

La FUSION

Les scientifiques rêvent de maîtriser la fusion nucléaire – le moteur des étoiles –, qui promet de l'énergie inépuisable et propre. Mais même si une étape historique devrait être bientôt franchie, certains considèrent le projet comme utopique ou prématuré.

Michael Moyer

L'allumage, ou ignition, est proche. Dans moins de deux ans, à Livermore, en Californie, les 192 faisceaux laser du NIF concentreront leur énorme puissance sur une pastille sphérique de quelques millimètres. Le NIF, ou *National Ignition Facility* (Installation nationale pour l'ignition), est le résultat de 13 ans d'efforts et de quatre milliards de dollars d'investissement. Il est comparable au LMJ français, le *Laser Mégajoule*, en construction à Le Barp, au Sud de Bordeaux.

Ces deux équipements sont conçus pour que les faisceaux laser compriment fortement le contenu d'un microballon – des isotopes de l'hydrogène, à savoir du deutérium et du tritium – au point de faire fusionner les noyaux atomiques et libérer ainsi de l'énergie (voir aussi l'article page 36).

En d'autres termes, l'idée est de créer dans des conditions contrôlées une bombe H miniature pour exploiter l'énergie de l'explosion. Cela a déjà été testé, et avec succès. Mais jusqu'ici, les scientifiques devaient fournir plus d'énergie pour les tirs de laser que la fusion nucléaire n'en produisait... Cela devrait changer avec l'entrée en action du NIF : la fusion du centre de la cible produira plus d'énergie que les lasers n'en auront apporté. Une étape importante aura alors été franchie.

En théorie, le surplus d'énergie pourrait être utilisé pour alimenter une centrale productrice d'électricité. Le deutérium, combustible nécessaire à une telle centrale exploitant la fusion nucléaire, serait extrait de l'eau de mer, et il n'y aurait ni émissions atmosphériques ni déchets nucléaires... Tout se passerait comme si l'on avait capturé une petite étoile afin de faire marcher les machines sur Terre, et cela sans craindre une pénurie d'énergie.

Lasers ou champs magnétiques

La construction d'une autre installation majeure pour la fusion nucléaire bat son plein à Cadarache, au Nord d'Aix-en-Provence : ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Dans cette installation dont le coût est estimé à une dizaine de milliards d'euros (construction et fonctionnement durant plus de 20 ans), les composants essentiels ne sont pas des lasers. Des aimants supraconducteurs assureront le confinement du mélange d'isotopes de l'hydrogène, qui sera chauffé à quelque 150 millions de degrés, soit 25 000 fois la température régnant à la surface du Soleil. ITER est aussi censé produire plus d'énergie qu'il n'en consomme. De

Lawrence Livermore National Laboratory

NUCLÉAIRE

une filière d'avenir ?

DANS LA CHAMBRE DE RÉACTION du MIF, en Californie, 192 faisceaux laser concentreront leurs impulsions sur une toute petite capsule remplie d'un mélange d'isotopes de l'hydrogène (cette cible est tenue par l'extrémité du bras en forme de crayon). Une brève et explosive fusion des noyaux d'hydrogène en résultera. Quand la réaction produira plus d'énergie que celle fournie par les lasers, on aura franchi une étape importante vers le contrôle de la fusion nucléaire.

L'ESSENTIEL

✓ La fusion d'isotopes de l'hydrogène est sur le point d'être enfin réalisée avec un gain d'énergie : c'est une étape essentielle vers la domestication de l'énergie des étoiles.

✓ En maîtrisant l'énergie en excès produite, on pourrait concevoir des centrales électriques révolutionnaires, fondées sur la fusion thermonucléaire.

✓ Toutefois, les chercheurs n'ignorent pas l'ampleur des défis techniques à relever avant que l'on puisse construire une première centrale à fusion.

plus, à la différence des tirs intermittents des systèmes à laser, les champs magnétiques d'ITER maintiendront le plasma chaud (le gaz ionisé de deutérium et de tritium) en confinement plus continu, durant des dizaines ou des centaines de secondes (voir l'article page 44).

Cependant, l'ignition du combustible nucléaire pourrait n'être que la partie facile du contrôle de la fusion nucléaire. Les experts de la recherche sur la fusion reconnaissent de plus en plus que les défis de la construction et du fonctionnement d'une centrale à fusion pourraient être bien plus difficiles à relever. Certains physiciens qui ne sont pas directement impliqués dans les recherches sur la fusion se demandent même si l'objectif est réalisable, même en théorie.

