Fusion, l'énergie des étoiles, un héritage incertain ?

La fusion sera-t-elle un jour une énergie sûre, propre et durable ?

Jean-Marc Ané
Association Euratom-CEA sur la fusion
CEA Cadarache 13108 St Paul lez Durance

jean-marc.ane@cea.fr
http://www-fusion-magnetique.cea.fr/ http://www.iter.org/

Au cœur de l'anneau de plasma d'un réacteur de fusion, **les "combustibles" (deutérium et tritium), fusionnent s'ils sont chauffés à environ deux cent millions de degrés**, plus de dix fois la température du centre du soleil. A cette température l'énergie cinétique des noyaux est suffisante pour leur permettre de franchir la barrière de potentiel de répulsion coulombienne ; au cours des collisions les noyaux entrent dans le rayon d'action de la force d'interaction forte résiduelle (~10^{-15} m) et fusionnent.

La fusion magnétique utilise l'interaction entre des champs magnétiques et des courants pour maintenir un gradient de pression entre le cœur d'un anneau de plasma à 200 millions de degrés et le bord à quelques milliers de degrés. Pour des raisons de stabilité la pression du plasma ne doit pas dépasser quelques pour cent de la pression magnétique. La pression magnétique qu'il est possible de générer dans de grands volumes est limitée par la technologie à une centaine d'atmosphères. Donc, bien qu'à 200 millions de degrés **la pression d'un plasma de fusion magnétique ne peut dépasser quelques atmosphères**.

Le cœur du plasma peut être chauffé par le couplage résonant d'ondes/particules ou "autochauffé" par les réactions de fusion qui s'y produisent. Dans un réacteur le cœur du plasma devra être essentiellement auto chauffé. En effet la puissance de fusion est récupérée sous forme de chaleur. Les rendements de conversion chaleur / électricité puis électricité / ondes/particules sont faibles. La puissance d'ondes/particules à injecter ne doit pas dépasser environ 10% de la puissance de chauffage nécessaire au maintien du plasma à 200 millions de degrés. **Les réactions de fusion doivent fournir 90% du chauffage du cœur du plasma pour assurer un rendement acceptable pour le réacteur**

Pour une pression de quelques atmosphères à 200 millions de degrés la puissance volumique de fusion est de quelques MW/m3 et l'énergie contenue dans le plasma de quelques MJ/m3. La contrainte d'auto chauffage du plasma se traduit donc par une contrainte sur le temps de refroidissement du plasma. **Le cœur du plasma doit être suffisamment bien isolé pour que son temps de refroidissement soit de quelques secondes.**

Il faut donc entourer le cœur du plasma d'un plasma "isolant". En augmentant le volume du plasma (l'épaisseur d'isolant) on accroit le temps de refroidissement. L'amélioration de la qualité de l'"isolant" permet aussi d'améliorer ce temps à volume constant.

Le transport est majoritairement du à la turbulence générée par les gradients. Les caractéristiques et la dynamique de la turbulence restent encore mal connues. Les méthodes de contrôle ne sont encore que partiellement maitrisées. Elles jouent sur la topologie magnétique, qui permet d'éloigner les surfaces résonantes autour lesquelles se développe la turbulence, ou encore sur le cisaillement des vitesses qui déchire les cellules de convection. Les configurations optimisées obtenues ne sont pas toujours stables et peuvent relaxer, parfois violement.

La construction de machines de plus en plus grandes et le développement de méthodes de réduction du transport de la chaleur a permis d'accroitre les performances des machines de fusion au cours des cinquante dernières années.

Le 24 mai 2006 la Chine, la Corée du sud, les États-Unis, l'Inde, le Japon, la Russie et l'Union européenne ont signé un traité pour la création de l'organisation internationale ITER pour l'énergie de fusion.

Le tokamak ITER sera construit en France à Cadarache et les premières expériences devraient commencer en 2016. Grâce à ses 840 m^3 de plasma, ITER devrait produire 500 MW de puissance de fusion et être auto chauffé à 70%.

C'est un saut important par rapport aux machines actuelles les plus performantes dont les plasmas, d'une centaine de m^3, permettent tout juste d'atteindre un taux d'auto chauffage de 10%

C'est une étape cruciale sur le chemin du réacteur qui exige un taux de l'ordre de 90%.

L'incertitude sur les performances d'ITER et sur les caractéristiques d'un réacteur de fusion, sont liées aux limites :

* de la compréhension théorique des phénomènes turbulents qui contrôlent le transport dans les machines actuelles qui sont massivement contrôlées par injection de puissants faisceaux d'ondes/particules

* de la capacité de calcul des ordinateurs actuels qui ne permettent pas encore de suivre les quelques 10^{23} particules en interaction électromagnétique du plasma d'un réacteur de fusion.

* de nos capacités à prévoir et à contrôler le comportement d'un plasma dans lequel la puissance disponible pour le contrôle sera marginale par rapport à la puissance déposée par les réactions de fusion.

Une démarche semi empirique, assez proche de celle de la mécanique des fluides permet, à partir de l'analyse adimensionnée des équations de Fokker-Planck et de Maxwell de déterminer les paramètres adimensionnés qui caractérisent le transport. Une loi semi empirique qui relie le temps de refroidissement à ces paramètres peut être dérivée à partir de l'analyse des résultats expérimentaux. Lorsqu'on prend en compte les résultats de machines dont les volumes de plasma varient de quelques dixièmes à une centaine de m^3 la loi est vérifiée sur deux ordres de grandeur du temps de confinement. L'extrapolation de ces résultats à ITER et à un réacteur reste néanmoins délicate.

Aux incertitudes de la physique s'ajoutent celles de la technologie. Nous évoquerons quelques défis technologiques qu'il a fallu résoudre pour qualifier les solutions adoptées pour ITER et le chemin qu'il reste à parcourir, pour que la fusion puisse devenir une source industrielle d'énergie.

Nous aborderons quelques pistes de réflexion sur la sûreté d'un réacteur de fusion, sur la durée de vie des déchets de la fusion et plus généralement sur l'impact environnemental, climatique ainsi qu'en terme de santé publique de la filière fusion.

La question de la compatibilité de l'énergie de fusion avec un développement durable sera abordée en évaluant les ressources en combustible, l'accessibilité de ces ressources et l'impact de l'extraction des combustibles. Nous traiterons aussi des risques de prolifération.

De ces éléments et de l'incertitude qui demeure quant à l'impact qu'ils peuvent avoir sur la perception du nucléaire "fusion" par la société civile dépendra l'effort qui sera investi dans le développement d'une source d'énergie incertaine mais prometteuse.

Nous conclurons en essayant d'esquisser la place que pourrait tenir l'énergie de fusion dans un système de production énergétique du futur, évidemment pluriel et sans production de gaz à effet de serre. **L'incertitude sur la disponibilité de la fusion en 2050** fait peser une lourde menace sur la capacité de l'humanité à gérer une crise énergétique et environnementale qui se profile inéluctablement.