MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'ESPACE

Liberté
Égalité
Fraternité

Stratégie nationale française pour l'énergie de fusion :

Horizon 2026-2035

Novembre 2026

esr.gouv.fr

Résumé exécutif

Un contexte qui positionne la fusion au cœur des stratégies énergétiques de long terme

La maîtrise de l'énergie de fusion constitue l'un des grands défis scientifiques, technologiques et industriels du XXIe siècle, défi engagé déjà il y a plus de 60 ans. En complément de la fission nucléaire qui a atteint une maturité industrielle et économique ce qui en fait un élément essentiel du mix énergétique décarboné national, elle représente une opportunité majeure pour répondre à long terme aux besoins énergétiques décarbonés, stimuler le développement industriel et technologique, et renforcer le positionnement stratégique de la France et de l'Europe. Au regard de l'expérience accumulée ces dernières années, il semble légitime d'envisager la maîtrise de la fusion comme un objectif atteignable au cours de ce siècle.

Deux approches technologiques et une voie stratégique de référence pour la France

La production électrique par fusion nucléaire repose sur deux approches dont la maturité diffère sensiblement. La voie de la fusion par confinement magnétique (FCM) a démontré des performances significatives — 69 mégajoules produits sur JET en 2023, et plasma maintenu plus de 22 minutes sur WEST en 2025— et ITER, en construction à Cadarache, est conçu pour atteindre un gain énergétique de 10, se rapprochant des conditions d'une centrale électrogène. La fusion par confinement inertiel (FCI) a franchi en 2022 le seuil de bilan énergétique positif à la *National Ignition Facility*, en configuration d'attaque indirecte, historiquement développée dans le cadre des programmes de dissuasion nucléaire. Pour ce qui est de l'attaque directe visée pour les applications civiles de nombreux verrous subsistent et aucune installation de démonstration n'existe actuellement. C'est sur cette différence de maturité que repose le choix stratégique français : la FCM constitue la voie principale, orientée vers la structuration d'une filière industrielle et la préparation d'une centrale pilote[1] à l'échelle européenne. La FCI se positionne sur le développement de briques technologiques nécessaires à l'obtention d'un gain positif (couplage laser et hydrodynamique) et donc de certains sous-systèmes spécifiques et, à l'horizon 2035, sur la contribution à une installation test d'implosion en attaque directe dans un cadre européen.

Une compétition internationale qui s'est profondément accélérée

La dynamique mondiale s'est drastiquement accélérée au cours de la dernière décennie, encouragée par les succès expérimentaux évoqués plus haut. Les investissements privés cumulés dans la fusion ont atteint environ 13 milliards d'euros à fin 2025, concentrés principalement aux États-Unis et, dans une moindre mesure, en Asie. Cette dynamique a fait émerger un écosystème de start-ups développant des approches technologiques variées, souvent avec des calendriers annoncés plus ambitieux que les programmes publics traditionnels, et qui exercent une pression croissante sur le calendrier global de la filière.

Les États-Unis combinent des financements publics substantiels — le *Department of Energy* consacre environ 800 millions de dollars par an à la recherche sur la fusion, auxquels s'ajoutent les crédits de défense qui irriguent indirectement la filière inertielle — et un soutien actif à un écosystème privé dense, avec 29 start-ups implantées sur leur territoire. *Commonwealth Fusion Systems*, qui construit le tokamak SPARC et prépare un démonstrateur électrogène pour 2035, en est l'illustration la plus avancée. La Chine a fait de la fusion une priorité nationale en 2025, avec un investissement estimé à plus d'un milliard de dollars par an, une structuration industrielle explicite à travers la *China Fusion Energy Co.* dotée d'un capital de 1,9 milliard d'euros, et l'objectif affiché d'une commercialisation à l'horizon 2050. Le Japon engage un effort public dépassant 400 millions de dollars par an, articulé autour du tokamak JT-60SA mis en service en 2023, et bénéficie d'un écosystème industriel actif. La Corée du Sud a quasiment doublé son budget de R&D fusion en 2026, à environ un milliard de dollars.

[1] Centrale à fusion pilote (ou centrale pilote, abréviation : pilote) : prototype de centrale électrogène conçu pour démontrer la faisabilité de la production d'électricité nette à partir de l'énergie de fusion et de l'autosuffisance en tritium. C'est une étape intermédiaire entre les infrastructures expérimentale à grande échelle, comme ITER, et les centrales à fusion commerciales (*Fusion Power Plant*, FPP).

En Europe, les dynamiques nationales se sont renforcées. Le Royaume-Uni a engagé 2,5 milliards de livres sur cinq ans, dont 1,3 milliard pour le programme STEP visant un démonstrateur électrogène d'ici 2040. L'Allemagne a annoncé en octobre 2025 un investissement de 2,45 milliards d'euros d'ici 2029, répartis entre recherche et infrastructures, dans le cadre de son programme « *Fusion 2040* ». La Commission européenne prépare une montée en puissance de ses investissements dans le prochain programme-cadre 2028–2034, en lien avec *EUROfusion* et *Fusion for Energy*.

Dans ce contexte, la compétition ne porte plus seulement sur la recherche fondamentale, mais de plus en plus sur la capacité à franchir les étapes industrielles — démonstrateurs, centrales pilotes, premières centrales commerciales — déterminante pour asseoir le positionnement stratégique et l'influence internationale.

Un positionnement français unique en Europe, développé grâce à une stratégie affirmée

La France bénéficie d'un positionnement unique en Europe dans le domaine de la fusion nucléaire grâce à deux atouts majeurs : l'accueil sur son territoire du projet international ITER et la maîtrise souveraine d'installations de pointe couvrant les deux grandes voies mondiales que sont le confinement magnétique (Tokamak WEST) et le confinement inertiel (Laser Mégajoule).

Dans ce contexte, le projet ITER constitue un pilier central de la stratégie française pour le développement d'une future filière de centrales électrogènes à fusion. Cette installation d'envergure a pour mission de démontrer la faisabilité scientifique et technique de la fusion en tant que source d'énergie décarbonée et massive. Son objectif le plus emblématique consiste à créer et maintenir un plasma qui génère dix fois plus de puissance que la puissance injectée pour le chauffer. Cette performance sera atteinte en produisant suffisamment de réactions de fusion entre le deutérium et le tritium au sein d'un plasma chauffé à 150 millions de degrés sur des durées de plusieurs centaines de secondes. La réussite de ce défi technologique exige de maîtriser des briques stratégiques complexes, allant du contrôle du plasma par des aimants supraconducteurs à la gestion industrielle et sécurisée du combustible, en passant par le traitement pionnier de tous les aspects nucléaires propres à ce type d'installation, y compris les tests des maquettes des futurs systèmes visant à produire in-situ le tritium des installations de fusion. Au-delà de ces avancées scientifiques à long terme, la construction d'ITER produit dès aujourd'hui un effet de levier économique majeur. Ce chantier hors norme a permis de structurer un tissu industriel français de premier plan, désormais apte à conduire des projets d'installations de fusion complexes. Sur un horizon de 10 ans, la stratégie a pour vocation à augmenter de manière significative la maturité technologique de briques technologiques clés : moyens de maitrise des plasmas (diagnostics, aimants, systèmes de chauffage), matériaux face aux plasmas (qualification de matériaux sous flux et travail sur la fabricabilité de composants basés sur ces matériaux), matériaux pour les structures des futures centrales de fusion (formulation de matériaux à désactivation rapide), cycle du tritium (développement des procédés d'extraction et de recyclage à échelle réduite, mais démontrant la faisabilité des performances attendues), couvertures tritigènes (réalisation et tests de maquettes au moins en conditions thermohydrauliques représentatives), moyens de téléopération et robotiques (développement de briques robotiques à tester dans une environnement irradiant représentatif), lasers de puissance (développement d'une brique élémentaire laser exploitable sur une centrale de fusion inertielle).

En complément d'ITER, l'écosystème français de recherche en fusion repose sur les deux principales installations nationales opérées par le CEA— le tokamak supraconducteur WEST pour la FCM et le laser Mégajoule pour la FCI— et sur le CNRS et les universités, qui contribuent en tant que partenaires scientifiques de premier ordre. En FCM, la communauté s'est structurée autour de la *Fédération de Recherche sur la Fusion par Confinement Magnétique* (FR-FCM), créée en 2007, qui regroupe une cinquantaine de laboratoires associant CEA, CNRS, universités et grandes écoles. En FCI, les compétences civiles s'organisent au sein d'unités mixtes de recherche associant le CNRS, le CEA et les universités partenaires, le CEA apportant notamment l'accès au LMJ et une expertise historique issue du domaine de la défense.

Le dispositif France 2030 constitue un levier de financement complémentaire aidant à la structuration et au renforcement de la communauté nationale de recherche. Le programme PEPR *SupraFusion*, lancé en mars 2025

dans ce cadre et doté de 50 millions d'euros sur sept ans, mobilise 400 chercheurs autour du développement des aimants basés sur des matériaux supraconducteurs à haute température, un verrou technologique central pour la prochaine génération de tokamaks, avec des retombées attendues bien au-delà du seul domaine de la fusion.

Un écosystème de start-up émerge en France et est porteur d'un potentiel stratégique pour la filière fusion. *Renaissance Fusion* et *GenF*, en développant respectivement des concepts innovants embarquant des technologies pour la FCM et la FCI, se positionnent comme des fournisseurs potentiels clés de briques technologiques critiques pour la fusion voire pour d'autres secteurs industriels. Leur approche entrepreneuriale, combinée à des partenariats avec les acteurs publics et industriels, peut accélérer la maturation de composants essentiels pour les futures centrales. Ces start-ups incarnent ainsi une nouvelle dynamique industrielle, capable de renforcer l'autonomie technologique de la France et de créer des emplois hautement qualifiés dans un secteur d'avenir. Leur modèle pourrait également positionner la France comme un exportateur de technologies clés pour la fusion, renforçant ainsi son rôle d'acteur industriel majeur à l'échelle européenne et mondiale.

L'expérience accumulée dans le nucléaire de fission — culture de sûreté, de sécurité, ingénierie de systèmes complexes, chaînes industrielles rodées — constitue un atout différenciant. Les entreprises françaises ont par ailleurs su capter une part significative des contrats ITER, ce qui a renforcé leurs compétences et leur position à l'international, en particulier dans les domaines de la cryogénie, de la mécanique de précision et des systèmes de contrôle-commande.

Dans ce contexte international en rapide évolution et au regard des atouts dont dispose la France, la définition d'une stratégie nationale apparaît nécessaire afin de coordonner les parties prenantes, orienter les investissements et préparer les prochaines étapes du développement de la fusion, en cohérence avec les orientations européennes.

Des défis technologiques identifiés, des investissements à engager

La stratégie nationale s'organise autour de deux horizons temporels articulés. À court terme (2026–2030), il s'agit de consolider les bases scientifiques et technologiques, de renforcer les compétences et les infrastructures expérimentales, et de sécuriser les financements nécessaires pour les étapes suivantes. À moyen terme (2031–2035), la priorité est de relever les défis technologiques identifiés et de préparer la conception et entamer la réalisation d'une centrale pilote dans un cadre européen, en consolidant la chaîne de valeur industrielle. L'horizon 2035 a été retenu car il correspond à une convergence d'échéances déterminantes : disponibilité des premiers résultats expérimentaux d'ITER, bilan des start-ups, orientations vers les démonstrateurs industriels. La stratégie proposée repose sur un scénario avec une inflexion notable à la hausse des activités. Les programmes menés à ce jour dans domaine de la fusion représentent un budget d'environ 70 M€/an[2] et 400 ETPT très majoritairement consacré à la FCM (90%), hors contribution française au projet ITER, et couvrent des domaines variés. Le scénario de la stratégie nationale définit, pour la FCM et la FCI, un socle de nouvelles activités, un volet d'extensions prioritaires et un dernier volet d'extensions complémentaires, afin de répondre aux enjeux de la nouvelle dynamique internationale sur la fusion.

Fusion par confinement magnétique. C'est la voie de référence pour atteindre la démonstration technico-économique. Les principaux défis restant à relever concernent la physique des plasmas — transport, instabilités, interactions plasma-paroi —, les matériaux et systèmes résistants aux flux intenses de neutrons et de chaleur et assurant le confinement et le niveau de sureté requis, le cycle du tritium (production, recyclage, confinement), et les aimants supraconducteurs à haute température critique, dont les applications dépassent largement le seul champ de la fusion. Le programme SupraFusion, soutenu dans le cadre de France 2030, adresse ce dernier point de manière ciblée. WEST joue un rôle central dans la validation expérimentale et les qualifications

[2] Budget à parts quasi égales entre subventions nationales et recettes externes (EUROfusion et France 2030 principalement).

technologiques, avec des programmes expérimentaux en soutien à ITER, à de potentiels acteurs privés, et aux futures centrales pilotes.

Fusion par confinement inertiel. On rappelle que la FCI présente une sensibilité particulière liée sa finalité défense. A ce titre, en France, la R&D dans ce domaine fait l'objet d'un encadrement strict au titre du décret n°80-247 du 03/04/1980. La FCI conserve un rôle complémentaire, orienté vers la recherche fondamentale et le maintien de compétences spécifiques présentant des synergies avec les programmes de défense. A ce titre, la France est le seul pays européen à disposer de compétences complètes dans le domaine. L'un des défis principaux réside dans le développement de lasers capables de fonctionner à haute fréquence tout en atteignant les niveaux d'énergie requis. A cet égard, le projet MOSAÏQUE vise à développer une nouvelle brique laser multifaisceaux à une cadence de 10 Hz, franchissant ainsi un verrou technologique central. En parallèle, la constitution d'une filière industrielle de fabrication de cibles à faible coût et en grande quantité est une priorité, compte tenu des volumes nécessaires à une future centrale électrogène. À l'horizon 2035, l'objectif est de disposer d'une installation intermédiaire permettant de démontrer un gain énergétique supérieur à 1 en configuration attaque directe.

Des retombés et des opportunités pour le secteur industriel

Les briques technologiques sélectionnées, qu'elles relèvent de fusion par confinement magnétique ou de la fusion par confinement inertiel, s'inscrivent dans des domaines à fort enjeu stratégique, caractérisés à la fois par leur potentiel de retombées industrielles et leur dimension souveraine. Ces secteurs, identifiés comme critiques pour l'autonomie nationale et la résilience des filières, offrent par ailleurs des opportunités concrètes de renforcement compétitif pour les acteurs français, comme en témoignent les retours d'expérience déjà observés dans des initiatives comparables.

Sur le plan industriel, les investissements consentis dans les plateformes proposées permettront aux entreprises françaises (souvent qualifiées sur des marchés similaires d'après notre retour d'expérience) de consolider leurs compétences sur des technologies différenciantes et de construire une souveraineté industrielle nationale dans les domaines concernés. Cette montée en expertise se traduira également par une meilleure position sur les marchés internationaux. D'un point de vue financier, les subventions allouées au développement de ces briques joueront un rôle multiplicateur en permettant de capter des cofinancements européens significatifs, notamment via des programmes tels qu'Horizon Europe, Eurofusion, F4E. Enfin, cette approche intégrée, combinant innovation technologique, souveraineté industrielle et performance économique, s'inscrit en parfaite cohérence avec les objectifs du Plan France 2030 ainsi qu'avec les stratégies européennes de relance industrielle. En structurant des filières d'excellence et en ancrant des compétences critiques sur le territoire national, cette stratégie contribuera non seulement à sécuriser des chaînes de valeur stratégiques, mais aussi à positionner la France comme un acteur clé dans les secteurs technologiques pour la fusion, tout en assurant des retombées tangibles pour l'économie locale et nationale.

Capital humain, réglementation, industrialisation trois conditions de réussite

Compétences et formation. La filière nucléaire fait face à un risque de tension croissante sur les ressources humaines à mesure que les projets montent en charge. La formation en physique des plasmas, en ingénierie nucléaire et en technologies cryogéniques devra être significativement renforcée en visant sur la période un doublement des étudiants formés dans le respect des règlementations en vigueur.

Le principal facteur limitant n'est pas l'attractivité de la filière, mais la capacité d'encadrement doctoral disponible dans les organismes et les laboratoires. Une coordination structurée entre établissements d'enseignement supérieur, CEA, CNRS et industriels est nécessaire, assortie de mesures ciblées : renforcement des financements de thèse, développement de programmes internationaux, création de spécialisations dédiées dans les écoles d'ingénieurs.

Cadre réglementaire. La France bénéficie d'un cadre éprouvé avec ITER, et d'une expertise de l'ASNR reconnue en matière de sûreté nucléaire. Ce cadre devra être précisé à l'aune des spécificités des futures installations :

gestion de l'ensemble du cycle du tritium (production, recyclage, confinement, détritiation, déchets, et non-prolifération), activation des matériaux (structures, poussières, gaz et fluides), cycles d'exploitation propres aux centrales de fusion, radioprotection vis-à-vis de flux neutroniques intenses. Il conviendra également de mettre en place un dispositif d'échanges en phase amont et d'accompagnement à destination des industriels pour faciliter les démarches d'autorisation, sur le modèle de ce qui a été mis en place pour les petits réacteurs modulaires (suivi prospectif, revues préparatoires, instruction anticipée). La France a un leadership reconnu dans l'harmonisation internationale de ces référentiels, notamment au sein de l'AIEA et auprès de la Commission européenne au travers d'ENSREG. Ce rôle est le fruit de l'expérience issue de l'application du cadre réglementaire de sûreté français au cas d'ITER, à ce jour le projet le plus avancé de grande installation de FCM, ce qui permet de transformer ces exigences en avantage compétitif, pouvant notamment aboutir à la production de documents de référence (standards ou guides) au niveau international.

La sensibilité particulière de la filière tritium en matière de risque de prolifération nucléaire devra aussi être prise en compte dans le cadre des engagements pris par la France dans le domaine, notamment en matière de contrôle des exportations.

Structuration industrielle. La montée en charge simultanée de la fusion et de la relance du programme électronucléaire de fission crée un risque de tension sur les capacités disponibles — notamment dans les domaines de la soudure de précision, de la chaudronnerie lourde, des systèmes cryogéniques et du contrôle-commande. Anticiper cette situation supposera de structurer la filière fusion de manière visible et prévisible, en renforçant le rôle coordinateur du GIFEN et en donnant aux industriels une visibilité suffisante sur les carnets de commandes à venir pour qu'ils puissent investir dans leurs propres capacités.

