



La fusion nucléaire, une option pour l'avenir

La fusion nucléaire est la source d'énergie du soleil et des étoiles. Le jour où l'on arrive à utiliser l'énergie de fusion dans des centrales commerciales, l'humanité disposera d'une source d'énergie pratiquement inépuisable, sûre et respectueuse de l'environnement. Pour répondre aux défis techniques majeurs que pose ce projet, la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis, l'Europe, l'Inde, le Japon et la Russie ont décidé de construire conjointement dans le sud de la France le réacteur expérimental thermonucléaire international Iter. Cette installation devrait démontrer la faisabilité d'une centrale à fusion. Un autre concept est étudié parallèlement à Greifswald, en Allemagne.

La technique de la fusion nucléaire, c'est-à-dire de la fusion de noyaux d'atomes, a accompli de grands progrès au cours de ces dernières décennies. La recherche internationale intense menée dans ce domaine est motivée par les énormes quantités d'énergie libérées lors de la fusion nucléaire. Comme les centrales nucléaires classiques basées sur la fission nucléaire, les centrales à fusion n'influent que très peu sur l'environnement et ne produisent aucun gaz à effet de serre. L'état actuel des connaissances permet d'exclure tout accident grave avec rejet important de radioactivité. De plus, le processus de fusion ne donne lieu en lui-même à aucun déchet radioactif issu du combustible. Pendant l'exploitation, seuls les composants à

l'intérieur du réacteur deviennent radioactifs. La fusion nucléaire présente l'avantage majeur d'utiliser des combustibles qui existent sur Terre en quantité pratiquement inépuisable. Elle pourrait ainsi devenir le pilier d'un approvisionnement énergétique qui fournira à l'humanité les conditions nécessaires à un développement durable.

La fusion à eau lourde

Parmi toutes les réactions de fusion possibles, celle de l'hydrogène «lourd» (deutérium et tritium) en hélium – un gaz rare – est la plus favorable. Le grand défi technique réside dans le fait que la fusion ne peut avoir lieu qu'à des températures voisines de 100 millions de degrés car il faut surpasser les

Utiliser la source d'énergie du soleil sur Terre: le réacteur de fusion Iter est en cours de construction – brasage des conduites d'hélium.

De l'hélium produit à partir d'hydrogène lourd

Au cours de la réaction de fusion nucléaire, deux noyaux atomiques légers fusionnent pour produire un noyau plus lourd. La fusion de deutérium et de tritium, deux isotopes de l'hydrogène, constitue ici la méthode la plus simple pour obtenir ce résultat. Alors que le noyau de l'hydrogène normal ne se compose que d'un proton, le noyau de deutérium contient un neutron supplémentaire, et le noyau de tritium deux neutrons supplémentaires. Lorsqu'ils fusionnent, ils génèrent de l'hélium, gaz rare inoffensif pour l'homme et pour l'environnement, ainsi qu'un neutron de haute énergie. Le processus de fusion libère de la chaleur dans le réacteur, chaleur qui, comme dans les centrales nucléaires classiques, génère de la vapeur qui actionne les turbines et les alternateurs pour la production d'électricité.

Parmi les noyaux atomiques qui participent au processus de fusion, seul le tritium est radioactif. Il possède une demi-vie de douze ans. N'existant quasiment pas dans la nature, il se forme uniquement dans le réacteur, à partir de lithium, et se transforme de manière continue en hélium non radioactif. Avec le temps, les neutrons de haute énergie libérés activent toutefois les matériaux de la structure du réacteur. Cent ans

après l'arrêt de l'exploitation, ces composants ne sont plus radioactifs et ils peuvent, pour certains, être recyclés. Aucun stockage géologique n'est nécessaire.

Une camionnette de combustible nucléaire par an

Chaque mètre cube d'eau contient 35 grammes environ de deutérium. Le tritium en revanche n'est présent qu'en faible quantité dans la nature. Les centrales à fusion permettent toutefois de le «générer», à l'aide des neutrons libérés, à partir de l'élément lithium.

