les paramètres caractéristiques prennent les valeurs suivantes :

$$\begin{aligned} Re &= 100 \\ Ha &= 110 \\ l &= 120 \\ Rm &= 4 \cdot 10^{-6} \end{aligned}$$

On ne peut, dans ce cas, négliger les forces d'origine visqueuses, et le système d'équation reste complet. Il s'écrit :

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial x} + \sigma [E_y - u(B_0 + b_z)](B_0 + b_z) + \rho \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = - \frac{\partial P}{\partial y} - \sigma [E_x + v(B_0 + b_z)](B_0 + b_z) + \rho \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial b_x}{\partial y} = \frac{\partial b_z}{\partial x}$$

$$\frac{\partial b_x}{\partial x} + \frac{\partial b_y}{\partial y} + \frac{\partial b_z}{\partial z} = 0$$

Il faut ici aussi adjoindre les conditions aux limites adéquates qui dépendent du profil et de la configuration des électrodes.

Une méthode de résolution introduisant la vorticité de l'écoulement peut être envisagée.

CONCLUSION

La présente note constitue les tâches minimales que le GEPAN se devait d'effectuer avant de développer des recherches dans le domaine de la MHD.

La première de ces tâches a été de faire un tour d'horizon des nombreuses applications de la MHD (conversion, fusion par confinement magnétique, métallurgie et propulsion) qui fasse le point sur les intérêts relatifs portés à ces techniques dans les différents pays au cours des 30 dernières années.

Sans porter un jugement de valeur sur les actions menées par le passé ni se faire l'avocat de telle ou telle solution, cette rétrospective permet de constater que la MHD demeure un domaine de la physique en pleine évolution, et qu'en particulier, certaines idées quant à la possibilité d'une propulsion par action MHD sont dignes de vérifications expérimentales.

La deuxième de ces tâches prioritaires a été la réalisation d'une expérience d'analogie hydraulique d'un écoulement supersonique sur un profil cylindrique en présence de champs électriques et magnétiques qui a montré la possibilité de supprimer l'onde d'étrave par un procédé MHD.

Reprenant l'expérience réalisée par JP. PETIT et M. VITON en 1976 en lui apportant certains prolongements (visualisation des lignes de courant), ce travail

constitue grâce aux moyens vidéo mis à disposition par l'ENSAE, un document final à l'étude phénoménologique.

En effet, il apparaît maintenant nécessaire, si l'on veut développer une démarche de recherche dans une voie qui paraît digne d'intérêt, de se donner les moyens d'effectuer des mesures objectivant les prévisions et quantifiant les premières observations.

C'est dans cet esprit que se pose le problème du prolongement de cette recherche dans les voies parallèles et complémentaires consistant à utiliser du mercure ou de l'air comme fluide d'essai.

Il est par ailleurs inutile de souligner l'intérêt qu'il y aurait à se doter de l'outil théorique de base servant de support de calcul à toute étude expérimentale bien menée.

REFERENCES

- (1) C. BAMIERES
"Compte rendu de mission"
n° 1270/SGDN/REN/CERST/E.6
1.06.76
- (2) C. BAMIERES
"La fusion thermonucléaire contrôlée"
n° 3 SGDN/AST/ST.1
26.10.78
- (3) C. BAMIERES
"Compte rendu de mission aux USA"
n° 161/SGDN/AST/ST.6
13.02.80-a
- (4) C. BAMIERES
"INTOR, vie et mort d'un Tokamak mondial"
n° 13/SGDN/AST/ST.6
8.10.80-b
- (5) C. BAMIERES
"La fusion thermonucléaire aux USA"
n° 12/SGDN/AST/ST.6
8.10.80-c

- (6) C. BAMIERES
"Les économies d'énergie dans la production d'électricité à partir de combustibles fossiles"
n° 16/SGDN/AST/ST.3
17.12.80-d

- (7) JP. CARESSA
Thèse de Doctorat de spécialité
Université d'Aix - Marseille
1968

- (8) US CONGRESS
"Magnetohydrodynamics - A Promising Technology for efficiently Generating Electricity from Coal"
Report to the Congress of USA
11.02.80

- (9) J. DELASSUS, MC. NOVE, R. ALBERNY, JP. BIRET
"Les brasseurs électromagnétiques IRSID-GEM dans le refroidissement secondaire des coulées continues de billettes et de blooms"
Institut de Recherches de la Sidérurgie Française (IRSID)
oct. 1977

ANNEXE

C. R. Acad. Sc. Paris, t. 279 (26 août 1974)

Série B — 203

MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE. — *Sur le coefficient de trainée de pression d'un obstacle sphérique isolant en magnétodynamique des liquides.* Note (*) de M. Charles Vivès, transmise par M. Léopold Escande.

Relevés expérimentaux de la distribution des pressions autour de sphères pleines, isolantes en présence d'un champ d'induction magnétique transversal à la direction moyenne de l'écoulement d'un liquide électroconducteur. On note que l'application d'un champ magnétique introduit une nette dissymétrie dans la répartition des pressions. Évolution de la pression au point d'arrêt et variation du coefficient de trainée de pression pour $107 \leq Re \leq 13,450$ et $0 \leq M \leq 160$.

