

RAPPORT D'ALERTE

RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES : UNE RELANCE STRATÉGIQUE POUR UNE SOUVERAINETÉ ÉNERGÉTIQUE DURABLE

SIE 28 - JUIN 2025



EXECUTIVE SUMMARY

La France dispose d'un atout technologique majeur, aujourd'hui sous-exploité : les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na). Cette technologie, développée dès les années 1960, permet de recycler le combustible usé et de produire de l'électricité tout en réduisant la quantité de déchets radioactifs à long terme. Elle constitue un levier clé pour renforcer l'indépendance énergétique et le leadership global de la France.

Or, malgré un demi-siècle d'avance technologique, cette filière a été affaiblie par des décisions politiques incohérentes et un manque de vision stratégique sur le long terme. Les arrêts successifs des projets Superphénix et ASTRID ont laissé la France sans feuille de route claire, alors même que d'autres grandes puissances (Russie, Chine, Inde et États-Unis) accélèrent dans ce domaine.

La relance de cette filière devrait s'appuyer sur une complémentarité forte entre les réacteurs à eau pressurisée actuels (REP), le développement des petits réacteurs modulaires (PRM) et les réacteurs RNR de grande puissance. Ces derniers permettent le recyclage du combustible nucléaire usé stocké en France, et offriraient donc au parc nucléaire français une autonomie de plusieurs milliers d'années, sans aucune importation de matière première.

L'heure où la transition écologique s'accélère, où les tensions géopolitiques s'exacerbent et où la dépendance aux matières combustibles constitue une vulnérabilité critique, il est nécessaire d'agir en faveur de la relance des RNR et de capitaliser sur la maîtrise de la technologie sodium.

Introduction

Depuis plusieurs années, les Français prennent conscience d'un effritement silencieux : la hausse continue des prix de l'énergie, les menaces de black-out, les alertes sur la fragilité du réseau. Ce que l'on croyait stable et acquis — un accès sûr, abondant et bon marché à l'électricité — peut désormais vaciller.

Dans ce contexte, il n'est plus possible de continuer à naviguer à vue. La France avait un atout stratégique : son énergie nucléaire. Elle l'a laissée s'affaiblir. Il faut désormais la reconquérir, non par nostalgie, mais parce qu'elle est la condition de notre indépendance énergétique, de notre souveraineté industrielle et de notre stabilité économique. Un autre péril s'annonce déjà : celui d'une dépendance durable aux importations d'énergie, dans un monde où chaque kilowatt devient un levier géopolitique.

« **En France, on n'a pas de pétrole, mais on a des idées** », affirmait déjà l'Agence pour les économies d'énergie (AEE) en 1970. Encore aurait-il fallu aller au bout de ces idées. Popularisée par Valéry Giscard d'Estaing en 1973, cette formule portait une ambition forte : celle de faire du progrès technique, appuyé par une vision politique claire et cohérente, le garant de notre indépendance énergétique à long terme.

À cette époque, la France détenait un véritable joyau technologique : la filière des **Réacteurs à Neutrons Rapides refroidis au sodium (RNR-Na)**. Visionnaire, cette technologie proposait déjà des réponses concrètes aux défis d'aujourd'hui : prolongation du cycle du combustible nucléaire, réduction des déchets, limitation des importations d'uranium naturel et renforcement de notre souveraineté énergétique. Elle portait en elle un modèle énergétique souverain, circulaire et durable, qui faisait de la France une référence mondiale dans le nucléaire.

En lançant son programme de réacteurs à neutrons rapides (de Rapsodie à ASTRID en passant par Phénix et Superphénix), la France s'était dotée d'une stratégie claire, structurée et séquencée. Forte de plus de 60 années d'exploitation cumulée de cette technologie, elle disposait d'une avance technologique incontestable. Pourtant, cette filière a été progressivement démantelée, non par manque de résultats, mais sous l'effet de revirements politiques successifs : l'arrêt brutal de Superphénix en 1997, suivi de l'abandon du programme ASTRID en 2019, a scellé le recul d'une des plus grandes aventures industrielles et scientifiques françaises.

Si le Conseil de Politique Nucléaire (CPN) de mars 2025 marque un revirement salutaire en annonçant la relance d'un programme RNR, cette décision ne peut rester symbolique. Elle doit s'accompagner d'une véritable stratégie industrielle, dotée de moyens et d'un calendrier précis. Cela suppose d'abord de clarifier la position de l'État vis-à-vis de sa filière historique, la filière sodium. Malgré la poursuite des efforts de R&D par les leaders historiques (CEA, EDF, Framatome) l'absence de stratégie industrielle claire pour cette filière pourrait affaiblir progressivement la position technologique de la France.

Aujourd'hui, ce désengagement fait peser un risque historique pour le pays : celui d'une colonisation technologique inversée, où la France, jadis leader mondial, pourrait devenir à terme cliente de technologies étrangères dans un secteur qu'elle a longtemps dominé. Car États-Unis, Chine, Russie ont su voir dans cette technologie tout son potentiel : tous ont fait le choix d'une volonté politique affirmée, d'une continuité stratégique et d'une mobilisation industrielle résolue autour de cette technologie d'avenir.

Et si à court terme l'approvisionnement de la France en uranium naturel reste maîtrisé pour notre filière de réacteurs actuels, nous restons cependant structurellement dépendants d'importations pour une ressource que nous ne possédons pas sur notre sol européen : l'uranium. Cette vulnérabilité géopolitique pourrait devenir un point de fragilité stratégique à l'horizon des prochaines décennies, d'autant plus dans un contexte de renouveau du nucléaire à l'échelle internationale. A contrario, les réacteurs à neutrons rapides, en permettant de valoriser le combustible usé de nos réacteurs actuels et futurs, offrent une voie concrète vers une indépendance durable et une meilleure maîtrise des coûts face à cette contrainte en réduisant drastiquement nos besoins en approvisionnement primaire.

En développant ses RNR-Na, la France pourrait exploiter des ressources énergétiques présentes sur son territoire pour plusieurs millénaires, renforçant ainsi durablement sa sécurité énergétique et la compétitivité des secteurs qui en bénéficient. Loin d'être une alternative, cette filière s'inscrit en parfaite complémentarité avec la filière historique des réacteurs à eau pressurisée (REP), formant ensemble un modèle nucléaire intégré et pérenne.

La maturité de la filière RNR au sodium se reflète notamment dans sa mention dans le scénario **Terrawater**, porté par **les Voix du Nucléaire**¹. Ce scénario repose sur deux hypothèses structurantes : la maturité technologique, et la souveraineté industrielle. C'est à ce titre qu'il intègre les réacteurs surgénérateurs au sodium, appelés à prendre le relais des EPR2 à partir de 2050. La mise à jour du scénario, attendue pour fin 2025 ou début 2026, devrait probablement confirmer cette orientation.

Cependant faute d'une relance claire, forte et durable dans la filière RNR-Na et de son cycle combustible associé, la France s'expose à un double déclasserment : devenir dépendante de technologies étrangères qu'elle a elle-même contribué à développer, tout en restant captive des fluctuations d'une ressource critique, l'uranium qu'elle ne possède pas sur son territoire.

EXECUTIVE SUMMARY	2
INTRODUCTION	3
PARTIE 1 - ANTICIPER LES RISQUES DE DEPENDANCE ENERGETIQUE.....	6
1. LE GAZ NATUREL, UNE DEPENDANCE RISQUEE, AU PRIX ELEVE	6
2. SECURITE ENERGETIQUE : LE ROLE STRATEGIQUE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE.....	8
3. LES RNR-NA : UN HERITAGE STRATEGIQUE DANS L'HISTOIRE DU NUCLEAIRE FRANÇAIS	11
a. RNR : Enjeux et complémentarité avec la filière REP	11
b. Histoire des RNR-Na en France.....	12
PARTIE 2 - ALERTE SUR LA FILIERE SODIUM : QUAND L'INCOHERENCE POLITIQUE SABORDE L'EXCELLENCE FRANÇAISE	15
1. SUPERPHENIX, ASTRID : FIGURES D'UN LEADERSHIP FRANÇAIS AVORTE	15
a. Le « stop-and-go » permanent comme marqueur d'une défaillance stratégique de l'État	16
b. Forcer l'État à clarifier sa position : entre silence stratégique et contradictions flagrantes	17
2. PARALYSIE FRANÇAISE, OFFENSIVE ETRANGERE : LA COURSE MONDIALE AUX RNR	18
a. Rosatom ou l'État en action : un instrument de puissance au service d'un État-stratège	18
b. La Chine ou la trajectoire planifiée	19
c. Inde : une autonomie stratégique en construction	20
d. États-Unis : capital-risque et État régulateur	20
e. Reprendre sans répéter : le Japon entre mémoire technologique et prudence réglementaire	21
3. RETOUR D'EXPERIENCE DES MODELES CONCURRENTS A LA FRANCE.....	22
a. Une stratégie publique explicite.....	22
b. Une industrie pilote.....	22
c. Un écosystème industriel à reconstruire.....	22
d. La nécessité de la pédagogie.....	23
PARTIE 3 - PETITS REACTEURS MODULAIRES ET FILIERE RNR-NA : UNE ALLIANCE GAGNANTE POUR UNE RELANCE INDUSTRIELLE A MOINDRE RISQUE	24
1. LES PETITS REACTEURS MODULAIRES : QU'EST-CE QUE C'EST ?.....	25
2. CHALEUR INDUSTRIELLE DECARBONEE : PRM, UNE SOLUTION ADAPTEE	25
3. SYNERGIES ENTRE LA FILIERE DE PUISSANCE ET PRM	28
4. DEVELOPPER LES PETITS REACTEURS MODULAIRES POUR MAINTENIR ET DEVELOPPER LES COMPETENCES CRITIQUES.....	30
5. PRM : UN MODELE DE FINANCEMENT INNOVANT POUR REVITALISER LA FILIERE NUCLEAIRE	31
6. UNE INITIATIVE INDUSTRIELLE QUI DOIT ETRE SOUTENUE PAR LES POUVOIRS PUBLICS POUR REpondre AUX PROBLEMATIQUES DE LA FILIERE.....	32
CONCLUSION	33
ANNEXE 1 : GLOSSAIRE.....	35
1. TECHNOLOGIE ET CONCEPTS NUCLEAIRES	35
2. GEOPOLITIQUE ET APPROVISIONNEMENT	35
3. INSTITUTIONS ET DOCUMENTS DE REFERENCE.....	36
ANNEXE 2 : COMPRENDRE LES REACTEURS A NEUTRONS RAPIDES (RNR) : UNE TECHNOLOGIE AU SERVICE DE L'EFFICIENCE ET DE LA SOUVERAINETE ENERGETIQUE	37
1. HISTORIQUE ET FONCTIONNEMENT DES RNR.....	37
2. LES RNR ET LA FERMETURE DU CYCLE.....	38
3. SODIUM, PLOMB OU SEL FONDUS : QUELLES OPPORTUNITES ?	38
ANNEXE 3 : BIBLIOGRAPHIE.....	40

Partie 1 - Anticiper les risques de dépendance énergétique

1. Le gaz naturel, une dépendance risquée, au prix élevé

Avant la guerre en Ukraine, les économies européennes affichaient une dépendance structurelle au gaz naturel, qui jouait un rôle central dans leur fonctionnement énergétique et industriel. En 2022, le gaz représentait environ 25% de la consommation d'énergie primaire de l'Union européenneⁱⁱ. Ce combustible fossile était massivement utilisé dans le chauffage résidentiel, dans la production d'électricité (notamment en Italie, en Allemagne, aux Pays-Bas, au Royaume-Uni et en Espagne), ainsi que dans des secteurs industriels clés comme la chimie, la métallurgie ou l'agroalimentaire.

Cette dépendance a été aggravée par la diminution de la production domestique : entre 2010 et 2020, celle-ci avait chuté de près de 50 %, poussant les États membres à augmenter leurs importations. En parallèle, les capacités de stockage restées limitées et inégalement réparties entre pays ont affaibli la sécurité énergétique tributaire européenne, devenue tributaire d'une logistique fragile et de marchés internationaux volatils.

La stratégie de transition énergétique adoptée par plusieurs pays européens repose à la fois sur l'abandon progressif du charbon (une décision fondée sur des impératifs climatiques évidents) et sur la sortie du nucléaire, motivée davantage par des considérations politiques que scientifiques (notamment en Allemagne et en Belgique). Ce double retrait a, de fait, renforcé le rôle du gaz comme « énergie de transition », censée compenser l'intermittence des énergies renouvelables et accompagner leur montée en puissance.

Cette centralité du gaz dans l'équilibre économique et énergétique européen en faisait une ressource critique, exposant l'Europe à un risque géopolitique majeur : celui de voir sa sécurité énergétique instrumentalisée à des fins stratégiques par les principaux pays producteurs, au premier plan desquels la Russie. C'est ainsi que le gaz naturel s'est naturellement imposé comme un levier d'influence dans les rapports de force eurorusses.

Le 24 février 2022, le début de la guerre Russie-Ukraine entraîne une envolée vertigineuse du prix de l'énergie en Europe. Le gaz en premier lieu, avec un pic à 300 €/MWh fin août (contre 20 €/MWh pré-crise). Cette flambée des prix a fortement fragilisé l'industrie européenne. De nombreuses usines ont ralenti ou suspendu leur production, incapables de faire face à la hausse des coûts énergétiques, ce qui a entraîné des pertes d'emplois et des fermetures temporaires.

