



IAEA

Agence internationale de l'énergie atomique

PERSPECTIVES DE L'AIEA SUR LA FUSION DANS LE MONDE 2024

2^e ÉDITION

**PERSPECTIVES DE L'AIEA
SUR LA FUSION
DANS LE MONDE
2024**

« La course à l'énergie de fusion témoigne de l'ingéniosité et de la persévérance de l'être humain. »

Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA

L'élan qui nous pousse aujourd'hui à concrétiser l'énergie de fusion est incontestable. Au vu des progrès réalisés, j'ai lancé l'année dernière une publication intitulée *Perspectives de l'AIEA sur la fusion dans le monde* qui se veut une référence exhaustive au niveau mondial dans la mesure où elle présente les dernières avancées dans le domaine de l'énergie de fusion. Je suis très heureux de l'accueil favorable qui a été réservé à cette publication.

La course à l'énergie de fusion témoigne de l'ingéniosité et de la persévérance de l'être humain. Pour appuyer les efforts dans ce domaine, j'ai créé le Groupe mondial de l'énergie de fusion, une initiative mondiale qui vise à encourager la collaboration dans toutes les activités concernées. Notre mission est ambitieuse et limpide : accélérer la recherche, le développement, la démonstration et le déploiement de l'énergie de fusion. En fédérant les industriels, les pouvoirs publics, les milieux académiques et les organismes de réglementation, nous jetons les bases d'une communauté de l'énergie de fusion, unie pour atteindre des objectifs communs.

Dans cette entreprise, les gouvernements ont un rôle crucial à jouer. Pour réussir à faire passer l'énergie de fusion du laboratoire au réseau, il faut des investissements publics stratégiques, des appuis politiques solides et une collaboration à l'échelle internationale. Le succès de la communauté mondiale de la fusion dépend de la continuité de ces efforts. J'encourage la mise en place de cadres réglementaires adaptés aux risques, qui apporteront la clarté nécessaire à l'accélération du développement de l'énergie de fusion et attireront les investissements dans ce secteur.

Cette année, j'ai également invité un groupe d'experts internationaux à recenser les éléments clés de la fusion en vue

d'élaborer une feuille de route complète et de proposer des orientations utiles, à court et à moyen terme, aux scientifiques, aux ingénieurs, aux responsables de la réglementation, aux entrepreneurs, aux décideurs et aux parties prenantes du monde entier.

Nous entrons aujourd'hui dans une phase cruciale du développement de l'énergie de fusion. C'est pourquoi il nous faut redoubler d'efforts dans tous les secteurs concernés, qu'il s'agisse de la mise au point des technologies et des matériaux nécessaires, de la consolidation des partenariats public-privé, de la mobilisation de capitaux privés pour atteindre la viabilité commerciale ou encore de la formation d'une main-d'œuvre compétente à l'échelle mondiale. L'énergie de fusion nécessite des connaissances spécialisées dans une grande variété de domaines : travailleurs qualifiés, professionnels du droit, décideurs et spécialistes de la communication, tous apportent leur contribution à l'économie mondiale.

Les investissements dans la recherche sur l'énergie de fusion et dans la commercialisation de cette énergie promettent des avantages économiques importants, qui ne se limitent pas aux possibilités liées à la décarbonation. Les technologies dérivées de la fusion pourront être utilisées dans les domaines de la santé, de la propulsion spatiale, de l'imagerie industrielle, des forages géothermiques et de la gestion des déchets nucléaires, entre autres applications, ce qui ouvre des perspectives commerciales nouvelles qui vont bien au-delà de la production d'énergie.

Alors que nous nous efforçons de surmonter les difficultés que présente cette technologie révolutionnaire, notre détermination est inébranlable : nous devons tirer parti de l'énergie de fusion pour créer un monde écologiquement viable, prospère et pacifique. L'ère de la fusion n'est plus une simple aspiration, c'est une réalité à portée de main. Ensemble, nous pourrions concrétiser cette ambition.

La présente édition des *Perspectives de l'AIEA sur la fusion dans le monde* ne recense pas seulement les avancées et les principales réalisations dans le domaine de la fusion, elle met en lumière les nouveaux projets de centrales à fusion, les étapes de développement envisagées, ainsi que les cadres et les tendances stratégiques en termes d'investissements tant publics que privés. Elle traite également des indicateurs relatifs aux produits de la recherche et présente des perspectives régionales et sectorielles. Je ne doute pas que les *Perspectives de l'AIEA sur la fusion dans le monde* continueront d'offrir des orientations précieuses aux parties prenantes dans les domaines de l'énergie, des politiques et de la recherche, alors qu'ils s'emploient à faire progresser l'énergie de fusion. ■



▲
Le Directeur général de l'AIEA,
Rafael Mariano Grossi, prononce un
discours en Belgique en mars 2024.



« Le développement de l'énergie de fusion est potentiellement un tournant à long terme et un instrument majeur pour bâtir un avenir durable fondé sur la paix et la sécurité. »

Antonio Tajani,
Vice-Président du Conseil, Ministre des affaires étrangères et de la coopération internationale



Antonio Tajani, Vice-Président du Conseil, Ministre des affaires étrangères et de la coopération internationale de l'Italie (avec l'aimable autorisation du Gouvernement italien).

Énergie de fusion : un défi inédit et une chance pour l'avenir

Nous avons l'honneur de co-organiser et d'accueillir la réunion ministérielle inaugurale du Groupe mondial de l'énergie de fusion. Cet événement illustre le soutien du Gouvernement italien à la coopération internationale et notre engagement de longue date en faveur du progrès technologique, moteur essentiel de la croissance, du bien-être et de la prospérité.

La sécurité énergétique est une priorité dans le contexte actuel, marqué par des turbulences géopolitiques croissantes. D'un point de vue politique, l'énergie de fusion recèle un immense potentiel : elle pourrait permettre de répondre à ces défis et d'assurer l'indépendance énergétique, tout en réduisant les tensions géopolitiques liées à l'exploitation des combustibles fossiles. Je

pense également à l'amélioration de l'accès à l'électricité dans de vastes régions du monde encore dépourvues d'infrastructures électriques efficaces.

Le développement de nouvelles technologies dans le secteur nucléaire peut constituer une étape importante sur la voie de la transition énergétique et de la lutte contre les changements climatiques. L'énergie nucléaire a été incluse dans la taxonomie de l'Union européenne en tant qu'énergie propre et je pense que nous ne devons pas laisser passer l'occasion que représente le début de la nouvelle législature européenne. Pour réduire notre dépendance à l'égard des combustibles fossiles, nous devons envisager un bouquet énergétique diversifié dans lequel l'énergie de fusion coexiste avec les énergies renouvelables, l'hydrogène et les technologies nucléaires émergentes comme les petits réacteurs modulaires. En outre, cela aura un impact positif sur les coûts de l'énergie, augmentera la compétitivité de nos entreprises et favorisera la croissance.

En d'autres termes, le développement de l'énergie de fusion est potentiellement un tournant à long terme et un instrument majeur pour bâtir un avenir durable fondé sur la paix et la sécurité.

La course à l'innovation et l'augmentation des investissements sont sur le point de faire de l'énergie de fusion une réalité. L'Italie souhaite rester à l'avant-garde de cet effort, grâce au savoir-faire de ses nombreuses entités publiques et privées qui y participent.

Les efforts technologiques, scientifiques et financiers sont essentiels. Il est crucial de promouvoir la coopération internationale et les partenariats public-privé, afin de rassembler les investissements importants qui sont nécessaires et de démocratiser les infrastructures de pointe et les compétences hautement spécialisées. C'est également l'objectif du Groupe mondial de l'énergie de fusion, qui joue un rôle majeur pour ce qui est d'empêcher qu'un effort scientifique de cette ampleur ne se transforme en une nouvelle arène de compétition géopolitique.

L'Italie a toujours été à la pointe de la recherche technologique et de l'innovation dans le domaine de l'énergie nucléaire, à commencer par le développement du tout premier réacteur nucléaire, qui a permis au physicien italien Enrico Fermi de jeter les bases de la physique nucléaire moderne.

« La course à l'innovation et l'augmentation des investissements sont sur le point de faire de l'énergie de fusion une réalité. »

Aujourd'hui, notre Agence nationale pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable (ENEA) est une institution de premier plan dans le domaine de l'énergie de fusion, et son centre de recherche de Frascati est un exemple clair de partenariat vertueux entre le secteur public, le secteur privé et le monde universitaire.

Je pense également à nos grandes entreprises du secteur de l'énergie, qui ont porté notre

effort d'innovation au-delà des frontières nationales en participant à de nombreux projets novateurs.

L'Italie est prête à partager son savoir-faire et à contribuer à une réduction significative du fossé qui sépare les pays industrialisés et les pays en développement en matière de connaissances. La collaboration universitaire, la formation théorique et professionnelle ainsi que la participation du secteur privé sont au cœur de la nouvelle démarche que nous appliquons à l'égard nos partenaires de développement, en particulier en Afrique. Cette position est également au cœur de la présidence italienne du G7 et de notre action au niveau européen.

C'est un élément très important, car la nouvelle ère de l'énergie nucléaire et de l'énergie de fusion repose sur les épaules des jeunes scientifiques et ingénieurs qui travaillent au mieux de leurs capacités.

Le chemin à parcourir est long et complexe et les enjeux sont importants. Nous devons être conscients que les choix que nous faisons aujourd'hui façonneront le paysage social, économique et géopolitique du monde de demain.

Travaillons ensemble pour assurer un avenir radieux à la prochaine génération.■



Nous sommes tous conscients de la nécessité de trouver une solution permanente aux défis mondiaux que sont les changements climatiques et la sécurité énergétique. Pour y parvenir, nous devons nous engager résolument sur la voie de la décarbonation et garder à l'esprit nos engagements actuels en matière de politiques climatiques, énergétiques et environnementales. Il s'agit notamment d'atteindre le zéro net en termes d'émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 afin de limiter l'augmentation de la température mondiale à 1,5 °C. Dans le même temps, nous devons transformer nos systèmes économiques et sociaux en mettant l'accent sur le zéro émissions nettes, les économies circulaires et la résilience climatique, tout en assurant une croissance durable et inclusive, en renforçant nos économies et en accélérant la transition énergétique.

Il convient de réaffirmer l'importance des approches scientifiques dans l'élaboration des politiques visant à lutter contre la crise climatique et environnementale mondiale. Cela nécessite une perspective technologiquement neutre qui explore toutes les solutions envisageables pour satisfaire des besoins énergétiques en augmentation à l'échelle mondiale en vue d'un développement durable.



Gilberto Pichetto Fratin, Ministre italien de l'environnement et de la sécurité énergétique (avec l'aimable autorisation du Gouvernement italien).

L'énergie de fusion peut fournir une solution durable en la matière. Réussir à produire de l'énergie de fusion, et donc disposer d'une source d'énergie propre, potentiellement sans émissions, sûre et pratiquement illimitée recèle la promesse d'avantages sociaux, environnementaux et économiques significatifs. Dans la perspective de la commercialisation de centrales à fusion, il est prévu de concevoir des installations de démonstration au cours de la décennie à venir, dans le cadre de vastes programmes de recherche financés par des gouvernements, par l'Union européenne et par des entreprises du monde entier. La collaboration internationale permettra d'accélérer le développement et la démonstration des technologies de fusion, sachant qu'il faudra une mobilisation mondiale pour relever les défis de la recherche, et de mettre en place des chaînes d'approvisionnement et de former une main-d'œuvre à l'échelle internationale.

Le secteur mondial de l'énergie de fusion connaît une accélération significative : de plus en plus d'entreprises privées travaillent au développement aussi bien de la fusion magnétique que de la fusion inertielle, ou encore d'approches mixtes, qui attirent des investissements substantiels de la part d'entités privées et de gouvernements. Certaines entreprises prévoient de construire des centrales à fusion capables de produire de l'électricité entre 2040 et 2050, soit avant l'échéance du

« Nous sommes tous conscients de la nécessité de trouver une solution permanente aux défis mondiaux que sont les changements climatiques et la sécurité énergétique. »

Gilberto Pichetto Fratin
Ministre de l'environnement
et de la sécurité énergétique

milieu du siècle envisagée dans les programmes de recherche publics. Dans les années à venir, le projet ITER fournira des informations précieuses sur la mise en service, les scénarios plasma, la gestion du tritium et les aspects nucléaires, la sûreté et la disponibilité des installations, la télémanipulation, la dissipation de la puissance dégagée par le plasma et la gestion des déchets radioactifs. Le projet ITER a déjà fourni des informations utiles sur nombre des technologies de construction des composants et sous-systèmes des centrales pour la production d'électricité fondée sur la fusion. Récemment, les responsables d'ITER ont annoncé leur intention d'étendre l'approche fondée sur le partenariat public-privé sur laquelle repose le projet en associant des entreprises du secteur privé aux initiatives en matière de fusion, notamment des entreprises travaillant au développement d'installations de fusion, des utilisateurs finaux, des acteurs des chaînes d'approvisionnement, des universités et des centres de recherche. Le projet ITER ainsi que le développement de nouveaux dispositifs soulignent la nécessité d'associer les acteurs de la chaîne d'approvisionnement dès le début du processus de conception afin d'optimiser l'expérience et les compétences.

Lors du Sommet du G7 tenu sous la présidence de l'Italie, les dirigeants des sept États membres, rappelant un engagement pris dans le communiqué issu de la réunion des ministres du climat, de l'énergie et

de l'environnement du G7 (Communiqué de Turin), ont inclus l'énergie de fusion parmi les domaines dans lesquels une collaboration est nécessaire pour relever les défis mondiaux, et se sont engagés à créer le groupe de travail du G7 sur l'énergie de fusion. Cela démontre une fois de plus que le rôle important de l'énergie de fusion dans la réalisation des objectifs à long terme en matière de sécurité énergétique et d'action climatique est de plus en plus reconnu.

Le 21 septembre 2023, j'ai créé la Plateforme nationale pour un nucléaire durable et chargé les principales organisations scientifiques et entreprises opérant dans le domaine nucléaire d'élaborer un possible plan d'action permettant de reconsidérer la production d'énergie nucléaire comme une source d'énergie décarbonée et livrable dans le cadre du bouquet énergétique italien. La Plateforme a évalué l'utilité et la faisabilité de l'exploitation de l'énergie nucléaire en Italie à partir de 2035, pour soutenir le déploiement complet des énergies renouvelables, et s'est parallèlement intéressée à l'énergie de fusion, en termes de recherche-développement et de déploiement à moyen et à long terme.

Par conséquent, sur la base des données nucléaires et de l'analyse de la Plateforme nationale pour un nucléaire durable, le Plan national italien pour l'énergie et le climat prévoit notamment de réintégrer l'énergie nucléaire au bouquet énergétique de l'Italie, en incorporant des technologies de fission durables, telles que les petits réacteurs modulaires, les réacteurs modulaires avancés et les microréacteurs, et en envisageant une éventuelle contribution de l'énergie de fusion à partir de 2050 environ.

Bien que l'Italie ait cessé de produire de l'énergie nucléaire il y a près de 40 ans, les organismes de recherche publics et les industriels ont continué à investir dans les technologies nucléaires et à faire avancer la recherche dans ce domaine, énergie de fusion comprise. L'Italie peut donc maintenant tirer parti du savoir-faire et des capacités scientifiques et techniques de ses organismes de recherche, de ses universités, de ses entreprises et de ses industries établies pour promouvoir une industrie de la fusion solide dans un cadre national cohérent.

Le Gouvernement italien est déterminé à développer la science et la technologie de l'énergie de fusion. Sous l'égide du Ministère de l'environnement et de la sécurité énergétique, l'Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable (ENEA) coordonne déjà les activités de 21 partenaires nationaux, dont des organismes de recherche, des universités et des entreprises de premier plan, pour favoriser les avancées dans le domaine de la technologie de la fusion. Les entreprises italiennes ont obtenu plus de 1,5 milliard d'euros de contrats pour le développement de systèmes et de composants pour ITER, notamment pour la préparation des opérations et les prochaines étapes.

Récemment, l'entreprise publique RSE a également commencé à travailler sur la mise au point de matériaux pour la fusion par confinement inertiel ; grâce à cette expertise, RSE s'impose à l'échelle internationale comme un partenaire important dans le développement de l'énergie de fusion.

L'Italie accueille de nombreuses installations de recherche expérimentale sur la fusion, notamment les centres de recherche de l'ENEA à Frascati, près de Rome, et à Brasimone, dans l'Apennin septentrional, le consortium RFX à Padoue et l'ISTP-CNR à Milan. Ces installations contribuent toutes de manière significative aux progrès scientifiques dans le domaine de l'énergie de fusion. Le Divertor Tokamak Test, nouvelle installation de recherche, est en cours de construction au centre de recherche de l'ENEA à Frascati, dans le cadre d'un consortium public-privé réunissant l'ENEA, l'entreprise du secteur de l'énergie Eni et divers universités et instituts italiens, afin de démontrer la technologie du divertor pour les futures installations de fusion.

Eni a été l'une des premières entreprises du secteur de l'énergie à investir dans la technologie de la fusion en devenant un actionnaire stratégique de Commonwealth Fusion Systems en 2018, dans le but d'accélérer l'industrialisation de la fusion.

Pour trouver des solutions aux défis qui restent à relever pour démontrer la faisabilité de l'énergie de fusion, nous devons élargir le champ de la collaboration internationale en recherchant de nouveaux partenariats pour renforcer la recherche-développement, en encourageant les partenariats public-privé et en stimulant l'innovation et le partage des ressources dans le domaine du développement de la fusion.

Alors que la fusion passe du statut d'entreprise scientifique à celui de réalité industrielle, et compte tenu des efforts encore nécessaires pour combler les lacunes technologiques, il est essentiel que nous continuions à entretenir le climat porteur fondé sur la collaboration et le partage des infrastructures qui a jusqu'à présent caractérisé les efforts mondiaux en matière de fusion. Il convient d'établir des cadres clairs en matière de propriété intellectuelle pour les procédés et les produits des centrales à fusion pour permettre un transfert de technologie efficace et soutenir la croissance mondiale du marché de la fusion.

En même temps, je voudrais souligner l'importance d'élaborer de nouvelles approches réglementaires pour assurer un niveau de sûreté élevé et proportionnel aux risques très limités que représente la fusion. Ces approches doivent tenir compte du caractère novateur de cette technologie émergente, afin que les centrales à fusion puissent être déployées et exploitées en toute sûreté. La collaboration internationale entre les gouvernements, l'AIEA et les différentes autorités de sûreté est essentielle pour une approche coordonnée de la réglementation entre les pays qui souhaitent faire progresser la fusion, et elle apporte au secteur de la fusion le niveau de prévisibilité et de confiance dont il a besoin.

Grâce à sa situation géographique, l'Italie pourrait devenir à l'avenir un centre méditerranéen dédié à l'énergie de fusion - dans le cadre du plan Mattei (« Piano Mattei ») - et se positionner comme chef de file de l'action visant à relever les défis régionaux en matière de sécurité énergétique et de durabilité, et à promouvoir le renforcement des capacités. L'Italie est prête à partager ses vastes connaissances et compétences spécialisées pour aider des pays comme l'Algérie,

l'Égypte, le Maroc et la Tunisie à faire progresser la technologie de la fusion. Des initiatives de développement de la main-d'œuvre et des programmes éducatifs ciblés peuvent constituer des points d'entrée pour l'acquisition de compétences qui peuvent ensuite être étendues à des applications liées à la fusion.

L'Italie dispose d'une combinaison presque unique de compétences scientifiques, technologiques, techniques et industrielles, ce qui lui permet de jouer un rôle de premier plan dans le développement et la construction d'installations de fusion en Italie et en Europe.

C'est pourquoi l'Italie est fière d'accueillir et de co-organiser la réunion ministérielle inaugurale du Groupe mondial de l'énergie de fusion. Le Groupe jouera un rôle de catalyseur à cette étape charnière où des efforts concertés sont indispensables pour faire avancer rapidement le développement de l'énergie de fusion. Alors que les efforts visant à concrétiser l'énergie de fusion prennent de l'ampleur à l'échelle mondiale, la capacité de cette technologie à fournir une solution énergétique abondante, propre et durable pour l'avenir devient de plus en plus évidente, comme l'a également reconnu le G7. Les récentes percées dans le domaine de la fusion ont suscité un intérêt et des investissements considérables de la part d'un large éventail de parties prenantes.

La réunion inaugurale du Groupe mondial de l'énergie de fusion en Italie, en amont de la Conférence sur les changements climatiques (COP29), représente un moment charnière dans la recherche mondiale de solutions énergétiques avancées. Cette réunion vise à maximiser l'impact et la visibilité des discussions sur l'énergie de fusion dans le cadre plus large des négociations internationales sur les changements climatiques. Non seulement le Groupe mondial de l'énergie de fusion soulignera l'importance des avancées scientifiques dans le domaine de l'énergie de fusion, mais en outre il facilitera la coopération internationale et les investissements dans cette technologie révolutionnaire, pour jouer un rôle décisif dans l'édification de l'avenir de l'énergie afin de garantir la réalisation des objectifs climatiques mondiaux et d'assurer une production d'énergie durable à long terme.

L'Italie est résolue à faire progresser l'énergie de fusion à l'échelle mondiale et s'engage à soutenir et à financer la recherche et l'innovation dans ce secteur. Le programme dynamique de l'Italie en matière d'énergie de fusion mobilisera un grand nombre d'organismes de recherche, d'universités et d'acteurs industriels italiens et reposera sur une collaboration internationale avec l'AIEA.

L'Italie se félicite des travaux de l'AIEA et de ses États Membres dans le domaine de l'énergie de fusion et continuera à les promouvoir sans réserve.■

REMERCIEMENTS

L'élaboration de la présente publication intitulée *Perspectives de l'AIEA sur la fusion dans le monde 2024* a été coordonnée par Sayed Ashraf et dirigée par Matteo Barbarino.

Personnes ayant collaboré à la rédaction et à l'examen du texte

Anikeev, A.	Corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom » (Fédération de Russie)
Artisiuk, V.	Agence internationale de l'énergie atomique
Asdic, M.	Agence internationale de l'énergie atomique
Ashraf, S.	Agence internationale de l'énergie atomique
Barbarino, M.	Agence internationale de l'énergie atomique
Barton, J.	Helion Energy (États-Unis d'Amérique)
Bellehumeur, C.	Stellarex (États-Unis d'Amérique)
Catena, G.	Gauss Fusion (Allemagne)
Chae Kim, W.	Institut coréen de l'énergie de fusion (République de Corée)
Cheong, C.	Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni (Royaume-Uni)
Donovan, J.	Agence internationale de l'énergie atomique
Federici, G.	EUROfusion (Allemagne)
Finnerty, M.	Agence internationale de l'énergie atomique
Ganzarski, N.	nT-Tao (Israël)
Goodman, A.	TAE Technologies (États-Unis d'Amérique)
Jasper, A.	Zap Energy (États-Unis d'Amérique)
Johnson, D.	General Fusion (Canada)
Kaneko, T.	Agence internationale de l'énergie atomique
Ma, T.	Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis d'Amérique)
Obeng Oforiwa, P.	Agence internationale de l'énergie atomique
Paluska, J.	Commonwealth Fusion Systems (États-Unis d'Amérique)
Sciortino, F.	Proxima Fusion (Allemagne)
Solomon, W.	General Atomics (États-Unis d'Amérique)
Strömstedt, L.	Novatron Fusion Group (Suède)
Subbiah, I.	Commonwealth Fusion Systems (États-Unis d'Amérique)
Surrell, J.	Longview Fusion Energy Systems (États-Unis d'Amérique)
Wagner, R.	Agence internationale de l'énergie atomique
White, S.	Tokamak Energy (Royaume-Uni)
Wurzel, S.	Fusion Energy Base (États-Unis d'Amérique)
Yoshimura, N.	Helical Fusion (Japon)
Yoshiteru, S.	Instituts nationaux des sciences et technologies quantiques (Japon)
Zhuang, G.	Université chinoise des sciences et de la technologie (Chine)

La présente publication a bénéficié d'un appui précieux du Gouvernement japonais.

Progrès ¹ réalisés sur la fusion

¹⁷ Centrales à fusion

Contexte et ²⁹ scénarios

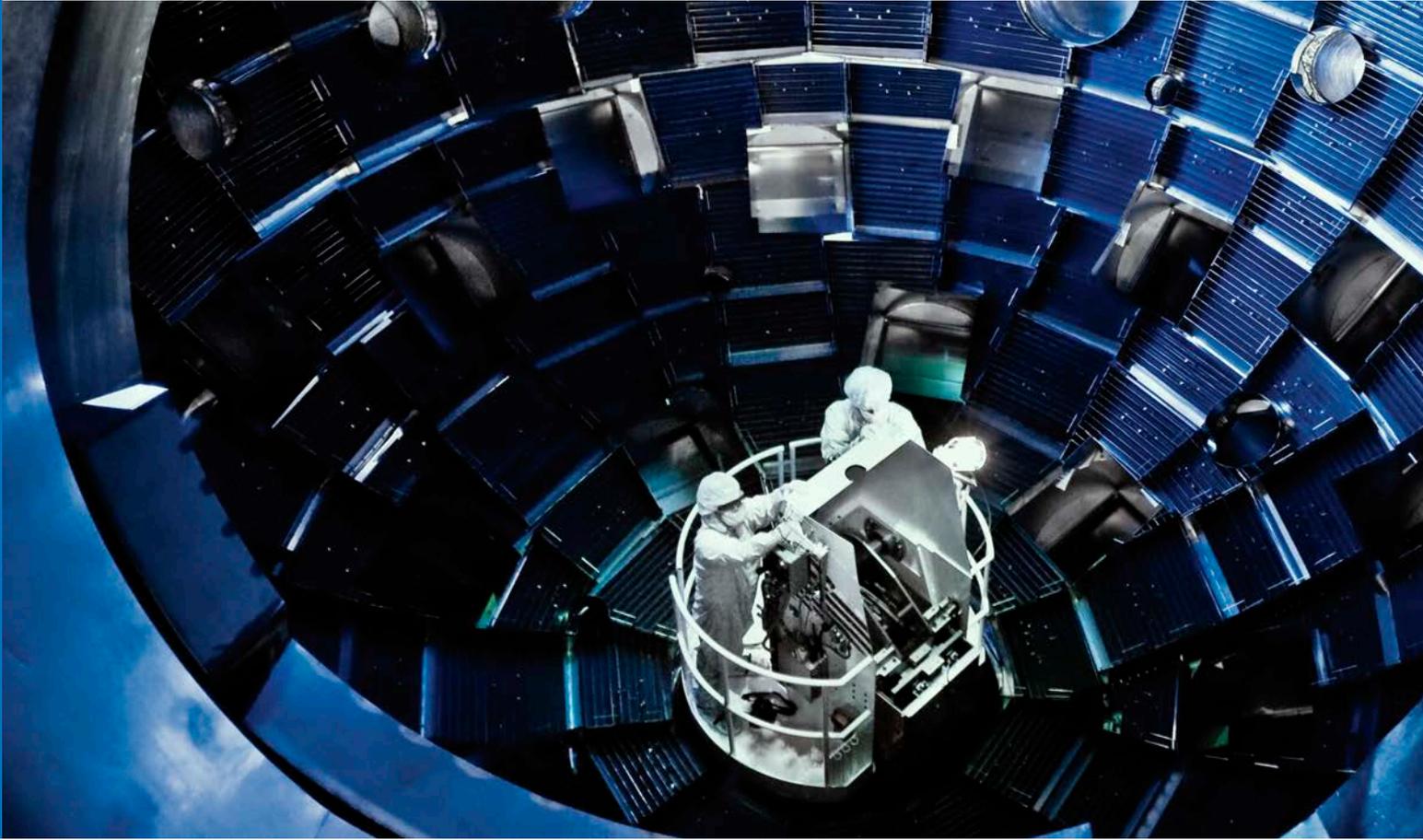
45 Perspectives

La fusion ⁶³
en chiffres

Progrès sur la fu

réalisés sion

Avancées et
percées récentes



Premier concept de fusion par confinement inertiel

1960

Invention du laser

1970

Laser Janus

Publication d'un article important

Argus

Shiva

1980

Nova (30 kJ)

1990

Décision déterminante sur la NIF

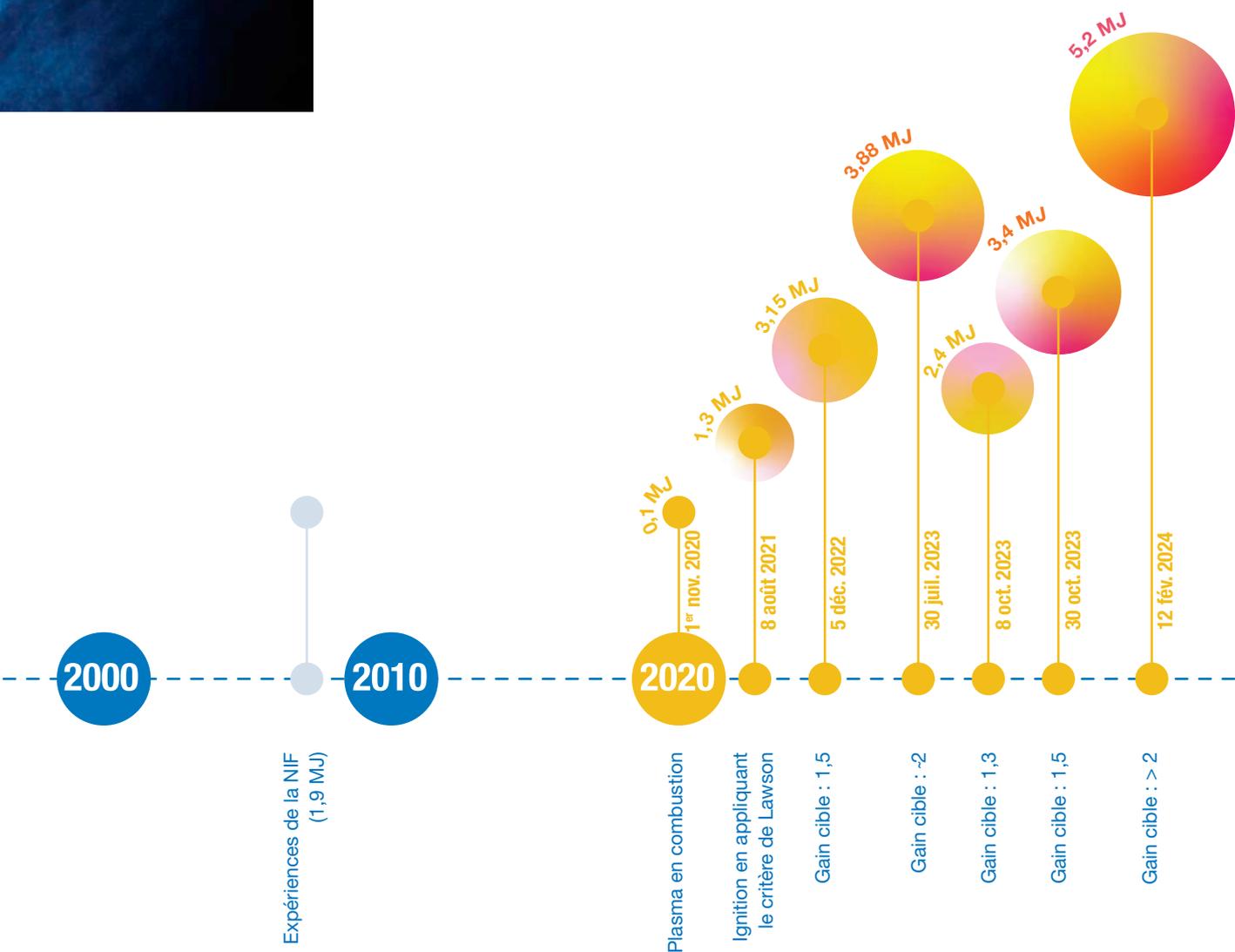


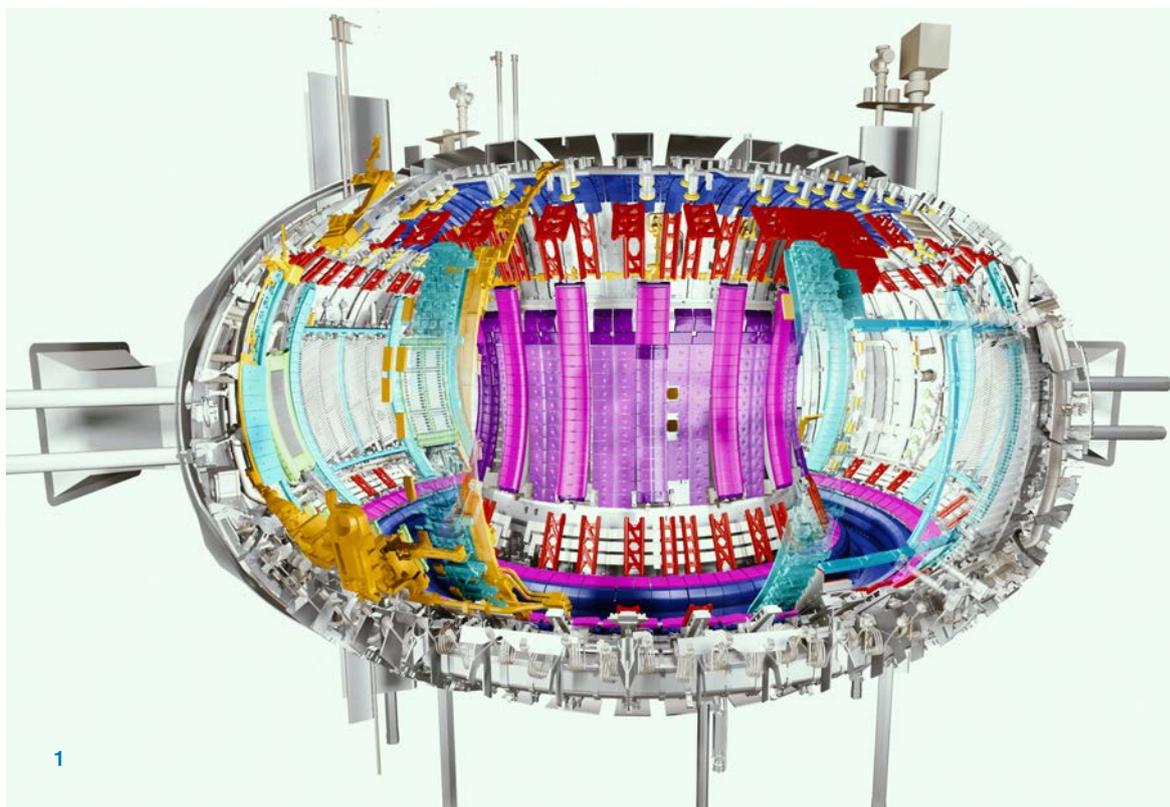
La NIF atteint le seuil d'ignition à quatre reprises

Des progrès ont continué d'être réalisés à l'Installation nationale d'ignition (NIF)

Depuis qu'ils sont parvenus à atteindre le seuil d'ignition de l'énergie de fusion en décembre 2022 [1], les chercheurs du Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis) ont réussi à reproduire cette prouesse à quatre reprises au moins dans le cadre de quatre expériences réalisées en 2023 et début 2024. Lors de l'expérience la plus récente, ils ont obtenu un rendement record de 5,2 MJ et un gain supérieur à 2. ■

◀ La NIF située au Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis) [avec l'aimable autorisation du Laboratoire national Lawrence de Livermore (États-Unis)].





