

COMMENT LEVER DANS UN CADRE EUROPÉEN LES VERROUS TECHNOLOGIQUES DE LA FUSION NUCLÉAIRE EN VALORISANT LES COMPÉTENCES FRANÇAISES

1. Une avancée majeure : ITER, fondement indispensable mais incomplet	3
2. Accélération mondiale et montée en puissance des initiatives privées de développement de la fusion	4
3. Une compétition internationale désormais industrielle	6
4. Une Europe en transition, mais encore fragmentée	7
5. La France : un acteur européen majeur de la fusion nucléaire	8
5.1. Un socle important en fusion	8
5.2. Un déficit stratégique croissant sur la fusion en France	8
5.3. Orientation stratégique proposée	8
5.4. Recommandations prioritaires	9
6. Message stratégique	10
Annexe 1 – Volumetric Neutron Source	11
Annexe 2 – Dynamique internationale de la fusion, hors UE	13
Annexe 3 – Glossaire	16
Annexe 4 – Auteurs et liens d'intérêts	19

Le contrôle de la fusion nucléaire pour la production d'électricité est un objectif poursuivi par de très nombreux pays et de très nombreux scientifiques depuis plus de soixante ans, alors même que sa faisabilité technique et économique reste débattue.

Des avancées très importantes ont été acquises, avec par exemple la démonstration de la maîtrise d'un plasma stable pendant plus de vingt minutes¹ : la limite temporelle ne tient pas à la maîtrise de la stabilité mais à la capacité des systèmes auxiliaires à entretenir la réaction de fusion, qu'ITER viendra confirmer dans la durée. Les développements consacrés à la fusion nucléaire se multiplient avec des budgets fortement croissants, souvent dans le cadre de partenariats public-privé, aux États-Unis², Grande-Bretagne, Allemagne³, Japon, Chine, etc. (voir annexe 2). Ces initiatives visent déjà même pour certaines une commercialisation rapide de centrales de fusion, alors même que certains verrous ne sont pas levés : objectif d'une mise en service en Allemagne d'un démonstrateur électrogène dans les années 2030 et d'une tête de série commerciale dans les années 2040 ; des objectifs commerciaux, encore plus ambitieux voire irréalistes, sont annoncés aux États-Unis.

Dans ce contexte de développements foisonnants, le présent avis ne discute pas le bien-fondé de la poursuite des développements de la fusion nucléaire : ces développements se font et se feront, que la France y participe ou non. Il n'est pas non plus une feuille de route présentant une vision à long terme de la production d'électricité ; l'Académie des technologies a publié en juin 2024 une telle feuille de route « Trajectoire vers un nucléaire durable pour la France »⁴ dont la fusion nucléaire constitue l'une des options pour le système énergétique futur sans pouvoir prétendre au rang de solution de référence sécurisée au regard des incertitudes technologiques, économiques et calendaires encore importantes.

Cette trajectoire devrait être révisée en fonction des développements de la fusion ; mais les incertitudes sur son calendrier et ses coûts ne permettent pas dans l'immédiat de l'inclure dans des scénarios de mix énergétique.

En revanche, cet avis fait le double constat que :

- les objectifs commerciaux proches annoncés vont modifier dans l'avenir le modèle actuel de coopération inter-États avec mise en commun des résultats, tel qu'il prévaut pour ITER ;
- ce qui est d'autant plus regrettable que des verrous technologiques importants, qu'ITER n'a pas vocation à lever, existent notamment dans les domaines de la tenue des matériaux à des fluences et températures très élevées (bien au-delà de celles pratiquées par le nucléaire fission), dans la génération et le cycle *in situ* du tritium, de la récupération de l'énergie thermique. Tant que ces verrous ne sont pas levés, les programmes et projets de fusion en cours échoueront.

C'est pourquoi cet avis propose la participation active au lancement des études de conception, ainsi que la définition du cadre organisationnel, associant acteurs publics et privés dans une coopération européenne (Euratom et Royaume-Uni), d'une source volumétrique de neutrons de haute énergie (*Volumetric Neutron Source* – VNS) telle que la Chine en réalise une. Une telle infrastructure pourra être un élément important du programme fusion d'Euratom⁴ et faire l'objet d'alliances avec le Royaume-Uni et d'autres pays.

1 [CEA Cadarache – 2025 - Fusion nucléaire : le tokamak West bat le record mondial de durée de plasma !](#)

2 Feuille de route gouvernementale du Département de l'Énergie du 9 juin 2026 prévoyant plus de 10 milliards d'investissements privés.

3 [Feuille de route très construite, jusqu'à la commercialisation, publiée par le Gouvernement fédéral et l'Industrie en mai 2026 Technologie-Roadmap - Bundesregierung](#) – Fusion Mai 2026

4 [Proposition de règlement du Conseil établissant le programme de recherche et de formation de la Communauté européenne de l'énergie atomique pour la période 2028-2032](#) ; le texte prévoit un budget de 1,4 G€ pour la période 2028-2032 en addition du budget d'ITER.

Une VNS (voir annexe 1) est l'équivalent d'un réacteur d'irradiation dans la fission nucléaire, comme il y en eût plus de 800 en exploitation dans le Monde⁵ (« réacteurs de recherche ») et de boucles d'essais permettant de qualifier des briques technologiques. La réalisation d'une VNS mettra en œuvre des technologies connues et qualifiées. À terme, son implantation possible sur le site de Cadarache est également à étudier compte tenu des synergies possibles avec ITER. Ce projet permettrait à l'écosystème français dont les compétences sont reconnues internationalement de rester, à frais partagés, associé aux développements futurs de la fusion.

