

Physique des plasmas et fusion nucléaire contrôlée

par M. Leiser*

La recherche concernant la fusion thermonucléaire contrôlée a accompli récemment des progrès rapides et importants dans le monde entier et les perspectives de développement de la fusion comme source d'énergie sont aujourd'hui considérées comme très favorables. Etant donné que la fusion est l'une des rares énergies de substitution viables, il est d'intérêt mondial de démontrer aussitôt que possible la faisabilité technique de l'énergie de fusion.

D'après les estimations, les dépenses mondiales pour la recherche sur la fusion s'élèvent annuellement à 2,5 milliards de dollars. Pourtant, un réacteur à fusion produisant de l'énergie utilisable dans l'industrie ne sera pas construit avant la deuxième décennie du siècle prochain. On a dit que la réalisation d'une telle installation est l'un des problèmes scientifiques les plus ardues jamais rencontrés. Tous les pays industrialisés effectuent des recherches sur la fusion, plus ou moins importantes suivant leur capacité industrielle et, en outre, un nombre croissant de pays en développement entreprennent leurs propres programmes relatifs à la fusion.

Cette activité s'est traduite notamment par le grand nombre de réunions tenues chaque année dans le monde entier et consacrées à différents aspects de la recherche sur la fusion. Les plus vastes de ces réunions sont les conférences biennales de l'AIEA; la neuvième conférence de cette série a eu lieu en septembre 1982**. (On trouvera un compte rendu de la huitième conférence tenue à Bruxelles en 1980 dans le volume 22, N° 5/6, p. 131–132, du *Bulletin de l'AIEA*.) Etant donné qu'un grand nombre d'experts représentant tous les principaux laboratoires ont assisté à la conférence de 1982, les participants ont pu, en dehors des séances organisées, tenir plusieurs réunions non officielles sur différents sujets.

Au cours de l'après-midi qui a précédé l'ouverture de la conférence, une séance spéciale a été consacrée au projet de réacteur tokamak international (Intor). Comme il est indiqué dans l'article consacré aux recherches sur la fusion dans le *Supplément de 1982 du Bulletin de*

l'AIEA, le projet Intor est le résultat d'un effort de collaboration entre la Communauté européenne, les Etats-Unis d'Amérique, le Japon et l'URSS. Il vise à mettre au point un futur dispositif expérimental de plus grande dimension que ceux qui sont actuellement en construction. La présentation d'Intor englobait certains des principaux aspects du projet: physique, élimination des impuretés, configuration mécanique, dispositifs magnétiques, et considérations relatives au tritium.

L'un des aspects importants des exposés consacrés à Intor a été de définir les secteurs critiques du projet Intor, ceux sur lesquels on manque actuellement de renseignements pour mettre au point le modèle définitif de plusieurs composants d'Intor. Les participants à la conférence se sont félicités des progrès du projet Intor et ont formulé un grand nombre d'observations constructives.

Les résultats présentés à la conférence montrent que des progrès importants ont été obtenus à la fois dans la compréhension du comportement du plasma et dans l'amélioration des paramètres de confinement du plasma. De ce fait on est de plus en plus convaincu que la prochaine génération de grandes machines tokamak – JET (Communauté européenne), TFTR (Etats-Unis), JT-60 (Japon) et T-15 (URSS) – parviendra à démontrer la faisabilité scientifique de la fusion.

Les séances techniques ont montré que les principaux pays qui s'intéressent à la fusion développent leurs efforts collectifs. Des résultats nouveaux et importants ont été signalés à la conférence concernant la recherche sur la théorie des plasmas et l'obtention de paramètres de plasma plus élevés. Sur le tokamak Doublet III (projet commun Japon – Etats-Unis), on a obtenu une valeur record de $\beta = 4,7\%$ (β = rapport entre la pression du plasma et la pression du champ magnétique toroïdal) en utilisant un chauffage par injection de neutres de 3,5 MW. Ce résultat confirme les prévisions théoriques suivant lesquelles la valeur critique de β est plus élevée pour les plasmas allongés que pour les plasmas circulaires. Etant donné que la valeur β nécessaire pour un réacteur à fusion est d'environ 5%, ce résultat confirme que les hypothèses de base de la conception d'Intor sont réalistes. Plusieurs grandes machines fonctionnent de manière satisfaisante avec un faible facteur de sécurité $q = 2$; sur PDX (Etats-Unis) et Doublet III, la valeur q pour les plasmas allongés était de 1,6 et 1,4 respectivement. Des résultats encourageants ont été obtenus sur Alcator (Etats-Unis) en utilisant un courant produit par haute fréquence. Sur cette machine, la production d'un courant haute fréquence a été démontrée pour une densité de $(4-6) \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, qui est supérieure d'un ordre de

* M. Leiser dirige la Section de physique à la Division de la recherche et des laboratoires de l'Agence.