L'absence de retour aux niveaux de prix pré-guerre a entériné le déclin d'une partie de l'industrie européenne et suscité de vives réactions des milieux politiques en faveur d'un accroissement d'une meilleure résilience via une réorientation du modèle énergétique européen, un risque majeur pour la sécurité énergétique du continent.

Cependant, derrière l'élan politique affiché, une autre dynamique s'est installée : celle d'un maintien, voire d'un approfondissement, de la place du gaz dans le paysage énergétique européen qui porte atteinte à sa souveraineté.

L'invasion russe a déclenché une frénésie d'investissements dans le gaz, consolidant sa place dans le mix européen. Cette ruée vers les infrastructures gazières est encouragée et financée par des acteurs majeurs, à commencer par l'Union Européenne, et les États-Unis.

Dans le cadre du plan *REPowerEU* visant à sécuriser l'approvisionnement énergétique, Bruxelles a prévu 10 milliards d'eurosⁱⁱⁱ pour cofinancer des terminaux méthaniers et autres infrastructures gazières. Concrètement, alors que l'Europe disposait de 38 terminaux GNL en 2021, elle en planifie neuf autres^{iv} nouveaux terminaux sont en cours de construction et 38 autres projets ont été proposés, ce qui augmentera largement la capacité d'importation gazière du continent.

Les États-Unis, de leur côté, soutiennent activement cette expansion. Washington a notamment vu dans l'Initiative des Trois Mers^v, un forum réunissant 13 pays d'Europe centrale et orientale, comme un instrument clé pour réduire l'emprise énergétique de la Russie sur l'Europe centrale et orientale. En soutenant la création d'infrastructures nord-sud capables d'acheminer notamment du GNL américain, les États-Unis cherchent à réorienter durablement les flux énergétiques du continent. À travers la *Development Finance Corporation* (DFC), Washington finance environ 34,5 % du fonds d'investissement dédié à l'initiative (3SIIF), qui soutient des projets majeurs comme le terminal GNL de Krk en Croatie ou les interconnexions gazières Pologne-Lituanie et Bulgarie-Roumanie. Ce fonds s'inscrit dans un ensemble de 143 projets d'infrastructures évalués à 111 milliards d'euros, ce qui démontre l'ampleur des moyens mobilisés pour restructurer le paysage énergétique européen au bénéfice d'alliés occidentaux.

Les États membres, individuellement, ont pris des initiatives pour diversifier leur approvisionnement en gaz en allant chercher des sources hors d'Europe.

L'Allemagne, pourtant frappée au cœur par l'arrêt des gazoducs Nord Stream, s'est ainsi lancée dans une course aux terminaux gaziers. Berlin, qui ne comptait aucun terminal GNL il y a peu, a affrété en un temps record des unités flottantes de regazéification. Deux FSRU^{vi} (unités flottantes de stockage et de regazéification) ont été installées dès l'hiver 2022-2023, l'une à Wilhelmshaven, l'autre à Lubmin, grâce à un soutien public de plusieurs milliards d'euros, et d'autres terminaux sont planifiés d'ici la fin de la décennie.

L'Italie, également frappée par l'arrêt des livraisons russes, a investi dans de nouveaux terminaux de regazéification à Piombino et Ravenna, tout en nouant des partenariats énergétiques renforcés avec l'Algérie et la Libye. En 2023, ENI a conclu un accord de 8 milliards de dollars avec Tripoli^{vii} pour exploiter des gisements offshore, illustrant la volonté de Rome de devenir un point d'entrée stratégique du gaz méditerranéen vers l'Europe.

De plus, malgré les sanctions et les discours de rupture, l'Europe reste largement perméable au gaz russe. En 2024, les importations de GNL en provenance de Russie ont même augmenté, avec des volumes dépassant les 25 milliards de m³/an^{viii}. La France, la Belgique et l'Espagne continuent de recevoir du gaz liquéfié russe via leurs terminaux méthaniers, profitant de contrats à prix cassés que Moscou utilise pour conserver des parts de marché.

Parallèlement, les livraisons via le gazoduc Turk Stream reliant la Russie à la Turquie puis à l'Europe du Sud-Est, ont connu une hausse notable : les flux ont augmenté de 16 %^{ix} au premier trimestre 2025 par rapport à l'année précédente, alimentant notamment la Hongrie, la Serbie et la Slovaquie. Le Kremlin envisage même d'élargir cette route en renforçant les capacités du réseau ou en créant un hub gazier en Turquie pour contourner les points de friction politiques^x. Enfin, en 2024, un investisseur privé américain, Stephen Lynch^{xi}, s'est positionné pour racheter les actifs de la société exploitant le gazoduc Nord Stream, avec l'objectif de « dépolitiser » l'infrastructure et de la rouvrir une fois la guerre terminée. Cette perspective témoigne d'une réalité dérangeante : l'idée d'un redémarrage des flux russes n'est pas exclue.

La guerre en Ukraine n'a ainsi pas mis fin à la dépendance européenne au gaz : elle en a simplement déplacé les contours. Les investissements colossaux réalisés dans les terminaux méthaniers, les interconnexions et les partenariats d'approvisionnement traduisent une stratégie de contournement plus que de rupture. Qu'il provienne des États-Unis, du Maghreb, de la Russie ou du Golfe, le gaz reste au cœur du système énergétique européen. Et avec des infrastructures coûteuses à rentabiliser sur plusieurs décennies, nombre d'États membres se retrouvent structurellement incités à maintenir un haut niveau d'importation. La dépendance européenne au gaz ne se limite cependant pas à l'accès aux ressources : elle concerne aussi la maîtrise des équipements. Alors que la France a repris le contrôle des turbines nucléaires Arabelle, les turbines à gaz sont restées sous contrôle étranger, révélant une faille stratégique persistante.

Face à ce verrouillage, le changement de paradigme dans la géopolitique (en premier lieu les relations entre les États-Unis et l'Europe) le développement du nucléaire, et en particulier la technologie des réacteurs à neutrons rapides, pourrait offrir à long terme une voie souveraine et durable pour rééquilibrer la stratégie énergétique européenne et de renforcer la sécurité de notre continent.

2. Sécurité énergétique : le rôle stratégique du combustible nucléaire

Une véritable politique nucléaire repose sur deux piliers indissociables : la maîtrise des réacteurs, mais aussi celle du combustible qui les alimente. Si les réacteurs d'aujourd'hui, les fameux réacteurs à eau pressurisée (REP) incarnent la vitrine technologique de la filière nucléaire, leur fonctionnement dépend de la disponibilité des ressources en uranium et des capacités en enrichissement. C'est toute une chaîne industrielle et stratégique qui entre en jeu.

L'uranium naturel est composé d'environ 99,3% d'uranium-238, un isotope non fissile et de 0,7% d'uranium-235, l'isotope fissile utilisé dans les réacteurs nucléaires. La part directement exploitable d'uranium est donc limitée. Selon les estimations de l'OCDE-NEA et de l'AIEA^{xii}, les ressources d'uranium actuellement identifiées pourraient permettre d'alimenter les réacteurs nucléaires jusqu'aux années 2080, au rythme de consommation actuel et sans avancée majeure dans les technologies de recyclage ou d'exploration. Toutefois il est à noter que de nouvelles ressources pourraient être découvertes à mesure que la demande évolue et que l'exploration se poursuit, notamment si les conditions économiques deviennent plus favorables.

Cependant en France, l'approvisionnement en uranium dépend à 100% des importations extra-européennes, créant ainsi une dépendance stratégique. La France doit donc être capable de s'appuyer et de développer un réseau de fournisseurs fiables, lui assurant un approvisionnement durable en uranium pour son parc nucléaire, et ce à moyen et long-terme. À court terme, la France bénéficie d'un approvisionnement sécurisé en uranium, assuré par les capacités industrielles d'Orano. Mais parallèlement, cette dépendance pose une autre question.

Si le combustible ne représente aujourd'hui qu'une part marginale des coûts d'exploitation des centrales (entre 5 et 10 %), cette situation pourrait évoluer avec la relance du nucléaire à l'échelle mondiale. Les États-Unis ont par exemple prévu de quadrupler leur capacité nucléaire d'ici 2050. L'alliance européenne du nucléaire envisage quant à elle une puissance de 150 GW installée en 2050 (contre 100GW aujourd'hui). À la lumière du retour mondial au nucléaire, quelle sera alors la dynamique future des prix de l'uranium, et dans quelle mesure cela influencera-t-il la compétitivité économique du nucléaire ?

La politique d'approvisionnement française en uranium s'est résolument orientée vers la diversification des sources depuis 2020, catalysée par le retrait français du Sahel (avec une saisie des mines d'Orano au Niger en 2024^{xiii}) et la guerre en Ukraine (la Russie étant un producteur d'uranium). La France a récemment signé un accord avec le Kazakhstan^{xiv} (40% de l'approvisionnement français) et la Mongolie, deux pays pourtant sous sphère d'influence russe et chinoise du fait de leur proximités géographique et historique et donc bien éloignés de la sphère d'influence traditionnelle française. Cette stratégie proactive témoigne d'une réelle capacité d'adaptation. Par ailleurs, d'autres pays producteurs d'uranium peuvent apparaître comme des fournisseurs fiables : le Canada^{xv}, où Orano exploite une importante mine en Saskatchewan, et l'Australie, autre acteur majeur du marché. Cette diversification maîtrisée des sources d'approvisionnement constitue un atout majeur pour la sécurité énergétique du pays.

Dans un second temps, la quantité de réserve prouvée ne pose pas de problème à court et moyen terme, la réflexion doit donc prendre un caractère plus visionnaire : en effet, les réserves d'uranium prouvées assurent des approvisionnements sécurisés à court et moyen terme tandis que de nouveaux gisements d'uranium pourraient être découverts, augmentant ainsi la quantité de réserves prouvées et en exploitation future (gisement de 30 millions de tonnes en Chine en 04/2025, plusieurs gisements au Canada en 2024-2025, États-Unis en 2025)^{xvi}.

Finalement, l'approvisionnement à court et moyen terme est sécurisé par la diversification des approvisionnements. Cependant, à long-terme, certains éléments exposent la France à plusieurs risques :

Une contraction de l'offre mondiale au rythme actuel de la consommation (OCDE-NEA & AIEA, 2025) en parallèle d'une forte augmentation de la demande mondiale (portée par la croissance démographique et particulièrement l'essor de secteurs fortement consommateurs d'électricité pour assurer leur transition énergétique). Une forte augmentation de la demande, sans découverte de nouvelles ressources, mènera donc indéniablement à une augmentation progressive des coûts de l'uranium sur les marchés mondiaux. Une augmentation de ces coûts entraînera des répercussions importantes sur le coût de l'électricité en France avec des conséquences sur toutes les filières économiques nationales.

Plus important encore, la nouvelle géopolitique, où la guerre économique occupe une place centrale, engendre de nombreuses incertitudes. Des risques géopolitiques croissants pèsent sur l'accès aux gisements d'uranium à travers le monde et à son transport. Le Canada et l'Australie, bien qu'alliés de la France, entretiennent des liens historiques avec de la sphère d'influence américaine, en témoigne l'affaire des sous-marins français en Australie. Le Kazakhstan et la Mongolie, malgré des succès éclatants de la diplomatie économique française, restent des pays enclavés entre leurs grands voisins russes et chinois. La Chine et les États-Unis favoriseront naturellement leurs intérêts économiques.

Ces éléments de risque se posent donc tous à long-terme. Il est par conséquent impératif de développer la filière nucléaire actuelle, mais également d'adopter cette vision sur le long terme pour se prémunir d'une très probable montée des prix et les risques de dépendance tout en alimentant l'économie d'une énergie résiliente et bas carbone.

La question de l'uranium ne relève donc plus simplement de la dimension géologique, mais bien de la souveraineté nationale. Si cette vulnérabilité est structurelle, elle n'est pas inévitable. La France dispose en effet de ressources dormantes : les centaines de milliers de tonnes d'uranium appauvri, une matière qu'elle pourrait valoriser dans un nouveau type de réacteurs : les réacteurs à neutrons rapides. À travers son programme de développement des RNR, la France avait su avoir, dès les années 70, une vision stratégique en cherchant à développer cette filière pour renforcer son indépendance énergétique.

Il serait dès lors facile de retourner cet argument contre la filière. Si les ressources aujourd'hui stockées sur le territoire français sont effectivement non dégradables, pourquoi alors investir, dès aujourd'hui et se lancer dans les aléas de la production de nouvelle technologie et de son cycle associé ? Ne suffirait-il pas à la France de se contenter de ses réacteurs actuels ?

Quoique séduisante, cette pensée est issue d'une vision à court terme dont nous avons trop longtemps souffert. Il est urgent de retrouver un État stratège. Car il ne suffit pas de savoir conceptualiser un réacteur nucléaire pour en matérialiser sa conception, il faut nécessairement disposer de l'expertise, maîtriser la chaîne d'approvisionnement. Et tandis que la France semble décrocher, d'autres puissances, au contraire, intensifient leurs efforts dans la course technologique.

