

Quelle énergie pour la Bretagne ?

Le nucléaire

Document faisant suite à la réunion du 15 juin 2024

Yves Mervin

Cercle Pierre Landais

Association pour le développement local et régional

Institutions et politiques publiques

Site internet : united-citizens.eu (en cours de redéveloppement)

Contact : adlr56@free.fr



L'Union est fondée sur les valeurs de respect de la dignité humaine, de liberté, de démocratie, d'égalité, de l'État de droit, ainsi que de respect des droits de l'homme, y compris des droits des personnes appartenant à des minorités. Ces valeurs sont communes aux États membres dans une société caractérisée par le pluralisme, la non-discrimination, la tolérance, la justice, la solidarité et l'égalité entre les femmes et les hommes.

Article 2 du traité de l'Union européenne (valeurs de l'Union)

Illustration de couverture : IAEA (<https://www.iaea.org/sites/default/files/uranium-1140x640.jpg>)

Synthèse

Synthèse stratégique : Un programme nucléaire territorial pour la Bretagne – SMR RNR 4G et transition énergétique durable

1. Objectif général

Ce document présente une proposition structurée de développement d'un programme nucléaire régional basé sur l'installation de réacteurs modulaires de quatrième génération (SMR RNR 4G). L'objectif est de fournir à la Bretagne une énergie décarbonée, pilotable, compétitive et durable, tout en construisant un modèle territorial reproductible à l'échelle nationale ou européenne.

2. Contexte énergétique régional

- La Bretagne consomme environ 115 TWh d'énergie finale par an, majoritairement sous forme de carburants pétroliers et de gaz naturel.
- L'électricité consommée est majoritairement importée.

- L'objectif est de convertir progressivement cette consommation vers une énergie électrique bas-carbone produite localement, avec valorisation de la chaleur produite.

3. Proposition technique et économique

- ▶ Composantes principales : 70 SMR RNR 4G répartis dans les zones industrielles bretonnes
 - Un centre de retraitement et de gestion du combustible (CI-CGR) à proximité de Morlaix-Brennilis
 - Une électro-raffinerie pour la production de carburants de synthèse
 - Un centre DAC/DOC pour capter les gaz à effet de serre de l'air et des océans
 - Un institut nucléaire public régional pour la R&D et la formation
- ▶ Coût du programme :
 - Environ 92 milliards d'euros d'investissements « overnight »
 - Étendu sur un siècle, avec un pic d'investissement sur les 10 premières années
- ▶ Compétitivité :
 - Coût de l'électricité produite (LCOE) : entre 16 et 25 €/MWh, selon les hypothèses de durée de vie et de taux d'intérêt
 - Coût du gaz de synthèse : environ 45 €/MWh, compétitif face au gaz naturel fossile
 - Coût des carburants de synthèse : ~0,60 €/litre, sans taxe

4. Emploi et retombées économiques

- 14 000 emplois directs mobilisés sur un siècle
- En ajoutant les effets indirects et induits : jusqu'à 35 000 emplois équivalents temps plein
- Fort impact sur la formation, la recherche, la sous-traitance industrielle et les services

5. Acceptabilité et territorialisation

- Le programme tient compte de l'histoire de la Bretagne (opposition à Plogoff) mais s'appuie sur les activités nucléaires discrètes déjà présentes (Indret, SNLE, consommation importée).
- Approche décentralisée : chaque territoire bénéficie de retombées directes (production, emploi, chaleur, carburants).
- Importance d'une gouvernance régionale associée à l'autorité nationale (ASN, Parlement, ministères).

6. Dimension stratégique et internationale

- Le développement du nucléaire civil avancé (RNR 4G) est stratégique pour la souveraineté énergétique.
- Synergies technologiques et industrielles possibles avec le nucléaire de défense, sans confusion des finalités.
- Le maintien d'une capacité nucléaire forte contribue à la crédibilité d'une dissuasion européenne à long terme.

7. Conclusion

Un tel programme représente une alternative intégrée, soutenable et stratégiquement cohérente pour réussir la transition énergétique bretonne. Il combine des objectifs environnementaux, économiques, sociaux, et géopolitiques tout en s'ancrant dans une réalité territoriale et industrielle forte.

Sommaire

Synthèse	2
Sommaire	5
Présentation	5
La consommation	7
Le réacteur.....	9
Le cycle du combustible.....	21
Le parc nucléaire	35
La sûreté et la sécurité.....	40
La réglementation.....	49
L'économie.....	52
L'organisation institutionnelle	63
Le dérèglement climatique	65
La synergie nucléaire.....	67
L'acceptabilité.....	72
Glossaire.....	79
Bibliographie.....	80
Sommaire long	80

Présentation

Ce document est un approfondissement de la réflexion du Cercle Pierre Landais – Association pour le développement local et régional sur l'énergie en Bretagne sur l'énergie en Bretagne¹. L'approche consiste à comparer plusieurs filières énergétiques permettant le remplacement des énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) qui s'épuiseront tôt et qui présentent surtout l'inconvénient critique d'être, selon les technologies actuelles, émetteurs de gaz à effets de serre dans l'atmosphère. Ces émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère sont à l'origine du réchauffement climatique d'origine anthropique, la plus grave menace qui pèse sur la planète, l'humanité et la biodiversité aujourd'hui.

Les filières alternatives aux énergies fossiles sont :

- Les énergies renouvelables

¹ En particulier lors de la réunion du samedi 15 juin 2024 (voir le compte-rendu : http://bibliotheque.idbe.bzh/data/cle_361/2024-07-05_-_CPL-ADLR_-_Energie_CR_3.pdf).

- Le nucléaire

A ces deux options, il convient d'ajouter une troisième option, la sobriété, c'est-à-dire le non-remplacement des énergies fossiles, une option volontaire ou involontaire à ne pas négliger dans la mesure où les énergies renouvelables ne garantissent pas un remplacement équivalent en consommation finale et en durabilité (durabilité qu'il n'y a pas lieu de confondre avec renouvelabilité). Si en outre l'option nucléaire est refusée par principe, alors l'option de la sobriété est à envisager sérieusement (elle fera l'objet d'une note spécifique pour en examiner les conséquences).

Les énergies renouvelables sont principalement :

- L'éolien et le solaire photovoltaïque producteur d'électricité mais non pas de carburants ni de gaz en remplacement des énergies fossiles,
- La biomasse qui se présente sous forme solide, liquide ou gazeuse. Et qu'il est ensuite possible de convertir en électricité.

D'autres filières renouvelables (marémotricité, courants sous-marins...) présentent un faible potentiel et ne peuvent donc constituer une filière principale dans un mix énergétique, seulement des appoints limités.

La comparaison entre ces filières et conduite selon le principe des « monofilières principaux », soit le remplacement de l'énergie actuelle par une seule des filières précitées et à même niveau de consommation d'énergie finale : c'est la seule façon de comparer des filières entre elles, d'identifier les avantages et leurs inconvénients.

Ce document porte sur une option nucléaire qui présente elle-même plusieurs options avec de nombreuses combinaisons, en particulier selon :

- La puissance du réacteur à distinguer entre les réacteurs de grandes puissance, largement installés dans le monde, et les petits réacteurs modulaires (Small Modular Reactor : SMR), solution émergente
- Selon la génération de réacteur entre 3^e et 4^e génération, en particulier les réacteurs à neutron rapides (RNR)

Ce document portera donc sur une filière nucléaire à base de SMR de 4^e génération.

L'étude d'une filière nucléaire sur ces bases suppose de préciser :

- La consommation finale objectif
- Les choix technologiques pour le réacteur
- Le cycle du combustible
- L'architecture d'un parc nucléaire
- La sécurité
- La réglementation
- Le financement
- L'organisation institutionnelle
- La contribution à la lutte contre le réchauffement climatique
- L'acceptabilité
- L'impact sur l'économie au-delà de la seule production d'énergie,

Notons dès maintenant que l'option retenue « SMR 4G » n'est pas encore totalement mature du point de vue des technologies et de la réglementation. Mais la recherche et de nombreux développements internationaux et les enjeux importants liés à ces technologies conduisent à considérer que les développements opérationnels surviendront dans les prochaines années.

Notons que cette approche RNR 4G au format SMR est une approche du nucléaire parmi d'autres, en particulier les approches 3^{ème} génération et format grand réacteur. Ces options pourraient être étudiées pour elles-mêmes afin de les comparer à l'approche retenue.

L'approche sera adaptée à la configuration de la Bretagne souvent qualifiée de « péninsule électrique ». Elle s'inscrit dans une vocation nucléaire de la Bretagne qui développe et met en œuvre des SMR pour les plateformes navales de la Marine nationale.

Enfin cette option représentera l'avantage considérable de ne pas contribuer à la dégradation du climat et le réchauffement lié aux émissions de gaz à effet de serre anthropiques. Elle pourra participer à l'extraction de gaz à effets de serre de l'atmosphère (DAC – Direct Air Capture et DOC – Direct Ocean Capture).

La consommation

La filière énergétique nucléaire sera dimensionnée de façon à satisfaire la consommation finale de la Bretagne en prenant l'année 2020 comme référence de sa consommation finale. Soit une approche « monofilière » nucléaire qui permet de comparer cette approche à d'autres approches monofilières, en particulier les approches monofilières éolienne et photovoltaïque. C'est par rapport à un même niveau de consommation finale que peuvent se comparer des filières entre elles et mettre en évidence leurs avantages et leurs inconvénients intrinsèques.

La transition se situera entre la Situation énergétique de 2020 et la situation finale considérée comme s'étant réalisée en 2050, soit une trentaine d'années de transition.

La consommation finale de 2020 est synthétisée comme suit :

Filières énergétiques	GWh	%
Produits pétroliers et autres	52 000	45 %
Gaz naturel	22 000	19 %
Electricité	29 000	25 %
Autres	12 000	10 %
Total	115 000	100 %

Figure 1 – Consommation de référence en 2020 (en GWh)

Dans la mesure où cette consommation finale ne consiste pas en seule électricité, mais aussi en produits pétroliers et en gaz naturel, nous considérerons qu'il est nécessaire de convertir une partie de l'électricité et de la chaleur produite dans les réacteurs nucléaires en produits pétroliers et gaz de synthèse dans une « électro-raffinerie » basée sur des technologies éprouvées (électrolyse, RGWS et Fischer-Tropsch, Sabatier). Ce qui nécessite de produire plus d'énergie secondaire² en tenant compte des rendements de ces processus :

² Energie secondaire : production à partir d'une énergie primaire (en l'occurrence la matière énergétique nucléaire) d'une énergie « secondaire », soit une première forme d'énergie (en l'occurrence d'électricité et chaleur dans le réacteur) avant stockage ou transformation en énergie finale livrée à l'utilisateur.

Filières énergétiques	(enGWh)	Rendement	enGWh)
Produits pétroliers et autres	52 000	57 %	91 000
Gaz naturel	22 000	47 %	47 000
Total	74 000		138 000

Cette option « electro-raffinerie » met de côté la filière de la mobilité électrique à base de batteries qui nécessitent des technologies émergentes, des matériaux plus critiques et des infrastructures nouvelles. Elle pose en outre des questions géostratégiques. L'option « electro-raffinerie » est cohérente avec le nucléaire de 4ème génération dans la mesure où cette filière permet une cogénération de chaleur en même temps que l'électricité et que cette chaleur - du fait de l'approche SMR en zones industrielles - peut être directement fournie aux utilisateurs sous forme de chaleur et non pas sous forme d'électricité, de carburants liquide ou de gaz. D'où une certaine optimisation dans la consommation finale d'énergie :

Filières énergétiques	Consommation finale 2020	Utilisation de l'énergie finale			Chaleur substituable	Consommation finale 2050
		Electricité	Mobilité	Chaleur		
Pétrole	52 000	0	50 000	2 000	1000	51 000
Gaz naturel	22 000	1 000	0	21 000	10 000	12 000
Electricité	29 000	26 000	0	3 000	2 000	27 000
Autres	12 000			12 000	2 000	10 000
Total	115 000	30 000	50 000	38 000	15 000	100 000

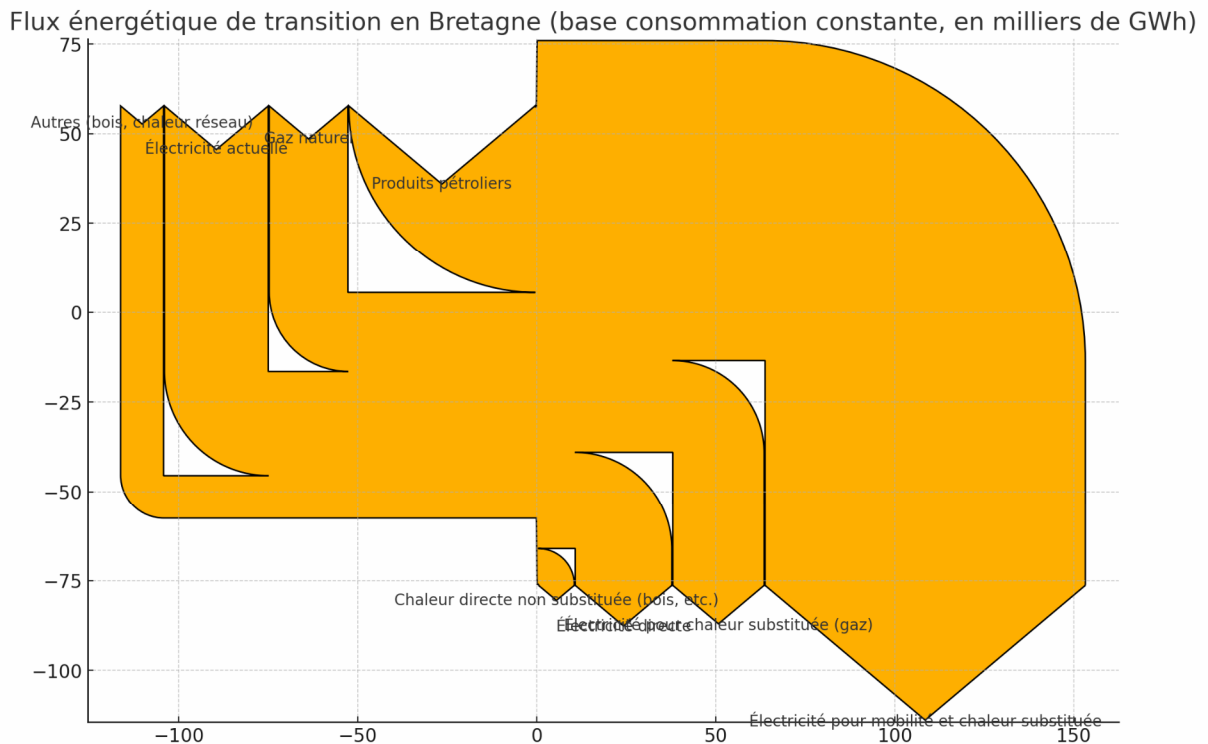
Ce qui réduit potentiellement la consommation finale d'environ 15 000 GWh. En synthèse, la transition énergétique nécessite une production d'électricité de l'ordre de 142 000 GWh.

