

General Fusion adopte encore une autre stratégie, nommée «fusion par cible magnétisée». Cela consiste à comprimer le plasma plus lentement, par exemple à l'aide de pistons, mais avec l'aide d'un confinement magnétique qui empêche la chaleur de se dissiper lorsque le plasma est comprimé. Cette idée, suggérée au début des années 1970 par des chercheurs du laboratoire de recherche navale américain, vise à trouver un compromis entre l'utilisation de champs magnétiques intenses et donc énergivores nécessaires pour confiner le plasma dans un tokamak, et celle d'ondes de choc (provoquées par des lasers ou autres), également gourmandes en énergie, pour comprimer rapidement le plasma dans le confinement inertiel.

La conception du réacteur de General Fusion à Culham utilise ainsi une centrifugeuse pour faire tourner une chambre remplie de plomb et de lithium fondus. Ce mouvement ouvre une cavité dans le métal liquide, où est injecté le plasma. Un système de pistons injecte un surplus de métal liquide dans la chambre, comprimant le plasma pendant quelques dizaines de milli-secondes. La fusion s'amorce, puis la pression est relâchée et le processus est répété par impulsions successives environ une fois par seconde.

Un aspect particulièrement intéressant de ce réacteur est qu'il produit du tritium, une ressource extrêmement coûteuse qui ne peut elle-même être fabriquée que par des réactions nucléaires (typiquement, par un flux de neutrons percutant du lithium) et qui se désintègre rapidement (sa demi-vie est de 12,3 ans). Dans le réacteur *Iter* et dans d'autres modèles, du tritium peut être produit lorsque des neutrons s'échappant du réacteur frappent une couche de lithium recouvrant le tokamak. Mais dans la conception de General Fusion, le tritium est fabriqué lorsque les neutrons percutent le lithium au sein même du mélange de métal liquide qui sert pour la compression.

Au cours des dernières années, General Fusion a franchi des obstacles majeurs dans son approche : fabriquer une cible de plasma qui tienne suffisamment longtemps pour être comprimée, et faire s'effondrer rapidement mais de façon bien contrôlée la cavité de métal liquide. L'entreprise affirme avec confiance qu'une fois que sa centrale de démonstration sera opérationnelle en 2025, elle «alimentera les foyers, les entreprises et l'industrie avec une énergie de fusion nucléaire propre, fiable et abordable au début des années 2030».

L'entreprise TAE Technologies a choisi un concept à certains égards encore plus audacieux. Elle prévoit d'abandonner le combustible D-T au profit des atomes de bore 11 et des noyaux d'hydrogène (c'est-à-dire des protons). Cette idée, défendue par le cofondateur de TAE, le physicien canadien Norman Rostoker, et baptisée



«fusion p-¹¹B», nécessite des températures dix fois supérieures à celles de la fusion D-T : environ un milliard de kelvins ! L'avantage est que cette réaction n'utilise que du combustible disponible en abondance, et ne produit pas de neutrons qui pourraient contaminer le réacteur. Selon Michl Binderbauer, ce concept permettrait de réduire les coûts de maintenance et d'atteindre un objectif beaucoup plus durable.

Dans la conception de réacteur de TAE Technologies, le plasma est confiné à l'intérieur d'un champ magnétique cylindrique créé par un solénoïde – une approche qui s'inspire des accélérateurs de particules. Le plasma tourne autour de l'axe du réacteur, et cette rotation, comme dans une toupie, assure une stabilité inhérente. Le confinement ne nécessite pas de puissants champs magnétiques externes ; ceux-ci sont pour l'essentiel engendrés par le plasma en rotation lui-même. Pour le maintenir en rotation, des faisceaux tangentiels d'atomes de bore injectent du moment angulaire.