Le problème de l'écoulement autour d'une sphère en présence d'un champ magnétique a été abordé théoriquement par différents auteurs [(1), (2)], particulièrement dans l'hypothèse où les nombres de Reynolds sont petits. Il est difficile de vérifier expérimentalement ces résultats, les pressions locales à la surface de l'obstacle étant alors très faibles, aussi

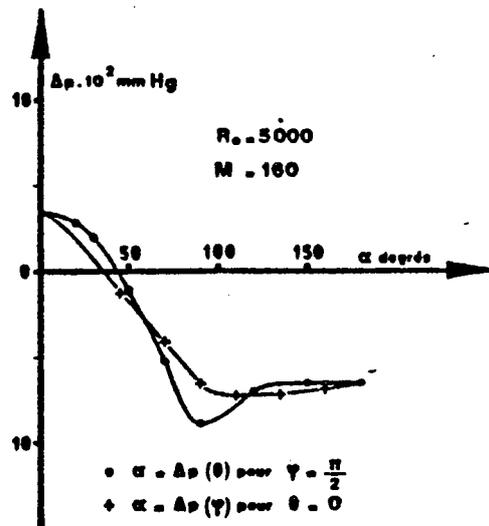


Fig. 1.

le but de ce travail est d'explorer systématiquement un domaine correspondant à des nombres de Reynolds supérieurs à 100.

Les sphères de diamètres D en ascodur (isolant) sont centrées dans un canal de section circulaire, de diamètre intérieur D' , réalisé en matériau isolant (altuglas) et à l'intérieur duquel s'écoule du mercure. Deux ouvrages de facteurs de formes identiques sont expérimentés avec respectivement $D=3 \text{ cm}$, $D'=5,23 \text{ cm}$ et $D=1 \text{ cm}$, $D'=1,74 \text{ cm}$.

Un tube en inox (diamètre extérieur : 2 mm) fixe la sphère et relie une prise de pression, pratiquée en un point m de la surface de l'obstacle, à un micromanomètre électromagnétique lui-même relié à une autre prise de pression, disposée sur la paroi du canal (infini amont de l'écoulement).

C. R., 1974, 2^e Semestre. (T. 279, N° 9)

Série B — 16

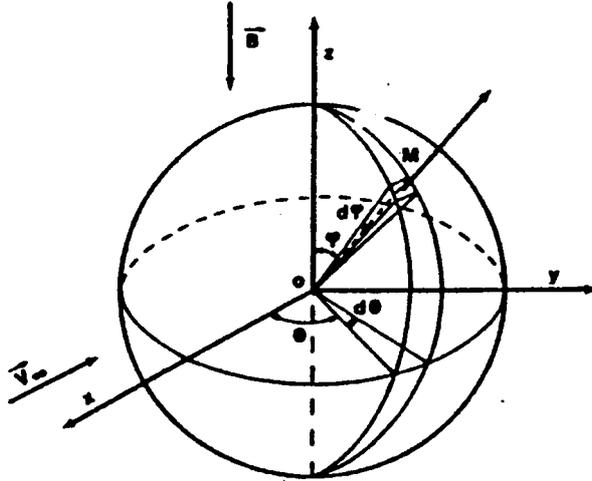


Fig. 2.

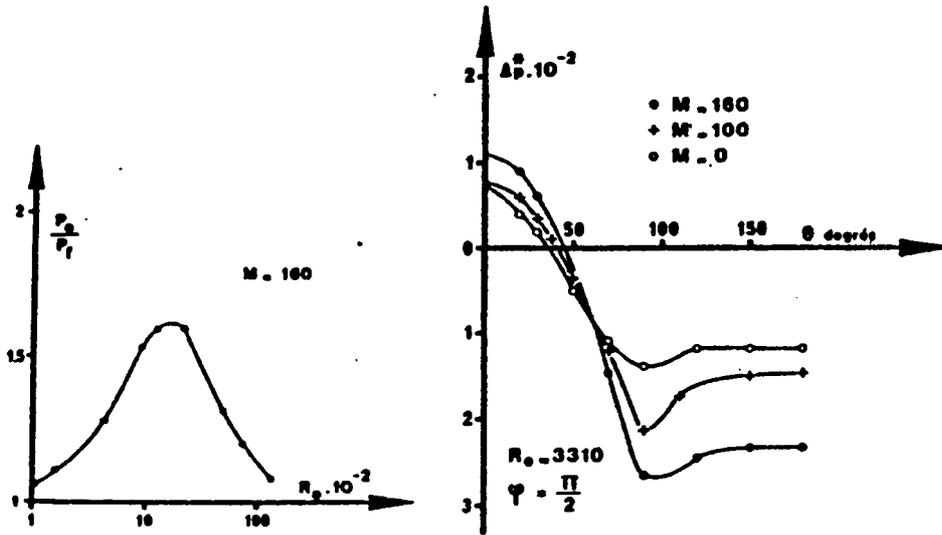


Fig. 3.

Fig. 4.