Conclusion – Enjeux et options pour la France

L'énergie de fusion entre dans une phase décisive, marquée par le passage de la recherche à la démonstration industrielle, avec des échéances structurantes autour du projet ITER à Cadarache d'ici 2035. Dans ce contexte, l'enjeu pour la France est désormais stratégique autant que scientifique.

Un engagement renforcé permettra de consolider la souveraineté technologique, de capter des retombées industrielles significatives et de positionner la France comme un acteur structurant au niveau européen et évitera un décrochage technologique, une perte d'influence et une dépendance industrielle.

Ce document stratégique définit un cadre d'action initial pour la filière fusion, conçu pour être actualisé, avec une première révision prévue dans un délai maximal de cinq ans. Cette actualisation régulière s'impose dans un environnement marqué par des avancées scientifiques et technologiques rapides potentiellement accélérées par l'utilisation de l'IA, mais aussi du fait d'un contexte international dynamique (compétitions et partenariats stratégiques).

Enfin, l'approche proposée permettra d'adapter en temps réel la feuille de route aux impératifs de souveraineté technologique aux évolutions des investissements publics et privés, ainsi qu'aux décisions structurantes prises au niveau européen et mondial. Que ce soit en lien avec le projet ITER ou avec les activités visant au développement des centrales de fusion, cette stratégie (avec ses futures adaptations) sera cruciale pour garantir que la France reste un acteur incontournable dans la révolution énergétique que promet la fusion.

Avant-propos

La maîtrise de l'énergie de fusion constitue l'un des grands défis scientifiques, technologiques et industriels du XXIe siècle. En complément de la fission nucléaire qui a atteint une maturité industrielle et économique ce qui en fait un élément essentiel du mix énergétique décarboné national, elle représente une opportunité majeure pour répondre à long terme aux besoins énergétiques décarbonés, stimuler le développement industriel et technologique, et renforcer le positionnement stratégique de la France et de l'Europe. L'expérience acquise au cours des dernières années permet d'envisager l'avenir avec un optimisme mesuré, et laisse penser que la maîtrise de la fusion pourrait être atteinte au cours de ce siècle.

À l'échelle internationale, les avancées scientifiques et technologiques récentes, l'accélération des investissements publics et privés et la publication de stratégies nationales ambitieuses en Europe (Allemagne, Royaume-Uni), aux États-Unis et en Asie traduisent un changement d'échelle significatif. Dans ce contexte, l'Europe renforce son positionnement et prépare les orientations du prochain programme-cadre 2028-2034, tandis que la France précise ses ambitions et priorités afin de jouer un rôle moteur dans la structuration d'une filière européenne de centrales à fusion pilotes[3] puis commerciales.

La France dispose d'atouts uniques en Europe, avec en premier lieu, l'accueil sur son territoire d'ITER, infrastructure expérimentale internationale clé. Elle vise à démontrer la faisabilité technologique de la fusion avec des avancées attendues dans les domaines scientifiques et techniques, tels que la démonstration d'un gain de puissance égal à 10 entre celle injectée dans le plasma et celle produite par la réaction de fusion par exemple, ou celui de l'industrialisation de machines de fusion avec des industriels français très impliqués. S'y ajoutent des installations de premier plan telles que le tokamak WEST et le laser Mégajoule (LMJ), une base industrielle nucléaire robuste, en lien avec un écosystème académique et technologique reconnu. Ces éléments placent le pays dans une position unique en Europe pour être un acteur majeur du développement d'une filière européenne de fusion et de la conduite de projets d'envergure.

Dans ce contexte international en rapide évolution et au regard des atouts dont dispose la France, la définition d'une stratégie nationale apparaît nécessaire afin de coordonner les parties prenantes, orienter les investissements et préparer les prochaines étapes du développement de la fusion, en cohérence avec les orientations européennes.

Le présent document fixe la stratégie nationale pour la période 2026–2035 et trace une trajectoire cohérente et progressive pour le développement de la fusion en France. Il identifie les priorités scientifiques et technologiques, les actions d'accompagnement nécessaires dans les domaines de la formation, du cadre réglementaire et de l'implication des industriels. Enfin, il hiérarchise les principaux défis à relever, intègre les éléments d'accompagnement essentiels au développement d'une filière (cadre réglementaire, engagement industriel) et prend en compte les enjeux humains, organisationnels et de compétences. Cette stratégie vise à renforcer la coordination entre les acteurs publics, académiques et industriels et à soutenir la contribution de la France au développement de la fusion à l'échelle européenne et internationale.

Cette stratégie nationale, portée par l'Agence de programme pour la recherche sur les énergies décarbonées (APED), a été élaborée à la demande du Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace (MESRE), en concertation avec les principaux acteurs nationaux impliqués dans la recherche et le développement de la fusion. Elle s'appuie notamment sur l'expertise des organismes de recherche, en particulier le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS),

[3] Centrale à fusion pilote (ou centrale pilote, abréviation : pilote) : prototype de centrale électrogène de taille réduite conçu pour démontrer la faisabilité technologique des principaux systèmes (y compris relatifs au tritium) d'une centrale allant jusqu'à la production d'électricité à partir de l'énergie de fusion, hormis la démonstration des plasmas en combustion ($Q > 5$), confiée à ITER. La centrale pilote constitue une étape complémentaire à ITER et à IFMIF-DONES qui qualifiera les matériaux pour les centrales à fusion commerciales (*fusion power plant* - FPP).

ainsi que sur la contribution d'établissements d'enseignement supérieur, de laboratoires académiques et de partenaires industriels engagés dans le domaine de la fusion.

Table des matières

Résumé exécutif ... 3
Avant-propos ... 8
Table des matières ... 10
1 Vision stratégique nationale pour le développement de la fusion ... 12
1.1 Deux approches technologiques et une voie stratégique de référence pour la France ... 12
1.2 Vision stratégique ... 13
Vision pour la France à l'horizon 2035 ... 14
Une stratégie nationale guidée par ITER et visant la commercialisation de centrales à fusion ... 14
Une trajectoire structurée à l'horizon 2035 ... 14
2 Panorama mondial de la fusion et positionnement de la France ... 15
2.1 Une compétition mondiale accélérée pour la maîtrise de la fusion ... 15
Accélération des financements privés et contrastes géographiques ... 15
Fusion magnétique dans le monde : accélération des programmes nationaux et des investissement privés vers les démonstrateurs électrogènes ... 16
Fusion Inertielle : une montée en puissance multiforme ... 17
2.2 Energie de fusion : enjeux stratégiques et atouts de la France ... 18
Transition énergétique et impératifs climatiques : enjeux et trajectoires ... 18
Structuration de la communauté de la recherche ... 18
ITER : un projet structurant de la stratégie nationale ... 19
Émergence des start-ups ... 20
Formation et vivier de compétences ... 20
Engagement européen et international ... 21
3 Défis et besoins pour la maîtrise de la fusion ... 21
3.1 Structuration de la stratégie française pour l'énergie de fusion ... 21
3.2 Fusion par confinement magnétique ... 23
Les défis de la fusion magnétique pour une filière industrielle ... 23
Les besoins pour une centrale pilote de fusion magnétique en Europe ... 24
3.3 Fusion par confinement inertiel ... 25
Les défis de la fusion par confinement inertiel ... 25
Les besoins de la fusion par confinement inertiel ... 25
4 Scénarios et projets nationaux fusion pour la période 2026-2035 ... 26
4.1 Fusion par confinement magnétique : des projets structurants vers une centrale à fusion pilote ... 26
Scénario ... 26
Description des projets nationaux proposés sur la période 2026-2035 ... 27
4.2 Fusion par confinement inertiel ... 33

Scénario 33
Projets nationaux et enjeu européen sur la période 2026-2035 34
5 Accompagnement au développement de la filière fusion 37
5.1 Compétences et formation 37
5.2 Cadre réglementaire 38
Contexte et enjeux 38
Une dynamique internationale et une nécessaire convergence 39
Une structuration internationale encore incomplète couplée à un défi d'harmonisation 39
Défis et opportunités pour la France 40
Leviers stratégiques proposés 40
5.3 Montée en puissance de l'implication industrielle 40
Une implication industrielle déjà concrète, tirée par ITER et d'autres initiatives au niveau européen notamment 40
Un atout stratégique : l'écosystème nucléaire français 41
Des capacités industrielles à faire croître à court terme et dans la durée 41
Des leviers d'action pour structurer la filière 41
5.4 Acteurs, partenariats, instruments de financement 42
Liste des acronymes 45
Auteurs 48

Vision stratégique nationale pour le développement de la fusion

Deux approches technologiques et une voie stratégique de référence pour la France

La fusion nucléaire libère de l'énergie en combinant des noyaux légers pour former des noyaux plus lourds, contrairement à la fission qui fragmente des noyaux lourds. Elle se produit naturellement dans les étoiles, où la matière est un plasma à haute température et densité, et où le cycle proton-proton (p-p) convertit l'hydrogène en hélium 4 (^{4}He) avec émission de rayonnement et de particules.

Pour que le bilan énergétique d'un plasma de fusion soit positif, le plasma doit satisfaire le critère de Lawson : le produit de la densité de matière n, de la température T et du temps de confinement τ, appelé triple produit, doit dépasser un seuil minimal (critère de Lawson) pour que l'énergie produite dépasse l'énergie apportée. Sur Terre, densités et temps de confinement sont limités, ce qui impose des températures très élevées.

La réaction deutérium–tritium (D-T) est privilégiée pour obtenir un gain énergétique positif, car elle combine une section efficace[4] maximale aux températures accessibles (~100-150 millions °C), une énergie libérée par réaction élevée (17,6 MeV) et la possibilité de produire le tritium *in situ* à partir de lithium et des neutrons produits par la réaction elle-même. D'autres réactions, comme D-D, D-^{3}He, T-T ou p-^{11}B, nécessitent des températures beaucoup plus élevées tout en ayant une probabilité de réaction plus faible.

La production d'énergie de fusion repose sur deux approches développées jusqu'à récemment pour des applications différentes :

- La fusion par confinement magnétique (FCM) qui utilise de forts champs magnétiques pour confiner un plasma sur de longues durées, visant un fonctionnement quasi permanent. C'est la voie la plus avancée technologiquement. Les configurations magnétiques les plus efficaces pour atteindre les conditions de fusion sont le tokamak (JET, WEST, ITER) et le stellarator (Wendelstein 7-X).
- La fusion par confinement inertiel (FCI) qui utilise lasers énergétiques pour comprimer et chauffer rapidement une petite bille de combustible, de manière à ce que l'inertie des couches externes maintienne le plasma confiné assez longtemps pour que suffisamment de réactions se produisent. Il existe deux schémas d'attaque : directe et indirecte (LMJ).

En 2022, la FCM a démontré une production de 10 MW de puissance fusion pendant 5 secondes sur JET (59 MJ, Q = 0.4) et en 2025 le maintien d'un plasma confiné à 50 millions de degrés pendant plus de 22 minutes sur WEST. ITER, en construction à Cadarache, va intégrer ces deux avancées. Compte tenu de ses grandes dimensions, la loi d'échelle établie sur l'ensemble des tokamaks exploités dans le monde montre qu'ITER devrait produire 500 MW de puissance fusion (Q = 10) sur de longues durées à savoir plusieurs heures par jour. ITER, dont le gain énergétique global de *l'ensemble de l'installation* (500 MW de puissance produite pour 150 MW de puissance électrique consommée) se rapprochera des conditions d'une centrale à fusion électrogène, démontrera la faisabilité scientifique et technique de la production d'énergie par FCM.

Elle constitue ainsi la voie la plus avancée vers une production électrogène. Le passage à l'échelle industrielle et la maîtrise de certaines technologies critiques– comme la génération *in situ* du tritium par réaction sur le lithium – problématique commune FCM/FCI – constituent les prochaines étapes à franchir.

Dans le cadre de l'attaque indirecte, la FCI, historiquement développée dans le cadre des programmes de dissuasion nucléaire, a franchi un jalon majeur en 2022 avec l'atteinte du seuil de *breakeven*[5] sur la National Ignition Facility (NIF) aux États-Unis. Cette avancée a suscité une émulation à l'international concernant les

[4] Mesure de la probabilité qu'une interaction se produise.

[5] Expérience dans laquelle l'énergie produite par le plasma ou le combustible dépasse l'énergie qui lui a été injectée (gain énergétique Q > 1). Le seuil de production nette d'énergie, c'est-à-dire celui où centrale produit plus d'énergie électrique qu'elle n'en consomme au total, se situe bien au-delà : Q visé pour les centrales à FCM > 20 et pour les centrales à FCI >50 voire 100.

perspectives d'applications civiles à long terme et a stimulé la création de start-ups. Cependant, le *breakeven* n'a pas encore été démontré dans la cadre de l'approche directe, préconisée par la communauté scientifique FCI.

Il est à noter que le *breakeven* ne constitue pas une démonstration scientifique et technique de la FCI en tant que source d'énergie. De nombreux autres verrous devront être levés, particulièrement dans le domaine des lasers, du taux de répétition des explosions, le coût de fabrication des cibles, la régénération de tritium (enjeu commun avec la FCM).

La maturité industrielle et économique de ces deux approches diffère donc fortement. En l'état, et parce qu'il a fait l'objet d'un effort important d'intégration, le confinement magnétique est considéré comme la voie la plus réaliste pour démontrer en premier la faisabilité technico-économique de centrales électrogènes à fusion commerciales.

Dans ce contexte, la FCM constitue la voie stratégique principale pour la France, sur laquelle elle concentre ses efforts afin de structurer une filière et aller vers la mise en service d'une centrale à fusion pilote, puis les futures centrales commerciales. La FCI, quant à elle, se positionne d'ici 2030 pour développer des connaissances fondamentales et comme un levier de R&D ciblée pour stimuler l'innovation et soutenir les industriels sur certains sous-systèmes spécifiques. D'ici 2035, elle a pour ambition de contribuer à la conception d'une installation test d'implosion en attaque directe appelée à s'inscrire pour sa construction dans un cadre européen. Pour certains sous-systèmes où les connaissances sont mutualisables, la FCI peut tirer parti de synergies avec la FCM. En France, son développement civil s'inscrit dans un cadre déterminé (accompagnement DAM),) et réglementé (décret n°80-247 (du 03/04/1980) compte tenu du lien historique entre les programmes laser de puissance et les applications de défense.

Vision stratégique

La stratégie nationale pour le développement de l'énergie de fusion présentée dans ce document s'organise autour de deux périodes successives de cinq ans, jusqu'à fin 2035. Ce cadrage temporel est cohérent avec les grandes échéances qui sont amenées à structurer l'avenir de la filière à l'échelle mondiale.

2035 comme horizon de référence : une convergence d'échéances décisives

D'ici à fin 2035, ITER devrait avoir réalisé ses premiers plasmas, y compris en deutérium, ouvrant ainsi une nouvelle phase du programme expérimental international. Ces résultats fourniront une base factuelle solide pour orienter les choix scientifiques et industriels de la décennie suivante. Parallèlement, les programmes nationaux ambitieux engagés par l'Allemagne, la Chine et le Royaume-Uni, ainsi que les développements portés par les start-ups du secteur (Etats-Unis, Europe), auront produit des résultats concrets susceptibles de reconfigurer significativement le paysage technologique et compétitif de la fusion. Dans ce contexte d'incertitude structurelle sur les trajectoires technologiques, construire dès maintenant une vision détaillée au-delà de 2035 serait prématuré et risquerait de limiter la flexibilité stratégique.

Cet horizon de 2035 permet également d'alimenter utilement les arbitrages européens à venir : les orientations définies dans le présent document ont vocation à préciser les positions françaises dans le cadre du prochain Cadre Financier Pluriannuel (CFP) de l'Union européenne, couvrant la période 2028-2034.

Une première étape, appelée à être révisée

La présente stratégie constitue une étape fondatrice. Elle a explicitement vocation à être révisée à minima au début de la prochaine décennie, à la lumière des avancées scientifiques et techniques, des évolutions du contexte international et des résultats obtenus sur les axes d'action qu'elle définit, mais aussi potentiellement suite à des engagements d'industriels spécifiques modifiant les priorités à moyen terme. Cette clause de révision inscrit la stratégie nationale dans une démarche d'adaptation continue, seule approche réaliste face aux incertitudes inhérentes à un domaine scientifique et technologique en pleine transformation.

Vision pour la France à l'horizon 2035

À l'horizon 2035 et en complément de ses activités autour d'ITER, la France conforte sa position en tant qu'acteur central de la filière européenne de fusion, capable de participer activement à la conception, la réalisation et l'exploitation de centrales pilotes, dans une perspective de commercialisation à plus long terme. Elle tend à maîtriser les technologies critiques de la filière, en propre ou dans le cadre de partenariats européens et internationaux stratégiques, dispose d'une base industrielle robuste et compétitive, forme et attire les talents nécessaires pour soutenir une recherche scientifique et technologique à l'état de l'art et une innovation de pointe.

Elle renforce et fait évoluer ses installations de recherche, et se dote des capacités scientifiques, technologiques et partenariales lui permettant d'envisager l'accès, le développement partagé ou l'accueil d'infrastructures dédiées à la fusion. Elle joue un rôle central dans l'orientation et la coordination des initiatives européennes et renforce ses collaborations, ainsi que sa présence et son influence au niveau international.

La stratégie nationale vise à répondre à quatre objectifs majeurs :

1. Renforcer la souveraineté technologique et industrielle ;
2. Consolider le leadership scientifique et technologique ;
3. Prendre en compte les spécificités de la fusion dans le cadre réglementaire français existant ;
4. Se mettre en perspective d'accompagner la transition énergétique décarbonée.

Elle oriente les décisions et les actions visant à structurer les investissements, développer les infrastructures et les compétences, soutenir l'innovation et préparer l'émergence d'une filière européenne de fusion compétitive et durable. Elle permettra à la France de jouer un rôle de premier plan dans la mise en œuvre de centrales de fusion pilotes puis la commercialisation des futures centrales de fusion en couvrant tous les domaines stratégiques du secteur.