1. Une avancée majeure : ITER, fondement indispensable mais incomplet

La fusion thermonucléaire contrôlée devra franchir une étape décisive avec ITER, et démontrer à l'échelle 1, la maîtrise d'un plasma en combustion. ITER constitue aujourd'hui la référence scientifique et technique mondiale de la fusion nucléaire par confinement magnétique.

La maîtrise de tels plasmas, dans les conditions équivalentes à celles des futures centrales à fusion, de même que l'élaboration et la mise en place d'une réglementation nucléaire dédiée, sont des prérequis pour développer cette future filière. À ce stade, la communauté de la fusion a acquis une compréhension solide et largement validée des mécanismes gouvernant la stabilité et le confinement des plasmas de fusion magnétique, ainsi que des outils de contrôle permettant leur maintien dans des régimes avancés. Les capacités expérimentales et de modélisation actuelles permettent désormais de prédire, piloter et optimiser ces conditions avec un degré de confiance élevé, y compris dans des configurations proches de celles visées pour les futures centrales à fusion. La mission d'ITER dans la prochaine décennie est de documenter en détail les points de fonctionnement stables, à une échelle proche des centrales de production d'énergie, et d'optimiser les outils et algorithmes de contrôle.

L'Académie des technologies souligne néanmoins que la démonstration physique et technique de cette étape cruciale ne peut se confondre avec la maturité technologique nécessaire à l'industrialisation de futures centrales à fusion.

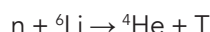
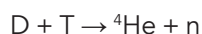
Malgré les progrès attendus, plusieurs verrous critiques subsistent aujourd'hui, principalement liés aux technologies nucléaires de la fusion D-T, et restent à lever par des actions et installations dédiées⁶ :

- résistance des matériaux aux flux neutroniques intenses ;
- maîtrise sur la durée des flux thermiques extrêmes sur les composants faisant face au plasma (divertor, première paroi) ;
- gestion complète du cycle du tritium (production, extraction, sûreté) ;
- maintenance à distance en environnement fortement irradiant ;
- récupération de l'énergie et conversion performante en électricité.

⁵ Research Reactor Database (RRDB) International Atomic Energy Agency - 2026

⁶ Ces verrous sont ceux reconnus par la communauté fusion et listés dans le document « Fusion key éléments » publié par l'AIEA (STI/PUB/2099, ISBN 978-92-0-128324-5 : www.iaea.org/publications/15764/fusion-key-elements)

À noter que les verrous mentionnés ci-dessus sont communs à la plupart des solutions de confinement, magnétique ou inertiel, de la fusion du deutérium-tritium. Par exemple, il n'existe pas actuellement de système démontré à l'échelle capable de générer *in situ* tout le tritium nécessaire au fonctionnement en continu d'une centrale à fusion, suivant le principe de la double réaction sur laquelle elle repose (« cycle du tritium ») :



De même, les matériaux de structure suffisamment résilients au bombardement neutronique n'ont pas encore atteint les niveaux requis par l'opération de futures centrales à fusion, et doivent encore être améliorés et qualifiés pour construire de telles centrales censées fonctionner en continu sur plusieurs décennies.

ITER dans sa conception actuelle ne permettra pas de qualifier pleinement ces technologies à un niveau industriel : les conditions de fluence neutronique et les contraintes d'exploitation resteront limitées dans ITER par rapport à celles des futures centrales.

L'Académie confirme en conséquence qu'ITER est une condition nécessaire, mais non suffisante pour l'émergence de centrales à fusion.

Une étape intermédiaire apparaît indispensable : elle concerne principalement la réalisation d'infrastructures dédiées à la qualification de certaines de ces briques technologiques en conditions représentatives d'une centrale industrielle. À ce titre, une *Volumetric Neutron Source* (VNS, voir annexe 1) constitue un maillon clé, en permettant des essais flexibles, itératifs et à fort niveau de contrainte nucléaire, complémentaires d'ITER.

2. Accélération mondiale et montée en puissance des initiatives privées de développement de la fusion

Le domaine de la fusion connaît une transformation récente et rapide, caractérisée par :

- une montée en puissance des investissements privés (à hauteur de plusieurs dizaines de milliards à l'échelle mondiale sur les cinq années passées) ;
- une diversification des approches technologiques ;
- une ambition très agressive, et très probablement exagérée, dans les calendriers de progression en maturité vers l'industrialisation et la commercialisation.

Cet engouement pour la fusion résulte de la convergence de plusieurs facteurs : les progrès scientifiques et technologiques accumulés depuis plusieurs décennies ont renforcé la crédibilité du domaine, tandis que l'urgence climatique et les besoins futurs en énergie décarbonée ont attiré des investisseurs privés prêts à prendre des risques importants. L'arrivée de ces nouveaux financements a favorisé l'émergence d'un grand nombre d'entreprises explorant des concepts de réacteurs variés, dans l'espoir d'identifier des voies plus rapides ou moins coûteuses que les approches traditionnelles. Dans ce contexte de forte concurrence, les acteurs du secteur affichent souvent des calendriers de développement très ambitieux pour attirer capitaux, talents et partenaires, même si ces échéances sous-estiment fréquemment les défis scientifiques, et les verrous techniques et industriels restant à surmonter.

