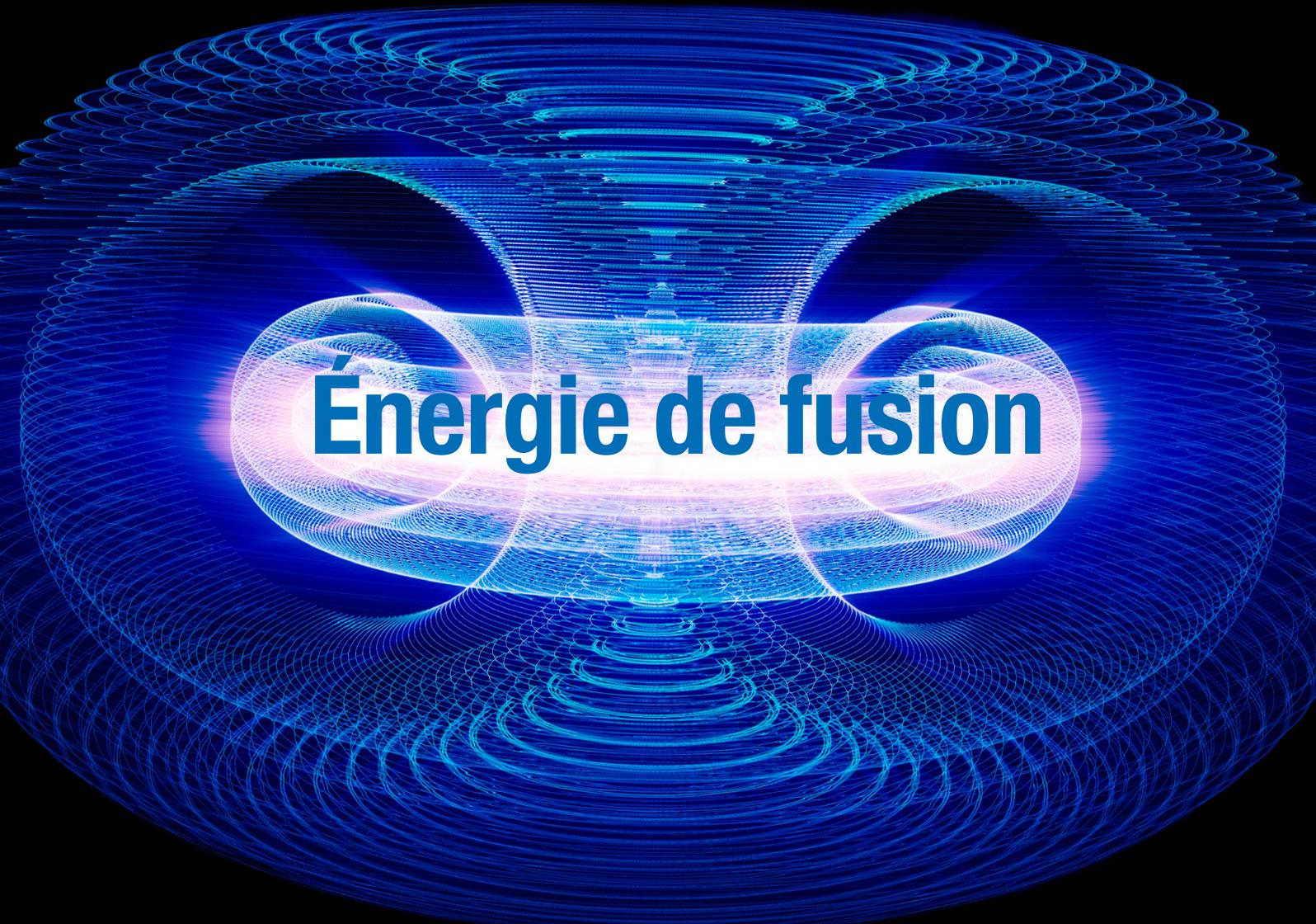


IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Mai 2021 | www.iaea.org/bulletin

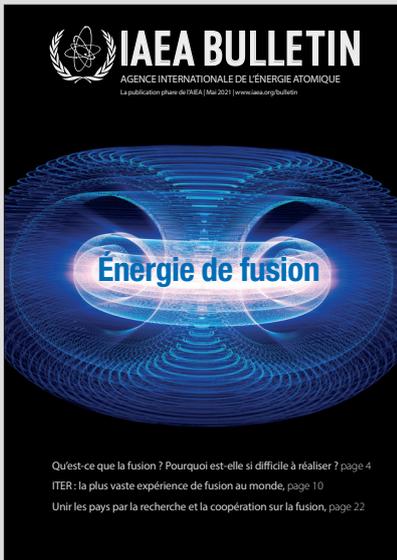


Énergie de fusion

Qu'est-ce que la fusion ? Pourquoi est-elle si difficile à réaliser ? page 4

ITER : la plus vaste expérience de fusion au monde, page 10

Unir les pays par la recherche et la coopération sur la fusion, page 22



Le Bulletin de l'IAEA

est produit par

le Bureau de l'information

et de la communication (OPIC)

Agence internationale de l'énergie atomique

Centre international de Vienne

B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Téléphone : (+43-1) 2600-0

iaeabulletin@iaea.org

Direction de la rédaction : Michael Amdi Madsen

Rédaction : Miklos Gaspar

Conception et production : Ritu Kenn

Le Bulletin de l'IAEA est consultable en ligne à
l'adresse suivante :

www.iaea.org/bulletin

Des extraits des articles du Bulletin peuvent être utilisés librement à condition que la source soit mentionnée. Lorsqu'il est indiqué que l'auteur n'est pas fonctionnaire de l'IAEA, l'autorisation de reproduction, sauf à des fins de recension, doit être sollicitée auprès de l'auteur ou de l'organisation d'origine.

Les opinions exprimées dans le Bulletin ne représentent pas nécessairement celles de l'IAEA, et cette dernière décline toute responsabilité à cet égard.

Couverture :

Dans un tokamak, des particules de plasma — chauffées à cent millions de degrés et confinées par des champs magnétiques — fusionnent et produisent de l'énergie.

(Shutterstock.com)

Suivez-nous sur :



L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a pour mission de prévenir la dissémination des armes nucléaires et d'aider tous les pays – en particulier ceux du monde en développement – à tirer parti de l'utilisation pacifique, sûre et sécurisée de la science et de la technologie nucléaires.

Créée en 1957 en tant qu'organe autonome, l'AIEA est le seul organisme du système des Nations Unies à être spécialisé dans les technologies nucléaires. Ses laboratoires spécialisés uniques au monde aident au transfert de connaissances et de compétences à ses États Membres dans des domaines comme la santé humaine, l'alimentation, l'eau, l'industrie et l'environnement.

L'AIEA sert aussi de plateforme mondiale pour le renforcement de la sécurité nucléaire. Elle a créé la collection Sécurité nucléaire, dans laquelle sont publiées des orientations sur la sécurité nucléaire faisant l'objet d'un consensus international. Ses travaux visent en outre à réduire le risque que des matières nucléaires et d'autres matières radioactives tombent entre les mains de terroristes ou de criminels, ou que des installations nucléaires soient la cible d'actes malveillants.

Les normes de sûreté de l'AIEA définissent un système de principes fondamentaux de sûreté et sont l'expression d'un consensus international sur ce qui constitue un niveau élevé de sûreté pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements ionisants. Elles ont été élaborées pour tous les types d'installations et d'activités nucléaires destinées à des fins pacifiques ainsi que pour les mesures de protection visant à réduire les risques radiologiques existants.

En outre, l'AIEA vérifie, au moyen de son système d'inspections, que les États Membres respectent l'engagement qu'ils ont pris, au titre du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires et d'autres accords de non-prolifération, de n'utiliser les matières et installations nucléaires qu'à des fins pacifiques.

Les tâches de l'AIEA sont multiples et font intervenir un large éventail de partenaires aux niveaux national, régional et international. Les programmes et les budgets de l'AIEA sont établis sur la base des décisions de ses organes directeurs – le Conseil des gouverneurs, qui compte 35 membres, et la Conférence générale, qui réunit tous les États Membres.

L'AIEA a son siège au Centre international de Vienne. Elle a des bureaux locaux et des bureaux de liaison à Genève, à New York, à Tokyo et à Toronto. Elle exploite des laboratoires scientifiques à Monaco, à Seibersdorf et à Vienne. En outre, elle apporte son appui et contribue financièrement au fonctionnement du Centre international Abdus Salam de physique théorique de Trieste (Italie).

Contribuer à faire de la fusion une réalité

Par Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA

Lorsqu'ils ont assisté à la deuxième Conférence internationale des Nations Unies sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques en 1958, les hauts responsables de l'AIEA ont été témoins de la divulgation de ce qui avait, jusqu'alors, relevé du secret d'État : les tentatives par les pays d'exploiter la puissance de fusion nucléaire. Si l'on en croit ces révélations, la fusion promettait de fournir une énergie illimitée pour la société. Elle requiert l'association des noyaux selon un processus qui libère, à partir d'une même quantité de combustible nucléaire, beaucoup plus d'énergie que la fission nucléaire, qui consiste à scinder les atomes.

À la fin des années 50, alors que l'avenir des combustibles fossiles semblait sans bornes et que le changement climatique n'était pas encore d'actualité, la fusion était considérée intéressante : une vision de la production d'énergie dans un futur lointain. Combien le monde dans lequel nous vivons aujourd'hui est différent, la demande en énergie propre étant largement supérieure à l'offre. C'est pour cette raison que les sources d'énergie propres, comme la fusion, suscitent l'intérêt des décideurs, des investisseurs et du grand public.

La fusion génère quatre fois plus d'énergie par kilogramme de combustible nucléaire que la fission, et presque quatre millions de fois plus d'énergie que la combustion du pétrole et du charbon. Le niveau actuel d'engagement international nous rapproche plus que jamais d'un avenir marqué par la fusion.

Un des meilleurs exemples à cet égard est ITER, la plus grande expérience de fusion au monde (voir page 10) qui associe des scientifiques de 35 pays dans le cadre de la recherche d'une réaction de fusion auto-entretenu. La construction est en cours et, une fois terminée, ITER permettra d'inaugurer la prochaine étape dans le développement de l'énergie de fusion : des centrales de démonstration à fusion, aussi appelées DEMO, qui sont destinées à produire de l'électricité à partir de la fusion pour la première fois.

L'AIEA est en première ligne dans le développement de DEMO, facilitant la coordination internationale et l'échange de meilleures pratiques dans les projets menés à l'échelle mondiale (voir page 12). Elle encourage la discussion sur les DEMO et fait progresser un vaste dialogue international, pour surmonter les difficultés hautement techniques et faire de la fusion une réalité.



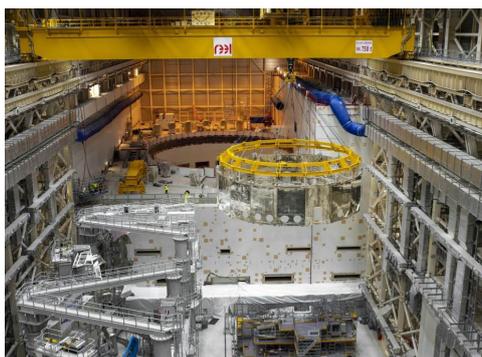
La publication par l'AIEA de Nuclear Fusion, la revue scientifique la plus ancienne et la plus reconnue au monde en matière de fusion, témoigne de notre engagement dans la recherche dans ce domaine. Avec un demi-million d'articles complets téléchargés chaque année, cette revue, qui soutient les chercheurs et les ingénieurs spécialisés dans la fusion dans le monde entier, a le plus grand impact dans son domaine.

Dans ce numéro du Bulletin, nous présentons les activités des gouvernements et la participation croissante du secteur privé dans la fusion. Cet intérêt croissant des investisseurs et des principaux producteurs d'énergie montre que l'on assiste actuellement à une accélération des progrès techniques nécessaires pour que la fusion devienne une réalité.

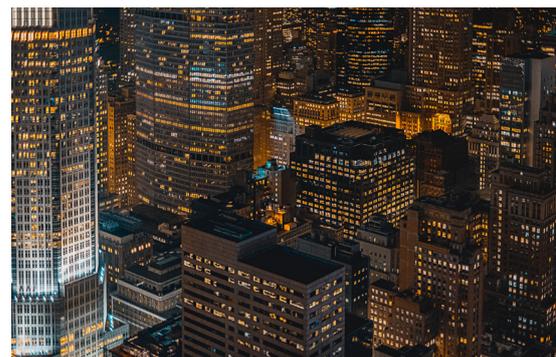
Pour paraphraser Lev Artsimovich, un célèbre physicien de l'ère soviétique, « la fusion sera prête lorsque la société en aura besoin ». Ce moment, c'est maintenant. Lutter contre le changement climatique est devenu une priorité mondiale et la décarbonation de nos sources d'énergie est l'une de nos tâches les plus importantes. L'exploitation de l'énergie de fusion offre à l'humanité un avenir énergétique propre plus proche que jamais.



(Photo : ITER)



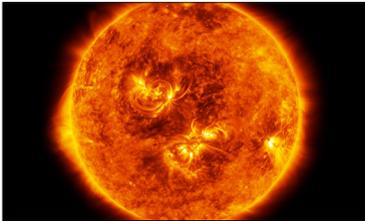
(Photo : ITER)



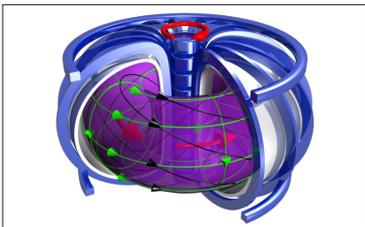
(Photo : Freepik.com)



1 Contribuer à faire de la fusion une réalité



4 Qu'est-ce que la fusion ? Pourquoi est-elle si difficile à réaliser ?



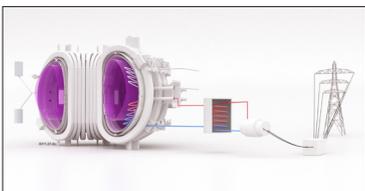
6 La fusion par confinement magnétique : tokamaks et stellarators



8 À la recherche d'alternatives au confinement magnétique



10 ITER : la plus vaste expérience de fusion au monde



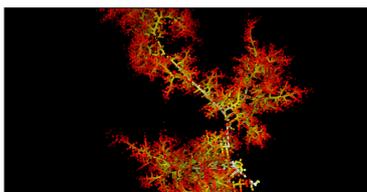
12 Centrales de démonstration à fusion

Un tremplin vers la production d'électricité commerciale à grande échelle



14 La sûreté de la fusion

Un processus intrinsèquement sûr



16 Comment les bases de données de l'AIEA contribuent au progrès de la recherche sur l'utilisation commerciale de la fusion



18 Le plasma en combustion
Un facteur essentiel de la fusion



20 Lever les inconnues sur la technologie et les matériaux de fusion



22 Unir les pays par la recherche et la coopération sur la fusion

Q&R

24 La fusion sera prête quand la société en aura besoin

Dans le monde

26 Projets audacieux et projets prudents

Pourquoi les entreprises et les startups sont indispensables à la fusion

— *Par Simon Woodruff*

Infos AIEA

28 Actualités

32 Publications

Qu'est-ce que la fusion ? Pourquoi est-elle si difficile à réaliser ?

Par Irena Chatzis et Matteo Barbarino

Il y a cinq cents ans, dans l'actuel Mexique, les Aztèques croyaient que le soleil tirait toute sa puissance du sang des sacrifices humains. Nous savons aujourd'hui que le soleil, comme les autres étoiles, produit de l'énergie grâce à une réaction appelée fusion nucléaire. Si cette réaction pouvait être reproduite sur terre, elle permettrait de produire une énergie pratiquement illimitée, propre, sûre et à un coût abordable pour répondre aux besoins en énergie de toute la planète.

Mais comment fonctionne au juste la fusion nucléaire ? En termes simples, la fusion nucléaire est le processus par lequel deux noyaux atomiques légers s'unissent pour en former un seul plus lourd en libérant une énorme quantité d'énergie. Les réactions de fusion se produisent dans un état de la matière appelé plasma, gaz chargé à température très élevée, constitué d'ions positifs et d'électrons libres, et aux propriétés distinctes de celles des solides, des liquides et des gaz.

Pour fusionner dans le soleil, les noyaux doivent se percuter à des températures très élevées, plus de 10 millions de degrés Celsius, ce qui leur permet de surmonter leur répulsion électrique mutuelle et de s'approcher très près les uns des autres. Leur force d'attraction nucléaire dépasse alors la force de répulsion électrique et leur permet de fusionner. Pour que cela se produise, les noyaux doivent être confinés dans un espace réduit, ce qui accroît les probabilités de collision. Dans le soleil, c'est la pression extrême engendrée par l'immense gravité de l'astre qui crée les conditions favorables à la fusion.

La quantité d'énergie dégagée par la fusion est très importante (quatre fois plus que celle des réactions de fission nucléaire) et la réaction de fusion pourrait être la base des réacteurs de puissance de demain. Les réacteurs à fusion de première génération devraient fonctionner avec un mélange de deutérium et de tritium, formes lourdes de l'hydrogène. En

théorie, il suffit de quelques grammes de ces réactifs pour produire un térajoule d'énergie, ce qui couvrirait pendant plus de soixante ans les besoins en énergie d'une personne vivant dans un pays développé.

Regarder vers les étoiles

L'énorme force gravitationnelle du soleil induit naturellement une réaction de fusion mais sans cette force la réaction ne peut se produire qu'à une température plus élevée. Sur terre, pour que le deutérium et le tritium fusionnent, il faut les porter à plus de 100 millions de degrés Celsius sous une pression intense, maintenir le plasma suffisamment confiné et maintenir la réaction de fusion suffisamment longtemps pour obtenir un gain net d'énergie, c'est-à-dire produire davantage d'énergie par la fusion qu'il n'en faut pour chauffer le plasma.

On parvient aujourd'hui régulièrement à créer lors d'expériences des conditions très proches de celles nécessaires pour un réacteur à fusion mais il faut encore améliorer les propriétés de confinement et la stabilité du plasma. Des scientifiques et ingénieurs du monde entier continuent à tester de nouveaux matériaux et à mettre au point de nouvelles technologies pour obtenir de l'énergie de fusion.

Des recherches sur la fusion nucléaire et la physique des plasmas sont menées dans plus de 50 pays et des réactions de fusion ont été obtenues lors de nombreuses expériences mais sans gain net d'énergie. Le temps qu'il faudra pour reproduire ce processus stellaire dépendra des ressources mobilisées par les partenariats et la collaboration à l'échelle mondiale.

Le soleil, comme les autres étoiles, tire son énergie d'une réaction appelée fusion nucléaire. Si cette réaction pouvait être reproduite sur terre, elle permettrait de produire une énergie pratiquement illimitée, propre, sûre et à un coût abordable pour répondre aux besoins en énergie de toute la planète.

