

DÉVELOPPEMENT DE L'ÉNERGIE DE FUSION - VISION DU RÔLE DE LA FRANCE EN EUROPE

Communication à l'Académie des technologies
d'Alain Bécoulet¹, membre de l'Académie des technologies

Introduction	2
Éléments de contexte européen	4
Synergies	5
Éléments de chiffrages	6
Études de site	6
Éléments de calendrier	6
Désignation d'une équipe projet nationale pour préparer le futur de la fusion	7
Concurrence	7
Conclusion	7
Annexes	8

Synthèse

Dans un écosystème de la fusion en pleine recomposition, porté par une dynamique internationale soutenue, l'essor rapide d'infrastructures expérimentales et l'émergence de partenariats public privé, il devient nécessaire de redéfinir sans délai la place que la France souhaite occuper, tant au niveau européen que dans le contexte particulier d'ITER, qui demeure la référence scientifique et technologique mondiale et a concentré jusqu'ici l'essentiel de l'attention.

Le présent document propose, dans cette perspective, une vision structurante ainsi que des orientations stratégiques pour guider l'action française.

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

Cette vision s'appuie sur un paradoxe désormais largement reconnu, et rappelé dans le document stratégique de l'AIEA (*Key Fusion Elements*) comme par les principaux acteurs publics : malgré la progression d'ITER, la coordination internationale des efforts et l'intérêt considérable suscité par l'initiative privée mondiale, la fusion n'est pas encore prête à entrer dans une phase d'industrialisation.

Si la mission d'ITER consiste bien à démontrer la faisabilité intégrée d'une installation de fusion magnétique à l'échelle 1, ainsi qu'à lever de nombreux verrous technologiques dans l'objectif d'un futur réacteur de fusion, plusieurs briques technologiques essentielles demeurent insuffisamment matures pour permettre la réalisation de réacteurs électrogènes. Pour lever ce verrou, et compléter les apports d'ITER, des plateformes expérimentales dédiées, flexibles et mutualisées, sont nécessaires pour accélérer la maîtrise des technologies nucléaires propres aux réacteurs de fusion (tenue des matériaux sous irradiation par des neutrons de haute énergie, régénération et cycle du tritium, récupération de l'énergie de fusion et production de puissance utilisable...). Une installation de cette nature (appelée de façon générique *Volumetric Neutron Source* (VNS)) apporterait un degré de confiance supplémentaire dans la capacité d'atteindre les performances visées pour la première démonstration de réacteur de fusion.

Dans le contexte actuel, la mise en œuvre d'une telle infrastructure requiert des partenariats public-privé ambitieux, ainsi qu'un renforcement substantiel des compétences et des ressources humaines dédiées à la fusion.

Dans ce cadre, l'auteur considère que la France dispose des atouts scientifiques, industriels et territoriaux pour assumer un rôle moteur au sein de la dynamique européenne. Une option structurante consisterait à proposer un positionnement scientifique et technique central, voire envisager l'option d'implantation sur un site tel que celui du CEA à Cadarache, d'un projet européen de VNS porté par un consortium public-privé à gouvernance renforcée. Une telle approche permettrait la mobilisation de ressources nouvelles, une cohérence forte avec ITER, et la consolidation du leadership européen.

La fenêtre 2026-2027 d'élaboration du prochain plan-cadre EURATOM constitue, de ce point de vue, une opportunité stratégique unique qui appelle une mobilisation rapide et coordonnée de l'ensemble des acteurs nationaux concernés.

Introduction

La filière de l'énergie de fusion aborde aujourd'hui une étape décisive de son développement. Alors que la perspective d'une industrialisation se précise, la qualification en conditions représentatives de plusieurs technologies clés demeure un prérequis incontournable : choix et comportement des matériaux, gestion de la puissance thermique sur les composants les plus exposés (divertor et 1^{er} paroi), maîtrise du cycle du tritium, gestion de l'énergie de fusion et conversion en puissance électrique.