TAE Technologies a fabriqué des prototypes pour démontrer la pertinence de cette conception. Depuis 2017, la société travaille avec un système de test nommé Norman, et elle commence aujourd'hui à travailler sur un dispositif appelé Copernicus, qui fonctionnera avec un plasma d'hydrogène normal pour éviter de produire des neutrons. Des simulations par ordinateur montreront quelle énergie pourrait être produite avec un véritable combustible adapté à la fusion. Si TAE Technologies parvient à atteindre les conditions nécessaires à la fusion D-T – ce qu'elle espère réussir d'ici au milieu de la décennie –, elle prévoit d'accorder une licence d'exploitation de sa technologie à d'autres équipes travaillant avec ce

L'aimant supraconducteur à haute température le plus puissant du monde sera utilisé dans le réacteur à fusion Sparc, de la société Commonwealth Fusion Systems et de l'institut de Technologie du Massachusetts (MIT), d'ici à 2025.



L'industrie privée dans le domaine de la fusion s'appuie sur des années d'investissements publics dans des projets comme «Iter»

combustible. Michl Binderbauer considère pour sa part Copernicus comme un «tremplin» vers les températures nécessaires à la fusion $p^{-11}B$. «Nous sommes convaincus que nous pouvons atteindre le milliard de degrés d'ici à la fin de la décennie», affirme-t-il.

DES RÉACTEURS MOINS CHERS ?

Parmi les nombreuses autres entreprises privées qui se sont lancées dans la fusion, Helion Energy, à Everett, dans l'État de Washington, est celle qui a suscité le plus d'intérêt de la part des investisseurs: début 2021, elle a annoncé avoir récolté 500 millions de dollars, portant son budget total à 578 millions de dollars (505 millions d'euros). Son objectif est de produire de l'électricité directement à partir de la fusion, plutôt que d'utiliser la chaleur dégagée par celle-ci pour vaporiser un fluide et actionner des turbines. La technique de Helion Energy consiste à envoyer des impulsions de plasma dans un réacteur linéaire, puis à comprimer rapidement ce plasma regroupé à l'aide de champs magnétiques. Lorsque la fusion se produit, le plasma se dilate et son champ magnétique interagit avec celui qui entoure le réacteur pour induire un courant électrique. Helion Energy espère réussir à faire fonctionner un mélange de deutérium et d'hélium 3, un processus qui ne créerait pas de neutrons en sous-produit. Mais l'hélium 3 lui-même devrait être produit par la fusion deutérium-deutérium... L'entreprise construit actuellement un réacteur de démonstration appelé Polaris, qu'elle souhaite mettre en service d'ici à 2024.

Les réacteurs construits par les entreprises privées, plus petits que les projets à l'échelle d'Iter, seront beaucoup plus abordables. Le

cofondateur de Tokamak Energy, David Kingham, envisage des dispositifs à 1 milliard de dollars, et Michl Binderbauer pense que les machines de TAE technologies pourraient même être construites pour environ 250 millions de dollars.

L'objectif est de fabriquer de petits réacteurs à fusion compatibles avec les réseaux électriques existants. Selon Chris Kelsall (le directeur général de Tokamak Energy), ils pourraient également servir directement aux industries particulièrement gourmandes en énergie, comme la métallurgie, un secteur qui pourra difficilement être alimenté par les énergies renouvelables. Chris Mowry ajoute que le transport maritime pourrait constituer un autre marché important: les dispositifs produisant environ 100 MW ont «la taille idéale pour un grand porte-conteneurs».

Tony Donné, du consortium Eurofusion, reste toutefois prudent quant à ces perspectives, affirmant que les entreprises privées «annoncent des délais très resserrés par rapport aux projets financés par le secteur public, mais présentent également un risque d'échec beaucoup plus élevé». Pour autant, TAE Technologies insiste sur le fait qu'elle est toujours sur la trajectoire annoncée au milieu des années 2010, à savoir mettre au point un réacteur à fusion commercialisable vers la fin de cette décennie.