Un réacteur opérationnel devrait être fait de matériaux capables de résister des années durant à des températures de plusieurs millions de degrés. On assisterait à une irradiation permanente de particules de haute énergie, conditions qui rendent les matériaux ordinaires friables et radioactifs. Il faudra aussi que le réacteur produise son propre tritium, l'un des deux composants du combustible, par un procédé complexe. Et afin de s'intégrer utilement au réseau électrique, une telle

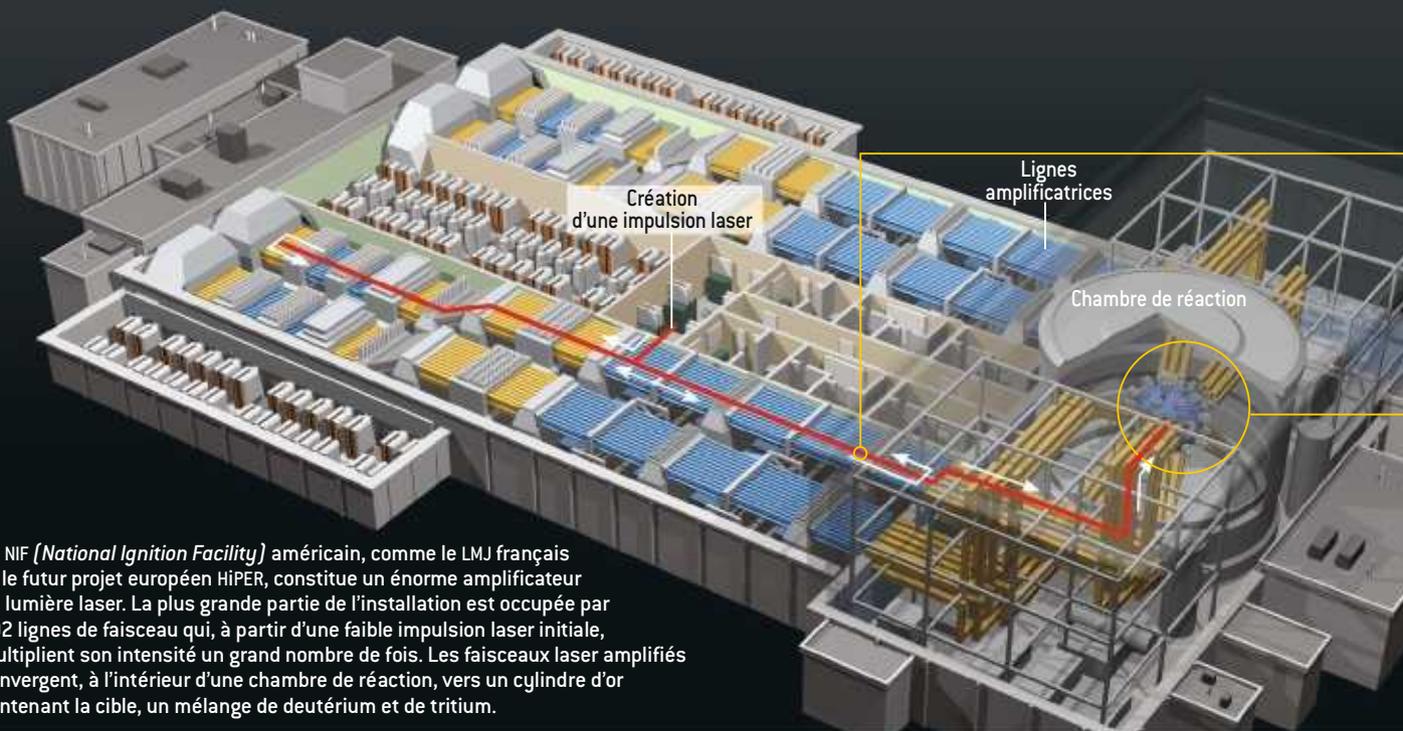
centrale devra fonctionner de façon permanente, sans interruptions ni incidents, pendant des décennies.

« L'attitude répandue a consisté à admettre l'existence de difficultés, mais à les considérer comme des problèmes surmontables, que l'on réglerait après s'être d'abord concentré sur la fusion elle-même, souligne Richard Hazeltine, directeur de l'Institut des études sur la fusion à l'Université du Texas à Austin. Il se peut que cela ait été une erreur. »

L'énergie des étoiles

La fusion – ou plutôt l'ignorance de ce phénomène – déconcerte les scientifiques depuis les années 1860 au moins. Pour expliquer l'incroyable diversité de la vie sur Terre, la théorie de Charles Darwin sur l'évolution des espèces par sélection naturelle suppose que de tout petits changements se sont accumulés durant des centaines de millions d'années. Or les calculs de l'éminent physicien britannique William Thomson (lord Kelvin) suggéraient que l'âge du Soleil ne pouvait guère excéder quelques dizaines de millions d'années. Comme le raconte l'auteur américain Charles Seife dans son livre de 2008 *Sun in a bottle*, Darwin voyait la critique de Thomson comme

FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL (PAR LASER)



Le NIF (*National Ignition Facility*) américain, comme le LMJ français et le futur projet européen HiPER, constitue un énorme amplificateur de lumière laser. La plus grande partie de l'installation est occupée par 192 lignes de faisceau qui, à partir d'une faible impulsion laser initiale, multiplient son intensité un grand nombre de fois. Les faisceaux laser amplifiés convergent, à l'intérieur d'une chambre de réaction, vers un cylindre d'or contenant la cible, un mélange de deutérium et de tritium.

© Don Fabry

l'une des principales difficultés de sa théorie. Il répliquait un peu maladroitement que la connaissance des lois du cosmos était si incomplète que les scientifiques devraient réserver leur jugement.

