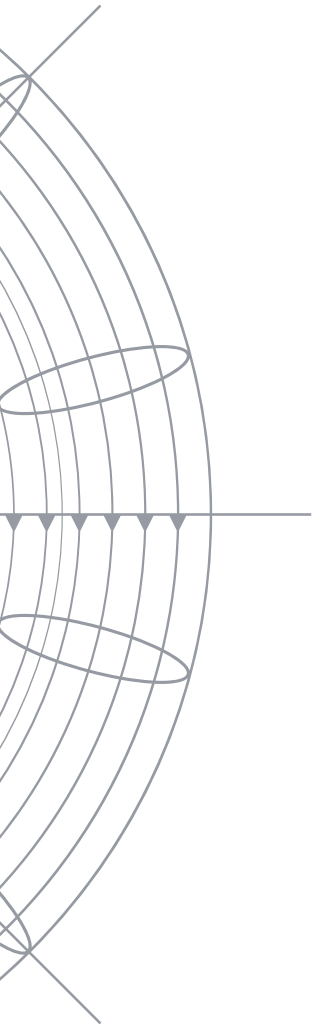
IAEA
Agence internationale de l'énergie atomique

Éléments clés de la fusion

Une vision commune pour le développement de l'énergie de fusion



Éléments clés de la fusion

Une vision commune pour le développement de l'énergie de fusion

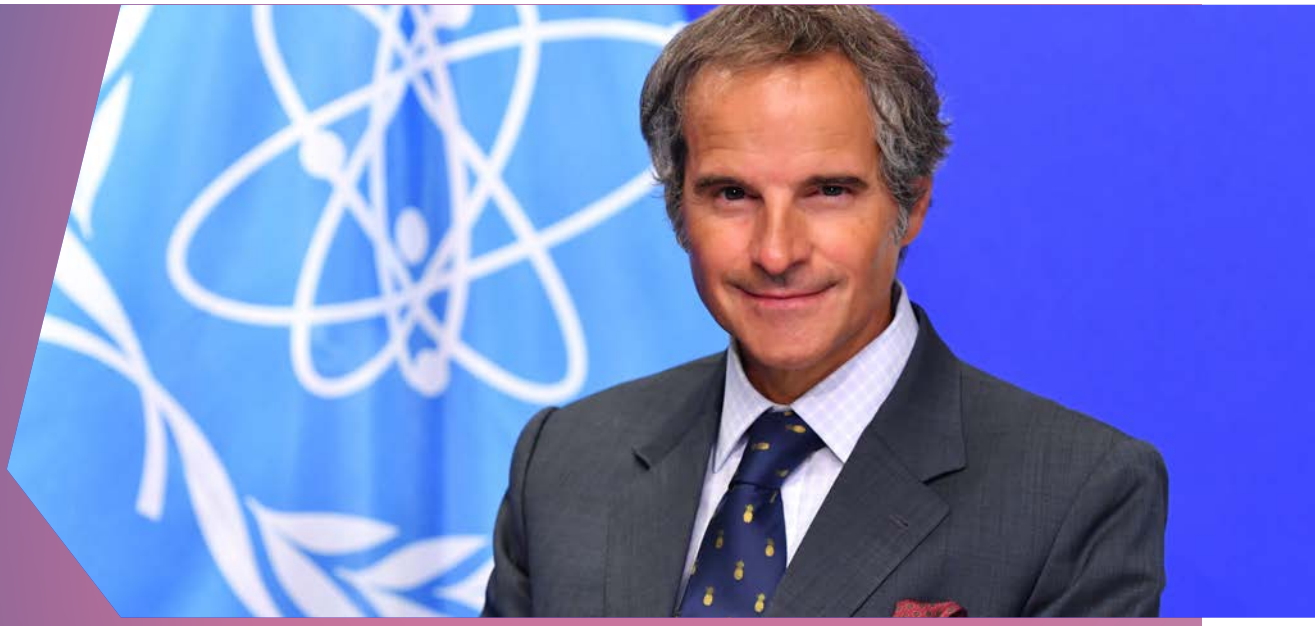
AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE
VIENNE, 2024

AVANT-PROPOS

Depuis plusieurs décennies, il est dit de la fusion qu'elle pourrait devenir une source d'énergie propre et durable capable de répondre aux besoins mondiaux sur le long terme. Désormais, cela ne fait plus aucun doute. Des avancées récentes ont donné un nouvel élan au secteur de la fusion ; le déploiement des centrales à fusion dans un avenir proche devient de plus en plus plausible.

Des programmes nationaux et internationaux tels que le projet ITER ont été la force motrice de la transformation sans précédent qui s'opère actuellement dans le secteur de la fusion. Cette transformation s'est accélérée au rythme des avancées scientifiques, auxquelles s'est ajouté un afflux massif et remarquable d'investissements privés. Lors de mes échanges avec les scientifiques et les ingénieurs qui étudient de nombreuses idées innovantes pour déployer des systèmes d'énergie de fusion, j'ai pu sentir tout leur enthousiasme, toute leur passion et tout leur optimisme. Face au double défi mondial que représentent les changements climatiques et la sécurité énergétique, l'émergence d'une nouvelle source d'énergie propre jouera un rôle décisif sur le long terme.

En outre, j'ai constaté la volonté des acteurs principaux de coopérer efficacement et de mettre en commun leurs données d'expérience, leurs connaissances et leurs ressources afin de résoudre les questions en suspens et d'établir une base industrielle pour appuyer le développement durable de l'énergie de fusion. Pour ce faire, il importe que toutes les parties prenantes du développement de l'énergie de fusion partagent une vision commune du chemin qui mènera à la commercialisation de l'énergie de fusion. C'est dans cette optique qu'ont été recensés les éléments clés de la fusion dans la présente publication de l'AIEA, qui constituera une feuille de route complète et orientera utilement les scientifiques, les ingénieurs, les responsables de la réglementation, les entrepreneurs et les décideurs du



monde entier vers un avenir dans lequel l'énergie de fusion occupera une place centrale dans le paysage énergétique mondial à court et à moyen terme.

La présente publication se penche sur les aspects fondamentaux indispensables à la concrétisation de cette vision. Elle s'articule autour de six éléments essentiels, qui reflètent chacun une facette cruciale du secteur de l'énergie de fusion. Ces éléments comprennent les priorités et les indicateurs de recherche, développement et démonstration, et les étapes importantes de commercialisation ; la gestion des ressources, de la main-d'œuvre et des connaissances ; la sûreté, la sécurité et la non-prolifération ; la collaboration mondiale ; les rôles des parties prenantes ; et la participation du public. Une fois réunis, ces éléments forment le socle d'une stratégie cohérente qui permettra de surmonter les obstacles et de saisir les occasions propres au développement de l'énergie de fusion.

L'AIEA remercie toutes les personnes qui ont pris part à cette publication, notamment les membres du Conseil international de la recherche sur la fusion et les autres experts et évaluateurs internationaux, pour leurs précieuses contributions et leur détermination à publier ce document en très peu de temps. L'AIEA continuera à promouvoir le développement de l'énergie de fusion et à soutenir les initiatives qui nous rapprochent du jour où le rêve d'une énergie propre illimitée deviendra réalité. Ensemble, réalisons la promesse de l'énergie de fusion et engageons-nous sur le chemin d'un avenir plus radieux et plus durable pour tous.

Rafael Mariano Grossi
Directeur général de l'AIEA

INTRODUCTION

À l'heure où l'énergie de fusion promet de devenir une source d'énergie abondante, propre et durable qui saura répondre à nos besoins futurs, les travaux à son sujet font l'objet d'un intérêt croissant à travers le monde. Jusqu'à récemment encore, les travaux sur l'énergie de fusion étaient principalement menés dans le cadre de programmes nationaux et internationaux, tels que le projet ITER. Cependant, face au besoin urgent de trouver des sources d'énergie propres pour lutter contre les changements climatiques et garantir la sécurité énergétique, le développement de la fusion a pris un tournant décisif. Les transformations rapides qui se sont opérées dans ce secteur sont le résultat d'avancées scientifiques et technologiques récentes associées à d'importants investissements privés. Aux efforts déployés par le secteur public pour faire progresser l'énergie de fusion jusqu'à sa mise en pratique viennent désormais s'ajouter ceux d'un secteur privé en pleine expansion - plus de 40 entreprises actives et plus de 7 milliards[1] de dollars des États-Unis d'investissements - qui se concentre sur la commercialisation.

Bien que les approches technologiques et les modalités de financement qu'ils adoptent pour développer l'énergie de fusion diffèrent, le secteur public et le secteur privé partagent le même objectif : faire de la fusion une source d'énergie viable et durable. Cette ambition commune souligne l'importance d'une collaboration accrue entre les gouvernements et les entités privées, indispensable pour accélérer le passage de la recherche à la commercialisation.

[1] Situation en juillet 2024 [1].

S'il est vrai que cette évolution inspire l'optimisme quant à la production d'énergie de fusion dans un avenir proche, des progrès restent à accomplir dans plusieurs domaines de recherche, développement et démonstration (RDD). En outre, pour réussir à adopter et à déployer l'énergie de fusion, il faut élargir la base industrielle, mettre en place des chaînes d'approvisionnement mondiales, former une main- d'œuvre compétente, définir des directives juridiques et réglementaires claires, et obtenir l'adhésion du public. Toutes ces étapes nécessitent la participation et la coopération de toutes les parties prenantes.

Dans un secteur où les évolutions sont si rapides, il est essentiel de cultiver une vision commune des principaux éléments à prendre en compte en matière d'énergie de fusion. Cette vision doit englober l'ensemble du processus, de la recherche-développement au déploiement et à la commercialisation, et permettre d'orienter l'action menée afin de surmonter les obstacles et de saisir les occasions qui se présenteront sur le chemin vers l'énergie de fusion. La présente publication propose une vue d'ensemble complète des six éléments clés indispensables pour établir une vision commune du développement de l'énergie de fusion, et faciliter ainsi l'adoption d'une approche unifiée pour faire de la fusion la pierre angulaire des futures solutions énergétiques.

Les six éléments clés de la fusion

UN OBJECTIF

faire de la fusion
une source d'énergie
viable et durable

1.

Priorités et indicateurs de **recherche, développement et démonstration**, et étapes importantes de commercialisation

La commercialisation de l'énergie de fusion nécessite des avancées dans les domaines scientifiques et technologiques concernés. Il est fondamental d'apporter un soutien continu aux activités de recherche-développement en vue d'accélérer la démonstration et le déploiement de centrales à fusion et de mettre en place des chaînes d'approvisionnement.

Priorités de recherche, développement et démonstration et compte rendu des progrès

Dans les domaines dans lesquels il reste des progrès à faire, il est crucial de distinguer les niveaux de maturité des différents composants d'une centrale à fusion et de leur intégration dans un système complet capable d'assurer une production d'énergie viable sur le plan commercial.

