

## Science et technologie nucléaires

### Exploiter l'énergie de la fusion nucléaire

#### Ce qu'il faut savoir

La production d'énergie grâce à la fusion nucléaire est considérée par beaucoup comme le grand défi technique du siècle dans le domaine de l'énergie. De nombreux chercheurs et ingénieurs de par le monde réfléchissent aux moyens de produire cette énergie en recréant sur Terre les conditions qui sont naturelles dans les étoiles, par exemple la densité et la température.

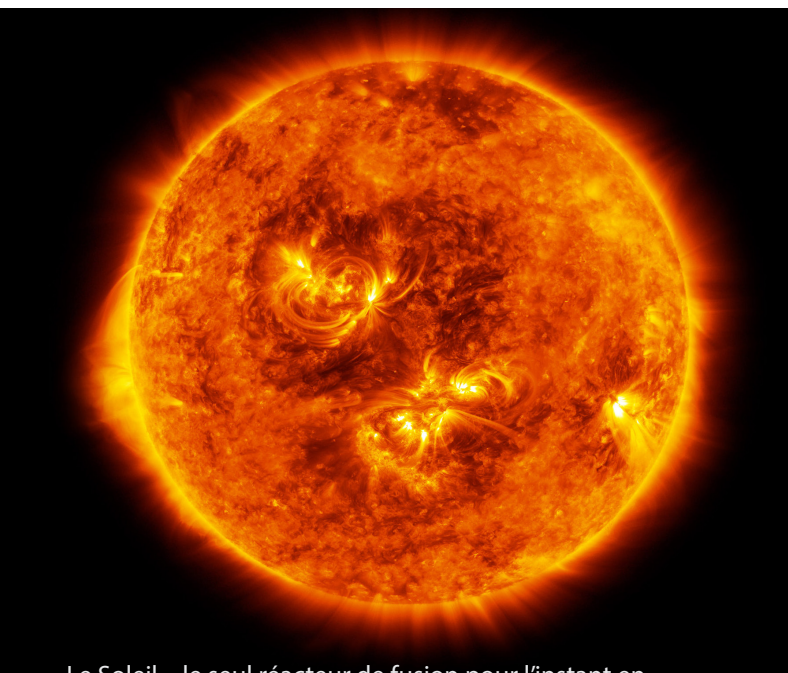
Lors de la fission nucléaire, c'est la scission des atomes qui produit de l'énergie. Lors de la fusion, en revanche, c'est l'union de **noyaux légers** qui crée des noyaux plus lourds et dégage de l'énergie. C'est comme cela que les étoiles transforment de minuscules quantités de matière en énormes quantités d'énergie. La vie sur Terre serait impossible sans les réactions de fusion nucléaire qui se produisent dans le Soleil.

La production d'énergie grâce à la fusion offre certes des perspectives intéressantes pour la société, telles que l'abondance et l'accessibilité du combustible ou l'absence d'émissions de carbone et de déchets radioactifs de haute activité, mais la mise en pratique de la fusion reste aujourd'hui l'un des domaines les plus complexes de la physique expérimentale et de l'ingénierie : contrôler une réaction de fusion à plus de 100 millions de degrés Celsius est une entreprise complexe et difficile.

Lorsque nous aurons relevé ce défi, la fusion pourra devenir une source d'énergie pratiquement inépuisable, sûre, écologique et disponible partout, qui permettra de répondre aux besoins énergétiques mondiaux.

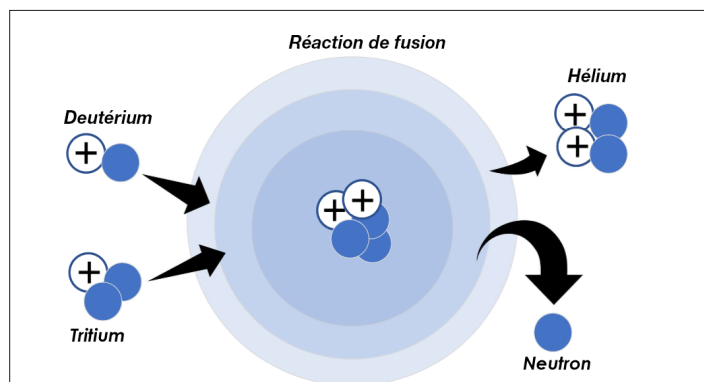
#### Comment la fusion fonctionne-t-elle ?