ITER reste, à cet égard, la pierre angulaire du dispositif international et l'intégrateur indispensable pour une démonstration de faisabilité à l'échelle du réacteur. Toutefois, il devient manifeste que la maturation technologique d'un ensemble de composants et de procédés essentiels requiert des moyens humains supplémentaires et des infrastructures de tests complémentaires, spécialement conçues pour des campagnes d'essais flexibles et itératives. Ce type d'installation, couramment désignée sous le nom de *Volumetric Neutron Source* (VNS), est aujourd'hui identifié comme un maillon critique, au niveau de flexibilité, de flux et de performance nécessaire pour qualifier de manière ciblée les verrous technologiques persistants, et de soutenir ainsi, de manière cohérente et structurée, la mission phare d'ITER.

Les verrous technologiques principaux sont très largement liés aux aspects « nucléaires » génériques de la fusion deutérium-tritium, et ne sont pas spécifiques du mode de confinement (magnétique ou inertiel) :

- **Matériaux résistants aux conditions extrêmes**

Le flux intense de neutrons à haute énergie et d'autres particules générées lors des réactions de fusion soumet les matériaux structurels à des conditions d'irradiation extrêmes. Même si des recherches sont en cours au niveau fondamental, qualifier de tels matériaux capables de mieux résister à ces conditions tout en conservant leur intégrité structurelle est une priorité pour permettre la viabilité commerciale de la fusion. Ces matériaux doivent également être compatibles avec le maintien de la pureté du plasma, ainsi qu'avec les environnements sévères de flux de chaleur, de rayonnement et de vide à l'intérieur de la machine de fusion. Les sollicitations des matériaux par le confinement magnétique sont renforcées dans le cas d'utilisation d'aimants supraconducteurs haute température pour réduire les dimensions d'un réacteur de fusion.

- **Cycle du combustible au tritium**

Le tritium, isotope radioactif de l'hydrogène, est une composante indispensable du combustible des réacteurs de fusion D-T. Du fait de sa rareté dans la nature et de sa période de décroissance relativement courte (12 ans), il est nécessaire de développer des techniques efficaces de production et d'extraction du tritium pour amorcer et entretenir les réactions de fusion D-T dans un réacteur de puissance. Une attention toute particulière doit être portée à la gestion du tritium pour la filière de réacteurs de fusion qui utilisera le combustible D-T.

- **Évacuation de l'énergie déposée sur les composants les plus exposés**

L'un des principaux défis dans la conception des machines de fusion est la gestion de la chaleur et des particules évacuées par le plasma. Les conditions extrêmes de densité de puissance prévues dans les machines de fusion représentent des défis d'ingénierie majeurs pour les matériaux faisant face au plasma (1^{er} paroi, divertor...), les techniques de refroidissement, la conception des composants, etc. Faire progresser la recherche sur des régimes plasmiques adaptés demeure un programme expérimental clé à cet égard.

- **Manutention à distance pour la maintenance**

Les centrales de fusion fonctionnent dans des environnements hostiles, inaccessibles aux opérateurs humains. Par conséquent, les tâches de maintenance et de réparation doivent être effectuées à distance à l'aide de systèmes robotiques avancés. Les efforts de développement doivent se concentrer sur la mise au point de ces systèmes de manutention à distance pour les applications de production d'énergie par fusion.

- **Récupération de l'énergie de fusion, conversion, et production de puissance électrique**

L'énergie générée à l'intérieur de la chambre de réaction et dans les couvertures qui l'entourent doit être extraite efficacement puis convertie en électricité par des composants et systèmes assez fiables pour assurer une disponibilité du réacteur de niveau industriel.

Le rôle d'ITER dans le développement et la maturation des verrous technologiques de la fusion mérite ici d'être clairement rappelé. Ni son design, ni son programme scientifique n'ont été conçus pour porter ces briques technologiques à un niveau de maturité industriel. ITER demeure avant tout une étape expérimentale d'intégration globale, destinée à démontrer la faisabilité physique et opérationnelle d'une machine de fusion magnétique à l'échelle 1.

Les matériaux structuraux et ceux exposés au plasma doivent supporter les environnements extrêmes caractéristiques de la fusion (flux intenses de neutrons, de particules et de chaleur). Toutefois, les fluences auxquelles ils seront soumis dans ITER resteront très inférieures aux niveaux qui devront être atteints dans les réacteurs industriels appelés à fonctionner de manière fiable avec un haut facteur de charge.