Malgré son scepticisme, Tony Donné ajoute qu'il «considère l'essor des entreprises privées dans le domaine de la fusion comme un bon signe. Il peut y avoir des avantages mutuels à maintenir des liens étroits entre les projets de fusion publics et privés.» C'est en tout cas ce qui se passe. Non seulement l'industrie privée de la fusion s'appuie sur des années d'investissements publics dans des projets tels qu'Iter, mais elle bénéficie également de l'intérêt des gouvernements – c'est pourquoi le gouvernement britannique et le ministère américain de l'Énergie investissent également dans des entreprises comme Tokamak Energy, Commonwealth Fusion Systems et General Fusion. Chris Mowry pense que ces partenariats entre public et privé sont la voie à suivre – comme ils l'ont été pour les vaccins contre le Covid-19. Et, comme les vaccins, la fusion sera nécessaire dans le monde entier, d'autant plus que la consommation d'énergie va augmenter dans les pays à faible revenu.

La mise au point des vaccins contre le Covid-19 a montré «ce que l'on peut réaliser si l'on dispose des ressources nécessaires, déclare Melanie Windridge. Si nous avions ce genre de mobilisation dans le domaine de l'énergie, ce qu'on pourrait réaliser serait incroyable». Le monde a désespérément besoin de davantage de sources d'énergie propres et décarbonées. «C'est un défi existentiel, déclare Chris Mowry. La fusion est en quelque sorte le vaccin contre le changement climatique.» ■

Cet article est une traduction de **The chase for fusion energy**, publié le 17 novembre 2021 sur Nature.com.

BIBLIOGRAPHIE

M. Barbarino, **On the brink of a new era in nuclear fusion R&D**, *Nature Reviews Physics*, 2022

A. Turrell, **The star builders : Nuclear fusion and the race to power the planet**, Scribner, 2021

P. Bertrand, **Iter, un passage obligé**, *Pour la Science*, n° 334, 2005

ALAIN BÉCOULET

est physicien et spécialiste
de la fusion nucléaire.

Il est responsable du domaine
ingénierie du projet *Iter* depuis
février 2020. Il a été directeur
de recherche au CEA
et notamment directeur de l'IRFM,
l'Institut de recherche sur la fusion
par confinement magnétique.



Le défi «Iter» était hors norme, mais nous touchons au but

Des résultats expérimentaux récents
et encourageants, des projets de firmes privées
qui se multiplient... et «Iter»? L'imposant réacteur
international en cours d'assemblage profite
de ces avancées. Alain Bécoulet est confiant:
la première fusion est prévue pour 2035.

Face au changement climatique, la question de l'énergie occupe une place centrale dans les débats actuels. Énergies renouvelables, fission nucléaire... les pistes sont nombreuses.

L'une d'elles, la fusion nucléaire, est particulièrement ambitieuse et doit encore faire la démonstration de ses performances.

L'installation d'Iter, en cours de construction, cristallise autour d'elle une forte attente aussi bien des acteurs du secteur, chercheurs et industriels, que du grand public. Quel est le principe de cette source d'énergie ?

L'idée principale est de mimer ce qui se passe dans le Soleil, sans en reproduire exactement les mêmes conditions. Une étoile est une boule de plasma (un état de la matière où les atomes sont totalement ionisés) qui sous l'effet de sa propre masse crée des conditions de pression et de température très élevées en son cœur. Ces conditions sont suffisantes pour amorcer et soutenir des réactions de fusion nucléaire. Typiquement, des noyaux d'hydrogène se lient pour donner de l'hélium. Ce processus libère de l'énergie, celle qui fait briller les étoiles.

Le principe de la fusion est d'une certaine façon l'inverse d'une fission nucléaire qui part de gros atomes que l'on scinde en deux, ce qui libère également de l'énergie.

Comment reproduire ces processus de fusion en laboratoire ?

Sur Terre, nous voulons réaliser ces réactions de fusion dans un plasma à petite échelle. Le rapport de volume entre le Soleil et celui d'un réacteur correspond à une réduction de 24 ordres de grandeur ! Évidemment, il est impossible de reproduire des conditions de pression comparables à celles qui existent au centre du Soleil. Or il est nécessaire pour faire fusionner deux noyaux atomiques de vaincre la répulsion coulombienne qui s'exerce entre eux, car ils sont tous deux chargés positivement. La solution est de leur donner une vitesse élevée en augmentant la température. Ainsi, deux noyaux peuvent se rapprocher assez l'un de l'autre de sorte que l'interaction forte (celle qui lie entre eux les constituants d'un noyau) prend le dessus et conduit à leur fusion.