Au cœur d'une étoile, les réactions de fusion entre les atomes d'hydrogène s'opèrent dans un plasma dense, à des températures supérieures à 10 millions de degrés Celsius. Le plasma, quatrième état de la matière, a des propriétés uniques, différentes de celles des états solide, liquide et gazeux. Composé de particules chargées qui circulent librement, il se forme à de hautes températures lorsque des électrons sont extraits des atomes neutres. En l'état actuel des



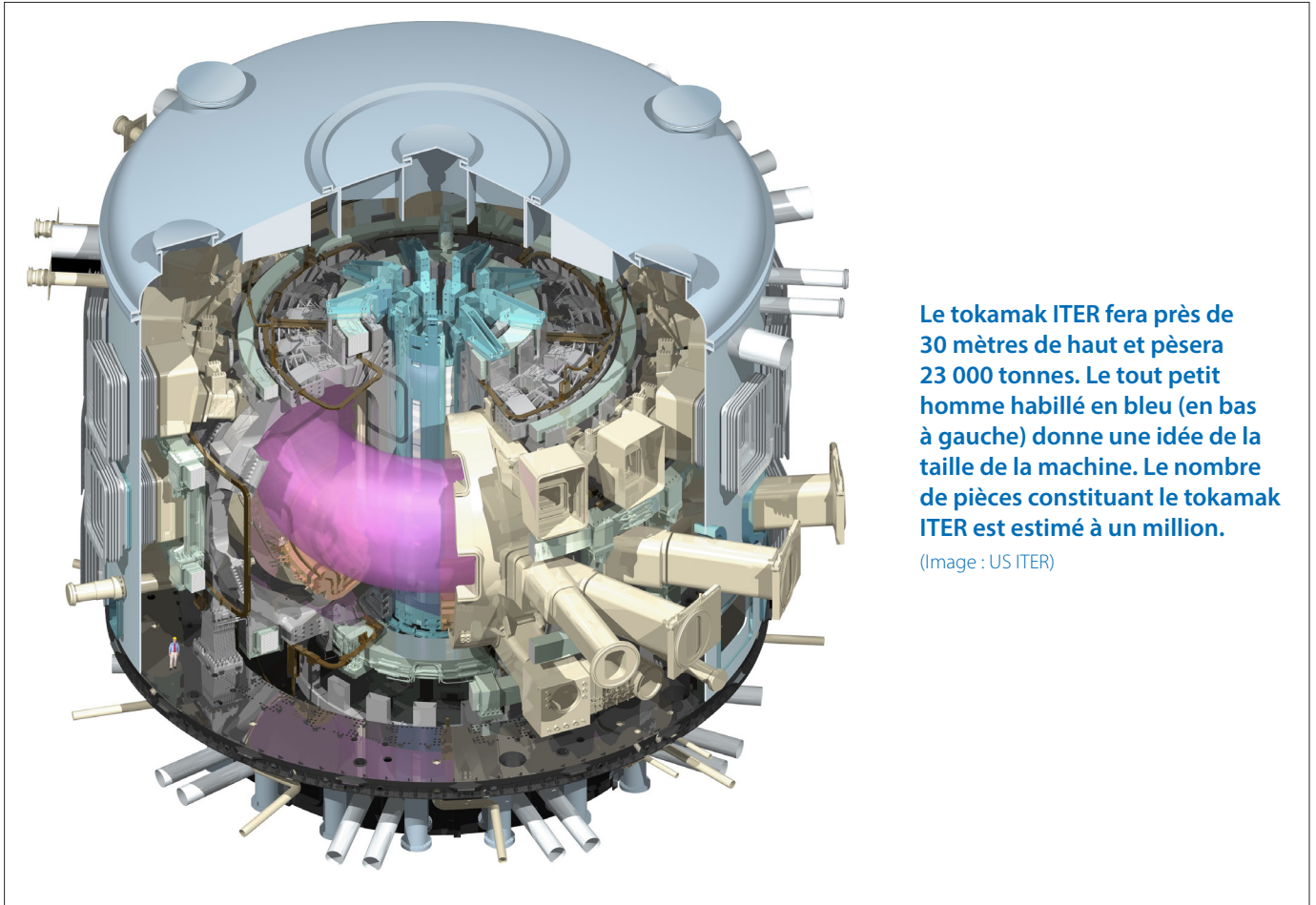
Le Soleil – le seul réacteur de fusion pour l'instant en activité dans notre système solaire – produit pratiquement toute l'énergie que nous utilisons dans notre vie.

