

Deuxième partie : L'électronique d'aujourd'hui et de demain

L'électro-magnétisme au cœur de la fusion nucléaire

Du bonhomme d'Ampère au Tokamak

Dr. Alain Bécoulet

Chef du Domaine d'Ingénierie, ITER Organization

C'est dès 1920, que l'idée que des réactions de fusion de l'hydrogène sont à l'œuvre au cœur du Soleil et des étoiles voit le jour, dans les travaux de Perrin, Eddington, puis Bethe, Rutherford...

Principes de la fusion

Dans une réaction de fusion, deux noyaux atomiques légers se combinent, forment un noyau plus lourd et libèrent une grande quantité d'énergie par perte de masse. C'est vers la fin des années 1950 que les premiers travaux de recherche pour une utilisation pacifique des réactions de fusion verront le jour, déclenchant l'une des plus grandes aventures de coopération scientifique de l'Humanité.

La fusion peut être obtenue à partir de différentes combinaisons de noyaux légers. En l'état présent de la technologie, la réaction deutérium + tritium (les isotopes de l'hydrogène) est la plus accessible ; elle donne naissance à un noyau d'hélium et un neutron (figure 1).

Deux « voies » sont possibles pour obtenir cette réaction sur Terre :

- **La voie « inertielle »** : Le mélange D-T, enfermé dans une micro-cible, est comprimé par des faisceaux convergents (laser ou particules). C'est cette voie qui vient de donner lieu à un fait marquant du National Ignition Facility (Lawrence Livermore National Laboratory), avec un tir sur cible déclenchant environ une fois et demi plus d'énergie produite qu'utilisée (voir par exemple <https://>

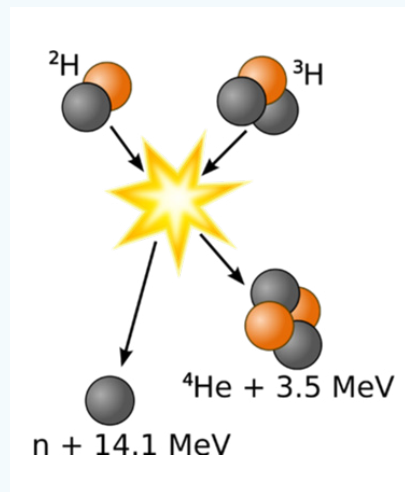


Figure 1 : La réaction de fusion deutérium-tritium.

www.llnl.gov/news/national-ignition-facility-achieves-fusion-ignition).

- **La voie « magnétique »** : Le mélange D-T est confiné dans une bouteille magnétique puis chauffé à l'état de plasma

au-delà de 100 millions de degrés. La configuration magnétique la plus prometteuse à l'heure actuelle est celle dite des « tokamaks ». A l'heure actuelle le tokamak le plus performant est le JET (opéré par UKAEA à Culham (UK) pour le compte de l'Europe). Il a récemment produit 59 MJ d'énergie de fusion, et validé une fois encore les paramètres de dimensionnement du réacteur international expérimental ITER, en cours de construction actuellement.

La voie magnétique

Dans cette voie magnétique, pour que des réactions thermonucléaires puissent se produire dans un plasma, il faut donc contenir les noyaux et les électrons dans un volume limité, et les maintenir à une température d'environ 100 millions de degrés, en les empêchant de céder trop directement leur chaleur à une paroi matérielle, qui ne

“ C'est vers la fin des années 1950 que les premiers travaux de recherche pour une utilisation pacifique des réactions de fusion verront le jour, déclenchant l'une des plus grandes aventures de coopération scientifique de l'Humanité. ”

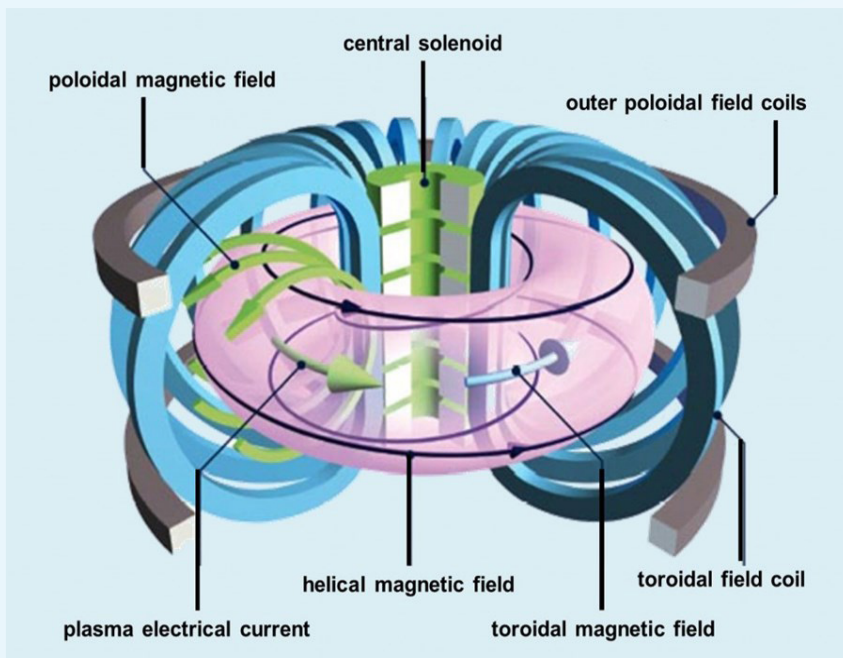


Figure 2 : La configuration Tokamak.