Darwin avait raison. Quelque 70 ans de plus passèrent avant que les physiciens ne développent les outils conceptuels nécessaires pour comprendre ce qui fait briller le Soleil. Vers 1930, les physiciens savaient que toute la matière est faite d'atomes, qui ont un noyau constitué de protons chargés positivement et de neutrons non chargés (l'hydrogène est la seule exception – son noyau est formé d'un seul et unique proton). Albert Einstein avait démontré, *via* sa fameuse formule $E = mc^2$, que la masse peut se transformer en énergie. Et les études spectroscopiques ont montré que le Soleil n'est pas constitué de roche fondue, comme l'avait supposé Kelvin, mais essentiellement d'hydrogène et d'un peu d'hélium.

En 1938, Hans Bethe, physicien d'origine allemande, comprit que la pression au centre du Soleil est si élevée que les noyaux d'hydrogène y sont tassés au point de vaincre la répulsion entre charges électriques de même signe. Bethe écrivit la

réaction en quatre étapes par laquelle les noyaux d'hydrogène fusionnent. Les produits finaux de cette réaction de fusion sont un peu plus légers que les ingrédients initiaux; la masse manquante se retrouve sous forme d'énergie, qui alimente le Soleil.

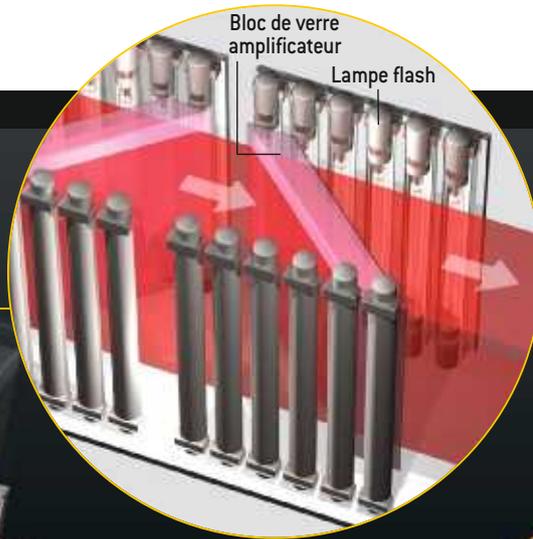
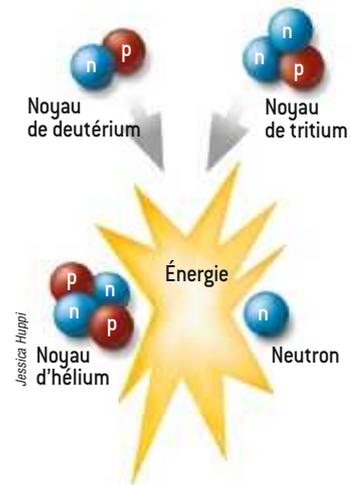
Haute pression et haute température

Cette réaction en chaîne, complexe, exige des pressions et des températures qui n'existent qu'au cœur des étoiles. Une voie un peu plus facile pour induire la fusion met en jeu deux isotopes de l'hydrogène: le deutérium (D, noyau formé d'un proton et d'un neutron) et le tritium (T, noyau formé d'un proton et de deux neutrons). La fusion d'un noyau de deutérium et d'un de tritium produit un noyau d'hélium (deux protons, deux neutrons) en libérant un neutron et une certaine quantité d'énergie.

Cette réaction de fusion entre le deutérium et le tritium est moins exigeante en termes de température et de pression que la fusion de noyaux d'hydrogène, mais elle libère tout de même beaucoup d'énergie. Si les scientifiques parvenaient à déclencher la fusion nucléaire de façon contrôlée, les problèmes d'énergie seraient résolus. Le combustible est abondant: on

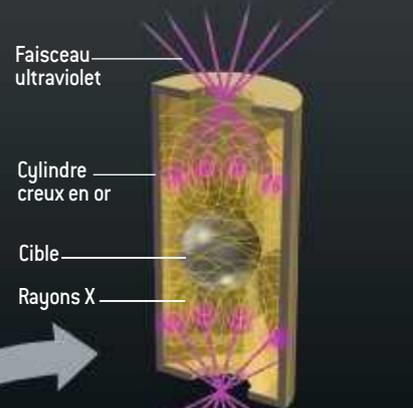
LA RÉACTION DEUTÉRIUM-TRITIUM

En forçant des noyaux de deutérium (D) et de tritium (T) à se rapprocher suffisamment, *via* de très hautes températures et pressions, la répulsion électromagnétique qui s'exerce entre eux est surmontée et les noyaux fusionnent. La réaction deutérium-tritium produit un noyau d'hélium, un neutron et un surplus d'énergie, sous la forme d'énergie cinétique des particules produites, c'est-à-dire de chaleur.



2 AMPLIFICATEUR DE FAISCEAU LASER

Une petite impulsion laser ayant été scindée et envoyée à travers des préamplificateurs, elle passe à travers des verres amplificateurs. Des lampes flash au xénon excitent le néodyme contenu dans le verre amplificateur; l'énergie ainsi déposée dans le verre amplificateur est transmise au faisceau laser lors de son passage. L'impulsion laser gagne ainsi 25 pour cent d'énergie à chaque passage, et chaque faisceau est soumis à 52 passages successifs.