Filières énergétiques	Consommation finale		Rendement	Electricité à produire
	2020	2050		
Pétrole	52 000	51 000	57 %	89 000
Gaz naturel	22 000	12 000	47 %	25 000
Electricité	29 000	27 000		27 000
Autres	12 000	12 000		0
Total	115 000	100 000		142 000

Ces estimations sont des ordres de grandeurs. A la transition à même consommation finale, il conviendra d'estimer les variations de consommation finale survenant au cours de la transition :

- liées au renchérissement éventuel de l'énergie qui incitera à la sobriété énergétique
- à l'effet rebond lié à une électricité restant cependant compétitive, alors que les autres électricités non nucléaires sont susceptibles d'augmenter en prix.
- Aux besoins nouveaux (dessalement, data center, intelligence artificielle, nouvelles activités industrielles...),
- Capacité d'exportation d'énergie, un atout considérable dans le monde futur.

Ces évolutions sont spéculatives et peuvent faire suite à l'analyse de la seule transition à même consommation finale de l'année de référence 2020.



La transition à même consommation finale représentée sous la forme d'un diagramme de Sankey.

Remarque : l'approche par l'électro-raffinerie retenue ici pour estimer un besoin de production sera à comparer à une approche par électrification de la consommation avec en particulier les batteries pour la mobilité. Cette approche alternative, qui reste à étudier et qui suppose de nombreuses hypothèses, est susceptible de nécessiter moins de production électrique, probablement avec plus de dépendances aux matériaux que le nucléaire.

Le réacteur

Le réacteur à neutrons rapides de quatrième génération (RNR 4G)

Un réacteur à neutrons rapides est un réacteur nucléaire qui n'utilise pas de ralentisseur de neutrons (modérateur) comme les réacteurs classiques à eau (REP, REB). Il utilise les neutrons rapides directement pour entretenir la réaction nucléaire, ce qui de :

- Utiliser beaucoup plus efficacement l'uranium naturel (pas seulement l'isotope 235, mais aussi 238 via la transmutation en plutonium),
- Brûler les déchets nucléaires lourds (actinides mineurs),
- Produire de l'énergie tout en réduisant la durée de radiotoxicité des déchets ultimes.

Les réacteurs de quatrième génération ne sont pas seulement rapides : ils intègrent aussi des innovations clés par rapport aux anciens RNR (comme Superphénix) :

Critère	RNR 4G	RNR précédents
Refroidissement	Sodium liquide, plomb liquide, gaz, sels fondus	Principalement sodium liquide

Sécurité	Refroidissement passif, comportement sûr sans intervention	Sécurité active, vulnérable en perte de refroidissement
Combustible	Oxyde, métal, nitrure, recyclables plusieurs fois	Principalement oxyde d'uranium-plutonium
Gestion des déchets	Transmutation possible des actinides mineurs	Limité au plutonium

Les RNR relèvent de différentes technologies :

- Réacteur rapide refroidi au sodium (SFR) : Le plus mature technologiquement. Exemple : projet ASTRID en France (abandonne en 2019), projet BN-800 en Russie, projet Natrium aux Etats-Unis.
- Réacteur rapide refroidi au plomb (LFR) : Moins de risques chimiques qu'avec le sodium, inertie thermique très élevée. Exemple : projet MYRRHA en Belgique (sous critique).
- Réacteur rapide refroidi au gaz (GFR) : Haute température, meilleure efficacité thermodynamique, mais encore très expérimental.
- Réacteurs à sels fondus à neutrons rapides : Projet plus lointain, combinant les avantages des sels fondus et des neutrons rapides.

Les RNR 4G présentent plusieurs avantages stratégiques

- Boucler complètement le cycle nucléaire (valoriser 100 % de l'uranium au lieu de 1 % aujourd'hui).
- Réduire les déchets nucléaires ultimes de plusieurs ordres de grandeur (durée de radiotoxicité ramenée de 100 000 ans à quelques siècles).
- Améliorer l'indépendance énergétique (utilisation de l'uranium appauvri et du plutonium sans nouvel enrichissement).
- Accompagner le déploiement massif d'énergies renouvelables grâce à une production d'électricité pilotable et stable.
- Offrir un levier stratégique de lutte contre le changement climatique, en fournissant de l'électricité bas carbone massive et continue.

Cependant, les RNR 4G présentent plusieurs défis technologiques et industriels

- Gestion du sodium liquide : hautement réactif avec l'eau et l'air exige une ingénierie extrêmement rigoureuse.
- Complexité des matériaux : résistance aux radiations et aux températures élevées indispensable.
- Démonstration industrielle à grande échelle encore limitée (hors Russie et expérimentation en Chine).
- Acceptabilité politique et sociale du nucléaire avancé.

La situation aujourd'hui :

- La France a arrêté ASTRID en 2019, faute de volonté politique claire.
- La Russie exploite BN-600 et BN-800, et projette un BN-1200.
- La Chine a démarré son premier réacteur rapide CFR-600 en 2023.

- Les Etats-Unis lancent des projets Natrium (Bill Gates / TerraPower) en refroidissement sodium.
- L'Union européenne finance MYRRHA (Belgique) et développe des concepts de petits réacteurs rapides expérimentaux.

Synthèse rapide :

Atout	Défi
Fermeture du cycle nucléaire	Gestion complexe du sodium ou du plomb
Réduction massive des déchets	Développement industriel nécessaire
Électricité pilotable bas carbone	Coût d'investissement élevé initialement
Valorisation complète de l'uranium	Nécessité d'une acceptabilité sociétale renforcée

Le RNR 4G est la pièce maîtresse d'une transition énergétique nucléaire durable, combinant efficacité matière, sûreté renforcée, réduction des déchets et appui au climat. Encore faut-il une vraie volonté industrielle et politique pour passer à l'échelle.

Les SMR

SMR signifie Small Modular Reactor = petit réacteur nucléaire modulaire. Ce sont des réacteurs :

- de petite puissance : généralement entre 10 MW et 300 MW électriques par unité,
- conçus pour être fabriqués en usine, transportés en module et installés rapidement sur site.

Leur philosophie : rendre l'énergie nucléaire plus flexible, rapide à déployer, plus sûre et plus accessible. Le concept clé est la production en série, installation simplifiée, coûts et délais réduits.

Les principales caractéristiques des SMR :

Caractéristique	SMR
Puissance unitaire	10 à 300 MWe
Conception	Compacte, modulaire, usine
Déploiement	Plus rapide (4-5 ans contre 10 ans pour un EPR)
Refroidissement	Eau, gaz, sel fondu, métal liquide selon les modèles
Sécurité	Forte (refroidissement passif, enfouissement possible)
Flexibilité	Installation par unités, adaptable à la demande locale

L'intérêt des SMR

- Accélérer la décarbonation : production massive d'électricité bas carbone.
- Remplacer des centrales fossiles existantes (charbon, gaz).
- Alimenter des zones isolées (îles, régions industrielles éloignées).
- Soutenir les renouvelables par une production pilotable et flexible.
- Réduire les risques industriels par des unités plus petites et plus sûres.

En résumé : amener l'énergie nucléaire partout avec moins de risques, moins de délais et moins de coûts unitaires.

Les technologies de SMR en développement

- SMR à eau pressurisée (PWR modifié) : plus simple, dérivé des technologies classiques (ex : NuScale USA, Rolls-Royce SMR UK, NUWARD France).
- SMR avancés (haute température, neutrons rapides) : plus performants, mais moins matures (ex : X-Energy USA, Sealer Suède).
- SMR à sels fondus : prometteurs pour l'avenir, mais encore expérimentaux.

Les développements de SMR aujourd'hui :

Pays	Projet phare
États-Unis	NuScale, X-Energy, Natrium
Canada	GE Hitachi BWRX-300, Terrestrial Energy
Royaume-Uni	Rolls-Royce SMR
France	NUWARD (EDF, CEA, TechnicAtome, Naval Group)
Russie	Akademik Lomonosov (SMR flottant déjà opérationnel)
Chine	ACP100 (Linglong One)

Les avantages stratégiques des SMR

- Coût initial réduit par rapport aux grosses centrales (moins d'investissement au début).
- Sécurité passive accrue : arrêt automatique en cas de défaillance, refroidissement naturel.
- Flexibilité industrielle : série d'unités installables selon les besoins.
- Usage multiple : électricité, chaleur industrielle, désalinisation d'eau, hydrogène vert.
- Soutien territorial : production locale pour zones isolées ou industrielles.

Les défis des SMR

- Coûts réels à confirmer : économies d'échelle nécessaires.
- Acceptabilité réglementaire : normes de sûreté adaptées encore en cours d'élaboration.
- Financement initial des usines de fabrication : investissement lourd au départ.
- Émergence de la concurrence : e-fuels, batteries longues durées, réseaux électriques renforcés.

Synthèse rapide

Atout	Défi
Déploiement rapide et modulaire	Investissement initial d'industrialisation
Flexibilité locale	Réglementations nucléaires à adapter
Sûreté renforcée passive	Coûts encore incertains à grande échelle
Multitude d'usages possibles	Nécessité d'une politique énergétique stable

Les SMR sont le pari d'un nucléaire plus léger, plus agile et plus territorial, pour compléter les grandes centrales et accompagner la transition énergétique mondiale. Encore faut-il réussir la démonstration industrielle et réduire les coûts à grande échelle.

Les SMR RNR 4G

Les SMR RNR 4G, soient des Petits Réacteurs Modulaires à Neutrons Rapides de Quatrième Génération. Un SMR RNR 4G est :

- Un petit réacteur nucléaire (de 10 à 300 MWe),
- Modulaire (fabriqué en usine, transportable),
- Fonctionnant avec des neutrons rapides (pas de modérateur),
- Et intégrant les caractéristiques de sûreté, de durabilité et d'efficacité typiques des réacteurs de quatrième génération.

Il combine trois innovations majeures :

- Format compact et flexible du SMR,
- Technologie rapide permettant la fermeture du cycle nucléaire,
- Sûreté renforcée passive et réduction massive des déchets.

En quoi est-ce différent d'un SMR classique ?

Critère	SMR conventionnel (eau pressurisée)	SMR RNR 4G
Modérateur	Eau sous pression	Aucun
Refroidissement	Eau	Sodium, plomb, gaz, sels fondus
Combustible	Uranium enrichi	Uranium appauvri, plutonium, recyclage d'actinides
Déchets	Identiques à ceux des gros réacteurs	Réduction forte, déchets moins radiotoxiques
Cycle du combustible	Ouvert	Fermé (multi-recyclage)

Pourquoi développer des SMR RNR 4G ?

- Optimiser l'usage de l'uranium (exploiter l'uranium 238, multiplier l'efficacité par 50 à 100).
- Réduire les déchets nucléaires (moins de volume, radiotoxicité réduite à quelques siècles).
- Assurer une production d'énergie bas carbone, pilotable et territoriale.
- Créer un système énergétique durable à long terme, en autonomie d'approvisionnement.

En résumé : allier efficacité énergétique, indépendance stratégique, et sûreté renforcée dans un format adaptable.

Les principales technologies envisagées

- SMR rapide au sodium liquide (type mini-ASTRID, mini-Natrium) : technologie la plus avancée aujourd'hui.
- SMR rapide au plomb liquide (type SEALER, MYRRHA small scale) : très forte inertie thermique, sûreté passive naturelle.
- SMR rapide au gaz (type UltraSafe Micro Modular Reactor - version rapide théorique) : haute température, conversion électrique efficace.

