



sphérique compacte: l'agence de l'énergie atomique britannique, par exemple, a lancé un projet appelé *Step* (*Spherical tokamak for energy production*), qui vise à construire un tel dispositif dans une centrale prototype qui fournirait au moins 100 MW au réseau électrique national d'ici à 2040. L'agence a présélectionné cinq sites pour accueillir la centrale, et le choix final devrait être fait l'année prochaine.

La clé de cette conception sphérique réside dans de nouveaux types d'aimants fabriqués à partir de rubans de matériaux supraconducteurs à haute température, qui devraient produire des champs beaucoup plus puissants que les aimants supraconducteurs classiques utilisés par *Iter*. Selon Thomas Klinger, ces aimants «pourraient changer la donne», non seulement en raison des champs plus puissants qu'ils induisent, mais aussi parce qu'ils sont plus faciles à refroidir. Les supraconducteurs classiques doivent être refroidis à l'hélium liquide, ce qui est un cauchemar pour les ingénieurs: la viscosité de l'hélium liquide étant presque nulle, il s'échappe par la moindre petite fissure. Les supraconducteurs à haute température, en revanche, peuvent être refroidis avec de l'azote liquide, qui est bon marché et facile à stocker.

Tokamak Energy (en collaboration avec le Cern, le laboratoire européen de physique des particules situé près de Genève, en Suisse) et Commonwealth Fusion Systems misent tous deux sur ces nouveaux aimants. En août, cette dernière entreprise a annoncé qu'elle avait fabriqué ces aimants dans la forme requise pour ses tokamaks «dans les délais et le budget prévus», selon Bob Mumgaard.

En 2018, Commonwealth Fusion Systems a été fondée au Centre pour la science des plasmas et la fusion de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Thomas Klinger considère l'entreprise comme «le projet de fusion privé le plus prometteur, le plus valable et le plus réfléchi.» Le MIT et Commonwealth Fusion System se préparent à construire ce que Bob Mumgaard appelle «le premier réacteur à fusion producteur net d'énergie», c'est-à-dire qui produira plus d'énergie qu'il n'en consomme. Baptisée Sparc, cette machine est en cours de construction à Devens, dans le Massachusetts. Selon Bob Mumgaard, elle sera opérationnelle d'ici à fin 2025 et sera «commerciallement pertinente» car elle fournira une énergie d'environ 100 MW.

First Light Fusion, une société fondée en 2011 à l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, poursuit une stratégie différente, appelée «confinement inertiel». Dans cette approche, le plasma n'est pas confiné par des champs magnétiques: il est comprimé par une onde de choc jusqu'à atteindre la densité gigantesque nécessaire à la fusion, et ne reste dans cet état qu'une fraction de seconde par sa seule inertie, avant de se disperser et de dissiper son énergie.

Cette idée, proposée dès les années 1950, est également étudiée au National Ignition Facility (NIF), du laboratoire Lawrence Livermore, en Californie. Des capsules de plastique de la taille d'un petit pois contenant du combustible D-T sont comprimées par des impulsions laser de quelques nanosecondes pour déclencher la fusion. En août 2021, le National Ignition Facility a annoncé avoir obtenu une brève libération d'énergie huit fois supérieure à ses tentatives précédentes, équivalente à 70% de l'énergie utilisée pour provoquer la réaction [le 27 janvier 2022, les équipes du National Ignition Facility ont annoncé avoir réussi à atteindre un état de plasma «en combustion», où la chaleur engendrée par les réactions de fusion au sein du plasma excède l'énergie extérieure injectée, ndlr]. Ces résultats ont relancé l'espoir de parvenir à un gain net avec la fusion à confinement inertiel, bien qu'un processus aussi énergivore puisse en fin de compte se révéler plus utile pour la recherche fondamentale que pour la production d'énergie à grande échelle.

Chez First Light, l'onde de choc qui comprime le plasma n'est pas créée par des lasers gourmands en énergie, mais par un canon à projectiles électromagnétiques qui tire un petit morceau de matériau sur une cible contenant les isotopes d'hydrogène. L'entreprise garde secrets les détails de ce processus, mais a déclaré que pour parvenir à la fusion, elle devra réussir à envoyer le projectile à 50 kilomètres par seconde, soit le double de ce qui est en général atteint dans les expériences d'ondes de choc actuelles.

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.