Le lithium est l'un des métaux légers les plus fréquents dans la croûte terrestre et ne se limite donc pas à des gisements locaux. Le combustible nécessaire à la fusion est ainsi disponible en quantité pratiquement illimitée: pour exploiter pendant un an une centrale à fusion de la taille d'une centrale nucléaire classique de 1000 MW, 100 kilogrammes de deutérium et quelques tonnes de lithium seulement sont nécessaires. Cette quantité insignifiante de matière, qu'une simple camionnette peut contenir, permettra de couvrir la consommation annuelle d'électricité d'un million de personnes. Pour produire la même quantité d'électricité, une centrale à charbon classique nécessite quant à elle quelque 1'500'000 tonnes de charbon par an.

forces de répulsion des noyaux atomiques chargés positivement. À une température aussi élevée, les électrons sont détachés des noyaux atomiques qui sont ainsi ionisés, et le gaz est à l'état de «plasma». Ce plasma étant conducteur, il peut être influencé par des champs magnétiques. Cette propriété est utilisée dans le réacteur de fusion en confinant le plasma chaud dans une chambre magnétique et en le tenant ainsi éloigné des parois du réacteur.

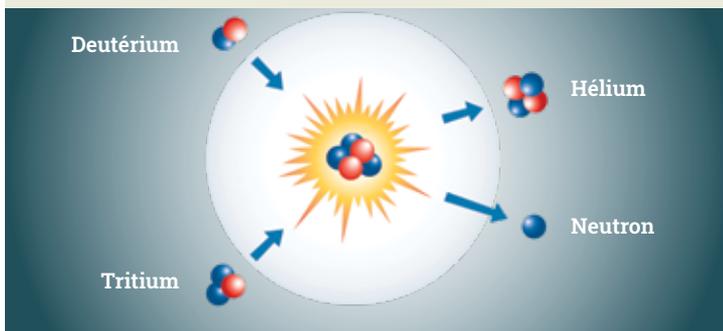
Iter: étape suivante

Le fait que ce principe fonctionne dans la pratique a été démontré dans l'installation de la Communauté européenne JET (Joint European Torus) de Culham, en Grande-Bretagne. En 1997, les scientifiques sont en effet parvenus à atteindre pendant un bref laps de temps une puissance de fusion de 16 mégawatts, soit plus de la moitié de la puissance nécessaire pour maintenir le plasma sous cette forme sur une durée prolongée.

JET est toutefois trop petit pour un gain énergétique net. C'est pourquoi la prochaine étape porte actuellement sur la construction du réacteur expérimental Iter (en latin «le chemin»), nettement plus grand. Iter devrait permettre de démontrer que les centrales de fusion sont réalisables sur les plans scientifiques et techniques. La puissance de fusion produite par le plasma devrait être dix fois supérieure à la puissance qui lui est fournie pour le maintenir à la température requise. En cours de l'étape suivante d'Iter, les scientifiques espèrent toutefois parvenir à augmenter ce facteur jusque vers trente ou quarante, ce qui permettrait d'obtenir un bilan électrique clairement positif.

Percée politique en 2005

Le projet Iter est le fruit d'une collaboration lancée en 1988 entre chercheurs européens, américains, japonais et russes. Après de longs tiraillements politiques sur le choix du site d'Iter, dans les années 2000, les six partenaires de l'époque, à savoir la Communauté européenne, la Chine, la Corée du Sud, les États-Unis, le Japon et la Russie, se sont accordés sur le site de Cadarache, dans le sud de la France. L'Inde a adhéré au projet fin 2005 en tant que septième partenaire, et Iter est ainsi financé par des pays représentant plus de la moitié de la population mondiale. Les coûts de la construction d'Iter ont augmenté au cours des dernières années et sont estimés actuellement à environ