- SMR à sels fondus rapides (recherche en cours) : combiner la flexibilité chimique des sels et la rapidité neutronique.

Qui travaille sur les SMR RNR 4G ?

Pays	Projet ou acteur
États-Unis	TerraPower (Natrium, version réduite)
Russie	RNR compacts projetés (après BN-800)
France	Réflexions post-ASTRID ; CEA s'intéresse à des concepts SMR rapides
Chine	Développement rapide en neutrons rapides (CFR-600, puis mini-CFR)
Suède	LeadCold (SEALER-L), SMR rapide au plomb

Les avantages stratégiques des SMR RNR 4G

- Boucler le cycle du combustible nucléaire à l'échelle régionale ou nationale.
- Fournir une électricité pilotable, propre, et massivement disponible.
- Réduire fortement la dépendance aux combustibles fossiles et aux importations d'uranium enrichi.
- Utiliser le stock actuel d'uranium appauvri et de plutonium civil comme ressource stratégique.
- Accompagner la transition climatique tout en gérant activement les déchets existants.

Les défis spécifiques

- Sodium ou plomb liquide : exigences très strictes de conception et de maintenance.
- Complexité du combustible (métallique ou nitrure, multi-recyclage).
- Industrialisation encore embryonnaire (besoin d'usines de fabrication adaptées).
- Réglementations nucléaires à adapter aux SMR rapides.

Synthèse rapide

Atout	Défi
Boucler le cycle nucléaire	Gestion des métaux liquides complexes
Réduire les déchets massivement	Démonstration industrielle nécessaire
Production flexible et locale	Réglementations lourdes à assouplir
Forte valeur stratégique nationale	Investissements lourds initiaux

Les SMR RNR 4G sont probablement l'avenir du nucléaire durable, alliant autonomie, efficacité, flexibilité, sûreté et climat. Leur succès dépendra de notre capacité à franchir la barrière technologique, industrielle et réglementaire d'ici 2035–2040.

Les développements en cours

Acteurs industriels et startups engagés sur les SMR RNR 4G

États-Unis

Entreprise	Projet	Description
TerraPower (Bill Gates)	Natrium	SMR sodium rapide de 345 MWe (version plus grande aujourd'hui, mais possibilité de versions modulaires plus petites à terme).
Oklo	Aurora	Micro-SMR à neutrons rapides, refroidi au métal liquide (hélium dans les versions avancées), puissance de 1 à 2

		MWe, basé sur combustible retraité.
X-Energy (en étude)	Future X-Core (hypothétique)	Envisage à long terme des variantes rapides à haute température en prolongement de ses réacteurs à billes de graphite.

Russie

Entreprise	Projet	Description
Rosatom	Lead-cooled SMR (concepts en développement)	Travaille sur des SMR au plomb liquide rapide, basé sur l'expérience BN-600, BN-800, et développement de futurs SMR compacts type BREST-SM.
Afrikantov OKBM (filiale Rosatom)	Mini-RNR rapide	Développement de petits réacteurs rapides à sodium et à plomb pour des usages isolés (mines, bases arctiques).

Suède

Entreprise	Projet	Description
LeadCold (SEALER)	SEALER-L	SMR rapide refroidi au plomb liquide, de très petite taille (~3 à 10 MWe), pour applications industrielles ou isolées (ex : Arctique).

Chine

Entreprise	Projet	Description
CNNC (China National Nuclear Corporation)	CFR-600 (grande échelle) + concepts futurs de mini-CFR	Le CFR-600 est un réacteur rapide sodium de taille classique (~600 MWe), mais des déclinaisons SMR rapides sont envisagées pour des îles ou des régions isolées.

Union européenne

Entreprise	Projet	Description
SCK-CEN (Belgique)	MYRRHA (et sa déclinaison SMR future)	MYRRHA est à l'origine un réacteur sous-critique rapide au plomb pour recherche. Des versions SMR au plomb liquide sont envisagées pour le futur.
CEA (France) (exploration)	Mini-ASTRID (projet conceptuel)	Le CEA a travaillé sur des miniaturisations conceptuelles du projet ASTRID, mais sans industrialisation à ce stade.

À noter

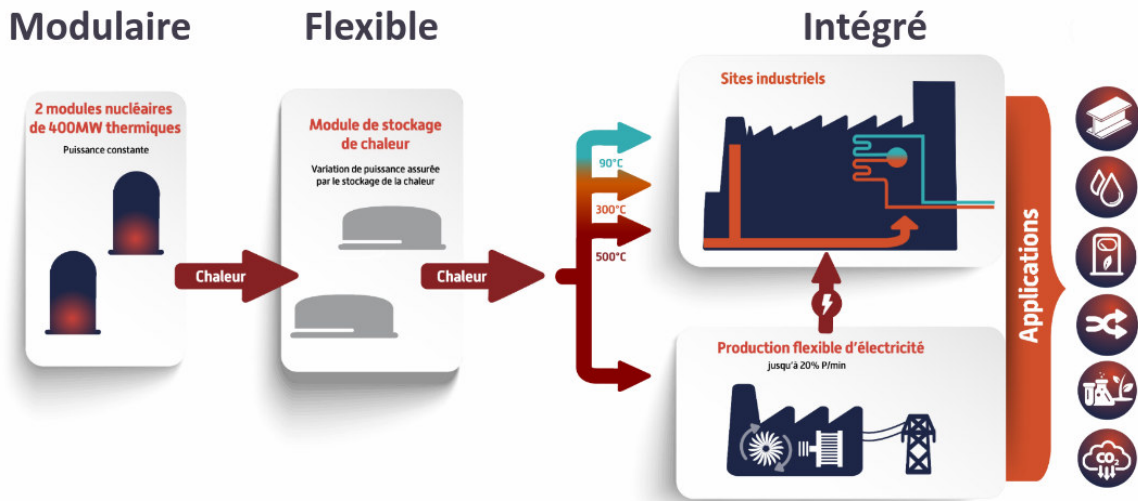
- Le segment SMR RNR 4G est encore émergent : beaucoup de concepts, peu encore de démonstrateurs commerciaux.
- Les États-Unis sont en tête pour les startups agiles (Oklo est emblématique).
- La Russie est en avance sur les démonstrations technologiques (plomb liquide, sodium rapide à petite échelle).
- La Suède développe une approche innovante "plomb + miniaturisation extrême" avec LeadCold.
- La France et l'Europe sont plus lentes mais disposent d'une excellente base scientifique (CEA, SCK-CEN).

Les SMR RNR 4G sont un domaine émergent où quelques pionniers industriels et startups s'affrontent. La Russie et les États-Unis sont en tête, suivis de la Suède et potentiellement de la France si un projet renaît.

Le moment est stratégique pour structurer un projet européen ou français avant que les standards internationaux ne soient fixés par d'autres.

Hexana (France)

HEXANA est une startup essaimée du CEA qui conçoit un réacteur nucléaire modulaire à neutrons rapides refroidi au sodium.



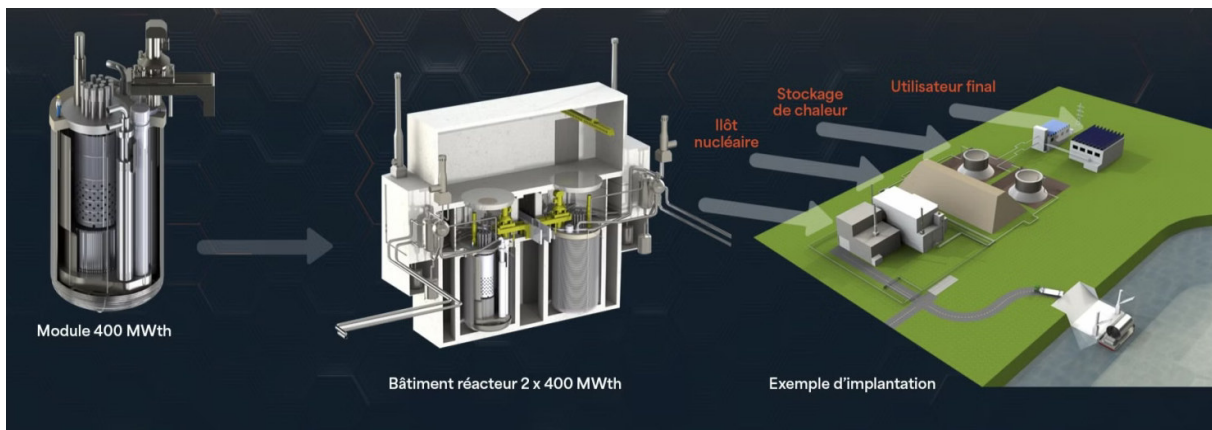
HEXANA développe un système énergétique de conception innovante, sûr et de fabrication modulaire associant deux petits réacteurs modulaires à neutrons rapides refroidis au sodium et un stockage thermique couplé aux besoins industriels.

Cette technologie de réacteur est la plus crédible des réacteurs de 4^e génération et s'appuie sur un patrimoine technologique industriel important développé par CEA (<https://www.cea.fr>),

Chaleur à haute température : jusqu'à 500°C pour des procédés industriels ou des réseaux de chaleur, y compris préchauffage de procédés très haute température

Électricité flexible pour les consommateurs à consommation variable ou pour remplacer les centrales thermiques à gaz.

Cogénération : chaleur et électricité flexible combinés pour la production de vapeur, d'hydrogène, de carburants de synthèse ou autres molécules chimiques (ammoniac, e-SAF, et e-methanol, e-methane, etc.)



Stellarium (France)

Voir les vidéos :

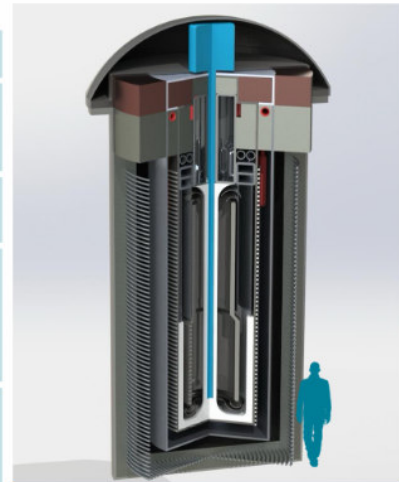
- <https://youtu.be/L1DNJBUM>
- <https://www.youtube.com/watch?v=RWtGOViGTEA>
- <https://www.youtube.com/watch?v=2jwR8hIzq7I&t=754s>

Le réacteur Stellarium



- Le Stellarium génère de l'énergie **compétitive, pilotable et soutenable**

Puissant	<ul style="list-style-type: none"> • 200 MWe ou 400 MWth (Température vapeur 580° C)
Coût-efficient	<ul style="list-style-type: none"> • LCOE < 70 €/MWh • CAPEX < 3 M€/MWe • OPEX stable (20 ans sans rechargement)
Pilotable	<ul style="list-style-type: none"> • Aussi flexible qu'une centrale à gaz : $\Delta P_e / mn > 50\%$ • >95% de disponibilité côté réacteur
Soutenable	<ul style="list-style-type: none"> • 20 ans d'autonomie de combustible sur site • Recyclage infini de la matière } 4 000 ans de réserves énergétiques • Multi-combustible (U/Pu/Th) • Incinération possible de certains déchets à vie longue (^{241}Am) • Jusqu'à 60 million de tonnes de CO_2 évitées par Stellarium
Sûreté par conception	<ul style="list-style-type: none"> • Pression atmosphérique, coeur liquide, contre-réaction thermique ultra-rapides par dilatation thermique → empêche tout accident grave • 4 barrières de confinement → déployable dans des zones périurbaines et industrielles



Stellarium - Molten Salt Fast Reactor

STELLARIA

Confidentiel | Droits réservés | 29/08/2024 | 9

https://www.sfenral.fr/images/Conferences/2024-06-12_STELLARIA_version_publicue.pdf

Newcleo (franco-italien et UK ?)

Small Modular Lead-cooled Fast Reactors (LFR) <https://www.newcleo.com/our-technology/reactors/>

Naarea (France)

<https://www.naarea.fr/fr>

Le micro-générateur XAMR® de NAAREA combine trois innovations majeures ayant fait l'objet de nombreuses recherches dans la filière du nucléaire : les sels fondus, les neutrons rapides et les réacteurs modulaires SMR (Small Modular Reactor).

NAAREA a opté pour le développement d'un réacteur nucléaire pour tirer parti de l'exceptionnelle densité énergétique de l'atome et de sa capacité à générer de l'énergie de manière pilotable.

Fondée sur l'exploitation de l'interaction nucléaire forte, la fission des atomes lourds libère des quantités phénoménales d'énergie. Un gramme d'uranium génère deux millions de fois plus d'énergie que la combustion d'un gramme d'essence. Cette densité énergétique permet de présenter une empreinte matière (occupation des sols) bien plus faible qu'avec n'importe quelle autre source d'énergie. La fission nucléaire ne libère pas de gaz à effet de serre et la réaction en chaîne peut être ajustée pour diminuer ou augmenter la puissance générée. Pour résoudre le trilemme énergétique, NAAREA s'appuie sur une l'énergie nucléaire qui peut désormais devenir durable, grâce à des innovations majeures.

Le fluide caloporteur

Le fluide caloporteur représente le principal choix technologique en matière de RNR 4G. En matière de réacteurs à neutrons rapides de 4^{ème} génération (RNR 4G), plusieurs fluides caloporteurs ont été testés, évalués ou projetés, chacun avec ses avantages et inconvénients.