3. Les RNR-Na : un héritage stratégique dans l'histoire du nucléaire français

a. RNR : Enjeux et complémentarité avec la filière REP

Dans de nombreux pays, le combustible nucléaire n'est pas recyclé. Une fois usé, il est bien souvent considéré comme un déchet, et donc envoyé en stockage géologique : c'est ce que l'on appelle un « cycle ouvert ».

En France, le combustible nucléaire usé est retraité à l'usine de retraitement d'Orano à la Hague^{xvii}. On parle ici d'un cycle semi-fermé. Ce cycle « semi-fermé » permet de récupérer le plutonium et l'uranium résiduel contenus dans le combustible déjà utilisé, puis de les réutiliser sous forme d'un nouveau combustible appelé MOX (mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium) dans certains réacteurs à eau légère. En 2017, sur les 58 réacteurs français, 22 réacteurs nucléaires d'EDF utilisaient ce combustible recyclé.

Mais la France pourrait franchir une étape supplémentaire en visant le multirecyclage de son combustible usé, une démarche appelée « fermeture du cycle du combustible ». Cette approche permettrait de valoriser pleinement les matières dont certaines aujourd'hui inexploitées, notamment le plutonium issu de combustibles MOX usés et l'uranium appauvri, abondant sur le territoire national, suffisants pour couvrir les besoins énergétiques pour des siècles^{xviii}. Ces matières recyclées pourraient devenir une ressource stratégique si elles étaient exploitées par une nouvelle génération de réacteurs : les réacteurs à neutrons rapides (RNR). En optant pour un cycle fermé appuyé sur les RNR-Na, la France renforcerait son indépendance énergétique, tout en optimisant l'usage du combustible et en réduisant volume et durée de vie des déchets nucléaires.

Si les réacteurs à neutrons rapides (RNR) étaient développés et intégrés au parc nucléaire, ils permettraient d'exploiter de manière bien plus efficace les ressources nucléaires déjà extraites. En produisant davantage d'énergie à partir du même combustible, ils contribueraient à prolonger significativement la durée d'utilisation des réserves disponibles. De plus, grâce à leur fonctionnement à des températures plus élevées que celles des réacteurs classiques, la chaleur produite pourrait être utilisée non seulement pour une production électrique plus efficace, mais aussi pour satisfaire les besoins industriels nécessitant une chaleur élevée, favorisant ainsi la décarbonation de certains procédés.

Par ailleurs, le développement des RNR entraînerait une réduction de la quantité, de la durée et de la radiotoxicité des déchets radioactifs, simplifiant leur gestion à long terme, permettant de maximiser l'acceptabilité du nucléaire. Enfin, leur utilisation contribuerait à diminuer la dépendance aux importations de matières premières, renforçant ainsi la sécurité énergétique nationale.

b. Histoire des RNR-Na en France

La France a historiquement fait preuve d'un engagement politique, financier et technologique considérable en faveur de la filière RNR-Na, en parallèle du développement des REP. La création de trois réacteurs a marqué les grandes étapes de cette filière : Rapsodie (réacteur expérimental), Phénix (prototype de démonstration) et Superphénix (prototype industriel), conduisant au projet ASTRID, démonstrateur de 4^e génération, en tant que résultat ultime.

Trois réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) ont ainsi été développés en France. Un dernier, **Astrid** n'a finalement pas abouti faute de volonté politique.

Rapsodie

Rapsodie est le premier réacteur expérimental à neutrons rapides français, de type boucle, refroidi au sodium. Il a atteint une puissance thermique de 40 MW après montée en charge. Conçu pour tester la technologie sodium-rapide et la plage thermique (400–550 °C), il a validé de nombreux éléments clés pour les réacteurs surgénérateurs. Une étape cruciale en termes de recherche dont les leçons ont permis la construction du réacteur **Phénix**. Le réacteur a opéré de 1967 à 1983.

Phénix

Il s'agissait d'un prototype de 250 MWe construit à Marcoule et raccordé au réseau en 1973. De taille intermédiaire, il affichait une puissance environ cinq fois inférieure à celle de Superphénix. Son objectif était de démontrer la viabilité industrielle de la filière RNR-Na, ainsi que la capacité d'exploitants comme EDF et le CEA à assurer son fonctionnement. Phénix a été en service de 1974 à 2009 ; il est en cours de démantèlement.

Superphénix

Construit à Creys-Malville, ce surgénérateur affichait une puissance de 3 000 MW thermiques et 1 240 MWe, bien supérieure à celle des réacteurs à eau pressurisée français de l'époque (900 MWe). Initialement conçu comme la tête de série d'une filière industrielle, il est resté un prototype isolé. Le projet était porté par la société NERSA, réunissant EDF (51 %), l'italienne ENEL (33 %) et l'allemande RWE (16 %). Superphénix a été couplé au réseau en 1985, mais a été définitivement arrêté en 1997 par le gouvernement Jospin, à l'issue de vingt années de controverses. Il est aujourd'hui en cours de démantèlement.

Définition des surgénérateurs

Un surgénérateur est un type de réacteur nucléaire capable de **produire plus de combustible fissile qu'il n'en consomme**. Il transforme des matériaux fertiles comme l'uranium-238 en isotopes fissiles, augmentant ainsi les ressources utilisables. Il permet donc d'étendre considérablement la durée de vie des réserves d'uranium en permettant la revalorisation des déchets nucléaires.

ASTRID (Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration)

Ce projet de démonstration d'un réacteur de 4^e génération, également refroidi au sodium, a été lancé en 2010 par le CEA, à la suite de la loi de 2006 sur la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Il associait le CEA et dix industriels, dont Areva, chargée de la conception de la cuve, et EDF, mobilisée pour son expertise en sûreté et en exploitation. ASTRID devait tirer parti des retours d'expérience de Phénix et Superphénix, tout en intégrant des innovations majeures destinées à renforcer la sécurité. Le projet était structuré en plusieurs phases : AVP1 (2010–2012) et AVP2 (2013–2015), et visait à développer un démonstrateur industriel à court ou moyen terme. Il n'a cependant pas abouti à une réalisation concrète.

Ces réacteurs incarnent des avancées scientifiques et techniques majeures liées à la technologie des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na). Ils peuvent produire plus de matière fissile qu'ils n'en consomment.

La recherche autour des RNR-Na a ainsi permis des avancées scientifiques et techniques majeures liées à la technologie, permettant à la France de démontrer son leadership en matière d'innovation dans le nucléaire. L'expérience acquise au fil de 46 années d'exploitation combinées de Phénix et Superphénix a permis de constituer un corpus solide de connaissances sur le comportement des matériaux, la sûreté et l'exploitation du sodium. Chaque itération de Rapsodie à Superphénix a permis d'augmenter l'expertise française dans la filière RNR-Na. Phénix a validé les options fondamentales. Superphénix a fourni des enseignements importants, notamment pour la gestion du combustible et le démantèlement. ASTRID devait intégrer ces leçons et permettre un déploiement industriel.

Le circuit primaire intégré, utilisé dans Phénix et Superphénix, constitue un élément clé de la sûreté intrinsèque, qu'ASTRID visait à renforcer. L'expérience française en matière de RNR-Na place aujourd'hui cette filière comme la plus avancée des technologies à neutrons rapides. Enfin, ce programme français a également permis d'acquérir une expérience précieuse dans la fabrication et le retraitement du combustible MOX, contenant une forte proportion de plutonium. Cette expertise est essentielle pour fermer le cycle du combustible nucléaire. La technologie au sodium apparaît donc naturellement comme l'héritière légitime pour relancer un programme RNR en France grâce à sa maturité, sa crédibilité gagnée et l'important héritage français dans ce domaine.

En comparaison avec d'autres filières, la technologie par refroidissement au sodium est donc aujourd'hui la plus mature et donc crédible pour arriver le plus rapidement sur le marché. Parmi les systèmes envisagés pour la 4^e génération (sodium, plomb, gaz, sels fondus), seule la filière RNR-Na dispose d'une base de connaissances suffisamment établie en France pour un développement rapide. Les autres concepts font encore face à des incertitudes et des verrous technologiques qui pourraient retarder le déploiement opérationnel de la technologie. Cela n'entache pas pour le moins le futur de ces différentes filières.

L'objectif final de la France sur sa filière de puissance reste de développer une technologie de production électrique compétitive à l'échelle industrielle. La construction de prototypes comme Superphénix, avec des partenaires européens, visait aussi à mutualiser les risques financiers et à développer un marché d'exportation. Malgré les défis économiques rencontrés, notamment par Superphénix, l'objectif était une réussite industrielle et commerciale. L'important effort en R&D et l'expérience acquise ont généré un capital de connaissances et de propriété intellectuelle considérable, constituant un avantage stratégique pour la France dans le domaine du nucléaire avancé qui bénéficiait non seulement de cette expertise technique, mais d'un statut de leader mondial dans cette technologie.

Consciente de ces enjeux stratégiques, la présidence de la République a récemment annoncé la reprise de la filière RNR en France à travers un communiqué^{xx}. Aucune technologie spécifique n'a été mentionnée malgré la longue expérience française avec les RNR-Na. Une question se pose. Est-ce une simple omission ou l'État envisage-t-il l'abandon d'une technologie mature et connue en faveur des filières plomb et sels fondus encore expérimentales ?

Forte d'un savoir-faire unique en matière de retraitement et de recyclage du combustible nucléaire, la France occupe une position de leader mondial dans la gestion du cycle du combustible. Ce leadership repose sur des décennies d'expérience industrielle, notamment à l'usine de La Hague, et sur une vision stratégique de long terme. Mais pour conserver cette avance et répondre aux enjeux énergétiques et environnementaux à venir, il est désormais indispensable de relancer activement la filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR). Ces réacteurs sont les seuls capables d'assurer le multirecyclage du combustible, de valoriser les stocks d'uranium appauvri et de réduire drastiquement la quantité et la radiotoxicité des déchets à vie longue.

Dans un contexte où les États-Unis viennent d'annoncer leur volonté de développer leur propre filière de retraitement, la France doit affirmer son rôle moteur en poursuivant l'innovation sur les RNR et en s'engageant résolument vers un cycle du combustible totalement fermé, durable et souverain.

Partie 2 - Alerte sur la filière sodium : quand l'incohérence politique saborde l'excellence française

À l'heure où les tensions géopolitiques s'exacerbent, où les prix de l'uranium sont susceptibles à l'augmentation où l'urgence climatique impose des choix industriels courageux, la filière RNR-Na aurait pu, dès la fin des années 80, être un énième symbole d'un particularisme français associant progrès technologique et souveraineté nationale. Pourtant, les reculs successifs du politique, avec l'abandon de Superphénix puis d'ASTRID, interrogent. Ces renoncements n'ont pas été dictés par des impasses technologiques, mais bien par une incapacité à inscrire l'action politique dans une temporalité de long terme. Ils symbolisent une forme de déconnexion entre la parole stratégique et les actes industriels, et incarnent l'un des plus grands gâchis technologiques de l'histoire industrielle française.

1. Superphénix, ASTRID : Figures d'un leadership français avorté

L'histoire des réacteurs à neutrons rapides en France illustre à elle seule l'impossibilité persistante de maintenir une stratégie industrielle cohérente sur plusieurs décennies. Le réacteur de démonstration Superphénix, en service moins de dix ans après le second choc pétrolier, représentait le symbole d'un leadership français : celui du plus puissant réacteur à neutrons rapides jamais opéré à l'heure actuelle.

Face aux logiques d'alliances et aux desiderata d'une partie du spectre politique de l'époque, le réacteur fait les frais de l'alliance de la Gauche plurielle, autour de Lionel Jospin, alors que les Verts réclament l'arrêt et le démantèlement du réacteur comme condition parmi d'autres à leur ralliement. Le projet est vidé de sa substance, rétrogradé en centre de recherche, puis définitivement arrêté en 1998. Ce n'est donc pas la complexité technique qui a eu raison du projet, mais bien l'accumulation de facteurs politiques : pressions militantes, arbitrages budgétaires, et surtout, l'absence d'une vision stratégique suffisamment claire, stable et partagée pour résister aux vents contraires.^{xxi}

Le projet ASTRID, lancé en 2006, devait prendre le relais. Fort d'un appui scientifique incontestable, d'une technologie éprouvée et d'un écosystème industriel solide, il incarnait une réponse aux défis du XXI^e siècle. Pourtant, en 2019, le projet ASTRID est sabordé sans débats. Non parce que la technologie aurait échoué, mais parce que l'État manque de vigueur sur le sujet.

La décision de suspendre le projet ASTRID était justifiée par le fait que le cours bas de l'uranium rendait inutile à court terme le développement de ce type de réacteur. Une fois encore, la filière sodium a été sacrifiée sur l'autel d'un manque de vision stratégique, malgré des décennies d'expertise et des milliards d'euros d'investissements publics conséquents^{xxii}.

Cette décision contraste avec le discours officiel valorisant le nucléaire comme pilier de la transition énergétique^{xxiii}. La France, deuxième puissance nucléaire civile mondiale en puissance installée, affiche une confiance affirmée dans ses réacteurs à eau pressurisée, tout en tournant le dos à une technologie capable d'en recycler les déchets. Au-delà des milliards d'euros investis, l'abandon du projet industriel RNR par la France a fragilisé l'ensemble de la chaîne de valeur nucléaire et a provoqué une fuite des compétences.