** Neuvième Conférence internationale sur la physique des plasmas et la recherche concernant la fusion nucléaire contrôlée tenue à Baltimore, Maryland (Etats-Unis d'Amérique), du 1er au 8 septembre 1982. La conférence a été organisée par l'AIEA en association avec le Département de l'énergie des Etats-Unis et le Laboratoire de physique des plasmas de Princeton. Elle a réuni 588 scientifiques et quelque 250 observateurs non enregistrés de 32 pays et 5 organisations internationales.

grandeur aux résultats présentés à la dernière réunion sur cette question tenue à Grenoble en mars 1982. Ceci signifie que la production de courant non inductif dans les dispositifs toroïdaux est possible non seulement au stade initial lorsque la densité est faible, mais aussi pendant le maintien du courant. L'efficacité de la production de courant par haute fréquence a été améliorée considérablement (de 0,8 à 1,2), mais elle n'est pas encore suffisante pour un réacteur à l'état stationnaire (pour lequel la valeur devrait être ~ 8). En augmentant considérablement le niveau d'énergie haute fréquence dans les expériences sur le chauffage à la fréquence cyclotronique des ions sur PLT (Etats-Unis), on a pu porter la température des ions à $T_i = 2$ keV contre $T_i = 0,4$ keV indiquée à la huitième Conférence de l'AIEA tenue à Bruxelles. Cette conférence a montré que dans la recherche sur les tokamaks, un effort considérable est consacré au chauffage haute fréquence du plasma et à la production de courant car la démonstration de ces deux techniques simplifiera les futures normes de conception des réacteurs à fusion. Les modifications apportées à la machine à champ inversé ZT-40 (Etats-Unis) ont amélioré sensiblement les paramètres du plasma. Le remplacement de la gaine d'alumine par une gaine d'inconel du type soufflet et l'emploi des bobines primaires du champ poloïdal extérieur ont permis à la température des électrons d'atteindre $T_e = 300$ eV et de réduire la résistance de striction d'un facteur ~ 30 . La durée de maintien du courant a également été augmentée d'un ordre de grandeur et a atteint 22 msec. D'après la tendance générale observée dans toutes les expériences sur la striction du champ inversé les principaux paramètres du plasma, densité et température, s'améliorent lorsque l'intensité du courant du plasma s'élève.

Les études théoriques ont atteint le stade où la théorie peut expliquer un grand nombre des phénomènes observés expérimentalement. Les mémoires théoriques présentés à la conférence étaient en rapport étroit avec les expériences. Les instabilités linéaires des plasmas toroïdaux continuent à faire l'objet d'études théoriques. Les instabilités idéales et non idéales ont été étudiées dans de nombreux exposés. Il existe un écart entre une faible valeur β de 3% prédite par la théorie et celle de 4,7% mise en évidence sur Doublet III. Un grand

nombre d'idées nouvelles ont été débattues à la conférence. L'une d'elles montre que la polarisation des noyaux peut augmenter le taux de réaction deutérium-tritium d'un facteur de 1,5. On ne sait toutefois pas quelle méthode est la plus simple: la polarisation des noyaux ou l'amélioration des paramètres de confinement du plasma. Dans le domaine de la théorie des plasmas, l'un des problèmes qu'il faudrait étudier prochainement est celui de la conductivité thermique anormale des électrons dans les plasmas toroïdaux. Ici comme ailleurs il ne suffit pas que la théorie puisse expliquer les résultats expérimentaux mais elle devrait aussi pouvoir les prédire. De manière générale, bien que notre compréhension du confinement du plasma soit incertaine, on peut espérer qu'il sera possible de mettre au point un réacteur satisfaisant.

Dans le domaine de la recherche sur la fusion par confinement inertiel au cours des deux dernières années, on s'est intéressé aux expériences sur la compression par ablation. On a réuni suffisamment de données expérimentales pour pouvoir étudier les lois d'échelle dans le processus d'ablation. Il semble que l'emploi de lasers à moins grande longueur d'onde permettra de résoudre le problème du préchauffage de la cible. A la suite d'importantes études dans le domaine de la fusion par confinement inertiel, on prévoit qu'au cours de la période 1983–1986 des expériences seront effectuées pour démontrer la faisabilité technique du concept, c'est-à-dire $Q = 1$ où Q est le rapport entre l'énergie de fusion libérée et l'énergie consommée. Pour démontrer les possibilités de la fusion par confinement inertiel, il faudra résoudre des problèmes comme ceux de l'efficacité hydrodynamique, du préchauffage et de l'augmentation de la compression et de la symétrie de l'irradiation des pastilles.

Les problèmes relatifs à la conception des réacteurs ont été évoqués longuement au cours de la séance spéciale consacrée à Intor; seuls les mémoires présentant des idées nouvelles et différentes ont été présentés à la conférence. Il est maintenant possible d'affirmer qu'un ensemble suffisamment bien défini de modèles de réacteurs tokamak a été mis au point et pourrait être construit. D'autres modèles qui présentent des valeurs plus hautes sont passés au stade de la réalisation et, à plusieurs égards, sont supérieurs à la famille des tokamaks.