

MÉCANIQUE DES FLUIDES. — *Méthode pour supprimer l'instabilité de Velikhov.*
 Note (*) de Jean-Pierre Petit et Michel Billiotte, présentée par André Lichnerowicz.

Une méthode originale de suppression de l'instabilité d'ionisation de Velikhov est présentée, basée sur le confinement de la décharge par la pression magnétique.

A MHD converter with spiral currents is operated, in which an original method, based on magnetic confinement, cancels the ionization instability.

1. INTRODUCTION. — Le principe de l'accélérateur à courants spiraux a fait l'objet d'une précédente Note [1]. Ces accélérateurs à fort paramètre de Hall ne peuvent fonctionner que si l'on parvient effectivement à réaliser un enroulement suffisant des lignes de courant. L'instabilité de Velikhov s'oppose immédiatement à cette distribution spirale [2]. Velikhov et Golubev [3] ont essayé de faire fonctionner un accélérateur-disque. Les photos prises au

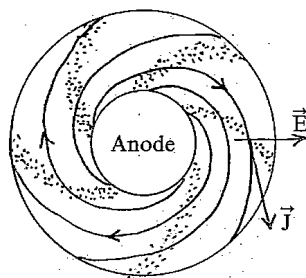


Fig. 1

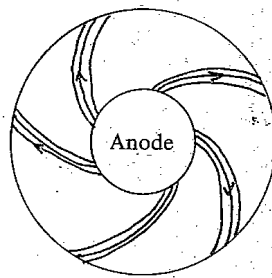


Fig. 2

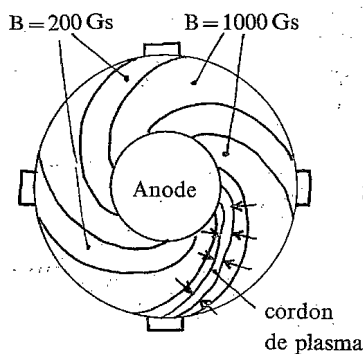


Fig. 3

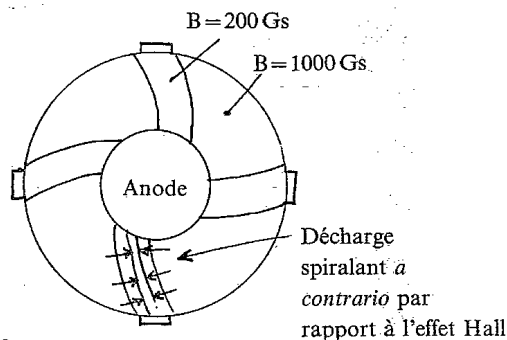


Fig. 4

convertisseur d'image montraient très bien l'effet de l'instabilité d'ionisation. Selon la théorie développée par Velikhov les ondes d'ionisation se développent suivant les bissectrices des angles (E, J) (voir *fig. 1*). Le temps de naissance de cette instabilité est très bref, puisqu'il est pratiquement égal au temps d'ionisation lui-même. Le courant a alors naturellement tendance à emprunter ces allées fortement ionisées (voir *fig. 2*). Et tout se passe alors comme si le convertisseur fonctionnait avec un paramètre de Hall (efficace) proche de l'unité. Auquel cas cette géométrie disque cesse d'être intéressante. Les décharges de courant se distribuent grosso modo suivant des spirales logarithmiques faisant un angle de 45° avec le rayon vecteur. On peut aisément reconstituer cette expérience à moindre frais en faisant opérer le convertisseur dans un gaz à basse pression, disons une fraction de millimètre de mercure.

Nous nous sommes demandé s'il était possible de supprimer purement et simplement cette instabilité.