- a. Le « stop-and-go » permanent comme marqueur d’une défaillance stratégique de l’État



Source: Gaspard de Monclin. (2024). *L'histoire du nucléaire civil français*. LinkedIn. https://media.licdn.com/dms/image/v2/D4E22AOGkqiqmPaOPGg/feedshare-shrink_2048_1536/B4EZchXVHJH0Ao-/0/1748611456146?e=1752105600&v=beta&t=7-Brt205CtwAUmX6UYa8Xf0wtzGe4wJzKweYVZ5bc8s

Le nucléaire repose par essence sur une logique de temps long. Il exige continuité, cohérence et stabilité dans les choix stratégiques. Pourtant, la politique énergétique française reste enfermée dans une dynamique bien connue de « stop and go » : on lance, on interrompt, on relance...^{xxiv}, sans jamais tracer de trajectoire claire pour les industriels, les ingénieurs ou les citoyens. Superphénix et ASTRID en sont les symboles les plus marquants, révélateurs d'un système décisionnel instable, où chaque alternance politique peut compromettre des décennies de recherche. Cette imprévisibilité mine la confiance, dissuade les vocations, disperse les compétences, et empêche l'émergence d'un tissu industriel solide et durable. Non sujets à ces mêmes revirements stratégiques, les États-Unis, la Chine et la Russie maintiennent leur cap dans les réacteurs à neutrons rapides avec des réacteurs déjà en exploitation et une vision claire pour cette filière.

b. Forcer l'État à clarifier sa position : entre silence stratégique et contradictions flagrantes

Lors du dernier Conseil de Politique Nucléaire de mars 2025, des engagements ont été évoqués, laissant entrevoir une volonté de relancer la filière des RNR. Mais rien de concret n'a été annoncé. Quand relancer ? Quel type de réacteur ? Avec quel calendrier ? Avec quels partenaires ? Autant de questions laissées en suspens. Face à la montée des incertitudes climatiques, à la nécessité de sécuriser notre mix énergétique et à l'augmentation prévisible du prix de l'uranium, ces interrogations appellent des réponses urgentes.

Le gouvernement peut-il durablement ignorer le potentiel stratégique d'une technologie ayant contribué à positionner la France parmi les références internationales ? Est-il envisageable d'abandonner l'industrie RNR-Na, résultat de plusieurs décennies d'investissements, de recherches et de savoir-faire malgré tous ses avantages et malgré son leadership historique dans ce secteur ? En définitive, la France s'apprête-t-elle à compromettre son avenir énergétique pour des raisons d'ordre politique ? La France est-elle sur le point d'entériner définitivement la perte de son leadership ?

2. Paralysie française, offensive étrangère : la course mondiale aux RNR

Alors que la France a mis un coup d'arrêt à son programme de réacteurs à neutrons rapides au sodium (RNR-Na), avec l'abandon du projet ASTRID en 2019, d'autres puissances étrangères poursuivent activement le développement de cette technologie. Russie, Chine, Inde, Japon et États-Unis investissent stratégiquement dans la recherche et le déploiement des réacteurs à neutrons rapides. La France, pourtant pionnière historique du domaine, avec Phénix et Superphénix, se retrouve désormais en posture d'observateur, là où elle fut jadis meneuse.

a. Rosatom ou l'État en action : un instrument de puissance au service d'un État-stratège

La Russie, par l'entremise de Rosatom, est aujourd'hui le pays le plus avancé technologiquement dans la filière des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na). Le réacteur BN-800 (880 MWe), situé à Beloyarsk, est en exploitation commerciale depuis 2016. Il fonctionne au sodium, utilise un cœur MOX, et constitue une étape cruciale vers le réacteur BN-1200, actuellement en développement. Ce dernier serait, à terme, le réacteur RNR le plus puissant au monde, égalant la puissance historique de Superphénix (1 240 MWe)^{xxv}. Parallèlement, la Russie construit le réacteur de recherche MBIR à Dimitrovgrad, conçu pour tester des combustibles avancés, matériaux et configurations de cœur. Ce dernier, également refroidi au sodium, est amené à devenir la plateforme expérimentale internationale de référence en matière de RNR⁶.

Le soutien de l'État russe s'incarne dans le programme stratégique « Proryv » qui vise à démontrer sa capacité à fermer le cycle du combustible, avec une coordination directe entre l'État, Rosatom, les instituts de recherche et les industriels. En 2021, le président Vladimir Poutine a approuvé une hausse du budget global de Rosatom à hauteur de 553 milliards de roubles (environ 7,5 milliards de dollars), incluant un soutien aux technologies nucléaires avancées, dont les RNR sodium. Les crédits alloués au projet MBIR s'élèvent à 900 millions de dollars, témoignant d'un effort étatique significatif. Cette véritable planification offre une visibilité financière pluriannuelle et une coordination entre conception, ingénierie, régulation et stratégie industrielle.

Les partenariats internationaux viennent compléter cette stratégie nationale. Le gouvernement russe souhaite voir naître un consortium sino-russe pour l'exploitation de MBIR, soulignant une volonté d'ouverture contrôlée sur les grandes puissances émergentes.

Par ailleurs, la Russie exporte sa technologie : un accord intergouvernemental signé en 2018 avec Pékin prévoit la fourniture de combustible dans un premier temps, puis de MOX pour les CFR-600 chinois^{xxvi}. Cette volonté de former des partenariats dans le domaine illustre combien la diplomatie nucléaire devient un vecteur de puissance.

À l'échelle industrielle, Rosatom contrôle une chaîne complète et autonome : la conception (OKBM), la construction (SCC), l'exploitation (Rosenergoatom), la fabrication d'équipements lourds (ZiO-Podolsk, Omsktransmash), les pompes et échangeurs (NPO CKTI), et le combustible (TVEL). La maîtrise de l'ensemble de cette infrastructure rend possible la construction en série des réacteurs BN, en s'appuyant sur l'héritage opérationnel du BN-600, toujours en service.

Enfin, le cadre réglementaire accompagne cette ambition : l'agence Rostekhnadzor a validé les études d'impact pour le BN-1200, et des consultations publiques ont été menées fin 2023 pour amener à un début de construction en 2027. Bien que la société civile russe n'ait qu'un accès limité aux débats, les processus institutionnels internes (Rospirodnadzor, Rosatom) assurent un encadrement normatif important^{xxvii}.

b. La Chine ou la trajectoire planifiée

Si la Russie conserve une avance industrielle certaine, la Chine est sans conteste la puissance émergente la plus impliquée dans sa stratégie de déploiement des réacteurs à neutrons rapides. Deux unités CFR-600 (*China Fast Reactor*), d'une capacité de 600 MWe chacune, sont en construction dans la province du Fujian, avec une mise en service attendue dans la décennie. Ces réacteurs adoptent une architecture avec une cuve de sodium, comparable à la technologie française^{xxviii}.

Ce programme est porté par la CNNC (*China National Nuclear Corporation*), équivalent d'EDF, et bénéficie d'un soutien politique inscrit dans les plans quinquennaux successifs. Le développement des RNR sodium est identifié comme prioritaire dans le cadre de la stratégie « Made in China 2025 » lancée en 2015 et de l'objectif à long terme de fermeture du cycle du combustible. En 2024, la Chine a mis en service une unité pilote de retraitement pour MOX, assurant l'autonomie du combustible de ses RNR. Par ailleurs, la filière bénéficie d'un financement public massif, fléché par le ministère de l'Industrie et des Technologies.

Comme exposé précédemment, Pékin n'agit pas seul, un partenariat stratégique a été noué avec Rosatom pour la fourniture d'uranium enrichi puis en MOX, consolidant la coopération sino-russe sur ce type de technologie. Cette diplomatie du combustible s'inscrit dans une volonté assumée d'accélérer l'apprentissage par intégration progressive de savoir-faire étrangers^{xxix}. Les centres de recherche tels que le CIAE (*China Institute of Atomic Energy*) mènent les efforts scientifiques, tandis que les industriels (CNEIC, CNPE) assurent la réalisation des installations. La maîtrise d'ouvrage est assurée par des groupes nationaux comme Dongfang Electric et Harbin Electric, renforçant leur autonomie stratégique^{xxx}.

c. Inde : une autonomie stratégique en construction

En Asie également, l'Inde construit sa stratégie nucléaire autour des réacteurs à neutrons rapides et souhaite, à terme, utiliser ses larges réserves de thorium (technologie en développement) comme substitut à l'uranium au sein de ces réacteurs. Le PFBR (*Prototype Fast Breeder Reactor*), d'une puissance de 500 MWe, en construction à Kalpakkam, incarne une étape de cette stratégie. Malgré un retard de plus de vingt ans quant à sa mise en service, le chargement en combustible du réacteur a eu lieu le 4 mars 2024 en présence du Premier ministre Narendra Modi. Ce réacteur utilise un cœur MOX à base de plutonium issu d'un de leurs réacteurs à eau lourde pressurisée et de sodium liquide^{xxxii}.

L'État indien, à travers le DAE (*Department of Atomic Energy*), finance directement ce programme structurant. La société BHAVINI, créée spécifiquement pour développer les réacteurs à neutrons rapides, en assure la maîtrise d'ouvrage. La présence étatique est donc exclusive. En complément, une installation dédiée au retraitement du MOX (FRFCF – *Fast Reactor Fuel Cycle Facility*) est en cours de construction sur le même site, visant à assurer une souveraineté complète sur le cycle du combustible^{xxxii}.

L'Inde bénéficie de l'expertise du FBTR (*Fast Breeder Test Reactor*), opérationnel depuis 1985, qui a permis de tester différents types de combustible, notamment le carbure de plutonium.

Sur le plan industriel, les grandes entreprises publiques, comme BHEL (Bharat Heavy Electricals Limited) et L&T (Larsen & Toubro), réalisent les composants structurants (cuves, échangeurs, boucles sodium). La construction est assurée sans recours à des fournisseurs étrangers, consolidant une filière intégrée et souveraine.

d. États-Unis : capital-risque et État régulateur

Si les États-Unis ont longtemps mis en sommeil leur filière RNR sodium, ils reviennent sur le devant de la scène avec le soutien de l'innovation au sein de la sphère privée, adossée à un soutien public stratégique. Deux projets concentrent les efforts actuels : PRISM, conçu par GE-Hitachi, et Natrium, porté par TerraPower (société fondée par Bill Gates). Tous deux utilisent la technologie de refroidissement sodium^{xxxiii}.

Le soutien du Département à l'Énergie (DOE) est décisif. Grâce au programme ARDP (*Advanced Reactor Demonstration Program*), Washington co-finance ces réacteurs à hauteur de plusieurs centaines de millions de dollars, répartissant les risques avec le secteur privé. Le projet Natrium bénéficie en particulier d'un cadre d'expérimentation dans le Wyoming, soutenu par PacifiCorp (filiale de Berkshire Hathaway), ce qui illustre une synergie inédite entre acteurs énergétiques, capital-risque et industrie lourde.

L'industrie américaine dispose d'un tissu compétent et développe une approche flexible adaptée aux logiques de marché. De son côté, la NRC (*Nuclear Regulatory Commission*) a lancé une réforme réglementaire (*licensing Part 53*) pour accélérer l'instruction des dossiers de réacteurs avancés.

Sur les PRM, il est à noter que, faute de débouchés sur leur propre territoire, certaines entreprises américaines cherchent à imposer leurs technologies nucléaires en Europe, au détriment des filières locales. Ce mouvement, parfois désigné sous le nom de « projet Phoenix »^{xxxiv}, illustre une stratégie offensive tournée vers l'extérieur. Sous couvert de partenariat, il s'agit en réalité d'une logique de prédation industrielle, qui risquerait d'affaiblir la souveraineté technologique européenne.

e. Reprendre sans répéter : le Japon entre mémoire technologique et prudence réglementaire

Le Japon tente de réconcilier son traumatisme nucléaire et ses désirs de sûreté après Fukushima. Le réacteur expérimental Monju, symbole des ambitions japonaises dans le domaine des RNR sodium, a été définitivement arrêté en 2016. Pour autant, malgré l'hostilité envers la technologie nucléaire à la suite de l'incident nucléaire, le pays ne renonce pas. Le réacteur RNR-Na Joyo est maintenu en activité, cela à des fins uniquement de recherche^{xxxv}.

En 2022, le gouvernement japonais a officialisé une feuille de route dédiée aux réacteurs à neutrons rapides, coordonnée par le METI (ministère de l'Économie) et le MEXT (ministère de l'Enseignement et de la Recherche). Cette stratégie prévoit la conception d'un réacteur sodium de nouvelle génération à l'horizon 2040, avec un financement public garanti pour les phases d'ingénierie en amont.

Le projet est mené conjointement par la *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) et MHI, avec un soutien technique du CEA français (coopération franco-japonaise héritée du programme ASTRID). Le Japon souhaite aussi s'appuyer sur le projet GACID (*Global Actinide Cycle International Demonstration*), en lien avec la France et les États-Unis, pour la R&D sur le recyclage des combustibles nucléaires^{xxxvi}.

L'acceptabilité de tels projets est stratégique post-Fukushima. Le gouvernement a renforcé les mécanismes de concertation locale, et le régulateur NRA, la *Nuclear Regulation Authority*, impose des critères de sûreté parmi les plus stricts au monde. Dans ce contexte, la relance du RNR sodium japonais s'inscrit dans une logique de rattrapage fondée sur de grandes compétences techniques, la coopération internationale et l'acceptabilité en lien avec la société civile.