(Image : NASA/SDO/AIA)

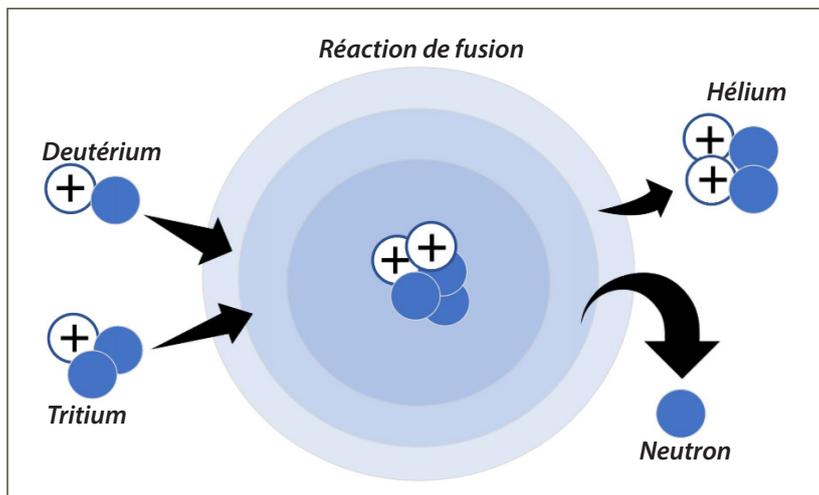


Une tradition de collaboration

Depuis qu'on a compris le principe de la fusion nucléaire dans les années 1930, des scientifiques cherchent à la reproduire et à la maîtriser. Au départ, ces tentatives étaient gardées secrètes. Cependant, il est rapidement devenu clair que cette quête complexe et coûteuse ne pouvait être menée qu'en collaboration. À la seconde Conférence internationale des Nations Unies sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques, tenue à Genève (Suisse) en 1958, des scientifiques ont dévoilé au monde leurs recherches sur la fusion nucléaire.

L'AIEA est au cœur de la recherche internationale sur la fusion. Pour favoriser l'échange d'informations sur les avancées en fusion nucléaire, elle a lancé en 1960 la revue « Nuclear Fusion », aujourd'hui considérée comme le meilleur périodique sur la question. La première Conférence internationale de l'AIEA sur l'énergie de fusion s'est tenue en 1961 et l'AIEA l'organise tous les deux ans depuis 1974 pour favoriser l'examen des faits nouveaux et réalisations dans ce domaine.

Après deux décennies de négociations sur la conception et l'emplacement de la plus grande installation internationale de fusion au monde, l'ITER a été créé en France en 2007 afin de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de la production d'énergie de fusion (voir page 10). Le Directeur général de l'AIEA est dépositaire de l'Accord ITER. Après l'ITER, il est prévu de créer des centrales de démonstration à fusion, ou DEMO, pour montrer que la fusion nucléaire contrôlée peut générer une puissance électrique nette. L'AIEA organise des ateliers sur les DEMO afin de faciliter la collaboration pour ce qui est de définir et coordonner les



Un mélange de deutérium et de tritium – deux isotopes de l'hydrogène – sera utilisé pour alimenter les futures centrales à fusion. 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)

activités régulières des programmes DEMO dans le monde (voir page 12).

Il est prévu que la fusion puisse satisfaire les besoins de l'humanité en énergie pendant des millions d'années. Le combustible de fusion est abondant et aisément accessible : le deutérium peut être extrait de l'eau de mer à peu de frais et le tritium produit à partir du lithium présent en abondance dans la nature. Les réacteurs à fusion du futur ne produiront pas de déchets nucléaires à longue période et haute activité, et la fusion du cœur du réacteur est pratiquement impossible.

On soulignera que la fusion nucléaire ne rejette pas de dioxyde de carbone ni d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère et qu'avec la fission nucléaire, elle pourrait jouer un rôle dans l'atténuation du changement climatique, en tant que source d'énergie bas carbone.



La fusion par confinement magnétique : tokamaks et stellarators

Par Wolfgang Picot

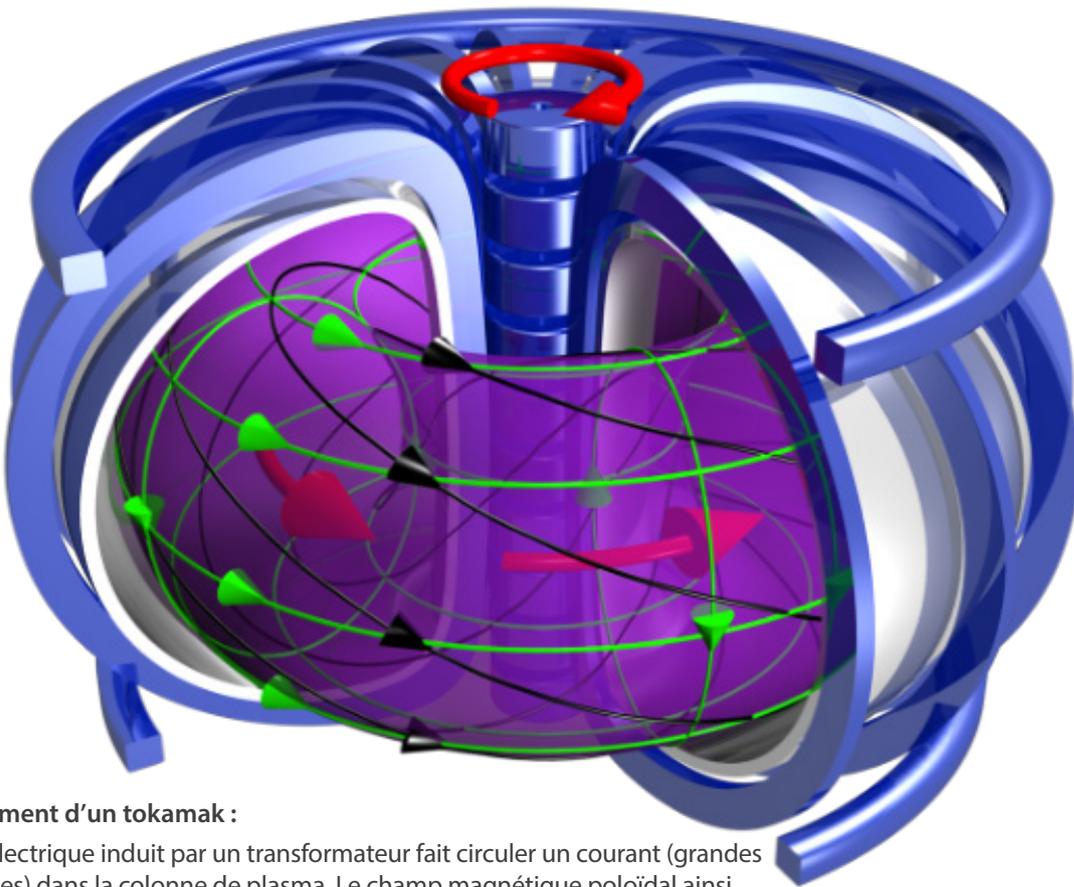
Les premières réactions de fusion en laboratoire ont été obtenues en 1934. C'était une avancée majeure à l'époque. Aujourd'hui, il n'est plus si difficile de provoquer cette réaction : en 2018, un enfant de 12 ans est entré au *Livre Guinness des records* en devenant la personne la plus jeune à réaliser une expérience de fusion à la maison.

Malheureusement, ces réactions ne durent que quelques fractions de secondes et il reste très difficile de les maintenir et de les prolonger. Pour que l'énergie de fusion devienne une source d'énergie commercialement viable, il faut trouver un moyen stable et fiable de la produire.

Énergie de fusion

L'énergie de fusion provient de la « fusion » de noyaux atomiques légers. Lorsque deux de ces noyaux fusionnent, le noyau résultant est légèrement plus léger que leur somme. La différence de masse ne disparaît pas mais se transforme en énergie. Cette infime perte de masse génère une quantité énorme d'énergie qui rend l'énergie de fusion extrêmement intéressante.

Il existe trois états de la matière : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux. Un gaz porté à très haute température devient un plasma. À l'état plasma, les électrons sont arrachés



Fonctionnement d'un tokamak :

Un champ électrique induit par un transformateur fait circuler un courant (grandes flèches rouges) dans la colonne de plasma. Le champ magnétique poloidal ainsi créé provoque un mouvement circulaire du plasma (cercle vertical vert). En courbant la colonne en un cercle à l'intérieur d'une chambre annulaire, on parvient à empêcher les fuites et à créer le vide. L'autre champ magnétique qui entoure l'anneau est appelé champ toroïdal (cercle horizontal vert). L'action conjuguée de ces deux champs crée une courbe tridimensionnelle hélicoïdale (en noir) dans laquelle le plasma est fermement confiné.

aux atomes. Un atome sans électrons en orbite autour du noyau est dit ionisé et appelé ion. Le plasma est donc fait d'ions et d'électrons libres. Les scientifiques peuvent y stimuler les ions de sorte qu'ils entrent en collision, fusionnent et libèrent de l'énergie.

Il est difficile de maintenir un plasma stable pour en extraire de l'énergie. Le plasma est chaotique, extrêmement chaud et sujet à des turbulences et autres instabilités. La compréhension, la modélisation et le contrôle du plasma sont extrêmement complexes mais les chercheurs ont fait d'énormes progrès ces dernières décennies.

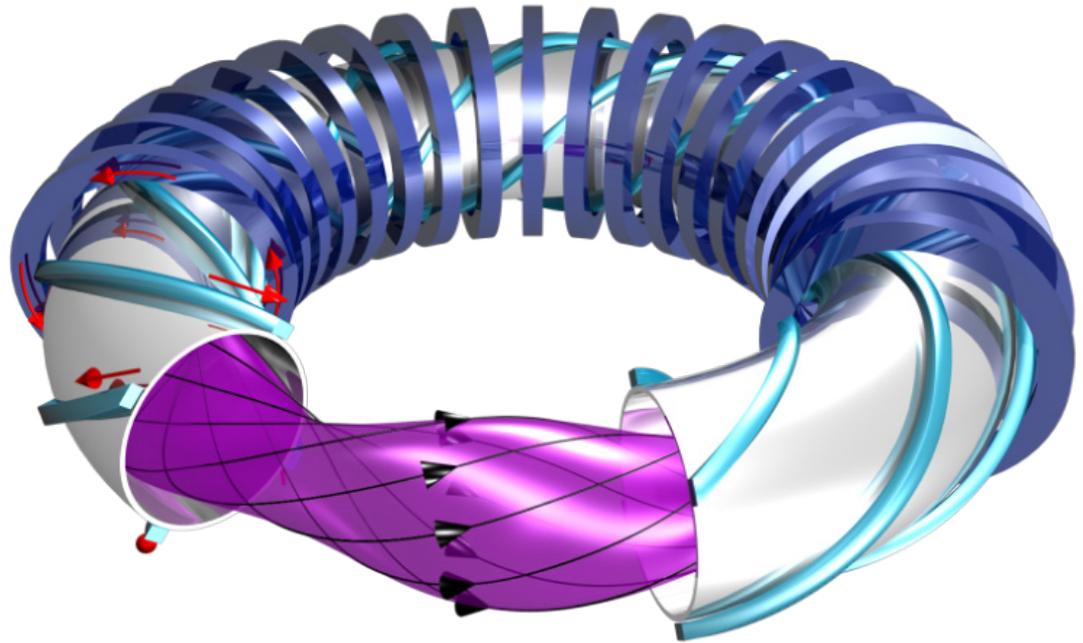
Les scientifiques font appel à des dispositifs de confinement magnétique pour manipuler les plasmas. Les réacteurs à fusion les plus courants de ce type sont les tokamaks et les stellarators. Ce sont actuellement les plus prometteurs pour les centrales à fusion du futur.

Les deux tirent parti du fait que les particules chargées réagissent aux forces magnétiques. Les ions sont confinés dans les réacteurs par de puissants aimants. Les électrons sont aussi confinés par les forces des réacteurs. Les forces magnétiques font tourner les particules dans les chambres annulaires des réacteurs pour les empêcher de sortir du plasma.

Des solutions différentes à des problèmes identiques

Les configurations de stellarators étant difficiles à construire, la plupart des expériences actuelles sur la fusion se font avec des tokamaks (abréviation d'une expression russe signifiant « chambre toroïdale à bobines magnétiques »). Une soixantaine de tokamaks et une dizaine de stellarators sont actuellement en exploitation.

Les deux types de réacteurs ont leurs avantages : les tokamaks sont meilleurs pour ce qui est de maintenir les plasmas à température élevée et les stellarators pour ce qui est de les maintenir stables. Les tokamaks sont plus répandus aujourd'hui mais il n'est pas exclu que les stellarators



En tordant les aimants, on peut aussi obtenir une forme hélicoïdale sans recourir à un transformateur. Ce type de configuration est appelé stellarator.

[Images : Institut Max Planck de physique des plasmas (Allemagne)]

deviennent la solution privilégiée pour les futures centrales à fusion.

Les chercheurs ont fait de grands progrès en fusion à confinement magnétique et peuvent aujourd'hui aisément porter des plasmas à des températures très élevées. Ils ont mis au point de puissants aimants pour manipuler les plasmas et des matériaux innovants pouvant résister aux conditions extrêmes des chambres des réacteurs. Les progrès réalisés dans l'expérimentation, la théorie, la modélisation et la simulation ont permis de mieux comprendre le comportement des plasmas, et les installations expérimentales telles que le tokamak et le stellarator, comme ITER, seront cruciales pour ce qui est de démontrer la viabilité scientifique et technique de la production d'énergie de fusion.

À la recherche d'alternatives au confinement magnétique

Fusion par laser, dispositifs linéaires et combustibles avancés

Par Aleksandra Peeva

La fusion par laser est une méthode d'amorçage de la réaction de fusion qui pourrait être utilisée à la place du confinement magnétique (voir page 6). Elle repose sur la technique du confinement inertiel : de minuscules capsules sphériques contenant des pastilles de combustible composé d'isotopes d'hydrogène, comme le deutérium et le tritium, sont chauffées et comprimées par des lasers de haute puissance.

La chaleur intense à la surface de la capsule provoque une micro-implosion du combustible, qui entraîne à son tour l'ablation et l'explosion de la couche superficielle de la pastille. L'inertie créée par ce processus maintient le combustible confiné suffisamment longtemps pour permettre des réactions de fusion.

Les premières expériences dans le domaine de la fusion par laser remontent aux années 1970. Aujourd'hui, avec 192 faisceaux laser, l'Installation nationale d'ignition (NIF) du Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis d'Amérique) est de loin la plus grande installation laser au monde. Les lasers y chauffent les parois intérieures d'un cylindre doré (hohlraum) contenant la capsule dans laquelle se trouve la pastille de combustible deutérium-tritium. L'interaction laser-hohlraum génère des rayons X qui, en chauffant et en comprimant la capsule, créent un point chaud au centre de la pastille. C'est là que se produisent les réactions de fusion.

Pour atteindre l'ignition, c.-à-d. le point à partir duquel la réaction de fusion s'auto-entretient complètement, les capsules doivent libérer environ 30 fois plus d'énergie qu'elles n'en absorbent.

« Nous avons nettement progressé à la NIF ces cinq dernières années et pouvons maintenant produire deux fois et demie à trois fois plus d'énergie que nous n'en injectons dans le point chaud du combustible », explique Brian Spears, responsable adjoint de la modélisation de la fusion par confinement inertiel à la NIF. « Un facteur d'amplification de 30 reste un objectif majeur mais ce n'est pas un processus linéaire et nous avons déjà franchi de nombreuses étapes importantes sur le plan technique. »

Pour que la fusion soit commercialement viable, la pression au centre du point chaud du combustible doit être plusieurs milliards de fois supérieure à la pression atmosphérique. La NIF a fait d'énormes progrès à cet égard en remplaçant les capsules en plastique par du carbone microcristallin de haute densité, en améliorant les dispositifs techniques qui soutiennent les capsules et en perfectionnant les structures utilisées pour introduire le combustible de fusion dans la capsule. Les experts ont ainsi pu augmenter considérablement le rendement du transfert d'énergie du laser à la capsule, ce qui a accru la production d'énergie.

« Des défis scientifiques majeurs restent à relever mais les récentes avancées à la NIF et dans d'autres installations prouvent que nous sommes de plus en plus près d'atteindre le point d'ignition par fusion laser », déclare Brian Spears.

En 2020, l'AIEA a lancé un projet de recherche coordonné (PRC) intitulé « Filières d'énergie de fusion inertielle : recherche sur les matériaux et développement de la technologie », auquel participent 24 établissements de 17 pays. Quatrième volet d'une série de PRC dans ce domaine, ce projet est consacré au développement de modèles de capsules à rendement élevé qui permettraient d'obtenir une réaction de fusion auto-entretenu.



Fusion par faisceaux en collision

Une autre méthode que le confinement laser et le confinement magnétique consiste à projeter l'un contre l'autre des faisceaux d'ions générés par des accélérateurs de particules pour déclencher une réaction de fusion au point de rencontre. Un inconvénient majeur de cette méthode est la forte probabilité que les particules rebondissent les unes sur les autres sans fusionner et donc sans produire d'énergie.

Aux États-Unis, la société privée TAE Technologies (TAE) utilise un dispositif linéaire : deux plasmas sont tirés à chaque extrémité d'un réacteur cylindrique de 25 mètres de long, de sorte qu'ils entrent en collision au centre et fusionnent pour former un nuage. Des atomes de deutérium sont alors bombardés sur ce nuage pour le faire tourner et maintenir la température et la stabilité du plasma.

Du confinement alternatif aux combustibles avancés

Les techniques de fusion par laser et par dispositif linéaire ont l'avantage d'être plus facilement adaptables à l'utilisation de combustibles autres que le deutérium et le tritium. Ces isotopes de l'hydrogène sont généralement utilisés ensemble pour amorcer la fusion car ils présentent le meilleur taux de réaction à une température plus faible que les autres combustibles.

Cependant, le tritium, radioactif, n'est pas présent naturellement en quantités significatives. Il faut donc le produire en faisant interagir les neutrons issus de la fusion et le lithium entourant la paroi du réacteur. En outre, l'énergie de ces neutrons représente un défi colossal en ce qui concerne les matériaux de la chambre à vide du réacteur car les structures et

les composants des parois du réacteur deviennent radioactifs lorsqu'ils sont percutés par les neutrons. Des éléments supplémentaires doivent donc être pris en considération en matière de radioprotection et d'élimination des déchets (voir page 14).

Pour contourner les problèmes liés à l'utilisation du tritium, les scientifiques expérimentent maintenant des combustibles de fusion alternatifs ou avancés comme le proton-bore 11 (p-B 11). Le bore 11, non radioactif, constitue environ 80 pour cent du bore présent dans la nature et est donc facilement disponible. Cependant, la fusion p-B 11 a pour inconvénient majeur qu'elle nécessite un plasma cent fois plus chaud que le plasma de deutérium-tritium. Heureusement, les dispositifs d'allumage par laser et les dispositifs linéaires permettent de cibler les points chauds et il ne faut donc pas que tout le plasma soit beaucoup plus chaud.