●●● pourrait pas résister à de telles températures. Les particules chargées du plasma (noyaux et électrons) sont sensibles au champ magnétique. Si le plasma baigne dans un champ magnétique rectiligne, ses particules tourneront autour des lignes de champ, et ne pourront pas atteindre les parois qui l'entourent. Afin d'éviter que le plasma ne s'échappe aux extrémités, on referme la boîte magnétique sur elle-même, pour former une cage torique. Le champ magnétique ainsi créé par une série d'aimants verticaux entourant le plasma est nommé *champ magnétique toroïdal*. Ce champ toroïdal n'est cependant pas suffisant pour assurer un confinement suffisant et un courant électrique toroïdal intense doit encore parcourir le plasma, générant un second *champ magnétique dit poloïdal*, qui parfait alors le confinement.

Le champ magnétique toroïdal est créé par des bobines verticales qui entourent la chambre plasma (en général, elles sont au nombre de 16 ou 18), et le courant plasma par la décharge du flux magnétique contenu dans un solénoïde placé verticalement au centre de l'anneau. D'autres bobines horizontales sont ajoutées afin de démarrer le plasma et contrôler sa forme (figure 2).

Les lignes de champ résultant ont finalement une forme d'hélice, c'est la configuration Tokamak (Tokamak est un acronyme dérivé de l'expression russe : *Тороидальная Камера и Магнитная Катушка*, i.e. chambre toroïdale et bobine magnétique).

Plus de 60 ans de recherche et développement ont été nécessaires pour

“ Plus de 60 ans de recherche et développement ont été nécessaires pour mettre au point, étudier, comprendre puis extrapoler le comportement et les propriétés des tokamaks, au travers de collaborations internationales toujours croissantes. ”

L'auteur

Le Dr. **Alain Bécoulet**, Chef du Domaine d'Ingénierie d'ITER Organization depuis 2020, est un expert reconnu de la fusion nucléaire. Ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure de Paris, il est devenu Professeur Agrégé de Physique en 1986 et a terminé son doctorat au CEA (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives) en 1990. Avant de rejoindre ITER, il a été directeur de l'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique (CEA/IRFM) (2011-2020), directeur de recherche au CEA (2009-2020), et a dirigé plusieurs groupes de recherche européens sur la fusion contrôlée. Il est l'auteur de «L'Energie de Fusion» (Odile Jacob, 2019) et Chevalier de l'Ordre national du Mérite.

mettre au point, étudier, comprendre puis extrapoler le comportement et les propriétés des tokamaks, au travers de collaborations internationales toujours croissantes. La fin du XX^e siècle a vu la confiance dans les lois d'échelles d'extrapolation suffisantes pour envisager la construction du premier tokamak, intégrant la physique et l'ensemble de toutes les technologies nécessaires et suffisantes pour envisager d'atteindre des plasmas de fusion stables, amplifiant une dizaine de fois la puissance qui sert à les chauffer par le biais des réactions de fusion deutérium-tritium.

Le tokamak ITER

Ce point de fonctionnement est plus précisément d'obtenir 500 MW de puissance fusion d'un plasma chauffé par 50 MW de puissance extérieure, et ce pendant plusieurs centaines de secondes, et de manière répétitive.

