

Zeitschrift: Tracés : bulletin technique de la Suisse romande
Herausgeber: Société suisse des ingénieurs et des architectes
Band: 132 (2006)
Heft: 02: Fusion thermonucléaire

Artikel: Réaction de fusion
Autor: Quang Tran, Minh
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-99441>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Réaction de fusion

ÉNERGIE

La fusion nucléaire présente plusieurs avantages. Les combustibles d'un réacteur de fusion sont pratiquement inexhaustibles et leur répartition garantit l'approvisionnement de toutes les régions du monde. La production d'énergie à partir de réactions de fusion ne libère pas de gaz à effet de serre. Contrairement à la fission, la fusion ne repose pas sur une réaction en chaîne. Aucun accident sévère - présentant le risque d'une exposition de la population à une irradiation radioactive - n'est donc à redouter, puisqu'il suffit d'interrompre l'alimentation du réacteur en gaz pour arrêter la production d'énergie.

Les noyaux des atomes sont formés de protons (chargés positivement) et de neutrons (non chargés), dont les masses sont approximativement égales. Ainsi un noyau d'hydrogène est formé d'un seul proton, un noyau de deutérium (D) d'un neutron et d'un proton et un noyau de tritium (T) de deux neutrons et d'un proton. Les protons et les neutrons sont tenus ensemble par des forces nucléaires, qui sont à l'origine de ce qu'on appelle l'énergie de liaison.

Réactions nucléaires de fusion

Les noyaux peuvent subir deux types de réaction. Les noyaux lourds comme l'uranium peuvent se désintégrer pour donner des éléments plus légers. Cette réaction de fission est possible car l'énergie de liaison des corps ainsi produits est inférieure à celle du noyau original.

Par contre, les noyaux légers, comme le D et le T, peuvent « fusionner » pour donner de nouveaux corps qui correspondent à un état d'énergie de liaison plus favorable. La réaction de fusion entre le D et le T donne naissance à un noyau d'hélium (He) - composé de deux neutrons et de deux protons - et un neutron (n). Dans le bilan total, le nombre de neutrons (et respectivement de protons) est conservé (fig. 1). La réaction s'écrit :

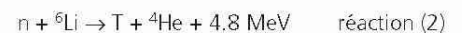


En comparant précisément la somme des masses du D et du T (membre de gauche de l'équation) avec celles de l'He et du neutron (membre de droite), on constate que :

$$(m_D + m_T) > (m_{\text{He}} + m_n)$$

Selon le principe d'équivalence de la masse et de l'énergie établi par Einstein ($E = mc^2$), la différence de masse entre le membre de gauche et celui de droite a été convertie en énergie cinétique du noyau d'He et du neutron. Le noyau d'He a une énergie cinétique de 3 millions d'électron-volt¹ (eV) et le neutron, de 14 million d'eV. Exprimé dans des unités plus communes, cela revient à dire qu'un gramme de combustible (D et T) permet de produire une énergie de 100 000 kWh.

Si le deutérium est abondant dans l'eau sous forme de D₂O, le tritium n'existe pas à l'état naturel, car il est radioactif avec une durée de vie très réduite (environ 13 ans). Il peut être produit par une réaction de fusion exothermique, pouvant avoir lieu dans le réacteur même, en utilisant le neutron issu de (1) pour bombarder du lithium (Li), ce dernier étant abondant dans la croûte terrestre et dans l'eau de mer. On obtient alors la réaction suivante :



En combinant les réactions (1) et (2), on peut écrire :



le neutron produit par la réaction (1) étant utilisé pour régénérer le T dans la réaction (2). Il n'y a ainsi pas de transport de tritium radioactif pendant le fonctionnement d'un réacteur conçu selon ce principe.

La grande difficulté tient ici à la faible probabilité de voir des noyaux de D et de T fusionner, puisqu'ils doivent se rapprocher suffisamment en dépit de la force de répulsion

¹ Un électron-volt correspond à une énergie de $1,6 \times 10^{-19}$ J

créée par leur charge positive. La fusion est possible si la température (qui caractérise l'agitation thermique) est de l'ordre de 100 millions de degrés.