Les domaines de recherche, développement et démonstration qui sont essentiels à la construction d'une centrale à fusion mais dont le niveau de maturité technologique est faible[2] (TRL) sont recensés ci-dessous. Bien que tous ces domaines soient fondamentaux, la mise au point de matériaux résistants à des conditions extrêmes et le cycle du combustible au tritium sont considérés comme les aspects les plus urgents pour parvenir à produire de l'énergie de fusion grâce à la réaction deutérium-tritium (D-T).

[2] Les niveaux de maturité technologique fournissent une méthode normalisée et objective d'évaluation de la maturité de diverses technologies et de leurs différents composants.

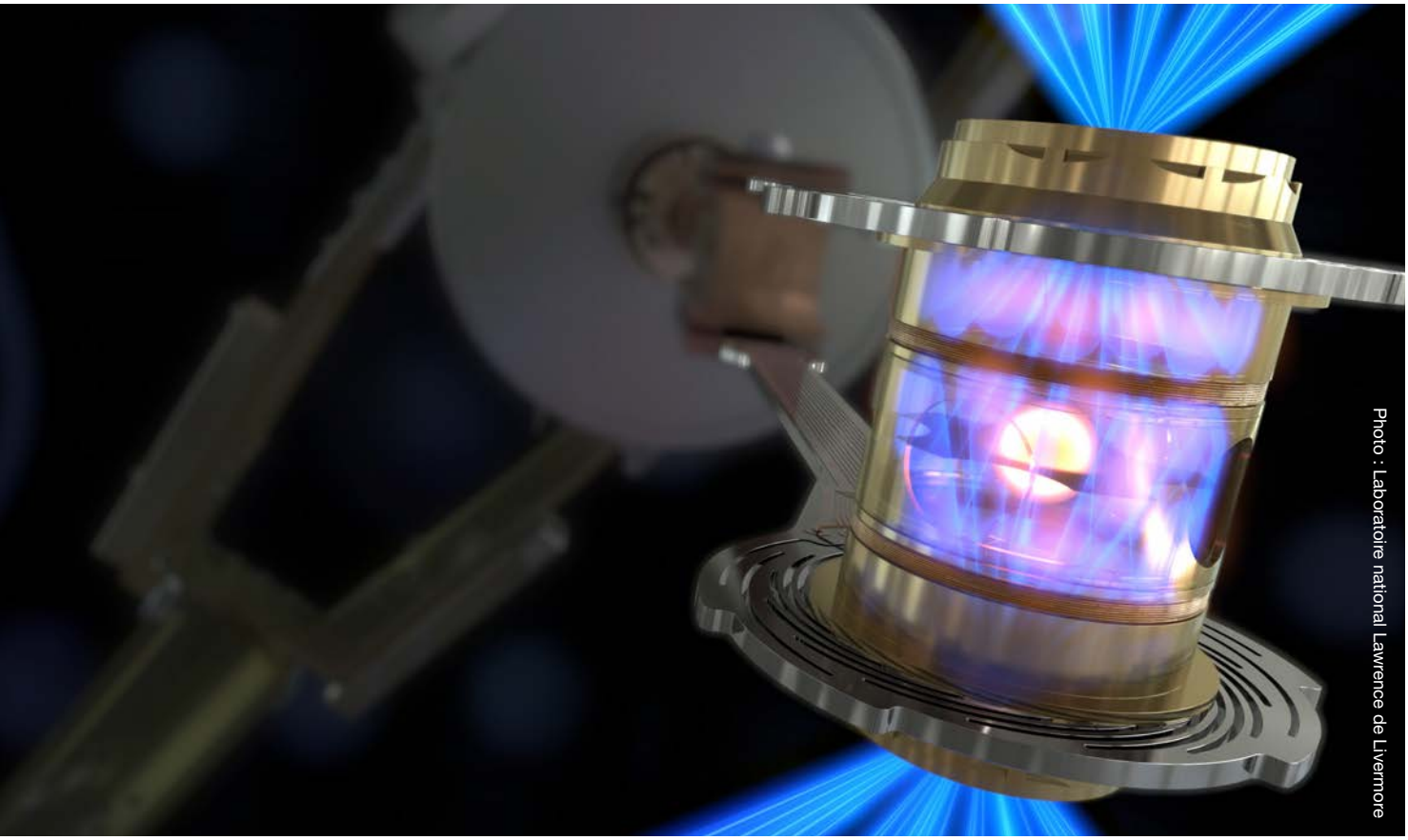


Photo : Laboratoire national Lawrence de Livermore

Matériaux résistants à des conditions extrêmes

Le flux intense de neutrons de haute énergie et d'autres particules généré lors de la fusion soumet les matériaux structurels à des conditions extrêmes. La mise au point de matériaux capables de mieux résister à ces conditions tout en conservant leur intégrité structurelle et des taux d'activation acceptables est une priorité absolue pour améliorer la viabilité commerciale de la fusion. Ces matériaux devront aussi maintenir la pureté du plasma et supporter les conditions induites par la température, les rayonnements et le vide à l'intérieur du dispositif de fusion. Des concepts innovants, notamment celui d'une première paroi liquide, pourraient éventuellement permettre d'assouplir certaines exigences auxquelles sont soumis les matériaux structurels. Il importe également de tenir compte des effets que ces conditions extrêmes pourraient avoir sur divers autres matériaux, utilisés par exemple dans les couvertures tritigènes, les instruments de diagnostic, les systèmes de chauffage, les systèmes de télémanipulation et les divertors, et de se pencher, au-delà des simples caractéristiques mécaniques, sur diverses propriétés des matériaux.

Cycle du combustible au tritium

Le tritium, un isotope radioactif de l'hydrogène, est un combustible essentiel pour les centrales à fusion D-T. Cependant, le tritium a une période relativement courte (12 ans) et n'est pas présent en abondance dans la nature. Le développement de techniques efficaces pour générer et extraire du tritium est fondamental pour déclencher et entretenir la production d'énergie de fusion dans une centrale à fusion D-T.

Photo : Institut de physique des plasmas de l'Académie des sciences de Chine

Gestion de la dissipation de la puissance dégagée par le plasma

L'une des principales difficultés que posera le fonctionnement des centrales à fusion sera la gestion de la dissipation de la chaleur et des particules produites par le plasma. Les approches axées sur le confinement magnétique devront également résoudre la question des interactions plasma-matériaux en régime stable. Les conditions extrêmes de puissance volumique anticipées dans les centrales à fusion posent d'importants défis en matière d'ingénierie, notamment en ce qui concerne les matériaux faisant face au plasma, les techniques de refroidissement et la conception des composants. La recherche sur les régimes de plasma appropriés demeure un domaine clé dans lequel des progrès expérimentaux sont nécessaires.

Télémanipulation

Les centrales à fusion fonctionnent dans des environnements difficiles qui ne sont pas accessibles au personnel d'exploitation. Par conséquent, les tâches de maintenance et de réparation devront peut-être être effectuées au moyen de la télémanipulation. Il faut poursuivre les travaux relatifs au développement de ces systèmes de télémanipulation, notamment en utilisant des systèmes robotiques avancés, en vue des applications commerciales de l'énergie de fusion.

Extraction de la chaleur

L'énergie générée à l'intérieur de la centrale à fusion doit être extraite efficacement et les composants concernés doivent être disponibles en suffisance pour que le coût de l'électricité produite soit compétitif. Dans les concepts qui reposent sur un cycle de vapeur, le rendement thermodynamique de la centrale augmentera si la couverture peut fonctionner à des températures plus élevées, auquel cas des matériaux à faible activation sont nécessaires.

La plupart des concepts d'énergie de fusion soulèvent les mêmes considérations de recherche, développement et démonstration, auxquelles s'ajoutent quelques questions à approfondir plus spécifiques, relatives à la technologie de confinement[3] et au choix de combustible[4]. Pour parvenir à commercialiser l'énergie de fusion une fois que le niveau de maturité technologique des domaines précités sera plus élevé, il faudra se pencher sur l'optimisation de la conception et sur la validation des composants (par exemple les matériaux et capteurs résistants aux rayonnements) dans une centrale à fusion, en tenant compte de la sûreté et des contraintes économiques dès les premières étapes. Il faudra notamment mettre au point des solutions intégrées au croisement de la recherche sur le plasma en combustion, la technologie de confinement, la gestion de la chaleur et le blindage.

Les domaines de recherche, développement et démonstration et d'intégration précités nécessitent un effort concerté. Il serait possible de tirer profit des avancées dans d'autres technologies, notamment le calcul intensif, l'intelligence artificielle et la fabrication de pointe, pour accélérer le développement de l'énergie de fusion et ouvrir la voie à sa commercialisation à plus grande échelle. En outre, pour parvenir à commercialiser l'énergie de fusion, il faudra établir l'infrastructure nécessaire (notamment les installations, les systèmes et les cadres pertinents) pour assurer l'ensemble de son cycle de vie.

Enfin, quand l'énergie de fusion dépassera le stade du développement pour passer à celui de la démonstration et du déploiement, il sera important que les parties prenantes actuelles du secteur ainsi que les nouvelles consignent et mettent en commun les nouveaux résultats. Cela implique un ensemble d'étapes essentielles, à savoir l'adoption de méthodes traditionnelles telles que l'examen par des pairs, la communication transparente au sujet des progrès, la protection de la propriété intellectuelle le cas échéant, et la collaboration efficace avec les gouvernements, les investisseurs et le public au moyen d'une communication stratégique.

[3] Par exemple, concernant la fusion par confinement inertiel, les domaines de recherche, développement et démonstration essentiels comprennent également la production à plus grande échelle de faisceaux et de cibles abordables.

[4] Le choix du combustible dépend du type de processus de fusion envisagé, par exemple deutérium-tritium, deutérium-deutérium, deutérium-hélium 3 ou proton-bore 11.

Indicateurs de recherche, développement et démonstration, et étapes importantes de commercialisation

Les indicateurs de développement suivants peuvent être utilisés pour évaluer le progrès en recherche, développement et démonstration de l'énergie de fusion :

- Démonstration d'un niveau de performance élevé et maintien du fonctionnement en continu (ou régime pulsé à fréquence de récurrence élevée pour la fusion par confinement inertiel ou magnéto-inertielle), dans des conditions à l'interface plasma-matériaux qui favorisent une durée de vie acceptable des composants de la chambre.
- Pour les concepts d'énergie de fusion axés sur la réaction D-T :
  - Obtention d'un rapport de surgénération du tritium[5] supérieur à 1, éventuellement en utilisant du lithium enrichi en isotope 6 ;
  - Démonstration de l'extraction et de la recirculation efficaces du tritium ;
  - Mise en place de chaînes d'approvisionnement adaptées à la production de combustible au tritium.
- Obtention d'un gain net d'énergie qui puisse être extrait d'une centrale à fusion.

Les étapes majeures ci-après sont nécessaires à la commercialisation de l'énergie de fusion :

- Démonstration simultanée de la suffisance[6] en combustible et d'un gain net d'énergie dans une même centrale à fusion ;
- Acquisition du site de la centrale à fusion et obtention des autorisations et permis nécessaires à la construction, à l'exploitation et au déclassement ;
- Établissement des filières stratégiques et réglementaires appropriées pour la gestion des déchets ;
- Connexion de la centrale à fusion à un système ou réseau électrique à un prix compétitif.

