

Communication présentée au Colloque « Le Feu » - Université de Liège - 25 novembre 2011

La fusion nucléaire, énergie du futur?

Robert AYMAR

La combustion nucléaire de l'hydrogène délivre un million de fois plus d'énergie que sa combustion chimique, mais est bien plus difficile à réaliser. Fruit d'une collaboration internationale à l'échelle mondiale, le projet ITER vise à maîtriser cette combustion, étape essentielle et avancée considérable vers un réacteur électrogène utilisant la fusion contrôlée.

I. Introduction

La fusion des noyaux légers des isotopes de l'hydrogène (Deutérium et Tritium, D et T) est la seule source d'énergie de l'Univers. Elle peut fournir une source d'énergie utilisable sur Terre si des conditions particulières sont réalisées : densité et température du milieu suffisamment grandes, et pertes énergétiques suffisamment faibles. On obtient alors une "combustion" nucléaire tout à fait analogue à la "combustion" chimique du charbon par exemple, qui exige aussi des valeurs particulières, très différentes, des mêmes paramètres : l'énergie de la combustion permet de stabiliser la température du milieu à la valeur nécessaire pour entretenir cette combustion.

Cette potentialité justifie les travaux de recherche sur le confinement magnétique des plasmas, qui ont débuté au milieu des années 1950-1960 et ont réalisé depuis lors des progrès substantiels dans la compréhension des mécanismes physiques contrôlant les performances: diminution des pertes par utilisation de configurations magnétiques sophistiquées, réalisant ainsi un meilleur "confinement"; le paramètre mesurant ces performances a crû durant les 30 dernières années comme celui mesurant celles des mémoires digitales. Les développements technologiques ont accompagné la réalisation de dispositifs expérimentaux de taille croissante, dont le JET (Joint European Torus) est l'actuel champion mondial, et ASDEX en Allemagne et Tore Supra en France des exemples substantiels en Europe.

Les performances obtenues avec ces appareils sont suffisamment proches des valeurs nécessaires pour le fonctionnement d'un réacteur de puissance pour justifier la confiance aujourd'hui acquise dans la possibilité d'utiliser la fusion DT comme source future d'énergie.

De plus, l'abondance du combustible Deutérium, et Lithium (qui permet de régénérer le Tritium), la sûreté particulièrement attrayante du fonctionnement d'un réacteur utilisant la fusion nucléaire sont des aspects essentiels qui n'autorisent pas à négliger les potentialités de cette source d'énergie, dans la perspective des besoins futurs en énergie propre et sans effet dommageables sur l'environnement.

II. Stratégie de développement

La stratégie de développement, unique à travers le monde, explicite l'affirmation suivante : l'étape des machines en cours d'exploitation (JET par exemple) doit être suivie par l'étude d'un "plasma en combustion", dans un dispositif extrapolé à partir des résultats obtenus actuellement.

Les machines actuelles permettent de simuler, pas toujours simultanément, la plupart des paramètres physiques qui contrôlent les performances du dispositif extrapolé ; mais des effets essentiels (non linéaires) de la source interne de chaleur (les particules d'hélium énergiques créées par la réaction DT) et de sa distribution spatiale ne peuvent être exactement simulés avec les dispositifs actuels.

ITER est la dernière étape de validation scientifique sur le chemin conduisant au réacteur électrogène.

Ce dispositif, à la fois expérience de physique et réacteur expérimental, doit démontrer la maîtrise scientifique de la fusion comme source d'énergie et développer les technologies nécessaires à un futur réacteur.

Son succès devrait être suivi par la réalisation d'un réacteur de démonstration, fournissant de l'électricité de manière fiable, sinon commercialement compétitive, lui-même suivi éventuellement par un prototype de réacteur compétitif. Bien évidemment, sans chevauchement des étapes successives, la dernière mentionnée ne saurait survenir avant la deuxième moitié du siècle.

La mesure des performances obtenues durant les 30 dernières années montre une croissance rapide et régulière, analogue à celles des processeurs et des mémoires pour ordinateurs. Le paramètre qui permet d'évaluer les progrès accomplis est le produit : $n.t.T_i$ soit Densité du plasma x Temps de confinement de l'énergie x Température.

À défaut de simulations numériques complètes, les performances sont actuellement prédites à l'aide de lois d'échelle. Cette démarche empirique a été utilisée avec succès, grâce à une collaboration internationale remarquable, qui a permis la mise en commun de tous les résultats obtenus sur les machines actuelles. Cette méthode a pu être fiabilisée en utilisant un principe de similitude, fondé sur une expression dimensionnelle de ces lois d'échelle. On peut ainsi extrapoler vers ITER les résultats obtenus sur des machines existantes comme le JET ou JT-60, une machine japonaise équivalente.

Les performances obtenues avec les installations expérimentales actuelles sont suffisamment proches des valeurs nécessaires pour le fonctionnement d'un réacteur de puissance pour justifier la confiance aujourd'hui acquise de pouvoir utiliser la fusion comme source d'énergie.