En décembre 2024, cette stratégie a franchi une nouvelle étape avec la signature d'un accord entre Framatome et plusieurs acteurs japonais, dont la Japan Atomic Energy Agency (JAEA) et Mitsubishi FBR Systems, visant à partager l'expérience française en matière de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium. Cet accord prévoit des échanges techniques autour de la conception, de la sûreté et des matériaux, dans le cadre du développement d'un démonstrateur japonais à horizon 2040^{xxxvii}. Pour faire face à ce regain d'intérêt pour la filière RNR-Na, il serait bon pour la France de s'inspirer des grandes puissances qui n'ont pas cessé de considérer cette technologie comme étant de rupture face aux enjeux géopolitiques et climatiques contemporains.

3. Retour d'expérience des modèles concurrents à la France

a. Une stratégie publique explicite

Dans tous les cas étudiés, les RNR-Na figurent noir sur blanc dans des documents de planification nationaux, bénéficiant d'un financement identifié et d'un calendrier adossé à une volonté politique claire. La France, après avoir stoppé ASTRID sans stratégie de remplacement, doit impérativement se doter d'un cap. La relance d'une tête de série industrielle ne pourra se faire sans cadrage budgétaire ni sans intégration au sein de la stratégie énergétique nationale.

b. Une industrie pilote

Rosatom, CNNC, GEH, MHI : tous les projets de RNR-Na sont portés par une grande entreprise disposant des compétences d'ingénierie, des moyens industriels et de la capacité à fédérer une chaîne de sous-traitance. En France, Framatome, EDF, le CEA et Orano disposent de cette expertise. Encore faut-il activer le tissu de PME autour des composants critiques et relancer les savoir-faire aujourd'hui dispersés. Cela suppose un soutien public structuré : subventions, commandes, garanties de volume.

c. Un écosystème industriel à reconstruire

Dans tous les pays pionniers en matière de RNR-Na, l'industrialisation fait désormais l'objet de plans stratégiques clairs et financés. La Russie opère déjà deux RNR-Na commerciaux (BN-600 et BN-800) et prépare le BN-1200 à échelle industrielle. La Chine construit une série de CFR-600, dans une logique de standardisation et de montée en puissance. Les États-Unis soutiennent le déploiement de Natrium (TerraPower) avec un financement fédéral, et le Japon prévoit un démonstrateur industriel à l'horizon 2040 avec Mitsubishi FBR Systems.

Face à cette dynamique mondiale, la France dispose encore de ressources industrielles précieuses, mais fragmentées, issues des programmes Phénix, Superphénix et ASTRID : savoir-faire en chaudronnerie nucléaire, fabrication de composants sodium, traitement du combustible, etc. Framatome, Orano, le CEA et un tissu de PME spécialisées (valves, robinetterie, instrumentation) constituent un socle à reconstituer.

Il est désormais essentiel de reconstruire une chaîne de valeur industrielle complète, du combustible au réacteur, autour d'un projet pilote de type démonstrateur préindustriel. Cela suppose de lancer un appel à projets structurant, de flécher des financements pluriannuels, et de garantir une gouvernance lisible pour les industriels. Une telle stratégie permettrait à la France de redevenir compétitive dans un marché mondial en structuration, et d'anticiper les besoins en compétences, en outils de production et en normes de certification.

d. La nécessité de la pédagogie

Le nucléaire, par son image, suscite méfiance et inquiétude. Pourtant, la plupart des pays ont choisi de l'assumer et d'aller plus loin avec la technologie des réacteurs à neutrons rapides au sodium en misant sur la transparence, les démonstrateurs et la pédagogie. La France, historiquement marquée par le débat autour de Superphénix, doit reconstruire un récit sur les RNR – ce à quoi ce rapport essaye de prendre toute sa part –, de façon à mettre en avant leur intérêt dans la réduction des déchets, valoriser le plutonium, sécuriser l'approvisionnement et retrouver son leadership. Cela suppose de dialoguer avec les ONG, les élus locaux, les écoles d'ingénieurs.

Partie 3 - Petits réacteurs modulaires et filière RNR-Na : une alliance gagnante pour une relance industrielle à moindre risque

Tous ces éléments plaident en faveur d'une relance de la filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR). Cette filière constitue une technologie stratégique pour l'avenir du secteur nucléaire. Sa capacité à optimiser l'utilisation des ressources, à réduire la production de déchets et à valoriser la chaleur générée en fait un complément essentiel à la filière traditionnelle des réacteurs à eau pressurisée (REP). Ensemble, ces deux technologies forment un système nucléaire durable, performant et résilient, capable de relever les défis énergétiques et environnementaux actuels.

En vérité, la volonté de relancer une filière de réacteurs à neutrons rapides (RNR) s'est affirmée dans le cadre du Conseil de Politique Nucléaire (CPN) de mars 2025. Cette ambition pourrait aujourd'hui s'appuyer sur un contexte favorable, marqué par l'émergence d'acteurs privés dynamiques, notamment issus du programme France 2030, qui contribuent à faire renaître une industrie innovante autour du nucléaire.

Toutefois, comme l'a justement rappelé l'ancien commissaire à l'énergie atomique Yves Bréchet^{xxviii}, il ne saurait être question de reléguer aux seules start-up la responsabilité de porter une politique nationale de réacteurs de puissance. Les petits réacteurs modulaires (PRM) ont un rôle essentiel à jouer : non pas en substitution, mais en complément d'une relance industrielle plus large. En effet, les PRM peuvent contribuer activement à la réactivation de la *supply chain*, au maintien des compétences clés, et à la reconstruction progressive d'un tissu industriel capable d'accélérer et de renforcer le retour de la filière RNR-Na.

C'est en articulant clairement une stratégie duale (PRM et réacteurs de puissance) que la France peut espérer réussir le redémarrage durable de son leadership technologique dans le nucléaire avancé, mais aussi ouvrir de nouvelles applications pour le nucléaire, notamment par le rôle que peuvent jouer les petits réacteurs modulaires pour décarboner les industries avec une meilleure valorisation de la chaleur produite. C'est donc une vision stratégique complémentaire : des RNR-Na pour investir sur une stratégie de long terme pour la production d'électricité (en complétant la filière traditionnelle du nucléaire des EPR qu'elle doit continuer à assurer à court terme les besoins électriques de la France) et les PRM pour assurer la décarbonation des industriels qui nécessitent une solution modulaire, sur site afin de remplacer les centrales à charbon et gaz.

Il pourrait apparaître intéressant dès lors de relancer la filière, en s'appuyant dans un premier temps sur la filière des petits réacteurs, afin de réenclencher une montée en compétences techniques et opérationnelles.

1. Les petits réacteurs modulaires : qu'est-ce que c'est ?

Relancer la filière du nucléaire au travers de la production industrielle de Petits Réacteurs Modulaires (PRM) constitue un catalyseur du renouveau de la filière du nucléaire en complément de la stratégie nationale de renouvellement du parc électronucléaire historique visant la construction de réacteurs EPR2 par EDF. Les PRM sont des réacteurs d'une puissance largement inférieure aux réacteurs conventionnels qui génèrent au moins 900 mégawatts électriques (MWe). On distingue parmi les PRM une large variété de concepts basés sur des technologies plus ou moins matures et dont les niveaux de puissance peuvent aller de 10 à 300 (MWe).

Parallèlement, au-delà de pouvoir adresser des marchés complémentaires appelant des puissances moindres et décentralisées en comparaison aux réacteurs de puissance, les PRM présentent un certain nombre d'avantages. Ils offrent la promesse d'un nucléaire plus compétitif grâce au levier d'un modèle d'industrialisation et de fabrication standardisé en usine qui peut aussi compter sur un effet de série et donc d'économies d'échelle.

En 2022, le gouvernement français a lancé un programme ambitieux pour développer ces petits réacteurs nucléaires innovants dans le cadre du plan « France 2030 ». Aujourd'hui, une dizaine de projets mêlant diverses technologies (réacteurs à eau, RNR refroidit au sodium, au plomb, aux sels fondus, réacteurs à haute température, etc.) sont en cours de développement sur le territoire français. Parmi les principaux acteurs français engagés dans ce domaine figurent Nuward (EDF), Calogena, Otrera, Jimmy Energy, Newcleo, Hexana, Stellaria, Thorizon et d'autres.

2. Chaleur industrielle décarbonée : PRM, une solution adaptée

20% des émissions à effet de serre françaises proviennent du secteur industriel. En 2023, des contrats de transition écologique sont signés par des entreprises, possédant les cinquante sites industriels les plus émetteurs, et par l'administration française. Les 50 entreprises concernées, génèrent actuellement 55 % des émissions industrielles en France, se sont ainsi engagées à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 50 % d'ici 2032.

Dans le secteur industriel, la chaleur constitue une composante essentielle de nombreux procédés de production, qu'il s'agisse de la transformation des matières premières, de la fabrication de biens ou du conditionnement final (plus de 2/3). Elle est indispensable dans des secteurs tels que la chimie, pétrochimie la métallurgie, la cimenterie, l'agroalimentaire, ou encore la papeterie. Repenser la gestion de la chaleur dans l'industrie ne relève pas seulement d'une nécessité technique, mais s'inscrit dans une démarche plus large de transition énergétique pour assurer la compétitivité, à terme de nos industries.

Toutefois, si la production de chaleur représente un défi en soi, son transport soulève également de nombreuses contraintes techniques et économiques.

Les pertes thermiques lors du transport, notamment à travers les réseaux de vapeur ou d'eau chaude, imposent des exigences élevées en matière d'isolation et de maintenance des infrastructures. De plus, la mise en place de réseaux de chaleur adaptés au tissu industriel existant suppose des investissements lourds, tant en termes de travaux que de coordination entre les acteurs concernés. Cette complexité est encore accrue lorsque les sources de chaleur et les besoins énergétiques sont géographiquement dispersés.

Or, à ce jour, près de 90% de cette chaleur pour les industries est encore générée à partir de combustibles fossiles, faute d'alternatives réellement matures et compétitives. L'une des réponses les plus souvent avancées consiste à électrifier les procédés thermiques. Toutefois, cette option, paraissant intéressante, se heurte à une contradiction fondamentale rarement soulignée. En effet, substituer une source de chaleur directe (gaz ou charbon) par de l'électricité revient, dans bien des cas, à perdre une large part de l'énergie initiale. En effet, la production d'électricité repose elle-même sur la conversion de chaleur, notamment dans les centrales nucléaires dont le rendement se limite à environ 35%. Autrement dit, une grande partie de la chaleur produite est dissipée avant même d'être utilisée. En valorisant directement cette chaleur à la source, on exploite presque intégralement l'énergie disponible, ce qui confère un avantage considérable en matière d'efficacité. À cela s'ajoute un second aspect économique, utiliser la chaleur nucléaire coûte nettement moins cher que de la produire avec de l'électricité. Cela représente, pour l'industrie, un levier de compétitivité majeur.

Les ressources fossiles, abondantes et peu onéreuses, répondaient aux besoins sans remettre en cause l'efficacité énergétique donc la création de chaleur par le nucléaire n'était pas un point mis en avant. En effet, le nucléaire français, historiquement, dédié à la production électrique. Les réacteurs classiques (REP) ne peuvent délimiter qu'une chaleur modérée, autour de 150-200°C. Cette limitation réduit leur potentiel dans un contexte industriel, où les besoins en chaleur peuvent atteindre des températures bien supérieures. Par ailleurs, la localisation des grandes centrales nucléaires, souvent éloignées des zones industrielles, rend difficile le transport de chaleur sans pertes significatives et il y a des pertes lors du transport électrique.

Face à ces défis, les PRM intégrant une technologie RNR (qu'ils soient refroidis au plomb, sodium ou sels fondus), peuvent émerger comme une solution pragmatique pour répondre à une grande partie des besoins industriels. Ayant la capacité de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur (système de la cogénération), ces réacteurs de faible puissance (généralement entre 10 et 300 MW) peuvent être déployés à proximité des sites industriels, réduisant ainsi les pertes liées au transport de chaleur. Selon une étude de la Société française d'énergie nucléaire (SFEN), ces réacteurs pourraient couvrir jusqu'à 100 TWh de besoins en chaleur industrielle et urbaine d'ici 2050, représentant une contribution significative à la décarbonation du secteur.

Par leur capacité à produire une chaleur d'environ 500°C, les PRM RNR-Na pourraient ainsi apporter une réponse crédible, tout en permettant de développer une stratégie doublement gagnante pour l'État.

Finalement, il ne s'agit donc pas de renoncer à l'électrification là où elle est pertinente (au-dessus de 500°C), mais de reconnaître que, lorsqu'une solution plus directe, plus efficace et économiquement avantageuse existe pour produire de la chaleur, il serait contre-productif de ne pas l'envisager. Jusqu'à 500°C, certains PRM RNR, dont les RNR-Na peuvent représenter une alternative crédible aux centrales à gaz ou charbon. Au-delà de cette température, le recours à l'électricité reste nécessaire, mais peut être optimisé, dans certains cas en associant le nucléaire comme source de préchauffage, limitant ainsi la charge électrique aux besoins strictement incompressibles nécessaires.

La production de petits réacteurs modulaires à neutrons rapides refroidis au sodium représente une stratégie de relance ambitieuse pour la filière nucléaire française. Cette technologie permet le déploiement de réacteurs compacts, capables de fournir de l'électricité de manière autonome aux industries fortement consommatrices d'énergie ainsi qu'aux territoires isolés ou mal raccordés au réseau électrique (régions enclavées ou insulaires par exemple).