Une stratégie nationale guidée par ITER et visant la commercialisation de centrales à fusion

L'accueil d'ITER et les activités menées en France dans le domaine de la fusion renforcent les capacités scientifiques, technologiques et industrielles nationales, constituant un socle solide pour le développement des futures centrales à fusion électrogènes. En continuité avec l'effort réalisé sur plusieurs décennies, la stratégie nationale considère ITER comme un échelon clé du développement de la FCM. Elle prévoit en conséquence une contribution nationale à ses priorités de recherche et à son développement en vue de son démarrage (notamment la qualification des matériaux de première paroi, les diagnostics, le chauffage et le contrôle du plasma, les moyens de maintenance), puis de son exploitation future, en stimulant la R&D et l'innovation technologique, en guidant les choix de conception, et en structurant les chaînes industrielles. Parallèlement, l'expérience acquise dans la filière nucléaire de fission a permis à la France d'avoir une expertise internationale sur l'ensemble des secteurs de cette industrie (conception, construction, exploitation et démantèlement), de développer des compétences sur l'ensemble de la chaîne de valeur et une culture de sûreté et sécurité nucléaire, ce qui bénéficie à la filière fusion. Ensemble, ces éléments positionnent la France comme un acteur central à la fois dans la préparation de démonstrateurs pilotes et dans la perspective de centrales commerciales après 2035.

Une trajectoire structurée à l'horizon 2035

La trajectoire 2026–2035 s'appuie au premier ordre sur ITER, dont le premier plasma prévu en 2034 constitue un jalon structurant, tout en balisant et en orientant les actions nationales. Elle se projette également au-delà de 2035, en intégrant d'ici-là sur la période, un ensemble d'activités visant le déploiement futur de centrales pilotes puis commerciales en Europe. Elle s'inscrit en cohérence avec les orientations européennes et reste attentive aux dynamiques internationales en forte expansion.

Pour soutenir cette vision, la stratégie repose sur sept piliers :

1. **Maintien du leadership scientifique et technologique :** soutenir l'avancée des connaissances et le développement des technologies clés pour relever les défs scientifiques et technologiques, et préparer le passage à l'échelle industrielle ;
2. **Structuration et compétitivité industrielle :** organiser et renforcer l'écosystème industriel national et européen, structurer les moyens de production, d'assemblage et de maintenance des systèmes critiques afin de soutenir ce passage à l'échelle ;
3. **Innovation de rupture et anticipation technologique :** anticiper les évolutions technologiques et les besoins futurs, et favoriser l'émergence de solutions innovantes et de rupture ;
4. **Influence et partenariats européens et internationaux :** établir des collaborations et des partenariats internationaux, assurer l'influence de la France dans le développement global de la fusion et renforcer les synergies qui soutiennent le développement et la consolidation de l'écosystème national et européen ;
5. **Développement du capital humain et organisation :** développer et maintenir les compétences scientifiques et industrielles nécessaires, et mettre en place des structures organisationnelles pérennes et collaboratives ;
6. **Adaptation du cadre réglementaire :** garantir un développement de la fusion bénéficiant de la confiance et du soutien des citoyens, des acteurs économiques et des décideurs, en s'appuyant en particulier sur une approche de sûreté proportionnée aux enjeux ;
7. **Pilotage stratégique et mobilisation des financements :** mettre en place des mécanismes de pilotage qui permettront de coordonner les acteurs publics et privés nationaux, d'optimiser les investissements et de garantir la pérennité des financements nécessaires au développement de la filière selon les feuilles de route validées et les engagements pris, et enfin définir une stratégie d'actions au niveau européen en visant à faire levier sur les financements européens.

Panorama mondial de la fusion et positionnement de la France

Une compétition mondiale accélérée pour la maîtrise de la fusion

Accélération des financements privés et contrastes géographiques

À l'échelle mondiale, la recherche et le développement en fusion connaissent une forte accélération, portée par des financements publics structurants et un essor massif du capital privé. Selon le rapport « *Global Investment in the Private Fusion Sector* »[6] du *F4E Fusion Observatory 2025*, les investissements privés dans les start-ups portant des projets de fusion ont atteint environ 13 milliards d'euros fin 2025 cumulés depuis les premières levées de fonds – en réalité quasi intégralement sur la période 2015-2025 – et sont en forte progression. Cela traduit la transition de la fusion d'un domaine essentiellement de recherche vers un secteur industriel émergent, à forte intensité technologique.

[6] https://fusionforenergy.europa.eu/wp-content/uploads/2025/11/F4E_Observatory_2025_digital.pdf.

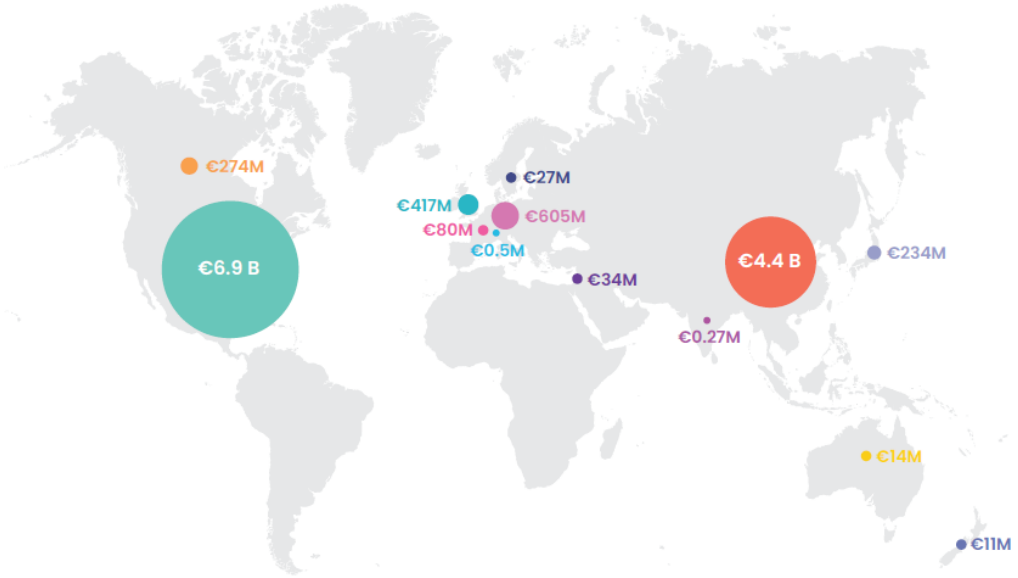


Figure 1 : Répartition géographique des investissements privés mondiaux par pays (montant en millions M ou milliards B d'euros)[6]

La répartition géographique (Figure 1) de ces financements révèle une forte concentration aux États-Unis et en Chine, qui représentent près de 90 % des investissements privés mondiaux. L'Europe se situe à un niveau limité en matière d'investissements privés (~5 % du total privé dont 85 % concentrés en Allemagne). En revanche, l'ampleur de sa contribution publique à ITER via Fusion for Energy (F4E) est comparable (≈ 6,8 Md€). À l'échelle mondiale, les investissements concernent principalement le confinement magnétique (90 %). Toutefois, les financements privés dédiés à la fusion inertielle sont en forte augmentation. Sur la période 2021-2025, l'analyse des données publiées par la Fusion Industry Association (FIA) montre ainsi une multiplication par sept des investissements sur la FCI, contre un doublement pour la FCM. Globalement les investissements sont concentrés sur deux pôles : 60 % aux Etats-Unis et 30 % en Allemagne. L'Allemagne se singularise par ailleurs avec 54% des levées de fonds européennes toutes technologies confondues.

Fusion magnétique dans le monde : accélération des programmes nationaux et des investissement privés vers les démonstrateurs électrogènes

L'**Union européenne** renforce son engagement, avec une révision de sa stratégie attendue à l'été 2026 et une volonté de la Commission d'augmenter substantiellement les budgets alloués au volet fusion hors ITER [7]. Pour autant, ITER en constitue le projet fédérateur et IFMIF-DONES un pilier structurant.

Plusieurs États membres ou associés lancent en parallèle des programmes nationaux ambitieux :

- Le **Royaume-Uni** avec STEP, tokamak sphérique électrogène visé pour 2040, comme projet phare accompagné de plusieurs infrastructures d'envergure, totalisant 2,5 Md£ sur 5 ans ;
- L'**Allemagne** avec son programme « Fusion 2040 » (2,45 Md€ d'ici 2029, dont 1,7 Md€ pour la recherche et 755 M€ sur les infrastructures)[8], soutient fortement le développement de la recherche publique et de l'écosystème scientifique, tout en favorisant les start-ups comme Proxima Fusion et Gauss Fusion par des subventions ciblées ;
- L'**Italie** avec le tokamak DTT (attendu à partir de 2032).

[7] 9,794 Mds€ estimés sur 2028-2034 (5,794 Mds€ dédiés à ITER et 4 Mds€ pour Euratom/Recherche dont 2,038 Mds€ pour la fusion i.e. x 2,5 par rapport au Cadre Financier Pluriannuel actuel). Processus d'approbation en cours.

[8] La répartition entre technologies magnétique et inertielle n'est pas précisée, le programme étant explicitement technologiquement neutre et promouvant les deux approches à parts égales à ce stade.

Aux **États-Unis**, le DOE consacre 760 à 790 M$ par an à la recherche sur la fusion, avec CFS comme fer de lance du secteur privé (tokamak SPARC en construction, démonstrateur ARC prévu vers 2035) dans un écosystème stimulé par les start-ups : 29 start-ups des 53 répertoriées par la Fusion Industry Association[9] y sont implantées.

En Asie, la **Chine** investit plus de 1 Md$ par an dans un programme national intégré combinant plusieurs tokamaks en développement (BEST, CFEDR, HL−4) et la création de la China Fusion Energy Co. (capital : 1,9 Md€), visant la commercialisation à l'horizon 2050. L'énergie de fusion est identifiée comme l'une des six industries du futur dans le 15ème plan quinquennal chinois (2026-2030).

Le **Japon** s'appuie sur un effort public dépassant 400 M$ par an, le tokamak JT-60SA (mis en service en 2023) et un écosystème industriel dynamique, avec notamment un investissement de 863 M$ de grands groupes japonais dans CFS. Un programme dédié aux HTS pour la fusion a par ailleurs été lancé (« Moonshot »), cité pour ses objectifs similaires à ceux du PEPR SupraFusion (France 2030).

La **Corée du Sud** dispose d'un programme national ambitieux, centré sur l'exploitation du tokamak KSTAR. En parallèle, le gouvernement a lancé un programme doté d'un budget de presque 1 Md€, visant à la construction d'un tokamak de démonstration.

Fusion Inertielle : une montée en puissance multiforme

La FCI bénéficie d'une dynamique croissante, portée principalement par le secteur privé américain et, en Europe, par une stratégie allemande de fort soutien public.

En **Europe**, l'Allemagne se distingue avec une stratégie publique multi-niveaux : financement fédéral du consortium PriFUSIO (18 M€ sur 3 ans), « *State Alliance for Fusion Research* » réunissant sept Länder, et un écosystème privé dynamique, avec Marvel Fusion et Focused Energy (~550 M€ levés), toutes deux ayant reçu des financements européens accordés par l'European Innovation Council (EIC)[10].

Aux **États-Unis**, le financement public s'articule autour de deux flux : la NNSA (~690 M$/an) et le DOE (programme IFE−STAR, enveloppe de 42 M$ sur 4 ans). Le secteur privé est très dynamique avec trois start-ups leaders : Pacific Fusion (900 M$ levés), Inertia, issue du LLNL avec un portefeuille de 200 brevets (450 M$) et Xcimer Energy (118 M$).

En **Chine**, le programme FCI reste public et essentiellement à vocation militaire, piloté par la China Academy of Engineering Physics (CAEP[11]), avec la construction du *Laser Fusion Major Device Laboratory* à Mianyang (laser Shenguang-IV, ~50 % plus grand que le NIF).

En définitive, si la fusion magnétique concentre l'essentiel des programmes publics structurés vers des démonstrateurs électrogènes, la fusion inertielle est principalement portée par le secteur privé et, en Europe, par une stratégie publique allemande explicite, à l'exception de laquelle aucun autre État n'a encore engagé de programme civil structuré de cette envergure sur cette voie. Dans une moindre mesure, et très récemment, le Royaume-Uni a fait part d'un soutien au développement d'infrastructures expérimentales pour la FCI.

La dynamique internationale ainsi décrite, marquée par une accélération des programmes nationaux (au-delà de 500 M€ par an de soutien public)[12], la montée en puissance d'un secteur privé désormais incontournable (13 Mds€ de levées de fonds cumulés) et une intensification de la compétition géographique et technologique, dessine le contexte dans lequel la France doit affirmer ses ambitions en consolidant ses atouts.

[9] 2,64 Md$ levés en un an à 07/2025, en hausse de 178 % vs 2024, financement total des 53 SU : 9,766 Md, × 5 par rapport à 2021. Source : « *The global fusion industry in 2025* », report (FIA).

[10] Ces financements, compris entre 10 et 30 M€, sont accordés sous forme de prises de participation au capital.

[11] Equivalente du CEA/DAM dans son périmètre, cette entité est en charge de la conception et de la production des armes nucléaires chinoises.

[12] 2,5 Md£ sur 5 ans au Royaume-Uni, 2,45 Md€ sur 5 ans en Allemagne soit environ 500 M€ annuels (ordres de grandeur des pays européens investissant le plus sur la fusion).

Energie de fusion : enjeux stratégiques et atouts de la France

La France mène des activités de recherche principalement dans le domaine de la fusion par confinement magnétique (FCM) dans le cadre des programmes civils de recherche. La fusion par confinement inertiel (FCI) est pour sa part explorée dans sa configuration d'attaque directe en vue d'applications électrogènes, tandis que l'attaque indirecte relève historiquement des activités de défense (CEA/DAM).

Les ressources humaines impliquées dans la fusion au CEA et dans les laboratoires des partenaires académiques en France représentent aujourd'hui environ 400 équivalents temps plein travaillé annuel (ETPT), hors étudiants, ressources des start-ups et des industriels. Le financement de l'ensemble des activités (couvrant les coûts de main d'œuvre, de fonctionnement et d'investissement) s'élève à environ 70 M€ par an (coût complet, hors subventions directes aux start-ups et hors ITER pour lequel la participation de la France est de l'ordre de 150 M€ annuels).

La répartition, en ETPT comme en financement, s'établit à 90 % pour la FCM et 10 % pour la FCI, dont la moitié est mobilisée par le projet TARANIS de la start-up GenF.

À l'échelle européenne, la position de la France en FCM peut être appréciée au regard de sa participation au programme EUROfusion : environ 213 ETPT ont été financés en 2023[13], à comparer aux 1 387 ETPT financés en Allemagne et aux 1010 ETPT en Italie, sur un total européen de 4 555.

Transition énergétique et impératifs climatiques : enjeux et trajectoires

La France évolue dans un contexte énergétique et climatique en profonde mutation, marqué par la nécessité de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre tout en garantissant sécurité d'approvisionnement, souveraineté énergétique et compétitivité industrielle. La PPE 3 fixe ainsi des objectifs ambitieux – réduction forte des énergies fossiles, électrification accrue et production décarbonée renforcée – traduits pour les prochaines décennies par la consolidation d'un mix énergétique combinant nucléaire de fission et énergies renouvelables.

Alors que la fission nucléaire constitue aujourd'hui une technologie mature, avec une filière pleinement structurée et souveraine, mais en pleine évolution (SMR, start-ups), la fusion, pour sa part, offre le potentiel de production d'une énergie décarbonée, quasi inépuisable, pilotable, avec des contraintes de sûreté et de déchets plus limitées que celles associées à la fission. Sa valorisation commerciale reste cependant conditionnée à la levée de verrous scientifiques et technologiques déterminants, et sa mise en œuvre en France est envisagée comme une composante additionnelle du mix énergétique à long terme.

Dans ce contexte, l'engagement français dans le développement de l'énergie de fusion répond au double enjeu de s'affirmer comme un acteur clé de la scène européenne et internationale évitant ainsi tout déclassement durable de la France sur cette filière d'avenir, et de sécuriser à long terme la décarbonation du mix énergétique (grâce à une ressource quasi illimitée).

Structuration de la communauté de la recherche

La FCM, étudiée depuis les années 1950 dans la perspective de produire de l'énergie, s'inscrit dans un effort international de long terme, reposant sur des investissements continus et un large parc d'infrastructures expérimentales. Les progrès accumulés ont conduit au lancement du projet ITER en 2006, actuellement en construction à Cadarache, dans le sud de la France, qui constitue aujourd'hui le jalon central de la stratégie nationale et européenne. La communauté française y contribue directement et continue de repousser les frontières scientifiques, comme l'illustrent la production de 69 MJ d'énergie de fusion pendant 5 secondes sur le

[13] « The 2023 HUMAN RESOURCES (HR) SURVEY FOR THE EUROPEAN FUSION RESEARCH PROGRAMME », By the 2023 HR Survey Panel, April 2024.

tokamak européen JET[14] près d'Oxford en 2023, ainsi que la maîtrise d'un plasma de fusion de 22 minutes sur le tokamak WEST à Cadarache en 2025.

L'écosystème français de recherche sur la fusion repose principalement sur le CEA, qui se positionne à la fois sur les dimensions scientifiques et technologiques et opère les deux principales installations nationales : le tokamak supraconducteur WEST pour la FCM et le LMJ pour la FCI. Aux côtés du CEA, le CNRS et des unités de recherche adossées aux universités jouent un rôle de contributeurs de premier ordre, apportant expertise scientifique, compétences technologiques et soutien aux projets nationaux et internationaux.

Dans le domaine de la FCM, la communauté française s'est structurée autour de la Fédération de Recherche sur la Fusion par Confinement Magnétique (FR-FCM), créée en 2007 à l'occasion de l'implantation d'ITER en France. Elle regroupe une cinquantaine de laboratoires associant organismes nationaux de recherche (CEA, CNRS, plus marginalement INRIA), universités et grandes écoles (notamment Aix-Marseille Université, Université de Lorraine et École Polytechnique). Dans le domaine de la FCI à usage civil, les compétences s'organisent principalement au sein d'unités mixtes de recherche (UMR) associant le CNRS, le CEA, l'université de Bordeaux (CELIA), Sorbonne université et l'École Polytechnique (LULI). Si cette thématique est essentiellement portée par le CNRS, le CEA intervient comme soutien scientifique et technologique et ouvre à la communauté l'infrastructure expérimentale majeure PETAL (PETAawatt Aquitaine Laser) au LMJ, mettant à profit son expertise historique issue du domaine de la défense.