Ce dispositif, placé dans un champ d'induction magnétique \vec{B}_0 sensiblement uniforme et perpendiculaire à la direction de l'écoulement à l'infini, permet de relever les différences de pressions $\Delta P = P_m - P_\infty$ en fonction de la position du point m .

Les ΔP ont été initialement mesurées le long d'un cercle équatorial (perpendiculaire à la direction de \vec{B}_0) et d'un cercle méridien (parallèle à \vec{B}_0 et à \vec{V}_∞). La figure 1 fait apparaître une nette dissymétrie dans la distribution de la pression qui est donc une fonction de θ et de Φ (fig. 2); des expériences systématiques montrent que cet effet croît avec M et dépend de Re . Les variations du paramètre P_0/p_f en fonction de Re , P_0 étant la pression au point $\theta = \pi/2$, $\Phi = \pi/2$, R , et P_f la pression au point $\theta = 0$, $\Phi = 0$, R , sont mises en évidence sur la figure 3, il apparaît que la dissymétrie est maximale pour $Re = 1\ 700$.

Pour $Re = 3\ 310$ (fig. 4) on note que les surpressions et les dépressions $\Delta P^* = \Delta P / \rho V^2$ augmentent respectivement avec M , ainsi que l'azimuth θ_0 correspondant à $\Delta P = 0$. Pour

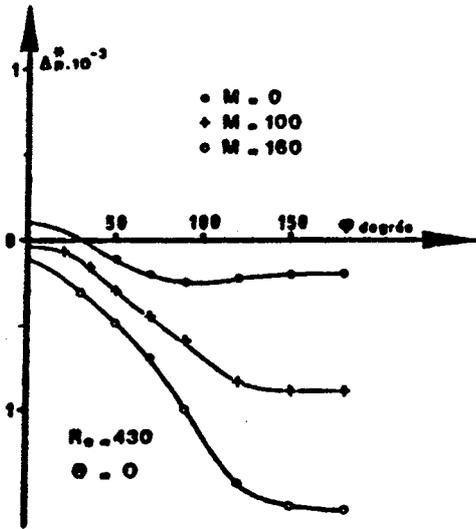


Fig. 5.

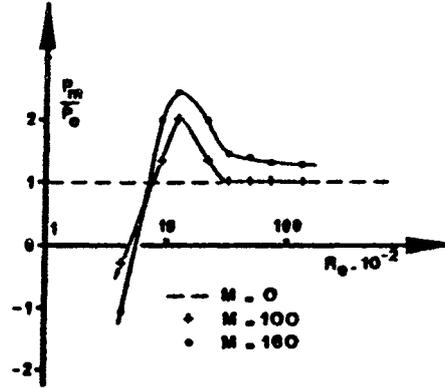


Fig. 6.

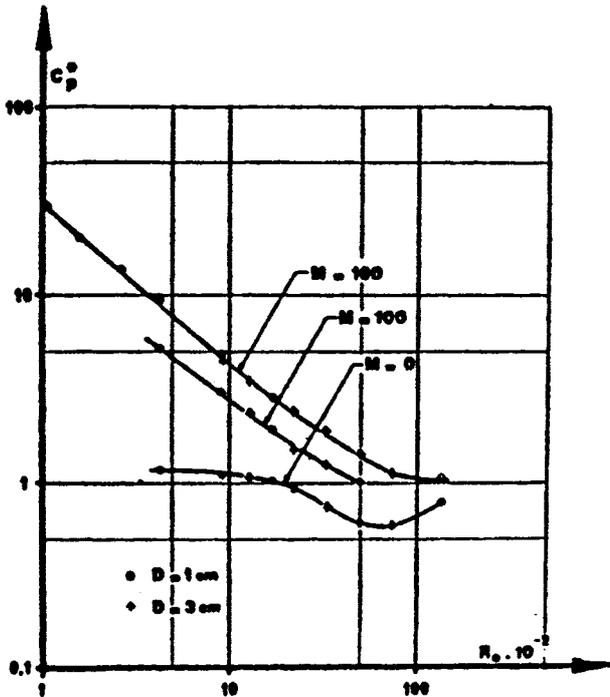


Fig. 7.

$Re=430$ (fig. 5) l'effet du champ magnétique est différent, les pressions deviennent toutes négatives pour des valeurs suffisantes de M et augmentent en valeur absolue avec ce paramètre, la zone de surpression à l'avant de l'obstacle est alors remplacé par une zone de dépression, délimitée par $0 \leq \theta \leq 90^\circ$. Par ailleurs l'azimuth θ_m de la valeur minimale de la pression varie progressivement avec M de 90 à 180° .

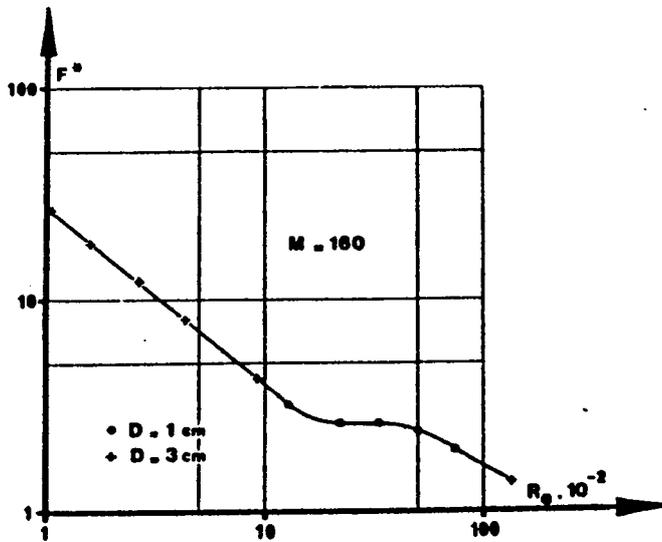


Fig. 8.