Le sodium (Na)

Le sodium est très utilisé historiquement et il est aujourd'hui dominant dans les développements. Il est utilisé dans : BN-600 / BN-800 (Russie), Monju (Japon), Kalpakkam PFBR (Inde), Astrid (France, abandonnée).

Ses avantages :

- Très bon transfert thermique (haute conductivité)
- Pas de modération des neutrons : idéal pour les RNR
- Large expérience industrielle

Ses inconvénients :

- Réagit violemment avec l'eau et l'air : risque d'incendie
- Opaques : surveillance interne difficile
- Problèmes d'activation (sodium devient légèrement radioactif)

Le sodium reste la référence industrielle actuelle, mais il est questionné pour des raisons de sûreté perçue et de complexité d'exploitation.

Le plomb ou Plomb-Bismuth (Pb / Pb-Bi)

C'est le fluide caloporteur qui monte en puissance (notamment en Russie et UE). Il est utilisé dans : projets russes (BREST-OD-300), le projet européen ALFRED (Roumanie), SEALER (Suède), projets militaires soviétiques (sous-marins Alfa)

Ses avantages :

- Très bonne stabilité chimique (pas de réaction avec l'air ou l'eau)
- Propriétés neutroniques excellentes (réflexion et inertie favorables)
- Peut piéger certains produits de fission

Ses inconvénients :

- Très lourd, érosion mécanique
- Température de fusion élevée (327 °C) : besoin de chauffage en cas d'arrêt
- Bismuth produit du polonium 210 radioactif très toxique

La tendance est en forte progression pour des raisons de sûreté passive, notamment en Europe de l'Est et dans les SMR innovants.

Les gaz (CO₂ ou helium)

Très sûr chimiquement. Ils sont utilisés dans des réacteurs anciens (Magnox, AGR) et étudiés pour Gen IV (GFR).

Les avantages :

- Inerte chimiquement, pas de corrosion, pas de réactions violentes
- Pressions maîtrisables

Les inconvénients :

- Capacité thermique limitée : moins efficace pour transférer la chaleur
- Températures de fonctionnement élevées nécessaires

Tendance : peu prioritaire dans les RNR, mais plus fréquent dans les HTR (réacteurs à haute température)

Les sels fondus (fluorures, chlorures)

Solution innovante à long terme (MSFR, MCFR). Utilisé dans : projet Molten Salt Fast Reactor (EU), MCFR (US TerraPower/ORNL)

Les avantages :

- Le combustible peut être dissous dans le sel
- Haute température possible (rendements élevés)
- Très bonne stabilité chimique, pas de pression

Les inconvénients :

- Très corrosifs, difficile à contenir
- Technologie encore expérimentale
- Gestion des produits de fission complexe

Tendance très prometteuse à long terme, mais pas encore mature industriellement.

Synthèse comparative

Fluide	Maturité	Avantages principaux	Inconvénients majeurs
Sodium (Na)	Très élevée	Expérience industrielle, bonne inertie	Reactif à l'eau et à l'air
Plomb/Pb-Bi	En progrès	Stabilité chimique, sûreté passive	Masse, température de fusion, polonium
Gaz (He, CO ₂)	Moyenne	Inertie chimique, simplicité	Faible capacité thermique
Sels fondus	En recherche	Haute température, possibilité de cycle liquide	Corrosivité, immature technologiquement

En conclusion

- Le sodium reste dominant dans les démonstrateurs actuels (Russie, Inde) malgré ses défauts.
- Le plomb est la piste montante, jugée plus sûre à long terme.
- Les sels fondus incarnent l'avenir technologique potentiel, avec des concepts très innovants.

Le choix dépend souvent d'un compromis entre sûreté, rendement, maturité industrielle et ambition technologique. Nous retiendrons par défaut le sodium tout en restant vigilant sur les autres technologies.

La maturité

Les RNR sont démontrés le plus souvent en tant que démonstrateurs, mais aussi opérationnellement en Russie. La France représente une référence mondiale pour le réacteur de 3eme génération (REP et EPR) et peut devenir une référence mondiale pour la 4eme génération.

Pour crédibiliser l'implantation d'une filière RNR 4G SMR en Bretagne, nous nous appuyerons sur l'héritage le plus robuste techniquement, le plus maîtrisé industriellement, le plus utile en retour d'expérience — tout en neutralisant les controverses historiques.

Phénix (1973-2009) - Réacteur RNR sodium expérimental

Ce qui crédibilise :

- Succès technologique : fonctionnement stable pendant 35 ans.
- Très grand retour d'expérience sur les réacteurs à sodium (exploitant CEA).
- Irradiation de combustibles MOX et comportement des matériaux étudiés en profondeur.
- Déjà en format intermédiaire, proche d'un pré-SMR (250 MWe).
- Très utile pour simuler et justifier des SMR sodium de 4e génération.

Ce qui limite :

- Ce n'est pas formellement un SMR (un peu trop puissant)
- Ancienne génération, pas encore 100 % passif.

Le projet Phenix = base de légitimité technique et retour d'expérience solide.

Superphenix (1986-1997) - Prototype industriel de 1 200 MWe

Ce qui crédibilise :

- Plus puissant réacteur RNR au monde à son époque.
- Fonctionnement démontré (malgré des difficultés).
- Technologie sodium testée à grande échelle.

Ce qui ne crédibilise pas :

- Fortement politisée et contestée, Symbole de méfiance publique.
- Longues périodes d'arrêt, fonctionnement effectif très court.
- Démantèlement long et coûteux encore associé à l'échec.

Superphenix est une référence utile pour les ingénieurs, pas pour l'image publique.

ASTRID

Ce qui crédibilise :

- Conception la plus avancée pour un RNR sodium de 4e génération.
- Fort potentiel d'intégration de sécurité passive, de réduction des déchets et de souplesse de fonctionnement.

- Etudes de transmutation, de miniaturisation, de couplage au retraitement.

Ce qui limite :

- Jamais construit, donc pas de retour d'exploitation.
- Arrêté pour raisons politiques, ce qui complique son usage comme argument public.

ASTRID présente donc une forte crédibilité conceptuelle et ingénierie de 4e génération, mais sans démonstration.

Conclusion :

Critere	Phénix	Superphenix	ASTRID
Fonctionnement réel	35 ans	Très limité	Non
Retour d'expérience	Solide	Partiel	Sur plans
Image publique	Plutôt neutre	Négative	Peu connue
Compatibilité SMR	Moyenne	Trop gros	Très forte
Maturité industrielle	Elevée	Moyenne	Théorique

Le cycle du combustible

Le cycle du combustible accompagne la mise en œuvre du réacteur nucléaire en entrée avec diverses étapes intermédiaires de retraitement jusqu'à l'enfouissement de déchets ultimes. Le cycle du combustible concerne le combustible lui-même, les produits de fissions et les éléments d'activation (utilisé pour la fabrication et l'exploitation du réacteur).

période	1	1 H																	2 He						
	2	3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	3	11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
	6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
	7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh											
			Lanthanides	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu								
			Actinides	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr								

 Combustibles utilisés (U, Pu)	 Autres produits de fission
 Actinides mineurs à transmuter (Am, Cm, Np)	 Lanthanides à séparer (La, Ce, Nd...)
 Produits de fission majeurs (Cs, Sr, I...)	 Éléments d'activation
 Éléments neutres ou non concernés	

Le cycle du combustible amène à se référer souvent au tableau périodique des éléments.

Le cycle du combustible classique

Pour les réacteurs à eau pressurisée (REP) le cycle du combustible correspond à :

1. Extraction d'uranium naturel (U238 avec ~0,7 % U235)
2. Conversion (U3O8 → UF6)
3. Enrichissement en U235 (3–5 %) – sauf dans certains réacteurs CANDU (non enrichi)
4. Fabrication du combustible (UO2),
5. Irradiation dans le réacteur (généralement REP en France)
6. Déchargement et entreposage des combustibles usés
7. Recyclage partiel en MOX (UO2 + Pu issu des combustibles usés)
8. Déchets ultimes : actinides mineurs, produits de fission (HAVL) → enfouissement à long terme.

Ce cycle présente une spécificité française :

- Forte politique de retraitement à La Hague (Orano),
- Fabrication de MOX (MELOX à Marcoule),
- Le MOX est utilisé dans une partie des REP (22 sur 56 environ).

L'avantage de cette spécificité française est la réutilisation partielle du plutonium. Mais le multirecyclage est limité (généralement 1 à 2 fois max) et conduit à une production continue de déchets ultimes.

Le cycle du combustible dans le cas des réacteurs à neutrons rapides (RNR) qui utilisent des neutrons non ralentis, présentent les spécificités ce qui leur permet de :

- Consommer l'uranium appauvri (U238),
- Recycler le plutonium issu des combustibles usés classiques,
- Fissionner les actinides mineurs, aujourd'hui considérés comme des déchets.

Schéma du cycle RNR 4G

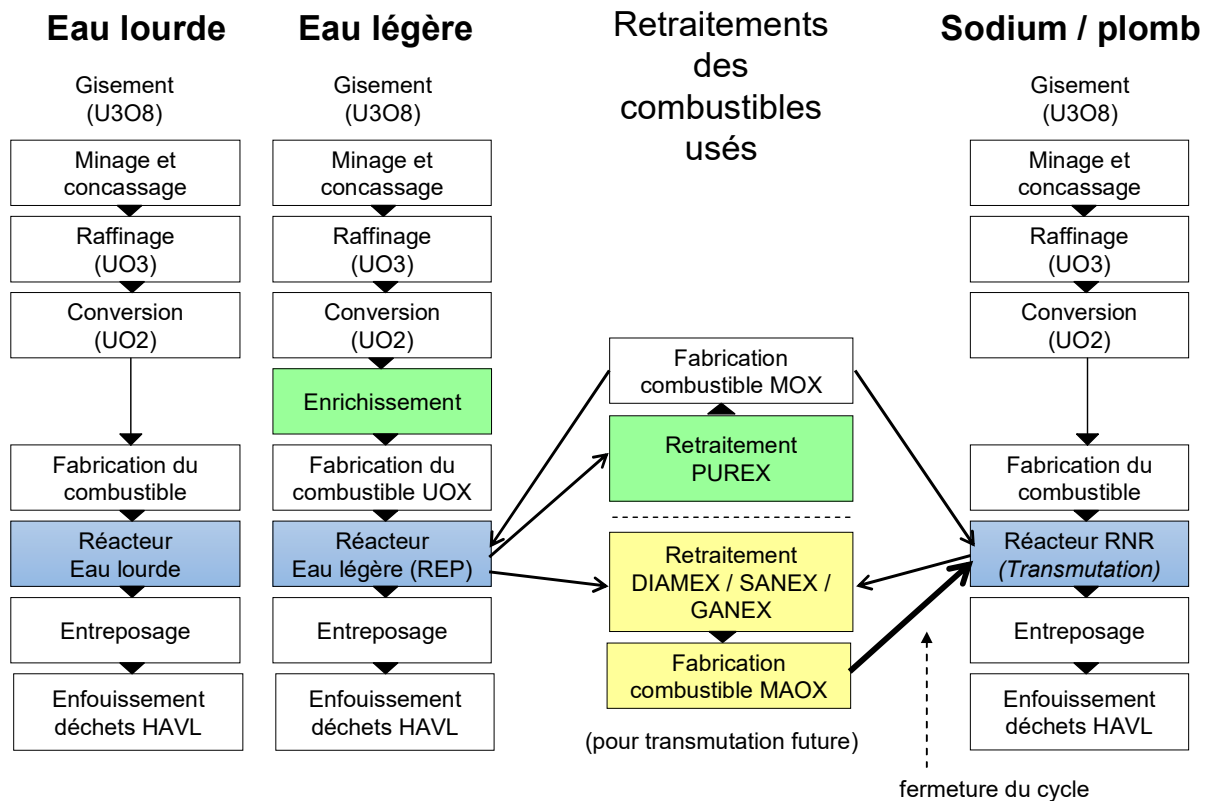
1. Utilisation initiale de plutonium ou de MOX enrichi pour « amorcer » le cœur,
2. Irradiation longue dans un spectre rapide : fission + conversion U238 en Pu239,
3. Déchargement pour retraitement avancé (actinides séparés, peu de perte),
4. Réinjection du plutonium ou des actinides dans un autre SMR RNR pour un cycle fermé,
5. Déchets ultimes réduits à des produits de fission à vie courte ou moyenne.

L'objectif est de parvenir à un cycle quasi fermé, très peu de déchets à enfouir, et valorisation maximale de l'uranium naturel.

Comparaison directe :

Élément	Cycle classique (REP)	Cycle RNR 4G (SMR)
Uranium nécessaire	Enrichi (3–5 %)	U appauvri ou naturel non enrichi
Plutonium	Produit, partiellement recyclé	Utilisé comme combustible
Actinides mineurs	Déchets à vie très longue	Transmutés ou recyclés
Recyclage	MOX 1–2 fois max	Multirecyclage visé
Déchets	HAVL pour enfouissement (plusieurs %)	Quantité réduite / vie réduite
Besoin d'enfouissement profond	Élevé (CIGEO)	Réduit (peut être en subsurface ou temporaire)

Le cycle du combustible RNR 4G transforme la logique nucléaire actuelle : il ne s'agit plus de « consommer du combustible et produire des déchets », mais de fermer le cycle, recycler l'énergie résiduelle et minimiser l'héritage radiotoxique laissé aux générations futures.