JET établit un record mondial et entame sa phase de déclassement

Le déclassement du Tore européen commun (JET) a commencé au terme de 40 ans d'opération et à l'issue des dernières expériences menées avec le mélange de combustible deutérium-tritium jusqu'à la fin de 2023. Il se poursuivra jusqu'en 2040 environ et fournira des informations précieuses aux spécialistes de la fusion qui auront la possibilité d'analyser l'évolution des matériaux à l'intérieur de la cuve après des années de fonctionnement.

Lors des dernières expériences menées en décembre 2023, JET a franchi une étape décisive [2]. Les scientifiques ont établi un record mondial en maintenant la réaction de fusion pendant 5 secondes, produisant ainsi 69 MJ d'énergie avec un minimum de combustible. Ils ont étudié des techniques innovantes, telles que l'inversion de la forme du plasma pour en améliorer le confinement. En outre, ils ont dirigé intentionnellement un faisceau d'électrons à haute énergie, produits lors de disruptions du plasma, sur la paroi interne pour mieux comprendre les mécanismes de contrôle et d'endommagement du faisceau. ■

▲
1 Vue des câbles, des composants et des systèmes de l'intérieur de la cuve de JET [avec l'aimable autorisation de l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni (UKAEA) (Royaume-Uni)].

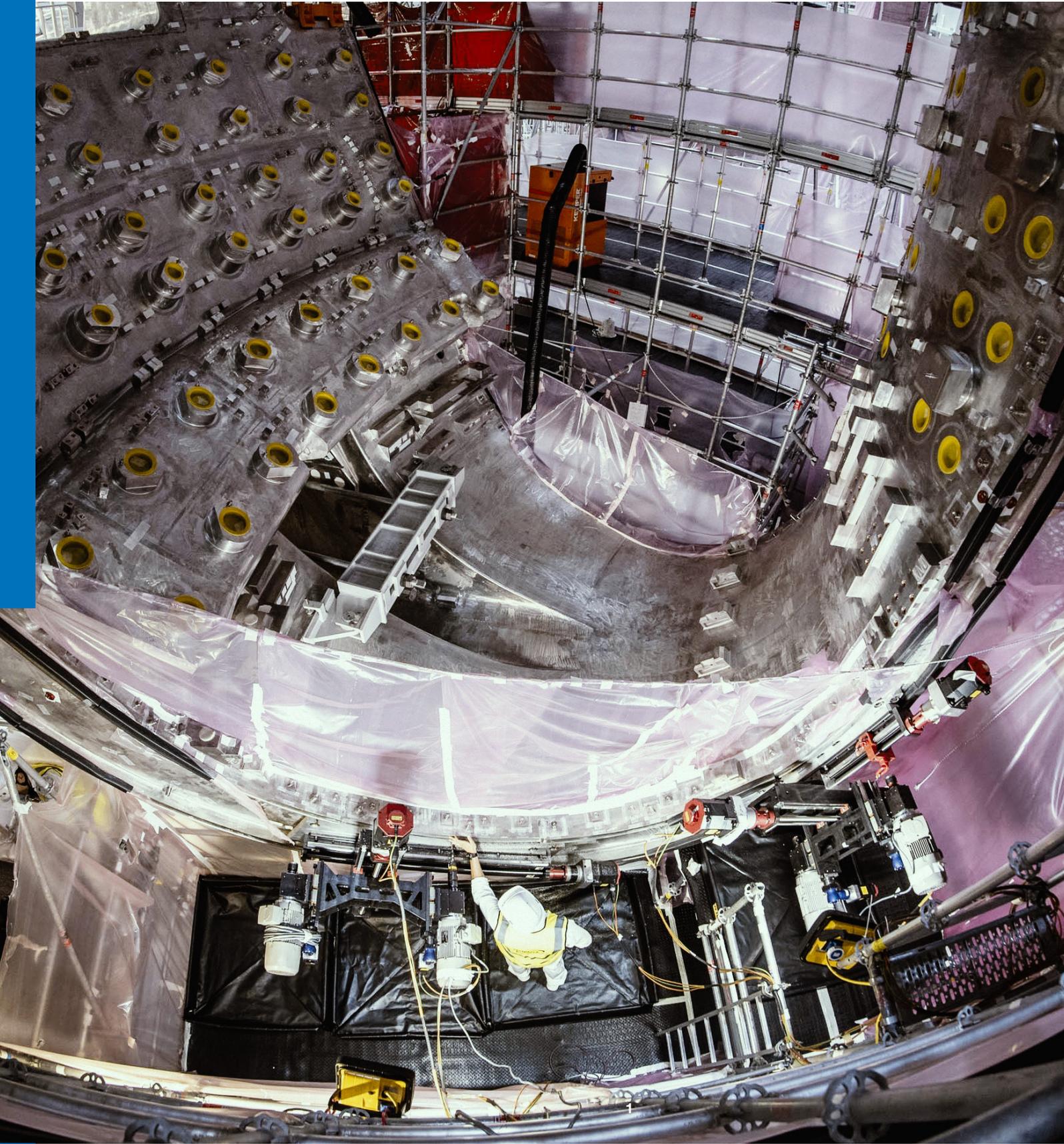
▲
2 Vue aérienne du site du projet ITER en juillet 2024 [avec l'aimable autorisation de l'Organisation ITER (France)].



Nouveau scénario de référence pour le projet ITER

Le projet ITER est passé par une période de transition et les activités se poursuivent désormais en fonction d'un nouveau scénario de référence. Les réparations de composants clés suivent leur cours conformément au calendrier prévu. Les activités de construction, de fabrication, d'assemblage et de mise en service du système continuent de progresser. Au terme d'un d'examen qui a duré plus d'un an, une nouvelle proposition de scénario de référence a été soumise au Conseil ITER en juin 2024 et ce scénario sert désormais d'échéancier de référence.

La découverte et l'analyse de non-conformités géométriques dans les joints biseautés de plusieurs secteurs de la chambre à vide, ainsi que la fissuration par corrosion sous contrainte due au chlorure dans les circuits de refroidissement des écrans thermiques, ont entraîné un retard dans l'assemblage du tokamak ITER en raison des réparations à effectuer. Dans le même temps, une évaluation des causes profondes, dont un auto-examen de la culture de la qualité mise en place dans le cadre du projet, a donné lieu à une réorganisation en vue de se préparer aux prochains défis à relever. Des discussions approfondies ont eu lieu avec l'Autorité de sûreté nucléaire française afin d'améliorer la démonstration de sûreté associée à l'octroi d'autorisation pour le projet ITER. Entre-temps, les systèmes d'alimentation électrique, l'usine cryogénique et le circuit d'eau de refroidissement ont été installés et pour l'essentiel mis en service. Toutes les bobines de champ poloïdal et de champ toroïdal ont été livrées, de même que la plupart des modules du solénoïde central et d'autres composantes de première importance. ■





La tâche la plus importante de l'année écoulée a consisté à intégrer ces éléments dans un nouveau scénario de référence qui soit réaliste.

Les étapes d'assemblage et d'exploitation précédemment envisagées sont désormais regroupées dans la proposition qui a été établie. Les risques techniques et opérationnels sont atténués grâce à deux mesures : d'une part, l'intégration du divertor, de blocs de blindage, d'un premier mur sacrificiel et d'autres composants de réduction des risques dans une machine plus complète avant la mise en service initiale, et d'autre part, la réalisation d'essais complets sur certaines bobines de champ toroïdal et de champ poloïdal avant leur installation.

Les opérations de recherche commenceront en 2034 par une période de 27 mois consacrée à de vastes recherches expérimentales sur les plasmas d'hydrogène et de deutérium-deutérium, et aboutiront, en 2036, à l'exploitation du tokamak en impulsions longues à pleine puissance magnétique et avec un courant plasma (15 MA).

Dans l'ensemble, la phase de démarrage des opérations de recherche servira à faire la démonstration de l'intégration des systèmes nécessaires aux opérations de fusion à l'échelle industrielle. La phase d'exploitation du deutérium-tritium, initialement prévue pour 2035 dans le scénario de référence précédent, est reportée de quatre ans et commencera en 2039. ■

◀ La métrologie joue un rôle essentiel dans la réparation des secteurs de la chambre à vide d'ITER, notamment dans le positionnement, avec une précision micrométrique, des fraiseuses permettant d'éliminer l'excédent de matière et de retrouver la géométrie nominale [avec l'aimable autorisation de l'Organisation ITER (France)].



2034 Début des expériences avec les plasmas d'hydrogène et de deutérium-deutérium



2036 Début de l'exploitation en impulsions longues à pleine puissance magnétique et avec un courant plasma



2039 Début de l'exploitation du deutérium-tritium

De nouveaux progrès réalisés depuis le premier numéro des *Perspectives de l'AIEA sur la fusion dans le monde*

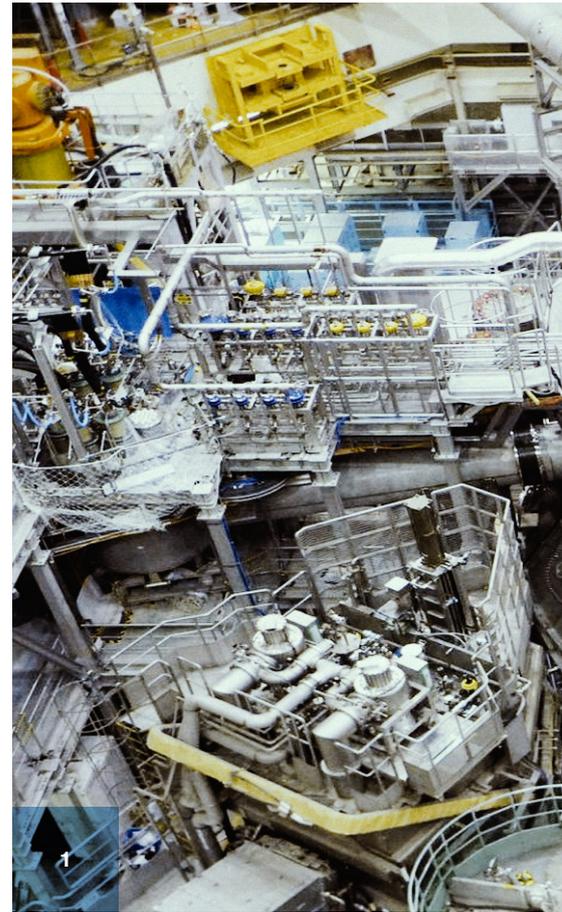
Le tokamak JT-60SA a produit son premier plasma [3]. Haut de quatre étages, il est conçu pour confiner du plasma chauffé à 200 millions de degrés Celsius pendant une centaine de secondes, soit beaucoup plus longtemps que les grands tokamaks précédents. Ses plasmas, très semblables à ceux prévus pour ITER, devraient permettre aux physiciens d'étudier la stabilité du plasma et la manière dont elle affecte la production d'énergie de fusion sur un long laps de temps, puis d'en tirer des enseignements qui pourront être appliqués aux prochaines générations de tokamaks. Au Japon, l'accélérateur linéaire prototype de l'installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion (IFMIF) a été installé à Rokkasho. ■

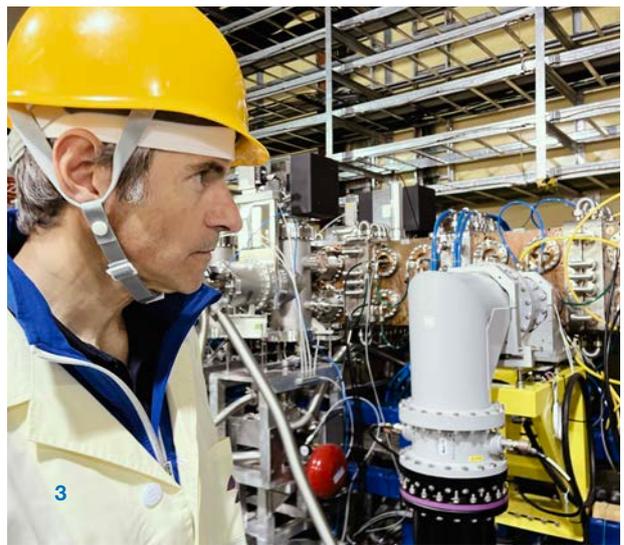
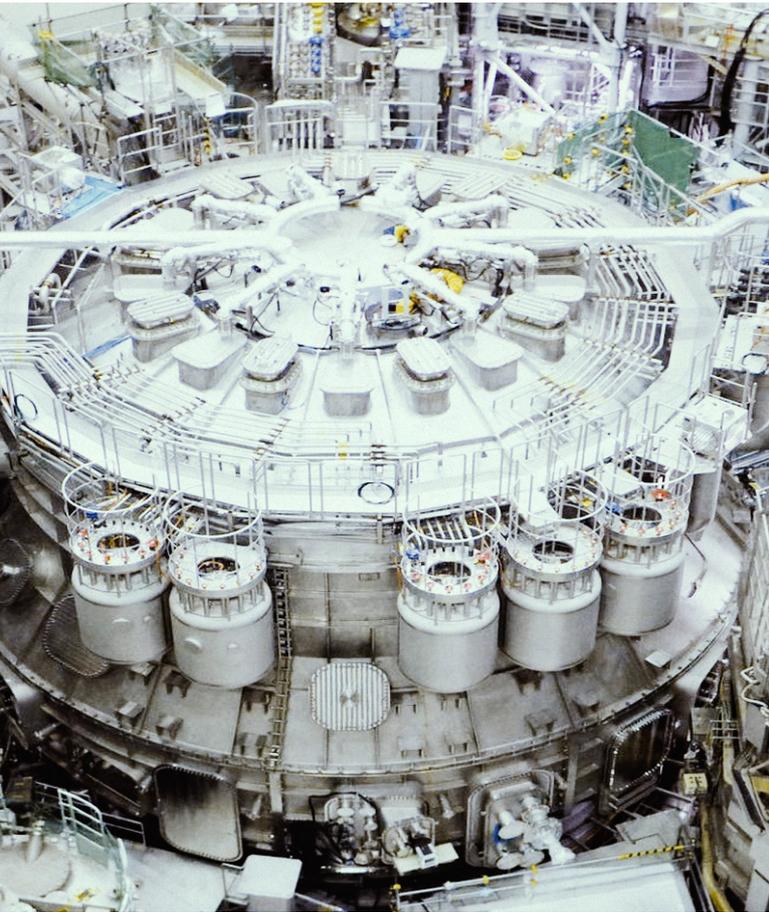
En Chine, le tokamak supraconducteur expérimental avancé (EAST) a réussi à produire un plasma stable en mode de confinement élevé pendant

403 secondes [4]. Cette performance lui a permis d'améliorer son record initial de 101 secondes établi en 2017. Les particules ont été portées à des niveaux de température et de densité très élevés pendant la production de plasma en mode de confinement élevé. Cette avancée permettra d'augmenter l'efficacité de la production d'énergie des futures centrales à fusion. Toujours en Chine, le tokamak HL-3 a fonctionné pour la première fois en mode de confinement élevé et généré un courant dans le plasma d'un million d'ampères grâce à l'amélioration des systèmes de chauffage, de production, de contrôle, de diagnostic et d'alimentation électrique. ■

Les chercheurs de l'Institut coréen de l'énergie de fusion, qui travaillent sur le tokamak supraconducteur expérimental avancé de Corée (KSTAR), sont parvenus à atteindre une température de 100 millions de degrés Celsius pendant

48 secondes et à maintenir un mode de confinement élevé du plasma pendant plus d'une centaine de secondes, établissant par là même un nouveau record. Ce résultat fait suite au succès qu'ils avaient obtenu en 2021 en maintenant un mode de confinement élevé du plasma pendant 30 secondes, ce qui avait constitué une avancée considérable dans la recherche sur l'énergie de fusion. L'objectif est de parvenir à maintenir des températures de plasma de l'ordre de 100 millions de degrés pendant 300 secondes d'ici 2026. À l'instar d'ITER, pour lequel il a été décidé de remplacer le divertor en béryllium par un divertor en tungstène, le KSTAR fonctionne désormais avec un divertor en tungstène. ■





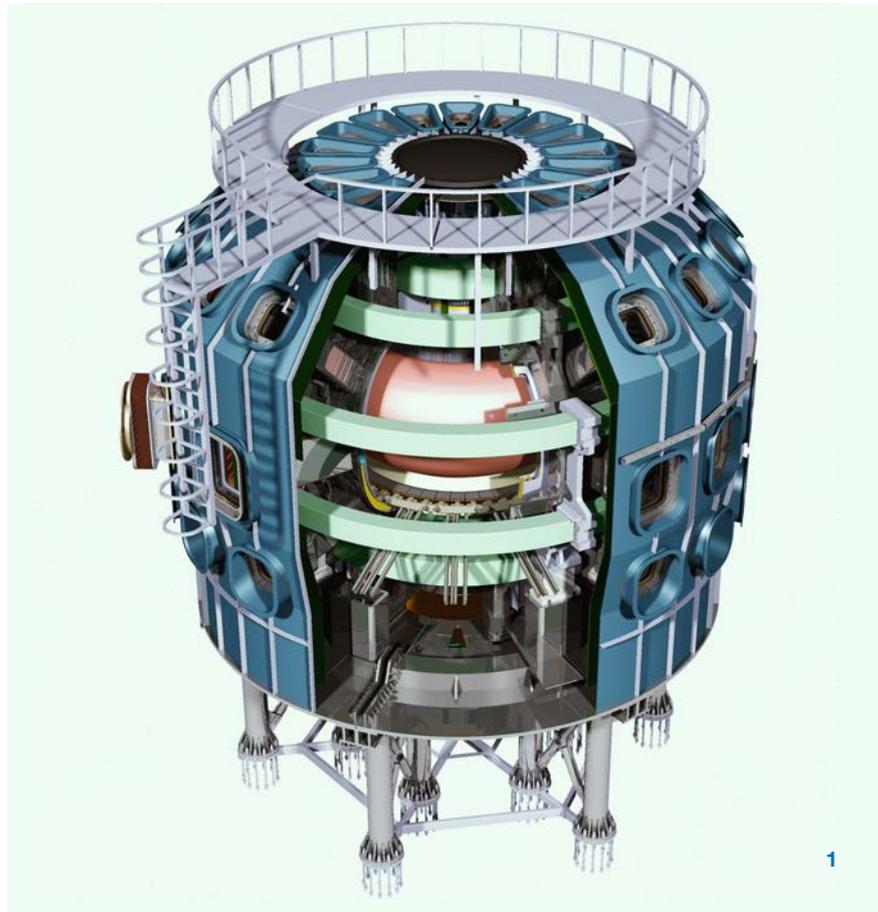
1 Conçu et construit conjointement par le Japon et l'Union européenne (UE), le JT-60SA est le plus grand tokamak actuellement en service [avec l'aimable autorisation des Instituts nationaux des sciences et technologies quantiques (Japon)].

2 Le tokamak KSTAR à l'Institut coréen de l'énergie de fusion [avec l'aimable autorisation de l'Institut coréen de l'énergie de fusion (République de Corée)].

3 Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, visite l'accélérateur linéaire prototype de l'IFMIF à l'Institut de fusion de Rokkasho lors de sa visite au Japon [avec l'aimable autorisation des Instituts nationaux des sciences et technologies quantiques (Japon)].

4 Intérieur du tokamak EAST [avec l'aimable autorisation de l'Institut de physique des plasmas de l'Académie des sciences de Chine (Chine)].

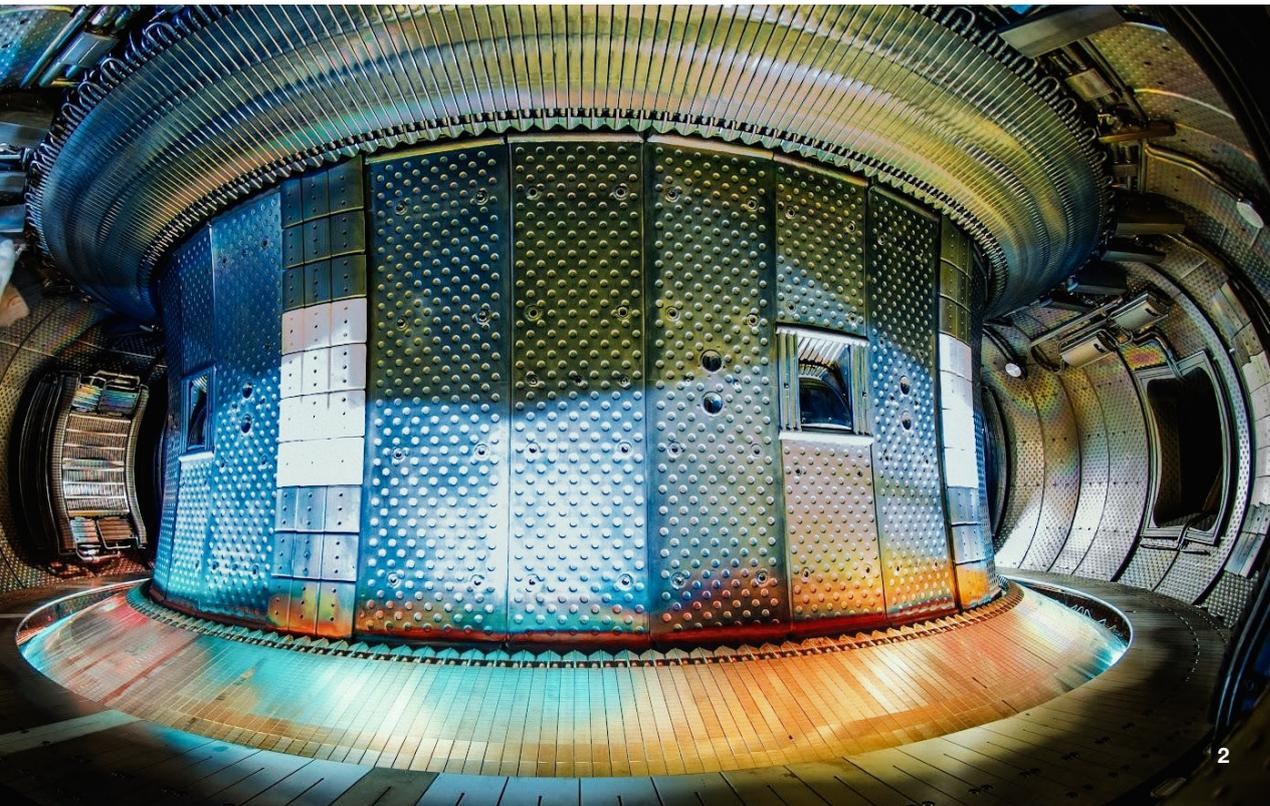




En Italie, les travaux de construction du DTT (Divertor Tokamak Test), un nouveau tokamak supraconducteur consacré à l'étude de solutions avancées de divertor pour les centrales à fusion, se sont poursuivis. Composé de nombreux instituts de recherche italiens et partenaires internationaux, dont l'une des plus grandes entreprises énergétiques du monde, le consortium chargé de la mise en œuvre du projet DTT a réuni près de 500 millions d'euros pour la construction de l'installation. Le DTT servira principalement à étudier les phénomènes physiques et à tester la technologie des concepts de dissipation de puissance dégagée par le plasma qui pourraient être utilisés dans la centrale de démonstration européenne (EU-DEMO). ■

À l'instar du KSTAR, le tokamak français WEST muni d'un divertor en tungstène est entré en fonctionnement sans heurt sur le site du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives de Cadarache. Au cours de la campagne expérimentale initiale, une fluence neutronique élevée a été produite grâce à une série d'impulsions de plasma d'une durée d'environ une minute chacune, ce qui a permis de démontrer la durabilité et la performance de ce nouveau composant. En outre, dans le cadre d'une collaboration, des chercheurs du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France) et du Laboratoire de physique des plasmas de Princeton (États-Unis) ont franchi une étape importante en maintenant le plasma de fusion à environ 50 millions de

degrés Celsius pendant une durée record de six minutes [5]. Cette percée, obtenue en injectant 15 % d'énergie en plus et en doublant la densité du plasma par rapport aux tentatives précédentes, démontre le potentiel des dispositifs de fusion avec revêtement en tungstène pour les futures centrales à fusion. ■



1 Représentation de l'installation DTT
[avec l'aimable autorisation du consortium chargé du projet DTT (Italie)].

2 Le tokamak WEST équipé de son divertor en tungstène activement refroidi
[avec l'aimable autorisation du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France)].



1 La chambre à vide en acier du SPARC est arrivée en 2024 [avec l'aimable autorisation de la société Commonwealth Fusion Systems (États-Unis)].



2 Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, visite la salle du tokamak SPARC, prête pour l'assemblage des composants.