3. Synergies entre la filière de puissance et PRM

Les réacteurs à neutrons rapides tels que Phénix et Superphénix sont des surgénérateurs^{xxxix}. À l'inverse, les petits réacteurs modulaires basés sur la même technologie, bien que plus adaptés à des implantations industrielles de proximité, ne disposent pas de la masse critique ni de la configuration nécessaire pour produire un excédent significatif de matière fissile.

Cette contrainte, loin d'être un frein, s'intègre dans une logique de complémentarité structurelle avec la filière de puissance RNR.

En effet, les réacteurs de puissance, par leur caractère surgénérateur peuvent assurer l'approvisionnement électrique pour le réseau, mais pourraient également participer à assurer un approvisionnement en matière fissile (qui nécessitera un retraitement avant d'être exploitable) pour les réacteurs modulaires, garantissant leur fonctionnement autonome sans dépendance extérieure prolongée.

Avantages des surgénérateurs

Un RNR surgénérateur est capable de produire davantage de combustible qu'il n'en brûle, tout en recyclant des déchets nucléaires existants et en générant de l'électricité¹. Il s'agit donc pour ces réacteurs de grosse puissance **d'optimiser l'utilisation des combustibles nucléaires**, de **réduire la quantité et la radiotoxicité des déchets**, et donc de garantir une production d'énergie durable compatible avec les besoins d'une économie moderne.

Dans cette optique et en prenant compte des risques logistiques auxquels la France est exposée en raison de sa dépendance à l'importation d'uranium d'outremer, la capacité de recycler les larges quantités d'uranium appauvri entreposées en France est une aubaine historique qui pourrait être exploitée par l'adoption des réacteurs de quatrième génération.

Une telle stratégie intégrée entre les réacteurs de puissance et les PRM pourrait donc être doublement gagnante pour l'État. Les réacteurs de puissance RNR-Na, surgénérateur peuvent assurer à terme une production électrique, en complément des REP, tandis que les PRM, plus modulables pourront apporter une réponse concrète, notamment en chaleur haute température au plus près des besoins industriels. Une logique de système autonome et circulaire s'installe ainsi. L'ensemble de la filière nucléaire devient capable de s'auto-entretenir, de répondre aux besoins thermiques et électriques de l'industrie, et de soutenir un modèle énergétique résilient, bas carbone et durable.

Zoom sur la fermeture du cycle du combustible

La fermeture du cycle nucléaire repose sur trois éléments clés à développer ensemble : la production d'un nouveau type de combustible, un réacteur de démonstration adapté, et une capacité à recycler ce combustible usé.

Orano prévoit une première étape d'ici 2040, avec un atelier de fabrication intégré à sa future usine Mélox 2 (programme Back End of the Future). Le recyclage pourra venir dans un second temps, à condition de poursuivre les travaux dès maintenant à partir des acquis sur Phénix.

Un parc 100 % RNR n'est pas nécessaire : un mix de REP moxés et RNR surgénérateurs est une cible réaliste. L'enjeu est de se donner les moyens d'agir au bon moment, pour garder la maîtrise du cycle.

Le développement coordonné de REP moxés (utilisant du combustible recyclé, dit MOX, fabriqué à partir de plutonium issu des combustibles usés), de RNR-Na de grande puissance et de SMR RNR-Na répond à des objectifs différenciés, mais complémentaires.

- Les **REP moxés**, déjà éprouvés, permettent une montée progressive en compétence sur la fabrication et l'usage du combustible recyclé. Ils constituent une passerelle opérationnelle vers la fermeture du cycle, en attendant la maturité industrielle des RNR.
- Les **RNR-Na de grande puissance**, surgénérateurs, sont essentiels pour garantir, à long terme, l'indépendance en combustible fissile et la réduction durable des déchets à haute activité. Ils donnent tout son sens au recyclage intégral de la matière.
- Enfin, les **SMR RNR-Na** offrent une solution de proximité pour décarboner les usages industriels de chaleur, difficilement électrifiables, tout en valorisant directement la chaleur nucléaire.

En misant sur la complémentarité de ces trois technologies, la France peut se doter d'un outil énergétique souverain, efficace, et capable de répondre à la fois aux enjeux climatiques, industriels et géostratégiques.

On a alors un nucléaire durable qui n'utilise aucune ressource naturelle, par définition épuisable et résout la question des déchets. En somme, un système circulaire pratiquement parfait, à émissions de gaz à effet de serre pratiquement nulles.

*Yves Bréchet, ancien Haut-commissaire à l'Énergie Atomique, à l'Assemblée nationale.
Commission d'enquête sur la perte de souveraineté énergétique.*

4. Développer les petits réacteurs modulaires pour maintenir et développer les compétences critiques

En soutenant les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium de type PRM, programme France 2030, l'État dispose d'un levier stratégique pour sécuriser et permettre le redémarrage de sa filière de réacteurs

La France a abandonné à deux reprises sa filière de réacteurs à neutrons rapides au sodium, ce qui a progressivement affaibli les compétences, la dynamique industrielle et la confiance des acteurs du secteur. Si la relance d'une filière s'annonce complexe, elle bénéficie néanmoins d'un socle d'excellence constitué par les acteurs historiques EDF, le CEA, Orano et Framatome qui assurent encore certaines activités de R&D dans le domaine. Mais parallèlement, en soutenant activement les initiatives industrielles menées par les petits réacteurs modulaires, portées par des acteurs privés innovants, l'État peut également revitaliser l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement ainsi que les compétences techniques et industrielles indispensables à la souveraineté énergétique du pays.

Les technologies et savoir-faire mobilisés pour la conception des PRM sont en grande partie similaires à ceux requis pour les réacteurs de plus grande puissance tant pour la fabrication de composants clés que du côté de l'expertise. Or, la technicité du secteur demande que les acteurs s'exercent à la conception, construction de tels réacteurs, afin de conserver les savoir-faire et de sécuriser la chaîne d'approvisionnement. Le développement des PRM permet ainsi de préserver, de renforcer, mais aussi de réactiver des compétences critiques pour la filière.

Ainsi, les sociétés développant des PRM jouent désormais un rôle central dans cet écosystème : elles servent non seulement de catalyseurs pour le partage de savoir-faire entre générations d'experts, mais peuvent aussi jouer un rôle de passerelles pour le retour de talents parfois partis à l'étranger. Elles deviennent ainsi des pôles de reconquête technologique, favorisant la transmission des connaissances et le rapatriement de compétences clés.

5. PRM : un modèle de financement innovant pour revitaliser la filière nucléaire

Les PRM s'inscrivent dans une dynamique de financement innovante, fondée sur des modèles hybrides combinant capitaux publics et investissements privés (parfois même directement portés par les industriels utilisateurs). Cette approche permet de mieux répartir les risques, de réduire la pression sur les dépenses publiques et d'accélérer la réalisation des projets. Parallèlement, en affichant un soutien politique fort à de tels projets, l'État renforce la confiance des investisseurs et favorise l'entrée de nouveaux capitaux privés dans ce secteur prometteur.

Par ailleurs, grâce à leur modularité et coûts d'investissement réduits, les PRM, sont financièrement plus accessibles et donc plus facilement exportables vers des marchés variés. Le marché international des PRM connaît par ailleurs une croissance soutenue. Il constitue un levier d'exportation majeur, capable de générer des retombées économiques significatives, de rentabiliser les investissements publics à long terme, et de créer de nombreux emplois qualifiés sur le territoire. Plus les acteurs sont engagés sur des projets internationaux, plus ils conservent un savoir-faire pointu et une expérience opérationnelle continue.

En soutenant les PRM, et en particulier ceux à neutrons rapides refroidis au sodium, l'État a ainsi l'opportunité de créer les conditions favorables à une relance maîtrisée de sa filière de réacteurs de puissance. Ce soutien anticipé pourrait permettre de préserver les compétences, de structurer la chaîne industrielle et de sécuriser les technologies clés indispensables à cette montée en puissance tout en participant à la compétitivité future de sa filière de puissance. En d'autres termes, le soutien de l'État à de tels projets permettrait de soutenir la filière de puissance et mitiger le risque associé à la relance, tout en s'inscrivant dans la stratégie nationale de réindustrialisation et de souveraineté énergétique.

6. Une initiative industrielle qui doit être soutenue par les pouvoirs publics pour répondre aux problématiques de la filière

Le soutien que l'État peut apporter au PRM est crucial dans le cadre d'une politique nationale industrielle intégrée. Ce soutien contribuera directement à la filière de puissance en sécurisant le retour des RNR-Na dans cette voie. L'État peut apporter un soutien très concret, en permettant à ces projets PRM d'accélérer leur développement. Il faut un certain nombre d'autorisations pour concevoir un réacteur nucléaire et commercialiser sa production électrique. Sans le soutien des pouvoirs publics, un projet de relance de la filière nucléaire est voué à l'échec par défaut d'obtention des autorisations. La conjoncture qui a mené à la loi de 2023 sur l'accélération du nucléaire, constitue un avantage majeur puisque qu'elle permet l'accélération des procédures administratives pour la construction de nouveaux réacteurs nucléaires.

Concernant le soutien de l'État qui est accordé par le biais de la loi de 2023 sur l'accélération du nucléaire : il est prévu la tenue de débats publics et d'enquêtes publiques ainsi que la facilitation des procédures administratives et l'octroi de financements. En effet l'État dispose, grâce à ladite loi, de la possibilité de garantir les prêts du secteur nucléaire et d'accorder des subventions, tout en intégrant la taxonomie verte européenne. Il est nécessaire que l'État s'investisse davantage encore dans sa filière de réacteurs avancés, en plus de son soutien à sa filière traditionnelle des EPR. Il doit désormais mettre en œuvre les leviers qui sont à disposition pour soutenir ces nouveaux acteurs, chose que les États-Unis sont déjà en train de faire (par l'octroi de fonds, l'accès à des sites et un soutien politique fort) témoignant d'un intérêt stratégique pour l'État américain.

Ce mouvement articulé pourrait ainsi permettre à la France de restaurer un leadership technologique sur une filière stratégique. Plutôt que de relancer seul, un programme industriel national complexe et coûteux, qui risquerait de faire les frais de nouvelles décisions politiques à visée courte, l'État pourrait ici faciliter le retour de la filière de puissance en établissant une interconnexion fonctionnelle entre les PRM et sa filière de puissance. Un modèle de financement partagé entre le public et le privé autour des PRM permettrait de reconstruire un socle de compétences et de services industriels, y compris autour de la filière combustible, favorable à la relance d'une filière RNR de puissance. Cela permettrait de générer à la fois des retombées industrielles immédiates et des perspectives de long terme.

Finalement, une fois le parc RNR pleinement opérationnel, le mix électrique français reposerait sur une base duale : réacteurs à eau pressurisée (REP) pour la production stable à court terme, et réacteurs RNR pour assurer la fermeture du cycle et valoriser les combustibles usés, tous deux complétés par des renouvelables. Ce système garantirait ainsi une autonomie énergétique complète sur plusieurs siècles, avec une réduction massive du volume et de la durée de vie des déchets radioactifs.

Conclusion

La France aborde la transition énergétique avec un atout unique : un mix électrique déjà largement décarboné grâce à son parc nucléaire. Mais ce socle, hérité des années 1980, vieillit et le reste de l'économie demeure encore largement irriguée de combustibles fossiles importés. Il faudra renouveler la moitié d'ici 2050, tout en répondant à une demande croissante de décarbonation des secteurs ne pouvant pas miser sur l'électrification pour atteindre la neutralité carbone. Ce défi structurel appelle une vision stratégique, de long terme, pour encore réduire la dépendance énergétique.

Aujourd'hui, prolonger les réacteurs actuels et construire de nouveaux EPR constitue une réponse rationnelle et pragmatique. Mais elle ne résout pas les limites intrinsèques de la filière actuelle : dépendance au combustible dont la matière première est importée, production de déchets à vie longue, et acceptabilité changeante. Le haut niveau de maîtrise français sur la technologie des réacteurs à eau pressurisée ne saurait justifier l'arrêt des recherches sur d'autres technologies. Si jusque dans les années 2000, elle était en avance en ce qui concerne la recherche de pointe, cette avance s'est désormais résorbée et le risque d'un décrochage technologique rend de plus en plus probable la perspective d'un déclassement ou d'un redémarrage incertain de notre filière RNR-Na malgré les intentions favorables récemment annoncées par l'État.

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR), et en particulier la filière au sodium, représentent une réponse claire à ces enjeux contemporains. Ils permettent de produire de l'énergie bas carbone sous forme de chaleur et d'électricité en utilisant très efficacement les ressources, de valoriser les combustibles nucléaires usés de la filière historique, de réduire la génération de déchets radioactifs de haute activité à vie longue, et garantir une autonomie énergétique du pays sur plusieurs siècles grâce à la disponibilité de stocks importants d'uranium appauvri sur le territoire. La France dispose déjà d'une expertise industrielle et scientifique inégalée dans ce domaine : elle peut redevenir pionnière et reprendre son destin énergétique en main.