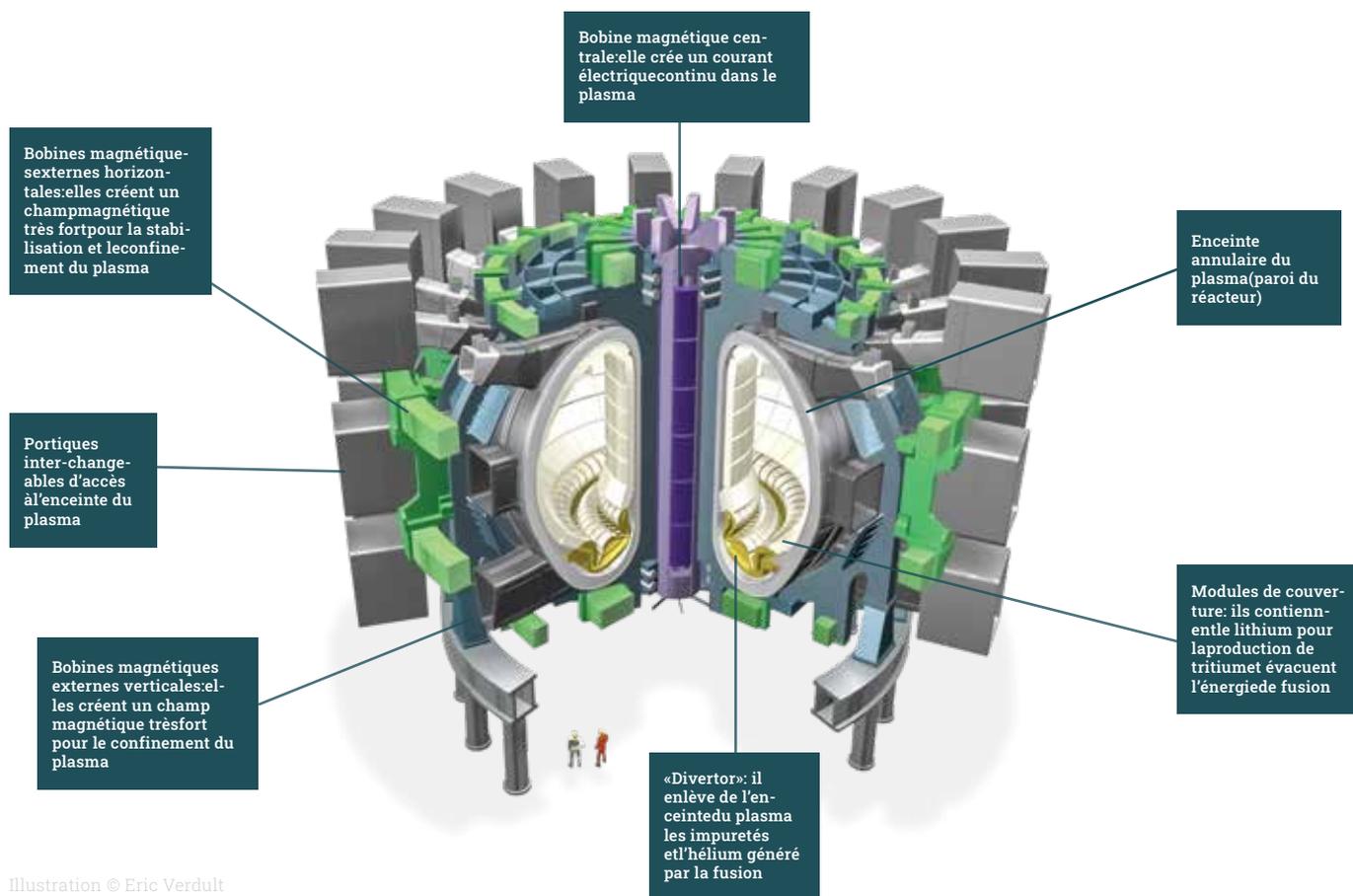


Illustration © Eric Verdult

15 milliards d'euros. Près de la moitié est prise en charge par l'Europe, le reste est réparti de manière uniforme entre les six autres partenaires. A titre de comparaison: l'exploration et l'extraction de matières premières telles que le pétrole et le gaz naturel coûtent chaque année plusieurs fois cette somme.

Fusion: démarrage en 2035

À l'issue de travaux préparatoires d'envergure, la construction du bâtiment du réacteur Iter a commencé en été 2013. L'assemblage du réacteur devrait être achevé en 2025, date prévue pour le premier plasma. Les composants sont fournis par l'ensemble des partenaires, une entreprise titanesque au vu des accords et de la précision qu'une telle coordination nécessite.

Le calendrier prévoit une première phase de tests généraux en hydrogène ou hélium puis en deutérium pour éviter au départ la production de neutrons. L'opération en deutérium et tritium devrait démarrer en 2035. Une installation de démonstration sera construite peu après. Sauf accélération du calendrier sur décisions politiques, les centrales à fusion destinées à une utilisation commerciale devraient commencer à voir le jour dès le milieu de notre siècle.

Participation suisse

La création d'Euratom en 1957 a marqué le lancement de la coordination européenne en matière de recherche sur la fusion. Un accord de coopération à durée indéterminée conclu en 1978 permet à la Suisse de participer aux travaux de recherche menés en Europe dans le domaine de la fusion nucléaire, avec des droits et des obligations identiques à ceux des membres d'Euratom. Le Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation ainsi que le «Swiss Plasma Center» (SPC) représentent la Suisse au sein des comités directeurs du programme Euratom.