Dès lors, il devient explicite qu'un certain nombre de technologies essentielles ne pourront être validées dans ITER et nécessitent des environnements d'essai dédiés, flexibles et capables de reproduire des conditions représentatives des futures installations électrogènes.

Éléments de contexte européen

Dans la perspective de son prochain plan-cadre EURATOM (2028–2032/34), l'Union européenne envisage de compléter l'écosystème constitué par ITER, auquel elle contribue à hauteur de 45 %, par l'irradiateur de matériaux DONES, actuellement en construction à Grenade (Espagne), et par une installation dédiée à l'acquisition de la maîtrise des technologies nucléaires requises pour le réacteur électrogène de démonstration.

Cette installation dédiée, appelée de façon générique *Volumetric Neutron Source* (VNS), prendrait la forme d'un tokamak de taille moyenne, comparable à JET, opérant un plasma deutérium-tritium maintenu par un chauffage externe robuste, de type injection de neutres à ions positifs. Il convient de souligner que le concept n'en est aujourd'hui qu'au stade pré-conceptuel : plusieurs choix technologiques fondamentaux, tels que le recours éventuel à des supraconducteurs à haute température, restent ouverts et devront être tranchés lors d'études de conception plus avancées.

La finalité première d'une telle installation serait de fonctionner dans des conditions nucléaires représentatives des futurs réacteurs de fusion : fluence neutronique élevée, gestion du tritium, et flux de chaleur intenses aux parois, sans objectif de performance fusion. Ces environnements sont indispensables pour qualifier, de manière accélérée et crédible, les technologies critiques destinées aux démonstrateurs industriels.

L'installation VNS s'inscrit, par nature, dans une complémentarité étroite avec ITER, et ce à plusieurs niveaux. Tout d'abord, l'Union européenne garantit un financement prioritaire et sanctuarisé pour ITER, sans possibilité de fongibilité avec les autres volets du programme fusion. Le développement d'une VNS doit donc être envisagé comme un effort additionnel : complémentaire, cohérent, mais distinct.

Par ailleurs, une VNS mise en service selon un calendrier aligné sur les phases nucléaires d'ITER (c'est-à-dire dès le début des années 2040) pourrait compléter les démonstrations technologiques, voire contribuer à réduire certains risques associés au programme. En satisfaisant notamment une partie des exigences en matière de fluence neutronique requises, elle pourrait également accélérer certaines démonstrations dans ITER. Un tel couplage offrirait ainsi une opportunité supplémentaire de maîtrise des coûts globaux du programme ITER. Le programme d'essais des concepts de couvertures tritigènes, en particulier, pourrait être optimisé et accéléré grâce à cette articulation : les campagnes menées sur la VNS offriraient même un retour d'expérience précieux, susceptible de réduire les durées et donc le coût d'exploitation d'ITER au cours de sa phase DT2, caractérisée par des fluences élevées. Tout ceci nécessite bien entendu une documentation conjointe précise lors de la phase d'avant-projet.

Ainsi, ITER et la VNS doivent être envisagés comme deux infrastructures complémentaires, pensées pour accompagner l'Union européenne vers l'industrialisation du procédé de fusion. Dans le contexte de la dynamique mondiale actuelle, EURATOM entend d'ailleurs promouvoir un partenariat public-privé pour le développement d'une VNS. Il s'agit à la fois de partager les coûts et les risques, mais également de structurer et renforcer le tissu industriel européen déjà mobilisé autour d'ITER, condition essentielle pour préparer l'entrée de l'Union dans l'ère des démonstrateurs puis des premiers réacteurs.