P_m/P_0 étant le rapport de la pression au point d'arrêt en présence (P_m) et en absence (P_0) de champ magnétique, on observe (fig. 6) que ce paramètre prend une valeur maximale pour Re voisin de 1 300 et que l'inversion de l'effet se produit pour Re voisin de 600; par ailleurs P_m/P_0 tend vers 1 pour les grandes valeurs de Re .

La figure 7 traduit les variations du coefficient de trainée de pression d'une sphère isolante, $C_p^* = 2 F g / \pi \rho R^2 V_r^2$ en fonction de Re et de M , on note d'une part l'importance de l'effet du champ magnétique (les forces sont multipliées par 27 pour $Re = 100$ et $M = 160$) et que par ailleurs la similitude géométrique est vérifiée. La vitesse de référence V_r a déjà été définie [(3), (4)] et

$$F = \int_0^\pi \int_0^{2\pi} \Delta P R^2 \sin^2 \Phi \cos \theta \, d\theta \, d\Phi.$$

Le paramètre $F^* = F_m/F_0$ égal au rapport des forces de pression en présence et en absence d'induction magnétique évolue linéairement, dans une représentation logarithmique, en fonction de Re lorsque ce nombre est compris entre 10^2 et 10^3 (fig. 8); les forces varient donc en raison inverse d'une puissance de Re , et suivent également une loi de la forme $a M + b M^2$ où a et b sont des constantes pour un Re donné. Les expériences ayant été menées en milieu confiné il n'a pas été jugé utile d'établir une formule empirique.

Les résultats expérimentaux relatifs aux sphères électroconductrices seront publiés ultérieurement.

(*) Séance du 24 juin 1974.

(1) H. CABANNES, *Magnétodynamique des Fluides*, Centre de Documentation universitaire, 1969.

(2) TH. LÉVY, *J. Mécan.* 6, 1967, p. 529-545.

(3) CH. VIVÈS, *Compte rendus*, 278, série B, 1974, p. 501.

(4) E. CRAUSSE, *Publications Technique et Scientifique de l'École française d'Ingénieurs de Beyrouth*, n° 9, 1945.

Laboratoire de Magnétohydrodynamique,
Faculté des Sciences,
33 rue, Louis-Pasteur,
84000 Avignon.

MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE. — Étude d'écoulements autour d'obstacles cylindriques isolants et électroconducteurs en présence d'un champ magnétique transversal.

Note (*) de M. Charles Vivès transmise par M. Léopold Escande.

Évolution de la pression au point d'arrêt et de l'azimut θ , relatif à la valeur minimale de la pression en fonction des nombres de Reynolds et de Hartmann. Les variations du coefficient de traînée de pression sont étudiées dans un domaine délimité par $93 \leq Re \leq 11\ 600$ et $0 \leq M \leq 160$ ce qui complète des résultats obtenus récemment (1).

On expérimente avec des cylindres de sections circulaires, pleins isolants (altuglas) et électroconducteurs (laiton) de diamètre $D = 1$ cm et de hauteur $h = 1,68$ cm. Ils sont disposés dans la partie centrale d'une conduite rectiligne de section carrée ($1,68 \times 1,68$ cm²), dont les parois sont réalisées en matériau isolant (altuglas), et dans laquelle s'écoule

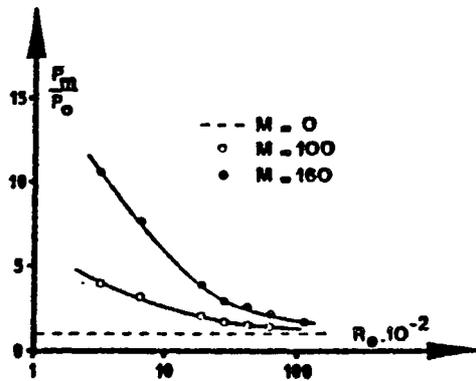


Fig. 1

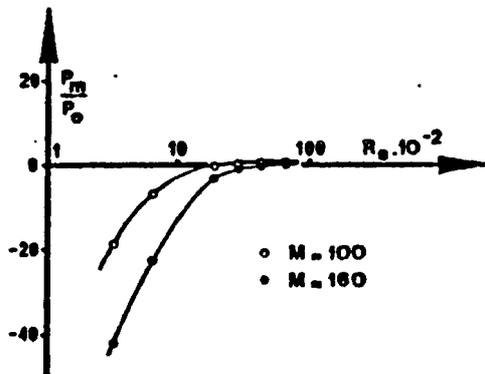


Fig. 2

du mercure. Les génératrices du cylindre sont perpendiculaires à la direction moyenne de l'écoulement.