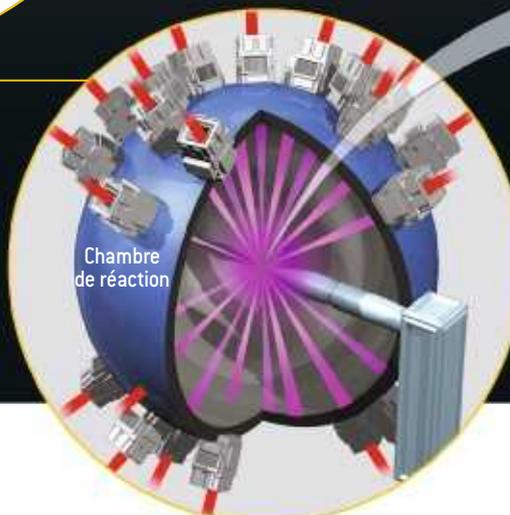


3 IGNITION

Au centre de la chambre de réaction, les faisceaux sont dirigés sur les parois internes de la cavité en or, qui réagit en émettant des rayons X de haute énergie. Ce rayonnement détruit l'enveloppe de la cible et comprime son contenu au point de lui faire atteindre 100 fois la densité du plomb, et de la chauffer à 100 millions de degrés. Cette brusque augmentation de la pression et de la température déclenche la fusion.

1 VERS LA CIBLE

Lorsque le faisceau laser entre dans la chambre de réaction, des cristaux triplent sa fréquence lumineuse pour le faire passer du rouge [couleur moins destructrice pour les dispositifs optiques] à l'ultraviolet, plus efficace pour induire la fusion.



trouve du deutérium dans l'eau de mer, tandis que le tritium peut être engendré au sein d'un réacteur. Et, au contraire de la fission, la fusion ne crée pas de sous-produits radioactifs à longue durée de vie, c'est-à-dire des déchets nucléaires. En théorie, les 3,3 grammes de deutérium contenus dans 100 litres d'eau de mer représentent autant d'énergie que 660 tonnes de pétrole, et le seul rejet consisterait en une bouffée d'hélium.

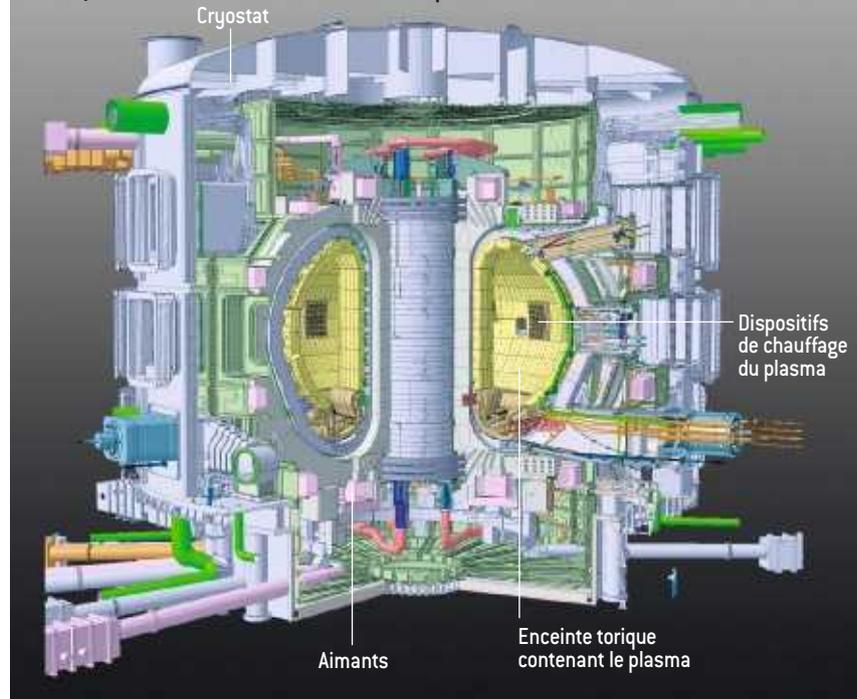
Les premiers concepts de réacteur à fusion sont apparus au début des années 1950. Lyman Spitzer, de l'Université de Princeton, calcula que son « stellarator » (du latin *stella* pour étoile) produirait une puissance de 150 mégawatts, de quoi alimenter 150 000 foyers. Le dispositif qu'il avait imaginé était fondé sur le fait qu'aux hautes températures nécessaires pour la fusion, tous les électrons sont arrachés de leurs atomes. La soupe de particules chargées ainsi formée, nommée plasma, peut être maintenue sous contrôle grâce à un champ magnétique. Pour l'essentiel, le stellarator de Spitzer consistait donc en une bouteille magnétique capable de confiner le plasma, même s'il était chauffé à des millions de degrés. On parle de « confinement magnétique ».