Synergies

La vision décrite ici consiste donc à encourager la France à participer activement à la VNS, comme installation européenne, via un consortium public-privé ad-hoc, ce qui aurait les avantages suivants :

- **Continuité stratégique, valoriser et développer les compétences déjà acquises avec ITER**

Au sein de l'Union européenne, membre principal d'ITER, la France est un partenaire majeur du projet, mais dont le programme national n'a pas encore pris la mesure des étapes suivantes à franchir en direction des réacteurs. Dans le cadre plus large de la relance du nucléaire, la VNS serait un atout de poids pour valoriser et/ou développer ses forces scientifiques et techniques acquises autant en physique et technologies des plasmas (confinement, chauffage, supraconducteurs, diagnostics et contrôles, 1^{er} paroi...) qu'à travers son expérience des systèmes nucléaires (sûreté, évacuation de puissance, gestion du tritium, démantèlement et traitement des déchets radioactifs...).

- **Valorisation des investissements et engagements passés**

Dans la continuité des activités du CEA et de l'accueil d'ITER, la France et la Région Sud ont investi, et continueront ainsi d'investir, dans le développement économique de la vallée de la Durance autour des énergies (recherche, réseaux, établissements de formation, pôles d'activités, etc.).

Par ailleurs, par traité, la France assume la responsabilité ultime de la mise à l'arrêt définitif et de la déconstruction du projet ITER, ce qui implique la conception et la mise en œuvre des procédés associés.

Dans le cas où l'Europe choisirait l'implantation de la VNS à proximité immédiate d'ITER, cela ouvrirait même des perspectives significatives de mutualisation, permettant ainsi de réduire les coûts relatifs, notamment pour les opérations liées à la gestion du tritium.

- **Synergies et retour d'expérience d'ITER, initiatives privées et verrous technologiques**

Les enseignements tirés de la construction d'ITER conduisent aujourd'hui l'Organisation Internationale à une extrême prudence face à la surenchère du secteur privé observée autour des promesses d'industrialisation de la fusion (cf. communication du Directeur général d'ITER lors de la *Fusion Energy Conference* de l'AIEA, Chengdu, Chine, octobre 2025). L'effort supplémentaire à consentir sur les verrous technologiques restants et sur la sûreté des installations de fusion est donc devenu un enjeu majeur d'action et de communication.

À noter que certains projets privés se positionnent également sur des innovations notables sur d'autres aspects. La France est notamment déjà engagée dans les supraconducteurs à haute température (avec Renaissance Fusion, et le PEPR SupraFusion) qui apportent des marges intéressantes, ou les développements de lasers de puissance à hauts rendement et répétitivité indispensables à la fusion inertielle (GenF). Avec Neutrogen Technologies, la France a également un nouvel embryon très aligné à la vision proposée autour du combustible fusion.

Éléments de chiffrages

Au sein du prochain plan cadre européen de recherche Horizon Europe 2028-2034, et plus précisément de son volet EURATOM, s'étalant sur 2028-2032 et qui couvre les activités fusion, le coût total du programme (incluant les activités pour la VNS) évoqué à ce stade est d'environ 1.4 Mrd €². C'est une augmentation significative par rapport au plan cadre actuel. Les budget et calendrier de conception et de construction de la VNS sont étudiés dans le cadre de l'étude de faisabilité (« *engineering cost and schedule* ») actuellement en phase pré-conceptuelle / de faisabilité initiale (*conceptual, neutronics and shielding scoping, divertor design*). À retenir à ce stade, les ordres de grandeurs suivants :

- **Timing** : dessin conceptuel 2026-2027 ; avant-projet sommaire 2028-2030 ; avant-projet détaillé final 2032 licensing et construction 2033-2040 ; commissioning et opération à partir de 2040.
- **Coûts** (de l'option étudiée actuellement) : design (estimé actuellement à 35M€ pour les études conceptuelles et 250 M€ pour le dessin détaillé) ; construction 3 Mrd€ ; Opération : 300 M€/an.

À noter donc que les chiffres évoqués n'impacteront le plan cadre EURATOM 2028-32 que via les phases de design.

Études de site

La Commission européenne, par l'intermédiaire de la Direction générale Recherche et Innovation (DG-RTD), étudie actuellement l'opportunité de lancer un appel à manifestation d'intérêt pour l'implantation de la future installation VNS. Dans cette perspective, la réalisation rapide d'une étude préliminaire de site pour le centre de Cadarache apparaît opportune.