Aux États-Unis d'Amérique (États-Unis) le tokamak DIII-D, installation nationale de fusion exploitée par General Atomics pour le compte du Département de l'énergie, a fait l'objet d'une importante modernisation, avec l'installation de nouveaux systèmes de contrôle du plasma, d'outils de diagnostic avancés et de systèmes améliorés de chauffage et de génération de courant, ainsi que des améliorations apportées au système du divertor. Le DIII-D est à présent doté d'outils avancés qui lui permettront de fonctionner en simulant les besoins d'une centrale à fusion. Juste avant cette modernisation, les expériences menées avec le DIII-D ont permis d'atteindre,



au même moment, des conditions de haute densité et de confinement élevé du combustible, ce qui n'avait jamais été réalisé simultanément auparavant [6]. Ce régime de fonctionnement répond à des prescriptions fondamentales dans de nombreuses conceptions de centrales à fusion dans le monde et laisse entrevoir la possibilité de produire une énergie de fusion à un coût attractif. En outre, lors d'expériences réalisées dans le DIII-D, des chercheurs du Laboratoire de physique des plasmas de Princeton ont démontré que leur modèle d'intelligence artificielle (IA), dont l'apprentissage s'est effectué uniquement à partir de données expérimentales antérieures, pouvait

prévoir des instabilités potentielles du plasma, connues sous le nom d'instabilités en mode de déchirement, jusqu'à 300 millisecondes à l'avance [7]. Le contrôleur fondé sur l'IA a été capable de prédire et d'éviter les instabilités avant qu'elles ne surviennent, ce qui ouvre la voie à un contrôleur capable de maintenir en temps réel un régime de plasma stable et puissant dans les centrales à fusion. ■

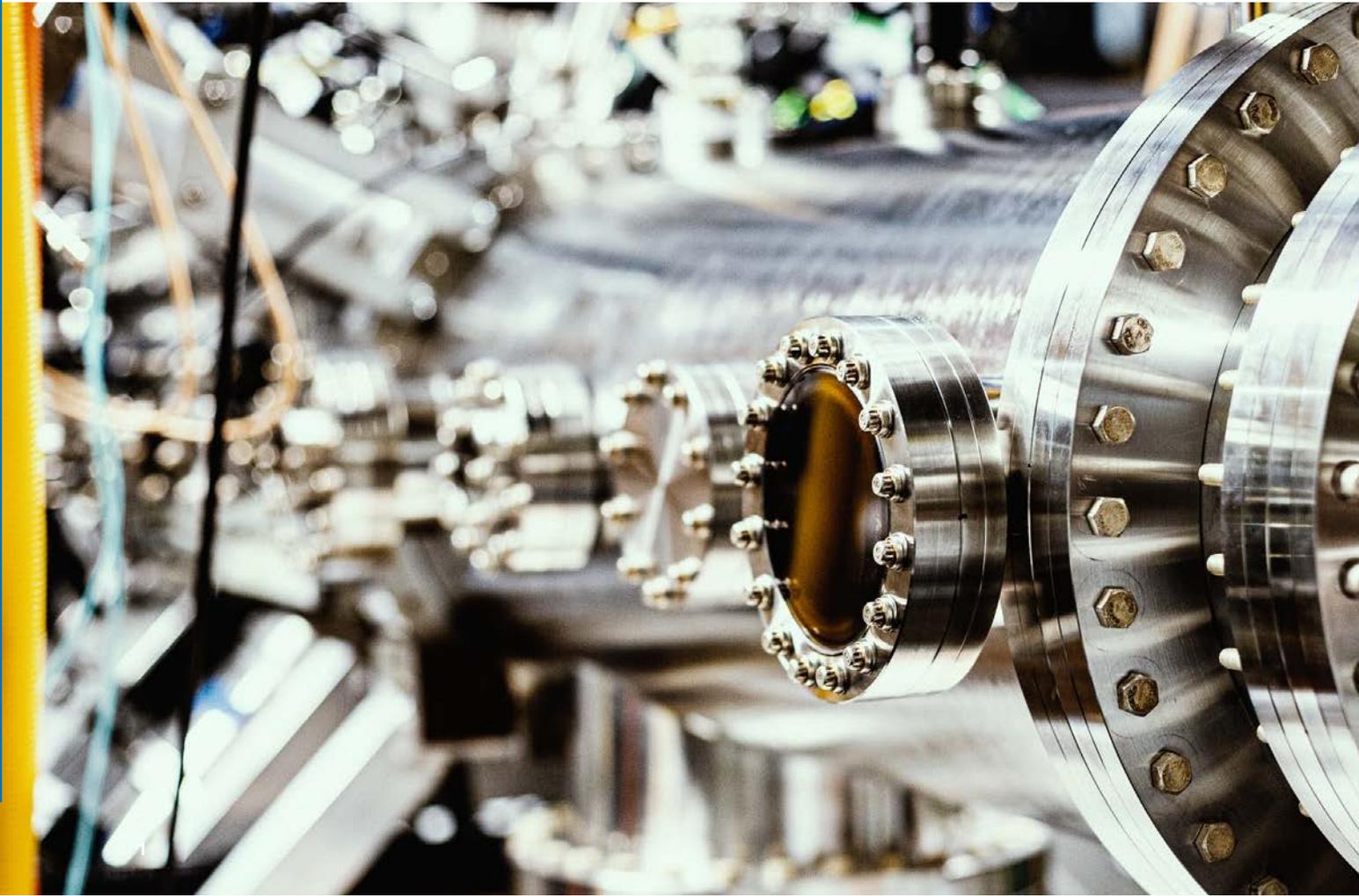
Les travaux menés par la société Commonwealth Fusion Systems (CFS) sur le site de construction du réacteur SPARC, un tokamak prévu pour générer un gain net d'énergie scientifique, se sont poursuivis à un rythme régulier. Une étape

importante a été franchie avec l'arrivée de la chambre à vide. Le SPARC, dont la mise en service est prévue en 2025, devrait atteindre le seuil de l'énergie nette de fusion par la suite. Son successeur, l'ARC, devrait être achevé au milieu des années 2030 et aura pour vocation d'apporter la démonstration que la production d'électricité est possible. ■

3 À l'intérieur du DIII-D, un ingénieur installe un nouvel équipement de diagnostic [avec l'aimable autorisation de General Atomics (États-Unis)].



AI for Plasma Control in Fusion
Energy by AI for Good



▲
1 Machine à striction magnétique axiale expérimentale de Zap Energie, connue sous le nom de FuZE [avec l'aimable autorisation de Zap Energy (États-Unis)].

◀
2 Intérieur du tokamak HH70 mis en service en juin 2024 [avec l'aimable autorisation d'Energy Singularity (Chine)].



L'expérience réalisée avec la machine à striction magnétique *axiale*, connue sous le nom de FuZE, de Zap Energy a permis de porter les électrons dans le plasma à des températures de l'ordre de 1 à 3 keV [8], soit au-dessus de 10 millions de degrés Celsius. Les résultats obtenus grâce à cette machine sont d'un niveau comparable à ceux qu'atteignent les dispositifs expérimentaux de fusion les plus avancés du monde. Dans le même temps, des travaux sont également en cours pour mettre au point une centrale à fusion dotée de la même technologie. ■

À la pointe du progrès, le HH70, tokamak supraconducteur à haute température mis au point par Energy Singularity, a produit son premier plasma. Ce dispositif est doté d'un champ magnétique toroïdal de 0,6 T, d'un grand rayon de 0,75 m et d'un système de 26 aimants supraconducteurs à haute température. Energy Singularity prépare déjà la nouvelle génération de son tokamak supraconducteur à haute température doté d'un champ magnétique puissant, le HH170, en vue d'obtenir un gain d'énergie supérieur à 10 équivalent à celui qui serait atteint avec du combustible deutérium-tritium. ■

Centrale à fusion

ES

On compte actuellement au moins 20 projets de centrales à fusion dans le monde (Allemagne, Canada, Chine, États-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Israël, Japon, République de Corée, Royaume-Uni et Suède), plus ou moins avancés, qui devraient s'achever entre la fin des années 2020 et le milieu des années 2050.

Ces projets sont mis sur pied par des gouvernements, des entreprises privées et certaines coentreprises public-privé.

CRITÈRES DE RÉUSSITE D'UNE CENTRALE À FUSION PILOTE [9, 10]

Catégorie	Critères
Fusion et performance en matière de production d'électricité	1. 100-500 MW de puissance thermique nette moyenne issue de la fusion 2. ≥ 50 MWe de pic de production d'électricité 3. $Q_e > 1$ 4. Fonctionnement sur plusieurs cycles environnementaux ^a
Composants	5. Stratégie, coûts et calendrier de retrait et de remplacement des composants détériorés comme caractéristiques de conception
Combustible et cendres	6. Le concept d'extraction des cendres peut être appliqué à plus grande échelle dans une centrale à fusion inédite 7. Éléments faisant face au plasma capables de résister aux dommages causés par les cendres d'hélium dans un environnement représentatif d'une centrale à fusion inédite 8. Rapport de surgénération du tritium $> 0,9$ 9. Stock de tritium ≤ 1 kg 10. Innovations relatives aux limites de la science des plasmas, technologies de chargement de combustible et de traitement des gaz 11. Définition claire des responsabilités concernant le tritium et méthodes d'analyse permettant de répondre aux exigences en matière de responsabilité
Fiabilité et disponibilité	12. Maintenance et remplacement effectués à distance 13. Composants modulaires remplaçables
Considérations environnementales et de sûreté	14. Atténuation des rejets de tritium 15. Réduction au minimum du volume des déchets et des risques dans l'ensemble et capacité d'éviter autant que possible la production de déchets au-delà de la catégorie C 16. Déclassement des déchets devenus radioactifs
Aspects économiques	17. Coûts instantanés de construction de moins de 5 à 6 milliards de dollars des États-Unis

^a Dans le cas d'une centrale à fusion, un cycle environnemental comprend l'installation des composants clés, l'exploitation de la centrale jusqu'à détérioration de ces composants, et enfin les activités de maintenance en vue de poursuivre l'exploitation. Bien que la durée de ce cycle ne soit pas précisément définie et qu'elle puisse varier selon les conceptions, dans le cas d'une centrale à fusion inédite, elle correspond généralement à un an d'exploitation à pleine puissance avant que n'apparaisse la nécessité de mener des activités de maintenance ou de réparation.

Note : Les critères grisés correspondent aux critères applicables aux centrales à fusion deutérium-tritium.

Centrale General Fusion (General Fusion, Canada)

General Fusion a pour ambition de construire la toute première centrale à fusion par cible magnétisée au monde d'ici le début ou le milieu des années 2030. Ce dispositif de fusion est doté d'un revêtement en métal liquide qui est comprimé mécaniquement par un ensemble de pistons ; les conditions de fusion sont créées par l'envoi de brèves impulsions plutôt que par le maintien d'un processus soutenu. Cette conception unique en son genre, qui ne nécessite pas d'aimants supraconducteurs ni de réseaux de lasers, vise à offrir une solution aux problèmes de dégradation des matériaux, de production du combustible, de capture d'énergie et de coûts qui font obstacle à la commercialisation. D'après la conception actuelle du projet, une centrale électrique General Fusion serait capable de produire environ 300 MWe grâce à deux dispositifs de 150 MW qui fonctionneraient en binôme pour produire de l'électricité à un coût compétitif et sans émission de carbone.

En janvier 2024, les résultats d'un examen par des pairs ont confirmé que General Fusion était capable de

+ 1

2025

Electric Fusion Systems



+ 9

2030

Avalanche Energy, Blue Laser Fusion, Helion Energy, Kyoto Fusion, LPP Fusion, Magneto Inertial Fusion Technologies, nT-Tao, Openstar Technologies, Princeton Fusion Systems



+ 27

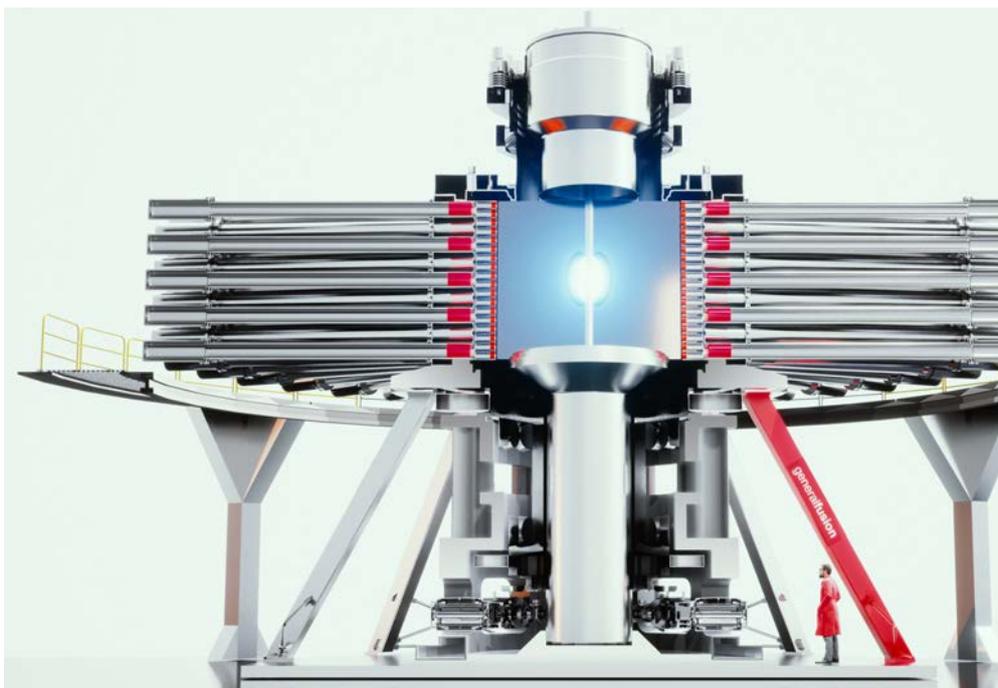
2035

Acceleron Fusion, Commonwealth Fusion Systems, Deutello, Ex-Fusion, First Light Fusion, Fuse, General Atomics, General Fusion, HB11 Energy, Helical Fusion, Longview Fusion Energy Systems, Marvel Fusion, Nearstar Fusion, NK Labs, Novatron Fusion Group, Openstar Technologies, Proxima Fusion, Realta Fusion, Renaissance Fusion, Stellarex, TAE Technologies, Terra Fusion Energy Corporation, Thea Energy, Tokamak Energy, Type One Energy Group, Xcimer Energy, Zap Energy

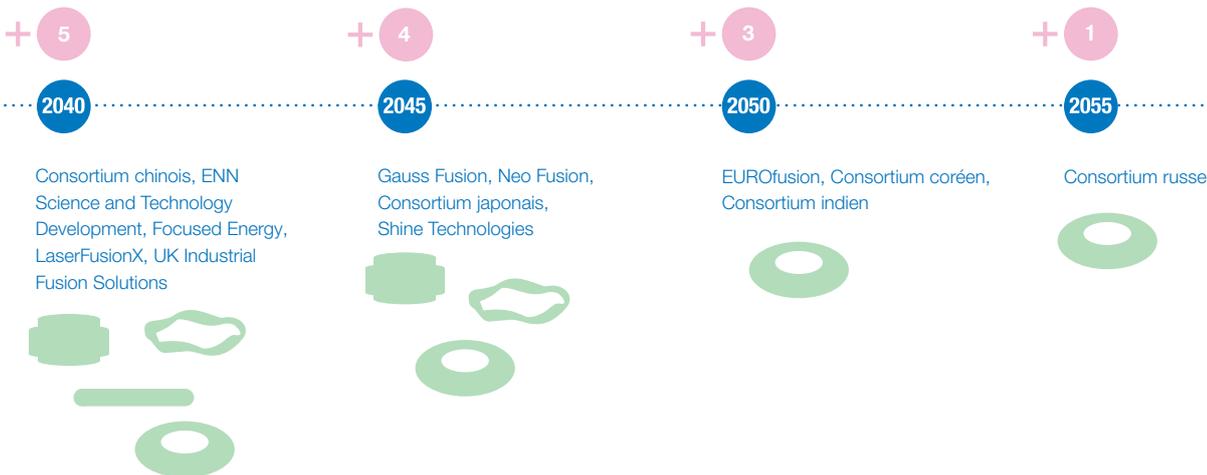


compresser une cavité de liquide avec rapidité, de manière symétrique et sans soubresaut, ce qui est indispensable dans l'optique du développement d'une centrale commerciale. En mars 2024, la société a également réalisé des progrès décisifs dans la modélisation du revêtement en métal liquide d'une machine commerciale en mettant au point un code exclusif qui permet de tester différentes conceptions et configurations de centrale électrique.

General Fusion construit actuellement une machine expérimentale de fusion appelée Lawson Machine 26 (connue sous le nom de LM26) en vue de réaliser des percées techniques qui permettront d'éliminer les risques et de mener plus rapidement à la construction d'une centrale électrique. La LM26 est conçue pour atteindre des conditions de fusion de plus de 100 millions de degrés Celsius d'ici 2025 et un gain net d'énergie scientifique d'ici 2026. Les données recueillies grâce à la LM26 seront prises en compte dans la conception de la machine commerciale envisagée par l'entreprise. ■



▲ Illustration de ce à quoi pourrait ressembler la LM26 [avec l'aimable autorisation de General Fusion (Canada)].





▲
1 Illustration d'une configuration possible du projet de centrale à fusion EU-DEMO [avec l'aimable autorisation de EUROfusion (Allemagne)].

2 Représentation artistique du réacteur de fusion expérimental chinois [avec l'aimable autorisation de l'Université chinoise des sciences et de la technologie (Chine)].

3 Représentation de la centrale Gauss GIGA [avec l'aimable autorisation de Gauss Fusion (Allemagne)].



Réacteur de fusion expérimental chinois (Consortium chinois, Chine)

Le réacteur de fusion expérimental chinois (China Fusion Engineering Test Reactor, ou CFETR) est un concept de centrale à fusion fondé sur celui d'un tokamak classique. Il est actuellement mis au point en Chine par un consortium national. Il s'agit du prochain dispositif prévu dans le cadre du plan d'action chinois pour la réalisation de l'énergie de fusion. Les travaux de construction devraient s'achever en 2040. Le CFETR devrait permettre de combler l'écart entre le projet ITER et une centrale à fusion et de parvenir à un gain net d'énergie électrique ainsi qu'à un coefficient d'utilisation de 0,5. Le plan de recherche-développement du CFETR comprendra deux phases. Durant la première phase, les activités se concentreront sur la réalisation d'un fonctionnement en régime permanent et la démonstration de l'autosuffisance en tritium pour atteindre une puissance de fusion allant jusqu'à 200 MW. Les questions relatives à la recherche-développement dans le domaine de la physique du plasma en combustion seront également abordées en vue de déterminer la faisabilité d'un fonctionnement avancé en régime permanent. Durant la deuxième phase, les activités porteront principalement sur la validation des éléments techniques pertinents liés à une puissance de fusion supérieure à 1 GW. L'une des réalisations importantes de cette deuxième phase sera l'élaboration d'une base de données RAMI¹ en vue de la conception d'un modèle commercial. Le CFETR présente notamment les caractéristiques de conception suivantes : grand rayon de 7,2 m, petit rayon de 2,2 m, élongation de plasma $K_{95}=2$, courant plasma de 14 MA, champ magnétique sur l'axe de 6,5 teslas, bêta normalisé $\beta_N=2,3$ et gain d'énergie scientifique prévu $Q_{sci}=20$. ■

EU-DEMO (EUROfusion, Union européenne)

La centrale de démonstration européenne EU-DEMO est un concept de centrale à fusion qui est actuellement développé en Europe par EUROfusion et qui repose sur la conception d'un tokamak classique. L'EU-DEMO devrait succéder à ITER selon la feuille de route établie par l'Europe pour parvenir à la production d'électricité à partir de l'énergie de fusion. Le projet en est actuellement à la phase d'étude de conception, la mise en service de l'installation étant prévue d'ici 2050. L'EU-DEMO vise à faire la démonstration de la viabilité technologique et économique de l'énergie de fusion grâce à une production électrique nette d'environ 500 MWe, en atteignant l'autosuffisance en tritium. Plusieurs choix de conception sont à l'étude. Ces derniers auront une incidence sur plusieurs technologies de l'installation, comme la configuration du divertor et les solutions de couverture tritigène. L'étude de pré-conception de l'EU-DEMO prévoit un grand rayon d'environ 9 m et une puissance de fusion de quelque 2 GW. Les efforts sont désormais tournés vers l'objectif qui consiste à réduire autant que possible la taille de la machine et les risques techniques afin de faciliter un déploiement plus rapide. ■

¹ RAMI est un acronyme anglais dont les quatre lettres signifient « reliability » (fiabilité), « availability » (disponibilité), « maintainability » (maintenabilité) et « inspectability » (inspectabilité). Cette appellation désigne un processus dont l'objectif principal consiste à s'assurer que tous les systèmes de la centrale à fusion fonctionnent de manière fiable pendant la phase d'exploitation et conservent leur efficacité dans les conditions d'exploitation avec la meilleure disponibilité possible.

Gauss GIGA (Gauss Fusion, Allemagne)

Gauss Fusion a pour ambition de concevoir et de mettre au point d'ici 2045 Gauss GIGA, une centrale électrique à fusion d'une puissance de l'ordre du gigawatt, inspirée des conceptions de stellarators. Ce projet sera réalisé dans le cadre d'un partenariat public-privé réunissant des institutions nationales et européennes. La conception de base actuelle présente un rapport de forme relativement élevé et une section efficace semblable à celle d'ITER, ce qui permet l'utilisation d'aimants et de chambres à vide dont la production, le transport et l'installation sont à la portée de l'industrie.

Gauss Fusion prévoit d'accélérer le déploiement de la première centrale à fusion de ce type en contournant la nécessité de recourir à des dispositifs expérimentaux ou de démonstration intermédiaires grâce à un processus de mise en service en plusieurs étapes. Chacune des étapes de la mise en service est conçue pour recueillir un maximum de données et permettre des extensions et des mises à niveau périodiques de l'installation. Le processus commencera avec la mise au point d'un dispositif à plasma, puis suivront la démonstration d'un système de maintenance à distance, la transition vers une machine capable de produire du tritium et enfin l'intégration d'un cycle du combustible entièrement continu et la production d'électricité.

Cette approche progressive devrait permettre de dissocier les échanciers de développement de la technologie et d'ajuster les paramètres, les systèmes de diagnostic et les systèmes de contrôle. En outre, elle devrait faciliter la collecte de données primordiales sur les matériaux. ■

Centrale de Proxima Fusion (Proxima Fusion, Allemagne)

Proxima Fusion se concentre sur les stellarators quasi-isodynamiques (QI) à champ magnétique intense qui utilisent la technologie des aimants supraconducteurs à haute température. Les concepts de centrales à fusion de cette société s'appuient sur les connaissances acquises grâce au Wendelstein 7-X (W7-X), un stellarator allemand révolutionnaire avec lequel les principes de l'optimisation quasi-isodynamique et l'approche du divertor à îlots ont été développés pour la toute première fois. Les conceptions de centrale de Proxima Fusion font appel à la technologie des supraconducteurs à haute température pour pouvoir atteindre des amplitudes de champ magnétique impossibles à réaliser avec des aimants supraconducteurs classiques (à basse température), ainsi qu'à la conception informatique intégrée pour dépasser les précédentes limites techniques concernant les structures de support. Les modèles de stellarators quasi-isodynamiques de l'entreprise utilisent un chauffage par résonance cyclotronique électronique à haute fréquence et des couvertures tritigènes au lithium-plomb refroidies par eau. ■

Machine Tao (nT-Tao, Israël)

La société nT-Tao est une start-up israélienne qui travaille à la conception d'une centrale à fusion dont la taille avoisinerait celle d'un conteneur d'expédition. Le système pourrait fournir 10 à

20 MW de puissance au réseau existant ou tenir lieu de solution énergétique indépendante et évolutive, capable de fonctionner dans des endroits isolés. nT-Tao prévoit de parvenir à la conception d'un prototype commercial d'ici la fin de la décennie. Sa solution repose sur une méthode exclusive de chauffage du plasma par impulsions et sur une topologie magnétique de la chambre avec stabilisation dynamique du tore. L'approche utilisée par nT-Tao vise à réduire la taille de la machine, ce qui permettrait de réaliser des itérations de développement rapides et de réduire les coûts et la complexité de la conception. ■

Centrale à fusion hélicoïdale (Helical Fusion, Japon)

La société Helical Fusion a pour ambition de concevoir une centrale à fusion capable de fonctionner en régime permanent d'ici 2034 et d'en lancer la commercialisation dans les années 2040. Le concept de cette centrale repose sur une configuration d'héliotron qui comprend deux bobines hélicoïdales et utilise les technologies de supraconducteurs à haute température et de couvertures de métal liquide. Flexibles et à haute densité de courant, les supraconducteurs à haute température permettent de construire des bobines hélicoïdales compactes. La couverture de métal liquide protège toutes les parois face au plasma et permet une production d'électricité à haut rendement. En outre, si l'on établit une comparaison avec d'autres stellarators, la conception de l'héliotron rend la maintenance structurelle plus facile, ce qui fait d'elle un choix particulièrement adapté à la commercialisation. Ces innovations peuvent aider à créer une centrale à fusion de taille réduite dotée d'une puissance de production électrique de l'ordre de 50 à 100 MWe. ■

JA DEMO (Consortium japonais, Japon)

La centrale de démonstration japonaise JA DEMO est un concept de centrale à fusion actuellement développé au Japon à partir de la conception d'un tokamak classique. Ce projet vise à obtenir une production électrique régulière et stable de plusieurs centaines de MWe, à atteindre l'autosuffisance en tritium et à garantir la disponibilité de la centrale pour se rapprocher de la commercialisation de l'énergie de fusion. JA DEMO répond notamment à deux grands principes : démontrer la faisabilité technologique, qui repose sur la conception des composantes d'ITER, et garantir une souplesse d'utilisation, qui permettrait de passer d'un fonctionnement en impulsions (environ 2 heures) à un fonctionnement en régime permanent. Sa construction devrait être achevée d'ici 2045, et il est prévu de faire la démonstration de la production d'électricité en régime pulsé peu de temps après. L'objectif, lors de la deuxième phase du projet, sera de parvenir à un fonctionnement en régime permanent d'ici 2055. JA DEMO présente notamment les caractéristiques de conception suivantes : puissance de fusion de 1,5 GW, grand rayon de 8,5 m, petit rayon de 2,42 m, élongation de plasma $k_{95}=1,65$, courant plasma de 12,3 MA, champ magnétique sur l'axe de 5,94 T, bêta normalisé $\beta_N=3,4$, capacité de génération de courant de 83,7 MW et gain d'énergie scientifique prévu $Q_{sci}=17,5$. ■

1 Maquette de la machine Tao, solution de centrale à fusion de taille réduite [avec l'aimable autorisation de nT-Tao (Israël)].

K-DEMO (Consortium coréen, République de Corée)

La centrale de démonstration coréenne K-DEMO est un concept de centrale à fusion actuellement développé en République de Corée à partir de la conception d'un tokamak classique. L'étude de conception de la K-DEMO se caractérise par un grand rayon de 6,8 m, un petit rayon de 2,1 m, un champ toroidal d'environ 7 T (grâce à des supraconducteurs à basse température) et un courant de plasma supérieur à 12 MA. La conception technique de la centrale devrait être achevée d'ici 2035. Plus récemment, une attention particulière a été portée à l'espace de conception en faisant appel à des supercalculateurs pour étudier les paramètres globaux. Une deuxième voie est également à l'étude en parallèle au concept de base. Elle concerne une conception plus petite et plus avancée qui utilise des aimants supraconducteurs à haute température. ■

DEMO-RF (Consortium russe, Fédération de Russie)

La centrale de démonstration russe DEMO-RF est un concept de centrale à fusion actuellement développé par un consortium national en Fédération de Russie à partir de la conception d'un tokamak classique. Sa construction devrait être achevée d'ici 2055, l'objectif étant de faire la démonstration d'un gain net d'énergie électrique par la suite. Ses caractéristiques sont en cours d'élaboration. Pour l'heure, l'étude de conception prévoit l'utilisation de l'installation soit comme centrale à fusion pure, soit comme réacteur hybride fusion-fission doté d'aimants supraconducteurs à haute température, d'un champ magnétique total supérieur à 8 T et d'un courant de plasma d'environ 5 MA. L'emploi de métal liquide est envisagé pour les éléments faisant face au plasma (première paroi et divertor). En outre, la Fédération de Russie prévoit de mettre au point un réacteur hybride fusion-fission doté d'une source de neutrons de fusion appelé « DEMO Fusion Neutron Source ». Ce réacteur vise non seulement à produire de l'énergie à partir de la réaction de fusion, mais aussi à utiliser les neutrons produits par cette réaction pour transformer l'uranium non fissile en matière nucléaire fissile ou transmuter les déchets radioactifs à longue période. La DEMO Fusion Neutron Source, qui devrait être achevée d'ici 2033, est un élément clé de la stratégie accélérée que la Fédération de Russie a adoptée pour concrétiser l'énergie de fusion d'ici 2050. ■

N4 (Novatron Fusion Group, Suède)

La société Novatron Fusion Group développe actuellement un concept de centrale à fusion utilisant des miroirs magnétiques classiques. Dans le cadre de sa stratégie par étapes, elle prévoit de mettre au point deux machines expérimentales (N1 et N2), puis une centrale de démonstration pré-commerciale (N3) et, enfin, la première centrale à fusion de ce type (N4). Au stade actuel, les activités de la société se dirigent vers la réalisation d'un essai de validation pour N1, l'objectif étant d'atteindre 1,5 GWe avec N4 d'ici la fin des années 2030. La N4 est conçue pour fonctionner en régime permanent grâce à une alimentation continue en combustible et à une extraction des

2 Illustration de la machine à fusion hélicoïdale [avec l'aimable autorisation de Helical Fusion (Japon)].

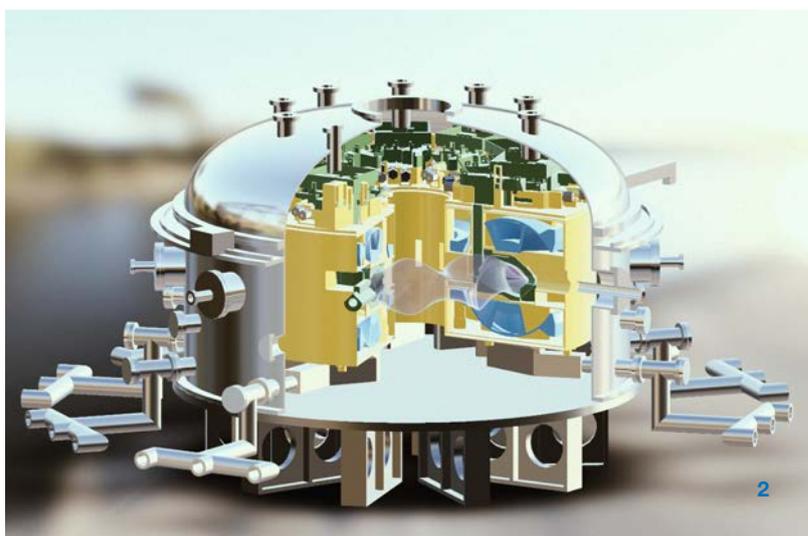
gaz libérés, ce qui permet la conversion directe des particules ionisées en électricité. Il est en outre possible de l'équiper de la technologie des aimants supraconducteurs à haute température pour améliorer ses performances et son efficacité. ■

Centrale à fusion pilote de Tokamak Energy (Tokamak Energy, Royaume-Uni)

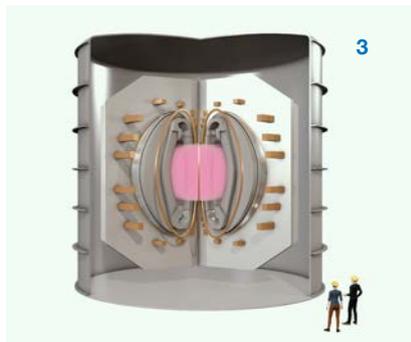
Avec sa centrale à fusion pilote, Tokamak Energy vise à intégrer tous les systèmes nécessaires aux futures centrales à fusion commerciales, à les tester et à démontrer leur efficacité. Conçue comme un tokamak à faible rapport de forme, doté d'aimants toroïdaux supraconducteurs à haute température (oxyde de cuivre, de baryum et de terres rares), la centrale doit permettre de faire la démonstration d'impulsions prolongées de plasma en combustion assorties d'une production nette d'énergie. Ce projet, qui est le fruit d'un travail de collaboration entre les États-Unis et le Royaume-Uni, est conçu et développé dans le cadre du programme de développement par étapes de la fusion du Département américain de l'énergie. ■



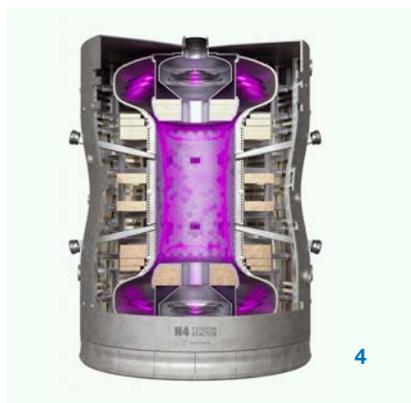
1



2



3



4

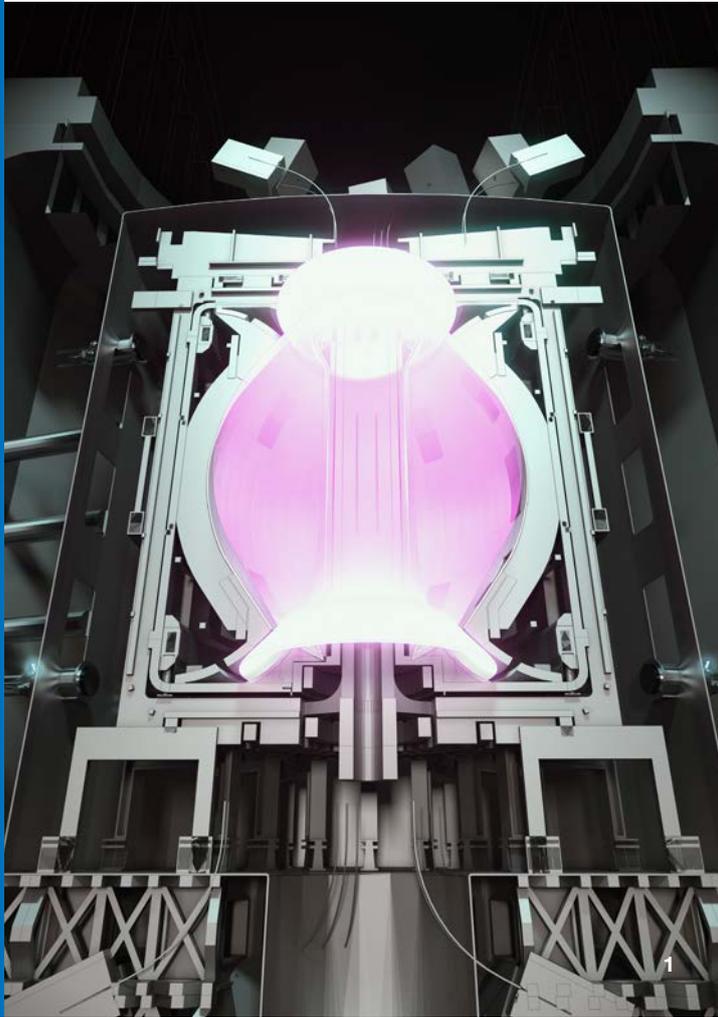


5

3 Illustration représentant ce à quoi pourrait ressembler la centrale à fusion pilote de Tokamak Energy [avec l'aimable autorisation de Tokamak Energy (Royaume-Uni)].