Pour autant, Spitzer et ses successeurs n'avaient pas une très bonne compréhension du comportement des plasmas. Ils se rendirent vite compte que les plasmas ne se comportent pas bien du tout. Imaginez un gros ballon en éponge. Essayez de le comprimer le plus possible. Quelle que soit la façon dont vous vous y prenez, une partie de l'éponge s'échappera toujours entre vos doigts. Le plasma a ce même comportement : quand on essaye de le concentrer dans un volume assez petit pour y induire la fusion, le plasma trouve le moyen de s'en échapper. C'est l'obstacle auquel sont confrontés tous les principes de réacteurs à fusion : plus on chauffe et plus on concentre un plasma, plus il oppose de résistance aux efforts de confinement.

Les scientifiques se sont démenés durant 60 ans pour contrôler les plasmas en utilisant des bouteilles magnétiques de plus en plus grandes. Et chaque fois que l'on inaugurait une machine améliorée, conçue pour corriger les faiblesses de la précédente, les énergies supérieures atteintes révélaient une nouvelle série de difficultés. « Peu importe ce que vous en faites, les plasmas restent toujours un peu

FUSION PAR CONFINEMENT MAGNÉTIQUE

Un tokamak, enceinte en forme de tore, est un dispositif destiné à déclencher la fusion au sein d'un plasma de deutérium et de tritium piégé magnétiquement. Le plasma, très chaud, est maintenu confiné et à distance des parois grâce à des champs magnétiques créés par de puissants électroaimants, tandis que des faisceaux de micro-ondes et de particules le chauffent à quelque 150 millions de degrés. Au contraire de la fusion par confinement inertiel, le procédé n'est pas discontinu. L'ambition du projet ITER (*schéma de son tokamak ci-dessous*) est d'entretenir la fusion durant plusieurs centaines de secondes.



instables», souligne Charles Baker, ancien directeur des programmes de recherche sur la fusion des laboratoires nationaux d'Argonne et d'Oak Ridge, et actuellement président du Comité consultatif technique américain pour ITER.

La crise énergétique des années 1970 a aussi vu la naissance d'une nouvelle voie de recherche sur la fusion contrôlée, celle du « confinement inertiel ».

Gagner plus d'énergie que l'on en fournit

Cette approche consiste à utiliser une multitude de faisceaux laser pour comprimer et chauffer une cible de deutérium et tritium. Ces essais, réalisés au Laboratoire national Lawrence Livermore, siège du programme militaire américain lié à la fusion, ont débuté avec un dispositif à deux faisceaux. Des progrès sur la puissance des lasers ont conduit en 1977 à *Shiva* (le nom du dieu hindou de la création et de la destruction), puis à *Nova* en 1984. Chacun de ces programmes de recherche a pulvérisé le record mondial de puissance pour des

impulsions laser. Mais, comme dans l'approche par confinement magnétique, on n'a pas pu atteindre le seuil de production d'énergie, celui à partir duquel la fusion produit plus d'énergie que les lasers n'en fournissent. Pour y parvenir, le Laboratoire de Livermore avait besoin d'un laser 70 fois plus puissant que les précédents. Et en 1997, la construction du NIF débuta.

De l'extérieur, le NIF n'a rien d'impressionnant. Ce bâtiment sans fenêtres, peint d'un beige neutre, a environ la taille d'un hangar pour avions. Comme dans tout équipement de science lourde, tel le grand collisionneur LHC au CERN, c'est la partie enfouie de l'installation qui inspire le respect. À l'intérieur, des dizaines de tubes larges de un mètre sont déployés ; ils conduisent à la chambre de réaction, une sphère haute de trois étages garnie de trous pour faire passer les lasers. Au centre de cette chambre se trouve la cible de deutérium-tritium, maintenue par ce qui ressemble à un gigantesque stylo.

Les faisceaux laser seront focalisés vers la cible avec une précision micrométrique. Cette cible sera comprimée par

ITER Organization

des impulsions dont la puissance totale – durant une petite fraction de seconde – dépassera de loin celle de tout le réseau électrique américain.

Bien que le NIF soit conçu pour atteindre le seuil de production d'énergie, la raison première de son existence est liée à la simulation des explosions nucléaires. En 1996, le président Bill Clinton a signé le Traité d'interdiction complète des essais nucléaires. Pour s'assurer cependant que l'arsenal existant restera en bon état de fonctionnement, les laboratoires américains spécialisés dans la recherche sur les armes nucléaires, ceux de Los Alamos et de Livermore, ont mis en place un programme de maintenance et de tests visant à garantir la fiabilité des quelque 5200 têtes nucléaires dont disposent les États-Unis.

La plupart des opérations de maintenance consistent simplement en des inspections de routine et au remplacement de pièces. Une autre composante de ce programme est la simulation par ordinateur des explosions nucléaires. Or les modèles physiques correspondants sont très sensibles aux conditions initiales ; le NIF est conçu pour fournir les données nécessaires à la calibration de ces modèles, à partir de mesures réalisées sur de minuscules explosions deutérium-tritium. L'installation sera aussi au service de la recherche fondamentale, pour étudier la physique de la matière à température, pression, densité ou champ extrêmes, telles les ondes de choc d'une supernova.

NIF, 15 ans avant ITER ?

Selon les prévisions, le NIF entamera ses expériences de fusion du mélange deutérium-tritium au cours de cette année et, si tout va bien, atteindra le seuil de production d'énergie environ un an après. Il ne s'agit pas là du seuil de production d'énergie d'une centrale, rappelle Edward Moses, directeur du NIF. Il s'agira juste d'obtenir de la pastille de combustible plus d'énergie que les 1,8 mégajoules déposés par les impulsions laser. Le NIF devrait atteindre ce seuil 15 ans avant ITER.