Le dispositif France 2030 constitue un levier complémentaire de structuration et de renforcement de la communauté nationale de recherche. Il soutient notamment le programme PEPR SupraFusion, lancé en mars 2025 et doté de 50 M€ sur 7 ans, piloté conjointement par le CEA et le CNRS et mobilisant 400 chercheurs à l'échelle nationale. SupraFusion vise à accélérer le développement des matériaux supraconducteurs à haute température critique (HTS), dont la maîtrise est un verrou technologique majeur pour la prochaine génération de tokamaks compacts. Au-delà de la fusion, les retombées de SupraFusion bénéficieront à d'autres secteurs stratégiques (réseaux électriques, mobilité bas-carbone, imagerie médicale) renforçant ainsi la pertinence de cet investissement au regard des priorités industrielles nationales.

ITER : un projet structurant de la stratégie nationale

L'accueil d'ITER confère à la France un rôle privilégié dans le développement de l'énergie de fusion, en fédérant autour du projet un large écosystème scientifique, technologique et industriel.

ITER a été conçu pour démontrer la faisabilité de plasmas en combustion de longue durée (fusion du deutérium et du tritium (DT), gain énergétique Q = 10, avec une puissance produite de 500 MW pendant 50 secondes, en 2044 et plus de 300 secondes en 2046). Il s'agit d'un jalon scientifique majeur pour la maîtrise de la fusion, préparé grâce aux résultats obtenus sur un ensemble d'installations expérimentales, notamment JET (jusqu'en 2023), ASDEX-U et WEST.

Le projet stimule le développement de solutions critiques : sources de puissance pour le chauffage du plasma, systèmes cryogéniques, composants exposés au plasma, technologies liées au cycle du tritium, technologies de production in-situ de tritium. Ces développements technologiques renforcent l'expertise française sur des composants à haute valeur ajoutée.

ITER est également un catalyseur pour la filière industrielle, en favorisant la structuration des chaînes de valeur, la montée en compétence des entreprises et le développement de solutions technologiques innovantes. Le Comité Industriel ITER (C2I), au sein de l'Agence ITER France (AIF, entité hébergée au sein du CEA, structure pivot entre la France, pays hôte, et le projet ITER) accompagne les industriels français afin d'optimiser les retombées

[14] Le CEA a participé à la construction et à l'exploitation du tokamak JET ainsi qu'à ses évolutions, aux côtés des partenaires européens, soit avec un soutien d'experts en détachement, soit par des développements techniques. L'Institut de recherche sur la fusion par confinement magnétique du CEA (CEA-IRFM) a activement participé au record de 59 mégajoules établi en 2021.

industrielles, technologiques et économiques du projet ITER sur le territoire national et de coordonner la réponse nationale aux appels d'offre. Plus de 350 sociétés participent à ce réseau.

ITER mobilise également d'autres champs de compétences et d'activité couvrant notamment les infrastructures et le génie civil (travaux publics, bâtiments, logistique), la réglementation et la sûreté, ainsi que le démantèlement et la gestion des déchets.

Le projet ITER génère des retombées économiques[15] directes et indirectes significatives et fournit un retour d'expérience précieux pour l'intégration et l'exploitation des futures infrastructures expérimentales et pilotes, préparant la France à être en capacité d'exploiter les centrales à fusion électrogènes du futur.

Émergence des start-ups

Pour compléter l'action publique, l'écosystème privé se renforce autour de start-ups qui développent de briques technologiques critiques et de concepts innovants. Dans le domaine de la fusion inertielle, le projet TARANIS, porté par GenF, spin-off de Thales et lauréate du temps 1 du dispositif France 2030 pour RNI, incarne cette dynamique. GenF fédère une expertise unique, notamment celle du CEA/DAM autour du LMJ ainsi que les UMR impliquées, et stimule l'innovation dans l'industrie des lasers, un secteur où la France est déjà une référence mondiale. Ses avancées pourraient positionner le pays comme un acteur clé dans la fourniture de composants laser haute performance pour les futures infrastructures de fusion. Le projet TARANIS constitue actuellement le principal cadre fédérateur pour une application civile de cette approche. Dans le domaine de la fusion magnétique, la start-up Renaissance Fusion, également lauréate du temps 1 du dispositif RNI, développe un concept de stellarator HTS à parois en métal liquide, une technologie prometteuse pour des centrales plus compactes et performantes. Ces deux start-up, accompagnées par le CEA, illustrent l'émergence d'un écosystème industriel français capable de fournir des solutions technologiques potentielles différenciées. Elles mobilisent un large spectre de compétences, favorisant ainsi l'essor d'une filière intégrée, depuis la R&D jusqu'à la production de composants stratégiques. Au-delà de ces deux acteurs, d'autres entreprises sont apparues depuis peu dans le paysage, comme FireFly Fusion (tokamak HTS compact) et NeutroGen Technologies (tokamak pour produire du tritium en quantité significative sur des couvertures fissiles), diversifiant les voies technologiques explorées.

Formation et vivier de compétences

La France dispose de cursus de formation spécialisés qui alimentent chaque année un vivier de compétences et attirent également des candidatures internationales : une trentaine de diplômés par an issus de masters en sciences des plasmas et de la fusion, dont deux tiers poursuivent en doctorat. La FR-FCM recense 112 thèses en cours en 2025, dont 30 % au CEA et 70 % dans les laboratoires académiques, la FCI en comptant 25. Ces nombres intègrent un flux d'étudiants étrangers attirés par la qualité de la formation doctorale française. Il se veut représentatif, sans être totalement exhaustif. Ces formations, fédérées au niveau national par des jurys et regroupements communs, et articulées au niveau européen avec le master Erasmus Mundus « Fusion-EP », bénéficient du soutien actif de l'INSTN. En matière de formation continue, plusieurs programmes de formation en fusion sont proposés. En France, l'École FUSION pour TOUS (CEA), l'ITER School et l'école stellarator IRFM–Renaissance Fusion. À l'échelle européenne, des écoles thématiques comme Culham Plasma Physics Summer School (UK), IPP Summer University (Allemagne) et Karlsruhe International School (Allemagne) offrent des formations spécialisées.

Au-delà des compétences scientifiques, la filière fusion mobilise des expertises de pointe et une main-d'œuvre hautement qualifiée, notamment en chaudronnerie de précision, soudage spécialisé et ingénierie système. Ces compétences et savoir-faire, largement partagés avec la filière nucléaire de fission, s'appuient sur une base

[15] 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.

industrielle nationale solide et reconnue, structurée notamment autour du GIFEN. La réalisation d'ITER a démontré la capacité des industriels français à répondre à des marchés complexes et exigeants : les entreprises françaises ont capté environ 60 % des contrats ITER attribués depuis 2007, contribuant directement à leur montée en compétence sur des technologies critiques à haute valeur ajoutée. Les compétences et références acquises sur ITER confèrent par ailleurs aux industriels français une crédibilité et une capacité d'export reconnues, les positionnant favorablement pour répondre aux futurs marchés des programmes de fusion internationaux et des acteurs privés en plein essor.

Engagement européen et international

Au niveau européen, la France s'est impliquée dès l'origine (1958) dans le programme fusion du traité Euratom et participe à de nombreuses actions et collaborations, notamment le projet international ITER, où elle intervient comme pays hôte et État membre de l'Union européenne. Cette implication se concrétise par un ensemble de contrats passés d'acteurs français avec Fusion for Energy (F4E) et ITER Organization (IO), recensés par l'AIF par grands domaines.

La France est également un partenaire clé de l'Approche élargie (UE-Japon), dont elle est le premier contributeur (tokamak satellite d'ITER JT-60SA, accélérateur IFMIF-EVEDA, centre de calcul IFERC). Dans la continuité d'IFMIF-EVEDA, la France est aujourd'hui observatrice du projet IFMIF-DONES (Grenade, Espagne), infrastructure expérimentale cruciale pour l'acquisition des données expérimentales indispensables à la qualification des matériaux exposés aux flux neutroniques extrêmes caractéristiques des centrales à fusion. Le projet, porté par l'Espagne et soutenu à 25 % par l'Union européenne, prévoit une mise en service en 2034.

Dans le cadre du programme Euratom « *Research & Training Programme* », la FR-FCM est un acteur majeur du consortium EUROFusion des activités de recherche, en place depuis 2014. Actuellement, la France participe activement à la structuration de l'écosystème européen de la fusion dont les bases sont posées par la *Coordination and Support Action* (CSA) GO4FUSION (projet Euratom, 2025-2027), impliquant le CEA et le partenaire industriel français Thales. Dans ce cadre, le Partenariat Public-Privé (PPP) européen sur la fusion, copiloté par l'association FUSION NOW et la Commission européenne est en cours de contractualisation. Il est appelé à jouer un rôle central, à travers des appels à projets ciblés sur les priorités du *Strategic Research and Innovation Agenda* SRIA, afin d'accompagner la montée en maturité des technologies clés. La France s'implique également dans la *European Fusion Association* (EFA) qui fédère un ensemble d'industriels européens de la filière. Ces engagements sont cohérents avec la stratégie française de contribution à la politique européenne de fusion, au démarrage et à l'exploitation d'ITER, et au développement d'une future centrale pilote.

La France entretient également des collaborations bilatérales en Europe, en particulier avec le Royaume-Uni dans les domaines de la téléopération, de la gestion des déchets et du démantèlement. Un *Mémorandum of Understanding* (MoU) est en cours de finalisation entre la France et l'Allemagne sur des thématiques d'intérêt commun (simulation, briques technologiques : couvertures pour la FCM, lasers et optiques pour la FCI).

La France a par ailleurs établi des collaborations internationales avec la plupart des pays partenaires d'ITER (Chine, Corée du Sud, Inde, Japon, USA). Les thèmes couverts concernent notamment la physique des plasmas, les technologies de chauffage, de diagnostics et de contrôle.

Défis et besoins pour la maîtrise de la fusion

Structuration de la stratégie française pour l'énergie de fusion

Le développement de la fusion est structuré autour de trois horizons temporels, dont les deux premiers sont couverts par la présente stratégie, chacun associé à des objectifs présentés dans ce document :

- Court terme (CT, 2-5 ans) : consolider les bases scientifiques et technologiques, renforcer les capacités nationales (ressources humaines, compétences et infrastructures expérimentales), attirer des acteurs industriels majeurs et sécuriser les budgets nécessaires aux développements de moyen et long terme ;
- Moyen terme (MT, 5-10 ans) : relever les défis technologiques, consolider la chaîne de valeur industrielle et préparer et amorcer la réalisation d'une centrale pilote dans un cadre européen ;
- Long terme (LT, > 2035) : intégrer les systèmes, mettre en service une centrale pilote européenne et préparer les premières centrales commerciales en France et à l'international.

La stratégie nationale pour la période 2026-2035 s'appuie sur un **scénario** qui consolide les acquis scientifiques et technologiques, prépare le démarrage et l'exploitation d'ITER (avec des premiers plasmas en 2034), oriente la conception et la construction d'infrastructures de tests complémentaires et soutient le développement de technologies clés pour les centrales à fusion. Ce scénario renforce progressivement les ressources humaines mobilisées, développe les compétences nationales, stimule l'innovation et vise à attirer des financements complémentaires, européens ou privés. Il est dimensionné pour faire de la France un acteur majeur de la fusion en Europe et offre une trajectoire robuste pour garantir la compétitivité européenne et la préparation optimale d'une première centrale pilote.

Le scénario, pour la période 2026-2035, se décline autour d'une priorisation stratégique des activités réparties en trois niveaux : **socle**, **extensions prioritaires** et **extensions complémentaires**. Cette hiérarchisation résulte de la combinaison de plusieurs critères : la position de leadership actuelle de la France sur le sujet et sa capacité à le renforcer, le caractère critique des activités, leur horizon d'impact et leur contribution à la trajectoire vers une centrale à fusion. Elle prend également en compte des objectifs transversaux de souveraineté scientifique et technologique, de renforcement des capacités de R&D, et de structuration de l'écosystème industriel.

- **Socle :** Plusieurs cas de figure se présentent. La France est leader dans certains domaines scientifiques, technologiques et systèmes critiques hautement technologiques, décisifs pour le succès d'ITER, la préparation d'une centrale pilote, ou considérés comme des facteurs de rupture à fort potentiel (par exemple physique des plasmas, aimants). Certains sujets sont ou pourraient devenir fortement concurrentiels, et la France doit être en capacité de préserver son avantage. D'autres présentent des enjeux majeurs de souveraineté, comme le cycle du tritium, où la France souhaite se positionner, même si des capacités existent ailleurs (notamment en Allemagne et au Royaume-Uni) et qu'un effort conséquent est à fournir. La France voit également un intérêt à maîtriser la conception système d'une centrale et l'intégration des composants en vue d'un déploiement futur sur le sol national.
- **Deux niveaux d'extensions :**
    - **Prioritaires :** elles regroupent les activités qui complètent les capacités développées dans le socle afin d'étendre la maîtrise de la France aux principales technologies clés. Il s'agit de mettre en place les travaux permettant la maîtrise de composants en interface étroite avec ceux déjà portés par le socle ou de systèmes auxiliaires ;
    - **Complémentaires :** elles rassemblent les activités qui viennent compléter le socle et les extensions prioritaires, offrant un renforcement supplémentaire, l'exploration de pistes à plus long terme, moins critiques mais potentiellement stratégiques, et visant à terme l'autonomie de la France pour la construction d'une centrale. Il s'agit principalement de plateformes expérimentales qui permettent de tester, valider et intégrer de nouvelles technologies ou concepts dans des conditions proches de l'exploitation réelle.

À l'horizon 2035, le scénario positionnera la France comme candidate à l'accueil sur son sol d'une centrale pilote, à Cadarache, dans l'écosystème scientifique, technologique et industriel constitué autour d'ITER. Deux modalités de réalisation d'une centrale pilote seront alors envisageables : une réalisation portée conjointement par plusieurs États membres dans le cadre d'une initiative européenne coordonnée, ou une maîtrise d'ouvrage nationale en propre, selon un modèle comparable à celui du Réacteur Jules Horowitz avec la recherche de partenaires en support. La construction d'une éventuelle centrale pilote à Cadarache, pourrait en faire un hub fusion de référence mondial, concentrant sur un même site les grandes infrastructures expérimentales, les

capacités de démonstration industrielle, les compétences scientifiques et technologiques et l'écosystème privé associé.

Fusion par confinement magnétique

Développer une filière industrielle de centrales à fusion en consolidant les compétences scientifiques, technologiques et industrielles, et préparer la France à participer activement aux démonstrateurs pilotes et aux centrales commerciales futures.

Les défis de la fusion magnétique pour une filière industrielle

Sciences et technologies pour la maîtrise des plasmas :

- **Physique des plasmas de fusion magnétique :** Améliorer la compréhension des phénomènes physiques en jeu dans les plasmas confinés magnétiquement (transport, instabilités, couplage plasma-paroi), en associant expérimentation et simulation ; développer des codes interprétatifs et prédictifs afin d'optimiser la performance et la stabilité des plasmas en vue d'une utilisation industrielle ;
- **Systèmes cryomagnétiques :** Concevoir, fabriquer et qualifier, à l'horizon d'une centrale pilote, les systèmes d'aimants supraconducteurs, indispensables pour assurer le confinement et le contrôle des plasmas de fusion ;
- **Systèmes de chauffage des plasmas :** Concevoir, fabriquer et qualifier, à l'horizon d'une centrale fusion pilote, les systèmes de chauffage plasma haute fréquence nécessaires pour accroître et contrôler la température du plasma ;
- **Composants face au plasma (CFP) :** Concevoir, fabriquer et qualifier, à l'horizon d'une centrale pilote, les composants face au plasma résistants aux flux de chaleur et de particules générés par les plasmas de fusion, afin d'assurer la disponibilité, la maintenance et la robustesse opérationnelle ;
- **Diagnostics et contrôles :** Concevoir, fabriquer et qualifier, à l'horizon d'une centrale pilote, les systèmes de mesure des paramètres des plasmas de fusion et les algorithmes de contrôle pour maîtriser les régimes de plasma performants avec un gain énergétique Q suffisant, compatibles avec les exigences d'une production électrique.

Sciences et technologies nucléaires pour la production d'énergie :

- **Matériaux pour la fusion** : Développer et qualifier, à l'horizon d'une centrale pilote, des matériaux de structure à désactivation rapide, résistants aux flux volumiques de neutrons de fusion (14 MeV) et aux contraintes thermomécaniques, afin de garantir leur durabilité, la sûreté et la minimisation des déchets ;
- **Cycle du tritium :** Maîtriser, à l'horizon des premières centrales à fusion, par le développement et la qualification des composants et procédés, le cycle complet du combustible deutérium et tritium (alimentation-injection, recyclage, pompage, extraction et purification ainsi que le comportement dans les matériaux et les déchets) en minimisant l'inventaire radiologique,l'impact environnemental, et en prévenant les risques de prolifération afin de sécuriser l'exploitation industrielle ;
- **Couvertures tritigènes :** Développer, à l'horizon des premières centrales à fusion, des couvertures tritigènes assurant la production *in situ* du tritium à partir de neutrons et de matériaux lithiés, la conversion de l'énergie en chaleur pour la récupération d'énergie, la protection des composants sensibles, afin d'assurer l'autonomie en tritium et la performance énergétique des centrales. Les défis techniques sont multiples : taux de génération du tritium (tritium breeding ratio, enrichissement du lithium), conception d'ensemble, techniques de fabrication, qualification des matériaux (Eurofer pour les premières couvertures), simulation du comportement et essais sur maquettes permettant de progresser dans la qualification des concepts développés ;

Aspects conception et intégration centrale :

- **Conception intégrée des centrales à fusion :** Concevoir des centrales à fusion, sûres et exploitables avec des solutions technico-économiquement acceptables, en intégrant dès l'amont les contraintes RAMI[16] (avec les moyens de maintenance ou de remplacement de systèmes dans les conditions très spécifiques des machines de fusion), la conception et l'intégration des solutions de téléopération et de robotique, ainsi que les aspects aval (gestion des déchets radioactifs et démantèlement) et les aspects cycle de vie afin de démontrer la viabilité technico-économique de la filière ainsi que la construction d'une approche réglementaire optimisée.
- **Maintenance et téléopération (robotique) :** Développer et qualifier les systèmes de maintenance dans les conditions très spécifiques des centrales à fusion (un environnement irradiant, des espaces très restreints, des charges importantes couplées à une précision millimétrique, et parfois à un niveau de vide élevé).