(Image : NASA/SDO/AIA)



**On utilisera un mélange de deutérium et de tritium – deux isotopes de l'hydrogène – pour alimenter les futures centrales de fusion nucléaire. Dans le réacteur, les noyaux de deutérium et de tritium entrent en collision et fusionnent, produisant de l'hélium et des neutrons.**

(Image : AIEA/M. Barbarino)



Le tokamak ITER fera près de 30 mètres de haut et pèsera 23 000 tonnes. Le tout petit homme habillé en bleu (en bas à gauche) donne une idée de la taille de la machine. Le nombre de pièces constituant le tokamak ITER est estimé à un million.

(Image : US ITER)

connaissances scientifiques, nous savons que plus de 99 % de l'univers, y compris la matière interstellaire et les étoiles, telles que notre Soleil, existe sous la forme de plasma.

Trois conditions doivent être remplies dans une centrale de fusion nucléaire contrôlée :

1. il faut une température très élevée (plus de 100 millions de degrés Celsius) pour provoquer des collisions de particules de haute énergie ;
2. la densité des particules doit être assez élevée dans le plasma, où la réaction a lieu, pour augmenter la probabilité de ces collisions ; et
3. le temps de confinement du plasma doit être suffisamment long pour que les réactions de fusion puissent se produire en continu.

Le concept de confinement le plus efficace à ce jour est celui du **tokamak** (dont le nom vient d'un acronyme russe qui signifie « chambre toroïdale avec bobines magnétiques »), dispositif en forme d'anneau inventé dans les années 1950 qui permet de confiner le plasma au moyen de puissants aimants. Cette installation permet déjà de réunir les conditions

de base nécessaires à la fusion, pour ce qui est de la densité du plasma et de la température. Il est donc possible de produire des réactions de fusion. Par contre, la production d'une puissance nette nécessite encore un confinement plus efficace et plus long, la question étant de savoir dans quelle mesure le champ magnétique permet de maintenir l'énergie du plasma dans le temps.

### Qu'est-ce qu'ITER et pourquoi est-il si important ?

ITER (Réacteur expérimental thermonucléaire international), fruit de la collaboration de 35 pays, permettra de mener la plus grande expérience de fusion sur Terre. Il est en cours de construction à Saint-Paul-lez-Durance (France) et son entrée en service est prévue fin 2025.

L'élan en faveur de la création d'ITER en 2007 est venu de discussions tenues lors de manifestations de l'AIEA portant sur plusieurs initiatives de collaboration aux fins de la recherche et du développement de la technologie de la fusion au niveau international.

Le Directeur général de l'AIEA est dépositaire de l'Accord ITER.

ITER est conçu pour faire la démonstration de gains en puissance de fusion bien supérieurs aux autres expériences de fusion menées jusqu'à présent. L'objectif est de produire 500 MW de puissance thermique avec de longues impulsions de 400 à 600 secondes et 50 MW de puissance en entrée. ITER ne convertira pas l'énergie produite en électricité, mais jettera les bases pour la mise au point d'une machine qui pourra le faire.

L'étape venant après ITER, la conversion de la chaleur en électricité, aura lieu dans une centrale de démonstration à fusion appelée DEMO. Celle-ci devrait permettre d'étudier et de démontrer un fonctionnement en continu, ou presque, l'autosuffisance en combustible et la production d'énergie à grande échelle, y compris sa conversion en électricité, et pourrait être reliée au réseau d'ici 2050 environ.

## La fusion produit-elle des déchets radioactifs comme la fission ?

Le processus de fusion le plus simple à réaliser fait intervenir deux isotopes de l'hydrogène : le deutérium et le tritium. Le tritium est radioactif, mais sa demi-vie est courte (12,32 ans). Étant donné qu'il est utilisé en quantités relativement faibles, il ne présente aucun danger sérieux, contrairement aux noyaux radioactifs à longue période.

Cette réaction deutérium-tritium engendre un atome d'hélium (gaz inerte) et un neutron, dont on peut exploiter l'énergie pour alimenter le réacteur et produire de l'énergie, respectivement. Donc, les réactions de fusion ne produisent pas de déchets radioactifs de longue période.