2. LES PARAMÈTRES SENSIBLES DE L'INSTABILITÉ DE VELIKHOV. — Cette instabilité se réfère uniquement aux plasmas hors d'équilibre ($T_e > T_g$). Dans ces conditions il est possible de calculer la valeur β_{cr} du paramètre de Hall critique. Si $\beta > \beta_{cr}$ l'instabilité se développera. La première idée consiste à opérer en dessous de cette valeur critique. Mais la valeur de β_{cr} est en général faible. Ce qui donne des accélérateurs de Hall inopérants. Les collisions coulombiennes ont un effet stabilisant. Voir références [4] et [5]. En régime totalement coulombien la valeur du paramètre de Hall critique est très voisine de 2, ce qui reste assez faible. A. Solbes [4] a mis l'accent sur le fait que les phénomènes dissipatifs pouvaient également stabiliser le plasma. En particulier les échanges radiatifs entre zones à forte et faible

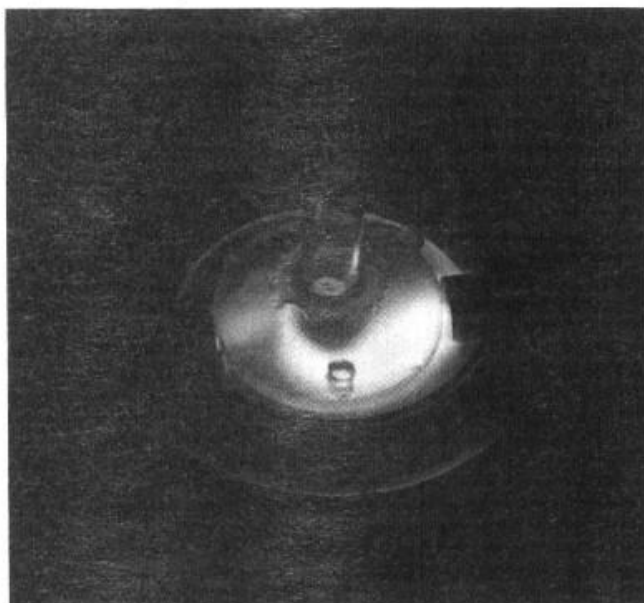


Fig. 5. — Décharge stabilisée par confinement magnétique.

température électronique. Encore faut il que la distance d'émission-réabsorption soit adéquate, c'est-à-dire de l'ordre de la longueur d'onde de l'instabilité, ce qui n'est pas nécessairement le cas.

Nous avons envisagé dans ce qui va suivre une méthode originale d'action sur l'instabilité, basée sur un confinement magnétique.

3. CONTRÔLE DE L'IONISATION PAR CONFINEMENT MAGNÉTIQUE. — Considérons un gaz sous une pression p_g . Soit α le degré d'ionisation hors d'équilibre. La pression du gaz d'électrons est $p_e = n_e k T_e$. C'est-à-dire $p_e = \alpha (T_e / T_g) p_g$.

Considérons une situation hors d'équilibre où T_e est au plus supérieur d'un ordre de grandeur à T_g . Et où le taux d'ionisation est inférieur à 10^{-1} . La pression partielle électronique p_e sera inférieure, ou au plus de l'ordre de la pression gaz p_g . Ces conditions sont réalistes. Plaçons le gaz dans un champ magnétique B . Si $p_e \ll B^2 / 2\mu_0$ la géométrie de la décharge sera imposée par la géométrie magnétique. Ces concepts dérivent directement de ceux en vigueur dans le domaine de la fusion contrôlée. Mais, au lieu de créer une géométrie magnétique propre à confiner la décharge électrique loin de la paroi, nous pouvons, dans un convertisseur-disque, utiliser la pression magnétique pour contraindre le plasma à rester dans des régions bien précises du convertisseur. Imaginons une distribution inhomogène du champ magnétique, facile à créer à l'aide par exemple d'aimants permanents, correspondant au schéma de la figure 3. Dans les allées spirales le champ est de 200 Gs, alors qu'en dehors il est de 1 000 Gs. Ce qui signifie une variation de pression magnétique dans un rapport de 25.