Peu importe comment on réalise la fusion, que ce soit à l'aide de lasers mégajoules ou de champs magnétiques, l'énergie produite se manifeste sous la forme de neutrons. Ces particules étant neutres, elles ne sont pas déviées par les champs électriques et magnétiques. En outre, elles passent à travers la plupart des matériaux. La

seule façon de les arrêter est de les faire heurter directement un noyau atomique.

Mais de telles collisions font des dégâts : les neutrons issus de la réaction de fusion deutérium-tritium sont si énergétiques qu'ils peuvent déplacer un noyau atomique hors de sa position dans le matériau, de l'acier par exemple. À la longue, tous ces chocs affaiblissent le réacteur et rendent ses structures friables.

Les neutrons peuvent aussi induire de la radioactivité, puisque l'impact d'un neutron sur un noyau atomique peut déstabiliser ce dernier. « Même s'ils proviennent d'une réaction propre, le flux continu des neutrons rendra dangereusement radioactif tout matériau ordinaire », explique Ch. Baker.

Du tritium créé *in situ*

Une centrale fondée sur la fusion devra convertir l'énergie des neutrons en chaleur, qui servira à faire tourner une turbine. Les réacteurs envisagés accompliront cette conversion dans leurs parois. La probabilité qu'un neutron donné heurte un atome de la paroi est faible ; mais une couverture assez épaisse et construite dans le bon matériau – quelques mètres d'acier peut-être – capturera presque tous les neutrons émis. Les collisions neutron-noyau chaufferont la couverture et un fluide caloporteur, du sel liquide par exemple, évacuera la chaleur hors du réacteur. Ce sel liquide très chaud servira à créer de la vapeur d'eau, qui fera tourner une turbine pour générer de l'électricité.

Sauf que cela n'est pas si simple. La couverture du réacteur a une autre fonction, tout aussi essentielle que celles de la récupération et du transfert de la chaleur : produire le combustible utilisé dans le réacteur. Si le deutérium est bon marché et abondant, le tritium est instable et a une courte durée de vie (12,3 ans) : il doit en fait être obtenu par des réactions nucléaires. Une centrale nucléaire ordinaire (à fission) peut en produire entre deux et trois kilogrammes par an, à un coût estimé entre 60 millions et 90 millions d'euros par kilogramme. Or une centrale à fusion par confinement magnétique consommera environ un kilogramme de tritium par semaine ! « Les besoins de la fusion sont bien au-delà de ce que peut fournir la fission », insiste Mohamed Abdou, directeur du Centre pour la science et la technologie de la fusion de l'Université de Californie à Los Angeles.

UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA FUSION

1950 : Le physicien soviétique Andreï Sakharov conçoit une enceinte magnétique de forme torique nommée tokamak, capable de contenir un plasma. Mais les travaux de Sakharov sur les armes nucléaires le détournent du projet.

1951 : Lyman Spitzer, de l'Université de Princeton, invente le stellarator, un dispositif de même type que le tokamak.

1952 : Les États-Unis font exploser *Ivy Mike*, la première bombe H.

1968-1969 : Les premiers neutrons issus de la fusion par laser sont observés à Moscou et, de façon indépendante, en France au CEA.

1969 : Des chercheurs occidentaux se rendent à Moscou afin de prendre connaissance de la conception du tokamak de Sakharov. Ils constatent qu'il produit un plasma bien plus chaud et dense que le stellarator. Les tokamaks se mettent à dominer dans les projets de fusion par confinement magnétique.

1972 : Les recherches sur la fusion par laser prennent leur essor ; les Américains proposent le concept d'implosion.

2010 : Le NIF entame ses expériences sur la fusion contrôlée par laser.

2018 : La construction d'ITER devrait s'achever. Les premiers tests de fusion d'un plasma de deutérium-tritium sont prévus pour 2026.

Pour produire son propre tritium, une centrale à fusion devra utiliser une partie des neutrons qu'elle émet. À l'intérieur de la couverture du réacteur, des canaux de lithium, un métal mou et très réactif, seront censés capturer les neutrons rapides et produire de l'hélium et du tritium (voir l'illustration ci-dessous). Le tritium s'échapperait par les canaux, afin d'être réinjecté dans le plasma contenu au sein du réacteur.

Cependant, si l'on examine les choses en détail, le bilan devient précaire. Chaque réaction de fusion consomme exactement un noyau de tritium et produit exactement un neutron. Par conséquent, chaque neutron provenant du réacteur doit produire au moins un noyau de tritium (sinon, le réacteur en consommera plus qu'il n'en produit).

Cela n'est possible que si les scientifiques parviennent à induire une cascade compliquée de réactions. Un neutron commence par heurter un noyau de lithium 7, ce qui produit un noyau de tritium, un noyau d'hélium et un neutron. Ce second neutron heurte ensuite un noyau de lithium 6 et engendre un second noyau de tritium, ainsi qu'un noyau d'hélium.