« Le p-B 11 est la source de combustible la plus propre et la plus respectueuse de l'environnement sur Terre : il ne génère pas de sous-produits nocifs et est présent naturellement en quantité suffisante pour plusieurs millénaires. Ensemble, ces facteurs peuvent maximiser la sûreté, l'efficacité, l'efficacité et la viabilité des centrales à fusion », déclare Michl Binderbauer, président-directeur général de TAE. « La principale difficulté avec le p-B 11 est qu'il faut atteindre des températures plus élevées qu'avec les autres combustibles pour entretenir la réaction de fusion. TAE a mis au point un concept de confinement adapté pour relever ce défi. »

Les combustibles avancés pourraient donc constituer un moyen plus efficace et plus efficient de produire de l'énergie de fusion à l'avenir.

Les exploitants de l'Installation nationale d'ignition (NIF) inspectent un montage optique final lors d'une opération de maintenance courante. Située dans le Laboratoire national Lawrence de Livermore, la NIF est le système de laser le plus grand et le plus puissant au monde.

(Photo : Laboratoire national Lawrence de Livermore)

ITER : la plus vaste expérience de fusion au monde

Par Wolfgang Picot

Avec ses 23 000 tonnes et près de 30 mètres de haut, ITER sera vraiment impressionnant. Ce réacteur nucléaire de fusion trônera au milieu d'un site de 180 hectares, aux côtés de bâtiments et de matériel auxiliaires. De par ses dimensions imposantes, ITER, qui signifie « le chemin » en latin, dépassera largement les plus grands réacteurs de fusion expérimentaux actuellement en service : le Tore européen commun (JET) au Royaume-Uni, et le JT-60SA, réacteur conjoint Europe-Japon, au Japon.

Mais de quoi sera capable ITER et, à l'ère de la miniaturisation et de l'optimisation, pourquoi construire un dispositif de recherche aussi gigantesque ?

L'un des objectifs d'ITER est de prouver que les réactions de fusion peuvent produire une quantité d'énergie bien supérieure à celle nécessaire pour déclencher le processus, ce qui se traduit par un gain d'énergie. Dans les réacteurs tels qu'ITER, appelés « tokamaks » (voir page 6), la combinaison de systèmes de chauffage, d'aimants puissants et d'autres dispositifs permet de créer des réactions productrices d'énergie dans des plasmas extrêmement chauds. Les champs magnétiques qui en résultent lient et font tourner les particules chargées dans la cuve du réacteur en forme d'anneau, pour qu'elles puissent fusionner et produire l'énergie de fusion.

Pour ce qui est de la taille, les grands tokamaks isolent mieux et confinent plus longtemps les particules de fusion,

permettant de produire plus d'énergie qu'avec des réacteurs plus petits.

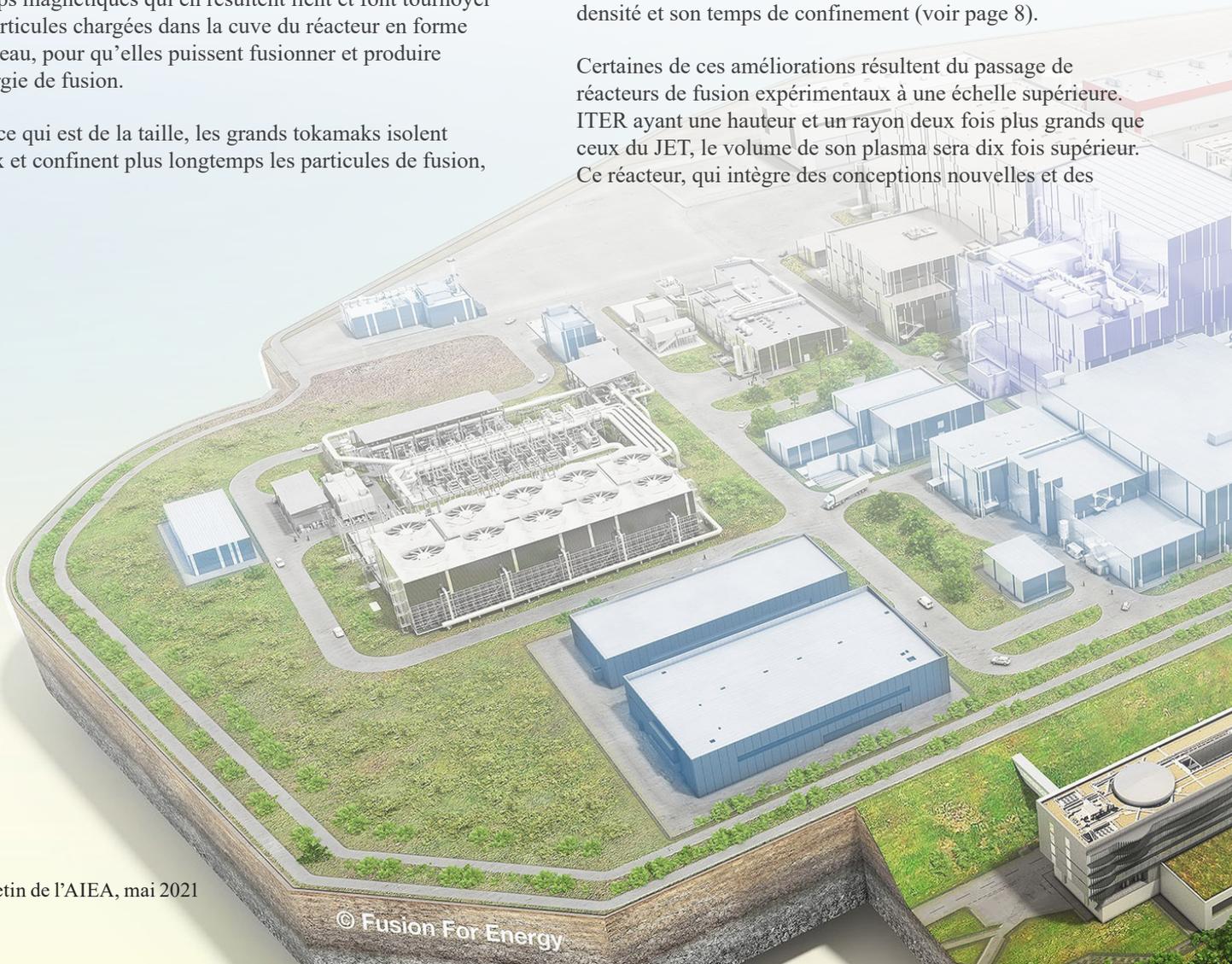
Un indicateur important de la performance d'un réacteur est le gain d'énergie de fusion, ou le rapport entre la puissance de fusion produite et la puissance introduite dans le plasma pour déclencher la réaction. Il est exprimé par le symbole « Q ».

À ce jour, le meilleur gain ($Q = 0,67$) a été obtenu avec le JET, qui a produit 16 mégawatts (MW) de puissance de fusion à partir d'une puissance de chauffage de 24 MW. Cependant, il faudra des valeurs de Q bien supérieures pour produire de l'électricité.

Conditions requises pour la puissance

Au cours des 50 dernières années d'expériences de la fusion, la performance des dispositifs de fusion a augmenté d'un facteur 100 000, mais elle doit encore augmenter d'un facteur 5 pour atteindre le niveau de performance requis pour une centrale nucléaire. Les chercheurs s'emploient donc à optimiser l'état du plasma en modifiant sa température, sa densité et son temps de confinement (voir page 8).

Certaines de ces améliorations résultent du passage de réacteurs de fusion expérimentaux à une échelle supérieure. ITER ayant une hauteur et un rayon deux fois plus grands que ceux du JET, le volume de son plasma sera dix fois supérieur. Ce réacteur, qui intègre des conceptions nouvelles et des



matières innovantes, comportera aussi certains des dispositifs de chauffage du plasma les plus puissants jamais utilisés. L'objectif est de produire, avec une puissance de chauffage injectée dans le plasma de 50 MW seulement, une puissance de fusion de 500 MW (soit une valeur de Q d'au moins 10) par impulsions de quelque 5 à 10 minutes chacune.

La performance maximale d'ITER sera impressionnante, mais ne sera atteinte que sur une très courte durée. Pour constituer une source d'électricité constante, les futures centrales de fusion devront être exploitées en continu. Une valeur de Q égale à cinq représente le seuil critique au-dessus duquel le plasma commence à chauffer pour entretenir à lui seul la réaction de fusion. Afin de mieux comprendre comment parvenir à cette réaction auto-entretenu, on vise, à terme, à générer et à maintenir avec ITER des valeurs de Q égales à cinq sur des durées bien supérieures à dix minutes.

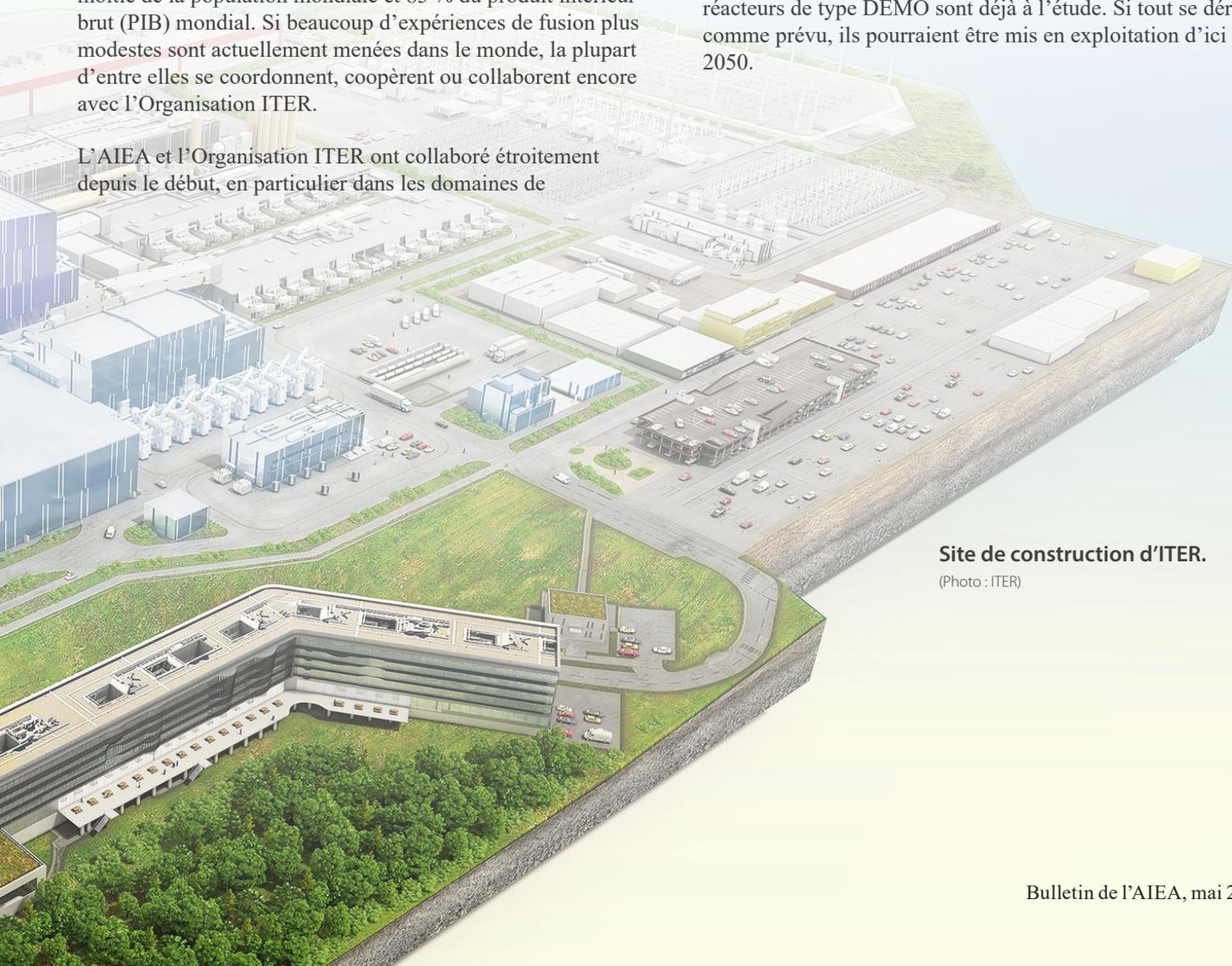
Une collaboration mondiale

Les 35 nations participant à ITER représentent plus de la moitié de la population mondiale et 85 % du produit intérieur brut (PIB) mondial. Si beaucoup d'expériences de fusion plus modestes sont actuellement menées dans le monde, la plupart d'entre elles se coordonnent, coopèrent ou collaborent encore avec l'Organisation ITER.

L'AIEA et l'Organisation ITER ont collaboré étroitement depuis le début, en particulier dans les domaines de

la recherche sur la fusion nucléaire, de la gestion des connaissances, de la mise en valeur des ressources humaines, des activités d'enseignement et de l'information active. L'AIEA aide également l'Organisation ITER à faire part de son expérience en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection avec les États Membres de l'AIEA, y compris ceux qui ne participent pas au projet. Cette année, l'Organisation ITER accueillera, avec le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), la 28^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion.

On espère qu'ITER montrera qu'il est scientifiquement et technologiquement possible de produire de l'énergie de fusion et que les premières expériences débiteront en 2025, conformément au plan de recherche suivant l'approche par étapes. Les expériences à plein régime devraient commencer en 2035. S'ils sont concluants, ces développements constitueront une étape importante et assureront la transition historique entre la recherche expérimentale et les premières centrales de démonstration à fusion, ou DEMO (voir page 12). Les DEMO devraient permettre d'obtenir un gain net d'énergie électrique. Plusieurs concepts préliminaires de réacteurs de type DEMO sont déjà à l'étude. Si tout se déroule comme prévu, ils pourraient être mis en exploitation d'ici 2050.



Site de construction d'ITER.

(Photo : ITER)

Centrales de démonstration à fusion

Un tremplin vers la production d'électricité commerciale à grande échelle

Par Irena Chatzis et Matteo Barbarino

L'ITER, l'expérience de fusion la plus importante au monde, vise à montrer comment créer de l'énergie nette à partir d'une réaction de fusion. L'étape suivante, considérable, sera de montrer que la production nette d'électricité est possible à partir de l'énergie de fusion. C'est là qu'interviennent les centrales de démonstration à fusion, ou DEMO.

Les réacteurs de type DEMO tiennent plus du modèle de conception que de la configuration d'un dispositif de fusion particulier. Les modèles préliminaires des DEMO à financement public, en cours d'élaboration dans plusieurs pays, doivent encore être parachés compte tenu des résultats des expérimentations de l'ITER.

Les DEMO seront conçues pour fonctionner presque en continu et atteindre une production nette d'électricité de plus de 50 mégawatts (MW). La principale difficulté à résoudre sera de maintenir le plasma de fusion stable assez longtemps pour produire de l'énergie en continu.

Il reste de nombreux points à décider mais une DEMO à financement public devrait être un réacteur de type tokamak et utiliser comme combustibles le deutérium et le tritium, isotopes lourds de l'hydrogène. Or, la quantité de tritium disponible dans le monde est limitée ; les DEMO devront donc produire elles-mêmes suffisamment de tritium à l'aide de « couvertures » qui le généreront et l'extraient. Des difficultés concernant l'alimentation, la consommation, le confinement, l'extraction et la séparation du tritium devront aussi être résolues, explique Sehila Gonzalez de Vicente, physicienne spécialiste de la fusion nucléaire à l'AIEA.

Une autre différence majeure entre les réacteurs de type DEMO et les autres réacteurs expérimentaux sera l'ajout de dispositifs et de techniques permettant de recueillir l'énergie de fusion et de la convertir en électricité.

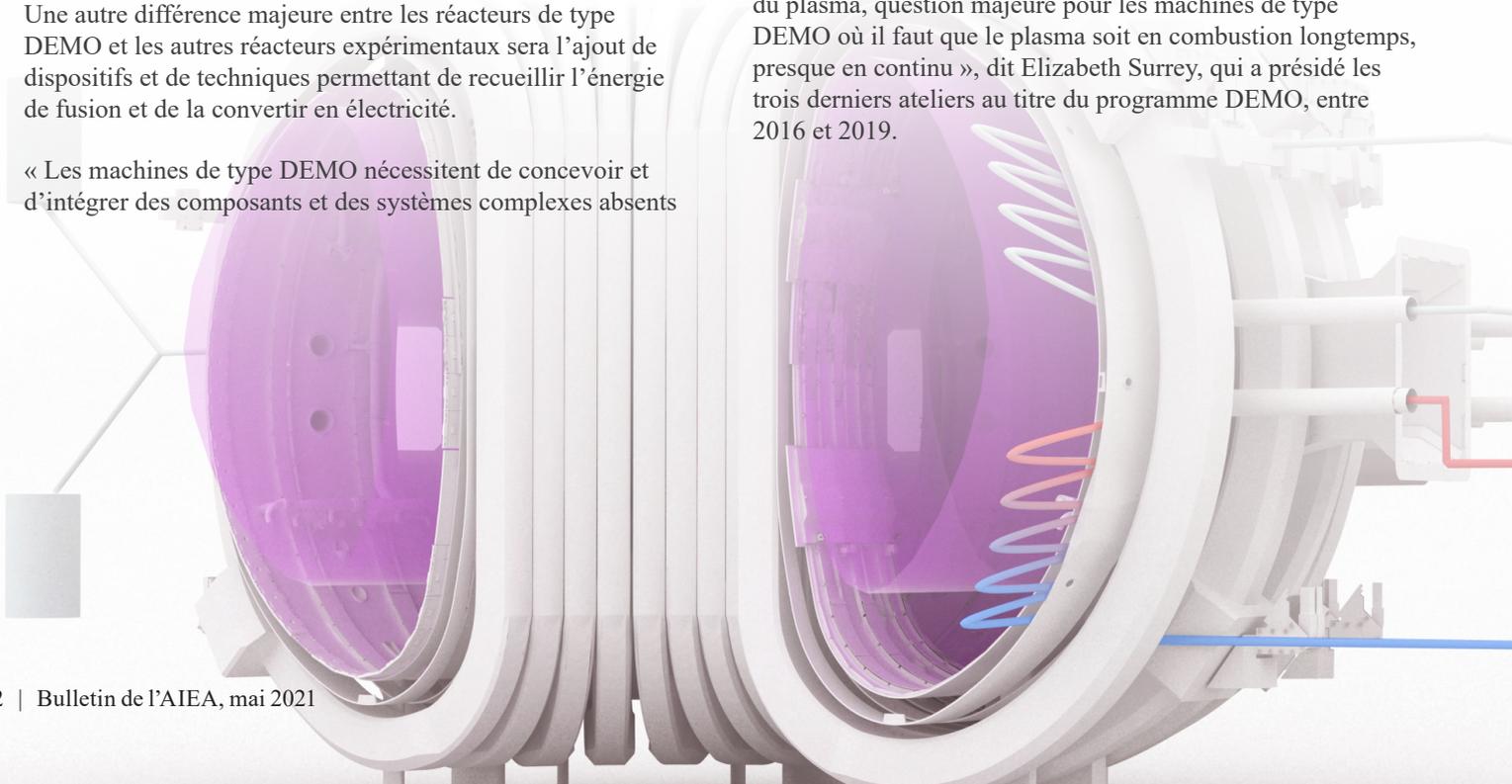
« Les machines de type DEMO nécessitent de concevoir et d'intégrer des composants et des systèmes complexes absents

des machines de fusion expérimentales existantes, notamment des couvertures pour la production de tritium et des dispositifs de production d'électricité et de contrôle de brûlage », dit Elizabeth Surrey, responsable de la technologie à l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni. « Les conditions de fonctionnement d'une DEMO mettent les matériaux à rude épreuve : le plasma en combustion soumet les parois à un flux élevé de neutrons et de fortes puissances volumiques. Les DEMO nécessitent la mise au point de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. »

Rôle de l'AIEA

Dans plusieurs pays, des groupes de chercheurs se penchent sur diverses façons de concevoir une DEMO. L'AIEA facilite la coordination internationale et l'échange de meilleures pratiques en organisant une série de réunions techniques et, depuis 2012, ses ateliers réguliers au titre du programme DEMO. Ces plateformes permettent d'examiner des questions de physique et de technologie, de mettre en commun les stratégies des programmes DEMO et d'analyser les façons possibles de procéder. Au fil du temps, les visées générales ont fait place à l'examen des difficultés techniques précises à surmonter.