Une telle analyse permettrait d'évaluer, de manière objective et documentée, les contraintes techniques, environnementales et réglementaires associées à une éventuelle implantation de la VNS sur le site. Elle viserait également à examiner la compatibilité de cette infrastructure avec les installations existantes, en particulier au regard des capacités d'accueil, des interfaces scientifiques et technologiques, et des synergies avec ITER.

Alternativement, une recherche d'alliance avec d'autres pays à même d'accueillir la VNS doit être envisagée.

Ces démarches précoces contribueraient à positionner la France comme un acteur proactif dans le processus européen de sélection et à éclairer, en temps utile, les décisions stratégiques à venir.

Éléments de calendrier

Le calendrier est contraint pour deux raisons principales :

- **L'alignement du fonctionnement de la VNS** avec les jalons majeurs d'ITER³, dans un contexte international marqué par une forte dynamique et une compétition accrue,
- **La fenêtre d'opportunité des années 2026-2027**, correspondant à l'élaboration du contenu et des modalités du prochain plan-cadre EURATOM, ainsi qu'au dessin conceptuel de la VNS.

2. Les chiffres mentionnés à ce stade et dans cette note sont provisoires et non consolidés. Il convient de rappeler que le programme-cadre EURATOM constitue un volet spécifique dédié au nucléaire au sein du programme-cadre européen de recherche. Son budget est établi sur des périodes de cinq ans, auxquelles s'ajoutent deux années supplémentaires afin de tenir compte des différences entre les traités de l'Union européenne et d'EURATOM.

3. La nouvelle baseline d'ITER prévoit un démarrage des opérations scientifiques immédiatement après la mise en service intégrée prévue vers 2033 et les opérations nucléaires avant la fin de la décennie 2030.

Désignation d'une équipe projet nationale pour préparer le futur de la fusion

Compte tenu de la complexité, de l'ampleur et des contraintes calendaires du projet, si la France veut contribuer significativement à la VNS, que ce soit scientifiquement et techniquement et/ou en proposant un site, il semble indispensable i) qu'elle s'implique de manière volontariste dans le dessin conceptuel de cette installation (en cours au sein de l'équipe EUROfusion) et ii) qu'elle constitue rapidement une équipe de gouvernance (État-CEA-industriels-partenaires) dotée des moyens d'agir efficacement avec toutes les parties prenantes, garantissant la cohérence stratégique et la réactivité des décisions, et chargée (notamment) de :

- Arbitrer les priorités nationales et l'allocation des ressources.
- Préciser le plan tritium : besoins, approvisionnements, stockage, comptabilité, effluents, déchets, acceptabilité sociétale.
- Sécuriser la tenue du calendrier (interfaçage précis avec ITER et EURATOM) et le tour de table partenarial. Structurer le partenariat public-privé.
- Documenter la maîtrise des risques (techniques, sûreté, approvisionnement tritium, supply chain)⁴.
- Identifier les work packages VNS à leadership français, préparer la réponse à un éventuel appel à manifestation d'intérêt DG-RTD, et positionner la France sur la gouvernance paneuropéenne.
- Définir et faciliter les canaux de communication et de décision institutionnels.
- Garantir la transparence (reporting, qualité, audits), la conformité et l'acceptabilité.

Concurrence

Comme décrit dans le rapport AIEA (*IAEA world fusion outlook 2025*), il existe une forte concurrence notamment aux États-Unis (secteur privé surtout) et en Chine.

Par exemple en Chine l'installation BEST, machine avec beaucoup de caractéristiques d'une VNS, est en construction avec un démarrage prévu dès 2027-28 (*Institute of Plasma Physics* de l'Académie des Sciences).

Au niveau européen, le positionnement des pays n'est pas encore connu, et donc doit faire l'objet d'une étude spécifique.

Conclusion

La VNS constitue l'outil européen manquant principal pour tester en vue de valider et qualifier des technologies critiques de la fusion en Europe. En plus de son expérience d'exploitation d'installations nucléaires industrielles et expérimentales, la France offre des garanties réelles d'expertise scientifique et industrielle, d'intégration, de sûreté et de mutualisation avec ITER, au bénéfice de l'avenir français et européen de la fusion.