III - ITER

Les principaux objectifs scientifiques et techniques d'ITER peuvent donc être résumés de manière synthétique comme suit :

Performances du plasma

- atteindre, dans un plasma, dont le courant est maintenu par induction, une combustion permettant un rapport Q, entre la puissance de fusion et la puissance auxiliaire injectée dans le plasma, supérieur à 10, et une durée de combustion comprise entre 300 et 500s ; la puissance de fusion nominale est d'environ 500 MW ;

- viser à démontrer le fonctionnement en régime permanent en utilisant une génération de courant non inductive avec Q supérieur à 5.

Performances et tests technologiques

- démontrer la disponibilité et l'intégration des technologies essentielles (aimants supraconducteurs, maintenance téléopérée en particulier) ;

- tester les composants d'un futur réacteur, en particulier le "divertir" en contact avec le bord du plasma ;

- tester les concepts de module de couverture tritigène avec une charge de puissance neutronique moyenne sur la première paroi supérieure à $0,5 \text{ MW/m}^2$ pour des neutrons de 14 MeV.

Exigences de fonctionnement

- l'exploitation prévue pendant une période d'environ 20 ans doit permettre de résoudre les problèmes des plasmas en combustion, du fonctionnement en régime permanent et des modes améliorés de confinement ;

- elle doit de plus valider les analyses de sûreté et démontrer la maîtrise de l'impact sur l'environnement de ces modalités de fonctionnement.

Neuf années (1992-2001) de travail intensif de la part de l'équipe internationale d'ITER et des équipes nationales associées des quatre partenaires (EU, JA, RF, USA), sous les auspices de l'AIEA, ont abouti à un dossier détaillé du dispositif. Celui-ci est établi sur la base des résultats d'un ensemble de R&D en physique et en technologie, d'analyses de sûreté et d'études de coûts industriels.

Sept pays (Chine, Union Européenne, Inde, Japon, Corée, Fédération Russe, Etats-Unis) ont approuvé le dossier technique et ont décidé en 2006 par la signature d'un accord international de réaliser ensemble le projet ITER à Cadarache (France). Les travaux de génie civil sont bien engagés ainsi que la production de composants. Le premier plasma est prévu pour 2020.

IV - Au-delà d'ITER, vers un réacteur électrogène

La mission principale d'ITER est donc, en opérant dans les conditions où le chauffage du plasma par les particules alpha est largement dominant, d'établir les règles de dimensionnement et les conditions optimales de fonctionnement d'un réacteur de fusion (dont les dimensions et paramètres ne sont pas très éloignés de ceux d'ITER). La réalisation de cet objectif physique passe par le développement de technologies clés pour le réacteur industriel (notamment les couvertures tritigènes, les supraconducteurs, les composants face au plasma et leur maintenance robotisée). Il est particulièrement efficace et probant que ces technologies soient testées dans ITER de façon intégrée.

Les développements technologiques pour la réalisation ultérieure d'un réacteur électrogène, en complément de ceux menés pour ITER, concernent principalement deux thèmes :

- le matériau de structure des composants internes, résistant particulièrement bien aux dommages créés par les neutrons de haute énergie et n'offrant qu'une activation de faible durée de vie ;

- les couvertures permettant la récupération de l'énergie des neutrons à haute température pour permettre une production électrique avec un rendement acceptable et la régénération du tritium consommé à partir de l'absorption d'un neutron par du Lithium.

L'étape qui suivra ITER sera donc un prototype qui intégrera toutes les technologies spécifiques et produira de l'électricité avec une disponibilité probablement réduite par rapport à des conditions commerciales ; le développement ultérieur, permettant l'existence éventuelle d'une filière dans la seconde moitié de ce siècle, dépendra de la compétition économique avec d'autres sources d'énergie.

Références

- ITER Physics Basis, 1999, Nucl. Fusion, **39**, 2137-2664
- The ITER Design, 2002, Plasma Phys. Control Fusion **44**, 519-565
- ITER Technology R&D, 2001, Fusion Eng Design **55**, 97-358
- <http://www.iter.org/news> .

Tableau I
Paramètres principaux du plasma d'ITER

Puissance de fusion	500 MW (700 MW)
Puissance auxiliaire de chauffage	73 MW/110 MW
Q (puissance fusion/puissance auxiliaire)	≥ 10
Puissance moyenne des neutrons de 14 MeV sur les parois	0,57 MW/m ² (0,8 MW/m ²)
Grand Rayon (R)	6,2 m
Petit rayon (a)	2,0 m
Elongation verticale (séparatrice)	1,85
Triangularité (séparatrice)	0 ;49
Champ magnétique toroïdal à 6,2 m	5,3 T
Courant plasma	15 MA (17 MA)
Surface/Volume du plasma	678 m ² /837 m ²