

Août 1981

INT 107/81

Approche de la génération de courant dans un plasma toroïdal
par ondes électromagnétiques

Guido Bugmann

Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association Euratom - Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

INTRODUCTION

Dans un réacteur à fusion de type tokamak le taux de production d'énergie sera maximal avec un plasma continu. Pour cela il est important de développer les systèmes permettant de générer un courant toroïdal continu. La densité de courant requise allant typiquement de 30 A/cm² (Jet) à 100 A/cm² (TCA).

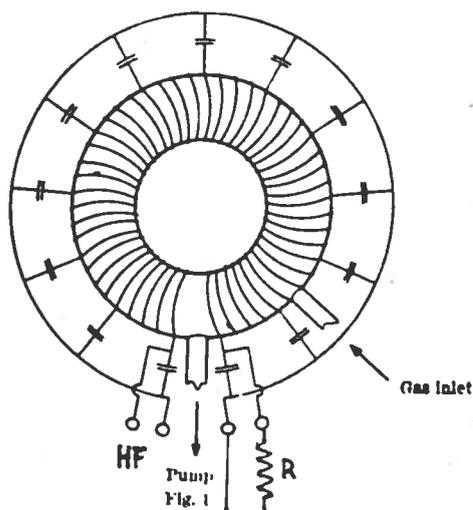
Il existe essentiellement deux classes de systèmes qui sont à l'essai, l'injection d'un flux de particules neutres (1,2) et la propagation contrôlée d'ondes électromagnétiques dans le plasma. Il sera traité de cette dernière dans ce papier. Les résultats intéressants de quelques expériences passées seront présentés ainsi qu'un bref survol des théories existantes.

Il apparaîtra que la pression de radiation sera le mécanisme dominant de production de courant à haute température.

Une expérience réalisable sur le tokamak TCA est suggérée.

Quelques expériences passées

Dès 1951 Thonemann et al. (3) ont essayé de générer du courant en poussant les électrons avec un miroir magnétique circulant autour d'un tube en verre (Fig. 1).



Toutes les expériences ultérieures (4,5,6,7) testant ce principe ont été réalisées avec le même montage expérimental.

Il y est apparu que la génération de courant était maximale quand la densité du plasma et le champ toroïdal étaient tels que la relation de dispersion d'une onde dans le plasma était vérifiée. K. Hirano (4) en 71 et M. Fuhuda (6) en 77 ont proposés le mode siffleur comme candidat, tandis que S.M. Osovets et I.A. Popov (7) en 72 proposaient une onde Alfvén.

Ce sont toutes deux des ondes à propagation parallèle et dans la limite des basses fréquences, les deux relations de dispersion ont une structure proche. Dans ce domaine de fréquences (< quelques MHz) une densité de courant record de 50 A/cm^2 a pu être obtenue récemment par

R.A. Demirkhanov et al. (8) sur le stellarator R-0. Cette machine possède un tore en quartz et des bobines d'excitation, semble-t-il, hélicoïdales $m = 2, n = 2$. L'efficacité de production est cependant faible: $3 \cdot 10^{-5}$ kA/kW ($T_e \sim 15$ eV, $n_e \sim 3 \cdot 10^{13}$ cm $^{-3}$)

Dans le domaine des ondes cyclotroniques ioniques l'intéressante expérience suivante a été réalisée par S. Yoshikawa, H. Yamato (9) :

Sur une des sections droites du Stellarator Model C des bobines de Stix (Fig. 2) sont montées pour une expérience de chauffage cyclotronique (10). D'un côté, disons le gauche, le champ magnétique principal est réduit de 10 %. Ceci crée une "plage magnétique" où l'onde se propageant vers le gauche va mourir quand elle atteint la zone où $\omega = \Omega_{ci}$. De l'autre côté de la bobine le champ B_z est tel que la résonance n'est pas atteinte et seule reste donc une onde se propageant vers la droite.

Dans cette direction une densité de courant de 0.75 A/cm 2 a pu être obtenue avec une efficacité de $12 \cdot 10^{-5}$ kA/kW ($T_e \sim 50$ eV, $n_e \sim 0.5 \cdot 10^{13}$)

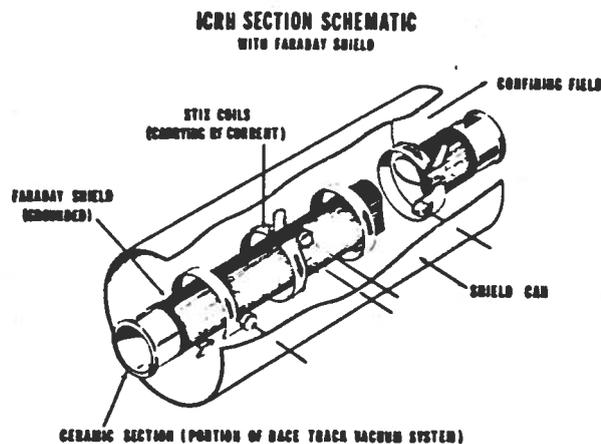


FIG. 2 Artist's view of the Faraday shield

De nombreux essais ont également été tentés avec les ondes hybrides inférieures. Le plus récent d'entre eux, effectué par K. Ohkubo, S. Takamura et al. (11) en 1980 sur le tokamak JIPP T-II, a permis de générer, sur un fond de courant ohmique, une densité de courant supplémentaire de $4,4 \text{ A/cm}^2$ avec une efficacité de $1,25 \cdot 10^{-2} \text{ kA/kW}$ ($T_e \sim 150 \text{ eV}$, $n_e \sim 0,6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$).