L'ensemble du montage est immergé dans un champ d'induction magnétique uniforme et perpendiculaire au plan défini par l'axe de révolution du cylindre et la direction de la vitesse à l'infini.

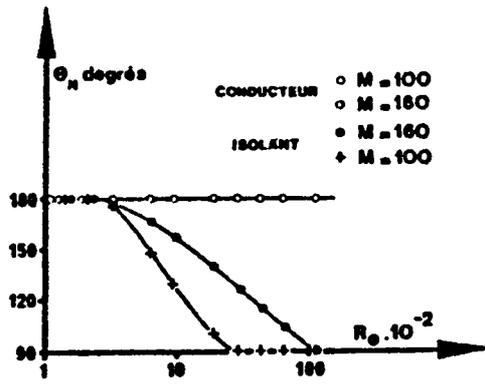


Fig. 3

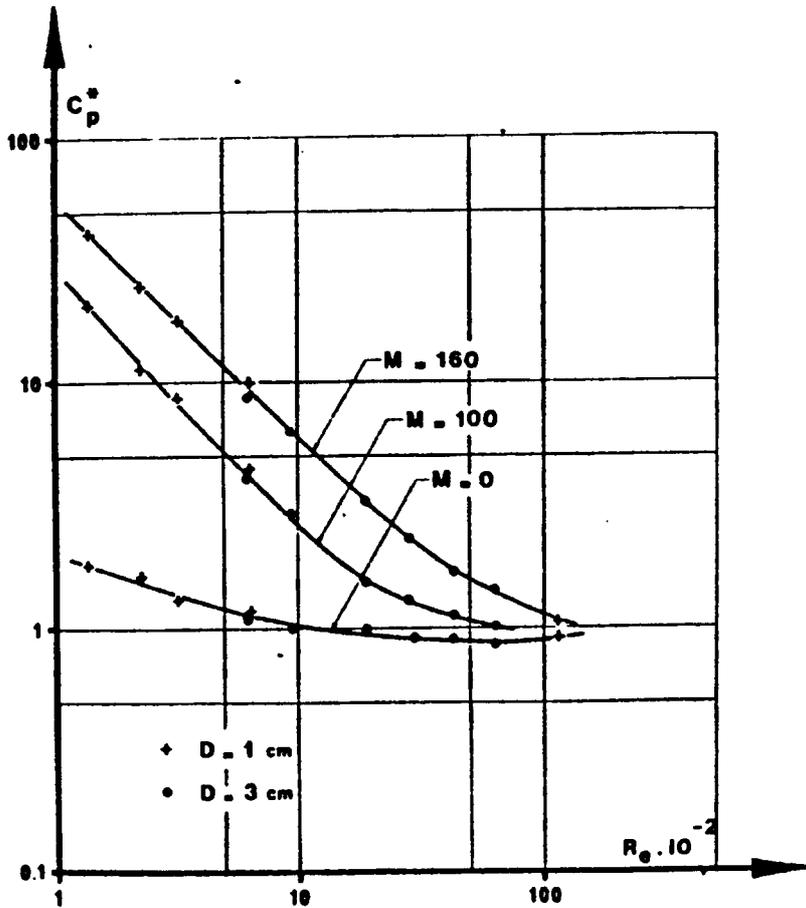


Fig. 4

Le procédé permettant de relever le profil des différences de pressions $\Delta P(\theta)$ a déjà été décrit (1).

P_M/P_0 étant le rapport de la pression au point d'arrêt en présence (P_M) et en absence (P_0) de champ magnétique, on observe que la variation de ce paramètre en fonction de Re et de M dépend très nettement de la conductivité de l'obstacle.

Si P_M/P_0 tend toujours vers 1 pour les grandes valeurs du nombre de Reynolds, il apparaît que, pour un obstacle isolant, la surpression initiale augmente avec M (fig. 1), alors qu'elle diminue, s'annule, puis est remplacée par une dépression d'autant plus importante que Re est plus faible, dans le cas d'un obstacle électroconducteur (fig. 2), par exemple on a $P_M > 40 P_0$ pour $Re = 430$ et $M = 160$.