Une action immédiate conditionne la réussite : la désignation d'une équipe de pilotage et de gouvernance forte pour sécuriser la fenêtre EURATOM 2026 2027 et l'émergence d'un consortium public privé.

4. Parmi les risques identifiables d'un tel projet, on doit évaluer rapidement : **R1 – Technique/design** : maturité insuffisante des technologies clés (matériaux, divortor, chauffage par injection de neutres (NBI), supraconducteurs à haute température (HTS) éventuels) et **VNS** encore au stade pré conceptuel ; probabilité élevée, impact très fort ; **R2 – Calendrier couplé à ITER** : asynchronisme possible VNS↔ITER réduisant la valeur des retours d'expérience/fluences ; probabilité moyenne, impact très fort ; **R3 – Licensing & tritium** : réglementation, inventaires, procédés, sûreté/acceptabilité ; probabilité moyenne, impact très fort ; **R4 – Financement et modèle PPP** : structure de financement multi sources et partage de risques non définis ; probabilité moyenne, impact fort ; **R5 – Ressources humaines** : tensions sur compétences rares et montée en charge rapide ; probabilité élevée, impact fort ; **R6 – Interface site** : compatibilité avec infrastructures existantes (Cadarache), contraintes environnementales et réglementaires ; probabilité moyenne, impact fort.

Annexes

Fusion magnétique (tokamak & stellarator)

En France, la recherche sur la fusion mobilise un écosystème relativement complet: le **CEA IRFM**, d'autres départements du **CEA** (matériaux, sûreté, cycle tritium), les laboratoires du **CNRS** et plusieurs universités (Aix, Marseille, Grenoble, Paris Saclay, etc.). Le CEA IRFM exploite **WEST** (ancien Tore Supra), héritier d'une tradition française pionnière. Tore Supra fut le **premier tokamak de grande taille équipé d'aimants supraconducteurs**, démontrant dès les années 1990 la faisabilité des **décharges longues** et validant des technologies clés pour ITER (gestion thermique, cryogénie, chauffages, diagnostics, télémanipulation). Ces succès ont été déterminants pour la sélection de **Cadarache comme site d'ITER**, symbole de l'excellence française.

Aujourd'hui, **WEST** constitue un banc d'essai unique pour les régimes stationnaires et les **parois en tungstène**, en préparation directe d'ITER et des étapes suivantes. En 2024 2025, il a établi des records mondiaux de durée pour un tokamak, avec notamment des plasmas d'hydrogène maintenus pendant **22 minutes (1 337 s)**, validant plus avant des briques essentielles comme le chauffage radiofréquence, la tenue des parois en tungstène et la gestion des flux thermiques. WEST reste étroitement associé à ITER, tant pour les tests techniques et scientifiques que pour la préparation de la phase opérationnelle. Ces résultats renforcent la crédibilité de la France dans la maîtrise des scénarios **long pulse**, cruciaux pour ITER et les futures centrales.

La France possède également quelques initiatives privées (start-ups), dont pour la fusion magnétique :

- **Renaissance Fusion**: première start-up de fusion magnétique en Europe continentale et plus grosse startup française (**€32 M levés en 2024 2025 (série A)**, total >€60 M depuis la création, et soutien **Bpifrance France 2030**: €10 M); ambitionne de devenir fournisseur de **HTS gravés** et de briques technologiques pour la filière fusion (métaux liquides notamment). Objectif: concevoir un réacteur compact, stable et capable de fonctionner en régime stationnaire.
- **FireFly Fusion** est une jeune entreprise spécialisée dans la **fusion magnétique**, fondée en 2023 et basée entre **Lausanne et Aix-en-Provence**, avec des liens forts en France (collaborations CEA IRFM). Objectif: développement de **tokamaks compacts** en s'appuyant sur des technologies éprouvées pour réduire les risques et accélérer la mise sur le marché.
- **Neutrogen Technologies**: cette start-up a pour objets, tant en France qu'à l'étranger, le développement de sources de neutrons pour diverses applications, telles que la production de combustible pour l'industrie de la fusion et de la fission nucléaire; la transmutation de matériaux, y compris les déchets nucléaires; la production de radio-isotopes médicaux et la production d'énergie.