4 Concept de centrale à fusion N4 de Novatron [avec l'aimable autorisation de Novatron (Suède)].

5 Le concept JA DEMO [avec l'aimable autorisation des Instituts nationaux des sciences et technologies quantiques (Japon)].



STEP (UK Industrial Fusion Solutions, Royaume-Uni)

Le tokamak sphérique pour la production d'énergie (Spherical Tokamak for Energy Production, ou STEP) est un prototype de centrale à fusion qui a pour vocation d'atteindre le seuil de l'énergie nette et l'autosuffisance en combustible, et d'ouvrir ainsi la voie à la puissance de fusion commerciale, dont l'entrée en service est envisagée pour 2040 [11]. L'équipe chargée du STEP a utilisé une méthodologie de conception numérique basée sur des ensembles. Celle-ci a fait l'objet de plusieurs examens relatifs au niveau de maturité du concept et de plusieurs évaluations qui ont été menées par des groupes consultatifs techniques indépendants. L'étude de conception vise à établir un juste équilibre entre performance, coût, taille et risques. Il est prévu que la conception technique détaillée débute en 2025. La société UK Industrial Fusion Solutions, filiale en propriété exclusive du groupe UKAEA, sera chargée de la livraison du STEP. Elle dirigera une alliance public-privé à laquelle seront confiées la conception et la construction de la centrale, qui sera implantée à West Burton, dans le nord de l'Angleterre, sur l'ancien emplacement d'une centrale au charbon. Outre la centrale à fusion, le projet STEP prévoit également la mise en place d'une chaîne d'approvisionnement de premier plan au niveau mondial pour soutenir la commercialisation de l'énergie

1 Le STEP devrait être mis en service en 2040 [avec l'aimable autorisation de UKAEA (Royaume-Uni)].

2 La GA-FPP est une conception qui reposera sur des capteurs avancés, des algorithmes de contrôle et des ordinateurs de haute performance [avec l'aimable autorisation de General Atomics (États-Unis)].

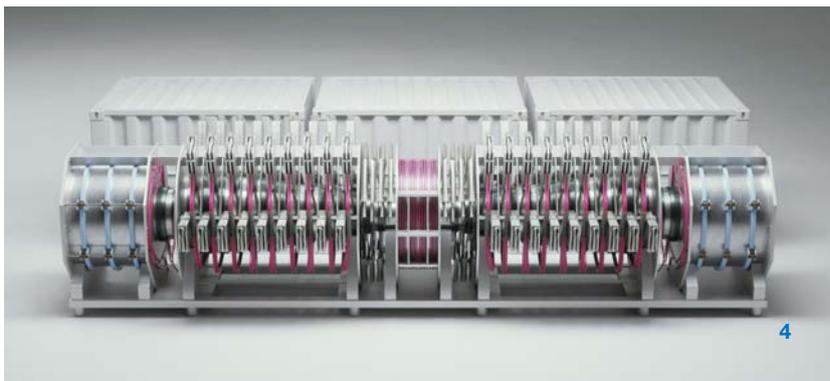
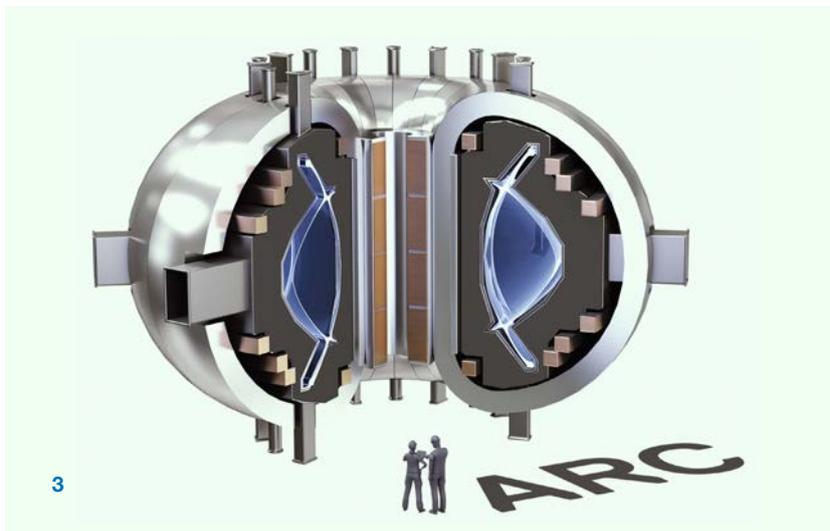
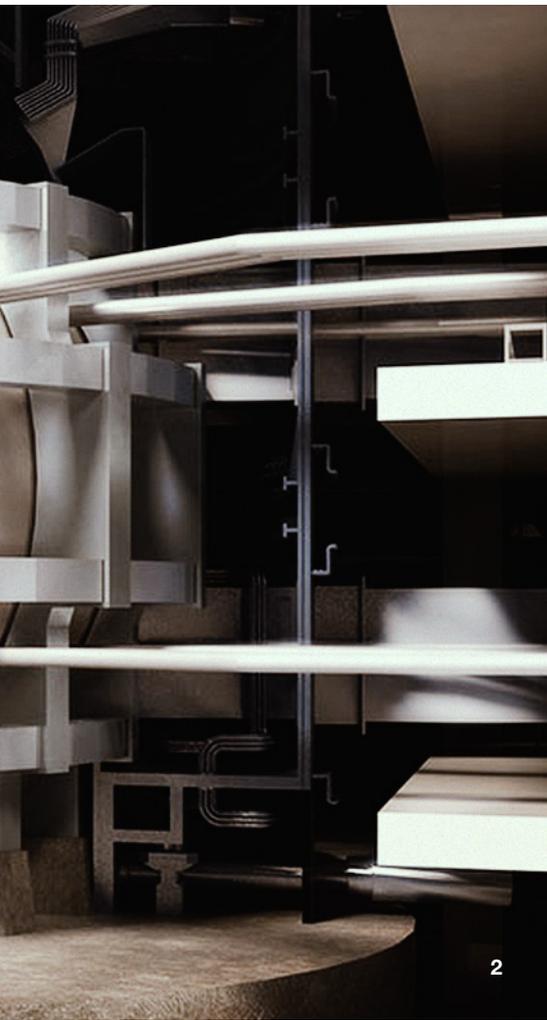
3 L'ARC utilisera la technologie des aimants supraconducteurs à haute température [avec l'aimable autorisation de CFS (États-Unis)].



de fusion. Il permettra de créer une nouvelle infrastructure de fournisseurs qui comprendra des intégrateurs globaux et des fabricants de systèmes à même de concevoir et de livrer les futures centrales à fusion dans le monde entier. ■

ARC (Commonwealth Fusion Systems, États-Unis)

Le projet ARC est un concept de centrale à fusion actuellement développé par Commonwealth Fusion Systems (CFS) à partir de la conception d'un tokamak classique. Il a pour vocation de démontrer la viabilité commerciale de l'énergie de fusion grâce à la technologie des aimants supraconducteurs à haute température. L'ARC sera un tokamak classique compact d'une puissance de quelque 400 MWe, doté d'aimants supraconducteurs à haute température, avec un grand rayon d'environ 4 m, un petit rayon d'environ 1,2 m et un champ magnétique sur l'axe d'environ 11 T. Il sera doté de bobines de champ toroïdal, de champ poloïdal et de solénoïde central composées de supraconducteurs à haute température. Certaines de ces bobines seront munies de joints qui faciliteront le désassemblage en vue de procéder rapidement à des remplacements de la chambre à vide, ce qui limitera les problèmes de durée de vie de la première paroi et permettra de modifier les conceptions de la chambre à vide et les matériaux du divertor dans un même tokamak.



L'ARC tirera parti des informations et des enseignements tirés du tokamak SPARC, qui est en cours de développement et dont la construction a débuté en février 2023 et devrait s'achever en 2025. Le SPARC devrait être mis en service en 2026 et générer un gain net d'énergie scientifique. La construction de la salle du tokamak SPARC est presque terminée ; les composantes du dispositif sont arrivées et ont commencé à être assemblées cette année. La société CFS a fait part d'un financement à hauteur d'environ 2,1 milliards de dollars des États-Unis. Elle emploie actuellement plus de 800 personnes à temps plein pour mener à bien la construction du SPARC, la fabrication d'aimants supraconducteurs à haute température dans son usine d'aimants et les travaux de recherche-développement pour le projet ARC. ■

GA-FPP (General Atomics, États-Unis)

La GA-FPP est un concept de centrale à fusion actuellement développé par General Atomics à partir de la conception d'un tokamak avancé compact capable de fonctionner en régime permanent. La conception reposera sur des capteurs avancés, des algorithmes de contrôle et des ordinateurs de haute performance pour contrôler le plasma, des couvertures en carbure de silicium pour produire le tritium et un chauffage par micro-ondes pour alimenter le plasma de fusion. ■

4 Polaris vise à être le premier prototype à produire de l'électricité à partir de l'énergie de fusion [avec l'aimable autorisation de Helion (États-Unis)].

Polaris (Helion Energy, États-Unis)

Helion Energy a déjà construit six prototypes de dispositifs de fusion et le septième, appelé Polaris, est en cours de construction. Polaris marque une étape importante dans l'exploitation commerciale de l'énergie de fusion et vise à être le premier prototype à produire de l'électricité à partir de cette énergie. Il est construit dans une installation de la taille d'un demi-terrain de football et peut être considéré comme le dispositif de fusion pré-production d'Helion qui ouvrira la voie à la première centrale à fusion commerciale. D'une longueur totale de 19 m, Polaris est conçu pour fonctionner avec des combustibles deutérium-deutérium, deutérium-hélium-3 et deutérium-tritium.

Il fonctionnera à une fréquence de récurrence de 0,1 Hz ou plus élevée et sera doté d'une batterie de condensateurs d'une capacité supérieure à 50 MJ. Son champ magnétique maximal atteindra plus de 15 T, ce qui équivaut à une pression d'environ 1 000 atmosphères. Enfin, Polaris disposera de 3 800 systèmes de diagnostic et de filtrage des gaz qui permettront d'évaluer ses performances et de filtrer les produits générés par son fonctionnement. ■



Centrale Longview (Longview Fusion Energy Systems, États-Unis)

La société Longview Fusion Energy Systems a pour projet de développer une centrale à fusion qui sera conçue en collaboration avec Fluor Corporation et reposera sur une conception de confinement inertiel par laser. Cette centrale servira de modèle pour les futures centrales commerciales destinées à être déployées à l'échelon national et international. ■

SX0 (Stellarex, États-Unis)

Société fondée en 2022, Stellarex fait figure de pionnière dans le développement d'une centrale à fusion basée sur une conception de stellarator. En collaboration avec Ontario Power Generation, des partenaires industriels et des établissements universitaires, Stellarex entend établir en Ontario (Canada) un centre d'excellence pour l'énergie de fusion produite au moyen d'un stellarator. L'entreprise a pour objectif de construire un dispositif à fusion de type stellarator (SX0), d'obtenir un gain net d'énergie en 2030, puis d'achever la construction de la centrale à fusion Stellarex (SX1), qui sera capable de produire 600 MWth de puissance thermique et 250 MWe de puissance électrique. ■

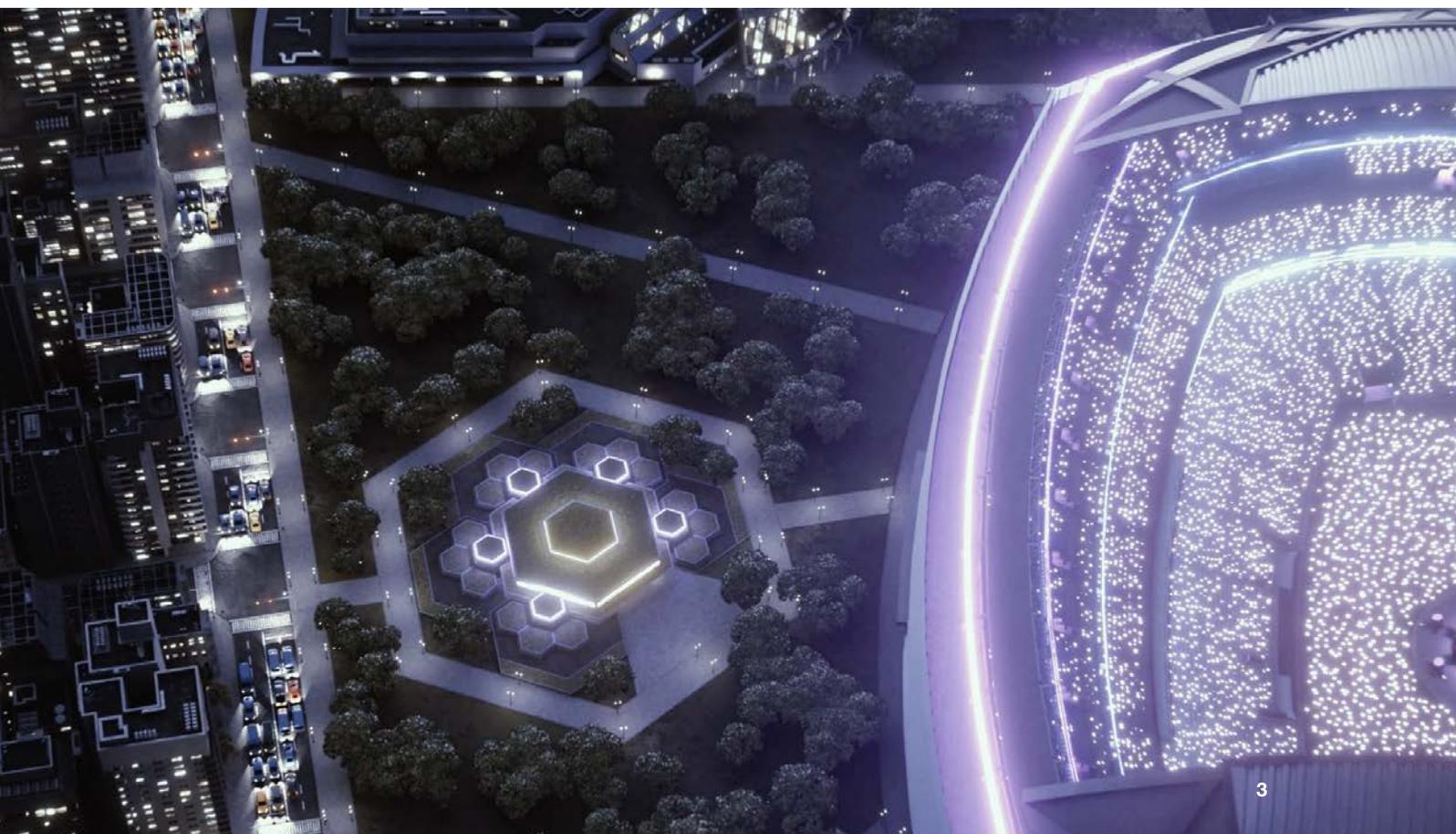
Da Vinci (TAE Technologies, États-Unis)

Depuis sa création, la société TAE Technologies s'est engagée sur la voie de la fusion hydrogène-bore. Il s'agit d'une technologie sûre, qui repose sur des ressources abondantes (plus de 100 000 ans d'approvisionnement disponible) et accessibles dans le monde entier. Cela dit, pour produire un plasma de fusion capable de générer de l'énergie avec cette technologie, il faut maintenir des températures plus élevées. Pour y parvenir, TAE Technologies a mis au point une plateforme exclusive qu'elle désigne sous le nom de « configuration avancée à champ inversé pilotée par faisceau ». L'approche retenue fait appel aux connaissances les plus poussées de la physique des plasmas et de la physique des accélérateurs pour le chauffage et la stabilisation du plasma. En outre, cette configuration linéaire compacte permet de concevoir un dispositif de plus petite taille et donc plus modulable et d'un meilleur rapport coût-performance. Da Vinci, le dispositif de septième génération de TAE Technologies, devrait être le premier prototype mondial de centrale à fusion hydrogène-bore à alimenter le réseau en électricité nette au début des années 2030. ■

1 Da Vinci, le dispositif de septième génération de TAE Technologies, devrait être le premier prototype mondial de centrale à fusion hydrogène-bore [avec l'aimable autorisation de TAE Technologies (États-Unis)].

2 La centrale Longview reposera sur une conception de confinement inertiel par laser [avec l'aimable autorisation de Longview Fusion Energy Systems (États-Unis)].

3 La centrale Zap utilisant la striction magnétique axiale stabilisée par un flux cisailé [avec l'aimable autorisation de Zap Energy (États-Unis)].



3

Centrale Zap (Zap Energy, États-Unis)

Zap Energy développe une centrale à fusion utilisant la striction magnétique axiale (ou « Z-pinch ») stabilisée par un flux cisailé. Cette technologie permet de confiner et de compresser le plasma sans avoir besoin de recourir à des bobines magnétiques supraconductrices ni à des lasers puissants, ce qui ouvre la voie à une évolution rapide vers une source d'énergie commerciale. À l'intérieur d'un dispositif de fusion en fonctionnement, chaque striction magnétique axiale est amorcée par une puissante impulsion d'électricité libérée par une batterie de condensateurs. Cette impulsion transforme un nuage de deutérium gazeux en un anneau plat de plasma chaud. L'anneau descend à vive allure le long de la cathode interne du dispositif, c'est-à-dire le long de l'extrémité chargée négativement. Une fois passée la pointe de la cathode, l'anneau de plasma se resserme en une colonne étroite formant un flux cisailé dont les différentes couches se déplacent à des vitesses variées. Des parois de métal liquide en mouvement, capables de résister à des conditions extrêmes, captent l'énergie libérée par le plasma de fusion. Puis, un mélange de plomb et de lithium dans les parois produit du tritium, qui est réinjecté comme combustible dans la centrale. Grâce à cette conception compacte, un dispositif de fusion pourra ne mesurer que 3 m de large et produire environ 50 MWe (suffisamment pour alimenter une petite ville), sachant que les centrales électriques de Zap Energy contiendront vraisemblablement plusieurs modules. ■

Place de l'énergie de fusion dans un système électrique décarboné

Dans un monde décarboné, la valeur sociétale potentielle de la fusion se chiffre en milliers de milliards de dollars des États-Unis. L'échelle et le calendrier de déploiement, ainsi que la mise en service des centrales à fusion, sont hautement tributaires :

- des coûts associés à la fusion (parmi les principaux facteurs de coûts pour les centrales à fusion figurent le coût du matériel, les considérations réglementaires et les coûts liés à l'exploitation et à la maintenance) ;
- du coût et de la disponibilité d'autres technologies bas carbone dans chaque région ;
- des limitations relatives aux émissions de carbone ;
- de la croissance économique et de l'augmentation de la demande en électricité ;
- de la conception du marché.

La capacité de fusion à la demande nécessite la mise au point de matériaux et de capacités de fabrication de composants spécialisés, ce qui n'est pas le cas pour les matières premières [12]. ■



◀ The Role of Fusion Energy in a Decarbonized System

Context scénario

e et

OS

Souligner les efforts
du secteur public et du
secteur privé dans le
cadre des programmes
de développement de
l'énergie de fusion

Hausse considérable des investissements privés dans les entreprises de fusion

Pour accompagner cette hausse considérable, des efforts doivent être engagés à l'échelle mondiale pour accélérer le développement scientifique et technologique, mettre en place des chaînes d'approvisionnement et établir des cadres réglementaires.

Aux quatre coins de la planète, les gouvernements reconnaissent le potentiel de l'énergie de fusion et investissent massivement dans la recherche-développement pour stimuler le progrès. Les pays sont en train de se doter de stratégies nationales, assorties de financements substantiels, pour soutenir les initiatives tant publiques que privées, l'élaboration des premiers cadres réglementaires et la mobilisation accrue des chaînes d'approvisionnement. Ils renforcent également leurs efforts en matière de collaboration en mettant en commun leurs connaissances, leurs ressources et leurs infrastructures dans le cadre d'accords qui visent à accélérer la transition vers la production commerciale d'énergie de fusion. Les synergies qui naissent de la combinaison d'avancées scientifiques et de cadres stratégiques porteurs favorisent l'instauration d'un écosystème solide qui entend faire de l'énergie de fusion une réalité dans un avenir proche.

L'énergie de fusion suscite un intérêt croissant de la part d'un grand nombre de parties prenantes. Plusieurs accords ont été conclus entre des développeurs et divers utilisateurs finaux qui souhaitent pouvoir s'appuyer à l'avenir sur une source d'énergie propre et fiable. Au nombre de ces utilisateurs finaux figurent notamment des acteurs du secteur des technologies, à l'image d'entreprises comme Amazon, Google et Microsoft, dont les besoins en énergie explosent avec le développement de leurs systèmes d'intelligence artificielle, mais également des acteurs du secteur des énergies fossiles, des entreprises de services publics, des entreprises de la chaîne d'approvisionnement, des acteurs de l'industrie automobile électrique et même des start-ups qui conçoivent des technologies de capture directe du dioxyde de carbone dans l'atmosphère dans le contexte de la recherche de la neutralité carbone. ■

Faire converger les efforts publics et privés vers un programme de développement de l'énergie de fusion piloté par l'industrie

La production commerciale d'énergie de fusion à grande échelle peut faire partie des solutions qui seront déployées à l'avenir pour relever les défis qui se posent dans les domaines du climat, de l'économie et de la sécurité énergétique. Puisqu'elle n'émet pas de dioxyde de carbone ni d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la fusion constitue une source potentielle d'énergie propre qui suscite un fort intérêt sur les marchés et qui attire d'importants investissements, en partie dans le cadre de partenariats public-privé (PPP) [13].

Tous ces efforts auxquels on assiste vont dans le sens de l'objectif mondial qui consiste à opérer une transition vers des sources d'énergie durables et à déployer la fusion pour qu'elle devienne une solution permettant de produire une énergie sûre, propre et abondante à l'échelle planétaire.



Éléments clés
de la fusion de
l'AIEA

Les progrès importants qui ont été réalisés ces dernières années dans le domaine de la science et de la technologie de la fusion ont attisé l'appétit du secteur privé, désireux de faire avancer le développement de ce type d'énergie, alors que les investissements publics et privés et les prises de participation dans des projets consacrés à la fusion continuent de croître à un rythme soutenu [14, 15]. Plusieurs entreprises ambitionnent de lancer des applications commerciales au cours des années ou décennies à venir.

Mettre au point des centrales à fusion qui soient viables exige des efforts considérables sur les plans financier et technique, aussi les PPP s'imposent-ils de plus en plus comme un mécanisme essentiel pour le développement de l'énergie de fusion. Les ressources publiques doivent être complétées par celles d'investisseurs privés capables d'apporter un surcroît de capitaux et de savoir-faire. L'ampleur des investissements privés qui sont engagés dans les technologies de la fusion, ceux-ci dépassant désormais les 7,3 milliards de dollars des États-Unis à l'échelle mondiale [15], témoigne de la volonté des investisseurs de développer des centrales à fusion qui puissent être exploitées de façon viable dans les années à venir. Les projets privés nécessitent l'appui des pouvoirs publics pour gagner la confiance des investisseurs et bénéficier des compétences techniques qui ont été acquises dans le secteur public grâce à des années de recherche-développement. Toutefois, les ressources demeurent limitées et il est primordial de bien les allouer. Les PPP peuvent faciliter cette tâche en faisant en sorte que les risques et les bénéfices soient partagés entre les secteurs public et privé. Le financement et l'appui apportés par les pouvoirs publics peuvent fournir la stabilité et la confiance que recherchent les investisseurs privés, ce qui permet aux entreprises spécialisées dans la fusion de poursuivre des projets ambitieux tout en diversifiant les risques financiers [16]. ■

La collaboration entre institutions publiques et entreprises privées permet une approche plus diversifiée en matière de recherche-développement, qui favorise l'innovation et accélère les progrès puisque les partenaires peuvent avancer en parallèle avec des délais plus courts [17]. En règle générale, les PPP prévoient un partage des responsabilités entre le secteur privé et l'État, le premier prenant en main le développement du projet et le second étant souvent chargé de garantir la disponibilité de liquidités. Ainsi, les risques sont partagés.

Lorsqu'ils sont gérés de manière judicieuse, les PPP peuvent s'avérer des outils formidables pour remédier aux problèmes qui se posent en ce qui concerne la stabilité financière et politique à long terme [18]. Le secteur de l'énergie a déjà tiré parti des avantages offerts par les PPP, et ces partenariats pourraient être un moyen de contribuer à atténuer les changements climatiques [19, 20]. Qui plus est, on dispose d'ores et déjà de cadres pour les PPP puisque d'autres secteurs se sont largement servis de ce mécanisme pendant de nombreuses années [21].

Il n'existe pas de modèle unique à suivre pour la construction de centrales à fusion. En toute logique, les PPP se veulent donc un mécanisme fondamentalement flexible, qui peut être adapté par les pouvoirs publics et les investisseurs en fonction des conditions propres à un pays ou à une région, voire, dans certains cas, à un projet en particulier. ■

FINANCEMENTS RAPPORTÉS EN 2023/2024

État Membre	Financements (en milliards de dollars des États-Unis)	Échelle temporelle
Allemagne	~ 1,4	plus de 5 ans
Corée, République de	~ 0,9	plus de 10 ans
États-Unis d'Amérique	~ 1,5 ^a	par année
Royaume-Uni	~ 0,8	plus de 5 ans

^a Ce montant inclut une somme de 690 millions de dollars des États-Unis provenant de l'Administration nationale de la sécurité nucléaire du Département de l'énergie des États-Unis destinée à soutenir la fusion par confinement inertiel pour des missions de l'Administration, et non pas le développement de l'énergie de fusion.

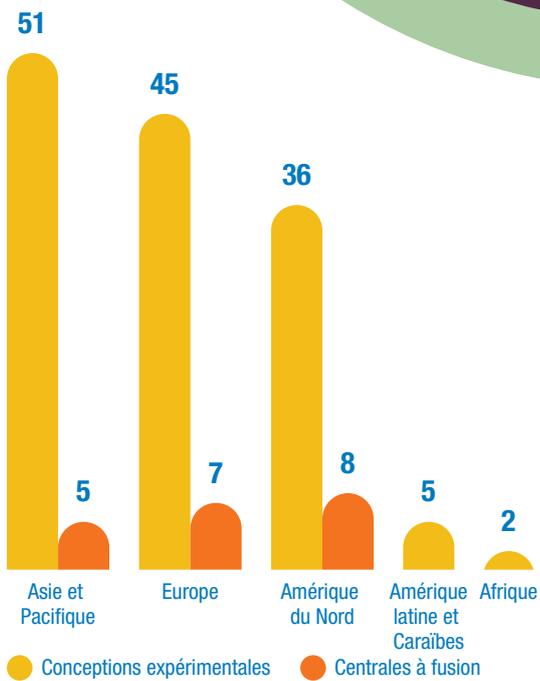
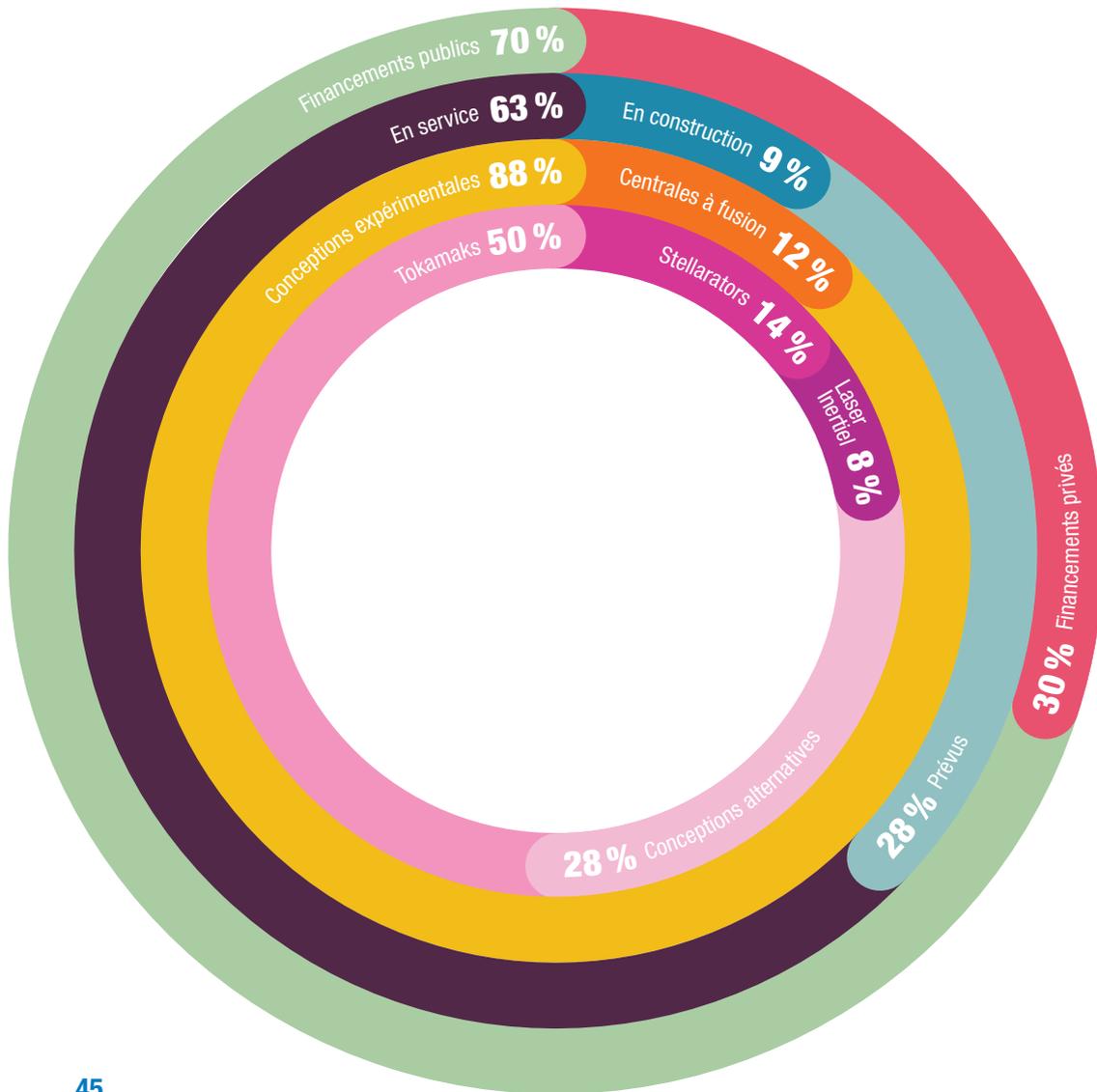
Principaux programmes pour la mise en œuvre de modèles de développement de la fusion pilotés par l'industrie

Certains des plus grands acteurs de la fusion déploient leurs propres modèles pour faire participer les professionnels du secteur et promouvoir le développement de l'énergie de fusion.