Au-delà du développement des efforts d'efficacité énergétique, des énergies renouvelables, de la prolongation du parc nucléaire et le lancement d'un programme ambitieux de construction d'EPR2, deux voies complémentaires pourraient être soutenues pour répondre à des enjeux stratégiques pour le pays:

- Un programme de petits réacteurs modulaires de technologie RNR-Na, s'adressant au secteur privé pour la décarbonation des secteurs industriels les plus difficiles à décarboner ;
- Un programme industriel de développement puis construction de réacteurs de puissance de type RNR-Na surgénérateurs, préparant la fermeture complète du cycle du combustible et la production d'électricité pour le réseau ;
- Ces scénarios intriqués peuvent aider à financer et à réduire les risques de la relance d'une filière stratégique, compétitive, souveraine. Les initiatives anticipées de la filière PRM qui s'adressent à des clients et des marchés identifiés dans plusieurs secteurs de l'industrie permettraient de réactiver une chaîne d'approvisionnement en sommeil, de stimuler la relance d'initiatives autour de la fabrication de combustible MOX, d'initier la formation de nouveaux ingénieurs et techniciens spécialisés pouvant encore capitaliser sur l'expertise des aînés jusqu'à faire émerger des concepts innovants également exploitables pour une filière de réacteurs de puissance.

Cette stratégie publique privée reposant d'abord sur un modèle économiquement viable avant d'aborder un modèle avant tout régalien vers la fermeture du cycle est peut-être une option gagnante pour la France, pour la compétitivité de son industrie, sa décarbonation et sa souveraineté énergétique. Mais cette ambition n'aura de sens que si ces nouveaux acteurs sont réellement en mesure de démontrer leur crédibilité : celle de tenir leurs engagements, de livrer des résultats concrets, et de le faire dans les délais.

Compte tenu de l'avance historique de la France sur la filière sodium, ce choix paraît naturel pour la France. Il est donc urgent que l'exécutif se positionne explicitement sur la technologie à privilégier, et surtout qu'il verrouille ces orientations dans la durée, pour éviter tout nouveau cycle d'hésitations stratégiques.

Relancer la filière des réacteurs à neutrons rapides au sodium selon une approche duale (combinant réacteurs de puissance et petits réacteurs modulaires) représente une opportunité majeure pour la France. Cette stratégie permettrait de renouer avec un leadership historique dans le domaine nucléaire tout en sécurisant le redémarrage de la filière RNR-Na grâce à une montée en puissance progressive et maîtrisée.

Annexe 1 : Glossaire

1. Technologie et concepts nucléaires

Réacteur à Neutrons Rapides (RNR) : Réacteur nucléaire de quatrième génération, utilisant des neutrons rapides pour maintenir la réaction en chaîne. Il permet de valoriser davantage le combustible nucléaire et de recycler certains déchets.

RNR-Na (RNR au Sodium) : Type de RNR refroidi au sodium liquide, offrant d'excellentes propriétés thermiques et une haute densité de puissance.

Cycle du combustible nucléaire : Ensemble des étapes de production, d'utilisation, de retraitement et de stockage du combustible nucléaire. La fermeture du cycle permet le recyclage des matières fissiles.

MOX (Mixed Oxide Fuel) : Combustible nucléaire composé d'un mélange d'oxydes de plutonium et d'uranium, utilisé notamment dans le recyclage partiel des déchets.

Neutrons rapides : Neutrons ayant une énergie élevée, non ralentis par un modérateur. Ils permettent de fissionner des matières peu fissiles comme l'uranium 238.

Quatrième génération : Famille de réacteurs nucléaires développés pour être plus sûrs, plus efficaces, et capables de recycler les déchets. Les RNR en font partie.

Superphénix / ASTRID : Projets français de réacteurs RNR-Na (Superphénix : 1986–1997 ; ASTRID : projet abandonné en 2019), symboles des ambitions et des reculs politiques dans le nucléaire avancé.

2. Géopolitique et approvisionnement

Matières fissiles : Substances capables de soutenir une réaction nucléaire en chaîne (ex. : uranium 235, plutonium 239). Leur disponibilité conditionne la souveraineté énergétique.

Souveraineté énergétique : Capacité d'un État à maîtriser l'ensemble des leviers de production, d'approvisionnement et de distribution d'énergie, sans dépendance stratégique.

Dépendance énergétique : Situation où un pays dépend fortement d'importations étrangères pour couvrir ses besoins en énergie, exposant son économie à des chocs géopolitiques.

Kazatomprom / Rosatom : Entreprises étatiques du Kazakhstan et de Russie respectivement, leaders mondiaux dans l'extraction d'uranium et le cycle du combustible. Exemples d'États-stratèges dans le nucléaire.

3. Institutions et documents de référence

RTE (Réseau de Transport d'Électricité) : Filiale d'EDF en charge du réseau électrique français. A publié des scénarios de mix énergétique pour 2050.

CPN (Conseil de Politique Nucléaire) : Organe stratégique français rassemblant des ministres, responsables industriels et hauts fonctionnaires, chargés de fixer les grandes orientations de la politique nucléaire.

Pacte vert européen : Feuille de route de l'Union européenne visant la neutralité carbone en 2050. Il implique une forte électrification et un besoin d'énergie décarbonée.

Annexe 2 : Comprendre les réacteurs à neutrons rapides (RNR) : une technologie au service de l'efficience et de la souveraineté énergétique

1. Historique et fonctionnement des RNR

Le Conseil de politique nucléaire (CPN) du 17 mars 2025 a acté la relance d'un programme de réacteurs à neutrons rapides (RNR), dans le cadre de la stratégie nationale pour une souveraineté énergétique décarbonée. Cette décision s'inscrit dans un effort plus large de diversification du parc nucléaire français, visant à engager la fermeture du cycle combustible, notamment par la valorisation du plutonium et la réduction des déchets à vie longue. Les premiers travaux de recherche sur les réacteurs à neutrons rapides remontent aux débuts de l'ère nucléaire, avec la construction du RNR expérimental *Clementine* à Los Alamos (US), en 1946^{xl}.

Depuis, plusieurs prototypes et démonstrateurs ont été développés à travers le monde, notamment en France avec Rapsodie, Phénix et Superphénix.

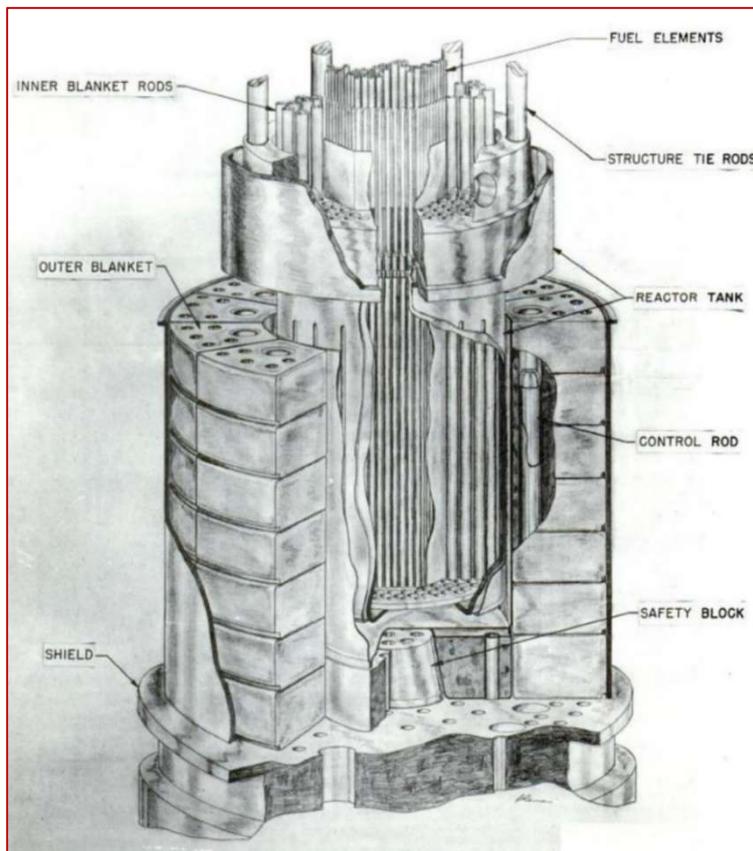


Schéma du réacteur expérimental «Clementine» par Walter Zinn.

Tout réacteur, rapide ou non, produit de la chaleur par l'exploitation d'un processus naturel nommé « fission »^{xli}.

Un atome étant électriquement neutre, il a le même nombre de protons (charge positive) dans son noyau que d'électrons (charge négative) en dehors. Il peut exister cependant des variations dans le nombre de neutrons : pour un atome donné, il peut exister plusieurs isotopes, avec un nombre de neutrons différent (la neutralité électrique de l'atome est donc conservée, un neutron n'ayant pas de charge électrique). Plus il y a de neutrons dans un isotope donné, plus l'atome est lourd. C'est le cas des atomes utilisés dans la fission : un atome lourd est utilisé, tel que l'uranium-235 ou le plutonium-239. Lorsqu'un neutron le percute, il se

scinde en morceaux plus légers. Cette réaction libère de l'énergie sous plusieurs formes : de la chaleur (énergie thermique), des neutrons (énergie cinétique), et un rayonnement gamma (radiation).

En regroupant un nombre suffisant de ces atomes lourds et en provoquant la fission de l'un d'eux, on peut déclencher une réaction en chaîne : les neutrons libérés par une fission provoquent à leur tour la fission d'autres noyaux, et ainsi de suite, dans un processus contrôlé. L'énergie thermique produite est ensuite utilisée pour porter de l'eau à ébullition ; la vapeur ainsi générée fait tourner des turbines, produisant de l'électricité.

2. Les RNR et la fermeture du cycle

Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) font partie de la quatrième génération de technologies nucléaires. Dans les générations précédentes, un modérateur est utilisé tel que de l'eau, de l'eau lourde ou du graphite afin de ralentir et contrôler la réaction^{xlii}. À la différence des réacteurs classiques, les RNR utilisent des neutrons rapides et fonctionnent donc sans modérateurs. Cette caractéristique leur confère la capacité de **transmuter de l'uranium non fissile (qui constitue la majorité de l'uranium) en combustible nucléaire** pouvant ensuite être réutilisé dans d'autres réacteurs notamment, des REP de troisième génération.

Certains réacteurs à neutrons rapides (RNR) sont appelés surgénérateurs, parce qu'ils produisent plus de combustible fissile qu'ils n'en consomment. En effet, ils transforment une partie du combustible non utilisé en nouveau combustible, ce qui permet de « fabriquer » plus de matière fissile que ce qu'ils utilisent eux-mêmes pour produire de l'énergie. On pourrait comparer un réacteur surgénérateur à une voiture qui, pendant qu'elle roulerait, produirait elle-même plus d'essence qu'elle n'en consomme. Cette surgénération permettrait de multiplier par 60 à 100 les réserves d'énergie utilisables, en comparaison des réacteurs actuels. À ce titre, Phénix a démontré cette capacité avec un rapport de surgénération de 1,15^{xliii}. Avec une telle capacité, la France a l'opportunité de prolonger considérablement l'utilisation de ses ressources nucléaires et d'améliorer la durabilité du cycle énergétique tout en offrant au pays une relative indépendance vis-à-vis de l'uranium et de sa géopolitique.

3. Sodium, plomb ou sel fondus : quelles opportunités ?

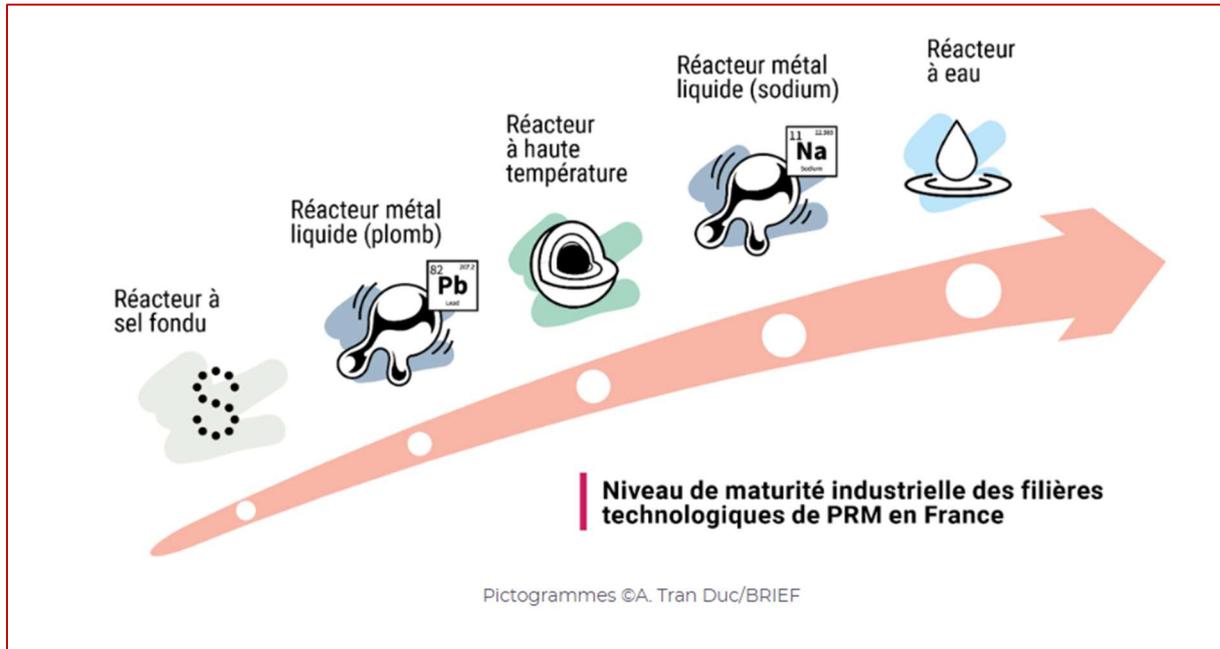
Dans un RNR, le caloporteur est le fluide chargé de transférer la chaleur produite par la fission nucléaire vers un échangeur thermique, où elle sert ensuite à générer de la vapeur et produire de l'électricité^{xliv}. Le choix de ce fluide est crucial pour le bon fonctionnement du réacteur. Plusieurs options sont envisagées dans les RNR, notamment le plomb, les sels fondus et le sodium liquide.