[5] Le rapport du taux de production total de tritium et du taux de consommation total dans un dispositif de fusion.
[6] En autosuffisance ou par approvisionnement en combustible.

2.

Gestion des ressources, de la main-d'œuvre et des connaissances pour l'**industrialisation**

Établir une industrie à part entière capable de libérer le potentiel de la fusion nécessite de disposer des ressources adéquates, de créer des flux de revenus parallèles, de constituer une main-d'œuvre compétente, de mettre en place des stratégies efficaces de gestion des connaissances et d'établir des cadres clairs s'agissant des aspects juridiques et réglementaires et de la propriété intellectuelle.

Ressources financières et mécanismes de financement

Il ne faut pas sous-estimer l'ampleur des investissements, tant publics que privés, ainsi que la durée pendant laquelle l'effort d'investissement devra être maintenu. Cela s'explique par la complexité technique inhérente à la maîtrise de la fusion, par les conditions rigoureuses qui devront être maintenues dans les centrales produisant de l'énergie, ainsi que par le nombre d'installations scientifiques et industrielles qui seront nécessaires pour les activités de recherche, de développement, d'essai et de fabrication, et enfin pour la production d'énergie.

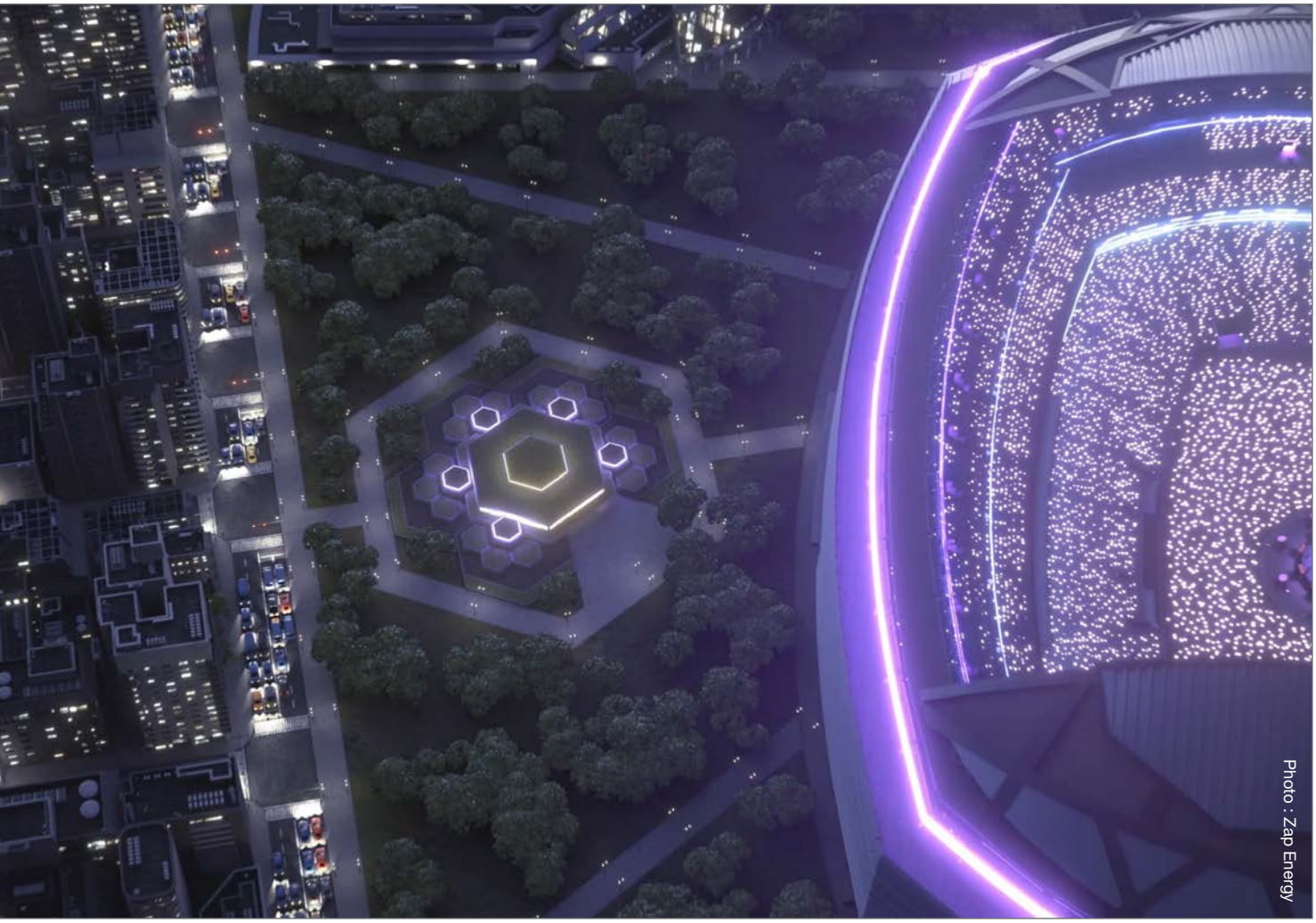


Photo : Zap Energy

Les ressources des secteurs public et privé joueront des rôles différents mais complémentaires. Les investissements des gouvernements seront essentiels dans les domaines suivants :

Financement de la recherche et des premiers stades du développement

D'importants efforts de recherche, développement et démonstration restent nécessaires dans le domaine de l'énergie de fusion. Les instituts de recherche et organismes publics assimilés sont au premier plan dans les domaines de recherche, développement et démonstration à faible niveau de maturité technologique. Il faudra continuer à financer ces établissements et leurs programmes pour développer l'industrie de la fusion. Les organisations privées sont certes moins actives en matière de recherche fondamentale, mais elles jouent elles aussi un rôle important dès les premiers stades du développement et bénéficient souvent d'un soutien public grâce à divers mécanismes comme les subventions, les exemptions fiscales et les partenariats public-privé.
Le soutien et le financement publics sont essentiels pour accélérer les activités de recherche, développement et démonstration, en particulier à ce stade de l'émergence d'une industrie. Toutefois, il faudra veiller à ce que les modalités concrètes de ce soutien ne soient pas trop complexes (en raison, par exemple, de la fragmentation des mécanismes de soutien, du montant des subventions individuelles, de la propriété intellectuelle créée, de la comptabilité des coûts ou de rapports fastidieux), afin d'éviter de rendre ces mécanismes moins intéressants pour les organisations publiques comme privées.

Financement de projets de démonstrateurs

Les projets de démonstrateurs technologiques et d'installations d'essai sont cruciaux pour établir l'industrie de la fusion et garantir sa pérennité, mais ils nécessiteront peut-être des financements publics s'ils ne sont pas avantageux sur le plan commercial.
De tels projets (par exemple **ITER**) peuvent contribuer à l'établissement d'une chaîne d'approvisionnement, puisqu'ils mettent en concurrence les entreprises publiques et privées qui souhaitent y participer, lesquelles renforcent par conséquent leurs compétences et leur base industrielle. Il faudra continuer à financer ces projets, même quand des difficultés ou des retards surviendront, et s'assurer qu'ils sont pertinents sur le plan commercial, et suffisamment longs et nombreux pour permettre l'établissement et le maintien d'une chaîne d'approvisionnement industrielle.

ITER, qui est actuellement en construction en France, représente la plus grande expérience de fusion en phase de développement. Ce projet est une entreprise internationale menée conjointement par la Chine, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon, la République de Corée et l'Union européenne. Son objectif est de démontrer la faisabilité scientifique et technologique de la production d'énergie de fusion.

Photo : Organisation ITER

Soutien aux centrales pilotes et aux projets inédits

Dans certains pays, les stratégies en matière de fusion, fondées sur des politiques et pratiques commerciales nationales, supposent que les activités de démonstration et de déploiement des centrales à fusion commerciales seront menées par des entités privées, et non publiques. Pour ce faire, les gouvernements devront faciliter la transition du secteur public au secteur privé au moyen de mécanismes adéquats de partage des risques pour les premières centrales commerciales (centrales pilotes et projets inédits), dont le rapport risque/bénéfice nécessitera que les gouvernements apportent le soutien dont le secteur privé aura besoin pour lever les capitaux nécessaires. Ces mécanismes de partage des risques[7] peuvent prendre différentes formes ; on en trouve dans des industries de complexité comparable, dans lesquelles ils permettent d'appuyer des projets dirigés par le secteur public ou par le secteur privé.

Les financements (actions et emprunts) issus d'investissements privés peuvent notamment soutenir les aspects suivants :

- Développement et industrialisation de la technologie au moyen de programmes de fusion spécifiques et des centrales et composants correspondants ;
- Renforcement des capacités industrielles sous la forme de mise à disposition de compétences, de processus (par exemple processus de fabrication) et d'outils nécessaires à la mise en œuvre de tels programmes ;
- Développement d'installations d'essai (par exemple pour le cycle du combustible) et de projets de centrales (par exemple les centrales pilotes, les centrales inédites et les centrales de série).

[7] Ces mécanismes comprennent entre autres des programmes de développement par étapes, des contrats de différence, et des contrats de base d'actifs régulés.

Main-d'œuvre

La constitution d'une main-d'œuvre compétente formée spécifiquement aux fins de la commercialisation de l'énergie de fusion appelle une approche globale combinant des initiatives nationales tant publiques que privées, éventuellement soutenues par une collaboration internationale et des programmes d'échange de connaissances.

À l'heure actuelle, les spécialistes de la fusion sont peu nombreux. Un effort concerté est donc nécessaire pour attirer et former, sur le plan théorique et sur le plan pratique, une main-d'œuvre compétente et spécialisée constituée de scientifiques, d'ingénieurs, de chefs de projets, d'exploitants, de techniciens et d'experts en réglementation, capable de surmonter les différents obstacles inhérents au déploiement de la technologie de fusion. L'accent devra être mis sur la constitution d'une main-d'œuvre diverse, et pas uniquement sur la priorité actuelle qu'est la formation de futurs chercheurs.

La fusion intéresse déjà des talents forts de compétences et d'expériences dans d'autres industries et dont il serait très utile de tirer parti en vue de constituer une main-d'œuvre compétente. Ce processus pourrait être accéléré au moyen de programmes de reconversion ciblés. Cependant, il ne faut pas négliger le degré de concurrence entre les talents au plus haut niveau des domaines scientifiques et d'ingénierie dans les industries et les établissements publics de recherche.

Il faudra mettre l'accent sur la formation de spécialistes tournés vers l'industrie, disposant d'une expertise technique vaste et transversale, et d'une expérience de différentes phases du cycle de vie d'un projet. Ce profil permettra d'éviter le cloisonnement des spécialités et des phases de développement, conception et mise en œuvre des projets, et aidera l'industrie à répondre à la demande prévue en matière d'expansion et de commercialisation. En outre, étant donné que l'exploitation de centrales à fusion nécessitera une chaîne d'approvisionnement robuste concernant aussi bien des éléments très spécifiques à la technologie de fusion que des éléments également utilisés dans d'autres industries, il est essentiel d'encourager les connaissances interdisciplinaires.