Le principaux cycles

Pour exploiter pleinement la capacité du RNR 4G à brûler des combustibles variés et à effectuer leur transmutation, des procédés de retraits spécifiques sont à développer pour séparer spécifiquement les actinides mineurs (neptunium, americium, curium), ce que ne fait pas le procédé industriel classique PUREX (qui sépare seulement uranium et plutonium). Ces procédés sont expérimentaux ou en développement avancé (CEA, Orano, laboratoires européens via le programme EURATOM).

Procédé	Signification	Objectif	Particularité
DIAMEX	DIAMide Extraction	Séparer les actinides majeurs et mineurs des produits de fission	Première étape de séparation groupée
SANEX	Selective ActiNide EXtraction	Séparer sélectivement les actinides mineurs des lanthanides	Extraction fine (nécessaire pour fission efficace dans les RNR)
GANEX	Group ActiNide EXtraction	Séparer tous les actinides en une seule phase (U, Pu, Am, Cm, Np)	Solution intégrée simplifiée, plus proche d'un cycle industriel

MAOX : le combustible pour RNR et transmutation

Le MAOX (Minor Actinide Oxide fuel) est un combustible contenant une proportion d'actinides mineurs, conçu pour les réacteurs à neutrons rapides (RNR). Sa composition typique :

1. UO_2 : uranium appauvri
2. PuO_2 : plutonium recyclé
3. AmO_2, CmO_2, NpO_2 : actinides mineurs (en % variables)

Cela permet aux RNR de fissionner les actinides mineurs, ce que les REP ne peuvent pas faire, et de réduire la durée de radiotoxicité des déchets de 100 000 ans à quelques siècles. Cela nécessite des conditions de fabrication strictes (radiotoxicité élevée, chaleur résiduelle...).

En résumé

- DIAMEX, SANEX, GANEX = techniques de séparation avancée des actinides mineurs.
- MAOX = combustible chargé en actinides mineurs destiné à la transmutation dans les RNR.
- Objectif final : boucler le cycle du combustible nucléaire tout en réduisant la toxicité à long terme des déchets.

La maturité des procédés

Les procédés de retraitement du combustible sont en cours de mise au point, et ne seront validés que dans quelques années. Mais leur mise au point définitive ne conditionne pas le démarrage d'une filière RNR 4G. L'enjeu est même d'être pionnier dans une technologie de rupture à risque contenu, ce qui constitue une opportunité stratégique majeure, notamment pour la France et la Bretagne dans notre contexte).

Être pionnier dans le SMR RNR 4G est un enjeu structurant, car la technologie de rupture est maîtrisée par peu d'acteurs. Les RNR 4G couplés à des SMR représentent une avancée décisive pour :

- Fermer le cycle du combustible,
- Réduire les déchets ultimes,
- Accroître l'autonomie énergétique et stratégique.

Les pays réellement positionnés sur ce segment sont encore peu nombreux (États-Unis, Russie, Chine, Inde, Japon).

Ces procédés représentent un risque technique faible dans une approche modulaire :

- Le SMR RNR peut démarrer avec du MOX, sans attendre les séparations avancées (DIAMEX/SANEX/GANEX),
- Il repose sur des technologies éprouvées partiellement dans les années 1980–2010 (Phénix, Superphénix, BN-800...),
- Le risque technologique est dé-risqué progressivement, à mesure que les combustibles évoluent.

Le risque politique et économique est limité :

- Le financement d'un programme SMR RNR est maîtrisable comparé aux grands réacteurs (EPR),
- Il peut mobiliser l'industrie locale (fabrication modulaire, installations locales, effet structurant régional),
- L'approche progressive permet de découpler le développement technique du cycle fermé de la production électrique immédiate.

En lançant un programme SMR RNR 4G maintenant, la France et la Bretagne peuvent

- Se positionner parmi les tout premiers à industrialiser une technologie nucléaire circulaire,
- Valoriser son héritage technologique (CEA, Orano, TechnicAtome, Naval Group...),
- Renforcer son leadership en matière de souveraineté énergétique et de décarbonation.

Les déchets ultimes

La question des déchets nucléaires ne porte pas sur leur existence future, mais sur leur réalité actuelle. Nous en avons déjà produits, et nous continuons à en produire. Même si l'on arrêta aujourd'hui toute activité nucléaire, il resterait nécessaire de gérer les déchets existants. Dès lors, la véritable question n'est pas tant la quantité de déchets à traiter, mais le fait que nous en avons, et qu'ils doivent être gérés durablement.

Ces déchets dits « ultimes » — ceux que l'on ne peut plus recycler — nécessitent un dispositif industriel de conditionnement, de confinement, puis un site d'enfouissement. Ce dispositif existe déjà en grande partie, et le site français d'enfouissement profond (CIGEO, à Bure) est en cours d'aménagement. La quantité marginale supplémentaire de déchets générée par une activité nucléaire prolongée ou modernisée ne modifie ni la nature du dispositif requis, ni son coût fondamental, ni même ses contraintes d'ingénierie : le facteur dimensionnant n'est pas tant le volume que la sécurité à long terme.

L'enfouissement repose sur une idée simple, mais exigeante : identifier une couche géologique stable, imperméable, et restée intacte pendant des millions d'années, susceptible de confiner la radioactivité sans intervention humaine. Cette condition est remplie dans plusieurs régions en France (argile du Callovo-Oxfordien, granite, sel), et elle constitue la clef technique d'une gestion sûre à l'échelle des siècles ou des millénaires.

L'intensité et la durée de vie des déchets

Le paradoxe des réacteurs à neutrons rapides (RNR) tient au fait qu'ils permettent de brûler presque entièrement le combustible nucléaire, exploitant ainsi la quasi-totalité de l'énergie contenue dans l'uranium. Ce procédé réduit considérablement la quantité de déchets à long terme à gérer. Il reste aussi à gérer le matériel de ces RNR qui sont irradiés au cours de leur exploitation et sont donc radioactifs en fin de vie.

La question de l'enfouissement des déchets (résidus de combustibles et matériels arrivés en fin de vie) est donc assez différente en termes de quantité de déchets à traiter dans une approche SMR RNR 4G. En outre, la durée de radiotoxicité de ces déchets est considérablement réduite et passe de quelques dizaines de milliers d'années à quelques siècles.

Les RNR ont un impact globalement réduit, mais ce n'est pas uniquement en termes de volume total. Le changement porte sur la nature, la radiotoxicité et la durée de vie des déchets, ce qui modifie :

- La surface nécessaire à l'enfouissement : moins de déchets très radiotoxiques à longue durée de vie (actinides mineurs).
- Le besoin en conteneurs spécifiques (moins de blindages très lourds pour des isotopes à vie très longue).
- Les contraintes de refroidissement passif : les déchets des RNR dégagent généralement moins de chaleur à long terme.

Le volume de déchets à traiter reste proportionnel :

- à la puissance installée (plus on produit d'électricité, plus on génère de déchets),
- et à la durée d'exploitation du parc nucléaire (le cumul des combustibles usés ou retraités croît avec le temps).

Mais avec les RNR, à puissance et durée égales, la masse et surtout la radiotoxicité des déchets à stocker est bien moindre (on évoque souvent des facteurs de réduction d'un ordre de grandeur en radiotoxicité à long terme).

En résumé :

Critère	Réacteurs thermiques (neutrons lents)	Réacteurs à neutrons rapides (RNR)
Volume total de déchets	Élevé	Réduit (par meilleur « brûlage »)
Radiotoxicité à long terme	Très élevée (actinides)	Réduite (transmutation)
Durée de confinement requise	≥ 100 000 ans	Quelques siècles à millénaires
Proportionnalité au parc	Oui	Oui, mais impact atténué
Dimensionnement du site	Important	Moins contraint (selon cycle fermé)

Le stockage géologique profond

Les projets de stockage géologique profond reposent sur des formations géologiques étanches et stables, situées à plusieurs centaines de mètres de profondeur (généralement entre 400 et 600 m). Trois grandes approches géotechniques sont privilégiées en Europe, chacune illustrée par un pays.

Comparaison des impacts des déchets RNR sur les trois types de sites

Critère	Argile France	Sel Allemagne, potentiel	Granit Finlande
Avantage principal	Rétention chimique	Fermeture mécanique	Stabilité structurale
Défi principal	Comportement thermique	Sensibilité à la chaleur	Fracturation (perméabilité)
Effet RNR (réduction chaleur)	Permet stockage plus dense	Réduit déformation du sel	Diminue expansion thermique
Effet RNR (moins d'actinides)	Moins de barrière chimique requise	Réduit besoins en barrière	Moins de migration à long terme
Effet sur la conception	Moins de surface nécessaire	Moins d'espacement thermique	Barrières allégées possibles

Par son socle granitique, la Bretagne se rapproche du cas de la Finlande. Mais ce cas n'est pas directement transposable à la Bretagne. La question de savoir si la Bretagne pourrait accueillir un site d'enfouissement de déchets nucléaires retraités, en lien avec la réhabilitation de sites miniers, mérite d'être examinée sous plusieurs angles : géologique, technique, réglementaire et politique.

La Bretagne repose sur un socle hercynien cristallin, majoritairement composé de granites, gneiss et schistes. Ces roches sont géologiquement anciennes et stables, ce qui pourrait les rendre intéressantes a priori pour un stockage profond, comme en Finlande. Mais elles sont fracturées et très perméables, ce qui complique la garantie d'un confinement hydraulique durable, indispensable à un site de stockage de haute sûreté.

La Bretagne a plusieurs anciens sites uranifères (ex. : Loqueffret, Lignol, Pont-Péan...), aujourd'hui en cours de réhabilitation. Ces sites présentent des infrastructures souterraines ou en surface existantes, une population historiquement exposée à une activité industrielle sensible, mais aussi des sols et eaux parfois encore pollués (radium, uranium résiduel).

Ces sites pourraient éventuellement accueillir des déchets de faible ou moyenne activité à vie courte (FMA-VC) ou certains résidus industriels contenant des radionucléides naturels (TENORM), comme ceux issus de traitements de minerais. En revanche, pas de déchets de haute activité ou à vie longue, qui nécessitent un stockage géologique profond et un isolement sur plusieurs centaines de milliers d'années.

Pour un enfouissement profond des déchets ultimes, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) a étudié la question en France³, en particulier dans le massif armoricain et plus précisément pour les granites de Quintin, avant de choisir l'option argile avec Cigeo.

Un autre site mérite d'être mentionné : Chartres de Bretagne où le BRGM a piloté le forage Cinergy, de juillet à septembre 2010 à Chartres-de-Bretagne (Ille-et-Vilaine). Ce forage de 675 mètres visait deux objectifs : améliorer la connaissance géologique du bassin rennais, le plus profond du Massif armoricain, et estimer le potentiel du bassin en matière de ressources en eau et de production d'énergie par géothermie⁴. Le site de Chartres-de-Bretagne peut-être considéré comme une autre possibilité d'enfouissement profond en Bretagne avec une approche argile comparable au projet Cigéo.

La localisation d'un site propice à l'enfouissement profond reste à étudier en Bretagne : en attendant, nous considérerons que le site de Quintin sera validé par ces études. Dans le cas contraire, il conviendra d'étudier le site alternatif de Chartres-de-Bretagne, d'autres sites en Bretagne ou, à défaut, à l'extérieur.

Un centre intégré de fabrication et de retraitement du combustible et d'enfouissement des déchets (CFRE)

Le développement d'une filière énergétique nucléaire à base de RNR 4G au format SMR donne l'occasion de développer un centre conjoint de fabrication et de retraitement du combustible et d'enfouissement déchets nucléaires. Cette installation centralisée et modulaire permettra :

- le retraitement des combustibles usés issus des RNR,
- le stockage temporaire des matières valorisables (actinides, uranium),
- la conditionnalisation des déchets ultimes,
- le stockage différencié selon la radiotoxicité et la durée de vie,
- et à terme, l'enfouissement partiel de certains déchets, sur site ou ailleurs.

Ce centre présentera différents modules fonctionnels :

- Une unité de retraitement avancé :
 - o Reçoit les assemblages usés issus des RNR.
 - o Sépare les produits de fission (à vitrifier) des actinides à recycler (uranium, plutonium, MA).

³ Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), Les recherches de l'Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue - Résultats et perspectives, 2005 (<https://www.andra.fr/sites/default/files/2018-02/265.pdf>).

⁴ BRGM, *Cinergy : un forage d'exception* (<https://www.brgm.fr/fr/actualite/video/cinergy-forage-profond-bretagne>).

- Technologie type PUREX avancé ou procédé GANEX, adapté aux cycles rapides.
- Une zone de stockage des matières valorisables
 - Uranium appauvri, uranium recyclé, plutonium, actinides mineurs.
 - Bâtiments hautement sécurisés, avec capacités de refroidissement passif.
 - Objectif : réalimentation du cycle ou stockage stratégique.
- Un atelier de conditionnement des déchets
 - Vitrification des produits de fission.
 - Compactage ou enrobage des coques, gaines, résines.
 - Confection de colis standards selon les normes ANDRA (C1, C2, MAVL, etc.).
- Un stockage intermédiaire des déchets
 - Déchets à vie courte (FMA-VC) : stockage en subsurface ou en bâtiments ventilés.
 - Déchets à vie longue (MA-VL, HA) : entreposage temporaire avec suivi thermique et radiologique.
 - Modules différenciés selon la nature, la durée de vie et la chaleur dégagée.
- Une unité d'enfouissement
 - Si le site présente une géologie adaptée : enfouissement sur place des déchets à radiotoxicité réduite.
 - Sinon, expédition vers un site géologique profond national (ex. Cigéo).