Stratégie européenne

La feuille de route fusion européenne (pilotée sous EURATOM) fédère environ **4 800 chercheurs** issus de **28 membres et 162 entités affiliées**, avec pour objectif historique la progression **ITER → DEMO** et la qualification des matériaux via la source de neutrons **IFMIF DONES**. La mise à jour récente conserve la cible d'un **design conceptuel DEMO d'ici ~2030**, mais introduit désormais une **étape intermédiaire et complémentaire à ITER**: la **Volumetric Neutron Source (VNS)**. Cette installation, conçue comme un banc d'essai intégré pour les composants tritigènes et les systèmes en conditions réalistes, vise à réduire les risques technologiques entre ITER et DEMO et à accélérer la montée en maturité industrielle.

Parallèlement, la stratégie européenne évolue désormais vers un **soutien renforcé aux initiatives public-privé**, considérées comme des leviers pour **accélérer la route vers l'industrialisation de la fusion**. Ce virage se traduit par des appels à projets dédiés, des mécanismes de co financement et une ouverture accrue aux investisseurs privés dans le cadre du prochain programme cadre EURATOM (2028-2032/34). La Commission travaille actuellement sur un budget global pour le plan cadre de recherche d'environ **€175 milliards**, dont **€6,7 milliards pour EURATOM sur 2028-2032**, avec près de **€5,3 milliards fléchés vers la fusion** (dont environ **€4 milliards sécurisés pour ITER**) et une enveloppe spécifique pour les projets innovants et les partenariats public privé, incluant la « **Moonshot Fusion** » européenne.

Dynamique internationale hors UE

La course mondiale à la fusion s'accélère, avec des stratégies convergentes vers la démonstration industrielle :

- **Japon** : partenaire clé du **Broader Approach** avec l'Europe, il opère **JT 60SA**, le plus grand tokamak supraconducteur en activité, pour valider les scénarios avancés avant ITER. Le Japon vise une **démonstration électrique dans les années 2030**, soutenue par des programmes publics (Moonshot, SBIR) et un écosystème privé dynamique (Kyoto Fusioneering, EX Fusion). Un consortium de **12 grands groupes** (Mitsubishi, Mitsui, NTT, JERA...) a déjà investi **~860 M\$** dans Commonwealth Fusion Systems (USA) pour accélérer la commercialisation.
- **États-Unis** : après l'ignition obtenue au **NIF** en 2022, la stratégie américaine combine **fusion inertielle et magnétique**, avec un plan fédéral visant une **centrale de démonstration d'ici 2035** et des financements massifs pour les startups (CFS, Helion, TAE Technologies (qui vient juste de rejoindre la sphère financière de D. Trump)), qui ont levé plusieurs **milliards de dollars** et influencent désormais les orientations du DOE. À noter que le DOE est en train de créer un « Office of Fusion » spécifique et désormais indépendant de et au même niveau que l'Office of Science. A noter également la récente fusion de TAE entièrement en actions d'une valeur de 6 milliards de dollars avec Trump Media & Technology Group. +CFS/ENI comme PPP.
- **Royaume-Uni** : hors UE et très actif, le programme **STEP** prévoit un prototype de centrale à fusion d'ici 2040 (site de West Burton), avec un investissement public record de **£2,5 milliards sur 5 ans**, complété par **£410 millions en 2025-2026**. L'UKAEA compte désormais **>3 000 professionnels**, contre environ **300 en France**, illustrant l'accélération britannique depuis la sortie d'Euratom.
- **Allemagne** : a adopté récemment un **Fusion Action Plan** ambitieux pour construire la **première centrale à fusion au monde**, avec **>€2 milliards d'ici 2029** et une approche technologique ouverte (magnétique et inertielle). Elle s'appuie sur un réseau public fort (IPP, KIT, Fraunhofer) et un secteur privé très dynamique :
 - **Proxima Fusion** (stellarator HTS) : levée record **€130 M en 2025**, total **>€185 M**.
 - **Gauss Fusion** (tokamak haute performance) : CDR publié en 2025, coût estimé **€15–18 Md** pour une centrale commerciale d'ici 2045.
- **Chine** : considère la fusion comme une **technologie stratégique** pour la souveraineté énergétique. Objectifs : démonstration industrielle dans les **années 2030**, centrale commerciale avant **2050**. Infrastructures majeures coordonnées par l'Académie des Sciences de Chine :
 - **EAST** (ASIPP, record 1 066 s en 2025),
 - **BEST** (PPP, démarrage visée en 2027),
 - **CFETR** (PPP, 200 MW en phase 1, >1 GW en phase 2). Les négociations de site débutent, pour un début de construction dans les 5 ans suivant la décision.