Gestion des connaissances

Le développement de l'industrie de la fusion et la commercialisation de l'énergie qui en sera issue nécessitent la création et une large diffusion de connaissances scientifiques et de connaissances en matière d'ingénierie, de fabrication et d'exploitation. À l'heure actuelle, ces activités de création et de partage de connaissances sont en grande partie réalisées dans le cadre de projets à financement public. Ces projets devront donc viser à optimiser la création, la consignation et la diffusion (dans le respect des protocoles appropriés) de ces connaissances. La participation des secteurs public et privé à la gestion et au partage des connaissances serait facilitée par l'établissement de cadres clairs et robustes en matière de propriété intellectuelle. Les forums industriels peuvent également jouer un rôle important en encourageant le partage d'informations essentielles s'agissant de la sûreté, de la sécurité et de l'excellence opérationnelle dans l'intérêt de tous.

La fusion étant une industrie récente, il faudra partager les connaissances avec des industries mieux établies de complexité comparable. Il importe aussi que les connaissances soient mises en commun entre les projets qui étudient différentes approches techniques de la fusion, notamment les différentes techniques de confinement. Les associations professionnelles, les organisations de commerce, et les programmes d'échange entre organismes de réglementation peuvent jouer un rôle important à cet égard.

Enfin, le développement de l'industrie de la fusion bénéficierait grandement de l'acquisition et de l'organisation des connaissances au moyen de normes et de codes nationaux et internationaux, et de la mise en commun d'orientations et des meilleures pratiques.

Photo : Organisation ITER

Sur la voie de l'industrialisation ▸▸▸▸▸

Bien que la fusion demeure un domaine naissant, l'évolution du secteur de l'énergie actuel laisse présager l'apparition de grands intégrateurs, d'entreprises de rang 2 qui se spécialiseront dans les systèmes et sous-systèmes des centrales à fusion, et d'un très grand nombre de petites et moyennes entreprises qui auront la propriété intellectuelle de certains composants ou pièces spécifiques. La création d'un secteur dynamique nécessitera des initiatives visant à aider l'ensemble de ces différents types d'entreprises à acquérir des compétences et de l'expérience dans le domaine de la fusion.

L'établissement d'une industrie de la fusion prospère dépendra de la réussite de la transition de la recherche sur les technologies de fusion et des premiers stades de leur développement à leurs applications commerciales. En règle générale, les projets nationaux et internationaux de grande envergure donnent lieu à des partenariats public-privé de facto[8], et contribuent largement au maintien de la chaîne d'approvisionnement et des ressources humaines dans le domaine de la fusion. Pour développer davantage l'industrie de la fusion, il est nécessaire que le secteur public continue à participer activement au maintien de la chaîne d'approvisionnement au moyen de programmes publics visant notamment à établir de nouvelles installations de recherche, afin de garantir le transfert fluide des connaissances et compétences spécialisées acquises dans le cadre de programmes publics vers le secteur industriel, selon les modalités appropriées. Ces programmes publics seront complémentaires des investissements privés, qui pourraient notamment servir à mener les activités présentées à la page 17. En outre, plusieurs éléments fondamentaux devront être mis en place, parmi lesquels :

[8] Les partenariats public-privé peuvent prendre la forme d'un engagement à long terme pris par un gouvernement de fournir une base de revenus stable aux entreprises privées et de réduire le risque financier auquel elles s'exposent.

Un cadre juridique et réglementaire clair et stable

Un aspect important des efforts visant à attirer des financements privés et à mettre au point des plans de développement crédibles est la clarté du cadre juridique et réglementaire, notamment l'établissement de processus d'octroi de permis pour le choix des sites, la construction et l'exploitation.

Un cadre robuste en matière de propriété intellectuelle

Un cadre robuste en matière de propriété intellectuelle est essentiel pour faciliter la collaboration entre les différentes parties prenantes lors de la transition de la recherche à la commercialisation de la technologie.

Des technologies utiles aussi bien pour l'énergie de fusion que pour d'autres marchés

L'établissement d'une industrie de la fusion dans le secteur privé comporte une difficulté fondamentale qui découle des délais liés à son développement : les investisseurs ont généralement besoin de flux de revenus à court ou à moyen terme. Ces flux pourraient provenir de l'application des technologies développées pour la fusion à d'autres marchés (par exemple les matériaux innovants, la robotique et les applications médicales). Des programmes de développement publics ou privés pourraient être conçus à cette fin.

Un élargissement de l'écosystème de collaboration

Il serait intéressant d'établir des centres de renforcement des capacités sur le terrain (surtout à l'échelle régionale pour encourager la participation des communautés et gouvernements nationaux et locaux), qui constituent un environnement dynamique où plusieurs organismes peuvent collaborer, partager les coûts de développement et mettre en commun leur savoir-faire et leurs compétences spécialisées, ce qui permet souvent d'accélérer la création et le partage de connaissances, et le développement de technologies.

3.

Sûreté, sécurité et non-prolifération

La réglementation qui s'appliquera aux centrales à fusion en matière de sûreté et de sécurité devra être à la mesure des risques que ces centrales poseront, compte tenu de leurs particularités, notamment l'absence de réaction en chaîne et la capacité de mise à l'arrêt immédiate. Il importe tout autant de s'assurer que le risque de prolifération reste faible, en intégrant cette considération dans la conception et en mettant en œuvre un contrôle réglementaire à mesure que l'énergie de fusion se développe.

Fondements de sûreté radiologique

La conception sûre et sécurisée est essentielle à la réussite du déploiement de l'énergie de fusion. L'approche adoptée en matière de sûreté pour les centrales à fusion doit être conforme aux dispositions de la publication intitulée *Principes fondamentaux de sûreté* (n° SF-1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA) [2], qui s'applique à toutes les circonstances donnant lieu à des risques radiologiques, notamment la production d'électricité et les applications médicales et industrielles. L'objectif fondamental de ces principes est de protéger les personnes et l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants.

Les Principes fondamentaux de sûreté énoncés dans la publication n° SF-1 [2] sont applicables à toutes les installations et activités utilisées à des fins pacifiques pendant leur durée de vie ainsi qu'aux mesures de protection visant à réduire les risques radiologiques existants. Ces installations et activités comprennent tout endroit dans lequel des matières radioactives sont produites, transformées, utilisées, manipulées, entreposées ou stockées définitivement à une échelle telle que la protection et la sûreté doivent être prises en considération [2]. Ces principes peuvent donc s'appliquer aux centrales à fusion, qui utilisent et produisent des matières radioactives à une échelle qui justifie la prise en considération de la sûreté.

Les Prescriptions générales de sûreté de l'AIEA (n° GSR Parts 1-7) [3-9] portent notamment sur l'évaluation de la sûreté et les cadres réglementaires. Les Prescriptions générales de sûreté concernent toutes les applications des rayonnements, y compris les dispositifs de fusion.

Les organismes compétents doivent évaluer et contrôler les risques radiologiques pour les personnes et l'environnement qui découlent du fonctionnement normal, des incidents et des accidents. Cette responsabilité s'applique à toutes les phases du cycle de vie des installations, notamment la conception, l'exploitation, la gestion du combustible et des déchets, le démantèlement et le déclassement. Il faudra recourir à des outils de modélisation et de diagnostic pour étayer l'argumentaire de sûreté. Il est essentiel de prendre les mesures de sûreté en considération dès le début du processus de conception de tous les systèmes concernés. Compte tenu du caractère nouveau des centrales à fusion, les incertitudes concernant la performance de différents systèmes doivent faire l'objet d'un examen attentif dans l'analyse de la sûreté. Les interactions de matières (par exemple le lithium, l'eau), les radio-isotopes et les énergies des particules varient selon la technique employée, ce qui signifie que des risques divers doivent être envisagés. Les concepteurs de centrales à fusion doivent tenir compte de ces principes pour réduire les risques et restreindre au minimum la production de déchets radioactifs, lorsque cela est possible.

Approches de la réglementation de l'énergie de fusion

Des expériences de fusion ont déjà été autorisées et réalisées dans le cadre de projets de recherche-développement menés dans quelques États Membres de l'AIEA. Dans les années à venir, les concepteurs devraient mettre en œuvre les premiers projets pilotes et projets de démonstration. Si ces projets aboutissent, ils pourraient entraîner l'adoption commerciale à grande échelle des centrales à fusion.

Concernant les modèles envisagés pour la commercialisation à grande échelle, les États Membres évaluent actuellement des approches visant à mettre en place une réglementation applicable aux centrales à fusion qui soit proportionnelle aux risques qu'elles présentent. Ces évaluations tiennent compte des caractéristiques intrinsèques de la fusion (par exemple l'absence de réaction en chaîne, la mise à l'arrêt immédiate en cas de perte d'alimentation électrique), des caractéristiques des matières radioactives présentes et de la gestion de ces matières sur site. Cette approche reflète l'approche graduée de la réglementation, adoptée par l'AIEA [10].

Des prescriptions et des orientations en matière de sûreté et de sécurité existent déjà ou sont en cours d'établissement au niveau des États Membres concernant les centrales à fusion et la gestion sûre des déchets radioactifs, conformément aux cadres nationaux et aux risques correspondants. L'AIEA peut apporter son soutien aux organismes de réglementation afin d'établir des prescriptions de sûreté et des orientations sur la sécurité relatives à l'énergie de fusion qui soient adaptées à cette technologie et aux risques qu'elle comporte, et qui permettent d'intégrer les enseignements tirés au fil des avancées en matière de conception, comme cela a été fait pour d'autres régimes réglementaires.

Il serait utile que les organismes de réglementation collaborent. En adoptant des approches communes et en prenant des décisions cohérentes lorsque cela est possible, les États Membres peuvent simplifier le processus de candidature ; les concepteurs auront ainsi moins de modifications à apporter à leurs candidatures, solutions techniques et justifications avant de les soumettre dans différentes juridictions.

Les organismes de réglementation gagneraient à employer une terminologie commune et à adopter des positions communes sur les questions techniques, même s'ils appliquent différentes approches réglementaires. Une collaboration constante entre ces organismes au sujet des nouvelles difficultés techniques et des questions de sécurité, notamment liées à la cybersécurité, faciliterait le partage des connaissances et des données d'expérience utiles pour établir une réglementation adaptée à ces aspects des centrales à fusion.

Les organisations internationales telles que l'AIEA peuvent organiser des discussions bilatérales et multilatérales entre les États Membres qui mettent au point des cadres réglementaires similaires. L'AIEA pourra également aider l'ensemble des États Membres à développer leurs cadres réglementaires en matière de fusion en veillant à la coordination en son sein afin de garantir la cohérence de ses travaux. Il faudra probablement attendre que les centrales à fusion aient progressé davantage pour déterminer si l'AIEA doit établir des normes de sûreté concernant la fusion.

Les organismes responsables des normes industrielles pourraient participer au développement d'approches communes de la conception permettant de rationaliser les examens réglementaires.