Dans le convertisseur un gaz (de l'air) sous une pression de 10^{-2} Torr. Dans des conditions où $p_e \lesssim p_g$ un rapide calcul montre que le rapport entre la pression magnétique et la pression électronique est supérieur à 3000. Les conditions de confinement sont donc réalisées. Effectivement, l'expérience montre que la décharge suit fidèlement le trajet qui lui est imposé. Pratiquement, tout le courant passe dans ces zones où le champ magnétique est le plus faible, et ceci se traduit par une force de Laplace $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ dont la direction est précisément celle qui permet à un accélérateur disque de fonctionner. Nous avons pu obtenir par cette méthode des distributions de courant correspondant à un angle spirale-rayon vecteur atteignant 70° . Ce qui donne une valeur, de ce que nous pourrions appeler le paramètre de Hall « apparent » de l'ordre de 2.74.

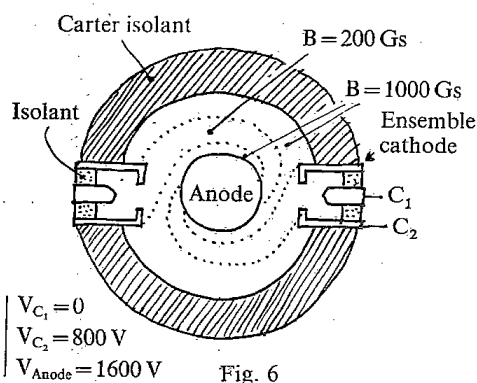


Fig. 6

Générateur de Faraday en situation hors-d'équilibre

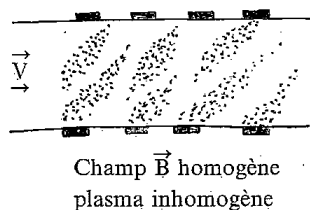
Champ \vec{B} homogène
plasma inhomogène

Fig. 7

Plasma confiné dans
les zones où B est minimal

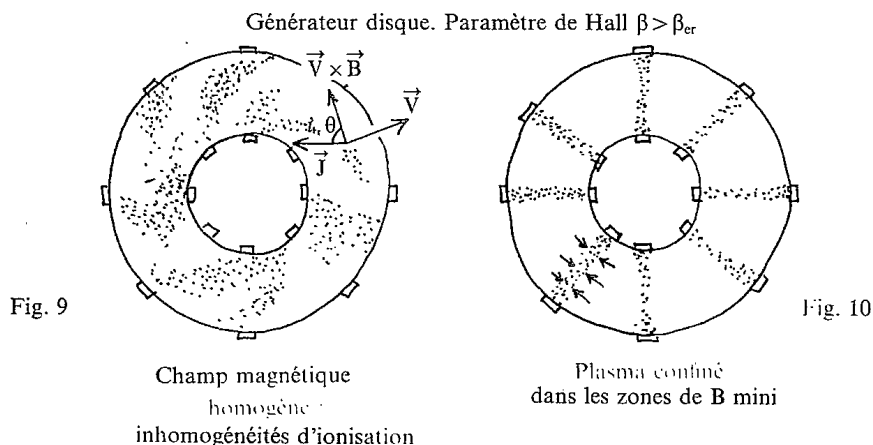
Fig. 8

La décharge est alors homogène, ce qui signifie que l'instabilité de Velikhov a été éliminée. Plusieurs interprétations peuvent être alors avancées. Dans la décharge, la densité de courant est élevée. Le plasma est totalement ionisé. Et l'accroissement de la fréquence de collision, du à l'apparition des collisions coulombiennes, a probablement fait chuter le paramètre de Hall local (dans la décharge) en dessous de la valeur critique $\beta_{cr} = 2$. Autre effet, difficilement appréciable : le couplage radiatif dans cette zone à forte température électronique.

4. EFFICACITÉ DE CE CONTRÔLE MAGNÉTIQUE. — Le problème était, rappelons-le, de réaliser une distribution spirale de courant électrique. Au départ ceci devait être le fait de l'effet Hall. Finalement c'est la géométrie magnétique qui crée cette distribution, et le résultat est atteint. On peut montrer la prégnance de cet effet du confinement magnétique, en réalisant l'expérience (paradoxe) suivante : créons un champ B inhomogène correspondant à la figure 4. La contrainte due au confinement magnétique l'emporte sur l'effet Hall lui-même, et on observe des spirales de courant qui s'enroulent en sens rétrograde (vis-à-vis du sens suggéré par l'effet Hall).