Cette dynamique introduit une pression temporelle nouvelle, qui modifie profondément le cadre stratégique, en particulier européen. En effet, la stratégie élaborée au moment du démarrage d'ITER, et qui contenait une étape publique de coopération internationale de centrale à fusion de démonstration post-ITER (connue sous le vocable DEMO) est désormais supplantée par une volonté d'industrialisation rapide soutenue par un foisonnement d'initiatives du secteur privé, en parallèle de la fin de la construction et de la mise en service d'ITER.

L'Académie observe toutefois, au regard de l'expérience acquise notamment sur ITER, que certaines « promesses » du secteur privé surestiment largement les niveaux de maturité technologique des différents systèmes d'une machine de fusion.

Dans ce contexte, une VNS apparaît comme une infrastructure charnière permettant de passer plus rapidement de la démonstration de faisabilité (ITER) à une trajectoire industrielle plus crédible, en accélérant la qualification des technologies, principalement nucléaires, critiques et en apportant le niveau de confiance indispensable pour les futurs démonstrateurs industriels.

Dans le domaine des matériaux par exemple, les grands défis de recherche à relever pour les centrales de fusion portent principalement sur le développement de protections de première paroi en composés de tungstène optimisés pour mieux résister à la fragilisation, sur la mise au point, dans le prolongement de l'acier ferritique-martensitique EUROFER97, d'aciers à faible activation conservant une bonne tenue mécanique à plus de 600 °C pour les structures de la chambre à vide et de la couverture, et sur la conception de matériaux spécifiques pour contrôler la corrosion par des composés lithiés pour la production de tritium (lithium, alliage lithium-plomb...) ou encore maîtriser la perméation du tritium dans les systèmes dédiés à son traitement.

En raison du faible facteur de charge lié à sa nature expérimentale, ITER ne pourra tester ces matériaux que dans des conditions d'endurance très inférieures aux niveaux requis pour une centrale de puissance. Notamment, en matière d'irradiation par les neutrons (et en particulier par les neutrons de 14,1 MeV émis par la fusion D-T), les effets sur les matériaux (dommages dus aux déplacements d'atomes (dpa), production d'hydrogène et d'hélium, activation) resteront très limités par rapport aux besoins pour une centrale (typiquement 2 dpa sur la vie d'ITER, à comparer à des valeurs allant jusqu'à 200 dpa pour une centrale).

Quant à elle, l'installation d'irradiation européenne IFMIF-DONES⁷ réalisée en partenariat avec le Japon et dont la construction a débuté sur le site de Grenade en Espagne doit permettre à partir de 2034 de caractériser dans des conditions d'irradiation proches de celles d'une centrale de fusion (pic de flux neutronique autour de 14 MeV) l'évolution des propriétés mécaniques d'une grande diversité de matériaux métalliques et céramiques composites, mais sous la forme de petits échantillons dans un volume expérimental réduit (1 000 échantillons dans ½ dm³). Il en résultera une base de données essentielles pour concevoir les installations qui suivront ITER et pour orienter la recherche de nouveaux matériaux pour la centrale industrielle en exploitant la capacité de prédiction de leurs propriétés en fonction de leur composition et de leur structure par la simulation numérique et l'intelligence artificielle.

Ces essais sur IFMIF-DONES ne pourront cependant pas rendre compte des sollicitations thermomécaniques spatiales et temporelles auxquelles seront soumis de façon simultanée les composants d'une centrale : gradients thermiques liés aux distributions de puissance sur la première paroi (1 à 5 MW/m²) et le divertor (10 à 20 MW/m²), transitoires thermiques associés au contrôle du plasma et le fonctionnement cyclique des tokamaks, gradients radiaux d'irradiation neutronique dans la couverture, contraintes sur les soudures, brasures et autres techniques d'assemblage utilisées pour les composants.

7 IFMIF-DONES : International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented NEutron Source

Seule une installation représentative d'une centrale de fusion en termes de source volumique de neutrons, potentiellement de taille et de puissance réduite par rapport à une véritable centrale de puissance pourrait valider le comportement global sous irradiation des composants mettant en œuvre des matériaux présélectionnés avec IFMIF-DONES. Une telle installation permettrait de plus de valider, bien au-delà des possibilités dans ITER, le choix des matériaux sous d'autres sollicitations telles que l'érosion par le plasma, le vieillissement des structures sous les sollicitations thermomécaniques, et la dégradation des matériaux fonctionnels utilisés pour les revêtements anti-corrosion et les barrières de perméation.

C'est précisément là que la VNS, portée dans une logique de partenariat public-privé et de soutien à la levée des verrous vers l'industrialisation, joue un rôle structurant : elle fournit une plateforme partagée de R&D lourde, difficilement finançable ou mutualisable par un acteur individuel en Europe, tout en offrant un environnement d'essai représentatif indispensable à la crédibilité industrielle des solutions proposées. Elle constitue ainsi un point de convergence entre innovation privée et exigences de qualification publique, permettant d'aligner les développements technologiques sur des référentiels communs, de réduire les incertitudes et d'accélérer la maturation des briques critiques (matériaux - incluant assemblage de matériaux, couvertures tritigènes, composants internes).

Au final, cette complémentarité organisée autour de la VNS permet de sécuriser et d'accélérer la transition vers l'industrialisation de la fusion, en évitant de transférer des risques excessifs vers les démonstrateurs ou les premières centrales, et en créant un *continuum* cohérent entre recherche fondamentale, démonstration expérimentale représentative de la situation industrielle et déploiement industriel.