« En s'attachant à déceler les problèmes et à examiner la recherche-développement en cours, les séries de réunions techniques de l'AIEA et les ateliers au titre du programme DEMO permettent à l'ensemble des parties intéressées de définir les prescriptions et de rechercher des solutions possibles de manière collaborative. Un exemple est le contrôle du plasma, question majeure pour les machines de type DEMO où il faut que le plasma soit en combustion longtemps, presque en continu », dit Elizabeth Surrey, qui a présidé les trois derniers ateliers au titre du programme DEMO, entre 2016 et 2019.



Projets dans le monde

Plusieurs moyens de produire de l'électricité de fusion sont à l'étude mais on sait quelles sont les questions de science et de technologie à résoudre. Chaque pays a son propre calendrier mais les scientifiques s'accordent à dire qu'un réacteur de type DEMO capable de produire de l'électricité pourrait être construit d'ici à 2050.

En Chine, des progrès considérables ont été faits dans la planification du réacteur de fusion expérimental (China Fusion Engineering Test Reactor, ou CFETR). Ce réacteur aidera à passer le cap de l'ITER aux DEMO. La construction du CFETR commencera dans les années 2020 et celle d'une DEMO dans les années 2030.

En Europe, c'est EUROfusion qui se charge de la conception d'une DEMO. Le projet, actuellement en phase d'étude de conception (2021-2027), vise à démontrer la viabilité technologique et économique de la fusion en produisant plusieurs centaines de MW d'électricité nette.

L'Inde a annoncé qu'elle prévoyait de commencer à construire un dispositif appelé SST-2 pour qualifier les composants d'une DEMO vers 2027 puis en commencer la construction en 2037.

L'équipe spéciale japonaise de conception d'une DEMO effectue actuellement l'étude de conception d'une DEMO à régime permanent (JA DEMO) dont la construction devrait commencer vers 2035.

En 2012, la République de Corée a entamé l'étude de conception d'une K-DEMO, qu'elle compte construire d'ici 2037 et qui pourrait commencer à produire de l'électricité à partir de 2050. La première phase (2037-2050) servira à mettre au point et tester des composants qui seront ensuite utilisés. On espère que la seconde phase, après 2050, aboutira à la production nette d'électricité.

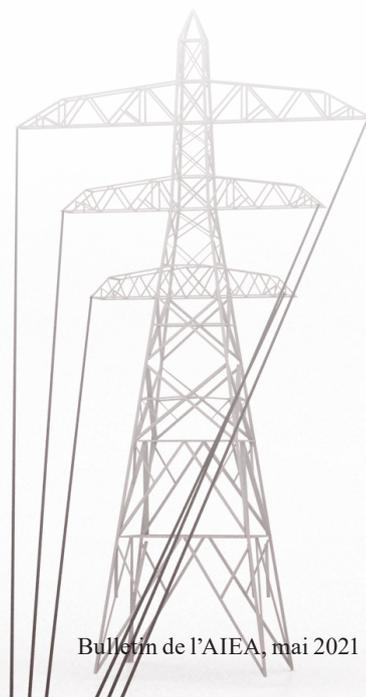
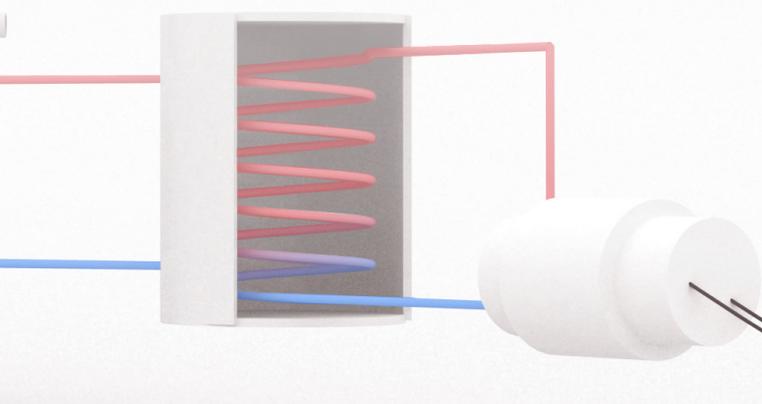
La Russie prépare une installation hybride fusion-fission dotée d'une source de neutrons de fusion, la DEMO Fusion Neutron Source (DEMO-FNS), qui récupérera les neutrons générés par la fusion pour transformer l'uranium en combustible nucléaire et détruire les déchets radioactifs. Cette installation, qui devrait être construite d'ici à 2023, s'inscrit dans la stratégie accélérée que le pays a adoptée pour construire une centrale à fusion d'ici 2050.

Aux États-Unis d'Amérique, des spécialistes de la fusion ont récemment publié deux rapports recommandant de démarrer un programme national de recherche et de technologie assorti de partenariats public-privé pour aboutir à la viabilité commerciale de la fusion en 2035-2040, afin de positionner le pays à la pointe de la fusion et d'accélérer le passage à l'énergie bas carbone, d'ici à 2050.

En parallèle, de nombreuses entreprises commerciales à fonds privés s'emploient à concevoir des centrales à fusion, faisant fond sur le savoir-faire accumulé au fil d'années de recherche-développement à financement public, et proposent un plan de marche encore plus accéléré.

Illustration d'une centrale à fusion transformant la chaleur de fusion en chaleur et en électricité.

(Source : EUROfusion)



La sûreté de la fusion

Un processus intrinsèquement sûr

Par Carley Willis et Joanne Liou

La fission nucléaire produit de l'énergie en scindant des noyaux atomiques et la fusion nucléaire en les unissant. Les deux réactions atomiques produisent de l'énergie en modifiant les atomes mais les différences fondamentales entre elles ont des incidences importantes du point de vue de la sûreté.

Les conditions nécessaires pour provoquer et maintenir une réaction de fusion rendent impossible un accident comme ceux que peut provoquer la fission ou une réaction en chaîne aboutissant à la fusion du cœur. Les centrales à fusion nucléaire nécessitent des conditions surnaturelles : il faut plus de 100 millions de degrés Celsius pour que la densité de particules soit suffisamment élevée et que la réaction ait lieu. Comme les réactions de fusion ne peuvent se produire que dans ces conditions extrêmes, une réaction en chaîne incontrôlée est impossible, explique Sehila González de Vicente, physicienne spécialiste de la fusion nucléaire à l'AIEA.

Les réactions de fusion nécessitent un apport continu en combustible et le processus est extrêmement sensible à toute variation des conditions de fonctionnement. Comme une réaction de fusion peut s'arrêter en quelques secondes, le processus est intrinsèquement sûr. « La fusion est un processus qui s'auto-limite : si vous ne pouvez pas contrôler la réaction, elle s'arrête d'elle-même », ajoute M^{me} González de Vicente.

En outre, la fusion ne produit pas de déchets nucléaires hautement radioactifs à longue période. « La fusion ne produit que des déchets de faible activité et ne présente aucun danger grave », explique M^{me} González de Vicente. Les objets contaminés tels que les tenues de protection, les articles de nettoyage et même les tubes ou les écouvillons médicaux sont des déchets de faible activité à courte période, qui peuvent être manipulés en toute sûreté avec des précautions de base.

La plupart des dispositifs de fusion expérimentaux actuels utilisent comme combustible un mélange de deutérium et de tritium. Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène d'une période de 12,3 ans. Lors d'une réaction de fusion, les neutrons libérés percutent la paroi qui entoure le cœur du réacteur. En les absorbant, celle-ci devient radioactive, explique M^{me} González de Vicente. « Les neutrons réagissent avec le lithium contenu dans les parois, produisant du tritium qui peut alors être réinjecté dans le dispositif. »

Les installations de fusion et de fission ont cependant des points communs, notamment en ce qui concerne la manipulation des matières radioactives et l'utilisation des systèmes de refroidissement. « Les organismes de réglementation ont une longue expérience de la sûreté et de la sécurité de la fission. Nous collaborons avec eux afin que toutes les connaissances applicables soient transposées à la fusion », explique M^{me} González de Vicente. « Cependant, tout n'est pas directement transposable et il faut prendre en compte les différences que présente la fusion, notamment la moindre quantité et variété de matières radioactives, l'impossibilité d'une fusion du cœur et l'absence de déchets à longue période. L'AIEA participe à cet effort. »

Collaboration internationale

ITER, la plus grande expérience de fusion au monde, rassemble des experts de 35 pays qui s'emploient à faire de l'énergie de fusion une source d'énergie réelle, tout en contribuant à résoudre les problèmes de sûreté et de sécurité de la fusion à mesure que le projet évolue.

Un niveau de sûreté élevé peut être obtenu en appliquant à la fusion les prescriptions de sûreté concernant la fission, notamment les normes de sûreté de l'AIEA. Par exemple, comme avec les réacteurs à fission nucléaire, il faut prévoir pour les projets de centrales à fusion une réglementation sur les doses et il convient de concevoir les installations de sorte que la dose minimale soit « aussi basse que raisonnablement possible » (principe ALARA). Cependant, le risque d'accident étant fondamentalement différent, il faut appliquer une approche graduée pour éviter de surréglementer le processus de fusion. « Le problème avec toutes les normes de sûreté existantes, c'est qu'elles concernent la fission », explique Stéphane Calpena, Chef adjoint du Département sûreté, qualité et sécurité de l'Organisation ITER. « Nous devons déterminer quelles normes sont pertinentes dans le contexte de la fusion et les appliquer proportionnellement au risque afin que la technologie soit non seulement utilisable mais aussi véritablement sûre. La fusion est un nouveau moyen de créer de l'énergie et c'est encore une technologie très jeune. »

L'AIEA contribue au développement de cette technologie en organisant des réunions techniques permettant aux experts de partager des connaissances qui peuvent contribuer à résoudre les problèmes posés par la fusion et garantir la sûreté des

installations. La première réunion technique conjointe AIEA-ITER sur les questions de sûreté et de radioprotection liées à la fusion, présidée par M. Calpena en novembre 2020, a porté sur l'élaboration d'une méthode servant à déterminer les types et les quantités de matières radioactives ou dangereuses qui pourraient être rejetées dans l'environnement par les installations de fusion, et de publications sur la fusion équivalentes au n° SSR-4 et au n° SSG-12 de la collection

Normes de sûreté de l'AIEA. Il a notamment été question des critères de risque concernant les installations de fusion, de leur conception et de leur exploitation. L'atelier sur la gestion des déchets résultant de la fusion, prévu en octobre 2021, portera sur la classification et le stockage définitif des déchets radioactifs issus de la production d'énergie de fusion.

Installation de l'un des secteurs de la chambre à vide d'ITER, élément de 440 tonnes qui servira à confiner le plasma dans l'installation.

(Photo : ITER)

Comment les bases de données de l'AIEA contribuent au progrès de la recherche sur l'utilisation commerciale de la fusion

Par Aleksandra Peeva

Pour pouvoir exploiter le potentiel de la fusion nucléaire et produire une énergie abondante dans un cadre commercial, il faut mieux comprendre les plasmas — des gaz ionisés amenés à des chaleurs extrêmes — et mettre au point des matériaux à hautes performances pour les réacteurs. En aidant les scientifiques à étudier le comportement des plasmas et à modéliser les propriétés des matériaux utilisés dans les travaux de recherche sur l'énergie de fusion, les bases de données de l'AIEA contribuent au progrès de la recherche visant à produire de l'énergie à une échelle commerciale.

Pour développer l'énergie de fusion, il est essentiel de créer et de maintenir les conditions extrêmes nécessaires pour atteindre le « seuil d'ignition », point à partir duquel la réaction de fusion peut se maintenir grâce à l'énergie qu'elle produit elle-même. Pour que cela soit possible, les combustibles sous forme de plasmas nécessaires à la réaction doivent être confinés pendant suffisamment longtemps pour que le processus de fusion puisse se développer et la température augmenter jusqu'à ce que la réaction s'auto-entretienne.

Pour atteindre le seuil d'ignition, les ingénieurs doivent également mettre au point des matériaux à hautes performances pour les parois des réacteurs, afin que celles-ci puissent résister au flux d'énergie constant se traduisant par une émission de neutrons et d'une forte chaleur. Cette énergie chauffe les parois et le bombardement de neutrons peut endommager les matériaux, compromettant ainsi l'intégrité des parois ou engendrant des rejets de ces matériaux dans le plasma, ce qui le refroidit.

Les matériaux dont est constitué le réacteur doivent également absorber aussi peu de tritium (l'un des isotopes de l'hydrogène du combustible de fusion) que possible, le combustible au tritium absorbé étant du combustible perdu pour la réaction. Qui plus est, le tritium est radioactif. Pour limiter autant que possible la quantité et la radiotoxicité des déchets nucléaires qui seront produits à terme, il serait donc préférable d'éviter que les parois du réacteur absorbent du tritium et deviennent radioactives.

Étudier le comportement du plasma

Il est nécessaire de bien comprendre comment le plasma se comporte dans un réacteur pour accroître la durée pendant laquelle il peut être confiné par des forces magnétiques. Les bases de données de l'AIEA contiennent des informations sur les processus à l'œuvre dans le cœur du plasma et dans le plasma de bord, de même que dans les systèmes d'injection de neutres utilisés pour chauffer le plasma jusqu'à ignition. On y trouve également des données sur les propriétés des diverses impuretés qui sont délibérément injectées dans le plasma à des fins de diagnostic et pour limiter les instabilités.

La base de données de l'interface ALADDIN de l'AIEA est un répertoire consultable de données collisionnelles évaluées sur les processus qui entrent en jeu dans la fusion. Elle est utilisée par la communauté scientifique pour établir des diagnostics sur le plasma et acquérir des connaissances sur des paramètres importants de cet état de la matière, notamment concernant sa température et sa densité. ALADDIN aide les scientifiques à mieux comprendre les propriétés collisionnelles–radiatives des ions, lesquelles sont d'une importance cruciale pour assurer des diagnostics fiables du plasma.

Modéliser les matériaux utilisés pour la fusion

Comme il n'existe que peu d'installations capables de reproduire les conditions extrêmes d'un réacteur à fusion, il est compliqué de créer de nouveaux matériaux pour les centrales à fusion de demain. Grâce à des techniques de modélisation computationnelle, des plateformes de calcul à hautes performances et des outils de caractérisation expérimentale analytique, les experts parviennent à concevoir des matériaux bien adaptés à un environnement d'énergie de fusion.

La modélisation permet de découvrir de nouveaux matériaux et de prévoir la fiabilité de matériaux existants, ce qui est particulièrement important pour la paroi la plus interne du réacteur, celle qui est la plus proche du plasma dans la cuve du réacteur et protège les composants de cette cuve des dommages engendrés par le plasma.

« Du fait des conditions extrêmes auxquelles est soumise la première paroi d'un réacteur à fusion nucléaire, il convient de choisir avec soin les matériaux utilisés : ceux-ci doivent pouvoir résister à des températures élevées et à un bombardement de particules sans s'éroder, se fragiliser ou devenir radioactifs, et ne doivent pas retenir le combustible à l'hydrogène », explique Christian Hill, Chef de l'Unité des données atomiques et moléculaires de l'AIEA. « Il est indispensable de disposer de données fiables, issues d'expérimentations et de calculs précis, pour pouvoir prévoir les propriétés qui nous intéressent dans les matériaux envisagés. »

Les chercheurs mettent à profit les bases de données de l'AIEA dans le cadre de la recherche sur l'énergie de fusion et pour d'autres applications scientifiques et technologiques relatives aux plasmas. Les données sont collectées et évaluées par l'AIEA par l'intermédiaire de ses réseaux, de ses projets de recherche coordonnée et de ses réunions techniques, puis diffusées grâce à ses bases de données en ligne gratuites, organisées et dotées d'un outil de recherche.

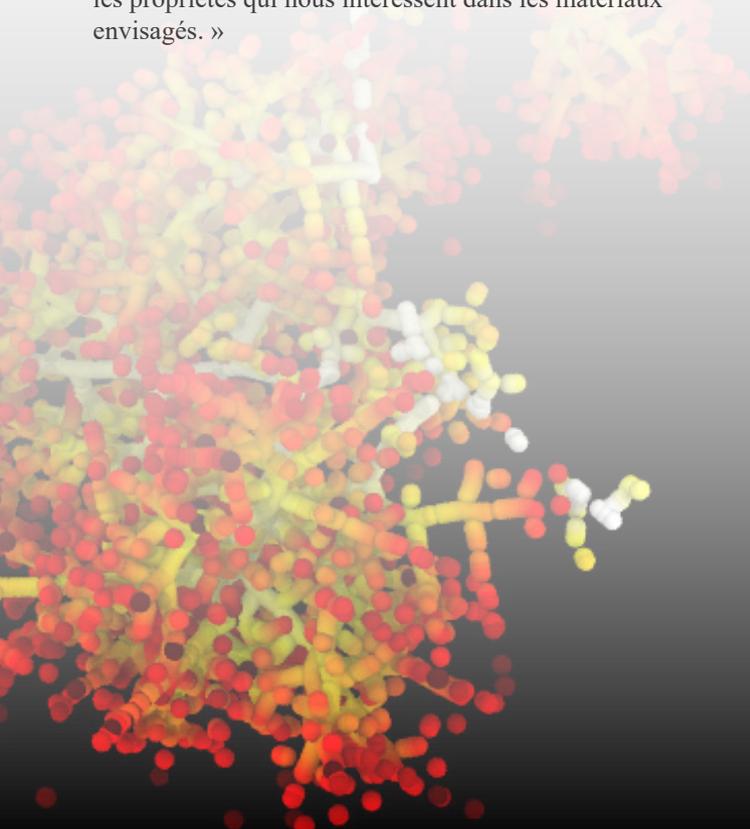
« L'intérêt de cette base de données internationale organisée est qu'elle joue le rôle de référentiel permanent, reconnu et accessible, centralisant des données évaluées qui peuvent être librement consultées par les spécialistes de la fusion. L'Unité des données atomiques et moléculaires de l'AIEA se distingue aussi par son ancienneté : elle existe depuis plus de 40 ans, ce qui est un âge plus que respectable dans la courte histoire de la fusion », ajoute M. Hill.