Toutefois, du fait des neutrons, la fusion rendra radioactifs les matériaux entourant le plasma. Autrement dit, lorsque les neutrons (produits par la réaction de fusion) heurteront les parois du réacteur, les structures et les composants de ce dernier deviendront radioactifs. L'un des grands défis à relever lors de la construction des futures centrales de fusion sera donc d'optimiser la conception de sorte à réduire autant que possible cette radioactivité induite par les neutrons et les volumes de déchets radioactifs qui en résulteront.

## Quel est le rôle de l'AIEA concernant le plasma de fusion et la technologie de la fusion ?

Depuis sa création, en 1957, l'AIEA soutient la recherche sur la fusion nucléaire. Elle entreprend de nombreuses activités dans le domaine de la fusion, sous l'égide du [Conseil international de la recherche sur la fusion](#), un de ses organes consultatifs dont les membres viennent du monde entier.

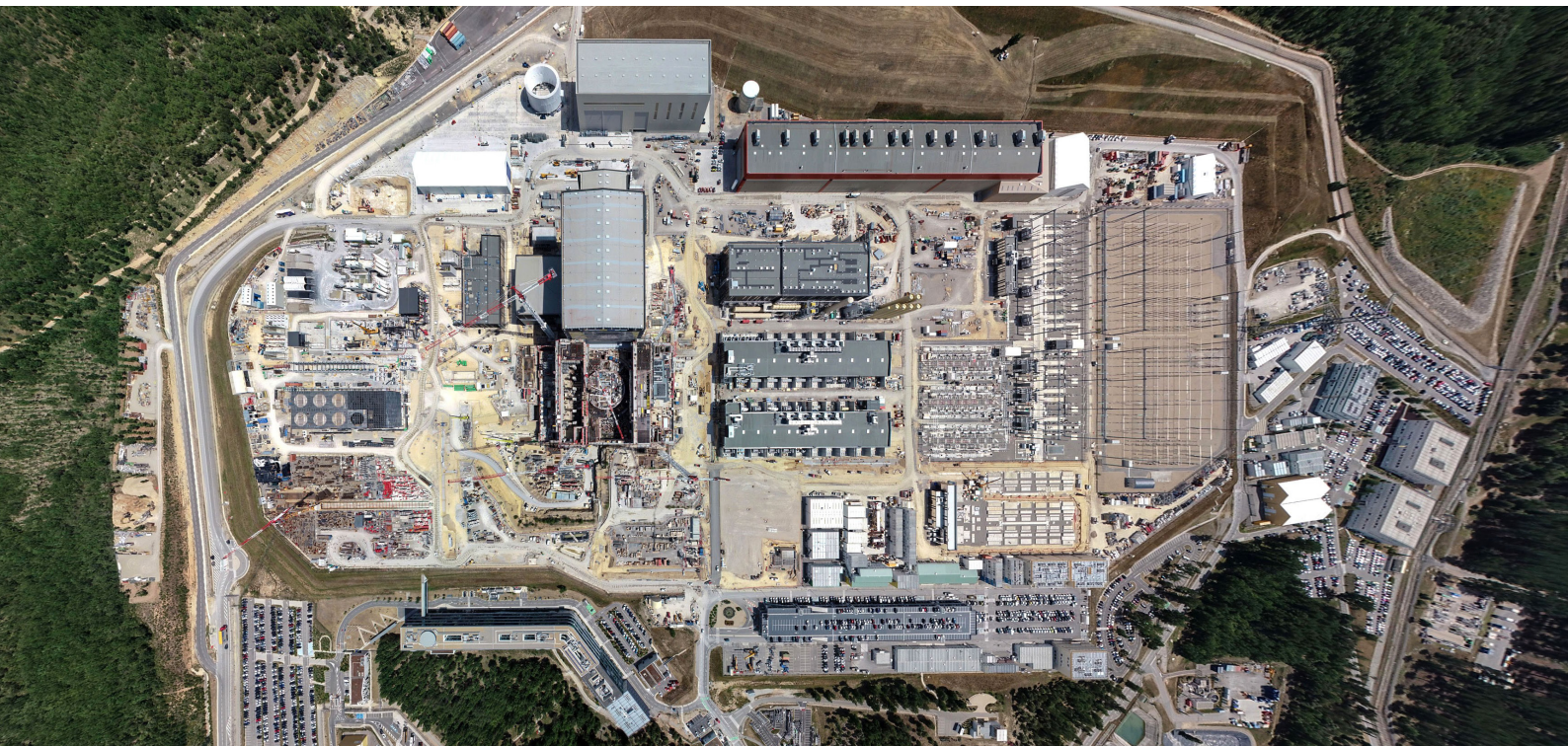
L'AIEA coordonne les efforts internationaux de recherche et développement de la technologie de la fusion en y associant des physiciens nucléaires, des scientifiques spécialistes des matériaux, des spécialistes des données nucléaires, des ingénieurs et des experts du plasma, entre autres. Elle organise aussi la [Conférence sur l'énergie de fusion](#), la plus grande manifestation internationale au monde dans le domaine de la fusion nucléaire.