La fusion comme source d'énergie

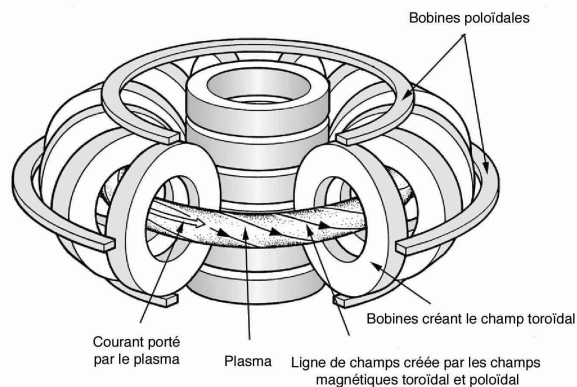
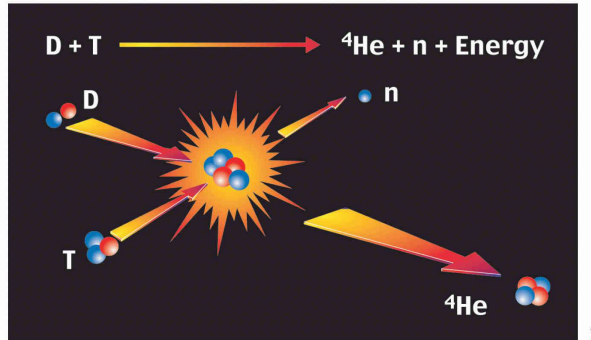
L'énergie cinétique du neutron produit par la réaction de fusion (1) peut être convertie en énergie électrique. En tenant compte également de l'énergie libérée par la réaction de fusion entre les neutrons à haute énergie et le lithium (2), on obtient une énergie totale libérée de 100 MWh par kg de combustible de D et Li, tout en ne produisant que de l'hélium lors des différentes réactions !

La fusion est une des quelques sources d'énergie électrique à grande échelle compatibles avec un développement durable (les combustibles de base - D et T - sont pratiquement inépuisables, pas de production de gaz à effet de serre) et dont la mise en œuvre est acceptable par la société du point de vue des risques (pas de risque d'accidents graves libérant de la radioactivité et nécessitant une évacuation). De plus, la fusion n'engendre pas de déchets imposant un stockage géologique de longue durée. En effet, si la réaction de fusion entre D et T ne produit pas directement des déchets radioactifs, les matériaux qui seront percutés par les neutrons énergétiques de 14 MeV deviendront radioactifs. Cependant un choix approprié de ces matériaux doit permettre, après un temps d'entreposage d'environ 100 ans, d'obtenir des matériaux non radioactifs ou recyclables pour une nouvelle utilisation dans d'autres réacteurs. Il n'est donc pas nécessaire d'envisager un stockage géologique. Il faut toutefois signaler que le développement de matériaux susceptibles de supporter le bombardement neutronique constitue un des défis importants de la recherche dans ce domaine (voir article p. 18).

Un réacteur à fusion

Nous avons vu que les réactions de fusion nécessitent une température de l'ordre de 100 millions de degrés, une température à laquelle la matière est à l'état de plasma. Cet état correspond à un gaz ionisé : les électrons ne sont plus liés aux noyaux positifs. Un plasma est donc une sorte de gaz composé d'électrons et d'ions, ces deux espèces se mouvant librement. Comme le nombre de charges négatives et positives est égal, il est globalement neutre. L'état plasma est celui du soleil, du milieu interplanétaire, de l'ionosphère. En fait, le plasma est extrêmement abondant dans l'univers.

Un des problèmes principaux liés à la réalisation d'un réacteur à fusion² est le confinement d'un plasma d'une température supérieure à 100 millions de degrés et d'une



densité de l'ordre de 10^{20} particules/m³. Il faut en outre limiter les pertes thermiques, sinon la dépense énergétique pour maintenir le plasma à la température requise devient excessive. On exprime ceci en disant qu'il faut avoir un bilan d'énergie positif. Cette condition se traduit par le fait que le triple produit du nombre (n) d'électrons par m³, de la température (T) exprimée en keV³ et du temps de confinement de l'énergie dans le plasma (τ_E , qui décrit la « qualité » du système de confinement) soit supérieur à une certaine valeur :

$$n\tau_E T > 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keVs}$$

Pour obtenir un tel confinement, on profite du fait que le plasma est constitué de particules chargées qui peuvent donc être guidées par des champs magnétiques. Le concept le plus performant est celui du « tokamak » (fig. 2), développé dans

² Nous ne discutons ici que du confinement magnétique. Il existe un autre schéma de réacteur basé sur le « confinement inertiel » où le plasma n'est en fait pas confiné, les réactions de fusion n'ayant lieu que pendant un très court instant : on doit alors produire des micro-explosions d'une durée d'environ un milliardième de seconde qui sont répétées entre 500 000 et 1 000 000 de fois par jour. Dans ce cas, contrairement au confinement magnétique, on ne crée pas un plasma de manière continue.

³ 1 keV correspond à environ 10 millions de degrés.