La stratégie présentée dans ce document propose des actions concrètes, portées par la communauté française de la fusion, pour répondre à ces défis. Au-delà, la question des ressources pour le cycle du tritium représente un autre défi majeur, dont l'industrie pourrait pleinement se saisir. En effet, la production de tritium via la couverture tritigène dépend fortement de la disponibilité de lithium-6 (^{6}Li), un isotope rare (7,5 % dans le lithium naturel). Les centrales de fusion nécessiteront du lithium enrichi en ^{6}Li, avec des besoins annuels d'une centaine de tonnes de ^{6}Li pour un parc de centrales équivalent à 2 à 3 fois le parc nucléaire de fission mondial actuel. Les premières machines tritigènes nécessiteront déjà un inventaire important de ^{6}Li. Actuellement, la production mondiale est limitée et repose sur des installations vieillissantes, souvent liées à des activités de défense. Les stocks disponibles pourraient rapidement être insuffisants, d'autant plus que les capacités de production existantes (Chine et Russie) répondent principalement à leurs besoins propres et sont basés sur une technologie vieillissante. Plusieurs procédés alternatifs sont à l'étude, mais ils en sont encore au stade expérimental. La sécurisation de l'approvisionnement en ^{6}Li pour la centrale pilote représente donc un enjeu stratégique majeur.[17,18]

Les besoins pour une centrale pilote de fusion magnétique en Europe

À l'horizon 2030, le besoin est de consolider des bases scientifiques et technologiques en réponse aux dix défis définis *supra* et de se doter des moyens nécessaires à la conception intégrée et à la réalisation d'une centrale pilote (codes de simulation, code système, corpus réglementaire dédié, plateformes de qualification, etc.). ITER apporte déjà de nombreux enseignements en termes de retour d'expérience de conception et de construction à exploiter pleinement. L'exploitation du retour d'expérience de la préparation à l'exploitation et aux expérimentations d'ITER constitue également un axe majeur de capitalisation qui se poursuivra jusqu'à sa mise en service en 2034. Par ailleurs, il existe un besoin crucial de définir les investissements en infrastructures nécessaires pour la montée en TRL des technologies identifiées pour une centrale pilote dans un premier temps et commerciale ensuite.

À l'horizon 2035, le besoin est de rendre fiables, robustes et performants les différents composants d'une centrale à fusion, de les intégrer en vue de proposer un concept de centrale pilote et lancer sa construction, en s'appuyant sur des infrastructures expérimentales au cœur de programmes de qualification et de validation ciblés, ainsi que sur des codes de simulation numérique multi-échelles, multi-physiques de nouvelle génération. Certaines de ces infrastructures sont dédiées et nouvelles, notamment IFMIF-DONES (Grenade, 2034), d'autres orientées fission comme le réacteur expérimental RJH (Cadarache, 2032) développent des dispositifs dédiés pour

[16] *Reliability, Availability, Maintainability and Inspectability* (RAMI).

[17] Les USA ont lancé en février 2026 le « *Project Vault* » (env. 12 Mds$) en vue de créer une Réserve Stratégique de Minéraux Critiques pour protéger l'industrie américaine des chocs d'approvisionnement, en ciblant particulièrement le lithium, le cobalt et les terres rares.

[18] Ce sujet relevant plus d'un développement industriel, les actions requises ne sont pas intégrées dans la stratégie fusion proposée ici, mais elles constitueraient à terme un passage obligé si une industrie de fusion devait être développée.

la fusion (FUSERO disponible à l'horizon 2035). La conception et la réalisation de ces infrastructures au cours de cette période sont cruciales pour répondre aux enjeux de qualification des matériaux et des composants. Le recours à des infrastructures existantes est également essentiel. C'est notamment le cas des réacteurs de recherche de type *Material Testing Reactor* (MTR), tels que BR2 à Mol (Belgique) ou la plateforme d'irradiation multi-ions JANNuS (Orsay et Saclay).

À plus long terme, l'exploitation d'ITER est capitale pour répondre à une partie des besoins clés de la filière. En effet, ITER doit permettre de lever un verrou décisif en démontrant la capacité à générer, dans un tokamak de grande taille, un plasma majoritairement auto-chauffé et stable, avec un gain énergétique important, sur des durées suffisamment longues pour ouvrir les perspectives d'exploitation électrogène.

Enfin, construire à terme en Europe une centrale pilote est indispensable pour répondre aux besoins post-ITER et tracer la voie vers une tête de série à l'horizon 2050. L'optimisation technico-économique sera par ailleurs déterminante pour la transition vers une exploitation industrielle rentable.

Fusion par confinement inertiel

Développer la fusion par confinement inertiel en attaque directe, établir le design, développer les briques technologiques critiques spécifiques (lasers, cibles, diagnostics), travailler en synergie avec la FCM (notamment matériaux, tritium), développer une installation intermédiaire en attaque directe de validation de performances en vue de démontrer la faisabilité de la fusion inertielle pour la production d'énergie.

Les défis de la fusion par confinement inertiel

Science et technologie pour la maîtrise des plasmas :

- **Physique des plasmas de fusion inertielle :** Améliorer les performances des implosions FCI en attaque directe en développant des stratégies de mitigation des instabilités plasmas et hydrodynamiques en attaque directe. Développer des modèles prédictifs afin d'améliorer les performances des implosions en attaque directe.
- **Diagnostics et contrôle :** Développer les algorithmes de contrôles de l'irradiation laser à haute cadence pour maintenir un gain nécessaire à la production d'énergie électrique.
- **Laser d'ignition :** Concevoir et développer un système laser multi Méga Joule, fonctionnant à 10 Hz, à large bande spectrale, fondé sur une technologie de pompage par diode. Ce système laser sera basé sur une technologie innovante en mosaïque de faisceaux lasers à différentes longueurs d'onde.
- **Cible FCI :** Concevoir et développer une cible FCI d'attaque directe à bas coût pouvant être produite en grandes quantités. Le contexte de la FCI en attaque directe à haute cadence implique de repenser la filière de production des cibles en explorant les processus de fabrication micro fluidique ainsi que l'impression de milieu poreux.
- **Optiques :** Concevoir, tester et intégrer des éléments optiques passifs ou d'amplification laser compatibles avec la haute puissance moyenne, l'élargissement spectral, visés pour une centrale, fondés sur des nouveaux matériaux (céramiques par exemple) et procédés.

Sciences et technologies nucléaires pour la production d'énergie :

- En matière de science et technologie nucléaire, les défis de la FCI sont similaires à ceux de la FCM avec des spécificités notables dont la génération de neutrons et de rayons X qui est impulsionnelle ce qui potentiellement peut avoir un impact sur la réponse des matériaux aux flux de neutrons et le flux de rayons X et d'ions ultra rapides qui est également propre au schéma de la FCI.

Les besoins de la fusion par confinement inertiel

À l'horizon 2030, le besoin est de définir les solutions techniques (lasers, cibles) par le biais d'études expérimentales et théoriques, afin d'atteindre un gain énergétique supérieur à 1 en attaque directe, dans un schéma robuste aux aléas technologiques (qualité cible, reproductibilité des performances laser). La mise à

niveau d'un laser à Haute Densité d'Energie (HDE) adapté aux besoins de la FCI en attaque directe (notamment en termes de longueur d'onde et de largeur de bande) permettra de lever des verrous scientifiques clés, conditionnant l'architecture d'une future centrale à fusion. Le deuxième besoin consiste à définir un point de fonctionnement d'une centrale, ce qui spécifiera la géométrie de la cible de fusion tout en dimensionnant le laser nécessaire. Enfin, le troisième besoin est de développer une brique technologique laser (regroupant plusieurs lasers avec un multiplicité de longueurs d'onde), qui servira de base pour les centrales à fusion futures.

À l'horizon 2035 et au-delà, le besoin s'articule principalement autour de la spécification et de la construction d'une installation intermédiaire d'attaque directe. Ce démonstrateur de principe, ou « Implosion Test Facility » pour reprendre une terminologie anglaise, vise la validation du schéma FCI en attaque directe pour la production d'un gain de fusion supérieur à 1. Il n'existe pas d'installation de ce type alors qu'elle constitue une étape clé intermédiaire pour la transition vers une centrale industrielle (*Inertial Fusion for Energy*) IFE. Le laser Omega au *Laboratory for Laser Energetics* (LLE) à Rochester (US) est une installation en attaque directe avec 60 faisceaux convergeant sur cible, mais délivrant une énergie de 30 kJ, trop faible pour déclencher l'ignition. Les installations avec un niveau d'énergie laser suffisant (NIF, LMJ) ne possèdent pas une géométrie d'irradiation pertinente pour l'attaque directe. En effet, les faisceaux laser arrivent en bouquet à des angles proches des pôles de la chambre d'interaction. Un ajustement des pointés et des focalisations des faisceaux permet d'approcher un éclairement quasi-uniforme de la cible et de réaliser un schéma d'irradiation en attaque directe dégradé, dénommé « polar direct drive ». Or la qualité de l'uniformité d'irradiation est un paramètre critique pour assurer la compression et le chauffage de la cible jusqu'à l'ignition. Cela requiert des faisceaux lasers complémentaires sur et proches du plan équatorial de la chambre d'interaction. L'installation intermédiaire requise devra intégrer des technologies lasers développées autour de la brique élémentaire et s'appuyer sur les résultats que la communauté académique aura produits autour des codes de simulation et les plateformes lasers accessibles. Un dernier besoin sera de tester l'intégration des évolutions technologiques en termes de diagnostics à haut taux de répétitions, de cibles définies selon le point de fonctionnement, et d'ingénierie système pour l'injection de cibles et de contrôle actif du laser.

Scénarios et projets nationaux fusion pour la période 2026-2035

Fusion par confinement magnétique : des projets structurants vers une centrale à fusion pilote

Scénario

À l'horizon 2030, le scénario répond aux besoins mentionnés précédemment, notamment sur la préparation de l'exploitation d'ITER, la qualification de matériaux de référence (et des procédés associés à la fabrication de composants), la conception et le développement de maquettes et d'infrastructures expérimentales couvrant l'ensemble des dix défis (cf. § 0) ainsi que sur un programme de développement de codes de simulation aux différentes échelles (plasmas, système).

Pour les défis du confinement du plasma, des CFP et des couvertures tritigènes, cet objectif sera soutenu par l'***infrastructure WEST*** (sur la période 2028-2034 avec une Phase 3[19]), complété par une participation à l'exploitation de JT-60SA (Approche élargie) et BEST (ouvert par la Chine aux collaborations internationales). Ces infrastructures, couplées à un ***programme de développement d'outils de simulation*** (intégrant les apports de l'IA), permettront d'assurer une préparation optimale de l'exploitation scientifique d'ITER. En complément, des maquettes de couvertures tritigènes (concepts à choisir) pourront être conçues, fabriquées en vue de tests pour

[19] Suite de WEST Phase 2 (2022-2027), la Phase 3 est conçue pour répondre aux besoins d'ITER en phase avec sa Baseline révisée 2024.

valider certains aspects de conception et de fonctionnement (hors aspects production de tritium). En parallèle, le ***programme SupraFusion*** (PEPR exploratoire) se focalise sur la qualification des HTS pour la fusion à travers la fabrication d'un prototype de bobine à grande échelle et étudie l'impact potentiel des HTS sur le confinement et la conception des centrales à fusion. Le lancement d'une ***plateforme tritium pour la fusion*** (plateforme T4E[20]) sera nécessaire pour répondre au défi du cycle du tritium (aspects recyclage du tritium non fusionné mais également récupération du tritium produit dans les couvertures tritigènes), et ainsi contribuer à maîtriser la production et la gestion du tritium, éléments clés pour la filière. Elle permettra également de répondre à des besoins en lien avec le développement des systèmes tritigènes, sachant que le programme lié aux ***couvertures tritigènes*** conduira à des développements de maquettes (de couvertures et boucles associées) à tester sur différentes infrastructures. Le lancement d'une ***plateforme de qualification de la production et de l'injection de solides cryogéniques*** vise à disposer d'une installation unique et de référence en Europe pour maîtriser l'alimentation en combustible des deux filières magnétiques et inertielles et les instabilités de plasma des centrales en FCM. Enfin, l'évolution progressive du ***référentiel de sûreté*** existant pour tenir compte des spécificités de la fusion — et proportionné à ses enjeux propres — constituerait une étape naturelle de maturation de la filière, dans la continuité du retour d'expérience accumulé avec ITER. Tous ces développements s'inscriront dans une ***démarche système intégrée***, permettant de définir les contours et les spécifications des futures centrales, déclinés ensuite plus précisément pour la centrale fusion pilote avec la définition des performances visées pour chacun de ses sous-systèmes. La réalisation de ces activités s'appuie sur le retour d'expérience d'ITER dans de multiples domaines : scientifiques, techniques, sûreté mais également en conception et construction de cette installation, dont les ses caractéristiques générales se rapprochent de celles d'une centrale de par.

À l'horizon 2035, le scénario s'articule autour de l'exploitation scientifique et technique d'ITER, et des dispositifs de qualification l'accompagnant, à des fins de démonstration, de développement et d'intégration système des différentes composantes d'une centrale à fusion, ainsi que la finalisation de la ***conception et le lancement de la construction d'une centrale pilote*** en partenariat avec l'industrie, dans un cadre collaboratif européen. Le niveau d'implication sera à déterminer le moment venu et avec une option possible d'implantation à Cadarache pour bénéficier des synergies avec ITER et de la proximité des infrastructures et des équipes expertes.

Pour les défis du confinement du plasma, des CFP et des couvertures avec leur systèmes associés, les connaissances progresseront grâce à ITER, ainsi que JT-60SA, BEST et DTT. Pour aller plus loin dans ces défis, le maintien en France d'une infrastructure de recherche pour étudier les scenarios plasma avancés et valider les dernières avancées technologiques, notamment concernant les HTS, devra être considéré. La recherche sur de nouveaux alliages avancés visant à accroître la performance des composants en conditions extrêmes est une priorité et l'installation IFMIF-DONES (mise en service prévue en 2034) sera déterminante pour la qualification des matériaux candidats. Les procédés du cycle tritium seront qualifiés sur la plateforme tritium qui vise une entrée en exploitation au plus tard en 2032. La réalisation de dispositifs expérimentaux ou d'upgrades d'installations existantes ou utilisées en support à l'industrie nucléaire de fission fait également partie de l'ambition visée, à l'instar du dispositif expérimental FUSERO prévu dans le RJH).

Dans l'ensemble des domaines évoqués ci-dessus, les travaux de modélisation et de qualification menés permettront de conforter la conception de la centrale pilote avec des facteurs d'extrapolation acceptables.

Description des projets nationaux proposés sur la période 2026-2035

En réponse aux défis définis précédemment, un ensemble de projets nationaux sont proposés et présentés en regard.

[20] Tritium For Energy (T4E) : plateforme expérimentale sur les technologies tritium en projet pour une construction au CEA à Cadarache en 2 phases (2032 et extension des capacités en 2036).

Sciences et technologies pour la maîtrise des plasmas :

1. WEST 3 ;
2. Aimants supraconducteurs HTS ;
3. Plateforme test conducteurs supra 20 T ;
4. Composants face au plasma avancés ;
5. Plateforme de caractérisation de surface des matériaux (*Plasma Wall Interactions* – PWI ;
6. Plateforme gyrotron.

Sciences et technologies nucléaires pour la production d'énergie :

7. Plateforme Tritium ;
8. Matériaux avancés pour la fusion ;
9. Couvertures tritigènes ;
10. Plateforme cryogénie.

Aspects conception et intégration centrale :

11. Simulation multi-échelles et multi-physique, jumeau numérique et intelligence artificielle ;
12. Conception et intégration des centrales à fusion ;
13. Plateforme de maintenance robotisée ;

En accompagnement :

- Compétences et formation ;
- Cadre réglementaire.

Ces projets se déclinent selon les trois priorités du scénario (socle, extensions prioritaires et complémentaires). Le tableau ci-dessous indique pour chacun des projets, le budget supplémentaire nécessaire à sa réalisation sur la période 2026-2035 (couvrant par ordre d'importance, les investissements, la main d'œuvre et les couts d'exploitation) et précise les objectifs, les enjeux et la plus-value.