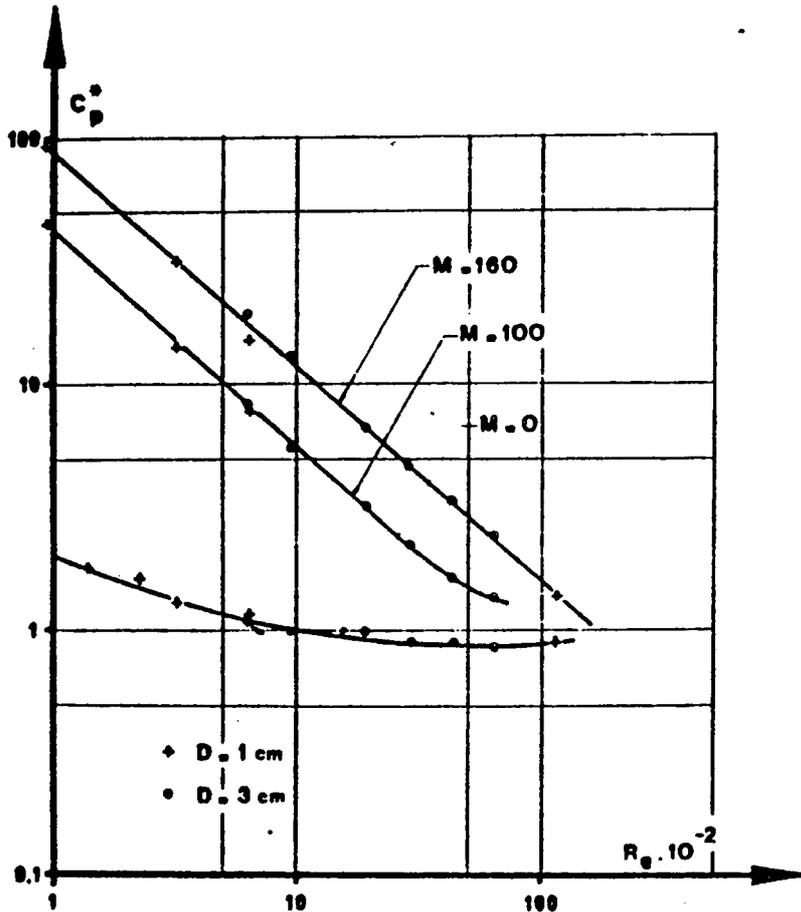


Fig. 5

En l'absence de champ magnétique l'angle θ_N relatif à la valeur minimale de $\Delta P(\theta) = p_{\infty} - p_{\theta}$ garde pratiquement une valeur constante, égale à 90° , lorsque Re varie; le résultat obtenu diffère de la valeur généralement admise dans l'intervalle étudié (80°), ce qui est probablement dû au fait que l'expérience est réalisée en milieu confiné.

En présence de champ magnétique on note (fig. 3) que lorsque le cylindre est électroconducteur, $\theta_N = 180^\circ$ pour $M = 100$ et 160 , quelle que soit la valeur du nombre de Reynolds, tout au moins dans la zone explorée. Dans le cas d'un obstacle isolant (fig. 3), la croissance de θ_N est d'autant plus rapide que le nombre de Hartmann est plus grand. Pour $M = 100$ et 160 l'azimut θ_N atteint 180° pour des valeurs de Re inférieures à 500.

Les variations du coefficient de traînée de pression C_p^* (Re, M) [pour des cylindres de longueur unité ⁽¹⁾], sont représentées sur les figures 4 (obstacle isolant) et 5 (obstacle électroconducteur). L'examen de ces réseaux montre que C_p^* est notablement modifié par la présence d'un champ magnétique surtout quand les nombres de Reynolds sont faibles et que par ailleurs la similitude géométrique est vérifiée. Pour $Re = 93$ et $M = 160$, la force résultante de pression est multipliée par 45 lorsque le cylindre est électroconducteur, enfin, et dans tous les cas, C_p^* devient sensiblement inversement proportionnel au nombre de Reynolds pour des valeurs suffisantes de M.

Cette dernière remarque, s'ajoutant au fait que θ_N atteint 180° , dans des domaines qui viennent d'être délimités, permet de supposer que le phénomène étudié présente, dans ces régions, des analogies avec l'écoulement de type visqueux sans décollement qui apparaît, pour des nombres de Reynolds inférieurs à 10^4 , en mécanique des fluides classique.

(*) Séance du 28 avril 1975.

(1) Ch. Vivès, *Comptes rendus*, 278, série B, 1974, p. 501.

Laboratoire de Magnétohydrodynamique,
Faculté des Sciences,
33, rue Pasteur,
84000 Avignon.

MAGNÉTOHYDRODYNAMIQUE. – Sur le coefficient de traînée de pression des cylindres ferromagnétiques en magnétodynamique des liquides. Note (*) de Charles Vives, transmise par Léopold Escande.

Évolution de la pression pour $82 \leq Re \leq 17 \cdot 10^3$ et $0 \leq M \leq 210$. Établissement de deux formules empiriques donnant le coefficient de traînée de pression en fonction du nombre de Stewart pour $0 < N < 40$ et $40 < N < 540$.

Evolution of the pressure for $82 \leq Re \leq 17 \cdot 10^3$ and $0 < M < 210$. Establishment of two empiric formulas giving the drag coefficient in function of the Stewart number for $0 < N < 40$ and $40 < N < 540$.

Plusieurs auteurs ([1], [2], [3]) ont étudié, théoriquement, des écoulements magnétohydrodynamiques autour d'obstacles aimantés, exclusivement de formes sphériques, particulièrement lorsque le champ magnétique est colinéaire à la direction de la vitesse à l'infini, dans l'hypothèse d'un régime laminaire ou d'un fluide non visqueux. Par

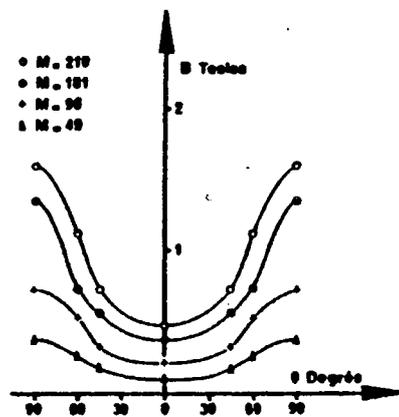


Fig. 1

ailleurs, les expériences, en présence de champ magnétique, déjà très fragmentaires sur les obstacles amagnétiques [4], car elles exigent l'appréciation de très faibles différences de pressions pariétales (de l'ordre de 10^{-4} mm de Hg), sont inexistantes dans le cas de solides ferromagnétiques.