De surcroît, le tritium doit être collecté et réintroduit dans le plasma avec une efficacité de près de 100 pour cent. « Dans cette réaction en chaîne, vous ne devez perdre aucun neutron, sinon la réaction s'arrête, souligne Michael Dittmar, physicien des particules à l'Institut suisse fédéral pour la technologie (ETH) à Zurich. La première chose à faire [avant de construire un réacteur] est de démontrer que la production du tritium peut fonctionner. »

Pour sa part, R. Hazeltine souligne à quel point la couverture du réacteur doit avoir des propriétés particulières : « Elle doit accepter beaucoup de chaleur et la transférer sans surchauffer ; elle doit recueillir des neutrons, et les matériaux très élaborés qui la composent doivent pourtant lui conférer une durée de vie importante. Et en plus, elle doit utiliser ces neutrons pour transmuter du lithium en tritium. »

Il est prévu de tester dans ITER des modules générateurs de tritium. En parallèle, un projet plus spécifique, l'IFMIF (*International Fusion Material Irradiation Facility*) prévoit la construction d'un accélérateur afin de produire des neutrons et de tester des matériaux de couverture destinés à un réacteur à fusion. M. Abdou estime qu'il faudrait entre 30 et 75 ans pour maîtriser

LES DÉFIS DE LA FUSION

Pour que la fusion nucléaire devienne une source d'énergie viable, il faudra surmonter plusieurs problèmes.

Chaleur : Les matériaux mis en présence des réactions de fusion doivent résister à de hautes températures pendant des années.

Structure : Les neutrons de haute énergie provenant des réactions de fusion fragilisent les matériaux qu'ils rencontrent.

Combustible : Un réacteur à fusion devra produire du tritium, c'est-à-dire une partie de son combustible, au moyen d'une chaîne complexe de réactions.

Fiabilité : Les réacteurs à laser ne produisent que des saccades de fusion ; les systèmes à confinement magnétique devront maintenir un plasma en fusion des semaines durant, et non quelques secondes.

suffisamment tous les problèmes liés aux matériaux de couverture pour construire une centrale à fusion opérationnelle. « Je pense que c'est faisable, dit-il, mais c'est beaucoup de travail. »

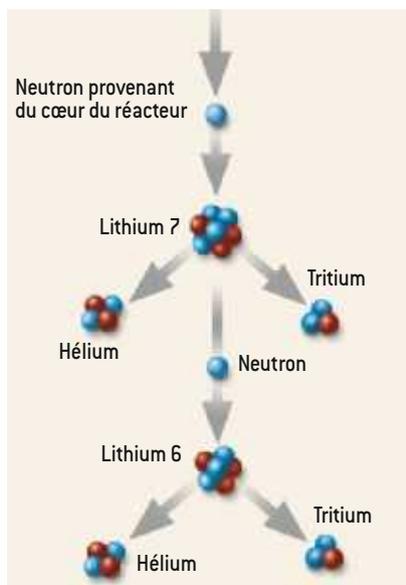
Une filière viable ?

Supposons que ce problème soit réglé. Nous sommes en 2050. Tant le NIF qu'ITER ont été des succès complets, et les objectifs en termes de gain énergétique ont été atteints tout en respectant les budgets... La nature n'a pas réservé aux scientifiques de mauvaises surprises quand ils ont augmenté l'énergie en jeu dans chacune des deux installations ; les fantasques plasmas se sont finalement comportés comme prévu. Un banc d'essai distinct a démontré la faisabilité d'une couverture de réacteur, capable d'engendrer du tritium et d'évacuer la chaleur due aux neutrons afin qu'on la transforme en électricité, tout en résistant aux agressions subatomiques qu'elle subirait quotidiennement dans une centrale à fusion. Et supposons que le coût estimé d'une centrale à fusion ne soit que de dix milliards d'euros. Disposerons-nous alors d'une nouvelle filière énergétique utilisable ?

Même pour les pionniers qui ont consacré leur vie à la quête de la fusion contrôlée, il est difficile de répondre. Le problème est que les centrales à fusion – comme les centrales à fission habituelles – devront produire de l'électricité en continu. Étant donné leur coût initial important, elles ne seront rentables que si elles fonctionnent en permanence. « Quand un système exige autant d'investissement, il faut pouvoir l'exploiter 24 heures sur 24, car vous ne payez pas le combustible » fait remarquer Ch. Baker.

Malheureusement, il est très difficile de maintenir un plasma stable assez longtemps. Jusqu'à présent, les réacteurs ont réussi à maintenir un plasma en fusion durant moins d'une seconde. Le but d'ITER est de prolonger cette durée à plusieurs dizaines ou centaines de secondes. Passer à une fusion du plasma 24 heures sur 24 représentera un pas gigantesque à franchir. « Il va falloir que la fusion se déroule 90 pour cent du temps », estime Ch. Baker en comptant les temps d'arrêt pour maintenance. « C'est, de loin, la plus grande source d'incertitude sur la viabilité économique des futurs réacteurs à fusion. »

E. Moses, le directeur du NIF, pense avoir la parade. Il a proposé un concept



GÉNÉRER DU TRITIUM

On prévoit que les réacteurs à fusion produiront leur propre tritium par une chaîne complexe de réactions. Un neutron commence par heurter un noyau de lithium 7 implanté dans la paroi du réacteur.