5. COMMENTAIRES SUR LA PHOTOGRAPHIE D'EXPÉRIENCE. — La photographie 5 montre l'enroulement du courant du au confinement magnétique. Le système comporte une anode centrale en cuivre, et deux cathodes diamétralement opposées. Le courant total atteint 0,6 A. Le diamètre extérieur de la chambre est de 10 cm. L'anode centrale a un diamètre de 4 cm. Et l'épaisseur de la chambre est de 5 mm. L'ensemble constitue un système de refoulement de l'air (forces de Laplace centripètes) vers le canal central visible sur la photo. Chaque cathode est constituée de deux éléments (voir fig. 6). Entre la tige centrale et le corps cylindrique de la cathode la chute de tension est de 800 V. Et l'on mesure encore 800 V entre ces éléments cylindriques et l'anode centrale. Un système d'alimentation séquentielle (voir référence [6]) permet d'appliquer alternativement la tension sur l'une ou l'autre des cathodes avec une fréquence de 10^4 Hz.

6. RÉFLEXIONS SUR LES CONVERTISSEURS MHD FONCTIONNANT HORS D'ÉQUILIBRE. — Les générateurs MHD hors d'équilibre, qui étaient censés fonctionner avec un mélange hélium-césium, ont été pratiquement abandonnée depuis des années au profit des générateurs dits en « cycle ouvert », fonctionnant avec des gaz de combustion (donc en situation proche de l'équilibre). L'instabilité de Velikhov, se produisant indifféremment dans les générateurs de Faraday ou dans les générateurs de Hall pour peu que β dépasse un tant soit peu la valeur critique β_{cr} , a stoppé tous les efforts dans cette tentative d'exploitation par la MHD de l'énergie produite par les réacteurs à haute température.



Il nous semble que cette idée nouvelle d'annihilation de l'instabilité de Velikhov suggérerait un réexamen de la question. La figure 7 par exemple montre les inhomogénéités maintes fois observées dans les convertisseurs de Faraday à électrodes segmentées. En appliquant la méthode du confinement magnétique, c'est-à-dire en créant des barrières de champ séparant les décharges successives dans la tuyère MHD, on pourrait peut-être retrouver un fonctionnement correct de ces machines (voir *fig. 8*).

Dans les générateurs disques, à paramètre de Hall élevé, l'écoulement de gaz est radial. Le champ électromoteur $\vec{V} \times \vec{B}$ est azimutal. Le courant devrait donc passer suivant des lignes proches des rayons vecteurs. L'instabilité de Velikhov crée alors des inhomogénéités (toujours selon la bissectrice de \vec{E}, \vec{J}) de forme spirale (voir *fig. 9*). Dans un champ magnétique non homogène, où les zones de B minimales seraient distribuées selon des rayons, on pourrait peut-être restaurer un fonctionnement correct (voir *fig 10*). Les flèches indiquent le sens des forces de confinement magnétique. On pourrait objecter que le champ électromoteur suit les fluctuations de B. Mais ceci devrait être compensé par le fait que la conductivité azimutale varie en $1/B^2$.

(*) Remise le 16 juin 1980, acceptée après révision le 27 avril 1981.

[1] J.-P. PETIT, *Comptes rendus*, 281, série B, 1975, p. 157.

[2] E. VELIKHOV, *Hall Instability of Current Carrying Slightly Ionized Plasma. MHD elec., Power generation*, Newcastle, 1962, p. 135.

[3] E. VELIKHOV et V. GOLUBEV, *MHD Conversion Experiments on Disc Shape Nozzle*, (Colloque MHD, Paris, 1965).

[4] A. SOLBES, *Étude des inhomogénéités planes dans un plasma de conversion MHD. Instabilités électroniques*, PA Ign/RT, Saclay, 8 septembre 1966.

[5] J. P. PETIT et J. VALENSI, *Comptes rendus*, 269, série B, 1969, p. 365.

[6] J. P. PETIT, M. BILLIOTTE et M. VITON, *Comptes rendus*, 291, série B, 1980, p. 129.