

Les centrales nucléaires existantes exploitent la fission, c'est-à-dire la désintégration d'atomes lourds comme l'uranium en éléments plus légers, qui dégage de l'énergie. Dans la fusion, ce sont au contraire des noyaux très légers, généralement des isotopes de l'hydrogène, qui s'assemblent pour former des atomes plus lourds, en dégageant une grande énergie. Cela ne peut se produire qu'à des températures et des pressions très élevées.

La plupart des tentatives pour exploiter la fusion dans des réacteurs consistent à chauffer du deutérium (D ou ^2H) et du tritium (T ou ^3H) – des isotopes de l'hydrogène comportant un proton et respectivement un et deux neutrons – jusqu'à ce qu'ils forment un plasma – un état de la matière constitué d'atomes ionisés et d'autres particules chargées – puis fusionnent en atomes d'hélium (He). Pour ces isotopes, la fusion s'amorce à des températures et des densités plus faibles que pour l'hydrogène normal.

Contrairement à la fission, la fusion ne produit pas en elle-même de déchets radioactifs à vie longue (seuls les neutrons libérés par la réaction peuvent éventuellement être capturés par les matériaux du réacteur et les rendre radioactifs). Elle est également plus sûre que la fission, car elle s'arrête spontanément si le plasma redescend en dessous des seuils critiques de température ou de densité.

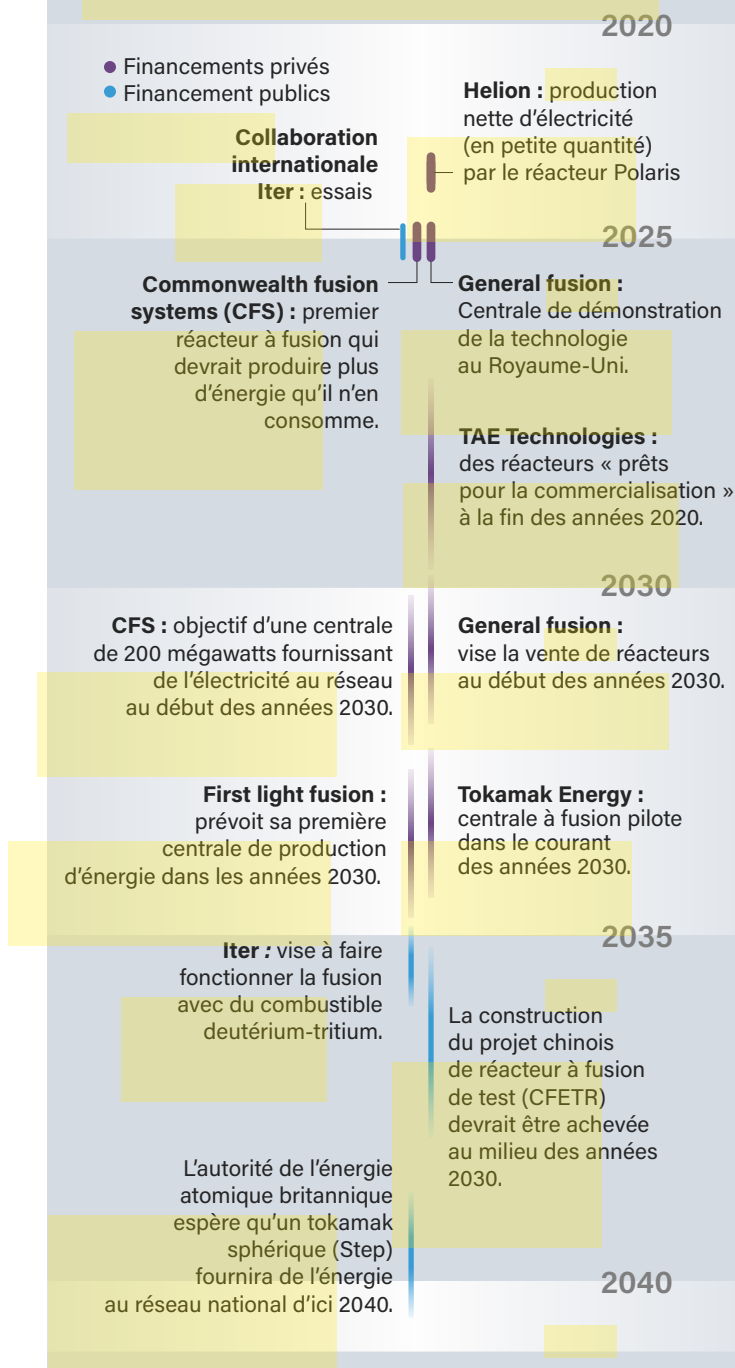
Cependant, ce qui rend la fusion nucléaire si compliquée à contrôler, c'est la difficulté à contenir un plasma chargé électriquement à une température d'environ 100 millions de kelvins – bien plus chaude que le centre du Soleil – pour que la fusion puisse se dérouler. En général, les physiciens utilisent des champs magnétiques pour confiner et faire léviter le plasma à l'intérieur du réacteur. Mais les instabilités dans ce fluide chargé rendent son confinement très difficile. Jusqu'à présent, on n'a jamais réussi à maintenir une réaction de fusion suffisamment longtemps pour en extraire plus d'énergie qu'on en avait injecté pour la déclencher.