Cette efficacité déjà grande devrait pouvoir être augmentée jusqu'à une valeur de $0,12 \text{ kA/kW}$. En effet, l'impulsion HF, d'une durée de 10 ms, n'a pas permis d'atteindre le plateau de densité de courant, estimé à 44 A/cm^2 .

L'efficacité est définie ici comme étant le rapport entre le courant généré dans le plasma et la puissance maximale du générateur HF. Elle décrit à la fois la difficulté à amener l'onde jusque dans le plasma et la difficulté de transmettre l'énergie de l'onde au courant. C'est donc une bonne mesure de l'état actuel des recherches.

Les ondes hybrides inférieures y viennent largement en tête mais c'est avec les ondes Alfvén que l'on a été le plus près de réaliser une machine en continu. Il faut cependant noter que ce résultat a été atteint sur un stellarator avec un plasma de basse température. Sur les plasmas chauds de tokamaks tout reste à faire.

Quelques théories :

Pour générer du courant il faut d'abord générer une onde dans le plasma et toutes les théories du chauffage traitent ce problème.

Une fois que l'onde circule dans le plasma plusieurs mécanismes particuliers peuvent générer du courant :

-Le champ magnétique oscillant de l'onde peut posséder une composante parallèle B_1 (au champ toroïdal B_0) et former ainsi une suite de miroirs magnétiques progressifs. La force associée à ces miroirs va cependant comme $(B_1/B_0)^2$ (12) et n'est sensible qu'à bas champ toroïdal.

-Le champ électrique de l'onde peut posséder, comme A. Hasegawa (12) le suppose pour les ondes Alfvén cinétiques, une composante parallèle. Le courant généré est formé d'électrons piégés dans le potentiel progressif Ψ associé au champ électrique parallèle. Après avoir fait l'hypothèse que la fonction de distribution s'applatissait localement autour de $v = v_{\text{alfvén}}$ sur une largeur estimée à $2 \Delta v = (2e\Psi/m_e)^{1/2}$ Hasegawa (14) obtient pour la densité de courant locale :

$$j_A(x) = \frac{e n_e(x) v_a(x)}{\sqrt{2\pi}} \left(\frac{e \Psi(x)}{T_e} \right)^{3/2}$$

v_a = vitesse d'alfvén

n_e = densité électronique

Jusqu'à maintenant ce résultat n'a été obtenu que dans un modèle unidimensionnel (plasma plan).

- Une troisième force utilisable est la pression de radiation. C.F.F. Karney, N.J. Fish (15) ont présenté un calcul bidimensionnel (plasma cylindrique) où ils considèrent une onde électromagnétique à $\omega = \Omega_{ci}$ absorbée dans le plasma et transférant ainsi son impulsion aux électrons (un peu comme un faisceau de particules). Toute la partie physique du calcul est cachée dans un coefficient de diffusion quasilinear $D(v)$ à valeur non-nulle dans une zone de la fonction de distribution $v_1 < v < v_2$.

La valeur de $D(v)$ influence le temps de montée du courant mais pas sa valeur plateau, car toute l'impulsion de l'onde finit par être absorbée. Le plateau de densité de courant, par contre, dépend de v_1 et v_2 :

$$j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} e^{-\frac{v_1^2}{2}}$$

Pour le calcul du courant généré l'approche ressemble à celle de Hasegawa, en ce sens qu'elle comporte également une estimation de l'importance de la perturbation de la fonction de distribution par l'onde.

Une analyse touchant également la pression de radiation, mais sans doute plus claire, a été faite par R. Klima (16). Il considère que pratiquement toute l'impulsion de l'onde est transférée aux électrons. Ceux-ci atteignent une vitesse limite quand la force électromagnétique appliquée est égale à la force de frottement due aux collisions avec les ions. Le courant est ainsi déterminé dans le cas d'un plasma toroïdal :

$$I = \frac{e k_z P}{2\pi m_e \nu_e \omega R}$$

p = puissance absorbée par le plasma

ν_e = fréquence de collision des e

ω/k_z = vitesse de phase parallèle de l'onde

On voit que tout comme dans l'expression de Fisch les ondes à petite vitesse de phase génèrent plus de courant. De plus, le rapport $\tau^{3/2}/n_e$ doit être aussi grand que possible.

Pour une densité constante il y a donc tout avantage à travailler à haute température.

Comme la conclusion exactement inverse peut être tirée du calcul de Hasegawa, il apparaît que la pression de radiation sera le processus dominant à haute température.

Remarques :

Les difficultés expérimentales du chauffage hybride inférieure à haute densité se retrouvent dans les expériences de génération de courant. De même, dans le domaine des ondes Alfvén, le problème du couplage de la puissance au plasma se retrouve dans les expériences de génération de courant.