Le plomb, utilisé dans certains designs appelés RNR-Pb, présente une faible réactivité avec l'air et l'eau, ce qui constitue un avantage en matière de sécurité^{xlv}. En revanche, son point de fusion élevé impose de maintenir le réacteur à température constante pour éviter la solidification du métal, ce qui complique

l'ingénierie du système. De plus, le plomb est corrosif pour de nombreux matériaux, ce qui limite sa durabilité.

Les sels fondus (RNR-MS, pour *Molten Salt*) ont eux aussi une faible réactivité avec l'eau et l'air. Cependant, ils sont très corrosifs, ce qui pose des défis similaires en matière de compatibilité avec les matériaux du réacteur.

Aujourd'hui ces deux types de réacteurs sont à toujours à l'échelle expérimentale. Cela n'est pas le cas des RNR-Na.



Enfin, le sodium liquide, utilisé comme fluide caloporteur dans les réacteurs à neutrons rapides de type RNR-Na, comme Phénix et Superphénix, présente plusieurs avantages importants.

Son point de fusion bas (98°C) permet une bonne circulation du fluide à des températures modérées, sans besoin de pressurisation, ce qui simplifie la conception du circuit. Contrairement aux autres matériaux envisagés comme le plomb ou les sels fondus, le sodium n'est pas corrosif, ce qui le rend compatible avec les matériaux des structures internes sur le long terme. En outre, il est vrai que le sodium est chimiquement réactif au contact de l'air ou de l'eau, mais cet aspect est parfaitement connu et maîtrisé, grâce à l'exploitation de nombreux réacteurs à travers le monde. Les installations sont conçues avec des systèmes de confinement redondants, des circuits hermétiques et des dispositifs de détection et d'isolement rapides en cas d'incident. Des siècles cumulés d'exploitation dans le monde (France, Russie, États-Unis) ont permis d'acquérir une solide expérience opérationnelle sur cette technologie, notamment en France (60 années de fonctionnement cumulées). Cette expertise permet aujourd'hui de garantir un niveau élevé de sûreté et de maturité technologique, tout en bénéficiant des atouts uniques offerts par le sodium dans la conception des RNR.

Annexe 3 : Bibliographie

- ⁱ Les Voix du Nucléaire. (2023, juin). *Scénario énergétique pour la neutralité carbone de la France en 2050 et au-delà (Version 1.21)*.
https://www.voix-du-nucleaire.org/app/uploads/2023/06/RAPPORT_Scenario-TerraWater_Futurs-Energetiques-France-2050_V1.21.pdf
- ⁱⁱ International Energy Agency. (2025). Europe – Energy mix. Dans IEA. Repéré à <https://www.iea.org/regions/europe/energy-mix>
- ⁱⁱⁱ European Commission. (2022). *Financing REPowerEU*.
<https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/attachment/872551/FS%20Financing%20REPowerEU.pdf>
- ^{iv} Institute for Energy Economics and Financial Analysis. (2024). *European LNG Tracker*.
<https://ieefa.org/european-lng-tracker>
- ^v Garding, S. E., & Mix, D. E. (2025, March 19). *The Three Seas Initiative* (CRS Report No. IF11547, Version 4). Congressional Research Service. <https://crsreports.congress.gov>
- ^{vi} Decode39. (2023, 20 mars). *Away from Russian gas: new regasification unit docks in Piombino*. Decode39.
<https://decode39.com/6183/away-russian-gas-new-regasification-unit-italy/>
- ^{vii} Başoğlu, M. (2023, 28 janvier). *La Libye et l'Italie signent un accord gazier de 8 milliards de dollars*. Anadolu Agency. <https://www.aa.com.tr/fr/afrique/la-libye-et-litalie-signent-un-accord-gazier-de-8-milliards-de-dollars-/2800346>
- ^{viii} Vladimirov, M. (2025, 7 mai). *TurkStream gas pipeline could slow EU, Russia decoupling*. Reuters.
<https://www.reuters.com/business/energy/turkstream-gas-pipeline-could-slow-eu-russia-decoupling-vladimirov-2025-05-07/>
- ^{ix} Ibid
- ^x Reuters. (2022, 13 octobre). *Poutine présente son projet de "hub gazier" en Turquie à Erdogan*. Reuters.
- ^{xi} Belton, C. (2024, 22 novembre). *American businessman makes play for Russian natural gas pipelines*. The Washington Post. <https://www.washingtonpost.com/world/2024/11/22/natural-gas-pipeline-russia-germany-nord-stream/>
- ^{xii} Organisation de coopération et de développement économiques – Agence pour l'énergie nucléaire & Agence internationale de l'énergie atomique. (2025). *Uranium 2024 : Ressources, production et demande (30^e éd.)*. Éditions OCDE
- ^{xiii} Patton, D., & Mallet, B. (2024, 4 décembre). *France's Orano says it has lost control of uranium mine in Niger*. Reuters. <https://www.reuters.com/markets/commodities/frances-orano-says-it-has-lost-control-uranium-mine-niger-2024-12-04/>

-
- ^{xiv} Quénelle, B. (2024, 6 novembre). France hosts Kazakhstan's president as partnership under Russia's watchful eye. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/en/international/article/2024/11/06/france-hosts-kazakhstan-s-president-as-partnership-under-russia-s-watchful-eye_6731787_4.html
- ^{xv} Jouan, H. (2024, 22 avril). Canadian uranium is strategic for French nuclear power plants. *Le Monde*. https://www.lemonde.fr/en/economy/article/2024/04/22/canadian-uranium-is-strategic-for-french-nuclear-power-plants_6669118_19.html
- ^{xvi} Amiri, A. (2025, Mai 10). China Discovers the Largest Uranium Deposit Ever—30 Million Ton Boost to Global Power. *Daily Galaxy*: <https://dailygalaxy.com/2025/05/china-discovers-the-largest-uranium-deposit-ever-30-million-ton-boost-to-global-power/>
- ^{xvii} Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire. (s. d.). Le cycle du combustible MOX en France. IRSN. <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/cycle-mox-france>
- ^{xviii} Abonneau, E. (2021, 10 juin). Encyclopédie de l'énergie. *Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na)*. <https://www.encyclopedie-energie.org/reacteurs-a-neutrons-rapides-refroidis-au-sodium-rnr-na/>
- ^{xix} FranceTerme (Ministère de la Culture). (s. d.). *Nucléaire (franceterme)*. Culture.fr. <https://www.culture.fr/franceterme/terme/NUCL310>
- ^{xx} Présidence de la République. (2025, 17 mars). *Réunion du 4^e Conseil de politique nucléaire*. Élysée. Consulté en juin 2025, depuis <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2025/03/17/reunion-du-4eme-conseil-de-politique-nucleaire>
- ^{xxi} Bembaron, E. (2024, 13 Août). *Superphénix, aux racines de la défiance entre le monde nucléaire et la politique*. *Le Figaro*. <https://www.lefigaro.fr/conjoncture/superphenix-aux-racines-de-la-defiance-entre-le-monde-nucleaire-et-la-politique-20240813>
- ^{xxii} ADIMAS. (2024, 25 Avril). *Déclin de l'avance du nucléaire français*. <https://adimas.paris/declin-de-lavance-du-nucleaire-francais/>
- ^{xxiii} Gremillet, D., Moga, J.-P., & Michau, J.-J. (2022, 20 Juillet). *Nucléaire et hydrogène : l'urgence d'agir* (Rapport d'information n° 801). Sénat. <https://www.senat.fr/rap/r21-801/r21-8011.html>
- ^{xxiv} Gremillet, D., Moga, J.-P., & Michau, J.-J. (2022, 20 Juillet). *Nucléaire et hydrogène : l'urgence d'agir* (Rapport d'information n° 801). Sénat. <https://www.senat.fr/rap/r21-801/r21-8011.html>
- ^{xxv} Traceyhoney. (2023, 7 Novembre). *MOX use at Russia's BN-800 reactor confirms reliability of the technology*. *Nuclear Engineering International*. <https://www.neimagazine.com/news/mox-use-at-russias-bn-800-reactor-confirms-reliability-of-the-technology-11278025/>
- ^{xxvi} International Panel on Fissile Materials. (2024, 25 Juillet). *Russia to supply MOX fuel for China's CFR-600 reactor*. IPFM Blog. https://fissilematerials.org/blog/2024/07/russia_to_supply_mox_fuel.html
- ^{xxvii} World Nuclear News. (2024, 17 Mai). *BN-1200 plans clear environmental hurdle*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/bn-1200-plans-for-beloyarsk-clear-environmental-hu>

-
- ^{xxxviii} World Nuclear News. (2020, 29 Décembre). *China starts building second CFR-600 fast reactor*. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/China-starts-building-second-CFR-600-fast-reactor>
- ^{xxxix} World Nuclear News. (2021, 19 Février). *Chinese fast reactor begins high-power operation*. World Nuclear News. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-fast-reactor-begins-high-power-operation>
- ^{xxx} World Nuclear News. (2021, 19 Février). *Chinese fast reactor begins high-power operation*. World Nuclear News. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Chinese-fast-reactor-begins-high-power-operation>
- ^{xxxxi} World Nuclear News. (2022, 8 Mars). *Indian test reactor reaches operation landmark*. World Nuclear News. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Indian-test-reactor-reaches-operation-landmark>
- ^{xxxii} World Nuclear Association. (2025, 23 Mai). *Nuclear Power in India*. World Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/india>
- ^{xxxiii} World Nuclear Association. (2024, 16 Février). *Small Nuclear Power Reactors*. World Nuclear Association. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors>
- ^{xxxiv} World Nuclear News. (2023, 8 septembre). *US furthers overseas support for coal-to-SMR projects*. World Nuclear News. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/US-furthers-overseas-support-for-coal-to-smr-projects>
- ^{xxxv} World Nuclear News. (2023, 12 Juillet). *MHI to develop Japanese fast reactor*. World Nuclear News. <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/MHI-to-develop-japanese-fast-reactor>
- ^{xxxvi} World Nuclear News. (2019, 9 Décembre). *France and Japan collaborate in fast reactor development*. World Nuclear News. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/french-japanese-collaboration-on-fast-reactor-develpment>
- ^{xxxvii} World Nuclear News. (2024, décembre 6). *Framatome to share fast reactor experience with Japan*. <https://www.world-nuclear-news.org/articles/framatome-to-share-fast-reactor-experience-with-japan>
- ^{xxxviii} Bréchet, Y., Henriot, P., Ledermann, P., Piednoir, S., & Chassaigne, A. (2024, 18 décembre). *Nucléaire : pour la relance d'un projet de réacteur à neutrons rapides au sodium* [Tribune]. *L'Humanité*. Consulté en juin 2025, sur <https://www.humanite.fr/en-debat/energie/nucleaire-pour-la-relance-dun-projet-de-reacteur-a-neutrons-rapides-au-sodium>
- ^{xxxix} *L'aval du cycle nucléaire*. (s. d.). Sénat. <https://www.senat.fr/rap/o97-612/o97-61234.html>
- ^{xl} Miller, D. R., & Smith, J. A. (2023). *Oh, My Darling Clementine: A Detailed History and Data Repository of the Los Alamos Plutonium Facility*. *Journal of Nuclear Materials*, 595, 1–15. <https://doi.org/10.1080/00295450.2023.2176686>
- ^{xli} Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire. (2012, 21 mai). *Fission, réaction en chaîne et produits de fission*. <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/dialogue-pedagogie/fission-reaction-chaine-produits-fission>
- ^{xlii} Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). (2021). Chapitre 2. Conception et fonctionnement d'un réacteur à eau sous pression. Dans *Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance : État des connaissances* (pp. 33–63). Collection « Sciences et techniques ». IRSN.

^{xliii} Michaille, P. (2012, Novembre 28). Article n°3 - Association des retraités du groupe CEA - Groupe argumentaire sur les énergies nucléaires et alternatives. Récupéré sur Energethique:
https://energethique.com/file/ARCEA/Articles/Article_03_Phenix.pdf

^{xliv} Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. (s.d.). Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire (Chapitre 2). <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/nucleaire/fonctionnement-reacteur-nucleaire.aspx?Type=Chapitre&numero=2>

^{xlv} Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire. (2012). Panorama des filières de réacteurs de quatrième génération (GEN IV) (IRSN 2012/158).
https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-irsn/GENIV_texte_VF_241012a.pdf



EGE Ecole de Guerre
Economique

CHRISTIAN.HARBULOT@EGE.FR

-

**196 RUE DE GRENELLE
75007 PARIS**