On relève des profils de pression pariétale, en fonction de l'azimut θ , sur des cylindres pleins, confectionnés en fer doux, de diamètre $D = 1$ cm. Le montage expérimental et la technique particulière de mesure ont déjà été décrites ([5], [6]).

Le champ magnétique B imposé initialement, stationnaire, uniforme, perpendiculaire à V_∞ et à l'axe de révolution du cylindre, est modifié par l'inclusion de l'obstacle; sa répartition sur la paroi, en fonction de θ (fig. 1), ainsi que sa topographie au sein du mercure, varie avec la perméabilité du matériau ferromagnétique et les facteurs de formes caractérisant la géométrie de l'obstacle et de l'entrefer. Des mesures annexes établissent que la hauteur totale du cylindre est suffisante pour que la variation relative de B , sur une génératrice, reste limitée à 2 % pour la portion métallique réellement immergée dans le fluide. La valeur de l'induction magnétique de référence, choisie pour déterminer le nombre de Hartmann $M = B \cdot D \cdot (\sigma / \eta)^{1/2}$, est celle qui règne, pour une même excitation de l'électro-aimant, en présence d'un cylindre amagnétique (ou en absence d'obstacle).

Trois obstacles sont expérimentés; un cylindre A, dont la surface n'a subi aucun traitement, un cylindre B, revêtu d'une très fine pellicule de vernis isolant, un cylindre C, chemisé par un anneau de cuivre de $5 \cdot 10^{-2}$ mm d'épaisseur. Les figures 2 et 3 représentent

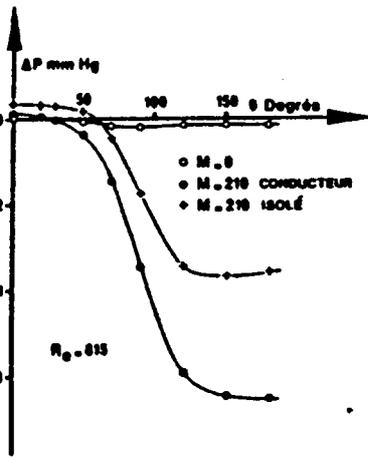


Fig. 2

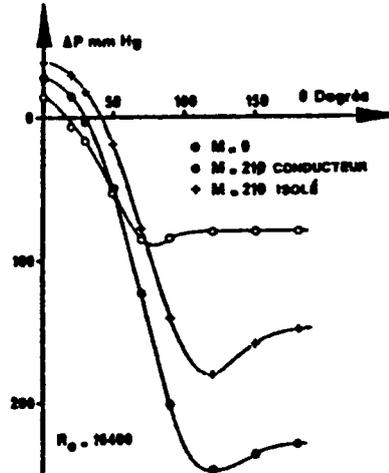


Fig. 3

les variations $\Delta P(\theta)$ relevées à mi-hauteur du cylindre. Pour des mêmes valeurs de Re et de M , les résultats relatifs aux cylindres A et B sont pratiquement identiques; à la température ordinaire, le mercure ne « mouille » pas le fer et le cylindre A se comporte

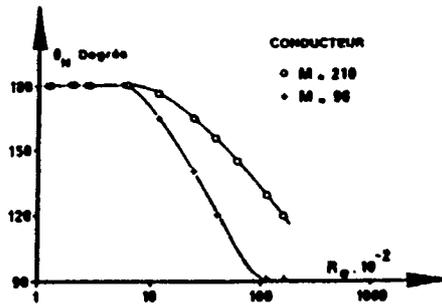


Fig. 4

comme s'il était isolé électriquement. Pour des relevés réalisés avec des prises de pression situées sur les cylindres, à 2 mm de leurs bases, les mesures restent stables et ne s'écartent que de 4 % des résultats présentés (fig. 2 et 3). Cette observation semble en contradiction avec la théorie prévoyant l'établissement d'un écoulement tridimensionnel [7], mais qui s'appuie, toutefois, sur des hypothèses ($Re \gg 1$ et $M^2 \gg N$) qui ne coïncident pas avec mes conditions expérimentales.

On accède au coefficient de traînée C_p^* ([5], [6]), après intégration graphique de très nombreuses mesures de pressions réalisées dans les intervalles $0 < \theta < \pi$ (fig. 5). C_p^* est inversement proportionnel à Re (droite de pente -1); cette propriété, déjà établie dans le cas des cylindres amagnétiques [6], s'ajoutant au fait que l'angle θ_N , correspondant à la valeur minimale de $\Delta P(\theta)$, atteint 180° , dans les régions $Re \leq 10^3$ et $M > 96$ (fig. 4), permet de supposer que, dans ce domaine, le phénomène présente des analogies avec l'écoulement de

type visqueux, sans décollement, qui apparaît, pour des nombres de Reynolds inférieurs à 10, en mécanique des fluides classiques.