Les bases de données de l'AIEA sont constamment améliorées et enrichies en fonction des besoins spécifiques en matière de données qu'ont les chercheurs, notamment en ce qui concerne la quantification et les incidences des incertitudes dans les données, ainsi que les techniques de validation, d'organisation et de diffusion des données.

Toutes les bases de données sur la fusion administrées par l'AIEA peuvent être consultées sur : amdis.iaea.org/databases

Représentation visuelle de la cascade de collisions occasionnant des dommages à un matériau cristallin.

(Reproduction avec l'aimable autorisation d'Andrea Sand / Université Aalto)



Le plasma en combustion

Un facteur essentiel de la fusion

Par Matteo Barbarino

Au cœur du soleil, les températures extrêmes et l'énorme pression résultant des forces gravitationnelles sont des conditions idéales pour la fusion nucléaire.

Cependant, recréer ces conditions sur la Terre, en l'absence des forces gravitationnelles extrêmes d'une étoile et au moyen d'un réacteur de fusion, pose de nombreuses difficultés techniques. La plus grande consiste à maintenir le plasma de fusion (gaz chargé composé d'ions et d'électrons libres dans lequel se produit la réaction) à plus de 100 millions de degrés Celsius, ce qui permet de confiner ses particules dans un champ magnétique et de les maintenir ensemble suffisamment longtemps pour que les réactions aient lieu et l'énergie soit produite.

Les scientifiques et ingénieurs spécialistes de la fusion doivent notamment comprendre et valider les hypothèses actuelles relatives au comportement de ce plasma de fusion chaud pour que de l'électricité puisse être produite à partir de la fusion.

Un super combustible pour atteindre une température plus élevée que celle du soleil

Pour la fusion, les options en ce qui concerne le combustible sont limitées. Le combustible qui donne les meilleurs résultats sur la Terre est composé d'un mélange d'ions deutérium et tritium, deux formes lourdes de l'hydrogène. Lorsqu'ils entrent en collision à des températures extrêmes, le deutérium et le tritium fusionnent pour former des particules chargées comportant deux protons et deux neutrons, appelées « particules alpha », et des neutrons libres. Tandis que les neutrons sortent du champ magnétique et n'interagissent pas avec le plasma, les particules alpha sont confinées par le champ magnétique et contribuent à chauffer le plasma qui les entoure. « Il est essentiel de contrôler cette chaleur pour exploiter l'énergie de fusion », indique Matthew Hole, professeur à l'Université nationale d'Australie.

Les particules alpha chargées et leur énergie sont cruciales à l'obtention d'une puissance de fusion sûre et durable pour maintenir le plasma à une température constante, ce qui permet aux réactions de s'auto-entretenir. Il est essentiel d'y parvenir pour exploiter un réacteur de fusion.

Dans les années 1990, des réacteurs de fusion expérimentaux ont produit jusqu'à 16 mégawatts (MW) de puissance pendant un peu moins d'une seconde. Lors de ces expériences, les particules alpha n'ont fourni que près de dix pour cent de la chaleur apportée de l'extérieur. On s'emploiera à comprendre ce qui se passe lorsque les particules alpha fournissent plus de chaleur dans le cadre d'initiatives comme ITER — expérience internationale menée à l'échelle d'un réacteur actuellement en construction en France (voir page 10).

« ITER va nous permettre d'étudier les "plasmas en combustion" dont au moins 66 % de la chaleur totale proviendra de particules alpha en fusion. Dans ces conditions, ITER produira 500 MW de puissance de fusion pendant 500 secondes au maximum », explique Alberto Loarte, chef de la Division de la science à l'Organisation ITER. D'après lui, les expériences menées par son organisation apporteront des réponses très attendues à des questions clés relatives à la physique du plasma en combustion, notamment concernant la manière de créer un plasma auto-entretenu par la chaleur interne émise par les particules alpha, et de trouver des conditions d'exploitation optimales pour une performance de fusion élevée qui soient compatibles avec la capacité de la paroi du réacteur à résister à la puissance.

Comment faire pour que le plasma soit auto-entretenu

Un indicateur important de la performance d'un réacteur de fusion est son « gain de puissance de fusion », déterminé par la température, la densité et le temps de confinement énergétique

du plasma, qui est la mesure de l'efficacité avec laquelle le champ magnétique maintient l'énergie du plasma sur la durée. Trois conditions sont requises pour créer une réaction auto-entretenu : une température d'environ 100 millions de degrés Celsius, une densité un million de fois inférieure à celle de l'air, et un temps de confinement énergétique de seulement quelques secondes.

Si les conditions requises sont bien connues, on est loin de savoir comment les réunir toutes en même temps. Par exemple, il est en principe avantageux d'augmenter la densité du plasma, car cela augmente la probabilité que les réactions de fusion se produisent. « Cependant, de nombreuses expériences montrent que le confinement du plasma se dégrade plus que prévu à mesure que la densité approche sa valeur maximale », affirme Richard Hawryluk, Directeur adjoint à la fusion au Laboratoire de physique des plasmas de Princeton, aux États-Unis d'Amérique.

Pour que l'expérience d'ITER soit un succès, des solutions à ces problèmes doivent être trouvées, et une grande partie de la recherche nécessaire à cet effet requiert une coopération internationale. Dans le cadre d'une série de réunions techniques sur la physique des particules énergétiques, le contrôle du plasma, et l'acquisition, la validation et l'analyse de données sur la fusion, l'AIEA crée une plateforme pour l'échange de résultats scientifiques et techniques et aide à développer des outils de modélisation pouvant être utilisés pour prédire le comportement d'un plasma de fusion dans ITER et les futurs réacteurs de puissance de fusion.

Trouver les conditions optimales

L'un des plus grands défis consiste à trouver des conditions d'exploitation optimales pour une puissance de fusion maximale et un contrôle du plasma permettant une performance élevée sans dépassement des limites d'exploitation pendant de longues périodes. Le dépassement de ces limites pose problème car il peut conduire à des

instabilités pouvant entraîner un phénomène appelé « perturbation du plasma ».

« Dans un réacteur de type tokamak en forme de tore, comme ITER, une perturbation pourrait conduire rapidement à une perte du plasma, en quelques millisecondes, et soumettre les composants du réacteur à une contrainte thermique et mécanique importante », explique Michael Lehnen, coordonnateur scientifique pour la Section de la stabilité et du contrôle de l'Organisation ITER. « L'AIEA contribue à éviter la réalisation de ce scénario en favorisant l'échange d'informations sur les travaux expérimentaux, théoriques et de modélisation dans ce domaine, et mettra l'accent, au cours des prochaines années, sur la mise en place d'une base solide pour la conception du système d'atténuation des perturbations d'ITER. »

Des expériences récentes et des activités de modélisation visant à intégrer des méthodes reposant sur l'intelligence artificielle mettent en lumière les conditions requises pour un contrôle efficace du plasma, ce qui aide à avancer vers une conception et une exploitation sûres des futures centrales de puissance de fusion. « Des statistiques avancées solides et des approches fondées sur l'apprentissage automatique appliquées à la recherche sur les perturbations peuvent aider à repérer des schémas importants et à révéler des informations cachées que l'on pourrait tirer de données expérimentales recueillies au fil de nombreuses années », indique Cristina Rea, chercheuse au Centre de la science du plasma et de la fusion de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT).

Il se crée, entre physiciens spécialistes du contrôle, modélisateurs, développeurs de scénarios et ingénieurs de données, une synergie fructueuse qui engendre de nouvelles solutions destinées à éviter ces limites de perturbation. « Il convient de poursuivre les travaux pour évaluer l'applicabilité de ces méthodes fondées sur des données pour des projets comme ITER, mais les résultats obtenus jusqu'à présent sont encourageants », déclare Cristina Rea.

Particules de haute énergie, sous la forme de plasma, traversant un réacteur de type tokamak.

(Photo : Shutterstock)

Lever les inconnues sur la technologie et les matériaux de fusion

Par Matteo Barbarino

Le plus grand défi technique et scientifique de l'humanité est probablement la fusion nucléaire. La construction d'un réacteur à fusion, l'obtention d'une réaction auto-entretenue et l'exploitation de cette source d'électricité quasi infinie transformeront à tout jamais notre existence et notre rapport à l'énergie. Cette perspective est certes séduisante ; néanmoins, les progrès dans ce domaine ne sont ni simples ni constants, et des difficultés techniques touchant aux structures, aux combustibles et aux matériaux doivent encore être surmontées pour faire fonctionner des machines aussi complexes.

Pour comprendre les limites techniques et les inconnues qui empêchent actuellement la production d'énergie par la fusion, il faut d'abord regarder à l'intérieur du réacteur.

Dans un tokamak (voir page 6), un gaz ionisé hyper chaud (plasma) est chauffé à plus de 100 millions de degrés Celsius (°C) pour induire des réactions de fusion. De puissants champs magnétiques confinent le plasma, protégeant ainsi les parois du réacteur du plasma instable.

Le plasma utilisé pour la fusion nucléaire est généralement constitué de deux isotopes lourds de l'hydrogène – le deutérium et le tritium – qui, en fusionnant, produisent de l'hélium et des neutrons. L'ambition des ingénieurs est de produire du tritium dans les centrales en faisant réagir ces neutrons avec une couverture tritigène, qui doit encore être testée.

« L'énergie des neutrons issus de la fusion représente un sérieux défi pour la première paroi et la chambre à vide de la centrale, ce qui nous impose de bien tenir compte des dommages radio-induits, du bouclier biologique, de la

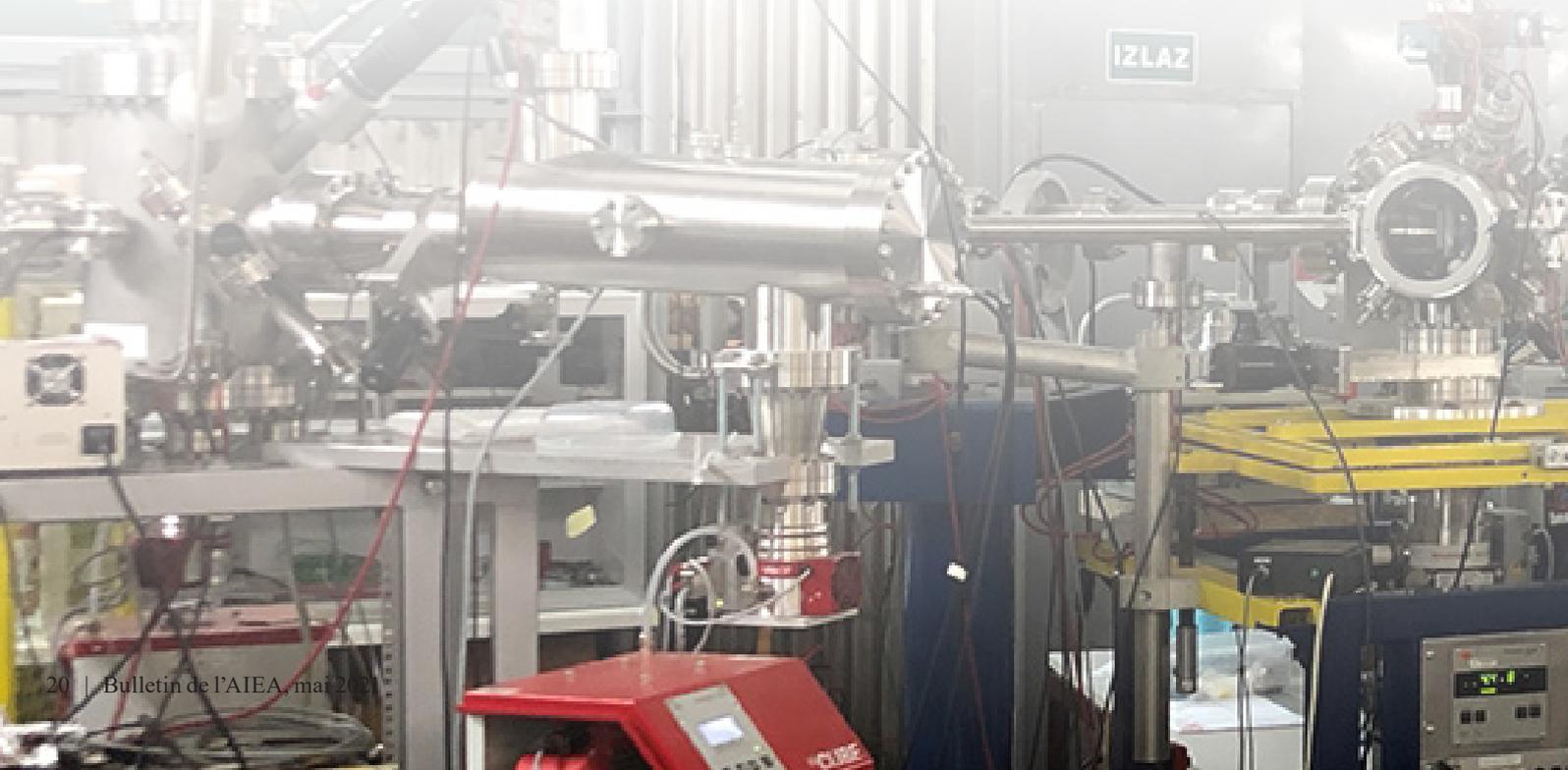
télemanipulation et de la sûreté », explique Ian Chapman, Directeur général de l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni.

L'objectif principal pour les ingénieurs est de mettre au point des matériaux ultra-performants capables de résister à des températures élevées et aux flux de neutrons intenses résultant de la réaction. Une bonne compréhension des effets subis par les éléments faisant face au plasma dans des conditions de fonctionnement normal est aussi essentielle pour l'avenir des grandes centrales à fusion.

Résistance aux extrêmes

L'une des priorités des chercheurs est de mettre au point des matériaux résistants à la dégradation induite par les neutrons pour les structures et les éléments qui font face au plasma. Ces matériaux doivent notamment avoir comme caractéristique de sûreté une faible radioactivité induite par les neutrons, de sorte que la quantité de déchets radioactifs générée soit aussi faible que possible. Cependant, il n'existe actuellement aucune installation d'irradiation par fusion spécialisée permettant de tester les mécanismes de dégradation radiologique et de développer et qualifier des matériaux dans les conditions requises.

L'AIEA aide à résoudre les problèmes liés au développement de matériaux de fusion et à la recherche sur ces matériaux en coordonnant l'élaboration de lignes directrices sur les techniques de test des matières de référence et en comblant le manque de connaissances sur la conception d'installations permettant de tester les matériaux et les composants des réacteurs à fusion.



« Des technologies telles que celle employée dans l'installation à double faisceau d'ions, dont l'AIEA a appuyé la mise en place en 2019 à l'Institut Ruđer Bošković, en Croatie, permettent de simuler les conditions auxquelles les matériaux seraient exposés dans un réacteur à fusion, notamment la transmutation des produits et les dégâts causés par les neutrons et les particules énergétiques issus de la fusion », explique Melissa Denecke, Directrice de la Division des sciences physiques et chimiques de l'AIEA.

Les scientifiques et les ingénieurs s'attachent actuellement à optimiser la configuration du « divertor », la partie du réacteur où le plasma entre le plus en contact direct avec la cuve, pour permettre à cet élément de mieux gérer les flux de chaleur auxquels il est exposé. De plus, à l'aide des connaissances et des données tirées de diverses expériences et outils de simulation d'irradiation, ils élaborent et vérifient une série de critères de conception pour l'ensemble des composants de la cuve du réacteur, dont les divertors.

Un échappement à haute température

Situé tout en bas du réacteur dans la plupart des modèles, le « divertor » fait office de « tuyau d'échappement » du réacteur à fusion : c'est là que les impuretés telles que les « cendres » d'hélium sont extraites et que l'excès de chaleur est évacué. Cette configuration favorise la production de plasmas « plus purs » avec un meilleur confinement énergétique — un paramètre crucial pour la performance d'un dispositif de fusion — en ce qu'elle maintient le plasma à une température suffisante pendant assez longtemps pour permettre des réactions de fusion auto-entretenues.