Il s'agit nécessairement d'expériences de grande envergure et, jusqu'à récemment, seuls les projets publics pouvaient rassembler les ressources nécessaires. L'ampleur de cette entreprise se reflète aujourd'hui dans le plus grand projet de réacteur à fusion du monde: *Iter* (pour Réacteur thermonucléaire expérimental international). Ce réacteur en cours de construction sur le site de Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône, est financé par trente-cinq pays, dont la Chine, les membres de l'Union européenne, les États-Unis, la Russie, la Corée du Sud et le Japon. Son coût s'élève à au moins 20 milliards d'euros.

Bien que les premiers essais d'*Iter* aient été initialement prévus pour 2025, la fusion D-T complète n'est pas programmée pour avant 2035. L'objectif final est d'extraire en continu du réacteur une puissance de 500 mégawatts (MW)

Promesses d'avenir

Les entreprises privées font des promesses pour le moins audacieuses sur une possible commercialisation de leurs réacteurs à fusion au cours des années 2030.



– comparable à celle d'une centrale électrique au charbon de taille moyenne – tout en y injectant 50 MW (ces chiffres ne concernent que l'énergie injectée directement dans le plasma et extraite de celui-ci; ils ne tiennent pas compte d'autres processus comme la maintenance des systèmes ou les pertes lors de la conversion de la chaleur en électricité).

Une autre série de grands réacteurs pourrait succéder à *Iter*: la Chine, dont trois petits réacteurs à fusion alimentent *Iter* en données, prévoit de construire durant la prochaine décennie un grand réacteur à fusion d'essai (China Fusion Engineering Testing Reactor, ou CFETR), tandis que la Corée du Sud et l'Union européenne proposent de construire des centrales de démonstration qui prendraient la suite d'*Iter*.

Ces grands projets nationaux et internationaux ne seront pas prêts à temps pour produire l'énergie décarbonée nécessaire à la lutte contre le changement climatique, même si la fusion devrait devenir un élément clé de l'économie de l'énergie dans la seconde moitié du siècle. Mais les entreprises privées espèrent obtenir plus tôt des réacteurs à fusion fonctionnels et abordables.

Comme dans le cas de l'exploration spatiale, l'un des avantages d'un secteur privé de la fusion est d'offrir une plus grande diversité d'approches que celle des seuls projets publics monolithiques.

Iter utilise l'approche la plus courante pour confiner le plasma: un tokamak. Ce dispositif maintient le plasma dans une chambre toroïdale (en forme d'anneau) à l'aide de puissants aimants supraconducteurs. Le flux des particules du plasma, chargées électriquement, engendre également un champ magnétique qui contribue à le confiner.

Mais le tokamak n'est pas la seule option. Aux débuts de la fusion, dans les années 1950, l'astrophysicien américain Lyman Spitzer a montré que les champs magnétiques pouvaient être configurés en une boucle torsadée pour former une «bouteille magnétique» qui pouvait être remplie de plasma. Cette conception est connue sous le nom de «stellarator». Mais la résolution des équations décrivant le plasma pour cette géométrie complexe était trop exigeante en termes de calculs, si bien que le concept a été abandonné une fois qu'il a été démontré que les tokamaks fonctionnaient.

Toutefois, avec l'accroissement de la puissance de calcul à la fin du xx^e siècle, les chercheurs ont réexaminé l'idée. C'est ainsi qu'est né un projet de stellarator à l'institut Max-Planck de physique des plasmas, le réacteur Wendelstein 7-X. D'un coût de construction et d'opération de plus de 1 milliard d'euros, le réacteur Wendelstein 7-X a effectué son premier essai de fusion en 2015 et sera totalement achevé d'ici à la fin de l'année. Viendra



ensuite un long processus pour déterminer comment l'exploiter couramment en tant que démonstrateur.

Selon Josefine Proll, physicienne spécialiste de la fusion à l'université de technologie d'Eindhoven, aux Pays-Bas, les stellarators présentent l'avantage de confiner plus facilement le plasma, sans qu'il soit nécessaire, comme c'est le cas dans les tokamaks, d'y faire circuler de puissants courants électriques pour limiter les instabilités. Mais il n'est pas certain qu'il soit possible de mettre en œuvre la technologie du stellarator dans un réacteur d'ici à vingt ou trente ans. «Cela ne semble pas du tout probable à l'heure actuelle», estime-t-elle. «Nous devons encore répondre à beaucoup de questions fondamentales, déclare Thomas Klinger. Il s'agit d'une machine unique en son genre, il faut donc être patient et avancer pas à pas.» Selon lui, les entreprises privées se fixent des objectifs à plus court terme parce qu'elles doivent satisfaire leurs investisseurs, mais cela ne signifie pas qu'elles pourront tenir leurs promesses.

Un technicien travaille à l'intérieur (à droite) du réacteur de fusion de démonstration «Norman» de TAE Technologies (à gauche), dont le concept s'inspire des accélérateurs de particules.

DES CONCEPTIONS ALTERNATIVES

Certaines entreprises de fusion privées s'en tiennent à la conception du tokamak, mais à une échelle réduite. Chez Tokamak Energy, une équipe d'environ 165 personnes travaille sur un tokamak sphérique, ressemblant à une pomme au trognon évidé. Avec ses 3,5 mètres de diamètre, il sera beaucoup plus petit que le tokamak *Iter*, qui, avec les dispositifs de refroidissement qui l'entourent, mesurera près de 30 mètres de largeur et de hauteur. Certains projets publics envisagent également cette conception