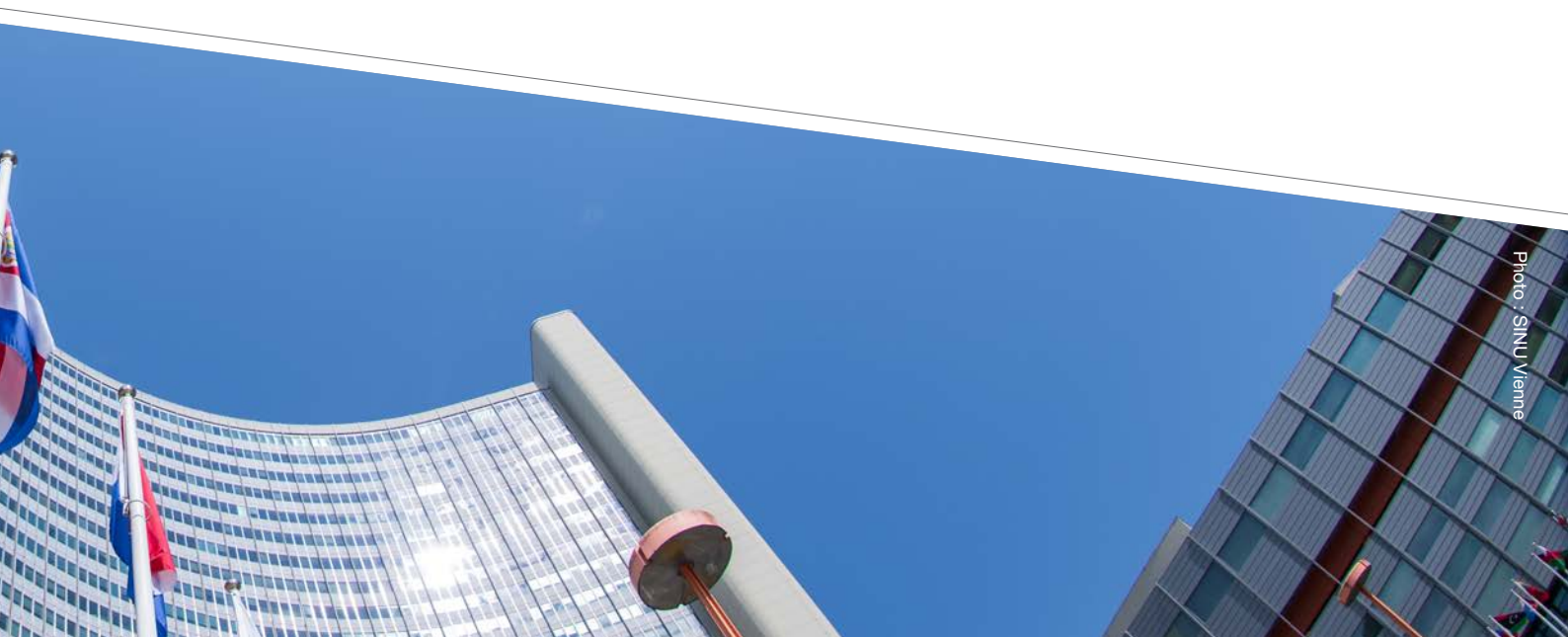


Photo : SINU Vienne

Transition vers la commercialisation à grande échelle des centrales à fusion

À ce jour, l'expérience en matière d'énergie de fusion se limite à des projets de recherche-développement. Cependant, il est prévu de produire et de commercialiser ce type d'énergie à l'avenir. Pour ce faire, il faudra construire des centrales à fusion (prototypes de centrale, centrales de démonstration et modèles commerciaux).

À mesure que la technologie de fusion progresse, les organismes de réglementation pourraient adopter des processus correspondant au stade de développement. Ils pourraient par exemple recourir à l'approche graduée en vue de définir différentes prescriptions relatives à l'octroi d'autorisations et différentes modalités de contrôle pour chaque stade. Les variables qui peuvent influencer les décisions relatives à la sûreté comprennent l'importance des stocks de matières radioactives ; le transport, l'entreposage et la transformation du combustible ; les catégories et volumes de déchets stockés définitivement ; et le refroidissement actif nécessaire pour certains composants. Les organismes de réglementation constateront probablement que leurs examens et processus gagneront en efficacité quand ils les appliqueront aux centrales de série. Plus particulièrement, les procédures relatives à l'octroi d'autorisations devront peut-être être repensées pour permettre la fabrication de masse et le déploiement à grande échelle sur un court laps de temps.

Considérations relatives aux autres risques

L'AIEA et de nombreux organismes de réglementation de ses États Membres qui coordonnent des projets d'énergie de fusion se concentrent sur la sûreté et la sécurité radiologiques. Les centrales à fusion comportent d'autres risques potentiels de nature industrielle et professionnelle, compte tenu de la haute énergie du système et de la possible toxicité des matières. La présente publication ne porte pas sur l'examen détaillé de ces risques. Toutefois, dans leur communication avec le public, les acteurs du secteur de l'énergie de fusion peuvent expliquer comment recenser et atténuer ces risques pour protéger les travailleurs et le grand public.

Photo : Organisation ITER

Considérations relatives à la non-prolifération

Les concepteurs devront être attentifs aux régimes de contrôle des exportations qui s'appliquent aux matières nucléaires utilisées pour l'énergie de fusion, notamment le tritium et le lithium 6, et à certaines technologies, telles que les codes d'analyse.

Concernant les conceptions de dispositifs de fusion qui ne transforment, n'utilisent ou ne produisent aucune matière nucléaire[9], l'AIEA n'applique actuellement aucune mesure de contrôle autre que celles nécessaires à la résolution de questions relatives à l'exactitude et à l'exhaustivité des informations communiquées par les États Membres, le cas échéant. Les accords de garanties internationaux existants s'appliquent aux conceptions de dispositifs qui transforment, utilisent ou produisent des matières nucléaires. Quand de nouvelles informations seront disponibles sur les conceptions des centrales à fusion, un examen plus approfondi sera nécessaire pour déterminer si le champ d'application des garanties de l'AIEA devrait couvrir plus largement ces centrales.

[9] Les garanties de l'AIEA s'appliquent à toute matière brute ou tout produit fissile spécial au sens de **l'article XX du Statut de l'AIEA**.

DGO

4.

Collaboration mondiale

L'écosystème de l'énergie de fusion évolue rapidement, poussé par l'élan de la collaboration internationale et de la participation croissante du secteur privé. La collaboration mondiale est essentielle dans les domaines dans lesquels des progrès supplémentaires sont nécessaires, pour établir des chaînes d'approvisionnement internationales et pour former la main-d'œuvre compétente nécessaire à la commercialisation de l'énergie de fusion.

L'écosystème en évolution de l'énergie de fusion

La quête de l'énergie de fusion est par nature une entreprise internationale, puisqu'elle nécessite une coopération à l'échelle mondiale pour surmonter les obstacles que rencontrent encore les domaines de recherche, développement et démonstration, pour établir des chaînes d'approvisionnement internationales, et pour former une main-d'œuvre compétente. Cette coopération mondiale est indispensable si l'on veut commercialiser l'énergie de fusion et contribuer à la transition vers des énergies durables.

Au cours des soixante dernières années, l'énergie de fusion s'est développée grâce aux efforts intenses de collaboration entre différents pays dans le domaine de la science et de la technologie de la fusion. Le projet ITER est le meilleur exemple de cet esprit de collaboration. L'élargissement de cette collaboration fondatrice aux acteurs industriels constitue une étape charnière vers l'intégration du secteur privé en pleine expansion à l'écosystème de développement actuel de l'énergie de fusion.

Des initiatives nationales ont déjà été lancées, notamment **Fusion 2040** en Allemagne, **Fusion Energy Innovation Strategy** au Japon, **Towards Fusion Energy** au Royaume-Uni, et **Fusion Energy Strategy 2024** aux États-Unis, qui sont autant d'exemples de politiques qui utilisent des infrastructures existantes et encouragent la collaboration entre les pays, les institutions publiques et les entités privées, et qui illustrent des stratégies efficaces visant à rassembler des acteurs industriels divers et les concepteurs dans le domaine de la fusion. Les alliances public-privé formées récemment, telles que le **consortium chinois sur l'énergie de fusion**, le **consortium DTT** en Italie et la société **UK Industrial Fusion Solutions Ltd** au Royaume-Uni, sont les premières à exploiter le potentiel de telles collaborations.

Fusion 2040 est un programme de financement lancé par le Gouvernement allemand en vue du développement de la conception d'une centrale à fusion.

Fusion Energy Innovation Strategy est la première stratégie nationale japonaise relative à l'énergie de fusion, qui fonde notamment un groupe industriel (Japan Fusion Energy Council) pour accélérer le développement de cette énergie.

Towards Fusion Energy est la stratégie du Royaume-Uni en vue de la réalisation de l'énergie de fusion. Cette stratégie comprend le programme de conception, développement et construction du prototype de centrale à fusion STEP (Tokamak sphérique pour la production d'énergie), et le nouveau programme de recherche-développement du Gouvernement britannique, Fusion Futures.

Fusion Energy Strategy 2024 est la stratégie des États-Unis d'Amérique visant à accélérer la viabilité commerciale de l'énergie de fusion en partenariat avec le secteur privé. Cette stratégie comprend un projet de consortium public-privé sur l'énergie de fusion.

Le **consortium China Fusion Energy** est une alliance industrielle créée par le Gouvernement chinois en vue du développement et de l'avancée de la technologie de fusion.

Le **consortium DTT** est une alliance public-privé en vue de la construction et de l'exploitation de l'installation expérimentale de fusion DTT (Tokamak de test de divertor).

UK Industrial Fusion Solutions Ltd est une alliance public-privé chargée de mettre sur pied le prototype de centrale à fusion STEP.

En outre, les modèles de partenariats public-privé, tels que le **programme de développement par étapes de la fusion** et l'initiative **INFUSE** lancés par les États-Unis, sont des exemples de mécanismes efficaces qui facilitent l'accès de l'industrie de la fusion à des ressources techniques et financières, et qui intensifient les investissements privés dans ce secteur, accélérant ainsi la transition de la recherche fondamentale à la viabilité commerciale. Ces programmes soulignent l'importance de la prise de risque collective, des progrès par étapes, et de l'appui des pouvoirs publics pour cultiver un écosystème dynamique et ouvert autour de l'énergie de fusion en vue de favoriser le transfert de technologies des premiers stades du développement au déploiement commercial, en mettant l'accent sur la protection de la propriété intellectuelle et la diversification des approches technologiques.

Le **programme de développement par étapes de la fusion** est le programme quinquennal du Département de l'énergie des États-Unis visant à faire avancer la conception et la recherche-développement de centrales à fusion pilotes exploitées par le secteur privé.

INFUSE (Réseau d'innovation pour l'énergie de fusion) est une initiative du Département de l'énergie des États-Unis visant à apporter un soutien technique et financier à l'industrie de la fusion en s'appuyant sur les institutions publiques qui travaillent sur la fusion.