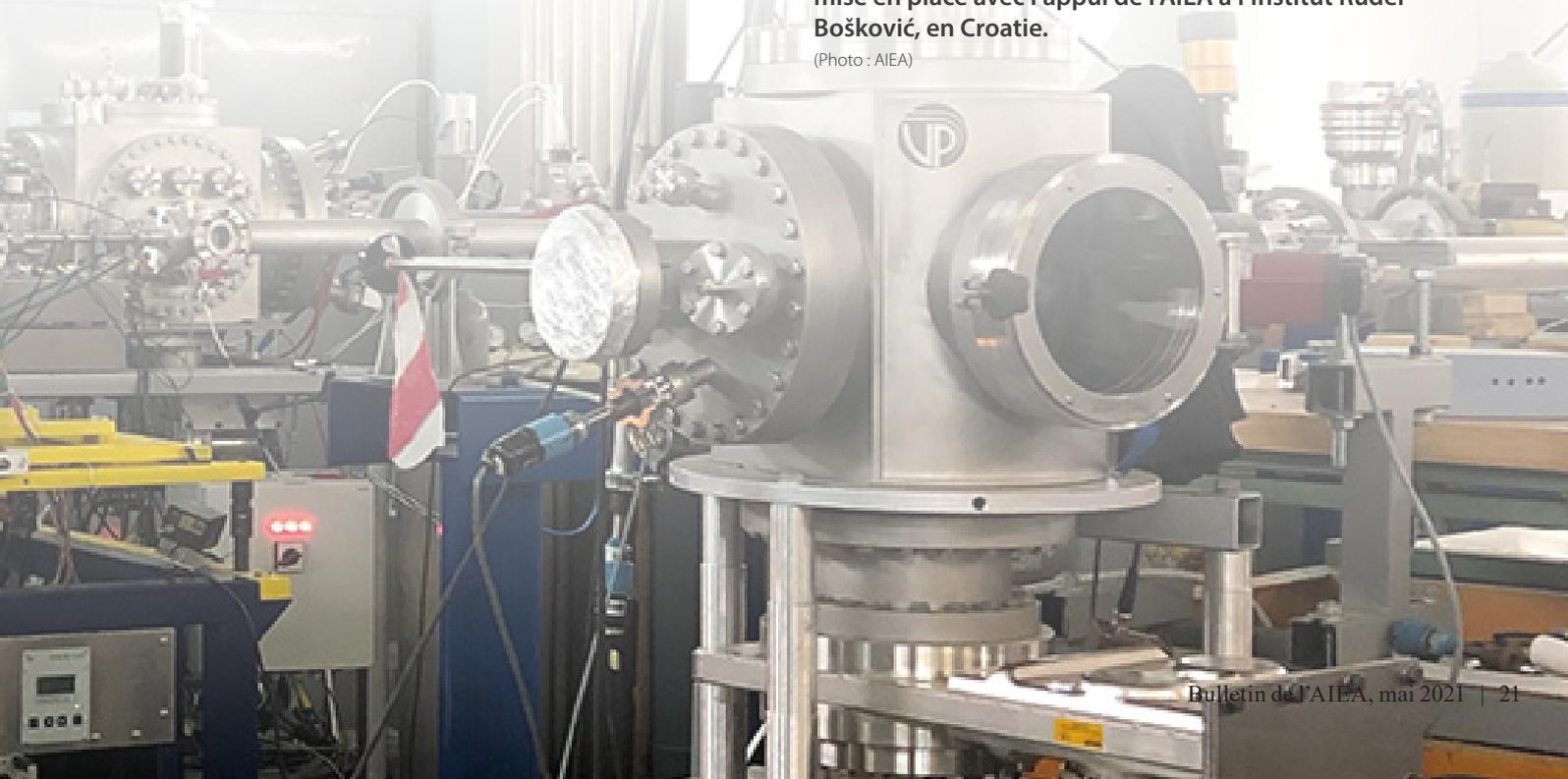
Dans le cadre du projet ITER, la plus grande expérience de fusion au monde, le divertor sera composé de 54 « cassettes » de 10 tonnes chacune, qui seront soumises à des conditions très exigeantes ; exposées à des flux de chaleur constants de 10 à 20 mégawatts par mètre carré, avec certaines parties subissant des températures comprises entre 1 000 et 2 000 °C, les cassettes devront être remplacées par des outils de télémanipulation au moins une fois pendant la durée de vie du réacteur. Pour supporter cette chaleur extrême ainsi que les particules nuisibles, les composants faisant face au plasma seront revêtus de tungstène, matière qui se caractérise à la fois par une faible absorption du tritium et la température de fusion la plus élevée de tous les éléments naturels.

« La conception du divertor d'ITER reflète les connaissances et les compétences physiques et technologiques les plus avancées à l'heure actuelle, mais des progrès supplémentaires devront être réalisés pour les futures centrales à fusion. L'une des nombreuses missions importantes du projet ITER est de découvrir quels sont les progrès à accomplir », déclare Richard Pitts, Chef de la Section des expériences et des opérations sur le plasma de l'Organisation ITER.

La conception et la construction des futurs réacteurs à fusion dépendront des résultats des expériences techniques, technologiques et matérielles d'ITER ainsi que d'autres activités de recherche-développement bien établies et coordonnées à l'échelle internationale, mais la distance qui nous sépare d'un monde alimenté par la fusion nucléaire se réduit de jour en jour.

L'installation « He Ion Source & DiFU Dual-Beam » a été mise en place avec l'appui de l'AIEA à l'Institut Ruđer Bošković, en Croatie.

(Photo : AIEA)



Unir les pays par la recherche et la coopération sur la fusion

Par Élodie Broussard

«**V**isez la lune. Même si vous ne l'atteignez pas, vous vous retrouverez parmi les étoiles », a dit un jour l'auteur Norman Vincent Peale. Avec la fusion nucléaire, ce sont bien les étoiles que visent les scientifiques en cherchant à déterminer s'il est possible de produire sur Terre de l'électricité de fusion à l'échelle industrielle.

Dans le monde, des experts d'une cinquantaine de pays contribuent à la recherche sur la physique des plasmas et au développement de la technologie de fusion nucléaire. Nombre de ces pays s'emploient actuellement à intensifier leurs programmes de recherche sur la fusion pour faire face à une demande énergétique en croissance rapide et à l'accélération du changement climatique due à l'utilisation des combustibles fossiles.

À l'appui des efforts menés actuellement à l'échelle internationale, l'AIEA propose à ses États Membres diverses activités de recherche et de renforcement des capacités — parfois au niveau régional — en vue d'aider certains pays à acquérir les connaissances et l'expérience nécessaires pour rattraper leur retard dans le domaine de la fusion.

Au cours des 50 dernières années, l'AIEA a appuyé la recherche-développement sur la fusion dans le monde entier en organisant divers forums, notamment la Conférence internationale sur l'énergie de fusion, qui a lieu tous les deux ans. L'AIEA organise également une série d'ateliers sur les concepts de centrale de démonstration à fusion, une série de réunions techniques sur des sujets en lien avec la science et la

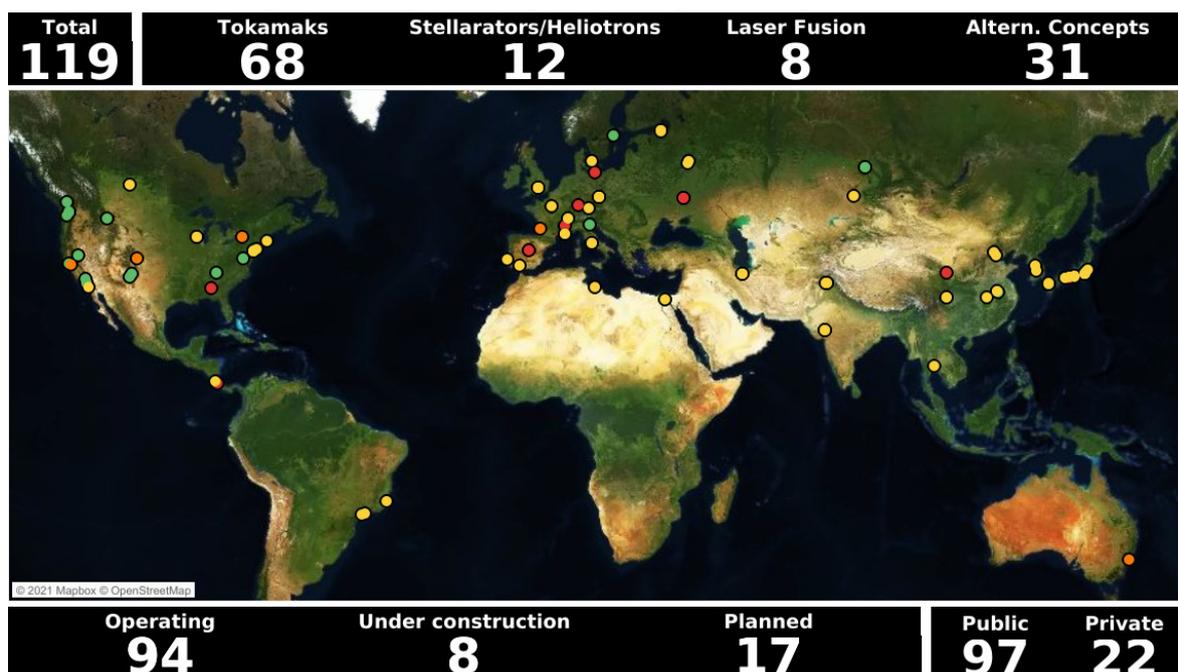
technologie de la fusion, ainsi que des activités de recherche coordonnée dans le cadre desquelles des institutions et des scientifiques se réunissent pour travailler sur des questions d'intérêt commun.

Dans ses publications sur la fusion, notamment dans des revues telles que Nuclear Fusion, l'AIEA diffuse des études et des informations, tout en contribuant à propager des connaissances approfondies au sein de la communauté scientifique. Parallèlement à son portail sur la fusion et à sa base de données des dispositifs de fusion, l'AIEA a constitué des bibliothèques numériques regroupant des données moléculaires et nucléaires fondamentales, qui sont indispensables pour la recherche et le développement de la technologie de fusion. Dans le cadre de ses collaborations avec de nombreux partenaires, l'AIEA organise et appuie également des activités de formation théorique et pratique sur le thème de la fusion, notamment des écoles et des ateliers internationaux et régionaux.

Nouveau venu sur la scène mondiale de la fusion, le Costa Rica s'appuie sur l'aide de l'AIEA pour rattraper son retard par rapport aux autres pays grâce au développement technique et au renforcement des capacités. En 2019, un atelier organisé par l'Institut de technologie du Costa Rica avec l'appui de l'AIEA a été l'occasion pour des participants de pays d'Amérique latine de prendre part à des expériences conjointes et de se former à l'utilisation des deux petits dispositifs de fusion de l'institut.

Plus de 100 dispositifs de fusion (publics et privés) sont en exploitation, en chantier ou en cours de planification.

((Source : Fusion Device Information System, AIEA)





Donné à la Thaïlande en 2018, le tokamak HT-6M est l'un des principaux piliers de la feuille de route du pays pour la fusion.

(Photo : ASIPP, Chine)

Resserrer les liens entre les chefs de file de la fusion et les pays contributeurs

L'Union européenne, par l'intermédiaire d'Euratom, et six pays coopèrent dans le cadre de la plus grande expérience de fusion au monde : ITER, réacteur de fusion expérimental en construction en France (voir page 10).

« Pour les pays qui ne prennent pas part au projet, l'AIEA joue un rôle important en relayant les connaissances acquises grâce à ITER à l'ensemble de la communauté, et vice versa. Pour ce faire, elle organise des réunions techniques, des ateliers et des écoles, et élabore des supports de formation en ligne, avec le concours d'experts d'ITER », explique Danas Ridikas, Chef de la Section de la physique de l'AIEA.

Une inspiration pour la nouvelle génération en Asie du Sud-Est

Depuis 2014, l'École de l'Association des nations de l'Asie du Sud-Est (ASEAN) sur le plasma et la fusion nucléaire est l'une des principales activités menées pour aider la Thaïlande à lancer son programme de fusion et faire progresser la recherche dans ce domaine dans la région. En janvier 2020, l'AIEA et ITER ont aidé cette école à promouvoir les contacts entre jeunes talents et chercheurs de renommée internationale. « L'AIEA a envoyé des experts qui, ayant partagé leurs connaissances et leur expérience avec les participants, ont été une grande source d'inspiration pour la nouvelle génération », se félicite Kanchalika Dechates, Chef de la Coopération internationale à l'Institut thaïlandais de technologie nucléaire (TINT). Plus de 80 jeunes chercheurs de la région ont participé à l'école.

Pour renforcer la formation et la collaboration entre les équipes de recherche des pays développés et en développement, l'AIEA mène depuis 2004 un projet de recherche coordonnée sur les dispositifs de fusion de moyenne et de petite taille, auquel contribuent des chercheurs de 19 pays. « Ce projet donne l'occasion à des chercheurs thaïlandais de rencontrer de nombreux experts du monde entier et de travailler en collaboration avec eux », explique

Boonyarit Chatthong, Professeur auxiliaire à l'Université du Prince de Songkla, en Thaïlande.

Grâce à ce partenariat de longue date, il est possible de réaliser des expériences conjointes et comparatives, de former le personnel d'institutions et de pays différents, et de permettre à la nouvelle génération de spécialistes de la fusion d'acquérir des connaissances théoriques et techniques de pointe. « La Thaïlande sera très bientôt dotée de son tout premier dispositif de fusion et, grâce à ce projet, le pays pourra lancer son propre programme de fusion », se réjouit Boonyarit Chatthong.

La construction d'un tokamak expérimental (voir page 6) représente la clé de voûte du programme de développement de la fusion dans le pays. Il s'agira du premier dispositif de fusion exploité par l'ASEAN et d'une pièce centrale dans la stratégie de formation des chercheurs en Thaïlande et dans les pays de l'ASEAN.

En 2018, l'AIEA a versé des subventions à des scientifiques et ingénieurs thaïlandais afin de leur permettre d'assister à la Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion, qui s'est tenue en Inde. Cette année-là, un chercheur thaïlandais a aussi pris part à la session commune CIPT-AIEA sur la physique des plasmas, qui a rassemblé en Italie quelque 70 doctorants de niveau supérieur, chercheurs post-doctorants et autres jeunes chercheurs de 23 pays, favorisant ainsi la collaboration internationale.

La fusion sera prête quand la société en aura besoin

Par Michael Amdi Madsen

Les scientifiques font valoir le potentiel de l'énergie de fusion depuis les années 1920 mais jusque très récemment, l'exploitation commerciale de la fusion est restée un rêve lointain. Pour mieux comprendre pourquoi, après des décennies de recherche, la fusion ne fait toujours pas partie du bouquet énergétique mondial et pourquoi cela est en passe de changer, nous avons rencontré Melanie Windridge, Directrice pour le Royaume-Uni de l'Association des industries de la fusion, consultante en communication auprès de Tokamak Energy et fondatrice de Fusion Energy Insights.

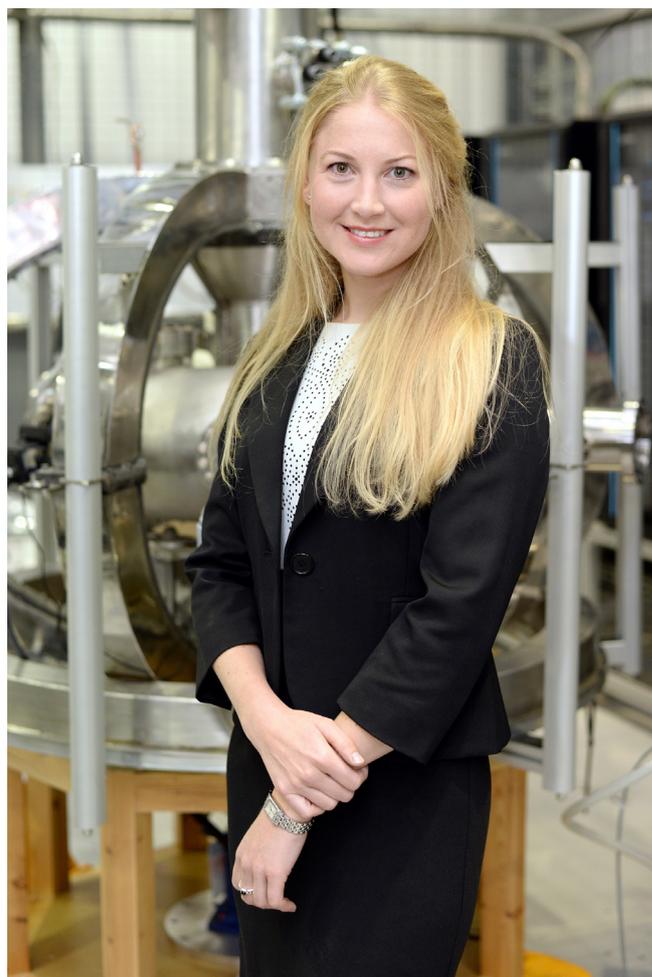
Q : Selon une vieille plaisanterie, on dit depuis bien longtemps que la technologie de la fusion nucléaire sera au point dans 30 ans. Qu'en est-il vraiment ?

R : Cette plaisanterie sur la fusion est bien connue mais un peu erronée, car en réalité les choses avancent. Aujourd'hui, les facteurs convergent pour accélérer les progrès dans le domaine de la fusion. Tous d'abord, la science a progressé et nous possédons maintenant de solides connaissances sur la physique des plasmas. Nous sommes parvenus à créer des réactions de fusion grâce à des concepts comme les tokamaks. Par ailleurs, de nouvelles technologies telles que le calcul intensif ont permis d'améliorer les simulations et la modélisation des plasmas. Grâce à l'intelligence artificielle et à l'apprentissage automatique, on a pu optimiser les opérations et on est aujourd'hui en mesure de mieux les contrôler. Enfin, les supraconducteurs à haute température permettent de créer des champs magnétiques bien plus forts, qui confinent les combustibles de fusion plus efficacement. Beaucoup plus puissants et efficaces, les lasers dont nous disposons aujourd'hui devraient donner un élan considérable à la fusion par confinement inertiel et les progrès des méthodes de fabrication pourraient contribuer à réduire le coût des expériences et des futures installations énergétiques.

D'autre part, les solutions climatiques suscitent aujourd'hui un intérêt bien plus vif auprès du public, et les gouvernements fixent des objectifs d'émissions nulles. Il existe maintenant un secteur privé de la fusion, qui a attiré à ce jour environ 2 milliards de dollars d'investissements. L'Association du secteur de la fusion compte aujourd'hui près de 25 membres et même les sociétés spécialisées dans le pétrole et le gaz commencent à s'intéresser à la fusion.

Q : Pour faire face au changement climatique, de nombreux pays entendent décarboner à grande échelle d'ici 2030 et visent la neutralité carbone d'ici 2050. La fusion arrivera-t-elle trop tard pour jouer un rôle dans cette transition ?

R : Le physicien russe Lev Artsimovich a dit un jour : « La fusion sera prête quand la société en aura besoin. » Je pense qu'il avait raison. Idéalement, nous aurions appris à maîtriser



la fusion il y a 30 ans et serions aujourd'hui en mesure de déployer cette technologie à grande échelle. Mais dans le passé, les conditions n'étaient pas réunies et le monde n'avait ni les motivations ni les moyens d'y parvenir.

Même si la fusion n'arrive pas à temps pour contribuer aux objectifs fixés pour 2050, elle sera nécessaire dans la seconde moitié du siècle, quand la demande d'énergie sera encore plus importante. Il nous faut cependant redoubler d'efforts dès aujourd'hui si nous voulons que le réseau fournisse de l'électricité produite grâce à la fusion avant 2050.

Q : Quels sont, selon vous, les obstacles à la technologie et comment peuvent-ils être levés ?

R : Il y a différentes difficultés à surmonter, et ce à plusieurs niveaux. La première consiste à faire en sorte que la réaction de fusion produise plus d'énergie qu'elle n'en requiert, c'est-à-dire à atteindre ce qu'on appelle le « point d'équilibre ». Il nous faudra ensuite construire une centrale expérimentale capable de produire de l'électricité. Quand nous y serons parvenus, nous pourrons commencer à planifier le déploiement commercial de la fusion.