- **Chine – Consortium pour la fusion** : ce consortium regroupe des entreprises publiques et des instituts de recherche, y compris certaines des plus grandes entreprises du pays dans les domaines de l'énergie et de la sidérurgie.
- **Allemagne – Initiative de financement** : ce programme met en commun les efforts d'entreprises, d'universités et d'instituts de recherche en vue de la construction d'une centrale à fusion dans le pays d'ici 2040.
- **Italie – Consortium chargé du projet DTT** : ce consortium se compose d'un grand nombre d'instituts de recherche italiens, de partenaires publics, de partenaires régionaux et de parties prenantes internationales.
- **Japon – Programme de recherche-développement « Moonshot »** : ce programme encourage des entreprises privées, des universités et d'autres organisations à participer à diverses approches dans le domaine de l'énergie de fusion.
- **République de Corée – Nouvelle initiative** : ce programme vise à faire avancer la technologie des centrales à fusion au moyen d'un PPP et à établir un écosystème de l'énergie de fusion industrielle dirigé par le secteur privé.
- **Royaume-Uni – Programme « Fusion Futures »** : ce programme vise à favoriser l'innovation et à renforcer les capacités générales de l'industrie grâce à la collaboration internationale et au développement de

futures centrales à fusion ; il fournit un financement supplémentaire pour la mise en place d'infrastructures destinées aux entreprises privées du secteur de l'énergie de fusion.

- **États-Unis d'Amérique – Programme de développement par étapes de la fusion et Cadre pour un consortium public-privé** : le programme de développement soutient les entreprises en leur octroyant des fonds compte tenu de certaines étapes de commercialisation préalablement établies qui doivent avoir été atteintes et validées. Le Département de l'énergie des États-Unis a également commencé à recueillir des informations concernant un projet de consortium public-privé pour l'énergie de fusion. ■



Types de dispositifs de fusion, état de fonctionnement et financements en 2024 [22].

Nombre de dispositifs de fusion en fonctionnement, en construction ou en projet par région.



Fusion Device Information System

Principaux facteurs propices au développement d'un écosystème de l'énergie de fusion piloté par l'industrie

Dans le cadre de l'économie politique du marché de l'énergie, les entreprises du secteur de la fusion doivent recevoir le même niveau de soutien que celles des autres secteurs pour pouvoir stimuler la commercialisation et se développer efficacement. Les autres sources d'énergie qui sont commercialisées bénéficient de partenariats avec les pouvoirs publics, de réglementations stables et d'incitations fiscales stratégiques destinées à servir l'intérêt général [23]. Procurer un appui semblable aux initiatives de développement de l'énergie de fusion pourrait ouvrir pleinement la voie vers l'exploitation commerciale de la fusion. En mettant en place des politiques porteuses, les pouvoirs publics peuvent accélérer l'émergence sur le marché d'une énergie de fusion propre, abondante, efficace et sûre.

Aux États-Unis, par exemple, les politiques fiscales ont permis d'encourager le développement de diverses technologies énergétiques propres. Dans le cadre de la loi sur la réduction de l'inflation (Inflation Reduction Act) adoptée en 2022, un grand nombre des crédits mis en place ont été étendus au secteur de l'énergie de fusion [24] et, à compter de 2025, de nouveaux crédits d'impôt « neutres sur le plan technologique » [25] seront applicables à la production commerciale d'énergie de fusion. Au Royaume-Uni, le gouvernement a entrepris de modifier certaines réglementations afin de classer les centrales à fusion dans la catégorie des projets d'infrastructure d'importance nationale en Angleterre et au Pays de Galles. Ce changement permettra d'accélérer les demandes de permis puisqu'on s'intéressera à des enjeux locaux spécifiques plutôt qu'à la question de la nécessité de la technologie [26]. Le règlement pour une industrie « zéro net » de l'Union européenne définit également la fusion comme une « technologie stratégique » [27].

Outre les incitations fiscales, les gouvernements ont mis sur pied des programmes de soutien aux technologies d'énergie propre, qui se présentent par exemple sous la forme de normes imposant une proportion minimale d'énergies renouvelables dans le portefeuille énergétique ou de mesures imposant le recours aux technologies de captage du carbone. Compte tenu de l'intérêt qu'elle présente en termes d'émissions et des autres avantages qu'elle procure, l'énergie de fusion pourrait, dès lors qu'elle sera exploitable, figurer au nombre des énergies définies comme étant « propres » ou « à émissions nulles ». Si l'on veut parvenir à déployer la fusion à grande échelle, il faudra impérativement pouvoir s'appuyer sur des chaînes d'approvisionnement résilientes, des cadres réglementaires efficaces et des investissements stables dans la durée. L'émergence d'une solide industrie de la fusion passera par une collaboration entre les pouvoirs publics, les organismes de recherche-développement et les entreprises privées. ■

Groupe mondial de l'énergie de fusion

Dans une volonté de renforcer la collaboration au sein du secteur de la fusion, l'AIEA a annoncé la création du Groupe mondial de l'énergie de fusion [28]. Ce groupe a pour vocation de réunir des scientifiques, des ingénieurs, des décideurs, des financiers, des responsables de la réglementation et des entreprises privées en vue d'accélérer la commercialisation de l'énergie de fusion [13]. La coopération et la coordination internationales ont un rôle déterminant à jouer dans le déploiement commercial de cette énergie. Le Groupe mondial de l'énergie de fusion vise à réunir les secteurs public et privé, l'industrie, le monde universitaire et la société civile pour former une communauté mondiale de la fusion qui soit unie dans l'action. En favorisant une approche unifiée et concertée, le Groupe mondial de l'énergie de fusion entend accélérer la transition du stade du développement à celui de la viabilité commerciale, de sorte que la fusion devienne l'une des pierres angulaires d'un avenir énergétique propre pour la planète.

Le Groupe mondial de l'énergie de fusion jouera un rôle de catalyseur à cette étape charnière où des efforts concertés sont indispensables pour faire avancer rapidement le développement de l'énergie de fusion. Pour ce faire, il s'attachera en particulier à :

- renforcer la coopération au niveau mondial, notamment en assurant la coordination et en fournissant un cadre et des occasions de concertation régulières qui soient propices au dialogue interactif, aux échanges de vues, à la planification et à la création de partenariats entre les parties prenantes de l'industrie, des pouvoirs publics, du monde universitaire, des organismes de réglementations et du public ;
- contribuer à l'efficacité des programmes de recherche-développement consacrés à l'énergie de fusion, notamment en ce qui concerne l'utilisation des installations existantes et la planification de nouvelles installations ;
- recenser, dans le cadre d'une démarche conjointe, les lacunes existantes dans le domaine de la technologie et de l'ingénierie et établir des stratégies qui permettront de mettre en place des solutions à l'échelle internationale ;
- faire avancer les discussions sur l'établissement d'une réglementation efficace de la fusion ;
- renforcer la participation du public ainsi que celle des jeunes et promouvoir l'égalité des sexes dans le secteur de l'énergie de fusion ;
- promouvoir l'intégration de la fusion au marché de l'énergie ;
- faciliter l'intégration de la fusion dans les systèmes énergétiques existants, y compris l'infrastructure de soutien. ■



L'AIEA soutiendra activement les efforts de réalisation des engagements pris dans le cadre du Groupe mondial de l'énergie de fusion. Conjointement avec ses États Membres et d'autres partenaires, elle organisera périodiquement des réunions du groupe pour faire le point sur les progrès accomplis à cet égard, garantir un engagement politique fort et promouvoir d'autres initiatives de collaboration en faveur de l'énergie de fusion. Grâce à ces efforts, l'AIEA entend faciliter des avancées et une coopération continues dans l'optique du développement de l'énergie de fusion à l'échelle mondiale.

▲
Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, et la Première Ministre italienne, Giorgia Meloni, coprésideront la première réunion ministérielle du Groupe mondial de l'énergie de fusion (avec l'aimable autorisation du Gouvernement italien).



◀ **Première réunion ministérielle du Groupe mondial de l'énergie de fusion**

Voies de développement de la fusion

Tour d'horizon des stratégies nationales, des accords internationaux, des investissements privés et prises de participation ainsi que des processus réglementaires qui, ensemble, permettront d'avancer sur la voie de la production commerciale d'énergie de fusion.



Stratégies nationales et accords internationaux

Lors de la 29^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion, le Royaume-Uni a dévoilé sa stratégie dans le domaine [29] et a présenté son nouveau programme intitulé « Fusion Futures », qui prévoit l'octroi de 650 millions de livres sterling supplémentaires (793 millions de dollars des États-Unis) sur une période de cinq ans pour financer un ensemble de programmes de recherche-développement. Cet investissement comprend la création de 2 200 places de formation, une nouvelle installation d'essai du cycle du combustible et la mise en place d'infrastructures pour les entreprises privées du secteur de l'énergie de fusion, notamment sur le campus de Culham de l'UKAEA. Cette annonce a fait suite à la décision du Royaume-Uni de quitter le Programme de recherche et de formation d'Euratom.

Plus tard, en 2024, le Gouvernement britannique a annoncé le lancement d'un concours industriel [30] qui doit lui permettre de trouver des partenaires dans les domaines de l'ingénierie et de la construction pour le prototype de centrale à fusion du Royaume-Uni, baptisé « STEP ». L'objectif est d'établir une alliance public-privé sous la houlette de

l'entreprise UK Industrial Fusion Solutions, filiale de l'UKAEA, pour mettre sur pied ledit prototype. Le projet, situé dans le nord de l'Angleterre, vise à réaliser une démonstration de la production nette d'énergie à partir de la réaction de fusion d'ici 2040, sachant que les contrats pour l'ingénierie et la construction devraient être attribués aux partenaires retenus à la fin de 2025 ou au début de 2026.

Le Gouvernement britannique a en outre annoncé qu'il prévoyait de simplifier le processus de planification des futures centrales à fusion. Le Ministère britannique de la sécurité énergétique et de la neutralité carbone a commencé à modifier certaines réglementations afin de classer les centrales à fusion dans la catégorie des projets d'infrastructure d'importance nationale en Angleterre et au Pays de Galles. Ce changement permettra d'accélérer les demandes de permis puisqu'on s'intéressera à des enjeux locaux spécifiques plutôt qu'à la question de la nécessité de la technologie. Une consultation [26] sera organisée pour recueillir des observations sur la déclaration de politique nationale avant que celle-ci soit présentée au Parlement pour approbation.

Par ailleurs, soucieux de faire progresser leurs stratégies nationales en matière d'énergie de fusion, le Ministère britannique de la sécurité énergétique et de la neutralité carbone et le Département de l'énergie



← Royaume-Uni –
Towards Fusion
Energy 2023



← États-Unis d'Amérique –
Fusion Energy Strategy 2024



des États-Unis ont annoncé la formation d'un nouveau partenariat stratégique [31] visant à accélérer la démonstration et la commercialisation de l'énergie de fusion. Par la suite, à l'occasion de la 28^e Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP28), la Maison-Blanche a rendu publique une stratégie pour la promotion des partenariats internationaux dans une nouvelle ère de développement de l'énergie de fusion [32]. Ce faisant, les États-Unis ont affiché leur intention d'élargir leur projet visant à accélérer la démonstration et la commercialisation de l'énergie de fusion, projet qui a été encore consolidé par l'annonce en avril 2024 d'un autre partenariat avec le Japon [33]. ■

Le Département de l'énergie des États-Unis a dévoilé sa stratégie en matière d'énergie de fusion pour 2024 [34], dont les objectifs sont les suivants : i) combler les lacunes scientifiques et technologiques en vue du développement d'une centrale à fusion pilote présentant un intérêt sur le plan commercial ; ii) préparer le terrain pour un déploiement durable et équitable de la fusion commerciale ; et iii) établir des partenariats avec des entités externes et en tirer parti. Dans le cadre d'une démarche étroitement coordonnée avec cette stratégie, le Département de l'énergie des États-Unis a également lancé un appel à candidatures pour la formation d'équipes de collaboration (appelées « collaboratives ») au titre de l'initiative Fusion Innovative Research Engine, lesquelles pourront se partager un financement de 180 millions de dollars des États-Unis. Il a aussi dévoilé une nouvelle vision pour son programme « Fusion Energy Sciences » : baptisée « Building Bridges », celle-ci a pour objet, d'une part, de remédier activement aux lacunes scientifiques et technologiques qu'il faut combler pour parvenir à développer une centrale à fusion pilote d'intérêt commercial et, d'autre part, de soutenir la recherche fondamentale dans le domaine des sciences de l'énergie de fusion et des technologies habilitantes.

▲
1 Cérémonie d'ouverture de la 29^e Conférence de l'AIEA sur l'énergie de fusion à Londres. De gauche à droite : A. Bowie, alors Sous-Secrétaire d'État parlementaire au nucléaire et aux réseaux ; Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA ; et I. Chapman, Directeur général de l'UKAEA.

2 Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, à la COP28 à Dubaï (Émirats arabes unis) en décembre 2023.



◀ **Débat sur l'énergie de fusion organisé par l'AIEA lors de la COP28**

En 2024, le Gouvernement des États-Unis a accru de manière considérable le financement consacré à la recherche sur l'énergie de fusion. Il a en effet octroyé 790 millions de dollars des États-Unis au service du Département de l'énergie chargé de l'énergie de fusion. Il a également débloqué une enveloppe de 690 millions de dollars des États-Unis au titre du budget de l'Administration nationale de la sécurité nucléaire pour financer la recherche sur la fusion par confinement inertiel. Cet investissement a été complété par un programme de 42 millions de dollars des États-Unis qui s'intitule « Inertial Fusion Energy Science and Technology Accelerated Research » et qui vise à faire progresser la science et la technologie fondamentales de l'énergie de fusion inertielle. Dans l'ensemble, ce sont donc 1,58 milliard de dollars des États-Unis [35] qui ont été injectés dans l'énergie de fusion, ce qui représente un investissement record de la part du Gouvernement américain dans ce domaine. En outre, l'administration Biden-Harris a proposé d'étendre les crédits d'impôt dans le cadre de la loi sur la réduction de l'inflation de 2022 pour soutenir un éventail plus large de technologies énergétiques propres, dont l'énergie de fusion [36].

Dans ce contexte de l'énergie de fusion en pleine évolution, de plus en plus de partenariats public-privé prennent forme. Dans le cadre de son programme de développement par étapes de la fusion, le Département de l'énergie des États-Unis a annoncé des accords prévoyant l'octroi de 46 millions de dollars des États-Unis à huit entreprises pour financer les 18 premiers mois de leurs activités de conception et de recherche-développement relatives aux centrales à fusion. Ces entreprises ont été retenues parmi les nombreux candidats qui avaient soumis leurs propositions en exposant dans les grandes lignes leurs projets de commercialisation de l'énergie de fusion. Les fonds seront déboursés une fois que certaines étapes de commercialisation préalablement établies auront été atteintes et validées par le Département de l'énergie. Se projetant dans l'avenir, le Département de l'énergie a également commencé à recueillir des informations sur un projet de consortium public-privé consacré à l'énergie de fusion [37]. Ce consortium aurait pour but d'élargir le financement fédéral en intégrant des contributions des États et des administrations locales, des investissements du secteur privé et des fonds provenant de sources philanthropiques. ■

Le Japon suit un chemin semblable. En 2023, le pays a adopté sa première stratégie nationale de l'énergie de fusion [38], l'accent étant mis sur la création d'une industrie nationale dans ce domaine avec une participation accrue du secteur privé à la recherche-développement. Cette stratégie prévoyait également l'établissement du Conseil japonais de l'énergie de fusion, chargé de mettre sur pied les entreprises connexes et d'élaborer des lignes directrices aux fins de la réglementation de la technologie de l'énergie de fusion. Un groupe de travail sur la réglementation relative à la fusion a également vu le jour. En 2024, allant encore plus loin dans son engagement à faire progresser la technologie de la fusion, le Gouvernement japonais a annoncé la mise en place d'une nouvelle initiative de recherche-développement axée sur la fusion dans le cadre de son Programme de recherche-développement Moonshot [39]. Il prévoit également de faire de l'enseignement de l'énergie de fusion une priorité dans les établissements universitaires pour que la prochaine génération de scientifiques et d'ingénieurs soit

bien préparée et puisse ainsi apporter sa contribution au domaine. Ces efforts sont complétés par le partenariat stratégique conclu avec les États-Unis en vue d'accélérer le développement de l'énergie de fusion. ■

La Chine élargit rapidement son programme en matière d'énergie de fusion en augmentant chaque année ses investissements [40]. La formation d'un consortium consacré au développement de l'énergie de fusion, sous la direction de la Compagnie nucléaire nationale chinoise, est révélatrice de l'ambition du pays. Axé principalement sur les supraconducteurs à haute température, le stockage de l'énergie de grande capacité et la production de tritium, le consortium se compose de 25 entreprises publiques et d'instituts de recherche et compte dans ses rangs certaines des plus grandes entreprises énergétiques et sidérurgiques du pays. Le gouvernement a annoncé la création d'une nouvelle entreprise nationale chargée de piloter le développement de l'industrie [41]. ■

En juillet 2024, le Gouvernement de la République de Corée a annoncé un investissement majeur de 1 200 milliards de won (environ 900 millions de dollars des États-Unis) pour le développement de l'énergie de fusion. Cette initiative, qui devrait s'étaler sur dix ans à compter de 2026, vise à faire avancer la technologie des centrales à fusion au moyen d'un PPP. Elle prévoit la construction d'une centrale pilote d'une capacité de production d'électricité de 100 MW dans le courant des années 2030, avec une mise en service prévue dans les années 2040. L'objectif premier est d'établir un écosystème de l'énergie de fusion industrielle dirigé par le secteur privé [42]. ■

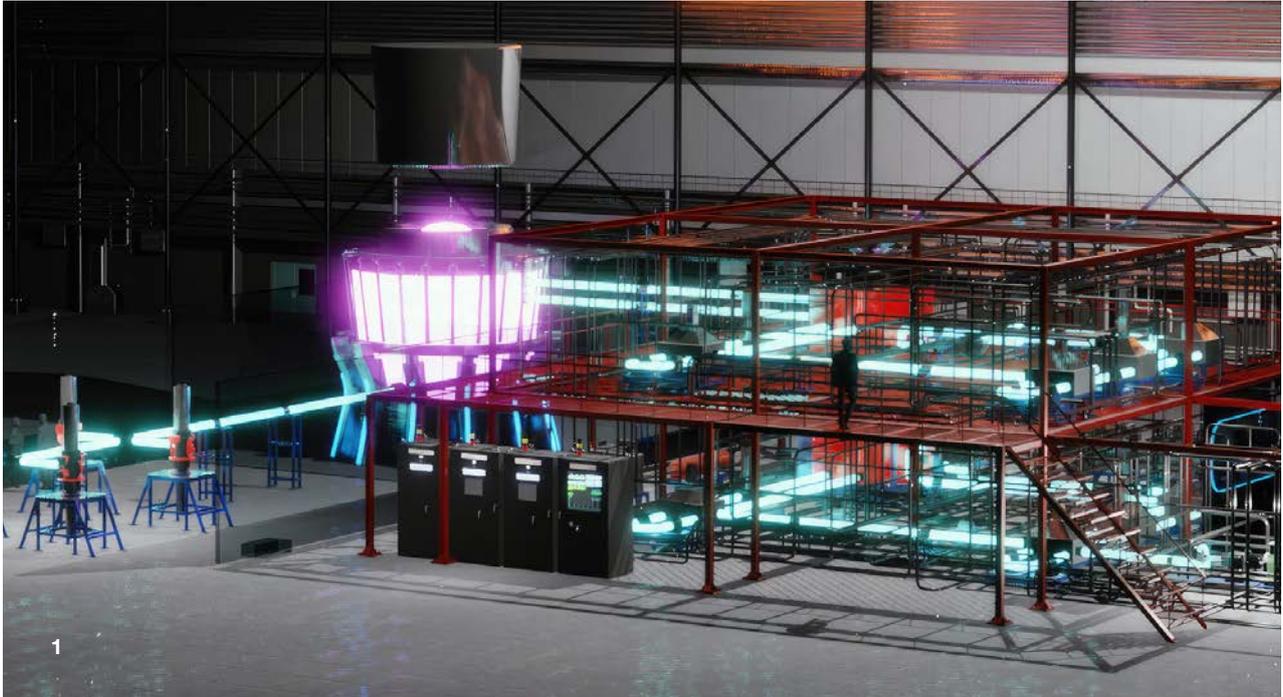
Désireuse de doter l'Union européenne d'une stratégie globale en matière de fusion, la Commission européenne a organisé la conférence intitulée « EU Blueprint for Fusion Energy » (Plan détaillé de l'UE pour l'énergie de fusion) [43], qui a permis de mettre en avant plusieurs grandes priorités pour l'UE : le renforcement de la collaboration, l'augmentation des financements, la clarification du cadre réglementaire et le développement d'une main-d'œuvre qualifiée.

L'Allemagne fait figure de force motrice dans l'UE : le Ministère fédéral de l'éducation et de la recherche a en effet annoncé qu'il consacrerait plus d'un milliard d'euros à la recherche sur la fusion d'ici 2028, en plus des 370 millions d'euros (396 millions de dollars des États-Unis) qui seront versés à des instituts de recherche.

À ce financement institutionnel s'est ajouté un nouveau programme de financement de projets baptisé « Fusion 2024 » [44], qui vise à réaliser des avancées en ce qui concerne les technologies, les composants et les matériaux nécessaires pour les centrales à fusion, la priorité étant accordée à la fusion à confinement magnétique et à la fusion par laser. La première phase du programme, qui devrait être achevée d'ici le début des années 2030, est axée sur la réalisation de progrès technologiques, tandis que la deuxième phase sera consacrée à l'intégration de ces technologies dans un modèle de centrale à fusion fonctionnel. Le programme « Fusion 2024 » accorde une large place à la recherche collaborative appliquée, sous la forme d'un PPP destiné à accélérer le passage à l'énergie de fusion commerciale.



IAEA's Plasma Physics and Technology Aspects of the Deuterium–Tritium Fuel Cycle for Fusion Energy



1



2



1 Illustration du dispositif UNITY-1, une installation non radiologique d'essai des composants de couverture et du cycle thermique, ouverte à la communauté des utilisateurs et située au Centre de recherche de l'entreprise Kyoto Fusionneering à Kyoto (Japon). Les premières activités ont commencé et les campagnes d'essais grandeur nature devraient débuter en 2026 [avec l'aimable autorisation de Kyoto Fusionneering (Japon)].

2 Le Secrétaire adjoint à l'énergie des États-Unis, D. M. Turk, et le Ministre de l'éducation, des sports, de la science et de la technologie du Japon, M. Moriyama, annoncent le partenariat stratégique des deux pays pour faire avancer l'énergie de fusion [avec l'aimable autorisation du Département de l'énergie (États-Unis)].



En Italie, le Ministère de l'environnement a mis sur pied la Plateforme nationale pour l'énergie nucléaire durable [45]. L'objectif principal est d'élaborer des lignes directrices et une feuille de route pour suivre et coordonner l'évolution des nouvelles technologies nucléaires à moyen et long terme. Il s'agira notamment d'étudier les perspectives en matière d'énergie de fusion à l'appui de l'objectif d'une décarbonation totale à l'horizon 2050. La plateforme réunira un large éventail d'acteurs, dont des institutions de l'administration publique, des entreprises, des associations professionnelles, des universités, des établissements de recherche et des organisations de la société civile.

Sous l'égide de la présidence italienne, les pays du G7 ont donné un coup de projecteur sur l'énergie de fusion en appelant à une collaboration internationale pour accélérer le développement et la commercialisation de cette technologie. Cette intervention souligne la nécessité d'instaurer des réglementations rigoureuses en matière de sûreté, de mettre en place des chaînes d'approvisionnement internationales et d'assurer la formation de la main-d'œuvre. Les pays du G7 se sont engagés à promouvoir les collaborations, à encourager les investissements et à établir des groupes de travail pour mettre

en commun les meilleures pratiques, se félicitant à cet égard de la contribution de l'AIEA et de ses États Membres [46]. ■

En 2024, le Canada et le Royaume-Uni ont signé un accord [47] dans le but de resserrer leur collaboration pour le développement de l'énergie de fusion, et ce dans plusieurs domaines tels que la recherche, l'harmonisation des réglementations et le renforcement des compétences de la main-d'œuvre. Les deux pays coopéreront pour soutenir le déploiement de la fusion dans le monde. S'il est vrai que le Canada n'a pas annoncé de programme national officiel en matière de fusion, les Laboratoires nucléaires canadiens (LNC) ont dévoilé en 2024 un rapport intitulé *L'énergie de fusion pour le Canada* [48], qui se veut une première ébauche de stratégie et de feuille de route. Le rapport exhorte le Gouvernement canadien à mobiliser rapidement un écosystème de la fusion au moyen d'une politique et d'un mandat clairs. L'objectif est de faire en sorte que le Canada devienne un chef de file international des technologies et des services en matière de fusion, avec deux ambitions : la démonstration et l'adoption de l'énergie de fusion entre les années 2030 et 2040, et le déploiement commercial de cette énergie au Canada d'ici 2050. ■

▲
Sommet du G7 en 2024 (avec l'aimable autorisation de l'Union européenne)



◀ **Fusion Industry Association:**
Commercializing Fusion Energy

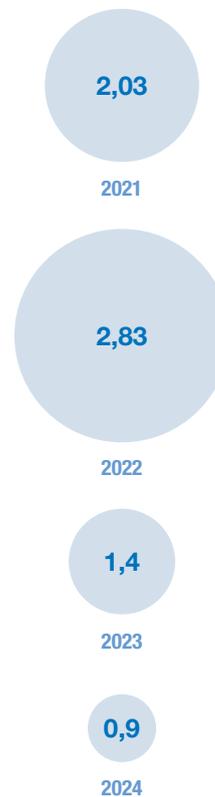
Dans cette optique, les LNC ont signé un accord de collaboration avec l'UKAEA pour mettre au point des technologies de traitement du tritium [49]. Les LNC ont également conclu des accords et des projets avec Stellarex [50] et General Fusion [51], et ont notamment annoncé la création de l'entreprise Fusion Fuel Cycle avec Kyoto Fusionering [52] en vue de la construction et de l'exploitation d'une installation d'essai du cycle de combustible au tritium ouverte à la communauté des utilisateurs. Baptisée « UNITY-2 », cette installation devrait entrer en service d'ici la fin de l'année 2025 et être pleinement opérationnelle d'ici la mi-2026. Elle est conçue pour soutenir le développement intégré du cycle du combustible deutérium-tritium, depuis le déchargement jusqu'à la purification et à l'approvisionnement, de façon à démontrer l'efficacité de la technologie de traitement du tritium dans des conditions et à des débits appropriés. ■

Des investissements privés et des prises de participation en hausse

L'industrie de l'énergie de fusion connaît une croissance constante des investissements d'année en année. Si la majorité des fonds (environ 70 %) étaient jusqu'ici traditionnellement investis dans des entreprises de fusion situées aux États-Unis, l'année 2023 a été marquée par une augmentation notable des prises de participation dans des entreprises issues d'un plus grand nombre de pays [53]. Parmi ces pays figurent notamment l'Allemagne, le Canada, la Chine, la France, Israël, le Japon et la Suède, ce qui démontre que le développement de l'énergie de fusion suscite une vague d'intérêt et un afflux massif d'investissements à l'échelle mondiale.