La sûreté, la sécurité et la contrôlabilité :

- Sûreté nucléaire : normes ASN, systèmes redondants, contrôle de la criticité.
- Surveillance continue : capteurs, IA prédictive, gestion de la température et des flux de neutrons.
- Sécurité renforcée : périmètre protégé, cybersécurité, surveillance anti-intrusion.
- Réversibilité : installations conçues pour permettre l'extraction/retraitement de matières valorisables à long terme.

Le calendrier et l'évolutivité :

- Phase 1 (2035-2045) : retraitement + stockage matières + entreposage déchets.
- Phase 2 (2045-2060) : modules d'enfouissement en subsurface ou expédition vers Cigéo.
- Phase 3 (après 2060) : adaptation aux flux de déchets de nouvelle génération, fermeture partielle progressive.

Les avantages stratégiques

Aspect	Bénéfices
Industriel	Réduction des transports, centralisation des flux, optimisation du cycle
Environnemental	Moins de volume, moins de chaleur, durée de radiotoxicité réduite
Économique	Mutualisation des infrastructures, réduction des coûts logistiques
Géopolitique	Souveraineté sur les matières nucléaires, maîtrise du cycle complet
Sociétal	Transparence, gestion différenciée des risques, meilleure acceptabilité locale

Le CFRE constitue une réponse réaliste à l'évolution du nucléaire vers un cycle fermé dominé par les RNR, en combinant :

- l'efficacité industrielle du retraitement et de la valorisation,
- la flexibilité technique face à des déchets de nature et durée variées,
- une réduction significative des besoins d'enfouissement profond classique, tout en conservant une capacité résiduelle pour les déchets ultimes.

L'extraction de l'uranium océanique

Le cycle du combustible ne nécessite pas d'extraire de l'uranium neuf : la filière peut démarrer avec du combustible usagé et retraité considéré comme déchet pour la 3^{ème} génération. Les déchets de cette 3^{ème} génération sont largement disponibles, en particulier à la Hague où un stock considérable est en attente de destination autre que l'enfouissement géologique.

L'extraction d'uranium naturel de l'eau de mer mérite néanmoins d'être mentionnée : bien que restant à développer complètement en filière industrielle, elle reste aujourd'hui économiquement bien plus chère que l'extraction terrestre. Pour autant, cette cherté ne remettrait pas globalement le modèle économique du nucléaire car le combustible ne représente qu'une faible part du coût global, en particulier avec la quatrième génération de réacteur.

L'extraction de l'uranium de l'eau de mer est une technologie démontrée scientifiquement, mais encore marginale industriellement. Elle suscite un grand intérêt stratégique à long terme, car elle offre une ressource presque inépuisable — mais pas encore rentable économiquement ni pleinement optimisée énergétiquement.

L'eau de mer contient naturellement environ 3,3 microgrammes d'uranium par litre ($\approx 3 \text{ mg/m}^3$). Environ 4,5 milliards de tonnes d'uranium y sont dissoutes, 400 à 500 fois plus que les réserves terrestres connues. Le renouvellement naturel du stock est lent, mais constant, via l'érosion des roches et les rivières.

L'extraction océanique permet surtout d'accéder à une source durable, diffuse mais immense, qui ne dépend pas des réserves géopolitiques.

La technologie de l'extraction marine repose sur l'adsorption sélective sur des fibres : on utilise des polymères (notamment à base d'amidoxime) fixés sur des filets, tresses ou membranes. Ces adsorbants sont immergés en mer (côtes, courants), puis récupérés, rincés, traités pour en extraire l'uranium. Chaque cycle dure plusieurs semaines.

Des progrès récents :

- USA (DOE + PNNL + ORNL) : grandes avancées en adsorption, rendement $\times 5$ en 10 ans.
- Japon (JAEA) : premiers tests semi-industriels dès les années 1990.
- Chine : grands programmes expérimentaux avec fibres d'amidoxime et carboxylates.
- Corée du Sud, Inde : essais pilotes en cours.

La rentabilité :

Critère	État actuel (2020–2024)
Coût d'extraction	Environ $\$400$ – $\$600$ /kg d'U (vs $\$30$ – $\$50$ minière)
Efficacité énergétique	Nécessite énergie pour extraction + régénération
Rendement	~ 5 g d'uranium par kg d'adsorbant, par cycle
Durée de vie des adsorbants	6 à 10 cycles actuellement (espérance)
Technologie disponible ?	Oui, en laboratoire et démonstrateurs
Technologie rentable ?	Pas encore, mais potentiel de rupture à terme

Aujourd'hui, ce n'est pas rentable à moins de crise d'approvisionnement, ou politique d'indépendance énergétique coûteuse. Mais l'amélioration rapide des matériaux laisse envisager des coûts divisés par 5–10 dans la prochaine décennie.

Est-ce rentable d'un point de vue énergétique ? Oui, en théorie. L'énergie nécessaire pour extraire 1 kg d'uranium de l'eau de mer est inférieure à l'énergie produite par ce kilogramme dans un réacteur (facteur >1000). L'EROEI (Energy Return On Energy Invested) reste très élevé. Le problème est économique et logistique, non physique.

Conclusion : quel avenir ?

- Scientifiquement prouvé,
- Pas encore rentable,
- Fort potentiel de rupture à long terme,
- Atout stratégique dans un monde post-fossile / post-minier,
- Particulièrement adapté aux pays côtiers avec réacteurs SMR-RNR (boucle énergétique locale).

L'extraction serait particulièrement adaptée à la Bretagne, car l'utilisation d'un courant marin naturel est l'un des leviers les plus efficaces pour améliorer la rentabilité et la simplicité du processus d'extraction d'uranium de l'eau de mer. C'est même au cœur des approches expérimentales les plus prometteuses aujourd'hui.

L'eau de mer contient très peu d'uranium et il faut donc faire passer de très grands volumes d'eau à travers un matériau adsorbant pour en extraire une quantité significative. Les courants marins sont utiles pour l'extraction d'uranium, car ils permettent d'utiliser le courant naturel au lieu de pomper. Au lieu de faire venir l'eau à l'adsorbant par pompage, on expose l'adsorbant au flux d'eau naturel en le plaçant dans un courant océanique, comme un filet de pêche ou une corde.

Les avantages de l'usage du courant marin :

Avantage	Détail
Pas besoin de pompage	Économie d'énergie mécanique importante
Renouvellement constant de l'eau	Plus d'uranium disponible autour de l'adsorbant

Meilleur rendement par cycle	Les matériaux adsorbent plus vite, plus complètement
Faible infrastructure active	Pas de moteurs, juste des amarres ou ancrages
Simplicité d'installation	Filets, cordes, cages, immergées puis récupérées

Exemples expérimentaux :

- Japon (JAEA) : tresses d'amidoxime immergées sur la côte de Tottori, ancrées en mer.
- USA (ORNL/PNNL) : essais dans les courants d'Alaska et du Pacifique.
- Chine : structures flottantes dans des estuaires et des courants côtiers.

Dans tous les cas, le mouvement constant de l'eau a permis d'augmenter le taux d'adsorption jusqu'à 2 à 3 fois plus que dans une eau stagnante.

Où déployer cette approche ? les zones idéales sont :

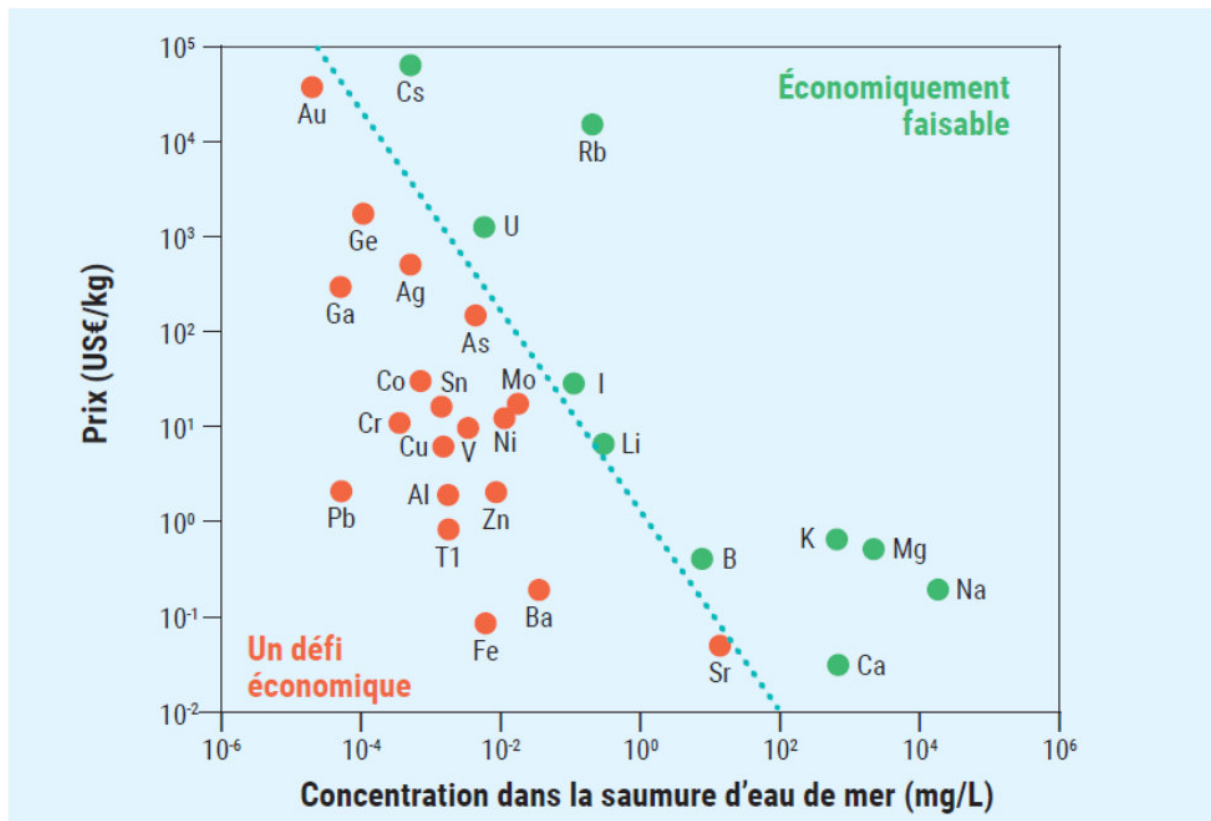
- Courants côtiers stables (ex. Kuroshio, Gulf Stream, Canaries).
- Zones subtropicales (plus chaudes = meilleure chimisorption).
- Régions à faible conflit d'usage maritime (hors navigation / pêche).

Les enjeux techniques :

- Fixation mécanique : filets ou cordes doivent résister à la houle et au biofouling.
- Durabilité : les polymères doivent survivre à plusieurs cycles (récupération, régénération, réutilisation).
- Écologie : faible impact sur la faune marine (filets à maille large, immersion contrôlée).

Conclusion : utiliser les courants marins naturels pour extraire l'uranium de l'eau de mer est : physiquement logique, énergétiquement sobre, expérimentalement confirmé. C'est la voie la plus prometteuse à court terme pour rendre cette technologie énergétiquement efficace et éventuellement compétitive économiquement.

Les matières dissoutes dans l'eau de mer



Concentration et prix des éléments (la concentration des éléments dans la saumure d'eau de mer est estimée sur la base d'un taux de récupération moyen de 40 % dans une usine de dessalement). Les prix du marché des éléments s'appuient sur les résumés des matières premières métalliques de l'USGS de 2018 (Kumar et al. (2021)). © Amit Kumar, Gayathri Naidu, Hiroki Fukuda, et al 2021, American Chemical Society

Mais l'extraction océanique permet plus globalement l'extraction conjointe d'une vaste gamme de métaux dissous, et plusieurs technologies d'adsorption ou d'extraction électrochimique permettent — en théorie et parfois en pratique — de récupérer plusieurs éléments en parallèle, notamment :

Principaux matériaux d'intérêt dans l'eau de mer :

Élément	Concentration typique (mg/m ³)	Usage industriel clé
Uranium (U)	~3	Combustible nucléaire
Lithium (Li)	~180	Batteries, verres spéciaux
Bore (B)	~4 500	Isolants, verres, semi-conducteurs
Vanadium (V)	~2	Batteries redox, alliages
Cobalt (Co)	~0.0003	Batteries, alliages
Nickel (Ni)	~0.5	Acier inox, batteries
Manganèse (Mn)	~10	Alliages, batteries
Terres rares	traces	Électronique, aimants, catalyseurs

Le lithium est plus concentré que l'uranium, mais plus difficile à capter sélectivement en présence de sodium, potassium et magnésium.