Socle :

WEST 3	**S&T pour la maîtrise des plasmas**
Objectif : Porter le tokamak WEST à des niveaux de densité de puissance et de fluence proches d'une centrale pilote (2028–2035) pour relever les défis scientifiques et technologiques de la fusion (plasmas, chauffage, composants face au plasma, diagnostics). **Enjeu : Préparer la communauté française à ITER et aux futures centrales, tout en soutenant un écosystème industriel national.** **Plus-value : WEST est le seul tokamak supraconducteur en Europe, plaçant la France en leader pour la prochaine génération de machines.**	
Aimants supraconducteurs HTS	**S&T pour la maîtrise des plasmas**
Objectif : Fabriquer et tester des prototypes d'aimants pulsés (conducteurs AC kilométriques avec des énergies importantes stockées) et d'aimants non planaires/démontables pour faciliter la maintenance ainsi que le transfert de la technologie des rubans HTS à l'industrie (Nexans, Axon, Renaissance Fusion). **Enjeu : Préparer une filière industrielle nationale et relancer la fabrication d'aimants supraconducteurs en France.** **Plus-value : Expertise du CEA, du CNRS et des partenaires académiques déjà engagés dans le PEPR SupraFusion sur cette technologie clé pour la fusion, avec un potentiel de souveraineté industrielle.**	
Plateforme Tritium (T4E)	**S&T nucléaires production énergie**
Objectif : Créer une plateforme pour la R&D sur les matériaux et les procédés du cycle du tritium (production, extraction, purification, recyclage), avec des essais sur matériaux tritiés/irradiés (ex. : provenances d'ITER) ou des systèmes ou composants pouvant aller jusqu'à leur qualification. **Enjeu : Maîtriser le cycle du combustible en conditions sûres et industrielles, en collaboration avec l'Allemagne, le Royaume-Uni et/ou la Roumanie, tout en conservant une souveraineté technologique.** **Plus-value : Expériences du CEA et des industriels français valorisables tout en étendant son périmètre, évitant la dispersion des technologies à double usage et assurant une maîtrise des aspects industriels.**	
Matériaux avancés pour la fusion	**S&T nucléaires production énergie**
Objectif : Développer des matériaux résistants aux neutrons (14 MeV, 150 dpa), aux températures extrêmes et à l'activation neutronique limitée, pour les composants critiques (première paroi, couvertures tritigènes, cycle du tritium). Mener la qualification de ces matériaux et assurer la normalisation indispensable (codification) pour passer à l'échelle industrielle, tout en développant des procédés de fabrication reproductibles **Enjeu : Assurer la durabilité et la sûreté des futures centrales, avec des procédés reproductibles et une qualification via ITER/IFMIF-DONES et un réseau de plateformes dédiées matériau.** **Plus-value : Les acteurs français disposent déjà des expertises et d'un réseau de plateformes de caractérisation (y/c en conditions radiologiques) pour valider les performances de matériaux.**	
Simulation multi-échelle / multi-physique	**Conception & intégration centrale**

Objectif : Disposer d'outils numériques pour prédire les performances de fusion en fonction des paramètres ingénieurs (taille, champ magnétique), prédire le flux d'ions, d'énergie et de neutrons sur les CFP, prédire l'érosion des matériaux exposés au plasma et la rétention du combustible dans les parois, prédire la modification des propriétés mécaniques, thermiques et l'activation des matériaux sous haut flux.

Enjeu : Accélérer et consolider le design d'une centrale fusion ainsi que son opération, en s'appuyant sur une hiérarchie de modèles physiques implémentés dans des codes numériques et validés sur les infrastructures expérimentales.

Plus-value : Les acteurs français, structurés au sein de la FR-FCM, disposent de l'expertise en théorie, simulation numérique et mathématiques appliquées. Positionnement stratégique à la pointe de l'intelligence artificielle et des ressources numériques exascale (synergie PEPR Numpex).

Conception et intégration des centrales à fusion	Conception & intégration centrale

Objectif : Développer des outils de conception (codes systèmes, jumeau numérique) pour garantir la cohérence globale des sous-systèmes (plasma, cryogénie, supraconductivité, etc.) et optimiser leur intégration dans l'objectif de concevoir des centrales de fusion (comme la centrale pilote).

Enjeu : Gérer les interactions complexes entre systèmes et répondre aux contraintes de maintenance, sécurité et macro-économie.

Plus-value : Simulation robuste et validée pour une conception optimisée dès la phase amont, approche déjà pratiquée en France dans d'autres domaines (fission par exemple).

Compétences et formation	Accompagnement

Objectif : Doubler le nombre d'étudiants en master et augmenter de 50 % les thèses pour former une nouvelle génération de scientifiques et ingénieurs en fusion.

Enjeu : Répondre au besoin croissant en compétences pour déployer la filière.

Plus-value : La France dispose déjà de formations reconnues en Europe, offrant un socle solide pour cette montée en puissance.

Cadre réglementaire	Accompagnement

Objectif : Décliner le cadre réglementaire français aux spécificités de la fusion et travailler à une harmonisation internationale (via AIEA, WENRA), en capitalisant sur le retour d'expérience d'ITER. Développer les installations d'une filière de gestion des déchets radioactifs prenant en compte les spécificités des installations et futures centrales à fusion.

Enjeu : Garantir un déploiement sûr des centrales en France et à l'étranger, avec des contributions au niveau international à l'établissement des guides et standards dédiés.

Plus-value : Positionnement proactif de la France dans la définition des normes, en évitant une dispersion des pratiques et en disposant du retour d'expérience d'ITER.

IFMIF-DONES	Accompagnement

Objectif : Valider et qualifier les matériaux destinés aux centrales de fusion. Ces matériaux, exposés à des neutrons de haute énergie (14 MeV) générés par la réaction de fusion, subissent des dommages extrêmes (transmutation, fragilisation), affectant leurs propriétés mécaniques et leur durabilité

Enjeu :. Construire une source de neutrons générés par bombardement d'une cible de lithium liquide par un faisceau de deutons jusqu'à 40 MeV, provenant d'un accélérateur linéaire à radiofréquence fonctionnant à 40 MeV 125 mA

Plus-value :. Être partenaire d'IFMIF-DONES est un levier pour garantir à la recherche française un accès privilégié aux données expérimentales sur les matériaux, assurer la formation de chercheurs, la compétitivité des métallurgistes industriels français et contribuer aux futures normes internationales utilisées pour la fusion nucléaire.

Extensions prioritaires :

Plateforme test conducteurs supra 20 T	**S&T pour la maîtrise des plasmas**

Objectif : Créer une plateforme pour tester des parties ou sous parties d'aimants supraconducteurs (rubans REBCO, câbles, aimants HTS) sous champ magnétique intense (> 20 T), en conditions représentatives de la fusion.

Enjeu : Valider la tenue mécanique, thermique et électrique des conducteurs supraconducteurs.

Plus-value : Qualification rapide et fiable des équipements, critiques pour la réussite des projets de machines de fusion à venir.

Composants face au plasma avancés	**S&T pour la maîtrise des plasmas**

Objectif : Développer des CFP innovants (parois liquides, utilisation de diamants, fabrication additive) pour améliorer l'extraction de chaleur, la résistance à l'érosion et la génération de tritium.

Enjeu : Rupture technologique par rapport à ITER, avec des tests possibles dans WEST, SPEKTRE[21] et HADES[22] en vue de satisfaire les exigences de centrales de fusion plus compactes.

Plus-value : Solutions disruptives pour des performances accrues s'appuyant sur l'expertise et les moyens de tests existants dans la communauté fusion française (en particulier WEST).

Couvertures tritigènes	**S&T nucléaires production énergie**

Objectif : Concevoir des maquettes de couvertures et leur systèmes associés (boucles eau/hélium/métaux liquides) et les tester sur des bancs dédiés ou installation WEST et/ou T4E. Qualifier l'Eurofer (matériau de référence).

Enjeu : Valider les briques technologiques clés pour la production de tritium dans les futures centrales.

Plus-value : Expertise historique du CEA associé à un savoir-faire industriel français important, avec des dispositifs expérimentaux complémentaires existants. Action en forte synergie avec des développements menés pour le nucléaire de fission.

Plateforme de caractérisation de surface des matériaux (Plasma Wall Interactions – PWI)	**S&T pour la maîtrise des plasmas**

Objectif : Caractériser les CFP (avant/après exposition) à différentes échelles (mm à nm), avec des mesures de topographie de surface, épaisseur de dépôts, composition chimique et contenu en gaz.

[21] SPEKTRE (Sheaths, Plasma Edge & Kinetic Turbulence Radio-frequency Experiment) est une machine linéaire d'interaction plasma paroi ciblant des études sur la turbulence et les instabilités, le couplage de systèmes de chauffage radio-fréquence et le test parois liquides.

[22] High heAt loaD tESt : installation (installation unique en France) permettant de tester de composants sous haut flux thermique.

Enjeu : Fournir des données expérimentales pour la conception, la validation des codes du projet de simulation multi-échelles et l'optimisation des composants. **Plus-value : Synergie avec les programmes matériaux, essais de CFP WEST 3 et les activités de la plateforme tritium, pour une approche intégrée.**

Extensions complémentaires :

Plateforme gyrotron	S&T pour la maîtrise des plasmas
Objectif : Disposer d'un site pour les essais finaux des gyrotrons (sources de chauffage plasma par ondes radiofréquences) avant livraison à ITER (ou d'autres installations). **Enjeu : Sécuriser la qualification de ces composants critiques (seulement 3 fournisseurs mondiaux, dont Thales en France).** **Plus-value : Positionnement stratégique près d'ITER, pour devenir une référence en développement des systèmes de chauffage plasma en forte connexion avec l'industriel Thales.**	
Plateforme cryogénie	**S&T nucléaires production énergie**
Objectif : Créer une plateforme européenne visant à concevoir, produire et qualifier des systèmes de solides cryogéniques pour la fusion magnétique et inertielle. **Enjeu : Assurer une souveraineté européenne face aux acteurs russes et américains, et soutenir les projets de fusion pour assurer une production des solides d'hydrogène et isotopes sous forme de glaçons et cibles cryogéniques, obtenus par condensation ou extrusion, et les caractériser depuis leur fabrication jusqu'à leur injection.** **Plus-value : Bénéficier de l'expertise du CEA dans le domaine (déjà positionné pour les fournitures de ces systèmes pour le projet ITER) et ouverture aux collaborations académiques/industrielles, avec une montée en puissance jusqu'en 2035.**	
Plateforme de maintenance robotisée :	**Conception & intégration centrale**
Objectif : Développer et mener des essais ciblés sur les briques technologiques nécessaires à la conception et à la réalisation de moyens de téléopération ou robots capables d'intervenir en milieu irradiant. **Enjeu : Répondre aux besoins spécifiques de maintenance dans les environnements exigeants des centrales de fusion et disposer de briques technologiques qualifiées pour la conception de système de télé-opération de ces futures centrales.** **Plus-value : Différenciation par rapport à l'Europe grâce à l'expertise française en robotique en milieu irradiant (avec la possibilité de qualification pour ITER).**	

Tableau 1 : Description des projets nationaux priorisés (FCM)

Au-delà des projets nationaux décrits ci-dessus, la France est fortement engagée dans le **projet ITER**, axe structurant de sa stratégie. Dans ce cadre, elle continuera des travaux de R&D et de développements technologiques et participera aux premières expérimentations menées sur ITER pour relever les défis mentionnés précédemment. De manière complémentaire et continue, la France poursuivra ses missions en lien avec ses engagements pris lors de l'accueil d'ITER sur le territoire. Dans l'optique de préparer la construction de nouvelles machines et de futures centrales de fusion, le travail de capitalisation du retour d'expérience d'ITER des phases de conception et construction sera étendu, en particulier en en renforçant les activités déjà en cours

sur le suivi des évolutions d'ITER déjà engagées pour analyse de la faisabilité technique des opérations de démantèlement et consolidation des coûts associés.

La stratégie s'appuie également sur un ensemble de grandes infrastructures de recherche, telles que **JT-60SA**, avec un engagement français fort et des apports cruciaux pour l'avancement de la fusion : optimisation de scénarios plasma, exploration des régimes de fonctionnement avancés, fournitures des données essentielles pour le développement des technologies, contribution à la formation. Afin d'exploiter pleinement ses capacités, un renforcement des ressources françaises est nécessaire.

Dans le domaine du développement et de la qualification des matériaux, l'infrastructure internationale **IFMIF-DONES** est déterminante pour la sélection des matériaux candidats pour les futures centrales. L'engagement de la France est stratégique à deux niveaux en prévision de la mise en service de l'installation en 2034 et de son exploitation optimale par la suite :

- implication directe dans les programmes d'essais, depuis la définition des expérimentations jusqu'à leur réalisation et exploitation, garantissant un accès privilégié aux données et aux résultats expérimentaux ;
- développement et valorisation de l'expertise nationale, notamment dans le domaine des sources de neutrons et les accélérateurs d'ions légers à haute intensité, en contribuant à la conception et à la fabrication de composants critiques pour l'infrastructure, associant l'ensemble de l'écosystème industriel et scientifique français.

Par ailleurs, la France porte et coordonne le projet RJH via le CEA, qui en assure la construction et l'exploitation, et rendra accessible à l'ensemble des membres du consortium international et de la communauté de recherche, une infrastructure unique pour tester matériaux et combustibles, à l'horizon 2032 ; un dispositif expérimental dédié à des expériences en réponse à des besoins de la fusion est prévu en vague 2. L'ensemble de ces engagements, qu'il s'agisse d'ITER, de JT60SA, de l'infrastructure IFMIF-DONES, ou encore du RJH, constitue la base sur laquelle s'appuient à la fois les projets nationaux et la stratégie française pour la fusion, permettant d'acquérir des connaissances, de renforcer les compétences, de développer les technologies clés et de garantir une participation active et influente dans la recherche et le développement européens et internationaux.

Fusion par confinement inertiel

Scénario

À l'horizon 2030, le scénario répond aux besoins mentionnés précédemment.

L'évolution de l'infrastructure de recherche HDE LULI2000 permettra de répondre en partie aux défis posés (instabilités hydrodynamiques et plasmas) par le schéma d'attaque directe. Cette infrastructure, couplée à un programme robuste de simulation renforcé sur les moyens mis à disposition de la communauté académique par le CEA, permettra de tester à échelle réduite les modèles de physique nécessaires au dimensionnement de la future installation intermédiaire. Parallèlement l'accès au LMJ donnera lieu à des expériences à échelle 1, dans une configuration d'attaque directe dégradée (polar direct drive). Il joue un rôle clef pour tester certains aspects (couplage cible-laser) nécessaires aux dimensionnements d'une l'installation intermédiaire en attaque directe. Le développement de cette installation intermédiaire s'avère absolument nécessaire car hormis une future installation laser chinoise, aucune installation expérimentale existante (NIF, LMJ), ne permet d'apporter la preuve de principe du fonctionnement de la FCI en attaque directe.

La brique laser élémentaire d'une centrale de fusion (MOSAÏQUE[23]) sera conçue et sa construction démarrée en partenariat avec l'industrie (Thales notamment) contribuant à la création d'un hub pour la fusion inertielle en région Nouvelle-Aquitaine. Elle inclura une architecture laser innovante permettant d'atteindre la largeur de

[23] MOSAÏQUE est un dispositif laser regroupant environ une centaine de faisceaux en fagot (ou matrice) avec une multiplicité de longueurs d'onde lui conférant une largeur spectrale effective de l'ordre de 1 %, une énergie globale supérieure à 10 kJ et pouvant fonctionner à une cadence de 10 Hz.

bande nécessaire toute en développant la technologie requise (pompage par diode) pour atteindre la cadence de tir (10 Hz) qu'une centrale de fusion implique.

Une filière industrielle de fabrication des cibles doit prendre corps pour répondre aux exigences d'une futur centrale fusion. À terme, une centrale de fusion consommera quelque 900 000 cibles par jour, à un coût inférieur à un euro. L'essor industriel de cette filière doit s'appuyer sur les savoirs faire du CEA en termes de micro fluidique et de réalisation de matériaux poreux. GenF développe certains de ces savoirs faire et peut potentiellement servir de base industrielle à cette filière.

À l'horizon 2035 et au-delà, le scénario s'articule principalement autour de la spécification et de la construction d'une installation intermédiaire d'attaque directe permettant d'atteindre des gains >1. Le système laser de nouvelle génération requis vise la classe 300-500 kJ intégrant des technologies du laser MOSAÏQUE et s'appuie sur l'exploitation scientifique de l'évolution du LULI2000 et des campagnes expérimentales menées sur le LMJ. En 2040, cette installation sera le point de convergence et d'intégration des évolutions technologiques en termes de diagnostics à haut taux de répétitions, de cibles issues du travail de définition du point de fonctionnement, et d'ingénierie système pour l'injection de cibles et de contrôle actif du laser. Si le scénario est appelé à s'articuler dans un cadre européen pour des raisons budgétaires et bénéficier d'une communauté élargie, il passe au préalable par la consolidation et l'essor d'une filière française, qui seule sur le continent européen, dispose de l'ensemble des connaissances et des expertises sur la physique et les technologies pour la FCI.

Projets nationaux et enjeu européen sur la période 2026-2035

Sciences et technologies pour la maîtrise des plasmas :

1. Rehaussement laser Haute Densité d'Energie (HDE), LULI2000 ;
2. Plateforme développement laser IFE : MOSAÏQUE ;
3. Plateforme cible ;

Simulations avancées (HPC, IA) :

4. Simulation multi-échelles/multi-physique ;

Facilité test d'implosion* :

5. Installation intermédiaire de compression (Gain > 1).

En accompagnement (spécificité FCI) :

- **Compétences et formation :** Répondre au besoin d'accroissement du capital humain et des compétences scientifiques et technologiques par la formation de nouvelles générations de scientifiques et ingénieurs. A 10 ans, un doublement de la communauté FCI est requis à travers des recrutements de chercheurs, enseignants chercheurs et ingénieurs et via l'augmentation des flux d'étudiants niveau master et des supports de thèses dans le respect de la réglementation en vigueur. La France dispose déjà de formations en fusion de haut niveau, reconnues et attractives en Europe et à l'international, qui la place en excellente position pour cette montée en charge.
- **Fédération de recherche FCI :** Son objectif est de répondre au besoin de structuration de la communauté des acteurs CEA et UMR-CNRS de la FCI. Elle assure l'animation scientifique, l'appui aux actions de formations, aux dépôts de projets conjoints et contribue au développement et à la mise en commun d'équipements clés (évolution d'installations, technologies lasers, diagnostics, cibles). Elle coordonne les actions de réalisation et de suivi de la feuille de route.

Socle :

Plateforme développement laser IFE : MOSAÏQUE	**S&T pour la maîtrise des plasmas**	
Objectif : Concevoir et réaliser un système laser innovant multifaisceaux d'énergie supérieure à 10 kJ, 10 Hz, brique intégrable à une future centrale FCI (démonstrateur industriel IFE : *Inertial Fusion for Energy*).		