De plus, l'ensemble de ces recherches et de ces expérimentations pourrait contribuer à stimuler le développement de matériaux nouveaux (métalliques et céramiques composites) à même d'améliorer les performances des réacteurs à fission.

3. Une compétition internationale désormais industrielle

La compétition mondiale s'est profondément transformée : ITER est principalement basé sur une coopération mondiale sur la physique des plasmas, les technologies très spécifiques à la fusion magnétique (aimants, systèmes hyperfréquences, lasers, etc.), et la prise en compte collective de la réglementation nucléaire pour les machines de fusion.

Les nouveaux développements portent désormais sur la maîtrise des technologies de centrales nucléaires de fusion et des chaînes industrielles associées. Ils font donc l'objet d'investissements portés dans une logique plus « nationale » avec des enjeux de propriété intellectuelle sur fond de compétition géopolitique (voir annexe 2) :

- **États-Unis** : stratégie hybride public-privé, forte dynamique start ups, objectif de démonstrateur autour de 2035
- **Japon et Corée** : trajectoires cohérentes, articulation forte entre programmes publics et industriels
- **Royaume-Uni et Allemagne** : stratégies nationales volontaristes, investissements massifs soutenant fortement le secteur privé en partenariat avec le public
- **Chine** : La Chine a adopté une stratégie particulièrement volontariste pour préparer l'après-ITER et la route vers les centrales à fusion, mobilisant simultanément ses grands instituts de recherche, l'Académie chinoise des sciences (CAS), l'industrie nucléaire portée notamment par la CNNC, entreprise étatique, ainsi qu'un

nombre croissant d'acteurs régionaux et privés. Cette approche s'appuie sur une vision intégrée allant de la recherche fondamentale aux démonstrateurs pré-industriels, illustrée par les progrès rapides d'installations telles qu'EAST, BEST, HL-3 et les programmes de réacteurs de démonstration (CFETR notamment). Forte de sa contribution à ITER, d'investissements soutenus, d'une capacité d'exécution remarquable et d'une montée en compétence industrielle continue, la Chine s'impose désormais comme l'un des leaders mondiaux de la fusion magnétique. Elle apparaît aujourd'hui comme un acteur incontournable de la course vers les premières centrales à fusion, capable d'influencer significativement le rythme et les orientations du développement mondial du secteur, mais aussi comme un partenaire scientifique majeur.

La mise en service rapide d'installations nucléaires intermédiaires (telles que la VNS BEST en Chine) traduit assez clairement cette volonté de sécuriser en amont et par secteur les briques technologiques, et la propriété intellectuelle associée, nécessaires à l'industrialisation de la fusion.

4. Une Europe en transition, mais encore fragmentée

L'Europe dispose sur son sol de l'atout majeur de la fusion avec ITER, dont elle est également la principale contributrice (à hauteur de 45 % de la valeur estimée). Ce partenariat avec les États-Unis, la Russie, l'Inde, le Japon, la Chine et la Corée reste unique.

Forte de cet atout, elle peut maintenant engager la route vers l'industrialisation dans une stratégie qui lui permettra de maintenir une position forte dans la compétition mondiale, avec notamment dans un avenir proche :

- le déploiement de IFMIF-DONES, irradiateur neutron de petit volume pour la sélection et la qualification partielle des matériaux ;
- la définition et stabilisation du concept de VNS comme étape intermédiaire majeure, pour atteindre la maturation des technologies évoquées ci-dessus ;
- une évolution vers des schémas de partenariats public-privé dans le cadre d'EURATOM.

La feuille de route européenne, en élaboration actuellement par la Commission européenne, envisage donc de s'enrichir explicitement d'une étape VNS, en partenariat public-privé pour adresser bon nombre des verrous technologiques entre ITER et les centrales à fusion.

Cependant, l'Académie constate également :

- une fragmentation des initiatives, dans et entre les différents pays européens ;
- un affaiblissement du pilotage européen ;
- une faiblesse stratégique, par exemple en termes d'alliance entre l'Union européenne et le Royaume-Uni, ou alors que certains partenaires comme l'Allemagne manifestent ponctuellement une préférence pour des initiatives conduites de manière autonome.

De fait, la compétition intra-européenne s'intensifie, avec des stratégies nationales de plus en plus affirmées, affaiblissant potentiellement un futur mouvement européen ambitieux dans ce domaine.

5. La France : un acteur européen majeur de la fusion nucléaire

5.1. Un socle important en fusion

La France dispose depuis plusieurs décennies d'atouts importants :

- rôle moteur dans la contribution européenne à ITER (site, contributions industrielles et scientifiques) ;
- excellence scientifique et infrastructures de premier plan européen, voire mondial (WEST, Cadarache) ;
- écosystème académique et technologique coopératif et structuré, incluant déjà des initiatives privées émergentes (Renaissance Fusion, GenF, NeutroGen Technologies...).

5.2. Un déficit stratégique croissant sur la fusion en France

L'Académie constate néanmoins :

- l'absence de stratégie nationale fusion explicite post ITER (*i.e.* à l'horizon de la seconde moitié de la prochaine décennie) ;
- une structuration encore insuffisante du tissu industriel fusion ;
- une dynamique nationale globale plus timide et lente que celle des principaux compétiteurs (EU et hors-EU) ;
- une perte de son influence et de son rôle fédérateur sur le programme fusion européen.

Malgré les initiatives récentes, du CEA ainsi que des acteurs privés français (Renaissance Fusion, GenF, NeutroGen Technologies, FireFly Fusion, Dicio Conflatio ...), l'Académie alerte sur un risque réel de décrochage, dans un contexte où les positions internationales se fixent dès maintenant, et où les investissements, publics ou privés, sont considérables.