Tirer parti de la coopération internationale et des partenariats public-privé

Collaboration mondiale dans un environnement concurrentiel sain

La collaboration internationale est fondamentale aux fins de la mise en commun des connaissances sur la science et la technologie de fusion, de l'avancée de potentielles pistes de développement et de l'accélération de la commercialisation de l'énergie de fusion. Une collaboration mondiale permettrait aux pays de mettre en commun leurs compétences spécialisées ; de partager le coût des projets de recherche, développement et démonstration ; d'accélérer les progrès mutuels grâce à la mise en commun des informations et des connaissances ; et de construire l'infrastructure nécessaire aux technologies de la fusion. Le temps et les ressources qui devront être consacrés à la fusion ont augmenté proportionnellement aux difficultés techniques rencontrées dans les domaines de recherche, développement et démonstration les moins avancés, ce qui souligne la nécessité de collaborer à l'échelle internationale pour parvenir rapidement à déployer et à commercialiser la fusion en partageant les risques et les investissements. La conception et la construction du projet ITER ainsi que les travaux de recherche-développement à ce sujet illustrent bien cette situation. Dans un écosystème qui encourage une concurrence saine entre les différentes approches du développement de l'énergie de fusion, les stratégies du secteur public et du secteur privé peuvent avancer en parallèle dans le contexte d'une collaboration mondiale.

Utilisation efficace des installations à forte intensité de capital

De nombreux pays ont établi une infrastructure de recherche-développement visant à faire progresser l'énergie de fusion dans le cadre de programmes nationaux. Cette infrastructure comprend des installations expérimentales, des systèmes de récupération du combustible, des systèmes d'entreposage, des installations de boucle de métal liquide, des installations d'irradiation, d'essai des matériaux et de fabrication. En raison de la forte intensité de capital requise par les installations d'essai, le coût de leur établissement sera prohibitif pour les pays qui entreprennent un programme d'énergie de fusion. Partager les infrastructures à l'échelle internationale, et également avec le vaste secteur privé de l'industrie de la fusion, permettrait d'accélérer encore le déploiement des centrales à fusion et d'éviter la duplication des efforts. En répartissant les coûts entre deux ou plusieurs pays, la duplication de l'infrastructure ne sera pas nécessaire, et les parties concernées, ainsi que l'industrie internationale de la fusion, y gagneront. Des accords de collaboration peuvent être convenus entre les pays pour mettre en œuvre ce type d'arrangement.

Mise en commun et alimentation des bases de données

Il importe que les spécialistes de la fusion reconnaissent qu'il est crucial d'améliorer l'accès aux données scientifiques pour les chercheurs, les décideurs et le public, ce qui permettra de promouvoir la transparence et la reproductibilité, et d'encourager la mise en commun des connaissances à l'échelle internationale. Dans cette optique, il est essentiel de créer une plateforme de bases de données centralisée pour les groupes de recherche-développement travaillant dans le domaine de la science et de la technologie de la fusion. Cette plateforme rendrait également accessibles à toutes les parties prenantes des données sous différents formats et des applications pertinentes en matière d'énergie de fusion.

Échange de personnel et formation de la main-d'œuvre

La coopération internationale permet de mettre à profit le partage des ressources et la diversité intellectuelle des spécialistes de la fusion. Les pays peuvent accélérer leurs progrès technologiques et améliorer leurs programmes nationaux en établissant des partenariats avec d'autres pays dont les programmes et les expériences en matière de fusion sont plus avancés. En outre, accroître la participation à l'échelle internationale permettrait de diversifier et d'élargir le vivier de talents dont émergeront les grands scientifiques de demain. La mise en place de mesures incitatives adéquates et la bonne gestion des droits de propriété intellectuelle favoriseraient les programmes d'échange de personnel qui permettraient aux parties prenantes de se familiariser avec les installations d'autres parties avec lesquelles elles collaborent dans des domaines spécifiques de la technologie de fusion. Ces programmes peuvent par exemple viser à former le personnel à l'exploitation des installations, ce qui présente des avantages pour toutes les parties prenantes.

Validation des codes de conception

La conception et l'analyse de la sûreté pourraient reposer en grande partie sur les codes et méthodes d'analyse. Les spécialistes de la conception en matière de fusion peuvent définir ensemble l'approche que les concepteurs devront adopter pour respecter les prescriptions réglementaires. Les bases de données et les codes peuvent être mis en commun aux fins de leur validation et de leur vérification au moyen de cadres de collaboration internationale.

Collaboration en matière de réglementation

Lorsqu'elles pourront être exploitées, les technologies de l'énergie de fusion dépasseront les frontières nationales et seront adoptées partout dans le monde. L'adhésion générale à l'énergie de fusion et son adoption massive seront facilitées par la mise en place d'une réglementation appropriée, harmonisée à l'échelle internationale et adaptée aux risques associés aux centrales à fusion. La collaboration mondiale permettrait aussi le renforcement des contrôles et des pratiques réglementaires.

Photo : Organisation ITER

Mise en place de chaînes d'approvisionnement robustes et disponibilité des matières indispensables

La demande concernant les ressources essentielles à la production d'énergie durable (notamment le deutérium, le tritium, l'hélium, les matériaux structurels, le lithium, le béryllium, le tungstène, le cuivre et les composites de carbure de silicium) devrait connaître une augmentation exponentielle à l'échelle mondiale, à l'heure de la transition vers les technologies énergétiques propres. Les ressources nécessaires à la construction et à l'exploitation des centrales à fusion seront l'objet d'une concurrence féroce à l'échelle mondiale. Les questions fondamentales à se poser sont a) comment augmenter la production pour satisfaire la demande croissante et b) quelles sont les sources d'approvisionnement possibles pour ces matières indispensables. Établir des cadres de collaboration entre les spécialistes de la fusion permettrait aux parties prenantes de définir ensemble les priorités de recherche-développement concernant la chaîne d'approvisionnement. Ce travail en amont encourage l'innovation, réduit le risque que l'indisponibilité des matières soit un obstacle à la réalisation des objectifs en matière de fusion, et ouvre ainsi une voie plus efficace et plus durable vers la maîtrise de l'énergie de fusion. Une bonne coopération entre les spécialistes de la fusion est essentielle pour obtenir des résultats bénéfiques à tous et garantir l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement en matières essentielles, ce qui favorisera la fiabilité et la résilience des systèmes énergétiques.

5.

Rôles des **parties prenantes**

Les gouvernements nationaux, les organismes de réglementation, les instituts de recherche, les milieux universitaires, les entreprises privées, les organisations internationales et les entités à but non lucratif doivent travailler de concert pour accélérer l'adoption et le déploiement de l'énergie de fusion.

Gouvernements nationaux

Compte tenu des ressources considérables qu'il faudra engager pour accélérer la démonstration et le déploiement des centrales à fusion et du rôle essentiel que l'énergie de fusion pourrait jouer dans un système énergétique décarboné, les gouvernements nationaux seront indiscutablement des acteurs et des parties prenantes de premier plan. À ce titre, leur participation pourrait comprendre les mesures suivantes :

Publication d'une politique et d'un plan d'action d'envergure nationale pour soutenir la création d'une industrie de la fusion

Il importe que l'action du gouvernement national soit bien comprise par toutes les parties prenantes, harmonisée entre les différents organismes de mise en œuvre et soutenue. Surtout, cette action doit porter sur un objectif et une vision d'ensemble clairement définis. Ainsi, à l'heure actuelle, les pays élaborent des politiques et des plans d'action d'envergure nationale qui fixent les grandes lignes des objectifs qu'ils visent en matière d'énergie de fusion et précisent les cibles à atteindre, les échéances à respecter et les méthodes à utiliser. Ces politiques doivent impérativement reconnaître l'importance du rôle que l'énergie de fusion peut jouer dans la lutte contre les changements climatiques et le renforcement de la sécurité énergétique. Elles doivent en outre traiter des outils essentiels, interfaces et conditions indispensables, tels que le financement et les subventions, qui permettent de faciliter l'entrée de cette énergie sur le marché à un prix compétitif. Ces stratégies peuvent s'étendre au-delà du déploiement initial et exposer en détail les étapes d'une mise en œuvre à grande échelle dans un délai pertinent.

Définition du rôle du gouvernement et de ses attentes à l'égard des autres parties prenantes

Les gouvernements nationaux prendront des décisions déterminantes concernant les activités qu'ils financeront ou géreront par l'intermédiaire d'organismes publics et celles où ils interviendront principalement en tant que catalyseurs ou facilitateurs en comptant sur des investissements et des résultats du secteur privé. Les rôles de chacun, les activités spécifiques associées à ces rôles ainsi que les attentes et les règles concernant la participation du secteur privé devront être définis de façon claire et transparente. Tous ces éléments feront partie intégrante des politiques nationales.

Mise en place d'un cadre juridique et réglementaire

L'une des fonctions essentielles des gouvernements nationaux consiste à mettre rapidement en place les cadres juridiques et réglementaires adaptés. La définition des critères qui orienteront la sélection des sites et l'obtention d'un consentement au développement sont tout aussi importants. Ces cadres sont essentiels pour veiller à ce que le développement technologique soit guidé par de justes préoccupations, telles que la sûreté, la sécurité et la non-prolifération. Ces cadres permettent aussi aux développeurs de réaliser des avant-projets et des estimations des coûts fiables, et de garantir aux investisseurs que les risques juridiques et réglementaires sont bien définis, stables et maîtrisables.

Organisation d'un débat sain et fondé sur des faits à l'échelon local et national

L'acceptation sociale est importante pour la mise au point et le déploiement de nouvelles technologies. Les gouvernements nationaux ont par conséquent un rôle à jouer dans la participation et la sensibilisation du public. Ce rôle consiste à promouvoir un dialogue scientifique ouvert et éclairé sur l'énergie de fusion, à diffuser des informations sur sa place dans le système énergétique et l'économie du pays, ainsi que sur l'ampleur et le calendrier des investissements nécessaires, et à présenter les avantages que cette technologie pourrait apporter.

Organismes de réglementation

Les organismes de réglementation sont à la fois des acteurs clés et des parties prenantes dans la mise en place d'une industrie de la fusion. Il leur faudra acquérir leurs propres aptitudes et compétences au fur et à mesure de l'évolution technologique, notamment dans le cadre de collaborations avec les industriels et les instituts de recherche.

Il importe également que les organismes de réglementation nationaux collaborent entre eux afin de veiller au partage des connaissances entre les différentes juridictions, de faciliter la mise en place de nouveaux organismes de réglementation et d'accélérer l'harmonisation des approches réglementaires. Il s'agit là d'éléments essentiels à la mise en place d'un marché international de grande envergure.