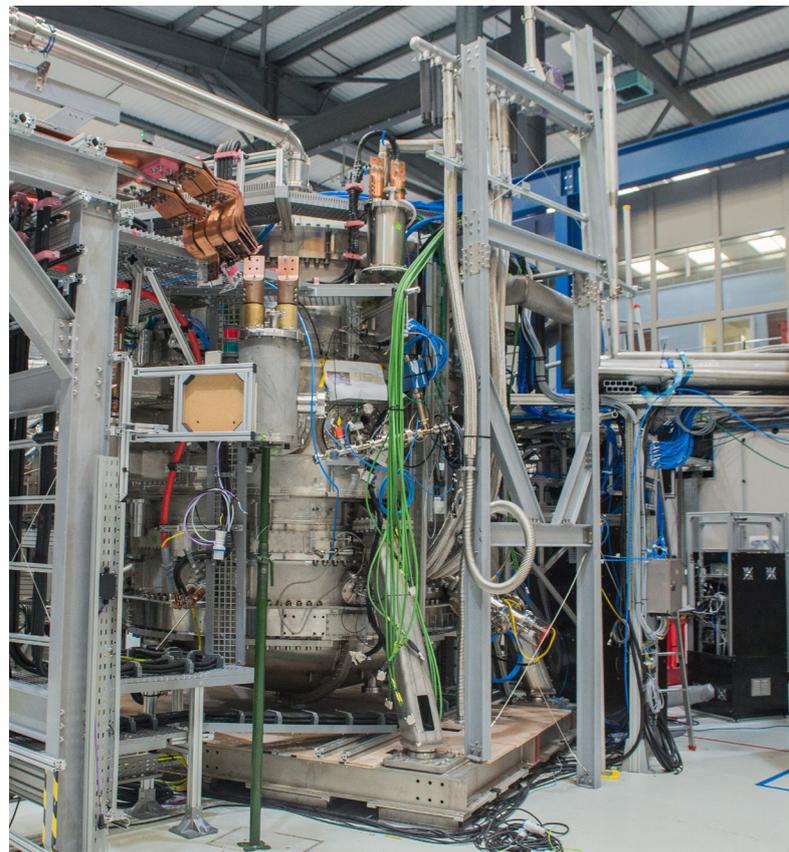
Entre l'atteinte du point d'équilibre et le lancement de la production d'électricité se dressent plusieurs obstacles techniques. Il nous faut, par exemple, trouver des moyens d'extraire l'énergie et de produire du combustible au tritium en plus grande quantité. D'autre part, l'environnement de la fusion nécessite l'emploi de matériaux bien spécifiques. Pour fonctionner, les aimants supraconducteurs ont besoin de températures extrêmement élevées et extrêmement basses, ainsi que de champs magnétiques puissants. Néanmoins, le principal problème vient des neutrons énergétiques, qui peuvent gravement endommager les matériaux. Il sera très probablement nécessaire de remplacer régulièrement certains composants des centrales, et la machine devra donc être conçue de telle manière qu'il soit possible de remplacer ces composants rapidement, facilement et à peu de frais.

Au-delà de la physique et de l'ingénierie, les spécialistes de la fusion doivent également dialoguer avec les gouvernements au sujet de la réglementation, et veiller à ce qu'il n'y ait pas d'obstacles aux autorisations quand nous serons prêts à construire des centrales. Enfin, il convient d'avoir l'adhésion du public et de faire en sorte que la population soit elle aussi associée au développement de la fusion. Il nous faut aborder toutes ces questions et commencer à en parler dès à présent. C'est d'ailleurs ce que nous faisons.

Q : Aujourd'hui, près de 800 millions de personnes ne disposent pas d'un accès fiable à l'électricité. La fusion nucléaire représente-t-elle une solution pour ces personnes et que fait la filière pour impliquer les pays en développement ?

R : Au départ, quand le projet international sur la fusion ITER a été imaginé, lors de la fameuse réunion au coin du feu de MM. Reagan et Gorbatchev, qui s'est tenue à Genève en 1985, les dirigeants ont déclaré souhaiter que la fusion bénéficie à l'ensemble de l'humanité. Cet objectif n'a pas changé. ITER prévoit un programme éducatif ouvert à tous les pays, qui permette de former les spécialistes de la fusion de demain. Il s'agit là d'un point important si l'on souhaite que la fusion soit déployée dans le monde entier.

La collaboration entre les secteurs public et privé qui commence déjà à se mettre en place devrait contribuer à réduire les coûts et à répartir les risques. Dans les pays en développement, cette coopération public-privé jouera un rôle particulièrement important et devra probablement être appuyée par une aide intergouvernementale.



Tokamak ST40 construit et exploité par la société privée Tokamak Energy.

(Photo : Tokamak Energy)

Q : Les domaines de la physique et du nucléaire sont généralement dominés par les hommes. Que fait-on dans la filière de la fusion en vue d'un meilleur équilibre entre les sexes ?

R : Nous sommes depuis longtemps conscients du déséquilibre entre les sexes dans la physique et la fusion, et des initiatives ont été lancées pour remédier à ce problème, mais il s'agit d'un processus lent, qui s'étalera sur plusieurs générations.

Cela fait maintenant près de 20 ans que je participe à des initiatives visant à faire évoluer les mentalités à ce sujet. Certains grands laboratoires s'emploient activement à améliorer la situation en menant des programmes destinés à accroître la diversité et à mettre en place des réseaux favorisant l'inclusion. Pour les entreprises privées, qui sont souvent de taille modeste, il est plus difficile de remédier au problème.

Cependant, la question ne doit pas être abordée simplement du point de vue des laboratoires. Il revient à chacun d'entre nous d'agir à son niveau. J'ai récemment lancé le compte @womeninfusion sur Instagram afin de présenter des femmes qui travaillent dans ce domaine et d'encourager la nouvelle génération féminine à se lancer dans la physique.

Projets audacieux et projets prudents

Pourquoi les entreprises et les startups sont indispensables à la fusion

Par Simon Woodruff



Simon Woodruff est le fondateur et le président de Woodruff Scientific, une société américaine qui, sous contrat avec des établissements privés et publics, effectue des travaux de recherche et développe la technologie de fusion afin d'accélérer le développement de l'énergie de fusion économique. Actif dans la communauté de la fusion, il accueille chaque année un camp d'entraînement sur le calcul scientifique à l'intention des étudiants de premier cycle, a organisé des ateliers nationaux sur les sciences d'énergie de fusion et participe actuellement à deux initiatives de l'AIEA sur les sources compactes de neutrons de fusion et le développement de la fusion privée.

Le développement de la fusion privée repose sur le fait qu'il existe de nombreuses voies de commercialisation, et que les entrepreneurs peuvent apporter un complément aux programmes gouvernementaux. Le secteur des lancements spatiaux suffit à illustrer ce point. Une combinaison de programmes de partenariats public-privé intelligents sous l'égide du Gouvernement des États-Unis a permis de réaliser des économies sur l'ensemble des lancements spatiaux. SpaceX et Blue Origin, entre autres, ont montré comment y parvenir.

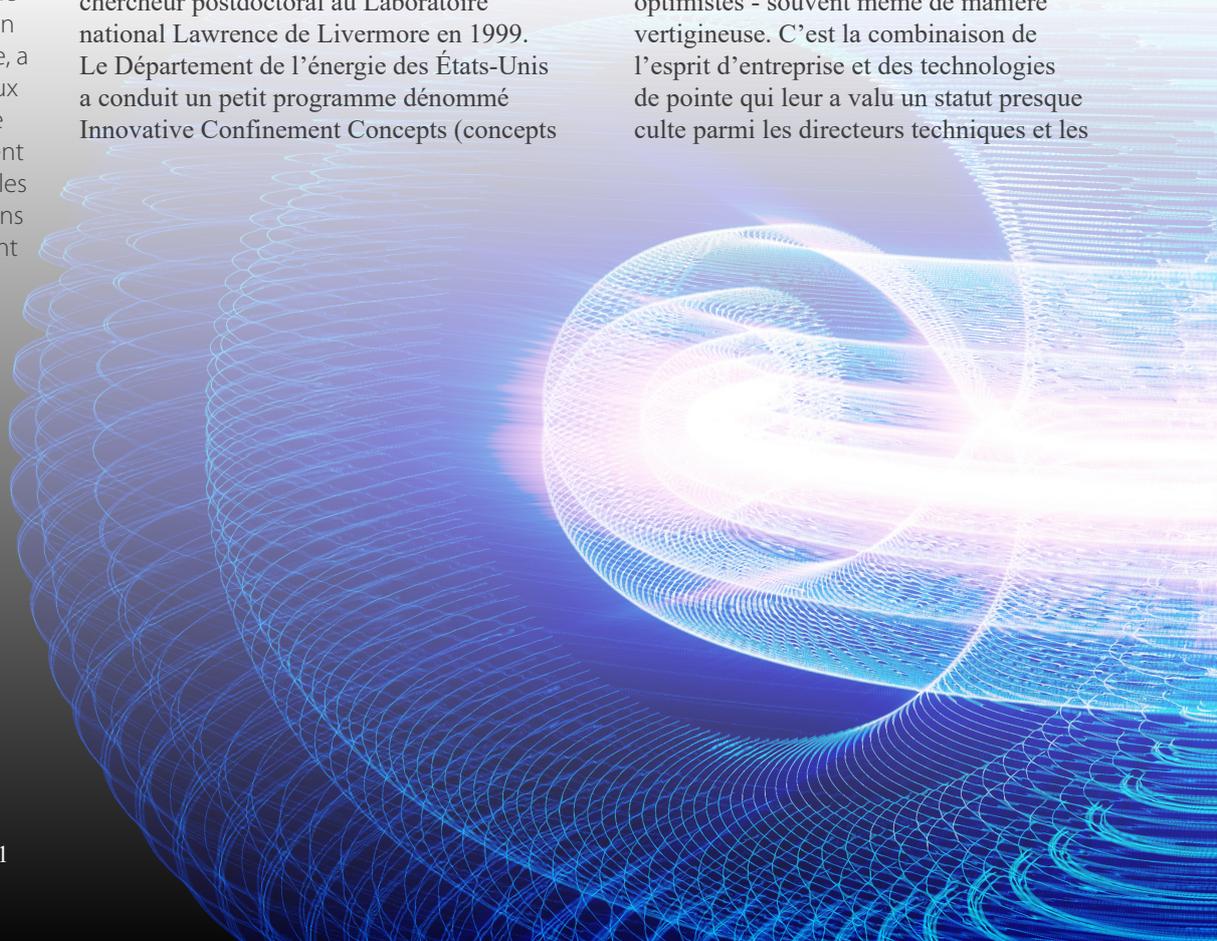
Les « fusionneurs » privés partagent cet avis et s'interrogent : comment pouvons-nous rendre les choses moins coûteuses ? Comment pouvons-nous utiliser les dernières innovations en matière de matériaux, de technologie et d'intelligence artificielle pour atteindre la viabilité ? Comment pouvons-nous réduire les coûts totaux en capital et le coût de l'électricité afin que les systèmes de fusion puissent concurrencer le gaz naturel à cycle combiné ?

Je suis de très près l'histoire des entreprises de fusion privées depuis mon poste de chercheur postdoctoral au Laboratoire national Lawrence de Livermore en 1999. Le Département de l'énergie des États-Unis a conduit un petit programme dénommé Innovative Confinement Concepts (concepts

de confinement innovants) (ICC), destiné à trouver des concepts de fusion nucléaire plus simples et plus faciles à mettre en œuvre. J'ai contribué à l'organisation de la série d'ateliers sur les ICC et il y avait un chevauchement intéressant avec les concepts de fusion développés à titre privé. Tout près de Livermore, TAE Technologies, alors appelée Tri-Alpha Energy, était créée et commençait à fonctionner ; un peu plus loin à Vancouver (Canada), General Fusion était en phase de démarrage ; et au Royaume-Uni, Tokamak Energy, alors appelée Tokamak Solutions, était en cours de création.

En 2004, j'ai quitté Lawrence Livermore pour suivre leur exemple et voir si nous pouvions réellement accélérer la livraison des systèmes d'énergie de fusion sur le marché commercial. Au cours des 22 années qui ont suivi, ces projets ambitieux sur la fusion ont globalement permis de lever plus de 1,5 milliards de dollars É.-U destinés à la réalisation de leurs concepts, et une nouvelle industrie de fusion a vu le jour pour soutenir ces efforts.

Les entreprises de fusion privées sont optimistes - souvent même de manière vertigineuse. C'est la combinaison de l'esprit d'entreprise et des technologies de pointe qui leur a valu un statut presque culte parmi les directeurs techniques et les



PDG dans d'autres secteurs. Mais il faut dire que l'espoir est omniprésent. De nombreux fusionneurs privés ont commencé dans des programmes publics avec des horizons de développement de plus de 20 ans, mais sont actuellement engagés dans des débats sur la « trésorerie neutre » et les efforts de démarrage dans un écosystème de startups qui battent de l'aile. Ils sont soutenus en partie par les efforts que déploie Advanced Research Projects Agency-Energy pour réduire l'écart entre le travail de laboratoire conventionnel et l'industrie au moyen d'une série de petits programmes tels qu'ALPHA, BETA, GAMOW et OPEN, et d'autres à venir, j'imagine.

Désormais, Tech to Market (T2M) est aussi une affaire de fusion. On discute régulièrement des « sorties » : la start-up est-elle rachetée, est-elle mise sur le marché, vend-elle sa propriété intellectuelle ? Pouvons-nous le faire avant l'expiration de la durée de vie du fonds d'investissement ?

Depuis mon départ de Lawrence Livermore, j'ai eu le privilège de me tailler une carrière dans des entreprises de fusion privées, que ce soit dans une start-up de sonofusion à Grass Valley (Californie) ou dans une entreprise essayée du MIT, réunissant la rondelette somme de 200 millions de dollars É.-U grâce à un investissement de série A. Il est clair que les questions de neutralité carbone et de trésorerie neutre suscitent un regain d'intérêt. Chaque entrepreneur et chaque entreprise a une approche technique différente (universellement, cependant, plus c'est petit, mieux c'est) et une idée légèrement différente concernant son plan de commercialisation — certains sont adeptes de l'approche audacieuse, pour laquelle la priorité est d'être premier à commercialiser quelque chose qui produit de l'énergie. Mais

les projets risqués (une vingtaine au total dans le monde) ne représentent qu'une infime partie de l'écosystème des petites entreprises qui offre des produits et des services appuyant la fusion.

Aux États-Unis, un programme de subvention à la recherche sur l'innovation destiné aux petites entreprises soutient des centaines de sociétés dont les activités sont liées à la fusion, qu'il s'agisse de la production d'ignitrons ou de condensateurs, de la réalisation de simulations, du développement de nouveaux matériaux pour la fabrication additive, ou de l'examen de nouvelles techniques de diagnostic. Les petites entreprises ont des frais généraux moins élevés que ceux des grands laboratoires. Elles sont agiles et capables de pivoter - en proposant une gamme de produits une année et un ensemble de solutions différentes l'année suivante. En outre, elles sont innovantes, gardent à l'esprit les problèmes les plus importants, y trouvent des solutions ; et mettent l'accent sur ce qui peut permettre à l'énergie de fusion d'entrer sur le marché.

En résumé, le *présent* de la fusion, ce sont les startups et les petites entreprises du secteur. L'*avenir* est brillant pour les petits !

Particules de haute énergie circulant dans un réacteur tokamak.

(Image : Shutterstock)

Boire sans danger : l'AIEA soutient une unité de traitement de l'eau pour rendre les eaux des aquifères potables en Jordanie



Achevée en décembre 2020, l'unité de traitement d'eau facilite l'utilisation de vieux aquifères souterrains de grès.

(Photo : A. Al-Sayaheen/WAJ)

En Jordanie, pays où la rareté de l'eau est de plus en plus préoccupante, une nouvelle unité de traitement des eaux souterraines mise au point grâce au soutien de l'AIEA, commencera bientôt à alimenter des milliers de foyers du gouvernorat d'Aqaba, à la pointe sud du pays, en eau potable de qualité. Ce système de traitement pilote, premier de ce type en Jordanie, élimine les radionucléides naturels des eaux souterraines, ce qui permet à la Régie jordanienne des eaux d'exploiter les aquifères auparavant non utilisés et de faire en sorte que les sources d'eau existantes soient moins sollicitées.

En raison de son climat semi-aride caractérisé par de faibles taux de précipitations et du fait de sa population en pleine expansion, la Jordanie figure parmi les dix pays qui ont les plus faibles taux de disponibilité d'eau douce par habitant au monde. De plus, cette situation devrait s'aggraver. Selon le Bureau régional OMS de la Méditerranée orientale (EMRO), si des mesures efficaces ne sont pas prises, le pays entrera dans un état d'extrême pauvreté en eau d'ici à 2025.

Au nombre de ces mesures figure l'exploitation des ressources d'eaux

souterraines plus profondes et plus anciennes comme l'aquifère de Ram, entouré de grès et regorgeant d'importantes quantités d'eau douce de haute qualité peu susceptible de présenter des risques de contamination anthropique. Cependant, le grès présente généralement de fortes concentrations de radionucléides naturels, notamment le radium, qui peuvent être dangereux pour les consommateurs d'eau.

Grâce au soutien du programme de coopération technique de l'AIEA, des spécialistes de l'analyse isotopique et de la technologie des déchets ont aidé les experts jordaniens à mesurer et à surveiller la concentration en radium des eaux souterraines prélevées dans l'aquifère de Ram et à examiner un certain nombre d'options pour leur traitement.

Les résultats de ces analyses ont justifié la construction et l'installation d'une unité de traitement, située à proximité d'un puits d'eau. Ce dispositif de traitement permet de filtrer l'eau en y ajoutant de l'oxyde de manganèse hydraté et en la faisant passer par la suite par une série de filtres en céramique, ce qui fait baisser les teneurs en radionucléides jusqu'à

un niveau conforme aux normes jordaniennes.

Après réception des premiers équipements de base, comme les pompes et les dispositifs de mesure, l'assemblage de l'équipement de traitement des eaux a commencé en février 2020, et le travail de génie civil et de construction le mois suivant. En décembre 2020, l'unité de traitement était achevée et prête à être mise en service par Aqaba Water Company, l'autorité locale chargée de la distribution de l'eau. Cette nouvelle unité, d'une capacité de traitement de 40 mètres cubes par heure, soit 12,5 litres par seconde, devrait permettre d'approvisionner en eau près de 2 000 personnes.

« Nous prévoyons de mettre en place plus d'unités pour traiter les ressources en eau dans la ville d'Aqaba, ainsi que dans de nouveaux puits d'eaux souterraines situés dans la région méridionale du gouvernorat d'Amman, dans une zone appelée Khan Alzabib », déclare Amal Al-Sayaheen, Directeur de la recherche et des services techniques à la Régie jordanienne des eaux.

Toutes les matières de la croûte terrestre contiennent des radionucléides naturels disséminés dans les roches et les sols à des concentrations d'activité généralement faibles. Cependant, ils pourraient s'infiltrer dans les eaux souterraines, donc dans l'eau potable provenant des eaux souterraines et des sources. « La présence de radionucléides pourrait justifier une analyse minutieuse destinée à expliquer les risques radiologiques liés à la consommation de ces eaux », soutient Horst Monken-Fernandes, spécialiste de la remédiation de l'environnement à l'AIEA qui assiste la Jordanie dans le cadre de ce projet.