Le rapport annuel sur l'industrie de la fusion publié par l'Association de l'industrie de la fusion (Fusion Industry Association), intitulé *The global fusion industry in 2024* (L'industrie de la fusion dans le monde en 2024) [15], qui est le quatrième rapport du genre, montre que l'industrie de l'énergie de fusion attire désormais des investissements d'une valeur totale de 7,3 milliards de dollars des États-Unis (contre 6,2 milliards de dollars des États-Unis en 2023). Il examine un ensemble de 45 entreprises privées spécialisées dans l'énergie de fusion, des entreprises bien établies aux nouvelles venues. Même si les États-Unis continuent d'être aux avant-postes et comptent 25 entreprises en activité dans le domaine de l'énergie de fusion (dont plusieurs des plus grandes), le secteur gagne en importance dans le monde et l'on compte au moins une entreprise d'énergie de fusion pour 13 pays, sachant que l'Allemagne, la Chine, le Japon et le Royaume-Uni en ont chacun trois. ■

Financements déclarés par l'Association de l'industrie de la fusion (en milliards de dollars des États-Unis)

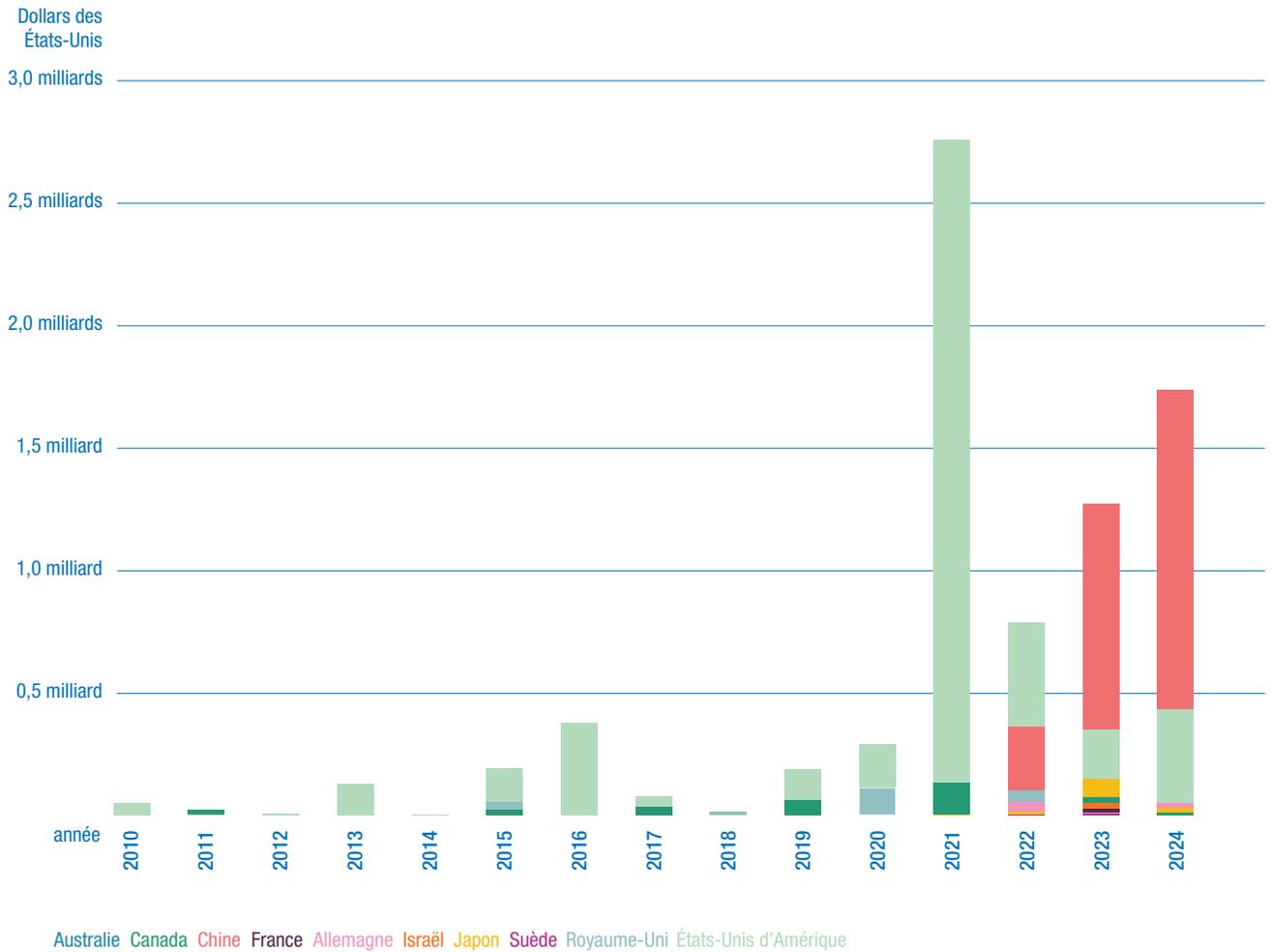


◀ **Fusion Industry Association:**
The global fusion industry in 2024



◀ **Communiqué des dirigeants du Sommet du G7 tenu dans la région des Pouilles (en anglais)**

Prises de participation dans des entreprises d'énergie de fusion entre 2010 et 2024, par État Membre ^[54]

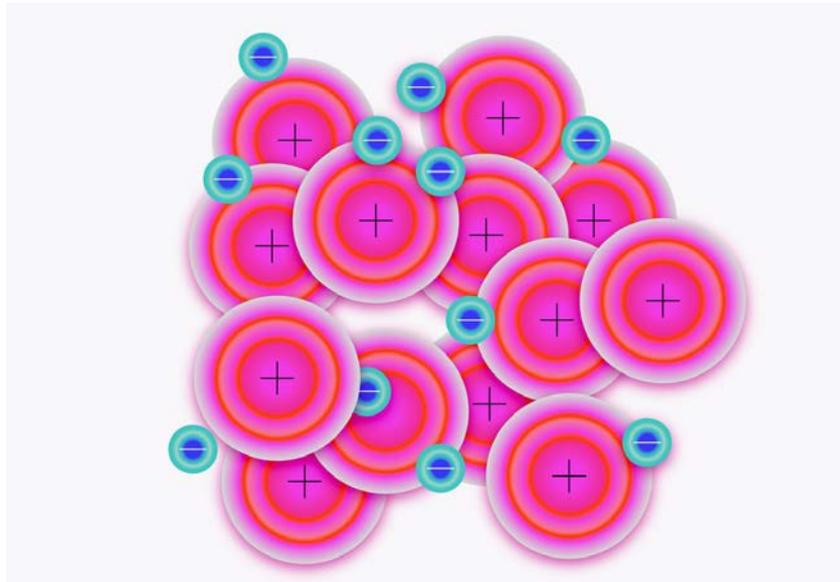


← Fusion Energy Base

Établissement d'approches réglementaires

Les organismes de réglementation et les législateurs se penchent de plus en plus sur les enjeux et les possibilités de l'énergie de fusion. En juillet 2024, le Président des États-Unis, M. Biden, a promulgué la loi de 2023 relative à l'accélération du déploiement des technologies nucléaires polyvalentes et avancées pour une énergie propre (« Accelerating Deployment of Versatile, Advanced Nuclear for Clean Energy Act », aussi appelée « ADVANCE Act ») [55], qui intègre des dispositions de la loi bipartite sur l'énergie de fusion (« Fusion Energy Act ») [56]. Ce texte de loi vise à faciliter le développement de l'énergie de fusion commerciale en établissant une autorité claire en matière de réglementation et en prévoyant des mesures de stimulation de l'investissement. Les dispositions qu'il énonce vont dans le sens de la décision prise précédemment par la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) de dissocier la réglementation de l'énergie de fusion de celle régissant l'énergie de fission, en réglementant les systèmes d'énergie de fusion pour le court terme en vertu du cadre applicable aux sous-produits (comme ceux issus d'accélérateurs de particules). En 2023, la Californie est devenue le premier État des États-Unis à reconnaître l'énergie de fusion comme étant une technologie distincte de l'énergie de fission. La NRC s'emploie actuellement à élaborer des directives en matière d'octroi d'autorisations pour les systèmes de fusion [57].

Le Gouvernement britannique a annoncé que toutes les installations d'énergie de fusion au stade de prototypes prévues au Royaume-Uni continueraient d'être réglementées par l'Agence de



l'environnement et la Direction générale de la santé et de la sûreté, contrairement aux centrales nucléaires, qui tombent sous le coup de la réglementation du Bureau de la réglementation nucléaire.

En outre, le groupe de travail des Nations agiles sur l'énergie de fusion, composé du Canada, du Japon et du Royaume-Uni en tant que membres, ainsi que de Bahreïn et de Singapour en tant qu'observateurs, a émis des recommandations conjointes [58] qui reconnaissent l'importante contribution que l'énergie de fusion pourrait apporter face aux défis mondiaux que représentent les changements climatiques et la sécurité énergétique. Le document d'orientation présente également les avantages qu'il y a à coordonner les efforts en faveur d'une réglementation de l'énergie de fusion adoptée par plusieurs pays et prône la clarté d'un cadre réglementaire, transparent et favorable à l'innovation, qui s'appliquerait aux installations d'énergie de fusion, indépendamment de la technologie de fusion utilisée, et qui énoncerait des mesures de protection appropriées pour les personnes et l'environnement en fonction des risques liés à cette énergie.

L'Allemagne s'engage dans une voie semblable. Une audience publique

de la Commission de l'éducation, de la recherche et de l'évaluation des répercussions technologiques tenue en 2024 a mis en évidence la nécessité d'établir un cadre juridique pragmatique, propice à l'innovation et indépendant pour régir l'énergie de fusion [59]. Un tel cadre aurait pour finalité d'encourager les investissements privés et de favoriser le développement de marchés pour les technologies de la fusion. ■

▲
Illustration reproduite avec l'aimable autorisation d'Ana Kova (États-Unis).



Perspe

ctives

Analyse des
tendances dans
certains secteurs
et tour d'horizon
de l'énergie
de fusion dans
différentes régions
du monde

Perspectives sectorielles

Bref aperçu des principaux exemples de collaboration entre des développeurs et des utilisateurs finaux des technologies de fusion établie afin de faire avancer la commercialisation de l'énergie de fusion

Industries pétrolière et gazière

Invoquant la nécessité de diversifier leurs portefeuilles dans le contexte des efforts déployés à l'échelle mondiale pour sortir progressivement de notre dépendance toujours aussi forte aux combustibles fossiles en vue de parvenir à la neutralité carbone d'ici 2050 – les compagnies pétrolières et gazières engagent d'importants investissements dans les entreprises spécialisées dans l'énergie de fusion. Outre Chevron et Shell, d'autres géants des combustibles fossiles investissent dans les entreprises du secteur de la fusion, notamment Occidental, Eni et le raffineur norvégien Equinor [60].

La start-up californienne TAE Technologies étudie la possibilité d'exploiter sa technologie d'énergie de fusion pour alimenter des installations de capture directe du CO₂ dans l'air mises au point par Oxy Low Carbon Ventures, filiale de la compagnie pétrolière Occidental. Les deux entreprises ont signé un mémorandum d'accord en juin 2024 pour chercher des moyens de commercialiser la technologie de fusion de TAE Technologies afin de produire de l'électricité et de la chaleur sans émissions de gaz à effet de serre pour les dispositifs de capture. Créée en 1998, TAE Technologies peut se targuer d'avoir attiré des investissements de 1,2 milliard de dollars des États-Unis de la part d'entreprises telles que le géant des technologies Google, la banque d'investissement Goldman Sachs et les pétrolières Shell et Chevron [61]. L'entreprise s'est fixé pour objectif de développer une centrale à fusion connectée au réseau électrique d'ici le début de la décennie 2030.

Bien que cela reste à prouver, la capture directe dans l'air est considérée par certains experts comme une technologie sans doute vitale pour atteindre la neutralité carbone en retirant le CO₂ présent dans l'air et en réparant ainsi les dommages causés à l'atmosphère pendant des décennies. Toutefois, pour qu'elle puisse être viable sur les plans technique et économique, cette technologie aurait besoin d'une source continue d'énergie abordable et à émissions nulles, semblable à celle que la fusion pourrait produire.

En plus d'investir dans TAE Technologies, les pétrolières Shell, Chevron et Equinor ont également injecté des capitaux dans Zap Energy. Cette entreprise basée à Seattle (États-Unis) compte déployer sa première centrale à fusion reliée au réseau électrique d'ici une décennie.

L'entreprise Eni a investi dans CFS, tout comme Equinor et Shell. En 2023, Eni a signé un accord de collaboration avec CFS pour soutenir l'industrialisation de la technologie mise au point par cette dernière. La centrale à fusion de CFS devrait entrer en service au début des années 2030. CFS a obtenu des investissements qui s'élèvent jusqu'ici à 2 milliards de dollars des États-Unis. Eni possède également une participation de 25 % dans le projet DTT, une installation italienne en développement dans les environs de Rome qui est consacrée à la recherche, notamment pour trouver des solutions permettant d'extraire la chaleur générée par le processus de fusion [62].

Secteur technologique

Les entreprises technologiques mondiales n'ont pas caché leur désir d'exploiter l'énergie de fusion pour faire face à l'explosion des besoins en énergie de leurs centres de données, sur lesquels reposent leurs systèmes d'IA en pleine expansion. Sam Altman, Directeur général d'OpenAI, aurait déclaré en janvier 2024 que le développement de l'IA dans les années à venir ne nécessiterait rien de moins qu'une « percée » majeure à l'image de celle que pourrait produire l'énergie de fusion [63].

Il aurait d'ailleurs lui-même investi plus de 375 millions de dollars des États-Unis dans Helion Energy, une entreprise spécialisée dans le développement de technologies de fusion qui est installée aux États-Unis et compte également au nombre de ses investisseurs le cofondateur de LinkedIn, Reid Hoffman, le fondateur d'eBay, Peter Thiel, et le cofondateur de Facebook, Dustin Moskovitz. Microsoft, qui fait partie des investisseurs d'OpenAI, s'intéresse à la fusion, entre autres sources d'énergie propre, dans l'espoir de concrétiser son ambition de parvenir à une empreinte carbone négative d'ici 2030.



L'entreprise a signé un accord en mars 2023 pour l'achat d'électricité produite par la première centrale à fusion d'Helion Energy, dont la mise en service est actuellement prévue pour 2028 avec une puissance de 50 MWe. Helion Energy, qui a attiré des investissements d'une valeur totale de 0,6 milliard de dollars des États-Unis, travaillerait en ce moment sur son septième prototype, dont elle annonce qu'il permettra de démontrer que la production d'électricité est possible [64].

Bill Gates, cofondateur de Microsoft, et Jeff Bezos, fondateur du détaillant en ligne Amazon, comptent parmi les plus importants investisseurs soutenant les start-ups du secteur de l'énergie de fusion. Le premier apporte un appui notamment par l'intermédiaire de son fonds Breakthrough Energy Ventures, auquel participent également l'homme d'affaires britannique Richard Branson, le magnat des médias Michael Bloomberg, et le cofondateur du détaillant en ligne chinois Alibaba, Jack Ma. En 2019, le fonds a octroyé, aux côtés d'autres investisseurs, un investissement initial de 115 millions de dollars des États-

Unis à CFS [65]. Quant à Jeff Bezos, son intérêt commercial pour la fusion remonte au moins à 2011, date à laquelle il s'est joint à un groupe qui a investi quelque 20 millions de dollars des États-Unis dans la start-up canadienne de la fusion nucléaire General Fusion, laquelle s'appuie aujourd'hui sur des investissements d'un montant total de 0,3 milliard de dollars des États-Unis pour développer la fusion par cible magnétisée. ■

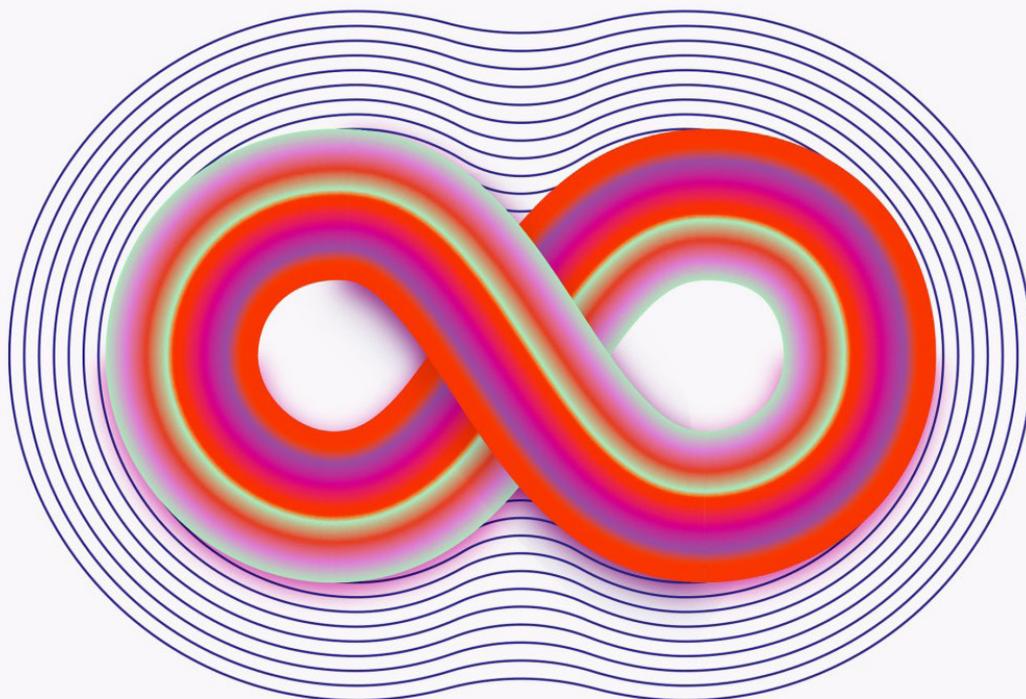
Industrie automobile électrique

La start-up israélienne nT-Tao, qui œuvre dans le domaine de la fusion avec l'appui de l'entreprise japonaise Honda Motor, a déclaré en janvier 2024 qu'elle prévoyait de développer des mini-centrales à fusion destinées à être utilisées comme stations de recharge pour les véhicules électriques et d'en lancer la commercialisation dans le courant de la décennie 2030.

Chaque station, d'une puissance de 10 000 à 20 000 kW, serait d'une taille suffisamment petite pour loger dans un conteneur de fret, si l'on en croit l'entreprise, qui a jusqu'ici recueilli 28 millions de dollars des États-Unis en financement auprès de divers investisseurs, dont deux sociétés du Japon, à savoir Mitsui Sumitomo Insurance Company et Honda Motor [66]. Le constructeur automobile estime que l'énergie de fusion pourrait changer la donne dans le secteur des véhicules électriques [67].

En Chine, le fabricant de véhicules électriques Nio a pris une participation de 20 % dans la start-up Neo Fusion, une entreprise spécialisée dans les technologies de la fusion et contrôlée à 50 % par des entreprises publiques et des organismes de placement. Établie dans la province de l'Anhui et disposant d'un capital social équivalent à plus de 700 millions de dollars des États-Unis, la start-up effectuera des travaux de recherche-développement dans le but de commercialiser sa technologie de fusion à l'échelle mondiale d'ici deux décennies [68]. ■

▲
Illustration reproduite avec l'aimable autorisation d'Ana Kova (États-Unis d'Amérique).



Chaînes d'approvisionnement

Le projet ITER a permis d'établir une assise solide pour la création d'une chaîne d'approvisionnement mondiale pour le secteur de l'énergie de fusion. Les agences des membres du projet ITER disposent chacune de leurs propres contrats avec des entreprises et des organismes de recherche-développement, et apportent ainsi des contributions en nature dans le cadre de divers arrangements relatifs aux achats. Ces agences fournissent l'ensemble des composants, depuis les secteurs de la chambre à vide jusqu'aux gyrotrons en passant par les alimentations haute tension, créant par là même une chaîne d'approvisionnement désormais accessible au secteur privé de la fusion qui est en train d'émerger.

Selon l'Association de l'industrie de fusion [69], les entreprises du secteur ont accru leurs dépenses liées à la chaîne d'approvisionnement, celles-ci ayant dépassé les 612 millions de dollars des États-Unis en 2023, contre quelque 489 millions de dollars des États-Unis en 2022.

Ces chiffres constituent sans doute une estimation prudente sachant que les entreprises n'ont pas toutes répondu à l'enquête à partir de laquelle ils ont été établis. Les postes de dépense les plus importants concernent l'achat de matériel spécialisé mais non spécifique à la fusion, comme des pompes à vide, ainsi que l'achat de matières premières, de services contractuels d'ingénierie et de combustibles. Les entreprises prévoient que leurs dépenses d'approvisionnement en 2024 augmenteront de 24 % par rapport à 2023, 77 % d'entre elles

ayant choisi d'investir dans le développement de leurs capacités pour soutenir l'industrie de la fusion.

Pour illustrer cette croissance de l'activité au niveau de la chaîne d'approvisionnement, on peut citer l'exemple de l'entreprise britannique de fusion Tokamak Energy et de la société japonaise Sumitomo Corporation, qui ont convenu, en juillet 2023, de coopérer pour déployer l'énergie de fusion commerciale à plus grande échelle au Japon et dans le reste du monde. Dans le cadre de l'accord conclu, Sumitomo Corporation mettra son savoir-faire et ses moyens financiers au service de projets menés conjointement avec Tokamak Energy pour renforcer la chaîne d'approvisionnement mondiale de la fusion. Sumitomo Corporation souhaite devenir un chef de file mondial du financement, de la construction et de l'exploitation de centrales à fusion, tandis

▲
Illustration reproduite avec l'aimable autorisation d'Ana Kova (États-Unis d'Amérique).

que Tokamak Energy cherche à accélérer la commercialisation et l'industrialisation de ses tokamaks sphériques, l'objectif étant d'y parvenir d'ici la fin des années 2030 [70]. Tokamak Energy a obtenu des investissements qui s'élèvent jusqu'ici à 0,3 milliard de dollars des États-Unis.

L'entreprise sise au Royaume-Uni, qui développe aussi la technologie des aimants supraconducteurs à haute température pour des applications autres que l'énergie de fusion, a annoncé en janvier 2023 qu'elle avait signé un accord avec le groupe japonais Furukawa Electric pour la fourniture de centaines de kilomètres de ruban supraconducteur à haute température pour son prototype de dispositif à fusion. Le ruban a été mis au point et livré par Furukawa Electric, depuis le site de production de l'entreprise à New York (États-Unis) [71].

Nucor Corporation, la plus grande société nord-américaine spécialisée dans la fabrication et le recyclage de l'acier, a signé un accord avec Helion Energy en 2023, qui prévoit la construction d'une centrale à fusion d'une capacité de 500 MWe sur le site d'une de ses aciéries aux États-Unis. D'après l'entreprise, cet accord est le plus important jamais signé dans le domaine de l'énergie de fusion et il devrait poser les jalons d'une décarbonation mondiale du secteur de la production industrielle [72].

La société Longview Fusion Energy Systems a pour projet de développer la fusion par confinement inertiel par laser en vue de la production commerciale d'énergie. Elle a accordé un contrat à Fluor Corporation en avril 2024 pour la conception et la construction d'une centrale modulaire fonctionnant à l'aide de lasers performants, à la pointe de la technologie, ainsi que grâce à l'optimisation basée sur l'IA. La centrale fournira, selon la conception initiale, entre 1 et 1,6 GW d'énergie, avec un premier modèle d'une puissance de 440 MWe devant être conçu d'ici 2027 et mis en service d'ici 2032. Parmi les grands défis à relever, il faudra trouver des solutions pour gérer le tritium radioactif et pour adapter la vapeur générée par la fusion au réseau. Longview

Fusion Energy Systems songe à plusieurs sites d'implantation et envisage même de convertir des centrales au charbon pour préserver les emplois et les infrastructures.

Parallèlement, l'UKAEA et l'organisme de recherche tchèque Řež ont signé un accord pluriannuel en mai 2024 pour mettre à l'essai des rubans supraconducteurs à haute température destinés au prototype de centrale à fusion britannique STEP. Les deux partenaires mettront au point un banc d'essai spécifique pour étudier l'incidence que les spectres neutroniques entrant en jeu dans la fusion peuvent avoir sur les rubans supraconducteurs, qui serviront à confiner le plasma à des températures allant jusqu'à 150 millions de degrés Celsius. Le banc d'essai, qui devrait être prêt en 2026, fournira des données sur la durabilité des rubans, lesquelles permettront d'orienter la conception et de déterminer la durée de vie des aimants supraconducteurs à haute température du prototype STEP.■

Services publics

L'entreprise américaine de services publics Constellation Energy, qui exploite déjà 21 réacteurs nucléaires dans tout le pays et ambitionne de parvenir à la neutralité carbone d'ici 2030, prendra en main la commercialisation et la transmission de l'énergie produite par la première centrale à fusion d'Helion Energy [73], qui devrait entrer en service en 2028 et fournir de l'électricité à Microsoft.

Ontario Power Generation, l'une des plus grandes compagnies d'électricité du Canada, souhaite elle aussi contribuer au déploiement d'une centrale à fusion. En juin 2024, elle a annoncé avoir signé un mémorandum d'accord avec Stellarex [74], société américaine du secteur de la fusion, pour étudier la possibilité de développer et de déployer l'énergie de fusion dans la province de l'Ontario. Les deux entreprises ont indiqué qu'elles allaient se pencher sur la création d'un centre d'excellence de l'énergie de fusion et recenser les sites possibles pour

l'implantation future d'une centrale à fusion de type stellarator en Ontario.

Une autre compagnie d'électricité canadienne, Bruce Power, a annoncé en 2022 qu'elle avait conclu un accord de collaboration avec General Fusion et l'Institut de l'innovation nucléaire du Canada en vue de faciliter le déploiement de l'énergie de fusion en Ontario. L'énergie nucléaire représentant déjà près des deux tiers de la production électrique dans la province, les trois organisations ont fait savoir qu'elles s'attacheraient à mettre à profit les technologies, les compétences et le savoir-faire dont dispose la région en matière d'énergie propre. Désireuses de veiller à la participation des parties prenantes, elles ont indiqué qu'elles chercheraient à sensibiliser les habitants, les acteurs de l'industrie et les entreprises aux perspectives qu'offre l'énergie de fusion pour ce qui est de transformer la production d'énergie propre en Ontario [75].

Selon certaines informations, Anhui Province Energy Group Company Limited, importante entreprise de services publics basée en Chine, aurait investi dans l'entreprise Neo Fusion [76].■



◀ **Fusion Industry Association:**
The fusion Industry Supply Chain 2024

Perspectives régionales

Afrique

Algérie, Égypte, Libye, Maroc et Tunisie

En Afrique, la recherche-développement consacrée à l'énergie de fusion est pour l'heure peu développée. La région dispose toutefois d'un savoir-faire et de professionnels qualifiés dans différents domaines intéressant la fusion. Dans plusieurs pays, des scientifiques et des groupes de recherche mènent actuellement des travaux sur la science des plasmas appliquée à la fusion. L'Algérie, l'Égypte, la Libye, le Maroc et la Tunisie, par exemple, font des progrès en ce qui concerne l'enseignement dans le domaine de la science des plasmas. Leurs universités sont très actives dans la recherche, notamment dans divers champs d'étude tels que les plasmas radiofréquences et leur application, la science des matériaux, la chimie des plasmas ou encore la théorie et la modélisation des plasmas. En outre, deux tokamaks sont implantés en Égypte et en Libye, les deux pays renforçant ainsi leurs contributions à la communauté scientifique mondiale. Ces initiatives illustrent l'engagement croissant de l'Afrique dans l'enseignement et la recherche dans les domaines de la science des plasmas et de la science de la fusion. ■

Asie et Pacifique

Australie et Nouvelle-Zélande

En Australie, la recherche sur la fusion est coordonnée par le Forum ITER australien, un réseau réunissant des scientifiques et des ingénieurs œuvrant dans diverses disciplines. Le diagnostic des plasmas, la théorie et la modélisation des plasmas ainsi que les études de matériaux pour les applications de fusion constituent les principaux domaines de recherche. L'Australie accueille également sur son territoire l'entreprise HB11 Energy, une société privée spécialisée dans la fusion par laser.

En Nouvelle-Zélande, l'entreprise privée Openstar Technologies est parvenue à mobiliser 12 millions de dollars des États-Unis pour développer des technologies de fusion fondées sur l'approche du dipôle en lévitation. ■

Chine

La Chine est dotée de plus d'une douzaine de dispositifs de fusion expérimentaux qui sont en exploitation, en construction ou à l'état de projet. Ces initiatives sont réalisées avec le concours d'entreprises industrielles publiques, d'universités et d'instituts de recherche. Grâce à des dispositifs de fusion de premier plan tels que les tokamaks EAST et HL-3, la Chine a obtenu d'excellents résultats expérimentaux

qu'elle met à profit en investissant dans de nouveaux projets de fusion, comme le tokamak BEST et le réacteur CFETR, ouvrant ainsi la voie au déploiement de centrales à fusion. Parallèlement, le pays s'attache à se doter d'une main-d'œuvre spécialisée dans la fusion, son objectif étant de former un millier de nouveaux physiciens spécialistes des plasmas. Par ailleurs, la Chine entreprend actuellement la construction d'une installation de recherche approfondie sur la technologie de fusion. Baptisée CRAFT (Comprehensive Research Facility for Fusion Technology), cette installation servira à concevoir et tester des composants de centrales à fusion et devrait sortir de terre en 2025 [77].

Plusieurs entreprises investissent également de façon massive dans la recherche sur la fusion, un grand nombre de projets étant sur les tables à dessin [78]. En 2024, le Gouvernement a annoncé la mise sur pied d'une nouvelle entreprise nationale [79] avec pour ambition de construire une centrale pilote de recherche en ingénierie, qui se trouve pour l'instant dans sa phase d'étude de conception. L'objectif est d'atteindre une production de 300 MW d'énergie de fusion en régime permanent et de 600 MW en régime pulsé, des ajustements étant possibles pendant la phase de conception. La construction devrait débuter en 2030 au plus tard, et l'ensemble des composants matériels devraient être prêts d'ici 2035. Dans cette optique, il est actuellement procédé à la modernisation du tokamak HL-3 pour permettre la réalisation d'expériences avec le mélange de combustible deutérium-tritium. Cette modernisation devrait s'achever d'ici 2027, mais le début de la phase d'exploitation au deutérium-tritium dépendra des délais nécessaires pour l'obtention des autorisations et la mise en service du dispositif. ■

Inde

Les principaux efforts déployés par l'Inde en ce qui concerne la recherche, le développement, le financement et d'autres contributions dans le domaine de la fusion et des plasmas sont centrés sur le projet ITER. Le pays opère plusieurs dispositifs de recherche expérimentaux et s'emploie actuellement à définir les grandes lignes de sa feuille de route en matière de fusion pour les 25 prochaines années. Celle-ci prévoit notamment, en amont du lancement de la centrale de démonstration indienne à la fin des années 2040, le développement de deux nouvelles machines : une source de neutrons de fusion basée sur un tokamak sphérique, et un tokamak classique conçu pour fonctionner en régime permanent et dont la taille devrait être équivalente à environ deux tiers de celle d'ITER. ■

République islamique d'Iran

La République islamique d'Iran opère actuellement trois tokamaks : Alvand, Damavand et IR-T15, ce dernier étant consacré à l'étude des plasmas dans différentes conditions expérimentales. ■

Israël

L'entreprise privée nT-Tao, spécialisée dans la fusion, est établie en Israël depuis 2019. Elle a indiqué avoir reçu des financements à hauteur de 32 millions de dollars des États-Unis et s'emploie à développer la technologie des stellarators aux fins de la production d'énergie. ■



Japon

Avec plus d'une vingtaine de dispositifs de fusion expérimentaux en service, le Japon est à l'avant-garde des efforts engagés pour faire progresser la recherche-développement sur la fusion. Sa stratégie en matière de fusion s'articule autour d'une approche par étapes devant mener à l'utilisation pratique de l'énergie de fusion. Trois étapes sont ainsi prévues : l'étude de conception et le développement technologique de base de la centrale de démonstration JA DEMO jusqu'en 2025 ; la conception technique et le développement technologique complet de 2025 à 2035 ; et la construction de la centrale de démonstration après 2035 s'il en est décidé ainsi compte tenu des progrès réalisés dans le cadre du projet ITER.

Par ailleurs, la collaboration bilatérale entre le Japon et l'UE dans le cadre de l'accord sur une « approche élargie » est axée sur les trois domaines suivants : i) la conception de centrales et la recherche-développement ; ii) la validation et la conception techniques pour des installations d'irradiation des matériaux de fusion dans le cadre d'un projet² ; et iii) l'exploitation du tokamak JT-60SA, qui est entré en service à la fin de l'année 2023. Diverses initiatives de recherche universitaire sont également en cours dans des universités et des instituts spécialisés, qui ont recours à des dispositifs de recherche et à des installations dotées de lasers de haute puissance. ■

² Ce projet axé sur la validation et la conception techniques de l'installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion (IFMIF), également dénommé « IFMIF/EVEDA », doit permettre de réaliser des essais de validation pour la source de neutrons IFMIF-DONES (DEMO Oriented Neutron Source) en construction en Espagne. Dans le cadre des activités du projet IFMIF/EVEDA, trois prototypes d'installations ont été construits pour valider chacun des trois composants clés de l'IFMIF-DONES. L'installation d'essai, située à Karlsruhe (Allemagne), teste des concepts pour le module d'essai à haut flux de l'IFMIF-DONES. L'installation de la cible de lithium, qui se trouve à Ōarai (Japon), évalue différents concepts pour le rideau de lithium liquide de l'IFMIF-DONES. Enfin, l'installation de l'accélérateur, établie à Rokkasho (Japon), met à l'essai des concepts pour l'accélérateur de particules qui produira le faisceau de deutérons de l'IFMIF-DONES.