Instituts de recherche et milieux universitaires

Les activités de recherche menées sur la fusion dans le secteur universitaire visent essentiellement à contribuer aux découvertes. Les instituts de recherche et les milieux universitaires (les universités et les établissement d'enseignement technique supérieur), qu'ils soient publics ou privés, jouent un rôle clé en mettant en œuvre des programmes de recherche visant à accroître le niveau de maturité technologique et le potentiel de commercialisation des technologies habilitantes essentielles jusqu'à ce qu'elles puissent être utilisées dans le secteur privé. Ces activités et, plus généralement, la coopération avec le secteur privé (par exemple la fourniture d'un accès à des installations de recherche) doivent être encouragées et axées sur la mise au point de technologies adaptées à une éventuelle commercialisation. Enfin, à l'appui des collaborations entre entités privées et publiques, il convient de mettre en place un cadre solide favorisant l'échange de connaissances ainsi que la production de biens intellectuels et la protection de la propriété intellectuelle, et de mettre l'accent sur des programmes de recherche interdisciplinaires.

Les instituts de recherche et les milieux universitaires ont également un rôle essentiel à jouer en ce qui concerne l'offre de formation et le développement des compétences, que ce soit isolément ou dans le cadre de programmes de développement de partenaires. Les activités ainsi entreprises permettront non seulement de retenir et de renouveler la main-d'œuvre de demain, mais aussi d'acquérir les connaissances essentielles en physique qui sont nécessaires à la réalisation d'une centrale à fusion. En outre, pour contribuer à la formation de la main-d'œuvre, les instituts de recherche et les milieux universitaires peuvent également établir des partenariats avec les industriels et les organismes de réglementation dans le cadre de programmes conjoints. Ils peuvent aussi fournir un appui technique direct à l'organisme de réglementation en mettant leurs compétences, leurs installations et leurs connaissances spécialisées les plus récentes à son service.

Enfin, les instituts de recherche et les milieux universitaires peuvent également contribuer au développement de l'industrie et à son acceptation par la société par l'intermédiaire des sciences sociales.

Fournisseurs de technologies de fusion

Les fournisseurs de technologies de fusion jouent un rôle important dans l'essor de cette industrie. Ils s'appuient sur des travaux de recherche et sur les premières phases de développement pour créer des produits industriels qui peuvent être vendus, construits, mis en service et exploités. En outre, au fur et à mesure des évolutions industrielles, on verra apparaître divers organismes qui auront eux aussi un rôle à jouer dans la conception, la construction, la mise en service et l'exploitation d'installations de production d'énergie. Étant donné que cette industrie n'en est qu'à ses débuts, il est encore difficile de définir avec précision les responsabilités qui incomberont aux fournisseurs de technologies et autres organismes.

Les intérêts potentiels du marché que représentent l'émergence de fournisseurs privés de technologies de fusion et les investissements dans ces entreprises revêtent une importance capitale qui explique l'intérêt international croissant pour le développement, la démonstration et le déploiement de la fusion en temps utile. À ce jour, il existe plus de quarante entreprises privées spécialisées dans le domaine de la fusion dans le monde, qui bénéficient en tout de plus de 7 milliards de dollars des États-Unis d'investissements. Ces entreprises s'intéressent à un large éventail de technologies liées à l'énergie de fusion, et notamment au confinement magnétique[10], au confinement inertiel[11] et au confinement magnéto-inertiel[12]. Leurs travaux portent également sur une large gamme de choix possibles en matière de combustible pour la réaction de fusion, notamment les réactions deutérium-tritium, deutérium-deutérium, deutérium-hélium-3 et proton-bore-11. Bien que chaque approche spécifique en matière de technologies de fusion corresponde à différents besoins de recherche-développement, certains des domaines généralement utiles en la matière pourraient bénéficier à la plupart des entreprises privées spécialisées dans les technologies de fusion, par exemple pour ce qui est des matériaux de première paroi offrant une plus grande résistance aux rayonnements et du développement de la technologie des couvertures.

[10] Les technologies de confinement magnétique comprennent le tokamak, le tokamak sphérique, le stellaratoret l'héliotron, la configuration à champ inversé, le miroir magnétique, le dipôle en lévitation, la cuspide et les systèmes électrostatiques hybrides.
[11] Les technologies de confinement inertiel comprennent les systèmes de compression par laser et par projectile.
[12] Les technologies de confinement magnéto-inertiel comprennent notamment la compression liquide, la configuration à champ inversé, la striction magnétique axiale, le jet de plasma et les systèmes de fusion inertielle à revêtement magnétisé.

Chaînes d'approvisionnement

Outre les fournisseurs de technologies de fusion, il sera nécessaire de disposer d'une chaîne d'approvisionnement solide dans de nombreux domaines pour permettre la planification, la conception, la construction, la mise en service et l'exploitation d'une centrale à fusion. Si certains de ces domaines sont très spécifiques à la fusion, beaucoup concernent également d'autres secteurs, tels que l'énergie nucléaire, le pétrole et le gaz, l'aérospatiale et la technologie spatiale, ce qui met en concurrence les travailleurs qualifiés et les ressources puisque ces filières exigent également des connaissances spécialisées et des capacités technologiques similaires. Parmi les acteurs potentiels de la chaîne d'approvisionnement dans le domaine de la fusion figurent les fournisseurs de matériaux clés, les fabricants de composants, les sociétés d'ingénierie des centrales, les entreprises générales du bâtiment, les fournisseurs de matériel et les prestataires de services spécialisés et non spécialisés. Compte tenu de l'étendue et de la diversité de cette chaîne d'approvisionnement, il est probable qu'elle soit d'envergure internationale.

La concurrence en matière de main-d'œuvre est un facteur déterminant qui pourrait avoir une incidence sur l'évolution de l'industrie de la fusion. Étant donné que les domaines de la technologie de fusion recoupent de plus en plus d'autres secteurs où il existe une forte demande, il sera primordial de s'assurer les services d'une main-d'œuvre qualifiée et de la conserver. Pour relever ce défi, il faudra mettre en place une planification stratégique de la main-d'œuvre et une collaboration entre les différentes industries afin que le développement de l'énergie de fusion ne pâtisse pas d'une pénurie de personnel doté des compétences et des connaissances spécialisées essentielles.

Photo : Organisation ITER

Organisations internationales

Les organisations internationales jouent un rôle essentiel dans le développement de l'énergie de fusion. Leur participation s'étend aux domaines clés suivants :

- Elles peuvent contribuer à la mise en place de l'infrastructure nécessaire à la recherche-développement sur l'énergie de fusion, comme les installations de recherche, ainsi qu'à celle de l'infrastructure dont les centrales à fusion commerciales auront besoin. Elles contribuent souvent aux projets de recherche, développement et démonstration dans le domaine de l'énergie de fusion en participant à leur financement et en mettant à disposition les ressources nécessaires. Compte tenu des coûts élevés et des longs délais associés au développement de la fusion, la collaboration internationale permet de mettre en commun les ressources de plusieurs pays, ce qui rend possible la réalisation de projets ambitieux.
- Elles facilitent la collaboration entre les pays, les scientifiques et les chercheurs, ce qui permet de mettre en commun les connaissances, le savoir-faire et les résultats de la recherche. Ces efforts en matière de collaboration peuvent contribuer à combler les lacunes dans les connaissances, à accélérer les progrès technologiques et à surmonter les difficultés techniques de manière plus efficace. En outre, la participation accrue des organisations internationales aux efforts de sensibilisation et d'information du public permettra de mieux faire connaître et comprendre l'énergie de fusion, ce qui contribuera à obtenir un soutien plus large du public aux projets qui s'y rapporteront.
- La contribution des organisations internationales pourrait prendre la forme de recommandations de politiques visant à appuyer le développement, le déploiement et l'adoption de l'énergie de fusion. Il peut s'agir, par exemple, de politiques relatives à la coopération internationale, aux mécanismes de financement et aux incitations dans le domaine de la recherche, du développement et de la démonstration.

Organisations à but non lucratif

Les organisations à but non lucratif peuvent jouer plusieurs rôles qui permettront de mesurer l'intérêt du public et de faciliter le débat public dans le cadre du développement et du déploiement de la technologie de fusion. Outre les campagnes générales de sensibilisation, les organisations à but non lucratif peuvent apporter une contribution essentielle aux débats internationaux, nationaux et locaux sur des sujets tels que les changements climatiques, la justice énergétique et l'empreinte environnementale, et permettre aux groupes et aux communautés de faire entendre leurs voix sur ces sujets.

Les organisations commerciales, quant à elles, jouent un rôle fédérateur qui permettra aux entreprises du secteur privé de partager leurs connaissances en vue d'établir des normes communes de performance et, le cas échéant, de parler d'une seule voix aux gouvernements et aux organismes de réglementation sur des questions clés. Elles peuvent également apporter leur contribution en fournissant des informations factuelles, scientifiques et actualisées aux principales parties prenantes, telles que les gouvernements, les organismes de réglementation et le grand public.

6.

Participation du public, sensibilisation et communication

Il est essentiel de montrer clairement que l'énergie de fusion a le potentiel de constituer une solution à long terme pour combattre les changements climatiques et garantir la sécurité énergétique afin d'obtenir l'adhésion du public au développement de cette énergie.

Communication à double sens pour une participation efficace

La meilleure façon d'obtenir l'adhésion du grand public à l'énergie de fusion est d'établir un dialogue avec lui. Cette approche permet aux concepteurs et aux gouvernements, entre autres, de comprendre et de prendre en considération les besoins, les intérêts et les priorités au niveau local, notamment s'agissant de justice énergétique, de justice environnementale et des effets sur l'environnement. En outre, le public peut ainsi apprendre quels sont les risques radiologiques, les technologies et les échéances réalistes du déploiement de l'énergie de fusion. Ces conversations doivent être adaptées aux besoins et aux intérêts du public et doivent faire intervenir des experts crédibles réellement désireux d'y participer, et représentant notamment les gouvernements, l'industrie et les organismes de réglementation. Les dialogues réguliers permettent de faire des ajustements en temps opportun pour répondre aux inquiétudes du public et renforcer son adhésion. À l'inverse, une communication tardive ou qui apparaît comme à simple visée informative ou explicative peut sembler manquer de sincérité si elle ne laisse pas la possibilité d'intégrer la réponse du public.

De nombreux travaux ont été réalisés ces dernières années sur la communication à double sens comme moyen de renforcer l'adhésion du public, et même son enthousiasme [11-13]. En s'appuyant sur ces travaux, les spécialistes de la fusion peuvent emprunter des approches efficaces à d'autres industries, notamment le « permis social » [14], adopté par l'industrie minière et pour les technologies biomédicales ; l'« examen bioéthique » [15-17], appliqué aux technologies biomédicales innovantes ; l'approche axée sur la « recherche et l'innovation responsables » [18-20], qui prend en compte l'avis du public dès les premiers stades de la conception ; et les méthodes de « co-conception » [21], qui rassemblent le public et les experts techniques pour concevoir une technologie conjointement.

Toutes ces approches nécessitent une communication transparente et objective concernant l'énergie de fusion, les progrès et les délais avant son adoption commerciale à grande échelle, les avantages et les problèmes potentiels, et les ressources nécessaires à son développement et à son déploiement. Les avantages de la fusion qui présentent un intérêt pour le public sont notamment sa contribution à la transition vers l'énergie propre, au développement économique, à la satisfaction des besoins des zones défavorisées et de la demande croissante d'énergie et à l'avancée d'autres domaines grâce aux technologies mises au point dans le cadre de la recherche-développement sur la fusion (par exemple les matériaux, les aimants et les technologies des plasmas).