La figure 6, où $F' = C'$ est le rapport des forces résultantes (où des coefficients de traînée) de pressions, en présence et en absence de champ magnétique, met en évidence l'importance du

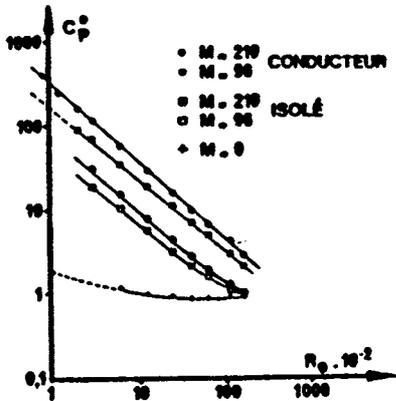


Fig. 5

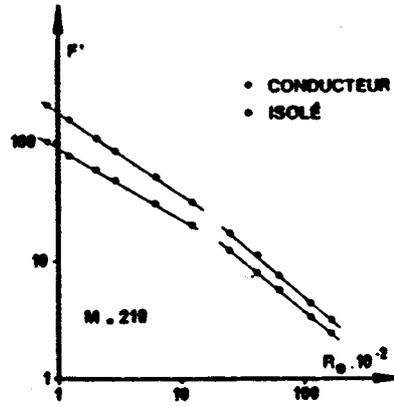


Fig. 6

phénomène (pour $Re = 82$ et $M = 210$, les forces sont multipliées par 200 pour le cylindre C et par 100 pour le cylindre A). On observe, dans les domaines relatifs à $Re < 10^3$ et $Re > 10^3$, la

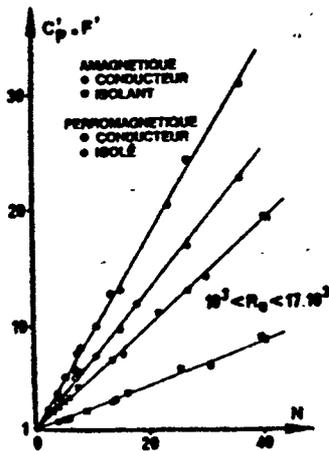


Fig. 7

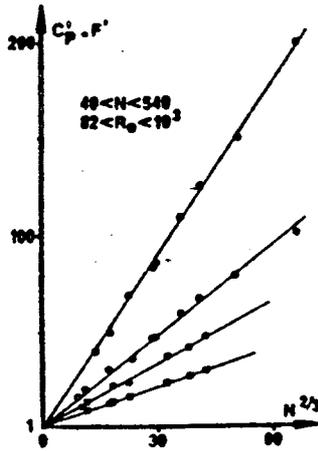


Fig. 8

présence de deux portions de droites, de pentes différentes, qui sont encore l'indice de l'existence de deux régimes d'écoulements, respectivement caractérisés, au point de vue strictement hydrodynamique, par la prédominance des forces de viscosité et d'inertie. Cette présomption est corroborée par l'examen des réseaux 7 et 8, dont on déduit deux relations empiriques très simples

$$C' = F' = 1 + A(\sigma, \mu) N^{2/3} \quad \text{pour } 40 < N < 540 \text{ et } 82 < Re < 10^3.$$

$$C' = F' = 1 + B(\sigma, \mu) N \quad \text{pour } 0 < N < 40 \text{ et } 10^3 < Re < 17 \cdot 10^3.$$

Le nombre de Stewart, $N = M^2/Re$, représente le rapport des forces électromagnétiques aux forces d'inertie.

En exploitant des résultats antérieurs, acquis dans des conditions expérimentales similaires, avec des cylindres non ferromagnétiques ([5], [6]), il s'avère (*fig. 7 et 8*) que la forme et le domaine de validité de ces lois ne dépendent pas de la conductivité électrique et de la perméabilité magnétique des obstacles ni de la topographie du champ magnétique.

(*) Remise le 29 janvier 1979 et acceptée le 9 avril 1979.

[1] H. CABANNES, *Magnétodynamique des fluides*, Centre de documentation universitaire, 1969.

[2] Th. LEVY, *J. Mécan.*, 6, 1967, p. 529.

[3] G. LUDFORD et J. MURRAY, *J. Fluid. Mech.*, 7, 1960, p. 516.

[4] G. BRANOVER, N. SLJUSAREV et A. CIMOBER, *Magnit. Gidrodinam.*, 3, 1966, p. 149.

[5] Ch. VIVES, *Comptes rendus*, 278, série B, 1974, p. 501.

[6] Ch. VIVES, *Comptes rendus*, 280, série B, 1975, p. 677.

[7] J. HUNT et G. LUDFORD, *J. Fluid. Mech.*, 4, 1968, p. 693.

*Laboratoire de Magnétohydrodynamique, Faculté des Sciences,
33, rue Louis-Pasteur, 84000 Avignon.*