

## Fusion, l'énergie des étoiles en héritage ?

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](mailto: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 cent cinquante millions de degrés**, de l'ordre de dix fois la température du centre du soleil. A cette température l'énergie cinétique des noyaux les plus énergétiques du plasma est suffisante pour leur permettre de franchir par effet tunnel la barrière de potentiel de la répulsion coulombienne entre noyaux ; au cours des collisions les noyaux entrent dans le rayon d'action de la force nucléaire ( $\sim 10^{-15}$  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 150 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 150 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 "auto chauffé" 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 cœur du plasma à 150 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 150 millions de degrés la puissance volumique de fusion est de l'ordre du  $\text{MW/m}^3$  et l'énergie volumique contenue dans le plasma à quelques atmosphères est proche du  $\text{MJ/m}^3$ . 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 du plasma "isolant" permet aussi d'améliorer ce temps à volume plasma constant.

Le transport est majoritairement dû 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 maîtrisées. Elles jouent sur la topologie magnétique, qui permet d'éloigner les surfaces résonantes autour desquelles 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 violemment.

La construction de machines de plus en plus grandes et le développement de méthodes de réduction du transport de la chaleur a permis d'accroître les performances des machines de fusion au cours des cinquante dernières années. Elles ont doublé en moyenne tous les deux ans.

Le 21 novembre 2006 à Paris, 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. Au-delà de la construction d'Iter il s'agit de développer l'énergie de fusion. D'autres partenaires pourraient rejoindre les signataires, le Brésil a déjà manifesté son désir de participer, le Canada qui a longtemps été engagé dans Iter pourrait y revenir. La communauté australienne des physiciens des plasmas se mobilise pour que leur pays se joigne aux sept partenaires actuels

**Le tokamak Iter sera construit en France à Cadarache et les premières expériences devraient commencer en 2016. Grâce à ses 840 m<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>, 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<sup>23</sup> particules en interaction électromagnétique du plasma d'un réacteur de fusion.

- de nos capacités à prévoir et à contrôler le comportement d'un plasma "autocontrôlé" 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, 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<sup>3</sup> 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 relever 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. Le défi majeur est sans doute la mise au point de matériaux capables de conserver suffisamment longtemps leurs propriétés mécaniques et thermiques sous un flux intense de neutrons de 14 MeV. La fluence neutronique dans Iter ne sera pas suffisante pour qualifier les matériaux d'un réacteur. C'est dans le cadre de "l'approche élargie" conclue par l'Europe et le Japon que sera développé IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) un accélérateur de deutons qui générera des flux de neutrons de 14 MeV en impactant sur une cible de lithium liquide. Ces flux de neutrons permettront d'accélérer les tests des matériaux.

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 termes 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 concluons en essayant d'esquisser la place que pourrait tenir l'énergie de fusion dans un système de production énergétique durable, évidemment pluriel, à faible taux de production de gaz à effet de serre, et réduisant au maximum le recours aux énergies fossiles. L'incertitude sur la disponibilité de la fusion fait peser une lourde menace sur la capacité de l'humanité à gérer la double crise énergétique et climatique qui se profile inéluctablement.