5.3. Orientation stratégique proposée

L'Académie considère que la France peut prendre un rôle important dans un effort de souveraineté européen pour industrialiser la fusion.

Cela signifie que la France doit :

- se positionner sur une participation au développement d'une VNS européenne, et dans la levée des verrous technologiques mentionnés ci-dessus ;
- participer à la constitution d'un consortium public-privé structurant, capable de piloter stratégiquement puis de mettre en œuvre rapidement et efficacement la stratégie élaborée, en conservant le cadre européen.

5.4. Recommandations prioritaires

À cette fin, et au vu du calendrier européen actuel, l'Académie recommande le positionnement sur les études de conception de la VNS européenne dès 2026 : fenêtre temporelle critique liée au calendrier d'élaboration du programme-cadre EURATOM (2028-2032). Les montants du programme Euratom fusion sont fixés et le contenu est en cours de discussion dès 2026, y compris en ce qui concerne les études de conception d'une VNS :

a) Mise en place d'une gouvernance forte

État – CEA – industriels – acteurs privés, avec une capacité d'arbitrage rapide et une coordination stratégique européenne.

b) Structuration d'un partenariat public-privé ambitieux

Condition indispensable pour la montée en maturité industrielle, et la gestion de la propriété industrielle associée.

c) Étude d'implantation d'une VNS à Cadarache

Objectif : utiliser les synergies avec ITER :

- gestion du tritium ;
- infrastructures existantes ;
- compétences humaines ;
- exploitation et retour d'expérience ;
- optimisation des coûts globaux.

d) Contribution active des équipes disponibles au design européen et aux appels à manifestation d'intérêt

Permettre à la France de jouer un rôle majeur dans la gouvernance européenne.

e) Maîtrise des risques et sécurisation des ressources

Intégrant :

- risques technologiques (matériaux, divertor, supraconducteurs) ;
- calendrier (alignement avec ITER) ;
- tritium et sûreté ;
- financement et modèle économique ;
- ressources humaines et supply chain.

6. Message stratégique

L'Académie formule donc la synthèse suivante :

La fusion nucléaire entre aujourd'hui dans une phase de transition majeure. Après plusieurs décennies essentiellement consacrées à la démonstration scientifique de sa faisabilité, l'enjeu se déplace progressivement vers la maîtrise des technologies permettant à terme une exploitation industrielle durable.

Dans cette évolution, ITER demeure l'infrastructure centrale de référence. Son rôle est de démontrer la maîtrise d'un plasma en combustion à une échelle pertinente pour les futures installations énergétiques. Toutefois, cette avancée décisive ne résout pas à elle seule les verrous technologiques qui conditionnent l'émergence de centrales de fusion : matériaux, cycle du tritium, maintenance en environnement irradiant, qualification des composants et démonstration de leur robustesse sur la durée.

L'Académie considère qu'une étape complémentaire est désormais nécessaire. Une infrastructure de type *Volumetric Neutron Source* (VNS) offrirait à l'Europe l'outil indispensable pour qualifier ces technologies dans des conditions représentatives des futures centrales et accélérer leur maturation industrielle.

Dans un contexte de compétition internationale croissante, les décisions prises au cours de la décennie à venir façonneront durablement la répartition des compétences, des infrastructures, des chaînes industrielles et de la propriété intellectuelle associées à la fusion. L'Europe et la France disposent d'atouts importants pour y jouer un rôle de premier plan, mais cette position ne pourra être préservée sans une stratégie ambitieuse et coordonnée.

Dans cette nouvelle phase :

- la perspective d'industrialisation devient un enjeu ;
- les écarts non- ou mal- gérés entre acteurs européens deviennent problématiques ;
- la capacité d'anticipation stratégique deviendra un facteur clé de succès dans une compétition mondiale qui se met en place.

L'Académie considère qu'une action rapide et coordonnée pour les études de conception d'une VNS européenne est nécessaire dans l'objectif de maîtrise technologique de la fusion, préalable à son industrialisation.

Annexe 1

Volumetric Neutron Source

Une *Volumetric Neutron Source* (VNS) en fusion désigne une installation dédiée à la production contrôlée et intense de neutrons de haute énergie (typiquement ~ 14 MeV, caractéristiques de la réaction deutérium tritium), dans un volume suffisamment étendu et homogène pour reproduire au mieux l'environnement neutronique d'un futur réacteur de fusion. Contrairement à un réacteur visant la production d'électricité, une VNS est avant tout une machine d'irradiation : elle cherche à générer un flux neutronique représentatif des conditions réelles d'une centrale industrielle, sans viser un bilan énergétique positif. Sa mission principale est triple : (i) tester et qualifier les matériaux et composants nucléaires soumis à des fluences élevées (endommagement atomique, production d'hélium, vieillissement), (ii) valider les systèmes de production *in situ* du tritium (« breeding blankets ») afin de démontrer la capacité d'auto alimentation en tritium des réacteurs de fusion, et (iii) réduire les risques technologiques avant l'étape d'industrialisation, en séparant les fonctions « production d'énergie » et « qualification nucléaire » pour accélérer la maturité des technologies. De manière plus générale, une VNS vise à fournir un banc d'essai représentatif pour l'ensemble des aspects nucléaires de la fusion, incluant aussi des usages secondaires tels que la production d'isotopes ou l'étude fine des phénomènes de transport neutronique.