Les techniques d'extraction multimatériaux :

1. Adsorption sélective multicouche : des polymères spécifiques (ou couches fonctionnelles) retiennent certains ions (ex. : amidoxime pour U, couronnes éther pour Li). Approche en séquençage ou hiérarchisation des priorités : uranium puis lithium.
2. Extraction électrochimique (membranes ioniques) : des membranes ou électrodes spécifiques attirent les cations ciblés. Technologie testée au MIT, à Stanford, en Corée du Sud. Potentiellement pilotable à distance, faible consommation d'énergie.
3. Échange d'ions et précipitation contrôlée : réacteurs chimiques en cascade récupérant plusieurs métaux. Moins sélectifs mais bon rendement global.

Exemples expérimentaux :

- Japon (JAEA) : extraction conjointe U–Li–B via polymères multicouches.
- USA (Berkeley, Stanford) : membranes électrochimiques pour Li et Co.
- Chine : essais pilotes avec extraction sélective de lithium sur flotteurs.

Enjeux économiques

Élément	Prix (USD/kg)	Seuil de rentabilité depuis mer ?	Potentiel ?
Uranium	30–50	Non atteint (~400–600 \$/kg)	Forte marge à terme
Lithium	15 000–40 000	Atteignable dans certaines zones	(batteries, VE)
Bore	4–8	Déjà extrait dans certaines usines	Secondaire

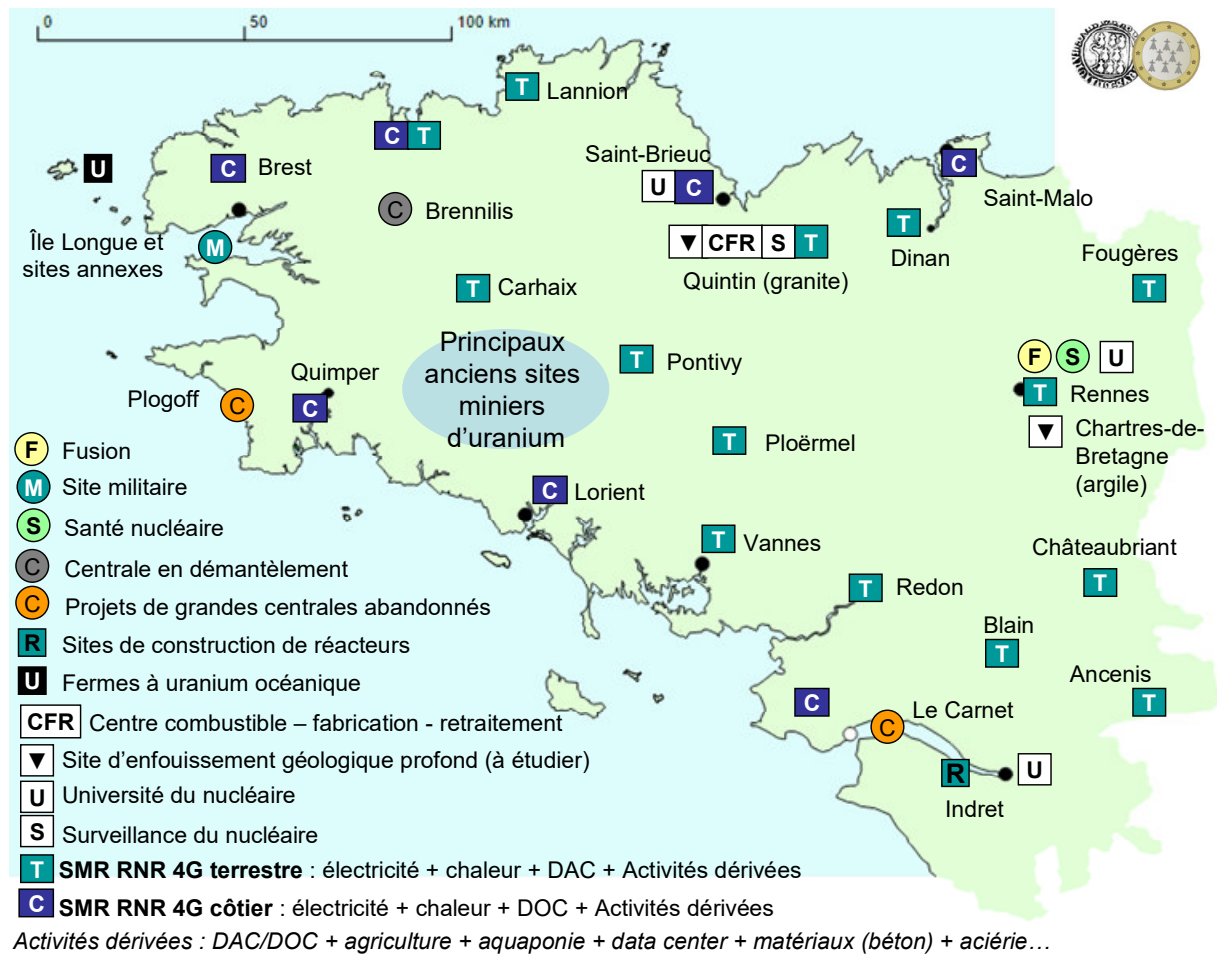
Le lithium est actuellement la cible la plus stratégique après l'uranium.

Dans une installation côtière intégrée SMR–DOC–cluster, il devient logique de :

- Combiner DOC (captage CO₂) et extraction de lithium/uranium dans un même flux d'eau de mer,
- Utiliser électricité bas carbone du SMR pour alimenter les systèmes électrochimiques,
- Créer un cycle local d'approvisionnement pour batteries, énergie, engrais ou carburants.

Conclusion : l'eau de mer est une mine à ciel ouvert pour plusieurs métaux clés de la transition énergétique. Ce multi-extraction est scientifiquement réaliste et économiquement prometteur à moyen terme, si optimisé dans un écosystème énergétique local.

Le parc nucléaire

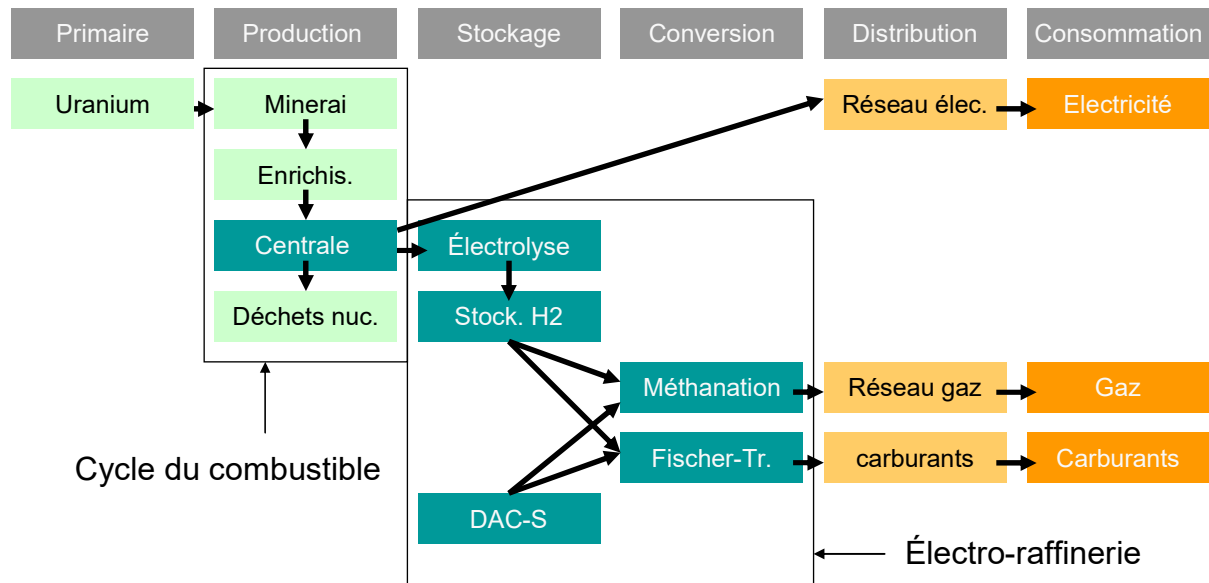


Le parc nucléaire concerne les réacteurs et les installations de gestion du cycle du combustible, ainsi que les entités de support global de la filière.

Le réacteur étant schématiquement défini, il est alors possible de dimensionner un parc nucléaire qui fera de la Bretagne, la première région européenne en autonomie énergétique nucléaire durable, avec :

- Énergie bas carbone continue,
- Stockage/valorisation locale du combustible,
- Compétences scientifiques et industrielles locales,
- Sécurité énergétique long terme,
- Contribution active à la transition climatique mondiale.

L'architecture du parc



L'architecture du parc nucléaire selon les différentes étapes de la filière avec les éléments de l'« électro-raffinerie » associée.

La production

Environ 70 SMR RNR 4G

Élément	Donnée
Nombre de réacteurs	70
Puissance unitaire	300 MWe
Production annuelle unitaire	≈ 2 500 GWh/an (facteur de charge 95 %)
Production annuelle totale	≈ 175 000 GWh/an
Objectif	Couvrir consommation électrique bretonne post-transition (≈ 142 000 GWh/an), + marge stockage/réserve.

Ce qui sera suffisant pour la Bretagne avec réserve de sécurité (variation saisonnière, incertitudes de consommation future).

Le combustible

Avec un parc de stockage intermédiaire (La Hague bretonne) :

- Stockage en piscine ou à sec du combustible utilisé pendant 30–60 ans,
- Capacité à dimensionner pour environ 70 réacteurs × 60 ans de production,
- Volume estimé : semblable à celui du cycle existant pour la France mais à échelle bretonne (~5 % de la France entière).

Un enfouissement de subsurface (local, type Brennilis)

- Enfouir les éléments les moins radioactifs après 30–60 ans de refroidissement.

- Profondeur : 100 à 200 mètres, dans une zone adaptée (ex : roches dures stabilisées comme à Brennilis).
- Complément nécessaire vers un enfouissement profond type CIGÉO pour les déchets ultimes (HAVL – Hautement radioactifs à Vie Longue).

Soit un modèle hybride entre stocker localement et évacuer à long terme vers un grand site spécialisé.

Une usine de fabrication, maintenance et rechargement des SMR

Élément	Donnée
Lieu potentiel	Brennilis ou proximité (nord Finistère, Lannion, Carhaix...)
Type d'usine	Fabrication des modules SMR complets, rechargement, maintenance lourde.
Capacité cible	1 à 3 SMR produits ou rechargés/an pour : - Lancer le parc initial, - Maintenir, renouveler, moderniser sur 60 ans.

Un institut de recherche nucléaire à Brennilis

Élément	Donnée
Mission	Recherche fondamentale et appliquée sur : - Neutrons rapides, - Fermeture du cycle du combustible, - Recyclage avancé, - Sûreté passive SMR.
Partenaires	Universités bretonnes (Rennes 1, Bretagne Sud), INSA Rennes, grandes écoles. CEA
Objectif	Devenir un pôle européen du nucléaire durable et des technologies énergétiques avancées

Le réseau électrique

La question de l'impact sur le réseau électrique est essentielle dès lors qu'on imagine l'implantation d'environ 70 réacteurs SMR (Small Modular Reactors) répartis régionalement.

Le réseau existant : un atout partiel

Le réseau de distribution moyenne tension (HTA) :

- Suffisant pour l'alimentation locale (industries, chauffage urbain, mobilité).
- Mais limité pour l'injection massive ou la redistribution régionale.
- Dans certaines zones industrielles, le réseau HTA est déjà proche de saturation.

Le réseau de transport haute tension (HTB – RTE) :

- Présent en Bretagne mais historiquement conçu comme un réseau de desserte, non de production.
- Le réseau breton importe historiquement une grande part de son électricité depuis la Normandie ou la Loire-Atlantique.
- Peu de nœuds de production majeurs actuellement (hormis le poste de Brennilis ou Landivisiau).

Le réseau actuel est partiellement réutilisable, mais pas suffisant à lui seul.

De nouveaux raccordements

Cela suppose un dialogue technique avec Enedis (HTA) et RTE (HTB) dès la phase de planification.

Type de site	Besoin probable	Justification
Zone industrielle proche d'un poste HTB	Raccordement possible avec renforcement	Injection directe dans le réseau de transport ou boucles régionales
Site isolé ou secondaire	Besoin de nouveau poste source HTB	Nécessaire pour injection vers les centres urbains ou industriels
Multiplés SMR sur un même site (2 ou 3)	Raccordement groupé + sous-station dédiée	Mutualisation, économie d'échelle

Echange d'électricité ou logique d'autoconsommation ?

Deux scénarios sont envisageables :

- Autoconsommation territoriale optimisée
 - o Les réacteurs SMR produisent de l'électricité pour la mobilité locale, l'industrie, le chauffage urbain.
 - o La distribution reste majoritairement locale, sans solliciter fortement le réseau national.
 - o Cela suppose une planification fine avec les collectivités et les syndicats d'énergie.
- Échanges inter-régionaux ou nationaux
 - o Dans les périodes de surproduction, les SMR injectent dans le réseau de transport.
 - o Dans les périodes de sous-production (maintenance, pics hivernaux), le réseau national complète.
 - o Cela nécessite une capacité d'interconnexion forte, et des modélisations dynamiques de flux (RTE, Enedis).