En présence d'un champ électrique toroïdal continu le taux de production de runaway est grandement accru (17) quand la vitesse de phase de l'onde est proche de la vitesse critique $v_c = v_{the} / \sqrt{E}$. Si l'on ne veut pas produire de runaway avec les basses vitesses de phase proposées plus haut, il faut travailler sans champ électrique torique.

D'intéressantes expériences de contrôle des pertes de plasma à travers les lignes de champ ont été faites par V.V. Dolgoplov (18) et R.A. Demirkhanov et al. (8,19) aux fréquences Alfvén. La théorie du processus étant faite par V.V. Nemov (10). Le principe est le suivant :

- Une onde se propageant azimutalement dans un plasma exerce une pression azimutale sur les particules, selon le même mécanisme que pour la génération de courant. Comme, cette fois, le champ magnétique principal est perpendiculaire à la force, le mouvement qui en résulte est soit dirigé vers l'intérieur soit vers l'extérieur du plasma, selon la charge de la particule et la direction de propagation de l'onde. Ce genre de mécanisme pourrait être mis en relation avec l'augmentation de densité observée lors d'une expérience de chauffage alfvén sur TCA (21).

Sur TCA, où une expérience de chauffage est actuellement en cours, il est possible, sans grandes modifications expérimentales de générer des ondes alfvén progressives. Pour cela il suffit de déphaser deux des quatre antennes de $\pi/2$ par rapport à la précédente. Le modèle théorique étant le même dans le cas d'ondes stationnaires (chauffage) ou progressives (génération de courant), rien, de ce côté, n'empêche que celles-ci soient générées.

Une autre approche, ou interviendrait l'esprit de l'expérience de Yoshikawa (9) et l'assymétrie théorique (22) de propagation entre les modes $n = +1$ et $n = -1$, devrait permettre, sur l'expérience telle qu'elle est montée actuellement, de mettre en évidence un courant généré.

Dans cette optique il serait intéressant d'explorer des domaines de paramètres où l'une des polarisations de l'onde est plus efficacement générée que l'autre. Par la même occasion l'hypothèse faite plus haut sur l'augmentation de la densité électronique pourrait être vérifiée.

Conclusion

Les résultats obtenus avec les ondes hybrides inférieures sont extrêmement encourageants, mais demandant à être confirmés à haute densité et haute température. Dans le domaine des ondes Alfvén sur tokamak tout reste à faire, en particulier pour la problématique injection de puissance dans le plasma.

La solution aux problèmes actuels se trouve probablement dans un système où des ondes à haute fréquence se propageraient à basse vitesse de phase.

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement M. Vaclavik pour sa traduction de la référence 8 et M. Hasegawa pour une intéressante discussion du sujet.

Références

- 1) T. Ohkawa, Nucl. Fusion, 10 (1970) 185
- 2) K.B. Axon et al. , 8th Conf. on Plasma Physics and Contr. Nucl. Fusion Res. IAEA - CN - 38/N-4, Bruxelles 1980
- 3) P.C. Thonemann, V.T. Cowning, P.A. Davenport, Nature 169 (1952) 34
- 4) K. Hirano, K. Matsuura, A. Mohri, Phys. Lett., 36A (1971) 215
- 5) M. Fukuda, K. Matsuura, Journal of the Phys. Soc. of Japan, 44 (1978) 1344
- 6) M. Fukuda, Journal of the Phys. Soc. of Japan, 45 (1978) 283
- 7) S.M. Osovets, IA. Popov, Grenoble 1972, vol 1
- 8) R.A. Demirkanov et al., SIPT-12, Sukhumi 1980
- 9) S. Yoshikawa, H. Yamato, Ph. Fluids, 9 (1966) 1814
- 10) S. Yoshikawa, R.M. Sinclair, M.A. Rothman, IAEA, Vienne 1966, Vol. 2 CN-21/121, p.925
- 11) K. Ohkubo, S. Takamura et al., The 4th Topical Conf. on Radio Freq. Plasma Heating (1981), Austin

- 12) J.M. Berger et al., The Phys. of Fluid, 1 (1958) 301
- 13) A. Hasegawa, L. Chen, The Phys. of Fluids, 19 (1976) 1924
- 14) A. Hasegawa, Nucl. Fusion, 20 (1980) 1158
- 15) C.F.F. Karney, N. Fisch, Phys. Fluids, 22 (1979) 1817
- 16) R. Klima, Plasma Phys., 15 (1973) 1031
- 17) C.S. Liu et al., LRP 175/80 CRPP, Lausanne
- 18) V.V. Dolgoplov, Sov. J. Plasma Phys., 5(6) (1979) 672
- 19) R.A. Demirkhanov, Pl. Phys., 10 (1968) 444
- 20) V.V. Nemov, Sov. J. Plasma Phys., 4(6) (1978) 714
- 21) G. Bugmann et al., 10th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys., Moscou 1981
- 22) R. Keller, R. Gruber, F. Troyon, Grenoble 1978, Vol. II, p. 195