Enjeu : **Réduire les instabilités laser plasma en attaque directe, optimiser le rendement de la réaction de fusion et intégrer une architecture d'amplification laser avec pompage par diode et refroidie par fluide.**

Apport stratégique : **Réalisation d'une distribution d'éclairement sur cible beaucoup plus uniforme que les installations existantes (NIF, LMJ, Omega) et de limiter les instabilités. Valorisation de nouveaux substrats laser (céramiques transparentes) ou de diode de puissance avec des perspectives d'essor pour des structures de production nationales.**

Plateforme cible	S&T pour la maîtrise des plasmas

Objectif : **Se doter d'une plateforme de conception et de réalisation de cibles de DT pour la FCI en attaque directe avec une production en masse et de faible coût.**

Enjeu : **Résoudre les problèmes dus à l'apparition des instabilités hydrodynamiques qui est liée à la forme des taches focales lasers à l'aide de deux types de technologie : la microfluidique et l'utilisation de matériaux poreux, permettant d'envisager une production de masse.**

Apport stratégique : **Réduction du coût de fabrication par rapport à celui de cibles NIF pour l'attaque indirecte, en faisant évoluer les techniques vers une filière industrielle. Ces développements font l'objet d'une collaboration entre le CEA et GenF.**

Simulation multi-échelles/multi-physique	S&T pour la maîtrise des plasmas

Objectif : **Mener des simulations numériques fiables et prédictives intégrant tous les paramètres d'une irradiation laser, afin de déterminer un point de fonctionnement (dimensionnement cible/laser) d'une centrale de fusion.**

Enjeu : **Développer un ensemble cohérent de codes de simulations multi-physiques et multi-échelles interconnectables modélisant les phénomènes physiques impliqués et confrontés aux expériences pour affiner sa fiabilité, tout en intégrant des approches d'IA.**

Apport stratégique : **Fédération des expertises en simulation autour d'un ensemble cohérent de codes de références et intégration des modules physiques complémentaires propres à l'attaque directe, pour donner un avantage considérable et décisif de la communauté française de la FCI.**

Extensions prioritaires :

Rehaussement laser Haute Densité d'Energie (HDE) LULI2000	S&T pour la maîtrise des plasmas

Objectif : **Faire évoluer la plateforme laser haute densité d'énergie LULI2000 pour répondre à des enjeux de validation expérimentale de la FCI en attaque directe.**

Enjeu : **Augmenter l'énergie laser de 1 à 10 kJ et le nombre de faisceaux de 2 à 5, passer d'un tir toutes les 90 minutes à 20 minutes et disposer d'un faisceau à large bande spectrale ; résultats contribuant de définir l'architecture de MOSAÏQUE (résultats peu accessibles sur des installations à l'international).**

Apport stratégique : **Test des stratégies de mitigations des instabilités laser plasma/hydrodynamique issues des implosions en attaque directe et test des briques technologiques d'une centrale de FCI fondé sur les innovations laser. Développement de diagnostics de nouvelles générations, et formation les futurs physiciens de la FCI.**

Tableau 2 : Description des projets nationaux priorisés (FCI)

Accompagnement au développement de la filière fusion

Compétences et formation

Le recensement prospectif des compétences nécessaires à l'exploitation d'ITER et à la réalisation des futures installations, mené en lien avec F4E et EUROfusion, constitue l'action initiale pour structurer la montée en charge et anticiper les besoins. Sur la base de cette évaluation, il devient possible d'ajuster les dispositifs et d'élaborer un plan d'action dont les grandes lignes sont déclinées *infra*.

La capacité d'accueil des formations initiales existantes au niveau master pourrait permettre de doubler, voire de tripler, le nombre d'étudiants formés sans modification structurelle, offrant un levier à mobiliser progressivement pour répondre à la croissance des besoins en compétences. Cette augmentation ne peut toutefois se faire que si la capacité d'absorption et d'encadrement correspondante existe, notamment en termes de stages, de postes de thèse financés et de directeurs de recherche disponibles. Ce goulet d'étranglement, structurel dans un domaine où l'encadrement doctoral repose sur un nombre limité de chercheurs permanents, impose d'emprunter une trajectoire ambitieuse mais tenable, calibrée sur la capacité réelle des laboratoires et des industriels à accueillir et former ces étudiants aussi bien au niveau national qu'international.

Une montée en charge progressive et concertée entre les établissements d'enseignement supérieur, le CEA, le CNRS, l'administration et les industriels partenaires est donc nécessaire. Elle s'accompagne de la mise en place de dispositifs visant à attirer et former les meilleurs étudiants (écoles d'été, financements de thèse – notamment CIFRE –, programmes internationaux comme le master européen Erasmus Mundus) et à valoriser les perspectives d'emploi et de carrière. Une réflexion est également à engager pour développer, au sein des écoles d'ingénieurs, des options ou des spécialisations dédiées à la fusion, au-delà de l'existant, afin d'élargir le vivier de recrutement et d'attirer vers la filière des profils d'ingénieurs aux compétences pluridisciplinaires. La réactivation de la Fédération Formation aux sciences des plasmas et de la fusion (FedSPF) offrirait un cadre de coordination adapté.

L'émergence de la filière fusion crée une opportunité de renforcement de la base industrielle et technologique nationale, à condition d'anticiper et de dimensionner les besoins en compétences de manière proactive. Certains des savoir-faire mobilisés (chaudronnerie de précision, soudage spécialisé, ingénierie système) présentent de fortes synergies avec ceux requis par le programme de relance du nucléaire de fission, ce qui plaide pour une approche intégrée des deux filières. Plus largement, la coexistence du développement de la fusion et de la relance du nucléaire de fission, incluant le déploiement des EPR2 et le programme visant à terme la fermeture du cycle, avec un réacteur à neutrons rapides conformément aux décisions du Conseil de politique nucléaire du 12 mars 2026, fait émerger des besoins considérables et concomitants en compétences industrielles. Dans ce contexte, une coordination d'ensemble apparaît nécessaire afin d'anticiper ces besoins à l'horizon 2035 et de structurer une offre de formation d'excellence à la hauteur des ambitions nationales. Le GIFEN pourrait constituer le vecteur naturel d'une telle coordination, à condition d'y renforcer explicitement l'intégration du volet fusion.

En formation initiale, il s'agirait de proposer des bourses attractives permettant de recruter les meilleurs étudiants vers les masters et doctorats spécialisés, tout en finançant des postes de thèse supplémentaires chez les industriels. En formation continue, il convient de structurer une offre nationale coordonnée, distinguant d'une part les compétences partagées avec d'autres filières pour lesquelles des dispositifs existants peuvent être mobilisés, et d'autre part les compétences très spécifiques à la fusion qui ne font pas encore l'objet d'une offre structurée et pour lesquelles des modules ad hoc certifiants restent à construire, potentiellement mutualisés à l'échelle européenne.

Pour l'ensemble des modes de formation ci-dessus, le cadre Euratom ouvre également des perspectives, le sujet « *Training, Knowledge Management* » étant identifié comme un enjeu du SRIA de GO4FUSION et pouvant s'inscrire dans de futurs appels à projets du PPP fusion.

L'ensemble de ces actions ne pourra toutefois produire pleinement ses effets que si elles s'inscrivent dans une stratégie nationale ambitieuse de dynamisation de la filière, de nature à rendre visibles et concrètes les perspectives d'emploi et de développement de parcours professionnels, condition essentielle pour attirer durablement des étudiants et des ingénieurs-chercheurs de haut niveau.

Cadre réglementaire

Contexte et enjeux

Dans ce domaine, la France bénéficie d'un positionnement singulier dans le domaine par rapport aux autres pays avec :

- Un cadre réglementaire pour les installations nucléaires de base (INB) par objectifs, peu prescriptif en termes de moyens, et conçu pour s'appliquer à des installations nucléaires de natures très variées et donc d'emblée opérationnel pour une première installation nucléaire de fusion,
- Et la présence sur son sol d'ITER (INB 174), qui a permis à l'ASNR et à l'exploitant *ITER Organization* de mettre en œuvre concrètement ce cadre sur un cas représentatif des futures machines de fusion. En particulier, l'ASNR a démontré l'adaptabilité du cadre réglementaire des INB, et sa flexibilité d'application, en aménageant les conditions d'une démonstration de sûreté « par étapes » pour ITER, compte tenu de son caractère exploratoire où les données nécessaires à la démonstration de sûreté sont acquises au fur et à mesure de la mise en œuvre des principales étapes du programme scientifique et technique, et plus récemment en décidant de réglementer la chambre à vide par une approche directe par objectifs de sûreté, plutôt que par l'application de la réglementation des équipements sous pression, peu adaptée au cas très particulier d'une machine de fusion.

Les travaux de l'ASNR entrepris depuis près de 20 ans autour de l'instruction et de l'expertise du dossier ITER lui donnent par ailleurs une connaissance approfondie des enjeux de sûreté que présente une installation de fusion de grande puissance, et des modalités pertinentes de leur encadrement réglementaire, notamment en termes d'exigences de sûreté.

La fusion nucléaire invite à réfléchir sur l'adéquation du cadre réglementaire actuel, tant au niveau national qu'international, selon une approche centrée sur l'ambition d'un haut niveau de sûreté. Cela est particulièrement motivé par une recherche de proportionnalité aux enjeux et bien souvent également du fait du caractère prescriptif des cadres réglementaires existant dans de nombreux pays à l'international. Les enjeux sont à la fois économiques, notamment en termes de coûts de construction, d'exploitation et de démantèlement, et industriels avec une exigence croissante d'agilité dans les délais de déploiement. La communauté internationale s'est saisie du sujet et plusieurs initiatives ont été lancées afin d'identifier les exigences d'un cadre adapté aux installations de fusion. A noter qu'au sein de l'Union européenne la France est la seule à devoir préserver ses intérêts défense dans les développements de la FCI à finalité civile.

C'est notamment le cas de l'AIEA, qui envisage l'élaboration prochaine d'un document fixant des standards de sûreté (SSR) spécifique aux installations de fusion[24], et de la Commission européenne, qui a missionné le groupe des régulateurs ENSREG en vue de proposer des options de cadre européen (directives ou guides)[25].

Dans le cadre de ces travaux, la France soutient les orientations suivantes :

- Les installations de fusion ont un profil de risques prometteur du point de vue des scénarios accidentels ou de la production de déchets, mais les plus puissantes d'entre elles présentent des enjeux de sûreté significatifs qu'il convient de traiter dans un cadre réglementaire et avec des moyens et méthodes qui valorisent les acquis de la culture de sûreté construite autour des installations nucléaires existantes ;

[24] Un « consultancy meeting » a été mis en place par l'AIEA et a tenu son premier séminaire de travail en avril 2026.

[25] Une « Task force » a été mise en place à cet effet et doit engager ses travaux en mai 2026.

- Les standards de sûreté applicables aux installations de fusion de puissance[26] doivent à cet égard reprendre, lorsqu'ils sont pertinents, les standards applicables aux autres installations nucléaires, et être complétés par des standards portant sur les enjeux spécifiques de la fusion (cycle du tritium, gestion des matériaux activés, radioprotection, qualification des matériaux et systèmes) ;
- Les autorités compétentes pour le contrôle des installations de fusion de puissance doivent bénéficier des compétences et des savoir-faire acquis dans le cadre du contrôle de la sûreté des autres installations nucléaires ; idéalement ce sont les autorités de sûreté en place.

Une dynamique internationale et une nécessaire convergence

À l'échelle mondiale, une tendance de fond se dégage : de nombreux acteurs engagés dans le développement de la fusion nucléaire cherchent à doter cette filière d'un cadre réglementaire distinct de celui de la fission, proportionné à ses risques réels et favorable à l'innovation. Ce mouvement trouve son origine dans les caractéristiques intrinsèques de la fusion — absence de réaction en chaîne, absence de criticité — justifiant des exigences adaptées, distinctes de celles applicables aux réacteurs conventionnels, encore plus nécessaires dans le cas de cadres réglementaires prescriptifs. Les réformes engagées dans les principaux pays avec un programme fusion notable illustrent cette tendance. Les États-Unis ont proposé en février 2026 une règle finale soumettant les installations de fusion à un régime allégé, distinct du cadre classique des réacteurs de puissance, afin d'accélérer les autorisations et de rassurer les investisseurs privés. Le Royaume-Uni a été le premier à légiférer explicitement en ce sens dès 2025. L'Allemagne finalise pour 2026 un cadre fondé sur la loi de radioprotection, conçu pour offrir vingt ans de visibilité aux industriels. La Chine a franchi une étape majeure en janvier 2026, en intégrant la fusion dans sa nouvelle loi sur l'énergie atomique comme filière stratégique, avec l'objectif affiché de s'imposer comme leader mondial. Le Japon, la Corée du Sud et la Russie s'inscrivent également dans cette dynamique, chacun à leur rythme.

Une structuration internationale encore incomplète couplée à un défi d'harmonisation

Au niveau européen, les travaux d'EUROfusion ont abouti en 2024 à des recommandations appelant à des approches harmonisées sur les enjeux clés — confinement du tritium, radioprotection, gestion des déchets. L'AIEA joue un rôle croissant de coordinateur mondial, avec la publication en 2026 d'une étude de référence sur les pratiques réglementaires nationales et la mise en place d'un « consultancy meeting » qui pourrait se voir missionné en vue de l'élaboration de standards de sûreté spécifiques à la fusion. Par ailleurs, la montée en puissance du secteur privé exerce une pression croissante sur les régulateurs pour produire des règles claires et stables rapidement.

Si l'orientation vers un cadre réglementaire distinct pour la fusion — fondé sur la proportionnalité aux risques et l'accélération des procédures — constitue un objectif souvent présenté à l'international, les modalités concrètes de son élaboration restent très hétérogènes d'un pays à l'autre. Cette diversité appelle un effort d'harmonisation portant à la fois sur la méthode et sur les exigences techniques de sûreté qui en découlent. Prévenir une fragmentation des normes constitue par ailleurs un enjeu central pour permettre l'émergence d'une filière industrielle à l'échelle mondiale.

Par ailleurs, dans le cadre des développements technologiques proposés, la problématique de non-prolifération sera pleinement intégrée, en particulier pour les activités en lien avec la production et la gestion du tritium.

[26] A partir de seuils de puissance brute ou d'inventaire en radionucléides qu'il conviendra de spécifier, et qui devront notamment permettre de faire la différence entre les installations de recherche présentant des enjeux limités, et les installations commerciales qui présenteront les enjeux les plus élevés.

Défis et opportunités pour la France

En capitalisant sur le retour d'expérience précieux acquis avec ITER, la France dispose d'une opportunité unique de consolider son positionnement dans la filière fusion. Le développement, en lien étroit avec l'ASNR, d'approches méthodologiques et de standards techniques adaptés aux spécificités des installations de fusion permettrait d'offrir aux exploitants une meilleure visibilité sur les attentes, tout en confortant le haut niveau de sûreté qui caractérise le cadre réglementaire français. Étendue à la gestion des matières et des déchets — notamment via des solutions optimisées pour les effluents et déchets tritiés — cette démarche de précision réglementaire contribuerait à structurer une filière économiquement viable et techniquement robuste, faisant de l'excellence française en matière de sûreté nucléaire un véritable avantage compétitif à l'échelle internationale.

Leviers stratégiques proposés

Il est stratégique pour la France de jouer un rôle clé dans le cadre réglementaire de la filière fusion, afin d'influencer les standards, de sécuriser les évolutions réglementaires et de soutenir le développement d'une filière industrielle compétitive. Pour ce faire, il est opportun de :

1. **Capitaliser sur l'expérience ITER et s'impliquer fortement dans le développement des pratiques internationales :** Valoriser les enseignements tirés du projet ITER (avec l'ASNR et ITER Organization) et analyser les propositions réglementaires internationales, notamment en participant aux groupes de travail internationaux, tels que ceux de l'AIEA, WENRA et ENSREG, porter la vision française d'une ambition d'un haut niveau de sûreté pour les installations de fusion.
2. **Prendre en compte les spécificités de la fusion dans le cadre réglementaire français existant :** Intégrer le retour d'expérience d'ITER, les meilleures pratiques internationales et poursuivre la recherche des simplifications découlant d'une analyse ciblée des risques et enjeux, dans un esprit réaffirmé de proportionnalité (approche graduée), et pour le cas d'installations encore en phase de développement conceptuel, de flexibilité dans l'application des exigences réglementaires. En parallèle, compte tenu des temps de leur temps de déploiement, il serait stratégique de développer les installations d'une filière de gestion des déchets radioactifs prenant en compte les spécificités des machines et futures centrales de fusion, en considérant en premier lieu ceux d'ITER comme cela est déjà initié, mais également en se projetant au-delà.
3. **Renforcer la cohérence et l'attractivité de la filière française :** favoriser la convergence entre les attentes de sûreté et les démonstrations des exploitants. Une compréhension mutuelle dès les phases amont, s'appuyant sur un dispositif d'échanges et d'accompagnement des porteurs de projet inspiré de celui mis en place par l'ASNR pour les porteurs de projets de petits réacteurs modulaires (PRM) comportant une phase de suivi prospectif, une phase de revue préparatoire et un investissement de pré-instruction au stade des options de sûreté, permettrait de gagner en efficience lors de l'instruction technique. Cette clarté normative soutiendrait la robustesse des projets industriels et conforte l'excellence française dans le déploiement des technologies de fusion.
4. **Harmoniser les standards à l'échelle européenne voire internationale :** participer activement à l'élaboration de principes communs de sûreté, de radioprotection et de gestion des matières, renforçant la position de la France comme acteur de référence et potentiellement leader dans la définition des standards internationaux (via des interactions entre l'ASNR, les acteurs du domaine de la fusion et l'AIEA par exemple), tout en facilitant la coopération et l'industrialisation. Ceci pourra alors conduire à l'établissement de guides et normes spécifiques.

Montée en puissance de l'implication industrielle

Une implication industrielle déjà concrète, tirée par ITER et d'autres initiatives au niveau européen notamment

L'essor d'ITER et l'émergence de nouveaux projets de machines de fusion à l'échelle internationale ont enclenché une mobilisation industrielle significative et tangible. En France, depuis une quinzaine d'années, de nombreux

acteurs ont investi le domaine de la fusion, profitant de l'implantation d'ITER sur le territoire national. Leurs contributions couvrent un spectre large : ingénierie et gestion de projets complexes, fourniture d'équipements et de systèmes, construction, contrôle, logistique et maintenance.

Au-delà de ces compétences transverses, des acteurs plus spécialisés ont développé ou consolidé des savoir-faire directement adaptés aux exigences singulières d'une machine de fusion : simulation numérique et IA, technologies laser, systèmes de chauffage, diagnostics, aimants supraconducteurs, téléopération, maintenance nucléaire, gestion des déchets et technologies du tritium. Le programme EUROfusion amplifie cette dynamique en finançant des développements technologiques spécifiques à la fusion, renforçant ainsi l'ensemble du tissu industriel européen. L'arrivée de start-ups dans l'écosystème fusion (en France, Allemagne et Royaume-Uni) contribue à renforcer cette demande en direction de l'industrie et offre des opportunités pour celle-ci.