Cette réaction crée un noyau d'hélium, un noyau de tritium et un neutron. Ce second neutron heurte ensuite un noyau de lithium 6, qui se trouve aussi dans la paroi du réacteur, ce qui produit un autre noyau d'hélium et un de tritium.

Jessica Huppi

hydride à fusion et fission ; le système utiliserait des neutrons produits par fusion, déclenchée par laser, pour contrôler des réactions de fission dans une couverture constituée de... déchets nucléaires. Il nomme son système LIFE (pour l'anglais *laser inertial fusion engine*), et affirme pouvoir livrer une centrale électrique fonctionnant sur ce principe en 20 ans.

Le système imaginé par E. Moses se fonde sur le fait que l'on n'utilise que cinq pour cent de l'uranium qui alimente les centrales à fission, avant que l'on ne retire les barres de combustible et ne les stocke pour une longue conservation. LIFE bombarderait ce combustible usagé avec des neutrons, ce qui accélérerait sa désintégration en espèces plus légères et moins radioactives, tout en produisant de la chaleur exploitable pour produire de l'électricité. « Nos études montrent que nous serions compétitifs avec toutes les sources d'énergie disponibles aujourd'hui, explique E. Moses. Voire moins chers. »

Combien coûtera une cible ?

Bien entendu, LIFE n'est pas sans inconvénients. Selon Edward Morse, professeur de génie nucléaire à l'Université de Californie à Berkeley, chaque filière a ses mystifications qu'il faut débusquer. « La principale mystification de la fusion contrôlée par laser est de prétendre que l'on pourra produire les cibles à quelques centimes l'unité. » Les cibles en question, de la taille d'un grain de poivre, doivent être usinées avec une très grande précision et être parfaitement sphériques pour s'assurer que la compression sera isotrope. La moindre déformation et la cible ne s'allumera pas...

Les cibles sont actuellement très chères à fabriquer. Le Laboratoire de Livermore, qui prévoit de produire ses cibles sur place, ne publie pas d'estimations de coût. Mais le Laboratoire d'énergétique laser de l'Université de Rochester produit aussi des cibles de deutérium-tritium. « Actuellement, le budget annuel utilisé dans ce laboratoire pour produire des cibles est de plusieurs millions de dollars, alors qu'il n'en produit qu'environ six par an, indique E. Morse. On pourrait donc en déduire que chaque cible coûte environ un million de dollars. »

Or en situation de production, les cibles ne seront pas utilisées au rythme du NIF, capable de réaliser un tir toutes les quelques heures, mais plutôt à la



UNE VUE DU PLASMA à l'intérieur du tokamak sud-coréen KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research), installation de recherche qui a commencé à fonctionner en 2008.

cadence d'une mitrailleuse. « Plus précisément, il faudra une machine capable de tirer 600 fois par minute, souligne E. Moses. Elle serait comparable à un moteur de voiture de un million de chevaux, sauf qu'il n'y aura pas de carbone émis... » Une centrale LIFE fonctionnant 24 heures sur 24 utiliserait environ 90 000 cibles par jour.

Bien entendu, il est impossible de prévoir la situation énergétique dans 20 ans. Il se pourrait que l'on ait besoin, plus que jamais, d'énergie produite par fusion thermonucléaire. Mais il se pourrait aussi qu'une percée de l'énergie solaire, éolienne ou d'une autre forme d'énergie fasse apparaître, par comparaison, la fusion comme trop coûteuse ou difficile à domestiquer. « Il est possible que les gens diront : certes, ça marche, c'est impressionnant, mais nous n'en avons plus besoin, car nous avons d'autres possibilités », affirme R. Hazeltine.

Autrefois, la fusion thermonucléaire était au-dessus de telles considérations. Elle apparaissait radicalement différente de la production d'énergie par utilisation de combustibles fossiles, si polluants, ou de l'uranium, si dangereux. La fusion représentait une solution définitive, belle et pure, à nos besoins d'énergie. Cette vision est en train de se dissiper. La fusion n'est qu'une voie possible parmi d'autres, et il lui faudra plusieurs décennies avant qu'elle porte ses fruits. L'ignition est peut-être proche, mais l'ère de l'énergie disponible à volonté ne l'est pas. ■

L'AUTEUR

Michael MOYER est rédacteur à *Scientific American*.

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Heller, **Safe and sustainable energy with LIFE**, *Science and Technology Review*, avril/mai 2009 (<https://str.llnl.gov/AprMay09/moses.html>).

Research needs for magnetic fusion energy sciences, Rapport final du *Research Needs Workshop*, juin 2009 (www.burningplasma.org/renew.html).

A. Benuzzi-Mounaix, **La fusion nucléaire**, Belin-Pour la Science, 2008.

Ch. Seife, **The Strange History of Fusion and the Science of Wishful Thinking**, Viking, 2008.

W. J. Nutall, **Fusion as an energy source : challenges and opportunities**, Rapport de l'*Institute of Physics*, septembre 2008 (www.iop.org/activity/policy/Publications/file_31695.pdf).