Par l'intermédiaire de l'[atelier au titre du programme DEMO](#), l'AIEA joue aussi un rôle de pivot dans l'élaboration des projets de programme et le lancement de nouvelles activités de recherche-développement, en vue de formuler différents concepts de réacteurs de puissance de démonstration.

Depuis quelques années, l'AIEA travaille à l'élaboration de lignes directrices et de documents de référence à l'usage des acteurs intéressés par la fusion, dans le but de faciliter et d'optimiser les différents processus et l'échange d'informations sur la recherche-développement dans le domaine de la fusion nucléaire. Par exemple, le récent document technique de l'AIEA intitulé [Integrated Approach to Safety Classification of Mechanical Components for Fusion Applications](#) (IAEA TECDOC No. 1851) est le premier à contenir des lignes directrices internationales concernant la fusion nucléaire.

## Comment l'AIEA contribue-t-elle au renforcement des capacités ?

La coopération entre les laboratoires et les installations par l'intermédiaire de l'AIEA contribue dans une large mesure au développement de la recherche et de la technologie concernant la fusion, ainsi que des lignes directrices et normes y afférentes nécessaires.



Site ITER : vue aérienne du site de construction d'ITER en juin 2019.

(Photo : Organisation internationale ITER)

Des activités de recherche coordonnée ont permis de créer plusieurs réseaux de petits dispositifs de fusion, utilisés avec succès et permettant d'appliquer une approche intégrée dans la recherche de solutions pour plusieurs questions en suspens. Par exemple, on organise au sein de ces réseaux des expériences conjointes, dans le cadre desquelles des experts de diverses institutions se réunissent pour tester les capacités d'une machine donnée, ce qui accroît la diversité intellectuelle et permet d'exploiter au mieux le dispositif en question sur le plan scientifique. Les [sessions communes CIPT-AIEA sur la physique des plasmas](#) sont une autre initiative internationale qui contribue au renforcement des capacités dans ce domaine.

En outre, l'AIEA vise à élargir la formation théorique et pratique de la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs spécialistes de la fusion, ce qui est

particulièrement important puisque les activités de recherche-développement dans le domaine de la fusion nécessitent de plus en plus des technologies de pointe, au-delà de l'horizon du savoir-faire actuel.

## PLUS D'INFORMATIONS

Division des sciences physiques et chimiques  
Agence internationale de l'énergie atomique  
Centre international de Vienne, B.P. 100,  
1400 Vienne (Autriche)

Mél. : [Fusion-physics@iaea.org](mailto:Fusion-physics@iaea.org)

Sites web :

[nucleus.iaea.org/sites/fusionportal](http://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal)

[www.iaea.org/fr/themes/la-fusion](http://www.iaea.org/fr/themes/la-fusion)

[www.iaea.org/publications/nuclear-fusion](http://www.iaea.org/publications/nuclear-fusion)

Les fiches d'information de l'AIEA sont élaborées par le Bureau de l'information et de la communication.

Rédaction : Aabha Dixit • Conception et mise en page : Ritu Kenn

Pour de plus amples informations sur l'AIEA et les travaux qu'elle mène, rendez-vous sur le site [www.iaea.org](http://www.iaea.org)

ou suivez-nous sur    

Vous pouvez également consulter sa publication phare, le Bulletin de l'AIEA, à l'adresse suivante : [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin).

Centre international de Vienne, B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Courriel : [info@iaea.org](mailto:info@iaea.org) • Téléphone : (+43 1) 2600-0 • Fax : (+43 1) 2600-7