▲
Illustration d'une vue aérienne de l'installation de recherche CRAFT à Hefei, dans la province de l'Anhui en Chine (avec l'aimable autorisation des Instituts de sciences physiques de Hefei de l'Académie des sciences de Chine).



Liban

Au Liban, la recherche universitaire vise à faire avancer plusieurs aspects fondamentaux de la science de la fusion, notamment la turbulence des plasmas, le confinement, le développement de diagnostics et les conceptions de divertors. ■

Pakistan

Le Pakistan exploite actuellement deux tokamaks, baptisés GLAST-III et MT-I. À ceux-ci vont s'ajouter deux autres tokamaks : le MT-2, qui est en construction, et le PST, qui en est au stade du projet [80]. L'ensemble de ces initiatives doivent permettre au pays de renforcer ses capacités dans le domaine de l'énergie de fusion. ■

République de Corée

La République de Corée poursuit avec détermination sa feuille de route en matière de fusion qui doit l'amener à se doter d'une centrale de démonstration à fusion d'ici 2050. Les activités relatives à l'étude de conception se dérouleront jusqu'en 2030, avant de laisser place à la phase de conception technique prévue de 2031 à 2035. Ces efforts sont soutenus par des travaux de recherche-développement de pointe menés dans les tokamaks KSTAR et VEST, qui serviront de base

au développement de la science et de la technologie qu'il faudra impérativement maîtriser d'ici 2035. En outre, la République de Corée envisage actuellement un nouveau projet intitulé complexe d'essai KFEAT (Korea Fusion Engineering Advanced Test). Cette installation est conçue pour satisfaire aux prescriptions relatives à l'évaluation de la performance de la couverture tritigène d'une centrale à fusion, notamment en ce qui concerne son fonctionnement continu sur le long terme, les flux de neutrons élevés produits par la fusion et la cible de grande taille nécessaire pour irradier l'unité de production de tritium [81]. Le complexe comprendra les éléments suivants :

- une installation intégrée d'essai de la production de tritium, exploitant un système hybride piloté par un accélérateur de deutérons de 40 MeV avec une intensité maximale de 10 mA pour la génération de neutrons de fusion, indispensable pour tester les composants de la couverture ;
- une installation d'essai du système de couverture, conçue pour démontrer la fiabilité et la sûreté de la couverture et de ses systèmes auxiliaires ;
- une installation expérimentale du cycle du combustible, conçue pour vérifier le fonctionnement continu du cycle du combustible avec un mélange hydrogène-deutérium à une échelle expérimentale d'un dixième. ■



Arabie saoudite

L'Arabie saoudite investit dans la recherche-développement sur les technologies énergétiques avancées, y compris la fusion. Dans le cadre de cette stratégie, le Fonds technologique JIMCO a injecté des fonds dans CFS ainsi que dans General Fusion. ■

Singapour

Selon les informations communiquées, Temasek Holdings Limited, société de placement détenue par le Gouvernement singapourien, aurait investi dans CFS [82]. ■

Thaïlande

En coopération avec la Chine, la Thaïlande a mis en service son premier tokamak en 2023, le TT-1 [83]. Première installation du genre en Asie du Sud-Est, le TT-1 joue un rôle essentiel pour l'avancement de la recherche sur la fusion en Thaïlande et dans les pays voisins. Il s'annonce comme un outil d'apprentissage d'un intérêt inestimable pour le développement dans les domaines des plasmas de fusion et de l'ingénierie de la fusion [84]. ■

Plusieurs pays mènent une initiative qui vise à mettre sur pied une agence arabe de l'énergie de fusion. Celle-ci ferait office d'organisme central chargé de coordonner la recherche et les collaborations en matière de fusion dans la région, d'obtenir des financements pour de futurs projets consacrés à l'énergie de fusion et de veiller à ce que les pays concernés prennent une part active dans les efforts qui sont entrepris au niveau mondial dans le domaine.

▲
1 Le TT-1 a été officiellement inauguré en Thaïlande (avec l'aimable autorisation des Instituts de sciences physiques de Hefei de l'Académie des sciences de Chine).

2 Représentation du projet de complexe expérimental avancé de fusion coréen (avec l'aimable autorisation de l'Institut coréen de l'énergie de fusion de la République de Corée).



Vue de l'intérieur de la cuve du W7-X dans laquelle est contenu le plasma (avec l'aimable autorisation de l'Institut Max-Planck de physique des plasmas d'Allemagne).



Europe

EUROfusion, FuseNet, Fusion for Energy et IFMIF-DONES

EUROfusion est le consortium européen qui a été établi³ pour coordonner et financer les activités de recherche-développement relatives à la fusion en Europe. La feuille de route d'EUROfusion suit une approche par étapes qui définit des objectifs sur le court, le moyen et le long terme [85]. Axée dans un premier temps sur la contribution au projet ITER, la feuille de route mettra ensuite l'accent sur la centrale de démonstration EU-DEMO, dont la mise en service est prévue à l'horizon 2050.

Les objectifs à court terme portent essentiellement sur la recherche-développement et la construction d'ITER et d'installations d'essai des matériaux telles que l'IFMIF-DONES, ainsi que sur l'étude de conception de l'EU-DEMO. À moyen terme, la priorité ira à l'exploitation scientifique et technologique d'ITER et de l'IFMIF-DONES et au lancement de la phase de conception technique de l'EU-DEMO avec la participation du secteur industriel. La vision à long terme, quant à elle, prévoit la conception, la construction et l'exploitation de l'EU-DEMO, cette phase s'accompagnant d'une collaboration accrue avec le secteur industriel. ■

FuseNet est le réseau européen pour l'enseignement sur la fusion. Avec ses programmes axés sur le développement de l'éducation et sur la mobilité, il fait office de plateforme centrale pour la formation à la fusion. Le réseau est affilié à EUROfusion et, à ce titre, a pour mission de développer et de coordonner les activités pédagogiques qui appuient la réalisation de la feuille de route d'EUROfusion. Il mène diverses initiatives, qui consistent par exemple à mettre sur pied des programmes de financement destinés aux étudiants en master, à organiser des activités de mise en réseau pour les doctorants, à élaborer des supports didactiques et à organiser des événements pour les étudiants des cycles inférieurs. En outre, FuseNet s'emploie à nouer des relations plus étroites avec l'industrie, pour faire en sorte que les efforts déployés en matière d'enseignement soient au diapason des besoins et de l'évolution du secteur. ■

Fusion for Energy est l'organisation créée par l'Union européenne pour gérer la contribution européenne au projet ITER. L'Europe est responsable de près de la moitié du projet, la part restante étant assumée à parts égales par les six autres membres, à savoir la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon et la République de Corée. Fusion for Energy collabore avec les acteurs de l'industrie et les établissements de recherche pour mettre au point et fabriquer les composants de haute technologie que l'Europe fournira pour le projet ITER. ■

Au cours des dernières années, plusieurs entreprises privées en Allemagne, en France, en Italie et en Suède, entre autres, ont entrepris d'importants efforts pour développer les technologies de la fusion. Afin d'assurer l'approvisionnement énergétique à long terme de l'Europe, dix entreprises européennes ont décidé en juin 2024 de créer l'Association européenne de la fusion [86]. Cet organisme tourné vers un objectif commun rassemblera différentes parties prenantes de l'industrie de la fusion et des autorités nationales, qui chercheront à accélérer l'industrialisation de l'énergie de fusion. ■

³ EUROfusion réunit les pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Malte, Norvège, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume des Pays-Bas, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède, Suisse et Ukraine.



Allemagne

L'Allemagne est une pionnière dans plusieurs domaines intéressant le développement de l'énergie de fusion, notamment la recherche sur les stellarators, la physique des tokamaks, les technologies et matériaux de fusion et les interactions plasma-paroi. Elle abrite le W7-X, qui est le plus grand stellarator au monde. Celui-ci est équipé de bobines supraconductrices modulaires qui permettent un fonctionnement du plasma en régime permanent afin d'étudier les régimes qui sont adaptés aux centrales électriques.

Le Gouvernement allemand accélère les efforts en vue de la commercialisation de la fusion. Conscient de la place croissante qu'occupent les entreprises privées dans le pays, il entend mettre à profit leurs contributions et leur mobilisation. Les entreprises allemandes qui sont actives dans le secteur de l'énergie de fusion ont créé l'association professionnelle Pro-Fusion [87]. Celle-ci leur permettra de contribuer au développement de l'écosystème de l'énergie de fusion économique et, à plus longue échéance, d'influer sur l'opinion publique concernant cette forme d'énergie. ■

Italie

L'Italie dispose d'un programme dynamique dans le domaine de la fusion. Son nouveau projet de fusion, le tokamak DTT, devrait entrer en service

après 2025. Le consortium chargé du projet, qui réunit un grand nombre d'instituts de recherche italiens, des partenaires publics et régionaux, des parties prenantes internationales et des entreprises privées, est parvenu à mobiliser près de 500 millions d'euros pour la construction du DTT. L'Italie accueille également sur son territoire plusieurs installations de recherche expérimentale sur la fusion et contribue activement aux préparatifs en vue de l'exploitation d'ITER et de la conception de l'EU-DEMO. Les entreprises italiennes ont obtenu des contrats d'une valeur de plus de 1,8 milliard d'euros pour le développement des technologies de fusion. ■

France

La France est le pays hôte du projet ITER et de plusieurs autres installations de recherche sur la fusion, dont le tokamak WEST et diverses installations dotées de lasers. On y trouve également la start-up Renaissance Fusion, qui met au point un concept de stellarator doté d'aimants supraconducteurs à haute température et de parois de métal liquide. Afin de soutenir la recherche-développement dans ce domaine, le Gouvernement français étudie actuellement différents dispositifs susceptibles de stimuler les PPP. ■

Kazakhstan

Le Kazakhstan mène un ensemble varié d'activités de recherche sur la fusion, qui vont des petits bancs d'essai sur les plasmas à



faible température aux expérimentations grandeur nature, comme le tokamak KTM, en passant par les applications des accélérateurs pour la recherche sur la fusion. Le pays a conclu un accord de coopération avec l'Organisation ITER pour étudier la radiorésistance des systèmes de diagnostic du plasma et la qualité des matériaux structurels. Il a par ailleurs établi un partenariat avec le Bélarus, la Fédération de Russie, le Kirghizistan et le Tadjikistan pour l'utilisation conjointe du KTM, contribuant ainsi à accentuer les efforts déployés dans la région en matière de recherche-développement. ■

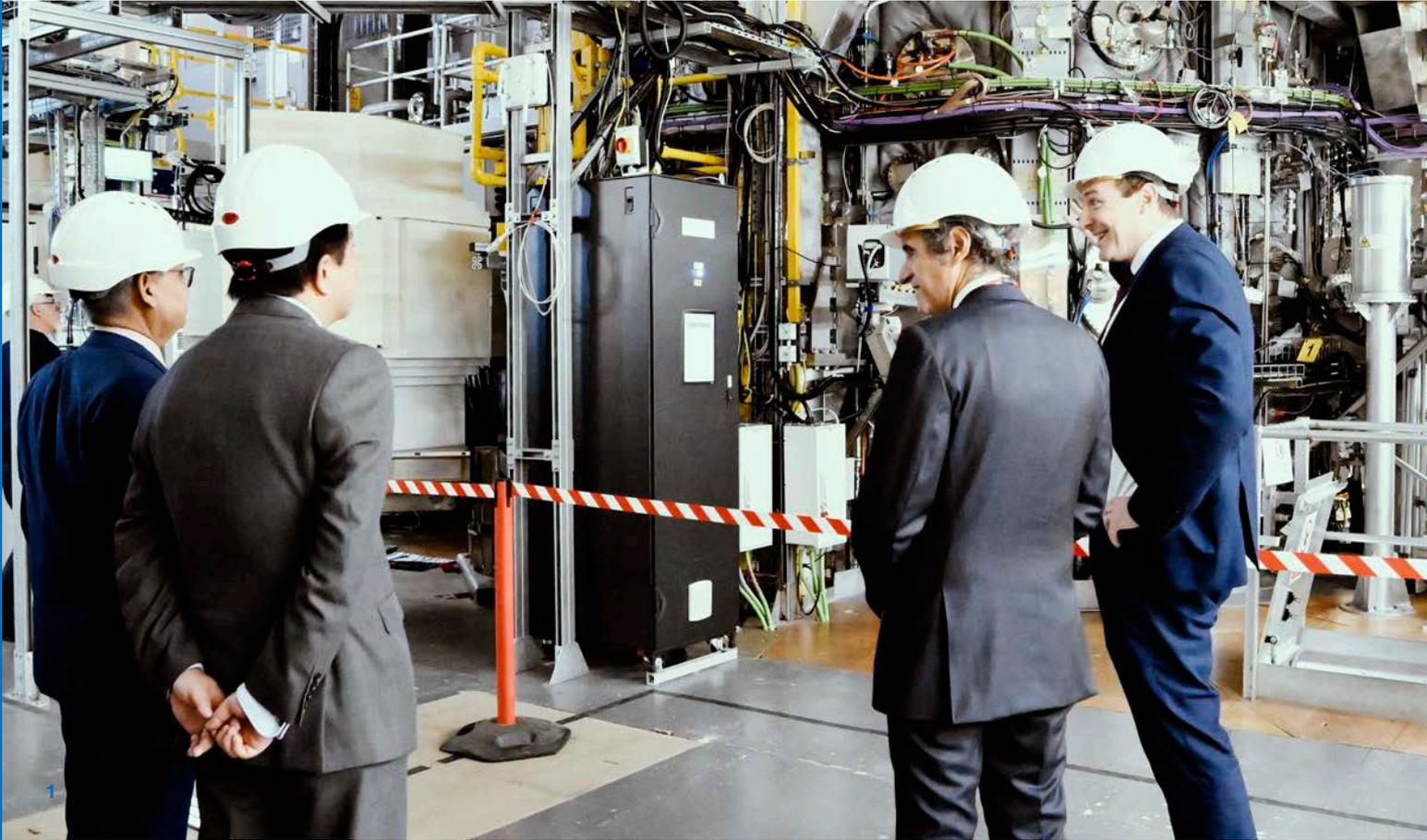
Fédération de Russie

En Fédération de Russie, le développement de l'énergie de fusion s'inscrit dans le cadre de la stratégie nationale relative à l'énergie atomique, qui accorde la priorité aux dispositifs d'énergie de fusion pure et aux réacteurs hybrides fusion-fission. Parmi les principales organisations qui prennent part à cette initiative figurent la Corporation d'État de l'énergie atomique « Rosatom », le Ministère de la science et de l'enseignement supérieur (y compris l'Académie des sciences de Russie) et le Centre national de recherche « Institut Kourtchatov ». Les travaux de recherche portent sur les tokamaks, les systèmes laser et les systèmes hybrides fusion-fission, ces derniers étant considérés d'importance stratégique en vue de l'exploitation des futurs réacteurs nucléaires et centrales à fusion dans le pays. ■



1 L'IFMIF-DONES est une installation d'essai des matériaux qui est en cours de construction à Grenade (Espagne). Le projet est piloté par l'Espagne, qui finance 50 % des coûts de construction et 10 % des coûts de fonctionnement, et par la Croatie, qui assume 5 % de chacun de ces postes de dépenses. L'IFMIF-DONES utilisera un accélérateur de particules pour produire un faisceau de deutérons à onde entretenue dirigé vers une cible constituée d'un rideau de lithium liquide. L'interaction entre le deutérium et le lithium générera suffisamment de neutrons libres pour simuler le flux de neutrons attendu au fil du temps dans l'EU-DEMO. Situé directement derrière la cible de lithium, le module d'essai à haut flux contiendra des capsules d'échantillons de matériaux, dont le comportement sous irradiation neutronique pourra ainsi être analysé [88].

2 Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, visite l'installation d'essai des équipements de télémanipulation et de robotique à Culham (Royaume-Uni).



Royaume-Uni

L'UKAEA est l'organisation nationale du Royaume-Uni chargée de la recherche et du développement de l'énergie de fusion. Elle supervise l'entreprise UK Industrial Fusion Solutions, qui a la responsabilité de mettre sur pied le prototype de centrale à fusion STEP. L'UKAEA s'emploie également à mettre en œuvre le programme « Fusion Futures » établi par le Royaume-Uni pour soutenir l'exécution de sa stratégie en matière de fusion. Ce programme prévoit notamment l'implantation de nouvelles installations sur le campus de l'UKAEA à Culham, dans le sud de l'Angleterre, pour promouvoir le développement de nouvelles technologies et renforcer les capacités dans le domaine du cycle du combustible de fusion. Il vise à favoriser une innovation de niveau international et à stimuler les capacités générales du secteur en misant sur la collaboration à l'échelle mondiale et sur le développement de futures centrales à fusion. Par ailleurs, il est prévu d'établir un programme de formation sur la fusion pour étoffer les compétences dans un large éventail de disciplines et à différents niveaux.

En 2021, l'UKAEA a inauguré son centre des technologies de fusion [89] près de Rotherham, dans le sud du comté de Yorkshire, afin de mettre au point et de tester des matériaux et des composants pour les centrales à fusion qui verront le jour à l'avenir. L'UKAEA collabore également avec des universités, d'autres instituts de recherche et des acteurs de la chaîne d'approvisionnement industrielle dans divers domaines, notamment la robotique et les matériaux.

L'UKAEA possède plusieurs dispositifs de fusion, dont les tokamaks MAST Upgrade et JET. JET a terminé ses activités de production de plasma à la fin du mois de décembre 2023, et l'UKAEA encadre maintenant le projet de déclassement et de réaffectation de l'installation [90]. Ce projet, le premier du genre au monde, permettra d'acquérir des connaissances scientifiques et techniques qui contribueront au développement des dispositifs et centrales à fusion de demain. Plusieurs activités sont prévues, notamment le désassemblage robotisé du tokamak de JET, des travaux de recherche sur la récupération du tritium en vue de sa réutilisation comme combustible de fusion et la poursuite des activités de développement sur le campus de l'UKAEA à Culham. ■

1 Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, visite le tokamak MAST Upgrade.

2 L'accord a été signé par L. Huerta, représentant de la Commission chilienne de l'énergie nucléaire, en présence du Sous-Secrétaire d'État à l'énergie du Chili, L. F. Ramos.



Amérique latine et Caraïbes

Argentine, Brésil, Chili, Costa Rica, Mexique et Pérou

Les activités dans le domaine de la fusion sont en essor dans le monde, une tendance qui s'observe également dans plusieurs pays d'Amérique latine, parmi lesquels l'Argentine, le Brésil, le Chili, le Costa Rica, le Mexique et le Pérou. Différentes initiatives sont menées pour renforcer les capacités régionales en matière de fusion et de physique des plasmas, l'accent étant mis sur le développement de la recherche et la mise en place de collaborations au moyen d'expériences conjointes, de stages de recherche, de programmes coordonnés et d'universités d'été consacrées à la physique des plasmas et à la science et la technologie de la fusion.

En 2024, l'AIEA a mis en ligne, en collaboration avec le Laboratoire de physique des plasmas de Princeton, une nouvelle série de webinaires destinés à présenter l'avancement et l'évolution des activités qui sont menées dans le domaine de la science de la fusion et des plasmas en Amérique latine.

3 Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, signe un accord avec le Ministre péruvien des affaires étrangères, J. González-Olaechea, lors de sa visite au Pérou en juin 2024.

En mai 2024, l'AIEA et le Gouvernement du Chili ont signé un accord visant à resserrer leur coopération concernant la technologie nucléaire et le lithium [91]. L'accord, qui doit permettre d'exploiter la technologie nucléaire pour améliorer l'extraction du lithium, ouvre la voie à un soutien régional de plus grande envergure de la part de l'AIEA. Le lithium est utilisé dans la fusion ainsi que dans d'autres secteurs de l'énergie.

En juin 2024, l'AIEA et le Gouvernement du Pérou ont signé une déclaration commune de coopération en ce qui concerne les applications de la technologie nucléaire dans l'industrie minière. L'objectif est d'accompagner le pays dans ses efforts de protection de l'environnement en l'aidant à mener ses activités d'exploitation minière et de prospection du lithium de façon durable [92]. ■



◀ **Webinaires de l'AIEA sur les activités relatives à la fusion en Amérique latine**



Amérique du Nord

États-Unis d'Amérique

Le Département de l'énergie des États-Unis investit depuis des décennies dans la recherche sur la fusion par l'intermédiaire du Bureau des sciences et de son programme consacré aux sciences de l'énergie de fusion. On peut notamment citer en exemple l'appui apporté aux collaborations internationales telles que le projet ITER ou encore le programme de l'Administration nationale de la sécurité nucléaire consacré à la fusion par confinement inertiel. Plus récemment, l'Agence chargée des projets de recherche avancée sur l'énergie (Advanced Research Projects Agency–Energy, ou ARPA-E) a orienté ses travaux de recherche-développement en matière de fusion vers des domaines qui pourraient être vecteurs de transformations, son objectif premier étant de permettre une commercialisation de l'énergie de fusion dans les meilleurs délais. Dans le cadre de son programme sur la fusion, le Département de l'énergie s'efforce maintenant de faire le lien entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée pour répondre aux besoins d'une industrie de la fusion qui ne cesse de se développer dans le

pays. En effet, les États-Unis d'Amérique ne comptent pas moins de 25 entreprises spécialisées dans l'énergie de fusion, soit plus que tout autre pays, et bon nombre d'entre elles sont parmi les plus grandes au monde. C'est aussi sur le sol américain que l'on trouve le plus grand nombre de dispositifs de fusion en exploitation, en construction ou en développement, puisqu'on en recense plus d'une quarantaine. Dans ce contexte, le Département de l'énergie coordonne aujourd'hui toute une série d'activités nouvelles qui visent à préparer le terrain en vue d'une commercialisation de l'énergie de fusion à plus ou moins brève échéance. À cet égard, on peut notamment citer le programme de développement par étapes de la fusion [93], des engagements internationaux destinés à renforcer la sécurité énergétique et le leadership technologique [94], ainsi que diverses initiatives menées conjointement par plusieurs organismes publics [95] pour évaluer l'environnement concurrentiel mondial et le développement du marché, élaborer des cadres réglementaires adaptés, mettre en place des chaînes d'approvisionnement, promouvoir le développement inclusif de la main-d'œuvre, assurer la justice énergétique et environnementale, garantir la création de filières d'élimination et de recyclage qui soient viables et favoriser la participation du public. ■



Canada

Le Canada possède de vastes compétences techniques dans des domaines qui sont essentiels pour le bon développement de l'industrie de la fusion, comme la production et la manipulation du deutérium et du tritium, la robotique, la télémanipulation et la science des matériaux. Ces capacités peuvent être mises à profit pour encourager l'essor de la fusion et correspondent bien aux besoins des technologies de fusion. En dépit de ces atouts, le gouvernement n'apporte qu'un appui modéré à la recherche-développement sur la fusion à l'échelle nationale, les activités en la matière étant essentiellement le fait d'établissements universitaires et d'entreprises privées.

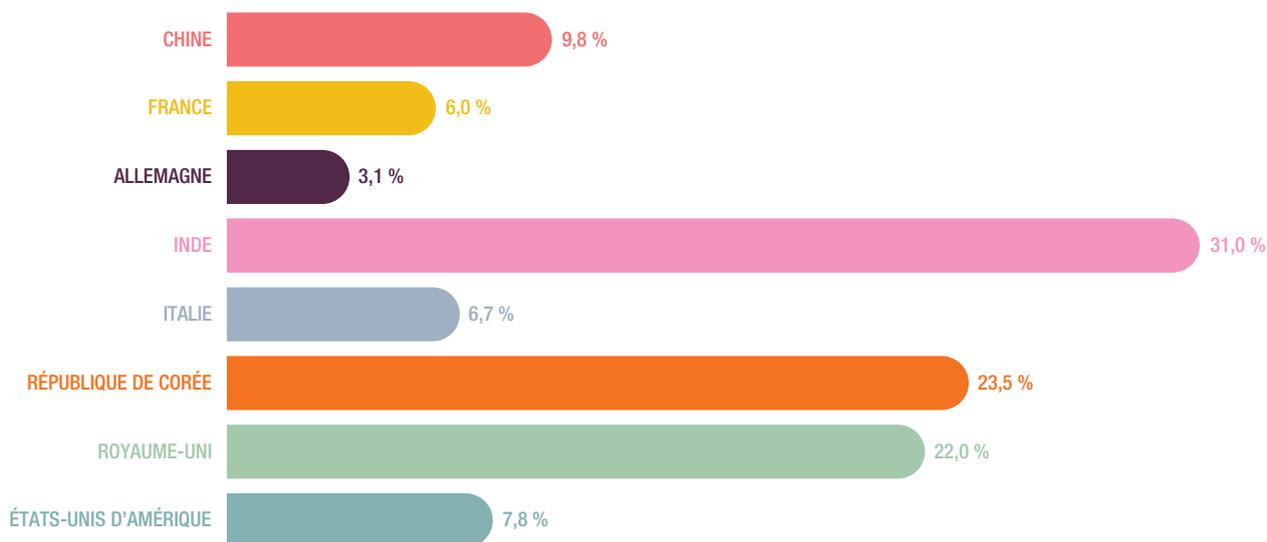
Dans leur rapport intitulé *L'énergie de fusion pour le Canada* [48], les Laboratoires nucléaires canadiens exhortent le Gouvernement canadien à établir une politique et un mandat clairs en vue de la mise en place d'un écosystème de la fusion. Dans cette optique, ils ont annoncé qu'ils allaient ouvrir leur appel d'offres pour des projets de petits réacteurs modulaires aux prototypes de centrales à fusion [50]. Ils ont également élargi leur Initiative canadienne de recherche nucléaire afin d'accorder une plus grande place à la recherche-développement fondée sur la fusion, en encourageant les projets de collaboration avec des fournisseurs de réacteurs nucléaires avancés. ■



Le Directeur général de l'AIEA, Rafael Mariano Grossi, visite le Laboratoire de physique des plasmas de Princeton (États-Unis d'Amérique) en septembre 2024.

La fusión en chiffr

on res



Taux de croissance composé positif des articles en premier auteur présentés à la Conférence sur l'énergie de fusion par pays (2006-2023).

Au cours des 17 dernières années, l'Inde, la République de Corée et le Royaume-Uni ont été les pays qui ont connu la

croissance la plus rapide en termes de nombre total d'articles rédigés en qualité de premier auteur, ce qui illustre leur participation croissante à la coopération internationale. Cette augmentation des contributions souligne le rôle vital de la collaboration mondiale dans l'accélération

des progrès sur la voie de l'énergie de fusion, car la mise en commun des savoir-faire et les efforts collectifs stimulent l'innovation et facilitent les percées scientifiques.

L'énergie de fusion en 2024 : aperçu

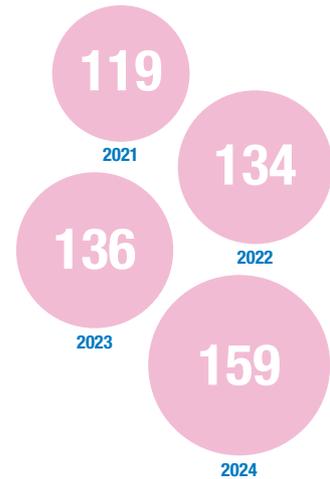
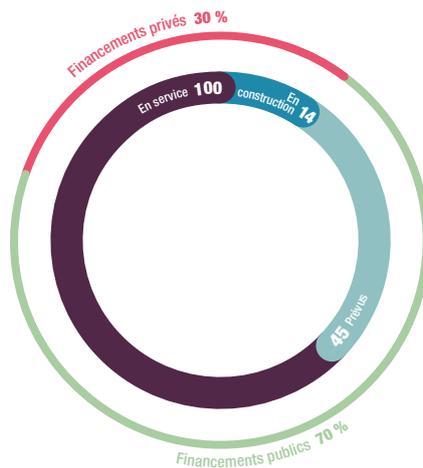
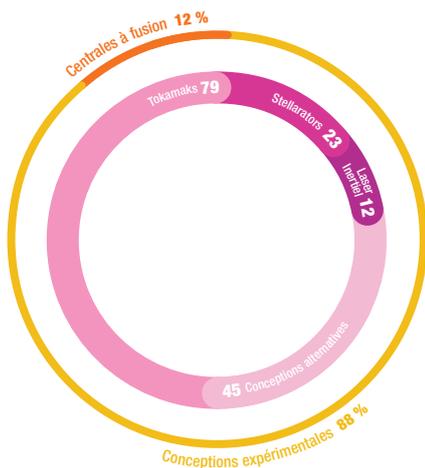
Entre 2021 et 2024, le secteur de l'énergie de fusion a connu une croissance et une diversification importantes. Le nombre total de projets de fusion a bondi, avec une augmentation notable des conceptions reposant sur des méthodes alternatives de confinement, notamment sur le confinement inertiel, et sur des stellarators, ce qui souligne une évolution vers l'exploration de technologies variées, au-delà des tokamaks traditionnels.

En 2024, la répartition entre les projets expérimentaux et les centrales à fusion est plus équitable, ce qui indique une maturation du secteur. Le secteur a également connu une augmentation significative des projets planifiés, ce qui traduit une planification stratégique à long terme. En outre, la participation du secteur privé a presque doublé, ce qui témoigne d'un intérêt et d'investissements accrus

sur le plan commercial, qui viennent s'ajouter au soutien du secteur public, qui demeure solide. L'année 2024 marque une phase dynamique dans le domaine de l'énergie de fusion, caractérisée par la diversité technologique, la planification stratégique et le renforcement de la volonté de collaboration entre les secteurs public et privé. ■

Augmentation des investissements et diversité des approches technologiques

Les tendances observées récemment dans le secteur de l'énergie de fusion laissent entrevoir un avenir prometteur caractérisé par une accélération des progrès technologiques, une augmentation des investissements et une adoption à plus large échelle. La diversification sous la forme de l'ouverture à des conceptions



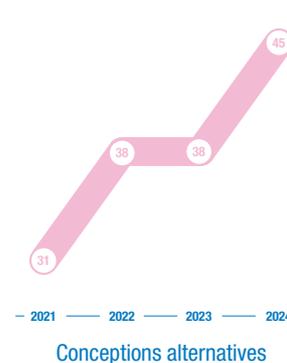
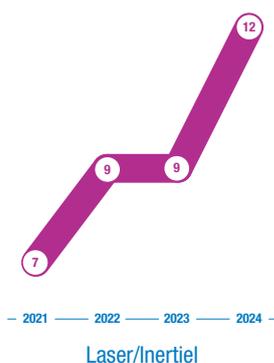
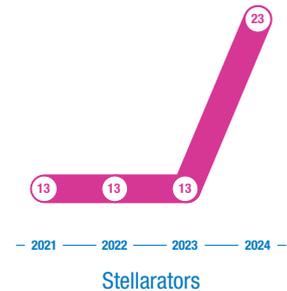
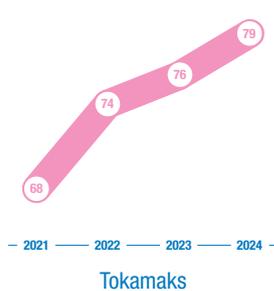
En 2024, la majorité des dispositifs de fusion étaient des modèles expérimentaux (139 dispositifs). Si les tokamaks restent le dispositif le plus répandu en 2024, d'autres modèles de dispositifs ont gagné en popularité ces dernières années.