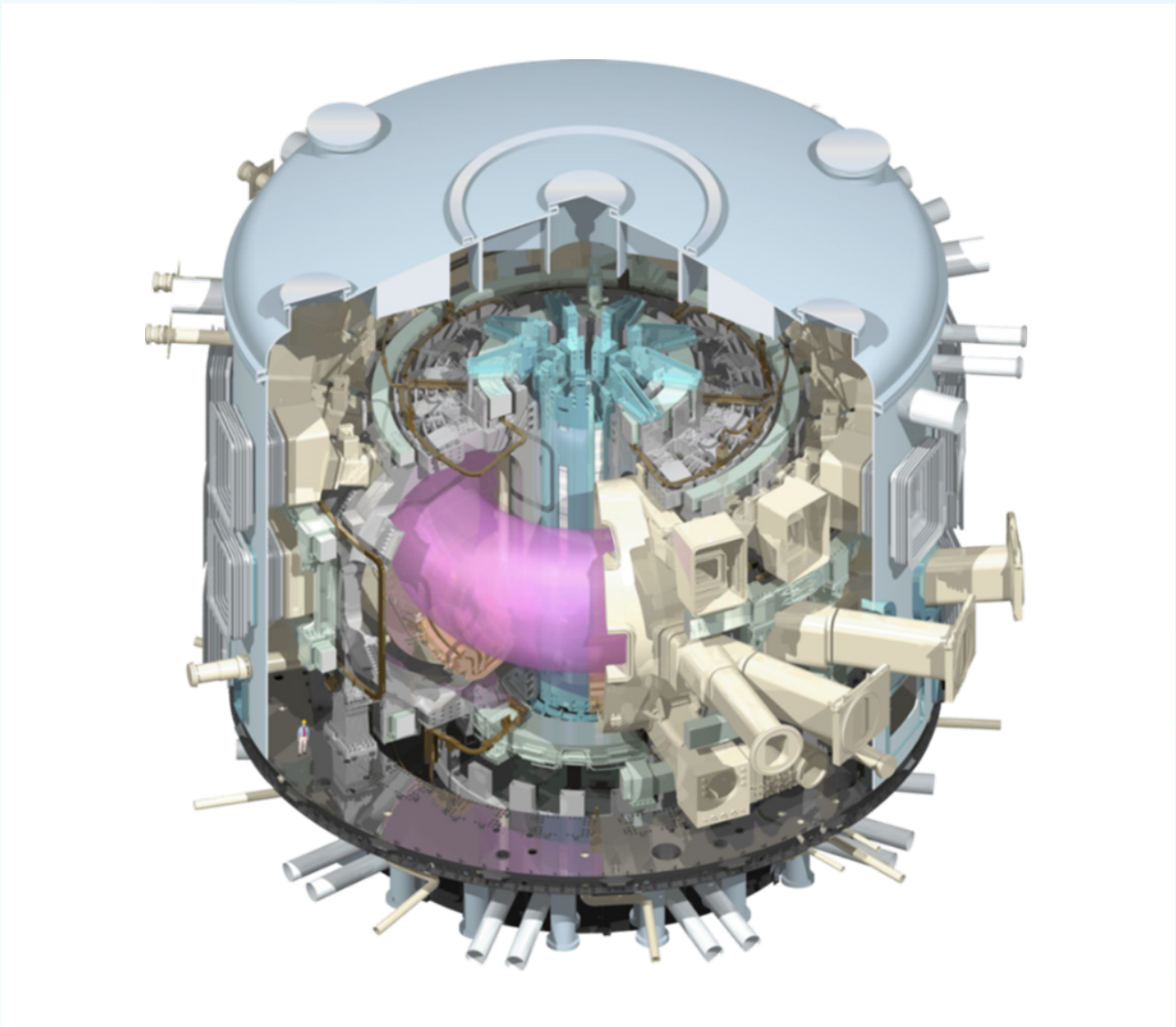


Figure 3 : Le Tokamak ITER.

C'est l'objectif affiché du tokamak international ITER en cours de construction sur le site français de Cadarache (Bouches-du-Rhône), sous l'égide d'un traité international liant la Chine, la Corée du Sud, les Etats-Unis d'Amérique, l'Europe, l'Inde, le Japon, et la Russie depuis 2006 (figure 3). Les sept Membres d'ITER représentent plus de 50 % de la population mondiale et 85 % du PIB de la planète.

ITER doit démontrer la maîtrise de l'ensemble des technologies et de la réglementation nucléaire, requises par un réacteur de fusion. Une fois "allumé", le plasma deutérium-tritium doit géné-

rer 10 fois plus d'énergie qu'il n'en aura reçu.

En parallèle à la construction des bâtiments et services débutée en 2012, le tokamak ITER est en cours d'assemblage sur le site de Cadarache depuis mi-2020. Le planning actuel du projet prévoit d'atteindre la performance finale dans le milieu des années 2030, et d'exploiter les capacités de la machine jusqu'en 2042, date actuelle de la fin de l'accord international. On constate des difficultés actuellement sur la fabrication de certains composants du tokamak, qui vont impacter la séquence d'assemblage, mais tout est fait à l'heure actuelle pour

minimiser au maximum l'impact de ces difficultés sur le planning expérimental.

ITER est l'étape systémique indispensable pour ouvrir la voie aux réacteurs de fusion commerciaux. Des études de réacteur sont déjà en cours chez les différents Membres ITER, dans ce sens. On note également un vif intérêt de la part des investisseurs privés pour démarrer des études industrielles dans le même sens et accélérer autant que faire se peut la route vers ces réacteurs commerciaux. Une convergence de ces efforts, si elle se maintient ou même s'amplifie, doit pouvoir donner jour à une production significative et crédible d'énergie de fusion dans la seconde moitié de ce siècle. ■