Les problèmes qui présentent un intérêt pour le public concernent la gestion des déchets en comparaison avec d'autres industries et les risques potentiels, notamment les rejets hors site. Il importe de communiquer clairement au sujet des risques qui pourraient se présenter lors du fonctionnement normal et lors d'éventuels incidents et accidents, et d'expliquer les mesures d'atténuation prévues pour limiter ou éviter les conséquences hors site. La transparence et l'intégration de la planification des interventions d'urgence dans les mesures de protection du public, lorsque cela est nécessaire, peuvent rassurer le public et renforcer sa confiance et son adhésion. Par ailleurs, la prudence est de mise quand il s'agit de distinguer la fusion des autres technologies, et également de distinguer les différentes technologies de fusion. Les personnes en charge de la communication doivent éviter de dénigrer par inadvertance d'autres technologies et doivent tenir compte des vues et des approches préférées du public auquel elles s'adressent. En s'exprimant de façon adaptée au contexte, il est possible d'éviter des conséquences involontaires et de donner une bonne indication de la phase de développement en cours (par exemple la phase des expériences, des démonstrateurs, des prototypes et des centrales commerciales).

RÉFÉRENCES

[1] FUSION INDUSTRY ASSOCIATION, The Global Fusion Industry in 2024, FIA, Washington, DC (2024), https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf

[2] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MARITIME INTERNATIONALE, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINE DE LA SANTÉ, PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, Principes fondamentaux de sûreté, nº SF-1 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2007), https://www.iaea.org/fr/publications/7829/principes-fondamentaux-de-surete

[3] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Cadre gouvernemental, législatif et réglementaire de la sûreté, nº GSR Part 1 (Rev. 1) de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2017).

[4] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Direction et gestion pour la sûreté, nº GSR Part 2 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2016), https://www.iaea.org/fr/publications/11109/direction-et-gestion-pour-la-surete

[5] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, COMMISSION EUROPÉENNE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINE DE LA SANTÉ, PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements : Normes fondamentales internationales de sûreté, n° GSR Part 3 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2016), https://www.iaea.org/fr/publications/10810/radioprotection-et-surete-des-sources-de-rayonnements-normes-fondamentales-internationales-de-surete

[6] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Évaluation de la sûreté des installations et activités, nº GSR Part 4 (Rev. 1) de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2017).

[7] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Gestion des déchets radioactifs avant stockage définitif, n° GSR Part 5 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2010).

[8] AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, Déclassement des installations, nº GSR Part 6 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2017).

[9] AGENCE DE L'OCDE POUR L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE, AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE, BUREAU DE LA COORDINATION DES AFFAIRES HUMANITAIRES DE L'ONU, COMMISSION PRÉPARATOIRE DE L'ORGANISATION DU TRAITÉ D'INTERDICTION COMPLÈTE DES ESSAIS NUCLÉAIRES, INTERPOL, ORGANISATION DE L'AVIATION CIVILE INTERNATIONALE, ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE, ORGANISATION INTERNATIONALE DU TRAVAIL, ORGANISATION MARITIME INTERNATIONALE, ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE, ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ, ORGANISATION PANAMÉRICAINE DE LA SANTÉ, PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR

L'ENVIRONNEMENT, Préparation et conduite des interventions en cas de situation d'urgence nucléaire ou radiologique, nº GSR Part 7 de la collection Normes de sûreté de l'AIEA, AIEA, Vienne (2017), https://www.iaea.org/fr/publications/11003/preparation-et-conduite-des-interventions-en-cas-de-situation-durgence-nucleaire-ou-radiologique

[10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of a Graded Approach in Regulating the Safety of Radiation Sources, IAEA-TECDOC-1974, IAEA, Vienna (2021).

[11] HOEDL, S. A., Achieving a social license for fusion energy, Phys. Plasmas **29**(9) (2022) 092506, https://doi.org/10.1063/5.0091054

[12] HOEDL, S. Social acceptance is as important as low costs and net energy production for climate and energy poverty impact, J. Fusion Energ. **42** (2023) 22, https://doi.org/10.1007/s10894-023-00355-x

[13] GUPTA, K., et al. Americans' views of fusion energy: Implications for sustainable public support, Fusion Sci. and Technol. **2024** (2024) 1–17, https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2328457

[14] GUNNINGHAM, N., KAGAN, R.A., THORNTON, D., Social license and environmental protection: Why businesses go beyond compliance, Law & Social Inquiry, **29**(2) (2004), 307–341, https://doi.org/10.1111/j.1747-4469.2004.tb00338.x

[15] UNESCO, National Bioethics Committees in Action, UNESCO, Paris (2010), https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189548?posInSet=1&queryId=a17553d7-2780-4e51-b9d3-a495cecdab90

[16] NUFFIELD COUNCIL ON BIOETHICS, Novel Techniques for the Prevention of Mitochondrial DNA Disorders: An Ethical Review, Nuffield Council on Bioethics, London (2012).

[17] WARNOCK M., et al., Report of the Committee of Inquiry into Human Fertilisation and Embryology, U.K. Department of Health & Social Security, London (1984), https://www.hfea.gov.uk/media/2608/warnock-report- of-the-committee-of-inquiry-into-human-fertilisation-and-embryology-1984.pdf

[18] STILGOE, J., OWEN, R., MACNAGHTEN, P., Developing a framework for responsible innovation, Res. Policy **42**(9) (2013) 1568–1580, https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008

[19] OWEN, R., MACNAGHTEN, P., STILGOE, J., Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society. Sci. Publ. Policy **39**(6) (2012) 751–760, https://doi.org/10.1093/scipol/scs093

[20] BRAND, T., BLOK, V., Responsible innovation in business: a critical reflection on deliberative engagement as a central governance mechanism, J. Responsible Innov. **6**(1) (2019) 4–24, https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1575681

[21] SMITH J.M., Extracting Accountability: Engineers and Corporate Social Responsibility, MIT Press, Cambridge, MA (2021).

PERSONNES AYANT COLLABORÉ À LA RÉDACTION ET À L'EXAMEN DU TEXTE

Abdullah, M. S.	Agence internationale de l'énergie atomique
Allain, J. P.	Département de l'énergie (États-Unis d'Amérique)
Anikeev, A.	Rosatom (Fédération de Russie)
Artisiuk, V.	Agence internationale de l'énergie atomique
Ascic, M.	Agence internationale de l'énergie atomique
Ashraf, S.	Agence internationale de l'énergie atomique
Barbarino, M.	Agence internationale de l'énergie atomique
Becoulet, A.	Organisation ITER
Budaev, V.	Centre national de recherche « Institut Kourtchatov » (Fédération de Russie)
Chapman, I.	Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni (Royaume-Uni)
Clark, T.	Commission de la réglementation nucléaire (États-Unis d'Amérique)
De Caires Watson, D.	Agence internationale de l'énergie atomique
Desai, S.	Helion Energy (États-Unis d'Amérique)
Ellis, T.	Commonwealth Fusion Systems (États-Unis d'Amérique)
Federici, G.	EUROfusion (Allemagne)
Hoedl, S.	Post Road Foundation (États-Unis d'Amérique)
Hole, M.	Université nationale d'Australie (Australie)
Hsu, S.	Département de l'énergie (États-Unis d'Amérique)
Jenko, F.	Institut Max-Planck de physique des plasmas (Allemagne)
Junillon, C.	First Light Fusion (Royaume-Uni)
Ibarra, A.	IFMIF-DONES (Espagne)
Kaneko, T.	Agence internationale de l'énergie atomique
Kumar Ellapan, R.	Institut de recherche sur les plasmas (Inde)
Li, P.	Institut de physique du Sud-Ouest (Chine)
Matsumoto, T.	Instituts nationaux des sciences et technologies quantiques et radiologiques (Japon)
Milnes, J.	Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni (Royaume-Uni)
Oh, Y.	Institut coréen de l'énergie de fusion (République de Corée)
Osakabe, M.	Institut national des sciences de la fusion (Japon)
Poli, E.	Institut Max-Planck de physique des plasmas (Allemagne)
Pussieux, T.	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (France)
Rance, P. J.	Agence internationale de l'énergie atomique
Romanelli, F.	Consortium DTT (Italie)
Shannon, M.	Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni (Royaume-Uni)
Tadjer, D.	Agence internationale de l'énergie atomique
Takeda, S.	Kyoto Fusioneering (Japon)
Wagner, R.	Agence internationale de l'énergie atomique
Yokoyama, M.	Institut national des sciences de la fusion (Japon)

Réunions de consultants

Vienne (Autriche) : 25-29 janvier 2024, 27-29 février 2024, 16-18 avril 2024

Les États ci-après sont Membres de l'Agence internationale de l'énergie atomique :

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

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. L'Agence a son Siège 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 ».

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 (Berne) et révisée en 1972 (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 est soumise à autorisation préalable et habituellement au versement de redevances. Les propositions de reproduction et de traduction à des fins non commerciales sont les bienvenues et examinées au cas par cas. Les demandes doivent être adressées à la Section d'édition de l'AIEA :

Unité de la promotion et de la vente
Section d'édition
Agence internationale de l'énergie atomique
Centre international de Vienne
B.P. 100
1400 Vienne (Autriche) +43 1 26007 22529
Tél. : +43 1 2600 22417
Mél. : sales.publications@iaea.org
www.iaea.org/publications

© AIEA, 2024
Imprimé par l'AIEA en Autriche
Novembre 2024
STI/PUB/2099
https://doi.org/10.61092/iaea.rjb6-m9r0

ÉLÉMENTS CLÉS DE LA FUSION
AIEA, VIENNE, 2024
ISBN 978-92-0-229224-6 (imprimé)
ISBN 978-92-0-229324-3 (pdf)

24-02765F

NOTE DE L'ÉDITEUR

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 leur utilisation.

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

Les orientations et les recommandations fournies dans la présente publication en ce qui concerne les bonnes pratiques répertoriées représentent l'opinion des experts et ne sont pas le fruit d'un consensus entre tous 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 le présent ouvrage et ne peut garantir que le contenu desdits sites est ou demeurera exact ou approprié.

La présente publication intitulée *Éléments clés de la fusion* donne les grandes lignes d'une vision commune pour le développement de l'énergie de fusion. Elle permet d'acquérir une compréhension commune du chemin qui mène de la phase de recherche, développement et démonstration à la commercialisation de l'énergie de fusion, et définit un cadre de collaboration qui permettra de soutenir et de faire progresser les initiatives en la matière à l'échelle mondiale. Elle s'adresse aux scientifiques et aux ingénieurs engagés dans la recherche-développement sur la fusion, aux organismes de réglementation, aux entrepreneurs ou aux parties prenantes qui participent au développement de la technologie de fusion, ainsi qu'aux décideurs.

Agence internationale de l'énergie atomique
Vienne, 2024
www.iaea.org