Sur le plan des concepts envisagés, plusieurs approches sont actuellement étudiées. La plus avancée repose sur des tokamaks dédiés de taille intermédiaire, souvent « beam driven », où un plasma à l'équilibre thermique peu auto entretenu est alimenté en continu par des faisceaux de particules neutres afin de produire un flux neutronique stable et contrôlé (typiquement quelques dizaines de MW de puissance de fusion). Ces dispositifs permettent d'obtenir un environnement très proche de celui d'un réacteur tout en restant plus simples et plus flexibles. D'autres variantes incluent des sources plasma-cible, très loin de l'équilibre thermique. Dans les deux cas, on privilégie la robustesse et la disponibilité plutôt que la performance plasma pure. En parallèle, des approches radicalement différentes existent ou ont existé, notamment des sources à accélérateur (type IFMIF/DONES) utilisant des réactions nucléaires induites par faisceau de particules sur une cible de lithium pour générer des neutrons de 14 MeV ; ces solutions offrent *a priori* une grande stabilité de fonctionnement mais sur des volumes très réduits, qui reproduisent mal les conditions volumétriques ou systémiques d'une centrale à fusion. L'enjeu central, dans tous les cas, reste le même : atteindre rapidement des fluences pertinentes (de l'ordre de dizaines de déplacements par atome (dpa)) dans un volume utile significatif, condition indispensable pour qualifier les technologies clés de la fusion dans des délais compatibles avec les feuilles de route internationales.

Parameters	VNS
R_0, a (m, m)	2.55, 0.5
A	5.3
$B_{T,0}$ (T), $B_{T,m}$ (T)	6, 14
I_p (MA), q	1.45, 3.1
k_{95} / δ_{95}	1.5, 0.33
$\langle T \rangle_e$ (keV)	14.8
$\langle n_{e,vol} \rangle (10^{20} m^{-3})$	0.78
Z_{eff}	2.2
Loop Voltage (mV)	< 1
t_{burn} (hrs)	Steady-State
$Beta_N$ (T m/MA)	3.9 %
P_{fus} (MW)	30.4
P_{NBI} (MW), E_{beam} (keV)	40, 120
P_{ECH} (MW),	5
P_{div} (MW)	48
Peak _{NWL} (MW/m ²)	0.57

Illustration du concept typique de la VNS européenne (extrait de G. Federici, Nucl. Fusion 63 (2023) 125002)

Il convient enfin de souligner que la VNS ne relève pas d'un concept à très bas niveau de maturité technologique (TRL). Elle s'appuie, pour ses briques essentielles, sur les technologies déjà largement développées et validées dans les programmes de fusion magnétique (tokamaks, systèmes de chauffage, ingénierie nucléaire associée), ainsi que sur des retours d'expérience significatifs issus d'installations existantes ou en cours de réalisation, dont ITER. En conséquence, les risques de développement portent principalement sur l'intégration, l'optimisation et le dimensionnement à l'échelle pertinente, plutôt que sur des verrous fondamentaux ou des incertitudes de principe.

Annexe 2

Dynamique internationale de la fusion, hors UE**Un paysage mondial en profonde transformation**

La fusion nucléaire connaît aujourd'hui une accélération mondiale marquée par la convergence de plusieurs dynamiques : maturité croissante de certains programmes scientifiques, montée en puissance des investissements privés, volonté de renforcer la souveraineté énergétique et industrielle, et recherche de solutions bas-carbone à long terme.

Cette dynamique s'exprime différemment selon les pays, mais avec une tendance commune : le passage progressif d'une logique centrée sur la démonstration scientifique de faisabilité à une logique davantage tournée vers la préparation de l'industrialisation.

États-Unis

Les États-Unis disposent de l'écosystème de fusion le plus diversifié au monde, combinant :

- un programme public historique de très haut niveau scientifique ;
- des infrastructures majeures dans la fusion magnétique et la fusion inertielle ;
- un secteur privé particulièrement développé, regroupant plusieurs des entreprises les mieux financées du secteur.

La stratégie américaine repose sur une forte complémentarité entre financements publics, capital-risque et grands industriels. Elle vise à accélérer l'émergence de démonstrateurs industriels tout en conservant une large diversité d'approches technologiques.

Les États-Unis constituent aujourd'hui le principal moteur mondial du financement privé de la fusion.

Chine

La Chine conduit une stratégie intégrée de long terme couvrant l'ensemble de la chaîne de développement de la fusion :

- recherche fondamentale ;
- grandes installations expérimentales ;
- démonstrateurs intermédiaires ;
- préparation de futures centrales de démonstration.

Cette approche mobilise conjointement l'Académie chinoise des sciences, l'industrie nucléaire nationale et un nombre croissant d'acteurs industriels et régionaux.

Les programmes EAST, HL-3, BEST et les études associées à CFETR illustrent cette volonté de préparer dès maintenant les étapes post-ITER.

La Chine se distingue particulièrement par sa capacité d'exécution, la continuité de sa stratégie et sa volonté d'intégrer très tôt les dimensions industrielles de la fusion.

Japon

Le Japon demeure l'un des leaders historiques de la fusion magnétique.

Partenaire majeur d'ITER et du programme européen *Broader Approach*, il dispose d'une forte continuité entre recherche publique, industrie lourde et développement des technologies avancées nécessaires aux futures centrales.

L'exploitation du tokamak JT-60SA, réalisée en coopération avec l'Europe, illustre cette stratégie de préparation des régimes opérationnels avancés nécessaires à ITER et aux futures installations industrielles.