La Chine développe également un nouvel écosystème industriel puissant, avec China Fusion Energy Co. (émanation de la Chinese National Nuclear Corporation, capital ~2,1 Md\$) et des investissements privés cumulés de ~2,8 Md\$ (2010-2025).

- **Corée du Sud**: premier pays à avoir adopté une loi dédiée à la fusion (2007). Objectif: démonstration électrique dans les années 2050, avec un pilote dans les années 2030. Exploite KSTAR (record 100 M°C pendant 48 s en 2024) et prépare K DEMO. Initiative privée notable: EnableFusion, visant à devenir le « TSMC de la fusion » en industrialisant la fabrication des composants complexes.

Tendance mondiale: accélérer la transition vers l'industrialisation via des projets intermédiaires (CFETR, STEP, JT 60SA, BEST, VNS) et un soutien massif aux partenariats public privé, avec des levées cumulées dépassant plusieurs dizaines de milliards de dollars. Cette compétition internationale renforce l'urgence pour l'Europe – et pour la France – de se positionner sur un projet d'intérêt collectif majeur comme la VNS et d'intégrer pleinement le secteur privé dans sa stratégie.

Implication actuelle de la France en fusion magnétique (national, européen, international; public & privé) — chiffres

- **ITER (hôte, Cadarache)**

L'Europe prend 45,6 % des coûts de construction d'ITER; 80 % de cette part viennent du budget UE et 20 % de la France en tant que pays hôte ($\approx 9,1$ % du total), puis 34 % en phase exploitation pour l'UE. Pour 2021-2027, l'UE a réservé €5,6 Md (prix 2018) pour ITER.

Retombées industrielles en France: depuis 2007, l'ITER Organization, F4E et Agence ITER France ont attribué €8,5 Md de contrats, dont > €4,9 Md à des entreprises françaises; l'impact macro 2018-2030 est estimé à €15,9 Md de VAB et 72 400 années emploi. [europarl.europa.eu], [iter.org] [link.springer.com]

- **Recherche nationale**

WEST/IRFM: ~300 personnels et ~30 doctorants/postdocs; leadership français sur parois tungstène, chauffage RF, tritium dans les matériaux; coordination des actions françaises au sein d'EUROfusion.

LMJ: 11 chaînes en opération à mi 2024 (330 kJ UV), montée progressive vers 1,3–1,4 MJ; LMJ PETAL fournit 1–7 PW couplables aux tirs ns.

RJH (Jules Horowitz Reactor) à Cadarache (en construction): réacteur matériaux 100 MW, flux jusqu'à $\sim 10^{14}$ n·cm⁻²·s⁻¹, outil clé pour l'irradiation accélérée et des synergies fission fusion (matériaux, isotopes). [irfm.cea.fr], [irfm.cea.fr] [photoniques.com], [inspirehep.net] [cea.fr], [jhrreactor.com]

- **Privé français**

Renaissance Fusion: €32 M (A1, 2025), sélection France 2030 (subvention €10 M Bpifrance, partenariat CEA), stratégie HTS « carpets » et parois lithium.

France 2030 – SupraFusion (CEA CNRS): programme €50 M/7 ans sur les supraconducteurs HT et la fusion (Paris Saclay). [sunyaenergy.com] [cnrs.fr]. Autres: chiffres inconnus.