Au niveau national, l'acteur principal dans ce domaine est le SPC, un centre de recherches de l'EPFL, également présent à l'Institut Paul-Scherrer (PSI) de Villigen (canton d'Argovie) par le biais d'un groupe de recherche. L'Université de Bâle participe elle aussi à la recherche sur la fusion. L'industrie bénéficie des commandes qui lui sont passées, ainsi que du transfert général de technologie.

Ces dernières années, la Confédération a investi entre 20 et 25 millions de francs par an dans la recherche sur la fusion en Suisse. C'est un peu plus que la somme injectée dans la recherche sur la fission mais sensi-

Un immense défi technique: schéma en coupe du réacteur expérimental Iter, avec ses principaux composants.

Sites Internet sur ce thème

Site Web officiel du projet «Iter» (ang.): www.iter.org

Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI): www.sefri.admin.ch
 → Recherche & Innovation
 → infrastructures de recherche internationales
 → Iter/ Fusion for Energy

Swiss Plasma Center, EPF Lausanne (fr./ang.) <http://spc.epfl.ch>

Attribution de mandats à l'industrie suisse (ang.) www.swissilo.ch
 → Research organisations
 → Iter

Institut Max-Planck en physique des plasmas (all./ang.) www.ipp.mpg.de

blement moins que les investissements dans les domaines des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. La nouvelle politique énergétique prévoit que la participation suisse restera inchangée même en cas de sortie du nucléaire.

Un tokamak à Lausanne

Le tokamak à Lausanne, entré en service en 1992, permet d'étudier l'influence de la forme du plasma sur son comportement. La régulation du plasma et l'utilisation d'ondes électromagnétiques de très haute fréquence pour garantir un chauffage continu du plasma sont aussi au cœur des travaux de recherche. Il s'agit d'autres composantes importantes du projet Iter. Un groupe du SPC, localisé au PSI, dispose de la plus grande installation mondiale d'essai de supraconducteurs. Il est chargé de tester des échantillons de câbles supraconducteurs provenant du monde entier et destinés à Iter. Un groupe de l'Université de Bâle analyse les phénomènes qui se produisent à la surface et dans les matériaux ayant été exposés au plasma du tokamak du SPC et du JET.

L'échange de connaissances entre la recherche universitaire et l'industrie constitue l'une des caractéristiques du programme de fusion. Non seulement l'industrie des pays partenaires profite des commandes relatives à la construction d'Iter, mais le programme stimule aussi le développement de technologies de pointe et de matériaux innovants destinés à des applications commerciales, du domaine médical à la gestion des déchets en passant par la technique énergétique en général et le domaine spatial.

En raison de l'échec de l'accord-cadre avec l'UE, la participation de la Suisse à Iter et à d'autres projets d'Horizon est suspendue jusqu'à nouvel ordre. (Etat: septembre 2021)

Forme complexe: élément de la cuve du plasma du Wendelstein 7-X, au cours de la fabrication.



Tokamak et stellarator

JET et Iter sont des machines de fusion du type «tokamak», une construction inventée par des physiciens russes et aujourd'hui de loin la plus répandue dans le monde. Dans un tokamak, le confinement magnétique est assuré en partie par des champs magnétiques externes qui entourent une enceinte de plasma toroïdale. L'autre partie du champ magnétique est produite par un courant continu qui circule dans le plasma et qui est fourni par un transformateur. C'est la raison pour laquelle un tokamak ne fonctionne pas en continu. Étant donné que, pour des raisons techniques, une centrale électrique ne doit pas fonctionner par impulsions, les scientifiques espèrent que lors d'une phase ultérieure de développement, le courant pourra être maintenu continuellement – notamment par des ondes électromagnétiques à haute fréquence, domaine dans lequel le SPC de Lausanne est spécialisé.

Contrairement aux tokamaks, les «stellarators» peuvent être exploités en continu sans autres mesures. Dans ce concept, le champ magnétique généré dans la chambre à plasma, elle aussi toroïdale, l'est entièrement par des bobines magnétiques externes. Ces bobines présentent toutefois une forme bien plus complexe que celles d'un tokamak.

Afin de démontrer le fonctionnement du principe du stellarator dans le cadre d'une centrale électrique, l'Institut Max-Planck de physique des plasmas en Allemagne a construit à Greifswald, sur la mer Baltique, la machine de fusion «Wendelstein 7-X». En février 2016, le premier plasma d'hydrogène a été généré. Il a été maintenu durant un quart de seconde. Dès 2022, après une phase d'expérimentation prolongée, l'objectif est de générer progressivement des décharges de 30 minutes afin de démontrer le fonctionnement en continu – la propriété la plus importante du stellarator.