Le Japon développe également un écosystème privé en croissance, complémentaire de son programme public.

République de Corée

La Corée du Sud poursuit depuis plusieurs décennies une stratégie cohérente fondée sur :

- le développement de compétences nationales dans les technologies de fusion ;
- l'exploitation du tokamak KSTAR ;
- la préparation du futur démonstrateur KDEMO.

La Corée bénéficie d'une base industrielle particulièrement solide dans les secteurs de la construction lourde, de l'électronique avancée et des infrastructures nucléaires.

Son approche vise à transformer progressivement ses compétences technologiques existantes en capacités industrielles directement mobilisables pour la fusion.

Royaume-Uni

Le Royaume-Uni a développé depuis plusieurs années une stratégie nationale particulièrement visible et ambitieuse dans le domaine de la fusion.

Autour de l'UKAEA et du programme STEP, il cherche à associer :

- recherche publique ;
- développement industriel ;
- participation du secteur privé ;
- développement territorial.

Le Royaume-Uni constitue aujourd'hui l'un des principaux pôles européens de fusion (hors Union européenne) et poursuit une stratégie explicitement tournée vers les applications industrielles futures.

Allemagne

L'Allemagne a récemment renforcé son positionnement dans la fusion à travers une combinaison :

- d'excellence scientifique historique ;
- d'instituts de recherche fortement structurés ;
- d'une politique nationale affirmée ;
- d'un écosystème privé en forte croissance.

Le pays soutient simultanément plusieurs approches technologiques, notamment autour des tokamaks, des stellarators et de la fusion inertielle.

L'émergence d'entreprises privées allemandes parmi les plus visibles du secteur illustre cette évolution vers une logique davantage orientée vers l'industrialisation.

Autres acteurs internationaux

D'autres pays développent également des programmes significatifs :

- **Canada**, avec plusieurs entreprises innovantes soutenues par des investissements privés importants ;
- **Inde**, partenaire majeur d'ITER et disposant d'une industrie nucléaire et de compétences scientifiques considérables ;
- **Russie**, acteur historique de la fusion magnétique et concepteur de plusieurs concepts fondamentaux encore utilisés aujourd'hui ;
- **Australie**, où émergent plusieurs initiatives privées innovantes ;
- **Israël**, qui développe un écosystème technologique de haute intensité dans plusieurs segments de la fusion.

Enseignements pour l'Europe

Malgré des approches nationales différentes, plusieurs tendances convergentes apparaissent :

- montée en puissance des partenariats public-privé ;
- concepts d'installations intermédiaires entre ITER et les futures centrales ;
- volonté de sécuriser les compétences industrielles stratégiques ;
- attention croissante portée aux questions de matériaux, de tritium, de maintenance et de qualification nucléaire ;
- recherche d'un avantage concurrentiel fondé sur la propriété intellectuelle et la maîtrise des chaînes de valeur.

Dans ce contexte, les infrastructures de qualification technologique, telles qu'une future VNS européenne, apparaissent comme un élément potentiellement structurant pour maintenir la compétitivité de l'Europe dans l'objectif d'industrialisation future de la fusion.

Annexe 3

Glossaire

BEST (*Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak*) – Projet chinois de tokamak supraconducteur destiné à préparer l’après-ITER. BEST vise notamment à tester dans des conditions proches d’une centrale plusieurs technologies nécessaires à l’exploitation de réacteurs de fusion de nouvelle génération. Mise en service prévue en 2028.

Breeding Blanket (couverture tritigène) – Système entourant le plasma dans une centrale de fusion et destiné à produire du tritium à partir du lithium sous l’effet des neutrons de fusion. Il permet théoriquement l’auto-alimentation du réacteur en combustible tritium.

Broader Approach (BA) – Accord de coopération entre Euratom et le Japon, complémentaire d’ITER, destiné à développer les connaissances, les outils de simulation, les matériaux et les infrastructures expérimentales nécessaires aux futures centrales à fusion. Il comprend notamment JT-60SA, IFERC et les activités précurseurs d’IFMIF-DONES.

CFEDR (*China Fusion Engineering Demonstration Reactor*) – Projet chinois de centrale de démonstration destiné à préparer les futures centrales de fusion commerciales. Il constitue une étape intermédiaire entre les dispositifs expérimentaux et les centrales industrielles. Études en cours, site sélectionné.

Confinement magnétique – Méthode de confinement d’un plasma de fusion à très haute température à l’aide de champs magnétiques intenses. Les tokamaks constituent aujourd’hui la principale approche de confinement magnétique.

Cycle du tritium – Ensemble des processus permettant de produire, récupérer, purifier, stocker et recycler le tritium nécessaire au fonctionnement continu d’une centrale de fusion D-T (deutérium-tritium).

D (Deutérium) – Isotope lourd de l’hydrogène contenant un proton et un neutron. Constitue, avec le tritium, le principal combustible des réacteurs de fusion en développement.

DEMO (*Demonstration Power Plant*) – Programme de Recherche et Développement et concept historique de centrale de démonstration post-ITER prévue dans la feuille de route fusion européenne telle que définie au début des années 2000. Son objectif est de démontrer la production nette d’électricité à partir de la fusion avant le déploiement commercial.

Divertor – Composant interne du réacteur chargé d’évacuer directement les particules et la chaleur issues du plasma. Il est soumis aux flux thermiques les plus élevés de toute l’installation de fusion.