Un atout stratégique : l'écosystème nucléaire français

La France bénéficie d'un avantage compétitif décisif : un tissu industriel nucléaire mature, structuré et reconnu internationalement. Les compétences accumulées dans le cycle du combustible fissile — conception, réalisation, exploitation, maintenance et démantèlement d'infrastructures nucléaires — sont directement transposables aux futures centrales à fusion. Les structures de gouvernance existantes, telles que le GIFEN et Nuclear Valley, ainsi que des vitrines comme la World Nuclear Exhibition (WNE), constituent autant de leviers de structuration et de valorisation pour la filière fusion.

Cette base solide positionne la France comme un acteur incontournable, à condition de lever deux verrous essentiels selon les industriels : d'une part, l'optimisation des procédures d'autorisation pour fluidifier le déploiement des installations ; d'autre part, l'harmonisation des standards aux niveaux européen et international (AIEA), indispensable à l'exportation de nos technologies et à l'accès aux marchés mondiaux.

Des capacités industrielles à faire croître à court terme et dans la durée

Si le tissu industriel français et européen démontre sa robustesse et la pertinence de ses compétences, il se heurte à une contrainte structurelle : l'inadéquation croissante entre les volumes de production disponibles et des besoins en forte augmentation. Cette tension est déjà perceptible sur ITER, où les limites de capacité constituent un facteur de risque pour les délais de livraison de composants clés, nécessitant parfois la mobilisation de plusieurs industriels en parallèle pour un même type de composant.

La montée en puissance industrielle devra donc s'opérer selon trois axes complémentaires :

- Rationaliser et simplifier les concepts technologiques pour en faciliter l'industrialisation à grande échelle.
- Intégrer le numérique — notamment l'intelligence artificielle — dans l'ensemble des processus de conception, de fabrication et de contrôle.
- Concrétiser des réalisations de référence — plateformes technologiques et centrales pilotes — garantissant une charge de travail stable dans le temps et une conduite de projet maîtrisée, avec des objectifs stables et des calendriers respectés.

Des leviers d'action pour structurer la filière

Deux initiatives méritent d'être lancées pour coordonner les efforts et ancrer l'engagement des industriels dans la durée :

- Premièrement, la création d'une commission fusion au sein du GIFEN, afin de fédérer les acteurs, élaborer une feuille de route industrielle commune et porter une voix unifiée auprès des instances européennes et internationales.
- Deuxièmement, la mise en place d'une Base Industrielle et Technologique de Fusion (BITF), s'inspirant du modèle éprouvé de la Base Industrielle et Technologique de Défense (BITD). Cette structure aurait pour missions de coordonner les projets, partager les approches souveraines sur les technologies

critiques, assurer la visibilité des plans de charge industriels, pérenniser les compétences et garantir la cohérence des programmes de développement.

Un double enjeu de souveraineté

L'implication des industriels dans la fusion répond à un impératif stratégique double : maintenir la France à la pointe de l'innovation nucléaire en consolidant son volet fusion, tout en valorisant les synergies fusion/fission au moment où le nouveau nucléaire connaît un renouveau d'ambition. Ces deux dynamiques sont complémentaires et se renforcent mutuellement — les soutenir simultanément, c'est garantir à la France une position de premier plan dans la maîtrise des solutions de production d'énergie de demain.

Grâce à l'ensemble des projets industriels mentionnés ci-avant et des actions de R&D amont soutenues au niveau européen par EUROfusion, un nombre significatif d'industriels sont impliqués dans la filière fusion en Europe. Les tableaux suivants offrent un aperçu de la diversité des principaux industriels engagés (sans prétendre à l'exhaustivité). Ils démontrent que, dans les différents domaines nécessaires au développement de cette filière, le tissu industriel français et européen est robuste et dispose des compétences requises. Toutefois, comme au niveau national, en termes de capacité de production, il devrait être adapté à des besoins en constante augmentation. Les limites des capacités de production constituent déjà parfois un facteur limitant pour la fourniture de composants à ITER dans les délais prévus, ce qui peut nécessiter la mobilisation de plusieurs industriels pour la réalisation d'un même type de composants clés. Par ailleurs, la montée en puissance de ces capacités d'accompagnement devra être menée en veillant à homogénéiser, simplifier les concepts, intégrer le digital (IA) et bénéficier de réalisations d'installations concrètes (plateformes, infrastructures, centrales à fusion pilotes) avec une conduite de projet maîtrisée (notamment objectifs stables, calendrier respecté).

Acteurs, partenariats, instruments de financement

Pour concrétiser l'ambition portée par cette stratégie, une approche systémique et coordonnée s'impose, mobilisant l'ensemble des acteurs nationaux et internationaux autour d'une vision commune et d'objectifs partagés.

Un écosystème diversifié et complémentaire à structurer

Le succès de cette entreprise repose sur la capacité à fédérer un large spectre d'acteurs aux compétences complémentaires. Les organismes de recherche publics, et en premier lieu le CEA avec ses infrastructures uniques, constituent le socle scientifique de cette filière. Les universités et grandes écoles, par leur rôle dans la formation et la recherche fondamentale, apporteront les compétences académiques nécessaires. Le tissu industriel français, dans toute sa diversité — des grands groupes énergétiques ou du nucléaire de fission aux PME spécialisées en passant par les start-ups innovantes telles que Renaissance Fusion ou GenF — devra être pleinement mobilisé pour assurer le transfert technologique et l'industrialisation des solutions.

Cette dynamique nationale devra s'articuler avec des partenariats internationaux ciblés. Des collaborations avec des instituts de recherche étrangers de premier plan comme l'IPP ou le KIT en Allemagne, l'UKAEA au Royaume-Uni ou l'ICSI en Roumanie pour des sujets comme les technologies de confinement magnétique, les matériaux ou le cycle du combustible, permettront d'accélérer les développements tout en positionnant la France au cœur des réseaux européens de recherche. Une cartographie précise des compétences et des ressources disponibles devra être établie pour chaque projet phare identifié dans ce document, afin d'identifier les complémentarités et prioriser les partenariats en fonction des expertises spécifiques, des opportunités de co-financement et des synergies industrielles potentielles.

Des plateformes technologiques comme leviers de fédération

Les infrastructures de recherche et de développement proposées dans le cadre de cette stratégie — qu'il s'agisse du tokamak WEST dans sa phase 3, de la plateforme tritium, des bancs d'essais pour les aimants ou pour les matériaux ou des démonstrateurs technologiques — joueront un rôle central dans cette dynamique collective.

Ces plateformes constituant à la fois des outils scientifiques de premier ordre et des vitrines et des outils de qualifications technologiques pour nos industriels, elles permettront de créer des points de convergence entre acteurs publics et privés, de mutualiser les coûts et les compétences, et d'offrir des environnements de validation pour les innovations industrielles.

Leur implantation sur le territoire national, en particulier à proximité des sites existants comme Cadarache pour la FCM ou du LMJ pour la FCI, renforcera l'attractivité de notre pays pour les investissements étrangers et contribuera à la structuration d'un véritable hub technologique dédié à la fusion. Cette concentration géographique des compétences et des infrastructures créera un effet d'entraînement pour l'ensemble de la filière, depuis la recherche fondamentale jusqu'à l'industrialisation.

Une stratégie de financement multi-sources et multi-niveaux

La réalisation de cette ambition nécessite une mobilisation sans précédent des ressources financières, envisageable par la combinaison des leviers européens, nationaux et privés.

L'augmentation des ressources pourrait être rendue possible grâce à un effet de levier : l'obtention de subventions publiques françaises supplémentaires permettrait de capter des financements complémentaires, institutionnels ou privés, comme ceux du prochain programme-cadre européen.

Au niveau européen, les programmes Euratom et Horizon Europe offrent également des opportunités majeures. Le budget conséquent alloué actuellement et dans le futur à la fusion dans le cadre d'Euratom et la création d'un partenariat public-privé européen dédié à cette technologie constituent des leviers essentiels. Les projets nationaux résonnent fortement avec les priorités définies dans le SRIA, en particulier sur les thématiques que sont le chauffage et le contrôle du plasma, les aimants supraconducteurs haute température, le cycle du tritium, les lasers haute énergie pour la fusion par confinement inertiel, ou encore les outils de simulation et d'intelligence artificielle.

Le programme EIC Accelerator, avec son enveloppe de 10 milliards d'euros, représente également une opportunité majeure pour soutenir nos start-ups et PME innovantes dans ce domaine. Une stratégie proactive de constitution de consortiums franco-européens avec les partenaires identifiés sera essentielle pour maximiser nos chances de succès dans ces appels à projets très compétitifs.

Sur le plan national, l'ensemble des instruments disponibles doit être mobilisé. Le programme France 2030, avec son volet dédié aux énergies décarbonées, constitue un levier majeur, comme en témoigne déjà le PEPR SupraFusion. Les Contrats de Plan État-Région (CPER) et les fonds européens régionaux (FEDER) pourront compléter ce dispositif pour le financement des infrastructures locales. L'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » offre par ailleurs une opportunité directe de financement pour plusieurs des projets structurants de cette stratégie.

Bpifrance jouera un rôle clé dans le soutien aux entreprises innovantes, à travers ses mécanismes de prêts innovants, de garanties pour les levées de fonds privées, et son accompagnement à l'internationalisation. La Banque des Territoires pourra quant à elle apporter son soutien pour les infrastructures locales.

Mobilisation des financements privés et innovation dans les modèles économiques

La réussite de cette stratégie passera également par une mobilisation significative des capitaux privés. Les investisseurs traditionnels — fonds de capital-risque spécialisés dans les *deep tech* et clean tech, *corporate venture capital* des grands énergéticiens, fonds souverains — devront être approchés avec des propositions ciblées mettant en avant le potentiel de retour sur investissement (pouvant exister à court moyen termes pour certaines technologies) et l'impact stratégique de celles-ci.

Des modèles économiques innovants devront être explorés pour diversifier les sources de financement. Les partenariats industriels, avec des mécanismes de co-développement technologique, de partage des risques et des retombées, ou de fourniture d'équipements en nature, pourraient réduire significativement les besoins en

trésorerie. Les consortiums sectoriels, sur le modèle de ceux qui ont fait leurs preuves dans le nucléaire de fission, permettront une mutualisation efficace des coûts et des compétences.

Une approche ciblée des grands groupes industriels sera particulièrement importante. Des énergéticiens comme TotalEnergies par exemple, avec leur expertise en gestion de grands projets énergétiques et leur intérêt pour la diversification de leur mix, constituent des partenaires naturels (approche retenue par exemple par l'UKAEA avec ENI).

Enfin, l'optimisation de la participation française au projet ITER pourrait passer par une actualisation des contributions en nature, notamment pour répondre à d'éventuels besoins de financement complémentaires, bénéficiant par ailleurs à l'engagement d'industriels français. Cette approche privilégierait la fourniture d'équipements industriels directs aux dotations financières, favorisant ainsi une montée en compétences technologiques et un retour d'expérience structurant pour nos entreprises nationales. En effet, ITER doit être considéré comme un banc d'essai grandeur nature pour nos technologies et nos industriels. Un effort particulier devra être consacré à systématiser le retour d'expérience vers nos entreprises nationales, et à préparer dès maintenant l'après-ITER en positionnant nos industriels sur les marchés des futures machines de fusion. Les compétences développées dans le cadre de ce projet devront être préservées et transférées vers les projets nationaux pour assurer la pérennité de l'expertise acquise.

Retombées économiques

Les retombées économiques de la stratégie proposée sont de plusieurs natures. Des retombées directes liées aux investissements dans les plateformes, moyens d'essais, maquettes, … Mais également des retombées indirectes par la valorisation des savoir-faire acquis avec des débouchés dans des secteurs d'activités autres que celui de la fusion.

Stratégie de communication

Pour garantir le succès de la proposition établie dans ce document, une stratégie de communication sera indispensable. Il s'agira tout d'abord de sensibiliser en continu les décideurs, tant au niveau national qu'européen. Des présentations ciblées devront être organisées auprès de la Commission européenne (notamment les DG ENER et RTD), des associations professionnelles comme l'EFA ou la FIA, et des organismes de recherche étrangers potentiellement partenaires.

Liste des acronymes

Acronyme	Signification
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique
AIF	Agence ITER France
ALP	Association Lasers Plasmas
AMIDEX	Aix Marseille Initiative d'excellence (idEx)
amU	Université d'Aix-Marseille
APED	Agence de programme pour la recherche sur les énergies décarbonées
ARC	Affordable, Robust, Compact
ASNR	Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
BA	Broader Approach (Approche élargie d'ITER)
BEST	Burning plasma Experimental Superconducting Tokamak
BMFTR	Bundesministerium für. Forschung, Technologie und Raumfahrt Federal Ministry of Research, Technology and Space
C2I	Comité Industriel ITER
CAEP	China Academy of Engineering Physics
CSA	Coordination and Support Action
CCSN	Commission canadienne de sûreté nucléaire
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CELIA	Centre Lasers Intenses et Applications (UMR – CEA, CNRS, Université de Bordeaux)
CFEDR	Chinese Fusion Engineering Demo Reactor
CFP	Composant face au plasma
CFS	Commonwealth Fusion Systems
CIFRE	Conventions industrielles de formation par la recherche
CPER	Contrats de Plan État-Région
CPN	Conseil de politique nucléaire
CRAFT	Comprehensive ReseArch Facility for Fusion Technology
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
DG-ENER	Directorate General – Energy (European Commission)
DG-RTD	Directorate General – Research and Innovation (European Commission)
DGRI	Direction générale de la recherche et de l'innovation
DOE	Department of Energy
DTT	Divertor Test Tokamak
ECRH	Electron Cyclotron Resonance Heating
EAST	Experimental Advanced Superconducting Tokamak
EFA	European Fusion Association
ETPT	Équivalent Temps Plein Travaillé
F4E	Fusion for Energy
FCI	Fusion par confinement inertiel
FCM	Fusion par confinement magnétique
FEDER	Fonds européens régionaux
FedSPF	Fédération Formation aux sciences des plasmas et de la fusion
FIA	Fusion Industry Association
FPP	Fusion Power Pant (centrale à fusion électrogène)
FR-FCM	Fédération de Recherche sur la Fusion par Confinement Magnétique — ITER
FuseNet	European Fusion Education Network

HADES	High heAt loaD tESt: plateforme de qualification des composants face au plasma activement refroidis
HTS	High Temperature Superconductor, Supraconducteur à haute température critique (HTc)
ICRH	Ion Cyclotron Resonance Heating
IFERC	International Fusion Energy Research Centre
IFMIF-DONES	International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented Neutron Source
IFMIF-EVEDA	International Fusion Materials Irradiation Facility – Engineering Validation and Engineering Design Activities
ISFIN	Institut fusion, fission et instrumentation nucléaires (amU)
ISITE	Initiative d'excellence Lorraine (idEx)
ILT	Institute for Laser Technology (Fraunhofer, Aix-la-Chapelle, Allemagne)
IAO	Institute for Applied and Precision Engineering (Fraunhofer, Iéna, Allemagne)
IFE	Inertial Fusion for Energy
INRIA	Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique
INSTN	Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires
IO	ITER Organization
IP Paris	Institut Polytechnique de Paris (École polytechnique, ENSTA, École nationale des ponts et chaussées (ENPC), ENSAE Paris, Télécom Paris, Télécom SudParis)
IPP	Max-Planck Institut für Plasmaphysik
ITER	International Thermonuclear Experimental Reactor
JET	Joint European Torus, Culham Centre for Fusion Energy, Royaume-Uni
JT-60SA	Japan Atomic Energy Research Institute – Tokamak 60 Super Advanced
KIT	Karlsruhe Institute of Technology
KSTAR	Korea Superconducting Tokamak Advanced Research
LLE	Laboratory for Laser Energetics
LLNL	Lawrence Livermore National Laboratory
LMJ	Laser Megajoule
LULI	Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (UMR – CEA, CNRS, École Polytechnique, Sorbonne Université)
LZH	Laser Zentrum Hannover (Allemagne)
MESRE	Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace
MTR	Material Testing Reactor
NBI	Neutral Beam Injection
NIF	National Ignition Facility
NNSA	National Nuclear Security Administration
ONR	Organisme National de Recherche
PETAL	PETawatt Aquitaine Laser
PPE	Programmation pluriannuelle de l'énergie
RAMI	Reliability, Availability, Maintainability, Inspectability
RJH	Réacteur Jules Horowitz
SBIR	Small Business Innovation Research
SPARC	Soonest/Smallest Private-Funded Affordable Robust Compact
SPEKTRE	Sheaths, Plasma Edge & Kinetic Turbulence Radio-frequency Experiment

STEP	Spherical Tokamak for Energy Production
TRL	Technology Readiness Level
UBx	Université de Bordeaux
UE	Union européenne
UKAEA	UK Atomic Energy Authority
ULo	Université de Lorraine
UMR	Unité Mixte de Recherche
UPSay	Université Paris-Saclay
WENRA	Western European Nuclear Regulators Association
WEST	Tungsten (W) Environment in Steady-state Tokamak
WNE	World Nuclear Exhibition

Auteurs

Cette stratégie nationale a été élaborée à l'initiative de la Direction générale de la recherche et de l'innovation (DGRI) du Ministère l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'espace et est portée par l'Agence de programme pour la recherche sur les énergies décarbonées (APED). Elle reflète la vision de la communauté nationale de la fusion, en particulier celle des organismes de recherche – le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) et le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), et de la Fédération de recherche sur la Fusion par confinement magnétique – ITER (FR-FCM). Elle associe également plusieurs établissements d'enseignement supérieur, dont l'École Polytechnique, l'Université d'Aix-Marseille, l'Université de Bordeaux et l'Université de Lorraine, ainsi que des unités mixtes de recherche telles que le Centre Lasers Intenses et Applications (CELIA) et le Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses (LULI). Des représentants industriels engagés dans le domaine de la fusion (Assystem, Comité Industriel ITER) ont également contribué à son élaboration.

MINISTÈRE
DE L'ENSEIGNEMENT
SUPÉRIEUR,
DE LA RECHERCHE
ET DE L'ESPACE

Liberté
Égalité
Fraternité