Fig. 3 : Schéma d'un réacteur à fusion basé sur le confinement magnétique

Fig. 4 : Progrès dans la valeur du triple produit $n\tau_E T$. Les noms autour de la courbe sont ceux des tokamaks où la mesure a été faite. (CEA)

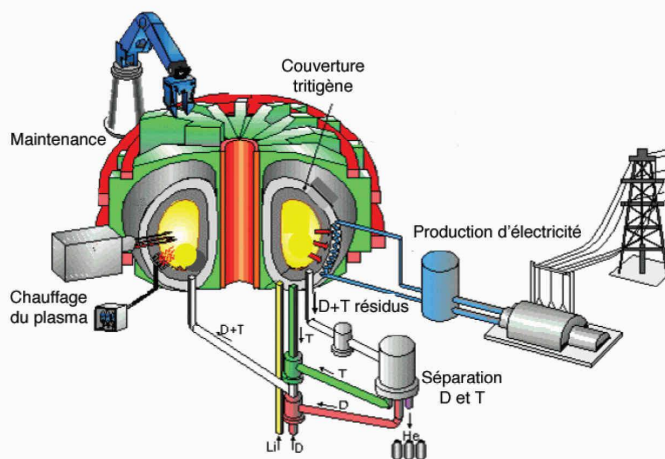
(Sauf mention, tous les documents illustrant cet article ont été fournis par l'auteur)

les années 50 à 60 par les Russes: c'est ce concept qui sera utilisé pour le réacteur ITER.

Le plasma, de forme toroïdale, est confiné par un fort champ magnétique toroïdal créé par des bobines extérieures (les lignes de champ sont des cercles autour de l'axe du tore) et par un deuxième champ, le champ poloïdal, lui-même créé par un courant porté par le plasma (les lignes de ce champ entourent le plasma). D'autres bobines externes, les bobines poloïdales, assurent le contrôle de la forme et de la position de l'anneau de plasma. Celui-ci est chauffé jusqu'aux 100 millions de degrés nécessaires à la fusion par l'absorption d'ondes électromagnétiques ou par des faisceaux de D ou de T à haute énergie.

Lorsque le plasma est « chaud », les réactions de fusion se produisent: les ions d'hélium produits étant plus chauds que le plasma, ils lui cèdent leur énergie, contribuant au chauffage et permettant ainsi de réduire l'apport externe. Lorsque le chauffage du plasma par les particules d'hélium suffit à le maintenir à la température requise pour les réactions de fusion, on a atteint la température d'« ignition », ce qui signifie qu'il n'est plus nécessaire d'injecter de la puissance extérieure.

Les neutrons énergétiques issus de la fusion ne sont pas confinés et quittent le plasma (fig. 3). Ils sont alors ralentis dans les structures entourant ce dernier - les « couvertures tritigènes » - au sein desquelles deux phénomènes ont lieu. Premièrement, les neutrons convertissent leur énergie cinétique en énergie thermique. Cette dernière est alors évacuée par un fluide caloporteur (eau ou hélium comme dans les réacteurs à fission) pour être ensuite transformée en électricité. Deuxièmement, les neutrons doivent permettre, par fusion avec le lithium selon la réaction (2), de générer le tritium consommé par le réacteur.



3

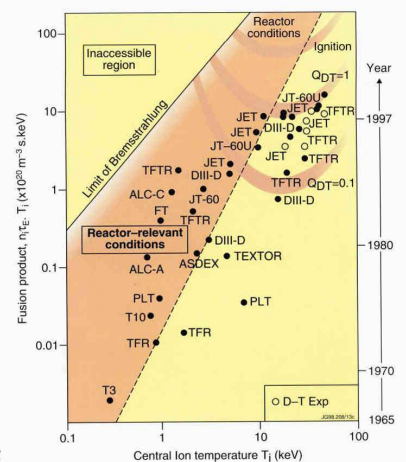
Où en sommes nous ?

La figure 4 montre les progrès en matière de confinement du plasma à travers l'évolution du triple produit $n\tau_E T$, accomplis avec les divers tokamaks construits dans le monde: celui-ci a augmenté d'un facteur 10000 en environ 30 ans! Les équipements disponibles aujourd'hui ne permettent de maintenir la réaction de fusion que pendant de courtes durées: JET, un tokamak européen, produit une puissance de fusion d'environ 16 MW, un record mondial, pendant une durée de moins d'une seconde. Cependant, le rapport Q entre la puissance de fusion produite et celle nécessaire pour chauffer le plasma est encore inférieur à 1: le bilan énergétique est négatif. L'objectif pour ITER est de produire 500 MW de puissance de fusion (puissance thermique) durant 400 secondes, avec un rapport Q égal à 10.

Fort des acquis scientifiques et techniques, la communauté scientifique commence maintenant la construction d'ITER, étape entre les tokamaks existants et un premier réacteur de fusion de démonstration DEMO produisant de l'électricité. Les études et la R&D pour DEMO vont débiter avec comme but une réalisation dans les années 2030 à 2040.

Par ailleurs, des études parallèles vont aussi être menées concernant les matériaux devant entourer le plasma, et la maîtrise de la production interne du tritium reste à démontrer. Concernant ce dernier point, ITER devrait néanmoins apporter quelques éléments de réponse puisqu'il est prévu d'intégrer des éléments de couverture incluant du lithium pour produire le tritium.

Minh Quang Tran, dr es sc., ing. phys. dipl. EPF
 Directeur du Centre de Recherches en Physique des Plasmas
 Technologie de la Fusion - Matériaux
 EPFL-Association EURATOM-Confédération Suisse
 PPB, CH - 1015 Lausanne



4