DPA (*Displacements Per Atom*) – Indicateur quantifiant l’endommagement des matériaux sous irradiation neutronique. Il correspond au nombre moyen de déplacements d’atomes dans un matériau causés par l’impact des neutrons.

DT ou D-T (Deutérium-Tritium) – Réaction de fusion entre un noyau de deutérium et un noyau de tritium produisant un noyau d’hélium et un neutron de haute énergie (14,1 MeV). C’est aujourd’hui la réaction de référence pour les futurs réacteurs de fusion magnétiques.

EAST (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak*) – Tokamak supraconducteur chinois de taille moyenne (identique à celle de WEST) ayant réalisé plusieurs records mondiaux de durée de plasma. Il constitue l’une des installations majeures actuelles du programme fusion chinois.

EUROFER97 – Acier ferritique-martensitique à faible activation développé spécifiquement pour les applications de fusion. Il est actuellement la référence européenne pour les structures exposées aux neutrons de fusion.

EURATOM (Communauté européenne de l'énergie atomique) – Organisation européenne coordonnant notamment le programme de recherche sur la fusion nucléaire et le co-financement des infrastructures associées.

Fluence neutronique – Quantité totale de neutrons reçue par une surface ou un matériau au cours du temps. Elle caractérise l'intensité cumulée de l'irradiation subie par les composants nucléaires.

Fusion thermonucléaire contrôlée – Processus visant à reproduire sur Terre les réactions de fusion qui alimentent les étoiles, dans des conditions contrôlées permettant une production d'énergie exploitable.

HL-3 – Tokamak avancé chinois destiné à préparer les futures étapes du programme fusion national, complémentaire des installations EAST et BEST.

IFMIF-DONES (International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented NEutron Source) – Installation européenne de test des matériaux basée sur une source neutronique générée par accélérateur.

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) – Projet international de démonstration scientifique de la fusion par confinement magnétique. Sa mission est de démontrer la faisabilité intégrée à l'échelle 1 et la maîtrise d'un plasma en combustion et d'établir les bases scientifiques de la fusion énergétique.

MeV (Mégaelectronvolt) – Unité d'énergie utilisée en physique nucléaire. Les neutrons issus de la réaction D-T possèdent une énergie caractéristique de 14,1 MeV.

Perméation du tritium – Migration du tritium à travers les matériaux. Sa maîtrise est essentielle pour limiter les pertes de combustible et garantir la sûreté des installations de fusion.

Plasma – Gaz ionisé constitué d'ions et d'électrons libres. C'est l'état de la matière dans lequel se produisent les réactions de fusion thermonucléaire.

Plasma en combustion (Burning Plasma) – Régime dans lequel l'énergie produite par les particules alpha (noyaux d'hélium) issues des réactions de fusion contribue de manière significative au maintien de la température du plasma. C'est l'objectif scientifique central d'ITER.

Première paroi (First Wall) – Surface interne du réacteur directement exposée au plasma. Elle doit résister simultanément aux flux thermiques extrêmes et à l'irradiation neutronique.

Supraconducteur – Matériau capable de transporter un courant électrique sans résistance. Les grands tokamaks modernes utilisent des aimants supraconducteurs pour générer les champs magnétiques de confinement du plasma.

Tokamak – Configuration de confinement magnétique en forme de tore utilisant des champs magnétiques puissants pour confiner un plasma de fusion. Il s'agit de la technologie de référence pour ITER et la plupart des grands programmes fusion mondiaux.

T (Tritium) – Isotope radioactif de l'hydrogène contenant un proton et deux neutrons. Associé au deutérium, il constitue le combustible principal des réacteurs de fusion D-T.

TRL (Technology Readiness Level) – Échelle de maturité technologique utilisée pour évaluer le niveau de développement d'une technologie, depuis le concept jusqu'au déploiement industriel.



VNS (Volumetric Neutron Source) – Installation dédiée à la génération de neutrons de fusion dans un volume représentatif d'une future centrale. Son rôle principal est la qualification des matériaux, des composants nucléaires et des couvertures tritigènes préalable à l'industrialisation de la fusion.

WEST (W Environment in Steady-state Tokamak) – Tokamak français exploité à Cadarache, anciennement appelé Tore Supra, dédié à l'étude des composants plasma-face sous conditions représentatives des futures centrales de fusion et d'ITER.

14,1 MeV Neutrons – Neutrons de haute énergie produits par la réaction de fusion deutérium-tritium. Ils sont responsables à la fois de la production de tritium et de l'endommagement des matériaux de structure.

Annexe 4

Auteurs et liens d'intérêts

Le groupe de travail était composé de :

- Bécoulet ALAIN, Académie des technologies, directeur scientifique d'ITER ;
- Iracane DANIEL, Académie des technologies, sans lien d'intérêt ;
- Vignon DOMINIQUE, Académie des technologies, sans lien d'intérêt ;
- Carré FRANCK, Expert invité, sans lien d'intérêt ;
- Grunblatt GÉRARD, Académie des technologies, sans lien d'intérêt ;
- Ledermann PATRICK, Académie des technologies, sans lien d'intérêt.

Un lien d'intérêt est un lien actuel ou passé susceptible d'influencer les argumentations et les positions du contributeur à un rapport ou avis. C'est l'auteur, sous sa seule responsabilité, qui déclare l'absence de lien d'intérêt ou au contraire qui révèle son existence ; un contributeur peut avoir plusieurs liens d'intérêt.

Ce document ne reflète ni n'engage l'opinion de l'Organisation Internationale ITER, dont l'auteur est membre .