Les travaux de recherche en physique nucléaire montrent que la réaction la plus simple à réaliser en laboratoire (c'est-à-dire avec une probabilité de réaction élevée) est celle du deutérium et du tritium, deux isotopes de l'hydrogène comportant respectivement un et deux neutrons. Lors de leur fusion, ils produisent un noyau d'hélium et émettent un neutron. Avec des densités de plasma de l'ordre de 10^{20} particules par mètre cube (la densité de l'air est de 2×10^{25} particules par mètre cube, et $3,3 \times 10^{28}$ particules par mètre cube pour l'eau à pression et température ordinaires), les températures requises sont de l'ordre de 150 millions

de degrés, soit dix fois celle qui règne au cœur du Soleil ! Aucun matériau ne peut résister au contact d'un plasma d'une telle température.

Quelles sont les solutions ?

Il existe deux approches. La fusion inertielle consiste à mettre les réactifs dans de petites capsules que l'on fait implorer en les frappant simultanément avec plusieurs lasers de haute puissance. L'autre piste est celle du confinement magnétique. On crée une « boîte » aux parois immatérielles à l'aide d'un champ magnétique. Comme les particules du plasma (noyaux et électrons) sont toutes chargées, elles décrivent des trajectoires hélicoïdales qui suivent les lignes du champ magnétique. Avec une géométrie du champ adaptée, le plasma reste confiné dans cette boîte magnétique. Il est possible de concevoir ce piège immatériel de sorte à empêcher le plasma d'entrer en contact avec les parois de l'enceinte du réacteur.

Différentes solutions de confinements magnétiques ont été imaginées depuis les années 1950. Le principe du tokamak a été forgé en Union soviétique par plusieurs physiciens, dont les deux Prix Nobel Igor Tamm et Andreï Sakharov. Le terme « tokamak » est un acronyme en russe signifiant « chambre toroïdale avec bobines magnétiques ». La configuration en est, à première vue, assez simple. La chambre forme un tore (similaire à une bouée ou un *donut*) et des aimants verticaux entourant la section de la chambre forment le champ magnétique dont les lignes de champ dessinent des cercles horizontaux dans l'enceinte du tore. Le premier tokamak soviétique opère dès 1958.

Les tokamaks ont donc déjà une histoire qui s'étend sur plus de soixante ans ; quelles ont été les grandes étapes de leur développement ?

Dans les années 1960 et 1970, les premiers prototypes ont permis aux physiciens de se familiariser avec le contrôle de ces champs magnétiques et d'y confiner un plasma. C'est une physique complexe contrôlée par les équations de Maxwell, pour le champ magnétique, et les équations de Vlassov, pour le plasma, qui se comporte comme un fluide présentant des propriétés magnétiques. Trouver les bons paramètres pour obtenir un régime stable afin de confiner le plasma le plus longtemps possible dans l'enceinte est l'un des grands défis dans ce domaine de recherche.

Après cette première phase exploratoire, une stratégie globale a été mise en place à partir des années 1980. Les différents tokamaks construits dans le monde ont été conçus pour se concentrer sur certains aspects particuliers du problème. Par exemple, *Jet* (le *Joint European Torus*), au Royaume-Uni, s'intéresse tout particulièrement à la physique du plasma, et à la

QUELQUES DATES

1958

L'Union soviétique construit T1, le premier tokamak.

1968

Le tokamak soviétique T3 bat des records de température et de temps de confinement.

1973

Le premier tokamak français TFR, à Fontenay-aux-Roses, est opérationnel.

1983

Premier plasma du tokamak européen Jet.

1988

Tore Supra entre en activité en France.

1988

Acte de naissance du projet international *Iter*.

2013

La construction du bâtiment d'*Iter* débute.