La radioactivité dans l'eau potable constitue une source de préoccupations dans beaucoup de pays du monde. Dans le cadre de la Conférence internationale sur la gestion des matières radioactives naturelles dans l'industrie, l'AIEA a récemment

organisé un atelier intitulé « Eaux souterraines 360° » à l'occasion duquel les participants ont examiné différents aspects liés à la présence de radionucléides dans les eaux souterraines.

EN SAVOIR PLUS

Les eaux souterraines des bassins de grès du Moyen-Orient sont pour la plupart de qualité. Cependant, en raison de sa composition, le grès a généralement de fortes concentrations

d'activité de radionucléides naturels. Concernant la Jordanie, les niveaux de radium naturel dans ces bassins et les propriétés cancérigènes de ces radionucléides pourraient nuire à la qualité des eaux souterraines du pays.

Il est toutefois possible d'éliminer le radium de l'eau à l'aide d'un filtre fait d'une membrane en carbure de silicium recouverte d'une couche d'oxyde de manganèse hydraté.

Lorsque l'eau passe dans le filtre, l'oxyde de manganèse hydraté absorbe le radium. Au bout d'un certain temps, le filtre en céramique est lavé à contre-courant et l'oxyde de manganèse hydraté contenant le radium absorbé est évacué comme déchet.

— Par Omar Yusuf

République démocratique populaire lao : augmentation du rendement des rizières grâce à des pratiques de gestion des sols et des nutriments améliorées



Essai de démonstration de la culture du riz dans le champ d'un agriculteur.

(Photo : M. Zaman/AIEA)

Principale culture de base en République démocratique populaire lao, le riz est essentiel à la sécurité alimentaire et à l'emploi. Plus de 80 % des agriculteurs laos pratiquent cette culture, qui occupe 60 % des terres cultivées du pays. Cependant, le climat tropical caractérisé par de fréquentes moussons et le relief montagneux du pays, l'érosion du sol, le manque de variétés de riz appropriées et l'utilisation insuffisante d'engrais ont limité la production rizière, mettant en péril les moyens d'existence dans cette société agraire. Étant donné que 72 % des zones rizicoles du pays dépendent des précipitations naturelles, on prévoit que les régimes pluviométriques de plus en plus variables en raison du changement climatique auront un

impact dévastateur sur la production de riz.

En coopération avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'AIEA a aidé les agriculteurs laos à augmenter les rendements de riz de 60 % grâce à de meilleures pratiques de gestion des sols et des nutriments, identifiées à l'aide de techniques nucléaires (voir l'encadré « En savoir plus »). Les essais effectués dans les champs des agriculteurs ont montré que l'utilisation optimale d'engrais chimiques et de fumier avait permis de faire passer les rendements de riz de 3,16 à 5,1 tonnes par hectare.

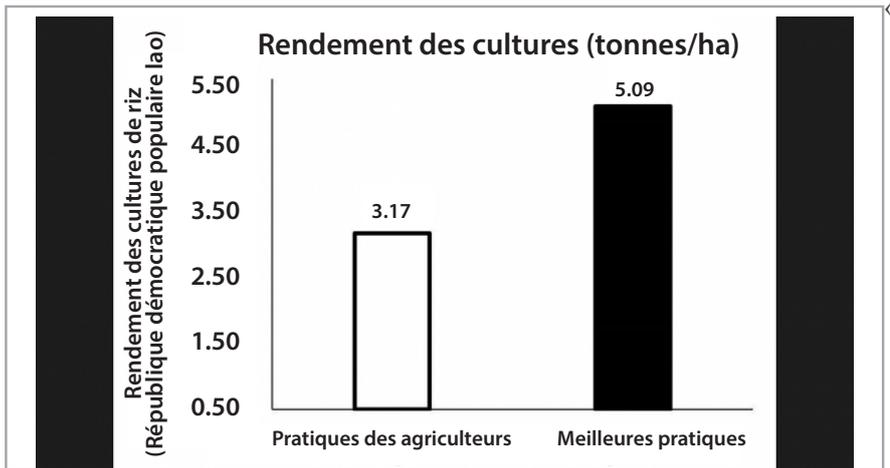
« J'applique ces pratiques depuis trois ans maintenant », déclare Somphet

Siphandone, un agriculteur du district de Sanakarm, dans la province de Vientiane, qui participe à un projet pilote qui permet de vérifier ces résultats dans la pratique. « Le rendement a augmenté de 60 % par rapport à la pratique traditionnelle. Nous avons été formés à des techniques agricoles efficaces et efficaces, qui ont donné de bons résultats dans nos champs. Grâce à ce programme, nous résistons mieux au changement climatique et nos récoltes sont meilleures. »

Dans le cadre de son programme de coopération technique, l'AIEA a formé les chercheurs à l'utilisation de l'azote 15, isotope stable de l'azote, pour mesurer la quantité d'azote que les plantes tirent des engrais, puis déterminer avec précision la quantité d'engrais que les agriculteurs devraient utiliser à différentes étapes de la vie de la plante cultivée, ainsi que la meilleure manière d'intégrer la paille de riz locale et le fumier animal dans ces engrais, comme source de nutriments.

Partant de ces résultats, des experts de l'AIEA et de la FAO ont aidé des spécialistes locaux à élaborer un ensemble de lignes directrices relatives à la production de riz à l'intention des agriculteurs et des agents agricoles travaillant avec eux. Ces lignes directrices, qui reposent sur des résultats tirés de l'utilisation des techniques isotopiques, présentent les meilleures pratiques en matière de gestion des sols et des nutriments.

Pour toucher davantage d'agriculteurs et diffuser ces meilleures pratiques, l'AIEA et les experts de l'Institut



Graphique montrant l'augmentation du rendement de riz grâce à des pratiques de gestion des sols et des nutriments améliorées.

national de la recherche agronomique et forestière (NAFRI) ont élaboré une brochure facile à utiliser à l'intention des agriculteurs en langue laotienne, en utilisant les informations qui figurent dans les lignes directrices relatives à la production de riz. À ce jour, 57 agriculteurs de quatre villages de la province de Vientiane ont été formés dans le cadre de la phase pilote du programme.

Cette brochure est une boîte à outils technologiques complète qui indique aux agriculteurs ce qu'ils doivent faire, de la préparation du terrain pour les semences à l'application d'engrais, en passant par la gestion des mauvaises herbes et des insectes, et la garantie d'une récolte au moment propice », dit Mohammad Zaman, pédologue et phytonutritionniste pour le Programme mixte FAO/AIEA des techniques

nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture.

EN SAVOIR PLUS

Les techniques faisant appel aux isotopes stables

Les isotopes sont des atomes d'un même élément qui ont le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons, donc un poids atomique différent. Par exemple, l'azote 15 a le même comportement chimique que l'azote 14, mais il compte un neutron de plus, ce qui le rend plus lourd. Les scientifiques peuvent utiliser des engrais marqués à l'aide de cet isotope pour comprendre la manière dont l'azote contenu dans les engrais transforme les systèmes du sol, des plantes et de l'eau, en suivant et en déterminant l'efficacité avec laquelle les cultures l'assimilent et la quantité qui reste dans le sol.

Ils peuvent également utiliser des isotopes pour retracer le mouvement et l'origine de diverses émissions dans l'agriculture : en utilisant l'azote 15 pour suivre l'oxyde nitreux et le carbone 13 pour le méthane et le dioxyde de carbone.

— Par Lu Han

Une nouvelle technologie de drones est disponible pour la surveillance radiologique en situation d'urgence

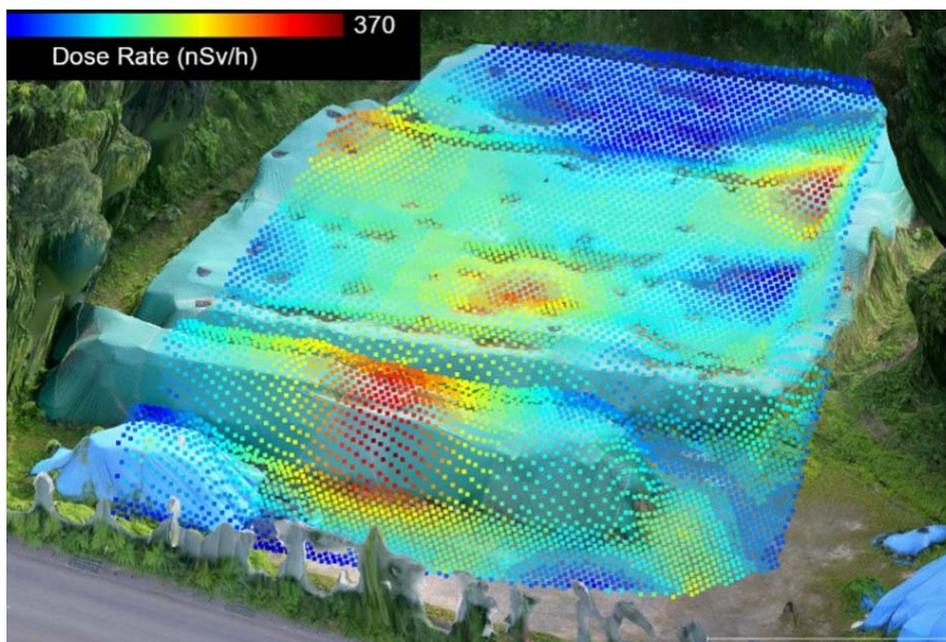


Une nouvelle technologie de drones, mise au point par l'AIEA à l'intention des autorités de la préfecture de Fukushima, au Japon, permet d'effectuer des mesures radiologiques dans les zones contaminées.

(Photo : Préfecture de Fukushima)

Après un accident nucléaire, comme celui survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi en 2011, il peut être dangereux pour les personnes de pénétrer dans la zone radiologiquement contaminée à proximité du réacteur pour surveiller les niveaux de rayonnement. Une nouvelle technologie reposant sur des drones, mise au point par l'AIEA à l'intention des autorités de la préfecture de Fukushima, au Japon, facilitera cette tâche.

La méthode et l'instrumentation développées par l'AIEA pour les véhicules aériens sans pilote équipés de détecteurs de rayonnement, de caméras et de dispositifs GPS ont été testées et validées dans des conditions réelles dans la préfecture de Fukushima et peuvent désormais être utilisées dans des situations de routine ou d'urgence. Compte tenu de cette expérience, l'AIEA est prête à accompagner les États Membres intéressés dans le développement et la



Photogrammétrie aérienne 3D complète superposée à une carte radiologique obtenue grâce à un seul véhicule aérien sans pilote en deux vols consécutifs.

(Image : AIEA et préfecture de Fukushima)

mise en œuvre de cette technologie aux fins de la réalisation d'une cartographie radiologique à la suite d'une situation d'urgence nucléaire ou radiologique.

Le faible coût des drones et l'absence d'exposition de personnes aux rayonnements sont deux avantages significatifs de cette technologie.

L'AIEA et la préfecture de Fukushima ont commencé à travailler ensemble au développement et à l'utilisation de véhicules aériens sans pilote aux fins de la surveillance radiologique en 2012. Dans le cadre de son plan d'action sur la sûreté nucléaire, l'AIEA a appuyé la préfecture de Fukushima dans le cadre de deux projets consécutifs, de 2012 à 2020 :

- en mettant à sa disposition un système complet d'instrumentation reposant sur des véhicules aériens sans pilote pour la mesure des rayonnements - un système de détection des rayonnements doté de capacités d'analyse et de stockage de données - mis au point et construit au Laboratoire des sciences et de l'instrumentation nucléaires de l'AIEA (NSIL) ;
- en fournissant une méthode d'analyse et d'interprétation des mesures a posteriori et en formant le personnel, dans la préfecture de Fukushima comme au NSIL de Seibersdorf, en Autriche, à l'utilisation des véhicules aériens sans pilote et de leur système d'instrumentation ainsi qu'à

l'utilisation du logiciel permettant d'obtenir et d'interpréter les données.

Récemment, des avancées ont été réalisées dans la technologie des véhicules aériens sans pilote, et des développements majeurs sont attendus dans un avenir proche, notamment des charges utiles plus importantes, des détecteurs et des capteurs intégrés, une amélioration de la navigation automatique et de la capacité des véhicules à travailler de concert avec d'autres véhicules aériens sans pilote ainsi qu'avec des systèmes au sol. L'AIEA travaille actuellement à l'intégration et à l'essai d'instruments nouveaux et améliorés, notamment à leur adaptation à la prochaine génération de véhicules aériens sans pilote.

« Ces innovations permettront à la fois d'augmenter le temps de vol d'un drone et de déterminer les débits équivalents de doses et les spectres gamma en une seule mesure », déclare Danas Ridikas, chef de la Section de la physique de l'AIEA. « Associé à des capacités de prise de vues de haute qualité, le nouveau système permettra aux utilisateurs d'obtenir un modèle de photogrammétrie aérienne 3D complet superposé à des cartes radiologiques et à l'identification des radionucléides. »

« Les technologies fondées sur les véhicules aériens sans pilote seront essentielles pour faire progresser la surveillance radiologique, notamment

pour renforcer l'application de la cartographie environnementale et améliorer la surveillance à long terme des zones contaminées », indique Miroslav Pinak, chef de la Section de la sûreté et du contrôle radiologiques de l'AIEA.

Les données collectées grâce aux systèmes de véhicules aériens sans pilote développés par l'AIEA et validées par la préfecture de Fukushima peuvent permettre d'évaluer les éventuels risques radiologiques et d'aider à établir des plans et stratégies appropriés de remédiation, de décontamination et de gestion des déchets nucléaires au Japon.

Un document technique détaillé de l'AIEA sur les résultats du projet, notamment l'étalonnage des instruments, la validation de la méthode, les mesures in situ de débits de dose et la cartographie des sites de stockage temporaires des déchets radioactifs de la préfecture de Fukushima sera rendu public.

La technologie, la méthode et les possibilités de formation connexes, qui peuvent être mises à la disposition des États Membres qui en font la demande, sont déjà mises en œuvre dans certains pays avec l'appui de l'Agence.

Comment fonctionne la technologie ?

Les véhicules aériens sans pilote sont équipés de détecteurs de rayonnement, de caméras et de dispositifs GPS. Après le décollage d'un véhicule aérien sans pilote, les mesures de rayonnement et autres informations pertinentes sont synchronisées avec sa position GPS exacte et envoyées, en temps réel, au pilote à la station au sol, tout en étant également stockées à bord. Après l'atterrissage, les données détaillées sont intégralement relevées et les informations photographiques et géographiques sont reconstituées avec les mesures de rayonnement corrigées. Les photographies de type satellitaire et les mesures de rayonnement analysées sont ensuite mises à la disposition des décideurs qui peuvent alors prendre des mesures.

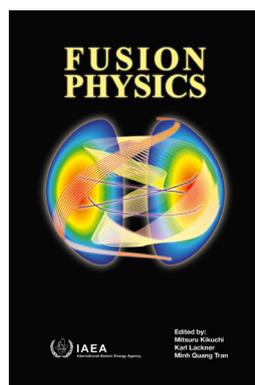
— Par Alexandra Peeva



La fusion nucléaire

Nuclear Fusion est la revue de premier plan internationale spécialisée dans la fusion. Elle couvre tous les aspects de la recherche, théorique et pratique, concernant la fusion thermonucléaire contrôlée. Lancée en 1960, elle publie chaque année quelque 400 nouveaux articles et offre un cadre objectif de grande qualité pour le partage de connaissances au sein de la communauté scientifique de recherche sur la fusion. L’AIEA gère le processus d’examen par des pairs et assure la coordination avec les auteurs et les arbitres scientifiques, ainsi qu’avec l’éditeur universitaire de la revue, le comité et le coéditeur, Éditions de l’IOP. Au cours des dernières années, la teneur de la revue a reflété l’intérêt croissant suscité par les matières utilisées dans les dispositifs de fusion. Parmi les revues de ce type, avec un demi-million d’articles complets téléchargés chaque année, celle-ci est la plus consultée.

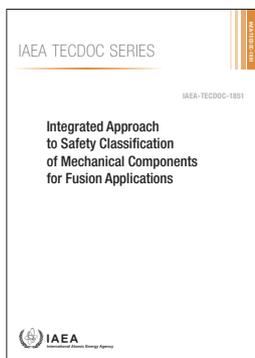
Revue ; doi:10.1088/issn.0029-5515 ; ISSN en ligne : 1741-4326 ; ISSN imprimé : 0029-5515



La physique de la fusion

La publication intitulée *Fusion Physics* est un ouvrage de référence complet pour les étudiants de cycle supérieur et un guide précieux pour les chercheurs plus expérimentés. Elle contient une introduction à la fusion nucléaire, présente son état d’avancement et ses perspectives, et comporte des chapitres spécialisés écrits par des spécialistes du domaine, qui présentent les principaux concepts de la recherche-développement concernant la physique de la fusion. Elle commence par l’exposition des arguments en faveur du développement de la fusion en tant que source d’énergie et aborde également le confinement inertiel et le confinement magnétique. Des chapitres sont consacrés à la physique du confinement, à l’équilibre et à la stabilité des tokamaks, au diagnostic, au chauffage et à la génération de courant par faisceau neutre et ondes de radiofréquence, ainsi qu’aux interactions plasma-paroi. Si le tokamak est le concept privilégié pour la fusion, la publication porte également sur d’autres concepts (confinement hélicoïdal et, de manière plus générale, d’autres configurations magnétiques et inertielles). Cet ouvrage de plus de 1 100 pages est une ressource inégalée pour les physiciens et ingénieurs spécialistes de la fusion.

Publication hors collections ; ISBN : 978-92-0-130410-0 ; 90,00 euros ; 2012 (en anglais)



Approche intégrée du classement de sûreté des composants mécaniques destinés aux applications de la fusion

La publication intitulée *Integrated Approach to Safety Classification of Mechanical Components for Fusion Applications* est la première publication de l’AIEA consacrée au classement de sûreté des composants destinés aux applications de la fusion. Elle met en relief les différences entre les réacteurs de fission et les réacteurs de fusion en ce qui concerne l’identification et le classement des structures, systèmes et composants importants du point de vue de la sûreté, et offre des informations pratiques sur les applications de la fusion. Elle fournit aussi des informations sur l’inclusion des nouvelles conditions additionnelles de dimensionnement, qui ont été ajoutées à la suite de l’examen des guides de sûreté de l’AIEA, après l’accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi.

IAEA-TECDOC-1851 ; 978-92-0-105518-7 ; 18,00 euros ; 2018 (en anglais)

Pour obtenir de plus amples informations ou pour commander une publication, veuillez écrire à l’adresse suivante :

Unité de la promotion et de la vente

Agence internationale de l’énergie atomique

Centre international de Vienne

B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Mél. : sales.publications@iaea.org

Lisez cette publication et d'autres numéros du Bulletin de l'AIEA en ligne sur
www.iaea.org/bulletin

Pour de plus amples informations sur l'AIEA et les travaux qu'elle mène, rendez-vous sur le site
www.iaea.org

ou suivez-nous sur



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique
L'atome pour la paix et le développement