Le financement public des dispositifs de fusion reste stable en 2024, tandis que le financement privé des projets de fusion a plus que doublé depuis 2021. En 2024, il y a plus de dispositifs de fusion en fonctionnement que jamais auparavant : il existe cinq dispositifs de plus qu'en 2023 et de nombreux autres sont en projet.

Le nombre de projets dans le domaine de l'énergie de fusion augmente d'année en année, de même que l'intérêt et les investissements d'entités publiques et privées concernant ce secteur.

alternatives et l'augmentation significative des projets s'appuyant sur des lasers et des stellarators indiquent que diverses voies technologiques sont en cours d'exploration pour parvenir à une énergie de fusion durable.

Cette diversification pourrait améliorer de façon significative les chances d'avancées décisives. Il sera crucial de poursuivre la collaboration entre le secteur public et le secteur privé pour accélérer le développement technologique et transposer à plus large échelle les modèles expérimentaux concluants dans des centrales à fusion opérationnelles. ■



▲
Nombre de dispositifs de fusion par année.

Tendances de la recherche sur l'énergie de fusion (2014-2023)

Au cours des dix dernières années, des pays du monde entier ont contribué de façon importante à la recherche sur l'énergie de fusion. Le nombre cumulé d'articles acceptés dans la revue Nuclear Fusion entre 2014 et 2023 témoigne de l'intérêt grandissant pour ce domaine et des progrès dans ce dernier.

Les tendances observées ici sont le reflet des données relatives au contenu de la revue Nuclear Fusion et ne reflètent pas nécessairement les tendances mondiales de la recherche-développement dans le domaine de la fusion.

La Chine est le pays qui a contribué le plus au fil des ans (858 articles acceptés). Cela souligne l'importance accordée à la fusion par ce pays au

cours de la dernière décennie. D'autres pays, dont les États-Unis (762 articles) et l'Allemagne (447 articles), sont également des contributeurs majeurs, grâce à des investissements importants dans la science et la technologie.

En outre, des pays comme le Japon (346 articles), la France (200 articles), le Royaume-Uni (196 articles), l'Italie (174 articles) et l'Espagne (129 articles), disposent également depuis longtemps de programmes de recherche et sont des acteurs essentiels de la recherche internationale. Outre la Chine et le Japon, la République de Corée (129 articles) est un autre grand contributeur asiatique, autre élément qui souligne le rôle de plus en plus important de cette région dans la recherche sur la fusion. L'Inde (57 articles) fait également des progrès notables dans ce domaine. La Fédération de Russie (115 articles) maintient une

forte présence dans le paysage de la recherche sur la fusion. Des pays comme le Royaume des Pays-Bas (47 articles), la Suède (43 articles), la Belgique (38 articles), la République tchèque (36 articles) et l'Australie (13 articles) ont toujours contribué de façon constante, en particulier dans le cadre de partenariats internationaux et dans des domaines de recherche spécialisés sur l'énergie de fusion. ■



Article le plus cité publié depuis 2014



Article le plus téléchargé publié en 2024



Article le plus téléchargé publié depuis 2014



Tendances mondiales de la recherche sur l'énergie de fusion telles qu'indiquées par le nombre d'articles acceptés pour publication par la revue Nuclear Fusion (articles acceptés au cours de la période 2014-2023). Les contributions relatives à ITER et à JET sont rapportées à la France et au Royaume-Uni, respectivement.

Références

- [1] DEPARTMENT OF ENERGY, DOE National Laboratory Makes History by Achieving Fusion Ignition (2022), <https://www.energy.gov/articles/doe-national-laboratory-makes-history-achieving-fusion-ignition>
- [2] EUROFUSION, Breaking New Ground: JET Tokamak’s Latest Fusion Energy Record Shows Mastery of Fusion Processes (2024), <https://euro-fusion.org/eurofusion-news/dte3record/>
- [3] NORMILE, D., First plasma fired up at world’s largest fusion reactor (2023), <https://www.science.org/content/article/first-plasma-fired-world-s-largest-fusion-reactor>
- [4] INSTITUTE OF PLASMA PHYSICS CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Reliable 403 Seconds Stationary H-mode Plasmas Demonstrated on EAST (2023), english.ipp.cas.cn/sywx/202304/t20230417_329393.html
- [5] KREMEN, R., Fusion record set for tungsten tokamak WEST (2024), <https://phys.org/news/2024-05-fusion-tungsten-tokamak-west.html>
- [6] DING, S., et al., A high-density and high-confinement tokamak plasma regime for fusion energy, *Nature* 629 (2024) 555–560 <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07313-3>
- [7] SEO, J., et al., Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning, *Nature* 626 (2024) 746–751 <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07024-9>
- [8] LEVITT, B. et al., Elevated Electron Temperature Coincident with Observed Fusion Reactions in a Sheared-Flow-Stabilized Z Pinch, *Phys. Rev. Lett.* 132 (2024), <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.155101>
- [9] KYOTO FUSIONEERING, [New Report] Advancing Fusion Technology: Insights and Collaboration Opportunities (2024), <https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/06/26/2421>
- [10] NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCE, ENGINEERING, AND MEDICINE, Bringing Fusion to the U.S. Grid, The National Academies Press, Washington, D.C. (2021), <https://doi.org/10.17226/25991>
- [11] CHAPMAN, I., COWLEY, S., WILSON, H., Delivering fusion energy – The Spherical Tokamak for Energy Production (STEP), *Phil. Trans. R. Soc. A* 382 (2024), <https://doi.org/10.1098/rsta.2023.0416>
- [12] MIT ENERGY INITIATIVE, The Role of Fusion Energy in a Decarbonized Electricity System (2024), <https://energy.mit.edu/publication/the-role-of-fusion-energy-in-a-decarbonized-electricity-system/>
- [13] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Opens Fusion Energy Discussion at COP28 as Momentum Keeps Growing (2023), <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-opens-fusion-energy-discussion-at-cop28-as-momentum-keeps-growing>
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA World Fusion Outlook 2023, Outlooks, IAEA, Vienna (2023), <https://doi.org/10.61092/iaea.ehyw-jq1g>
- [15] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, *The global fusion industry in 2024* (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>
- [16] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Fusion Industry Supply Chain: Opportunities and Challenges (2023), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2023/08/FIA-Supply-Chain-2023-FINAL.pdf>
- [17] EUROPEAN COMMISSION DIRECTORATE-GENERAL FOR RESEARCH AND INNOVATION, The European High-Level Roundtable on Fusion energy calls for closer collaboration between the public and the private sector (2024), https://research-and-innovation.ec.europa.eu/news/all-research-and-innovation-news/european-high-level-roundtable-fusion-energy-calls-closer-collaboration-between-public-and-private-2024-03-14_en
- [18] WORLD BANK, How Can Public-Private Partnerships (PPPs) be Successful? (2023), <https://www.worldbank.org/en/region/mena/brief/how-can-public-private-partnerships-ppps-be-successful>
- [19] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs (2024), <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/energy-and-power/climate-smart-ppps-1>
- [20] WORLD BANK, Climate-Smart PPPs: Further Reading and Resources (2024), <https://ppp.worldbank.org/public-private-partnership/climate-smart-ppps-further-reading-and-resources>
- [21] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches Commercializing Fusion Energy Paper (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-commercializing-fusion-energy-paper/>
- [22] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Device Information System (2024), <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>
- [23] DIRECTORATE-GENERAL FOR ENERGY (EUROPEAN COMMISSION), et al., Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy, Luxembourg, European Union (2024), <https://data.europa.eu/doi/10.2833/323326>
- [24] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fact Sheet: Inflation Reduction Act Supporting the Future of DOE Science (2022), <https://www.energy.gov/science/articles/fact-sheet-inflation-reduction-act-supporting-future-doe-science>
- [25] US DEPARTMENT OF THE TREASURY, U.S. Department of the Treasury, IRS Release Proposed Guidance to Continue Investment Boom in Clean Energy Production (2024), <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy2376>
- [26] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Consultation on a new National Policy Statement for Fusion Energy (2024),

- <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/667d5af197ea-0c79abfe4d1a/new-nps-for-fusion-energy-consultation-document-1.pdf>
- [27] COMMISSION EUROPÉENNE, Proposition de RÈGLEMENT DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL relatif à l'établissement d'un cadre de mesures en vue de renforcer l'écosystème européen de la fabrication de produits de technologie «zéro net» (règlement pour une industrie «zéro net»), COM/2023/161 final (2023), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fr/TXT/?uri=celex%3A52023PC0161>
- [28] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, New IAEA Initiative to Enhance Fusion Energy Collaboration (2023), <https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-initiative-to-enhance-fusion-energy-collaboration>
- [29] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Towards fusion energy: the UK fusion strategy: The next stage of the UK's fusion energy strategy (2023), <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/65301b78d06662000d1b7d0f/towards-fusion-energy-strategy-2023-update.pdf>
- [30] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UK launches search for industry partners to develop fusion plant (2024), <https://www.gov.uk/government/news/uk-launches-search-for-industry-partners-to-develop-fusion-plant>
- [31] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement Between DOE and the UK Department for Energy Security and Net Zero Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion (2023), <https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-uk-department-energy-security-and-net-zero-concerning>
- [32] THE WHITE HOUSE, International Partnerships in a New Era of Fusion Energy Development (2023), <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2023/12/02/international-partnerships-in-a-new-era-of-fusion-energy-development/>
- [33] US DEPARTMENT OF ENERGY, Joint Statement between DOE and the Japan Ministry of Education, Sports, Science and Technology Concerning a Strategic Partnership to Accelerate Fusion Energy Demonstration and Commercialization (2024), <https://www.energy.gov/articles/joint-statement-between-doe-and-japan-ministry-education-sports-science-and-technology>
- [34] US DEPARTMENT OF ENERGY, Fusion Energy Strategy 2024 (2024), <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-06/fusion-energy-strategy-2024.pdf>
- [35] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Congress Increases U.S. Funding for Fusion Energy Sciences Research (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/congress-increases-u-s-funding-for-fusion-energy-sciences-research/>
- [36] REUTERS, Biden administration expands tax credits beyond wind, solar (2024), <https://www.reuters.com/business/energy/biden-administration-expands-tax-credits-beyond-wind-solar-2024-05-29/>
- [37] FEDERAL REGISTER, Department of Energy, Fusion Energy Public-Private Consortium Framework, 2024-12539 (2024).
- [38] COUNCIL FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND INNOVATION JAPAN, Fusion Energy Innovation Strategy (Provisional translation) (2024), https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/230426_strategy.pdf
- [39] MOONSHOT RESEARCH AND DEVELOPMENT PROGRAM, Announcing Call for Proposals for Project Managers in Moonshot Goal 10 (2024), <https://www.jst.go.jp/moonshot/en/application/202403/index.html>
- [40] THE WALL STREET JOURNAL, China Outspends the U.S. on Fusion in the Race for Energy's Holy Grail (2024), <https://www.wsj.com/world/china/china-us-fusion-race-4452d3be>
- [41] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024), <https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company>
- [42] KOREA JOONGANG DAILY, Gov't to chase 'artificial sun' with \$866 million investment in nuclear fusion reactor development (2024), <https://koreajoongangdaily.joins.com/news/2024-07-24/business/economy/Govt-to-chase-artificial-sun-with-866-million-investment-in-nuclear-fusion-reactor-development/2097463>
- [43] FUSION FOR ENERGY, Discussing the European fusion strategy (2024), <https://fusionforenergy.europa.eu/news/discussing-the-european-fusion-strategy/>
- [44] GERMAN FEDERAL MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH, Förderprogramm Fusion 2040, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn (2024).
- [45] ITALIAN MINISTRY OF ENVIRONMENT, AI MASE la prima riunione della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (2023), <https://www.mase.gov.it/comunicati/al-mase-la-prima-riunione-della-piattaforma-nazionale-un-nucleare-sostenibile>
- [46] G7 ITALIA 2024, Apulia G7 Leaders' Communiqué (2024), <https://www.g7italy.it/wp-content/uploads/Apulia-G7-Leaders-Communique.pdf>
- [47] REUTERS, Britain, Canada sign deal to collaborate on fusion energy (2024), <https://www.reuters.com/business/energy/britain-canada-sign-deal-collaborate-fusion-energy-2024-02-14/>
- [48] LABORATOIRES NUCLÉAIRES CANADIENS, Il est temps d'adopter une stratégie de fusion canadienne (2024), <https://www.cnl.ca/energie-propre/recherche-sur-lhydrogene/journee-de-la-fusion-nucleaire-2024/?lang=fr>
- [49] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, UKAEA and CNL partner to accelerate fusion energy development (2024), <https://www.gov.uk/government/news/ukaea-and-cnl-partner-to-accelerate-fusion-energy-development>
- [50] WORLD NUCLEAR NEWS, CNL announces programmes to speed fusion deployment (2024), <https://world-nuclear-news.org/Articles/CNL-announces-programmes-to-speed-fusion-deploymen>
- [51] GENERAL FUSION, General fusion partners with Canadian Nuclear Laboratories to advance commercial power plant design (2024),

- <https://generalfusion.com/post/general-fusion-partners-with-canadian-nuclear-laboratories-to-advance-commercial-power-plant-design/>
- [52] KYOTO FUSIONEERING, Kyoto Fusioneering and Canadian Nuclear Laboratories Launch Joint Venture, Fusion Fuel Cycles Inc. (2024), <https://kyotofusioneering.com/en/news/2024/05/22/2337>
- [53] FUSION ENERGY BASE, Equity Investments to Fusion Energy Companies 2010-2023 by Country (2024), <https://www.fusionenergybase.com/article/equity-investments-to-fusion-energy-companies-2010-2023-by-country>
- [54] FUSION ENERGY BASE, Fusion Energy Base (2024), <https://www.fusionenergybase.com/>
- [55] US CONGRESS, S.870 - A bill to authorize appropriations for the United States Fire Administration and firefighter assistance grant programs, to advance the benefits of nuclear energy, and for other purposes, <https://www.congress.gov/bill/118th-congress/senate-bill/870/all-info>
- [56] PADILLA, A. The Fusion Energy Act of 2024, One pager (2024), <https://www.padilla.senate.gov/wp-content/uploads/One-Pager-Fusion-Act.pdf>
- [57] NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Consolidated Guidance About Materials Licenses, Preliminary Draft Report, Rep. NUREG-1556, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC (2024).
- [58] DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, Agile Nations working group on fusion energy regulation: initial recommendations, Policy Paper (2023), <https://www.gov.uk/government/publications/agile-nations-uk-japan-and-canada-joint-recommendations-on-fusion-energy/agile-nations-working-group-on-fusion-energy-regulation-initial-recommendations>
- [59] DEUTSCHER BUNDESTAG, Anhörung zum Rechtsrahmen für Fusionskraftwerke in Deutschland und Europa (2024), https://www.bundestag.de/ausschuesse/a18_bildung_forschung/oeffentliche_anhoerungen/1010504-1010504
- [60] MEXICO BUSINESS NEWS, Oil Industry Explores Viability of Nuclear Fusion (2023), <https://mexicobusiness.news/oilandgas/news/oil-industry-explores-viability-nuclear-fusion>
- [61] RECHARGE, Can a fusion energy pioneer backed by Google and Goldman Sachs help oil giant Occidental suck carbon from the air? (2024), <https://www.rechargenews.com/energy-transition/can-a-fusion-energy-pioneer-backed-by-google-and-goldman-sachs-help-oil-giant-occidental-suck-carbon-from-the-air-2-1-1661407>
- [62] ENI, Eni signs a new collaboration agreement with CFS to support development of fusion energy (2023), <https://www.eni.com/en-IT/media/press-release/2023/03/eni-signs-new-collaboration-agreement-with-cfs-development-fusion-energy.html>
- [63] REUTERS, OpenAI CEO Altman says at Davos future AI depends on energy breakthrough (2024), <https://www.reuters.com/technology/openai-ceo-altman-says-davos-future-ai-depends-energy-breakthrough-2024-01-16/>
- [64] HELION ENERGY, Helion announces world's first fusion energy purchase agreement with Microsoft (2024), <https://www.helionenergy.com/articles/helion-announces-worlds-first-fusion-ppa-with-microsoft/>
- [65] COMMONWEALTH FUSION SYSTEMS, Commonwealth Fusion Systems Raises \$115 Million and Closes Series A Round to Commercialize Fusion Energy (2024), <https://cfs.energy/news-and-media/close-series-a-round>
- [66] NIKKIEI ASIA, Honda-backed Israeli startup to use nuclear fusion to power EVs (2024), <https://asia.nikkei.com/Business/Energy/Honda-backed-Israeli-startup-to-use-nuclear-fusion-to-power-EVs>
- [67] PR NEWSWIRE, NT-Tao Raises \$22M Series A to Ensure a Secure, Clean Energy Future with a Compact and Scalable Nuclear Fusion Solution (2023), <https://www.prnewswire.com/il/news-releases/nt-cao-raises-22m-series-a-to-ensure-a-secure-clean-energy-future-with-a-compact-and-scalable-nuclear-fusion-solution-301735890.html>
- [68] REUTERS, Chinese EV maker Nio invests in nuclear fusion startup (2023), <https://www.reuters.com/business/energy/chinese-ev-maker-nio-invests-nuclear-fusion-startup-2023-05-19/>
- [69] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, FIA Launches 2024 Supply Chain Report (2024), <https://www.fusionindustryassociation.org/fia-launches-2024-supply-chain-report/>
- [70] WORLD NUCLEAR NEWS, British-Japanese partnership for fusion development (2023), <https://world-nuclear-news.org/Articles/British-Japanese-partnership-for-fusion-developmen>
- [71] TOKAMAK ENERGY, Tokamak Energy and Furukawa Electric Group strengthen relationship to progress commercial fusion energy (2024), <https://tokamakenergy.com/2023/01/11/tokamak-energy-and-furukawa-electric-group-strengthen-relationship-to-progress-commercial-fusion-energy/>
- [72] HELION, Helion and Nucor announce collaboration to deploy 500 MWe fusion power plant (2023), <https://www.helionenergy.com/articles/helion-nucor-collaboration-to-deploy-500-mw-fusion-power-plant/>
- [73] RECHARGE, 'Fusion in five years' | AI and Facebook billionaire-backed pioneer signs Microsoft up for 'star power' (2023), <https://www.rechargenews.com/energy-transition/fusion-in-five-years-ai-and-facebook-billionaire-backed-pioneer-signs-microsoft-up-for-star-power-2-1-1450880>
- [74] WORLD NUCLEAR NEWS, OPG investigates fusion as future option for Ontario (2024), <https://world-nuclear-news.org/Articles/OPG-investigates-fusion-as-future-option-for-Ontario>
- [75] BRUCE POWER, Bruce Power, General Fusion, and Nuclear

- Innovation Institute sign agreement to advance a net-zero future (2022),
<https://www.brucepowers.com/2022/02/02/bruce-power-general-fusion-and-nuclear-innovation-institute-sign-agreement-to-advance-a-net-zero-future/>
- [76] CHINA DAILY, Controlled nuclear fusion emerges as new frontier for China's venture capitalists (2024),
<https://www.chinadaily.com.cn/a/202407/23/WS669f5ca3a31095e51c50f7ad.html>
- [77] CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, China Sets to Build Fusion Energy Research Facility (2023),
https://english.cas.cn/newsroom/multimedia_news/202309/t20230918_376979.shtml
- [78] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, Chinese Fusion Energy Programs Are A Growing Competitor in the Global Race to Fusion Power (2024),
<https://www.fusionindustryassociation.org/chinese-fusion-energy-programs-are-a-growing-competitor-in-the-global-race-to-fusion-power/>
- [79] BLOOMBERG, China Seeks Nuclear Fusion Leap Through New R&D Company (2024),
<https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-01-02/china-seeks-nuclear-fusion-leap-through-new-r-d-company>
- [80] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, World Survey of Fusion Devices 2022, Non-serial Publications, IAEA, Vienna (2022)
- [81] HONG, S.H., et al., Neutronics analysis for conceptual design of target system based on a deuteron accelerator-driven fusion neutron source, *Fusion Eng. Des.* 199 (2024) 114103
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.114103>
- [82] BUSINESS TIMES, Singapore could star in the race towards nuclear fusion energy (2024),
<https://www.businesstimes.com.sg/esg/singapore-could-star-race-towards-nuclear-fusion-energy>
- [83] HEFEI INSTITUTES OF PHYSICAL SCIENCE, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES, Thailand Tokamak 1 (TT-1) Facility Officially Launched in Thailand (2023),
https://english.hf.cas.cn/nr/ps/202307/t20230728_334143.html
- [84] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Fusion Research in Southeast Asia: IAEA and ITER Support School in Thailand (2020),
<https://www.iaea.org/newscenter/news/fusion-research-in-southeast-asia-iaea-and-iter-support-school-in-thailand>
- [85] EUROFUSION, The EUROfusion Roadmap (2024),
<https://euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/>
- [86] GAUSS FUSION, Establishment of a European Fusion Association (2024),
https://cdn.prod.website-files.com/6461f14c58e0282da166d83d/6669502d73c9e85f4d2af3e0_European%20Fusion%20Association_PM_EN%5B86%5D.pdf
- [87] NUCNET, Companies Announce Formation Of Nuclear Fusion Industrial Association (2024),
<https://www.nucnet.org/news/companies-announce-formation-of-nuclear-fusion-industrial-association-6-2-2024>
- [88] ITER, IFMIF-DONES sort de terre (2023),
<https://www.iter.org/fr/actualites/3938>
- [89] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, FTF – Testing technology for future fusion power station (2024),
https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a820d4040f0b62305b9237d/UKAEA_-_Fusion_Technology_Facilities.pdf
- [90] UK ATOMIC ENERGY AUTHORITY, JET's Decommissioning and Repurposing: A new chapter at UK Atomic Energy Authority (2024),
https://ccfe.ukaea.uk/wp-content/uploads/files/JDR_New_Chapter_UKAEA.pdf
- [91] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA Director General Visits Chile to Sign Agreements on Plastic Pollution and Lithium Mining (2024),
<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-director-general-visits-chile-to-sign-agreements-on-plastic-pollution-and-lithium-mining>
- [92] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Director General Grossi Visits Peru to Sign Agreements on Atoms4Food, Mining and Lithium (2024),
<https://www.iaea.org/newscenter/news/director-general-grossi-visits-peru-to-sign-agreements-on-atoms4food-mining-and-lithium>
- [93] US DEPARTMENT OF ENERGY, DOE Announces \$46 Million for Commercial Fusion Energy Development (2023),
<https://www.energy.gov/articles/doe-announces-46-million-commercial-fusion-energy-development>
- [94] OFFICE OF CONGRESSIONAL AND INTERGOVERNMENTAL AFFAIRS, Before the House Committee on Science, Space, and Technology Subcommittee on Energy (2023),
<https://www.energy.gov/congressional/articles/house-committee-science-space-and-technology-subcommittee-energy-4>
- [95] THE WHITE HOUSE, Parallel Processing the Path to Commercialization of Fusion Energy (2022),
<https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/06/03/parallel-processing-the-path-to-commercialization-of-fusion-energy/>

ABRÉVIATIONS

CFETR	China Fusion Engineering Test Reactor (réacteur de fusion expérimental chinois)
CFS	Commonwealth Fusion Systems
DONES	DEMO Oriented Neutron Source (source de neutrons pour la démonstration)
DTT	Tokamak de test de divertor centrale de démonstration européenne
EVEDA	engineering validation and engineering design activities (activités de validation et de conception techniques)
IA	intelligence artificielle
IFMIF	Installation internationale d'irradiation des matériaux de fusion
JET	Joint European Torus (Tore européen commun)
KSTAR	Tokamak supraconducteur expérimental avancé de Corée
LNC	Laboratoires nucléaires canadiens
NIF	national ignition facility (installation nationale d'ignition)
PPP	partenariat public-privé
UE	Union européenne
UKAEA	United Kingdom Atomic Energy Authority (Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni)
W7-X	Wendelstein 7-X

NOTE DE L'ÉDITEUR

La présente publication a été éditée par l'équipe rédactionnelle de l'AIEA dans la mesure jugée nécessaire pour en faciliter la lecture.

Elle ne traite pas des questions de la responsabilité, juridique ou d'autre nature, résultant d'actes ou omissions imputables à une quelconque personne.

Bien que l'exactitude des informations contenues dans la présente publication ait fait l'objet d'un soin particulier, ni l'AIEA ni ses États Membres n'assument une quelconque responsabilité pour les conséquences éventuelles de l'utilisation de ces informations. Les orientations fournies dans la présente publication, décrivant de bonnes pratiques, reflètent l'avis d'experts. Pour autant, il ne s'agit pas de recommandations qui auraient été formulées sur la base d'un consensus entre les États Membres.

L'emploi d'appellations particulières pour désigner des pays ou des territoires n'implique aucune prise de position de l'AIEA quant au statut juridique, aux autorités, aux institutions ou au tracé des frontières de ces pays ou territoires.

La mention de noms de sociétés ou de produits particuliers (qu'ils soient ou non signalés comme marques déposées) n'implique aucune intention d'empiéter sur des droits de propriété et ne doit pas être considérée non plus comme valant approbation ou recommandation de la part de l'AIEA.

L'AIEA n'assume aucune responsabilité quant à la persistance ou à l'exactitude des adresses URL de sites Internet externes ou de tiers mentionnées dans la présente publication et ne peut garantir que le contenu desdits sites est ou demeurera exact ou approprié. ■

DÉCLARATION CONCERNANT LE DROIT D'AUTEUR

Toutes les publications scientifiques et techniques de l'AIEA sont protégées par les dispositions de la Convention universelle sur le droit d'auteur adoptée en 1952 (Genève) et révisée en 1971 (Paris). Depuis, l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (Genève) a étendu le droit d'auteur à la propriété intellectuelle sous forme électronique et virtuelle. La reproduction totale ou partielle des textes contenus dans les publications de l'AIEA sous forme imprimée ou électronique peut être soumise à autorisation. Veuillez vous reporter à la page www.iaea.org/fr/publications/droits-et-permissions pour en savoir plus. Pour toute demande de renseignements, veuillez contacter l'adresse suivante :

Section d'édition

Agence internationale de l'énergie atomique
Centre international de Vienne B.P. 100,
1400 Vienne (Autriche)
Tél. : +43 1 2600 22529 ou 22530
Mél. : sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/publications

© AIEA, 2024

Imprimé par l'AIEA en Autriche
Octobre 2024
IAEA/PAT/005

<https://doi.org/10.61092/iaea.rnku-j389>

AFGHANISTAN	GÉORGIE	PAYS-BAS, ROYAUME DES
AFRIQUE DU SUD	GHANA	PÉROU
ALBANIE	GRÈCE	PHILIPPINES
ALGÉRIE	GRENADE	POLOGNE
ALLEMAGNE	GUATÉMALA	PORTUGAL
ANGOLA	GUINÉE	QATAR
ANTIGUA-ET-BARBUDA	GUYANA	RÉPUBLIQUE ARABE SYRIENNE
ARABIE SAOUDITE	HAÏTI	RÉPUBLIQUE
ARGENTINE	HONDURAS	CENTRAFRICAINE
ARMÉNIE	HONGRIE	RÉPUBLIQUE DE MOLDOVA
AUSTRALIE	ÎLES MARSHALL	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
AUTRICHE	INDE	DU CONGO
AZERBAÏDJAN	INDONÉSIE	RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE
BAHAMAS	IRAN, RÉP. ISLAMIQUE D'	POPULAIRE LAO
BAHREÏN	IRAQ	RÉPUBLIQUE DOMINICAINE
BANGLADESH	IRLANDE	RÉPUBLIQUE TCHÈQUE
BARBADE	ISLANDE	RÉPUBLIQUE-UNIE
BÉLARUS	ISRAËL	DE TANZANIE
BELGIQUE	ITALIE	ROUMANIE
BELIZE	JAMAÏQUE	ROYAUME-UNI
BÉNIN	JAPON	DE GRANDE-BRETAGNE
BOLIVIE, ÉTAT	JORDANIE	ET D'IRLANDE DU NORD
PLURINATIONAL DE	KAZAKHSTAN	RWANDA
BOSNIE-HERZÉGOVINE	KENYA	SAINTE-LUCIE
BOTSWANA	KIRGHIZISTAN	SAINT-KITTS-ET-NEVIS
BRÉSIL	KOWEÏT	SAINT-MARIN
BRUNÉI DARUSSALAM	LESOTHO	SAINT-SIÈGE
BULGARIE	LETTONIE	SAINT-VINCENT-ET-LES
BURKINA FASO	LIBAN	GRENADINES
BURUNDI	LIBÉRIA	SAMOA
CABO VERDE	LIBYE	SÉNÉGAL
CAMBODGE	LIECHTENSTEIN	SERBIE
CAMEROUN	LITUANIE	SEYCHELLES
CANADA	LUXEMBOURG	SIERRA LEONE
CHILI	MACÉDOINE DU NORD	SINGAPOUR
CHINE	MADAGASCAR	SLOVAQUIE
CHYPRE	MALAISIE	SLOVÉNIE
COLOMBIE	MALAWI	SOUDAN
COMORES	MALI	SRI LANKA
CONGO	MALTE	SUÈDE
CORÉE, RÉPUBLIQUE DE	MAROC	SUISSE
COSTA RICA	MAURICE	TADJIKISTAN
CÔTE D'IVOIRE	MAURITANIE	TCHAD
CROATIE	MEXIQUE	THAÏLANDE
CUBA	MONACO	TOGO
DANEMARK	MONGOLIE	TONGA
DJIBOUTI	MONTÉNÉGRO	TRINITÉ-ET-TOBAGO
DOMINIQUE	MOZAMBIQUE	TUNISIE
ÉGYPTE	MYANMAR	TURKÏYE
EL SALVADOR	NAMIBIE	TURKMÉNISTAN
ÉMIRATS ARABES UNIS	NÉPAL	UKRAINE
ÉQUATEUR	NICARAGUA	URUGUAY
ÉRYTHRÉE	NIGER	VANUATU
ESPAGNE	NIGÉRIA	VENEZUELA,
ESTONIE	NORVÈGE	RÉP. BOLIVARIENNE DU
ESWATINI	NOUVELLE-ZÉLANDE	VIET NAM
ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE	OMAN	YÉMEN
ÉTHIOPIE	OUGANDA	ZAMBIE
FÉDÉRATION DE RUSSIE	OUZBÉKISTAN	ZIMBABWE
FIDJI	PAKISTAN	
FINLANDE	PALAOS	
FRANCE	PANAMA	
GABON	PAPOUASIE-NOUVELLE-GUINÉE	
GAMBIE	PARAGUAY	

Le Statut de l'Agence a été approuvé le 23 octobre 1956 par la Conférence sur le Statut de l'AIEA, tenue au Siège de l'Organisation des Nations Unies, à New York ; il est entré en vigueur le 29 juillet 1957. Le Siège de l'Agence est situé à Vienne. Son principal objectif est « de hâter et d'accroître la contribution de l'énergie atomique à la paix, la santé et la prospérité dans le monde entier ».

« Alors que nous nous efforçons de surmonter les difficultés que présente cette technologie révolutionnaire, notre détermination est inébranlable : nous devons tirer parti de l'énergie de fusion pour créer un monde écologiquement viable, prospère et pacifique. »

Rafael Mariano Grossi,
Directeur général de l'AIEA