L'exemple : Rennes ou Nantes. Ces agglomérations pourraient :

- Accueillir 2 à 3 SMR sur différents sites industriels,
- Raccorder chaque site à un poste source HTB local existant,
- Mutualiser la production sur des micro-réseaux industriels ou urbains,
- Alimenter en chaleur (chauffage urbain) via des réseaux locaux.

Mais cela suppose un renforcement des boucles HTA locales et parfois la création de sous-stations dédiées.

L'implantation régionale de SMR ne peut se faire sans adaptation du réseau électrique, mais elle renforce la résilience du système breton en diversifiant les points de production et en réduisant la dépendance aux grandes lignes d'interconnexion.

L'électro-raffinerie

L'électro-raffinerie ne fait pas directement partie du parc nucléaire. Elle est concevable pour les filières énergétiques électriques (nucléaire, éolien, solaire photovoltaïque). Elle représente une alternative au « tout-hydrogène » qui n'est pas aussi démontré que souhaitable. Il sera donc opportun, dans la recherche d'une cohérence énergétique et territoriale, de dimensionner l'électro-raffinerie,

Le dimensionnement

Dans la mesure où remplacer le pétrole pour la mobilité nécessite environ 50 000 GWh/an, avec un rendement de 57 % pour les e-fuels, il faut \approx 89 500 GWh/an de production électrique. L'électro-raffinerie devra consommer autour de 90 000 GWh/an en électricité pour produire :

- Gaz de synthèse (Sabatier),
- Carburants liquides (essence, gazole via RGWS + Fischer-Tropsch).

Il sera opportun de consacrer 50 % de la production SMR excédentaire estivale à l'électro-raffinerie (avec utilisation intelligente des pointes de production en été).

Grosse usine unique ou petites unités modulaires ?

Option	Avantages	Inconvénients
Grosse usine unique	- Économies d'échelle : Maîtrise industrielle forte	- Logistique complexe : Risque de concentration
Petites unités modulaires	- Résilience territoriale : Réduction des distances de transport	- Moins d'économies d'échelle : Besoin de standardisation très poussée

Recommandation : un réseau de 3 à 5 grosses unités modulaires, chacune de 15 000 à 30 000 GWh/an de capacité électrique consommée : flexibles, adaptées aux profils bretons (multi-ports, multi-zones industrielles), capables de s'adapter à la montée en charge progressive.

Localisation intérieure ou côtière ?

Option	Avantages	Inconvénients
Intérieure	- Proximité des SMR (électricité directe) : Utilisation de friches industrielles	- Difficulté d'accès pour l'import/export (carburants, CO ₂ capté)
Côtière	- Proximité des ports (import/export) : Accès direct au captage DOC (CO ₂ marin) - Meilleure dissipation thermique (eaux côtières)	- Risques climatiques (submersion, tempêtes)

Recommandation : installer les électro-raffinerie en zones côtières industrielles, dans des ports ou proches de grandes zones logistiques existantes.

Exemples potentiels : Brest (port militaire et civil), Lorient (port industriel), Saint-Nazaire (liaison naturelle Bretagne-Loire Atlantique).

La capture de carbone

DAC et DOC à proximité des réacteurs :

- DAC (Direct Air Capture) peut être implanté en même temps que l'électro-raffinerie pour fournir directement le CO₂ nécessaire aux procédés (Sabatier, Fischer-Tropsch).
- DOC (Direct Ocean Capture) est logique uniquement en site côtier :
 - o Directement sur des infrastructures portuaires ou industrielles,
 - o Capable d'exploiter le CO₂ dissous dans l'eau de mer.

Recommandation : associer chaque électro-raffinerie à :

- Une unité DAC moyenne (~1 MtCO₂/an),
- Et, pour les sites côtiers, une station DOC pour capter dans l'eau de mer.

Synthèse du schéma d'organisation

Éléments	Choix recommandé
Production d'électricité dédiée	≈ 90 000 GWh/an
Taille des unités	3-5 grosses électro-raffineries (15-30 TWh/an chacune)
Localisation	Côtière privilégiée (ports, zones industrielles)
DAC/DOC associés	Oui, sur tous les sites, DOC uniquement en côtier
Flux de sortie	E-fuels liquides, gaz de synthèse, hydrogène

Le système nucléaire breton SMR RNR doit être complété par un réseau de grandes électro-raffineries côtières, associées à des unités de captation carbone (DAC/DOC), pour stocker l'énergie estivale, produire des carburants synthétiques, et stabiliser l'offre énergétique annuelle.

La sûreté et la sécurité

Les deux défis majeurs pour un programme de RNR-SMR en Bretagne et plus largement en France sont :

- La sûreté nucléaire : intrinsèque au réacteur et au cycle du combustible (prévention des accidents, maîtrise des risques internes).
- La sécurité nucléaire : protection contre les actes malveillants, terrorisme, attaques sur sites ou en transport.

Ces deux enjeux doivent être articulés proprement dans toute communication ou conception de projet, sans minimiser l'un au profit de l'autre.

Le programme SMR RNR en Bretagne doit reposer sur une approche biface :

- Sûreté par conception (atout majeur des RNR-SMR modernes),

- Sécurité par maillage territorial et planification des flux, avec une doctrine intégrée d'organisation de la protection, du site industriel jusqu'à l'enfouissement final.

C'est la condition d'une acceptabilité politique et sociale durable, et d'une crédibilité industrielle nationale et européenne.

Les accidents de référence

L'histoire de l'énergie nucléaire est marquée par trois accidents majeurs : Three Mile Island (1979, USA), Tchernobyl (1986, URSS) et Fukushima (2011, Japon).

Accident	Cause principale	Reproductibilité dans un RNR 4G SMR	Commentaire
Three Mile Island (TMI)	Perte de liquide de refroidissement, défaut humain, défaut de capteurs et de compréhension de la situation	Tres improbable	Les RNR SMR 4G utilisent des caloporteurs non volatils (sodium, plomb...), une inertie thermique élevée, une sécurité passive par convection naturelle. Et l'automatisation est bien plus avancée.
Tchernobyl	Instabilité neutronique à faible puissance, retrait total de barres absorbantes, conception sans enceinte de confinement	Impossible	Les RNR sont stables à faible puissance, disposent de barres de contrôle qui chutent par gravité, et toujours d'un confinement étanche. De plus, la moderation par graphite, facteur aggravant, n'existe pas dans les RNR.
Fukushima	Séisme et tsunami -> coupure totale de courant (SBO) -> perte de refroidissement -> production d'hydrogène	Peu probable	Les SMR RNR sont enterrés ou en enceinte compacte, et peuvent se refroidir passivement sans électricité pendant plusieurs jours à plusieurs semaines. Pas de production d'hydrogène via zirconium-eau. Le risque de SBO est géré par conception passive.

Les RNR 4G SMR marquent une évolution et même une rupture par rapport aux technologies et aux architectures des réacteurs ayant subi ces accidents. Un RNR SMR de 4e génération est conçu précisément pour éviter les scénarios catastrophiques du passé. Il ne peut pas reproduire :

- TMI : grâce à l'automatisation, la simplicité des SMR et les caloporteurs alternatifs.
- Tchernobyl : car il est physiquement incapable d'emballement neutronique explosif.
- Fukushima : car il est capable de se refroidir sans électricité ni intervention humaine.

A contrario, il convient de porter son attention sur les risques inhérents au RNR 4G et à la spécificité du format SMR.

La sûreté intrinsèque des RNR SMR

La sûreté revient à empêcher l'accident interne par conception, ce qui dans le cas des SMR repose sur :

- La petite taille des SMR : moindre inventaire radioactif par site.
- Le refroidissement passif : pas de dépendance aux systèmes actifs en cas d'accident.
- Des réacteurs enterrables ou semi-enterrés : meilleure résistance physique aux agressions.
- Des technologies rapides : réduction de la masse critique, meilleure gestion du comportement en accident sévère.

Le programme repose sur des réacteurs conçus pour être inherently safe (sûrs par leur physique et leur architecture, pas par la seule action humaine).

La sûreté passive

Par conception, l'architecture des RNR intègre des dispositifs de sûreté passive qui réduit le besoin de dispositif de sécurité active :

- la gravité (par chute des barres absorbantes en cas de perte d'alimentation)
- la dissipation thermique passive (grâce à la convection naturelle, rayonnement, conduction),
- Coeur à vide d'effet modérateur (neutronique auto-stabilisant) : dans un RNR, l'augmentation de température diminue la densité du combustible ou du caloporteur (selon les matériaux utilisés), ce qui modifie la géométrie ou les flux neutroniques : moins de fissions, donc réduction automatique de la puissance. C'est une réaction négative de température, aussi appelée effet Doppler (élargissement des résonances d'absorption). Atout : naturel, instantané, sans action humaine.
- Expansion différenciée des matériaux : Le cœur peut être conçu de sorte que certains matériaux (barres, gaines, structures) se dilatent différemment avec la chaleur : Dilution du cœur ou éloignement du combustible, ce qui réduit la criticité. Cela agit comme un « frein » thermique purement mécanique. Atout : principe de « dilution naturelle du cœur ».
- Refroidissement passif par des échangeurs dédiés : systèmes à caloducs, échangeurs thermiques à air ou à eau situés en périphérie du réacteur, activés uniquement par la convection naturelle et la différence de température. Exemple : systèmes DRACS (Direct Reactor Auxiliary Cooling Systems) ou RVACS (Reactor Vessel Auxiliary Cooling System). Atout : ils permettent d'évacuer la chaleur résiduelle sans aucune pompe ni source électrique.
- Arrêt automatique en cas de perte de puissance : l'ensemble du système est conçu pour qu'en cas de blackout complet, le cœur entre naturellement dans un état sous-critique. Les barres tombent par gravité (déjà mentionné), sans force électromagnétique ou hydraulique.
- Conception à faible pression : les RNR n'utilisent ni vapeur sous pression, ni gaz comprimé à très haute pression : moins de risque de rupture d'enceinte, donc moins de mécanique de rejet explosif. En sodium ou plomb, les caloporteurs sont liquides à basse pression, même à haute température. Cela contribue à la sécurité passive structurelle.

- Matériaux retardant ou confinant la propagation : certains éléments du cœur ou de l'enceinte peuvent intégrer : absorbeurs neutroniques diffus (ex : bore dans les structures), matériaux céramiques ou réfractaires pour ralentir ou contenir un accident, barrières internes en acier ou bétons spécifiques en cas de fuite de sodium/plomb.
- Cloisonnement modulaire (partage de risque entre unités SMR) : dans le cas d'un parc modulaire : un SMR peut s'arrêter complètement sans impact sur les autres. Permet une segmentation du risque, donc une réduction de la gravité d'un événement accidentel.

En résumé, les RNR SMR de 4e génération intègrent souvent une sécurité passive multi-niveaux fondée sur :

Principe	Nature	Objectif
Gravité	Mécanique passive	Chute des barres absorbantes
Dissipation thermique passive	Thermique passive	Évacuation de la chaleur résiduelle
Effet Doppler	Neutronique passive	Auto-réduction de la criticité
Expansion géométrique	Thermomécanique passive	Dilution ou déformation stabilisante
Echangeurs sans pompe (RVACS...)	Thermique passive	Refroidissement sans électricité
Conception à faible pression	Structure passive	Moins de risque de brèche ou explosion
Cloisonnement modulaire	Organisation passive	Contention du risque à l'unité locale

Ces dispositifs sont essentiels pour les situations extrêmes, notamment : perte totale d'alimentation électrique, séisme, inondation, absence de personnel.

Mais même avec des dispositifs passifs très avancés, une sûreté active reste nécessaire, mais dans un rôle réduit et redéfini :

Fonction	Rôle actif
Pilotage fin de la puissance	Réglage progressif via moteurs et commande
Instrumentation en temps réel	Mesures de température, flux neutronique, pressions
Alarme et diagnostics	Détection d'anomalies faibles (avant seuil d'urgence)
Intervention humaine / télécommandée	Analyse et ajustement en situation dégradée
Prévention d'accident lent (par corrosion, fuite, déformation...)	Suivi actif des déviations lentes

Pourquoi il est dangereux de ne compter que sur le passif :

- Un système totalement passif ne peut pas s'autoréguler face à tous les scénarios, notamment les dégradations lentes.
- Une fuite de sodium, un vieillissement de matériaux, une déformation mécanique ne déclenchent pas automatiquement une chute de barres.
- La surveillance reste active : capteurs, systèmes de mesure, supervision distante ou locale.

Le bon équilibre consistera en sûreté passive en cas extrême, sûreté active pour l'exploitation normale. L'approche moderne repose sur la défense en profondeur :

- Niveau 1 : éviter l'accident (active)
- Niveau 2 : maîtriser les incidents (active + passive)
- Niveau 3 : limiter les conséquences (passive surtout)
- Niveau 4 : confinement ultime (passive, structurelle)

En résumé, la sûreté active reste indispensable, mais elle devient plus simple, moins sollicitée et plus fiable, car les fonctions critiques sont prises en charge par des dispositifs passifs. C'est ce couplage intelligent actif/passif qui rend les RNR 4G SMR plus sûrs que les réacteurs antérieurs.

L'enterrement du réacteur

L'enterrement d'un SMR (Small Modular Reactor) à une profondeur significative (souvent 10 à 30 mètres, parfois plus) offre des garanties supplémentaires notables en matière de sécurité passive et de protection contre les agressions externes, y compris militaires.

La protection contre les agressions physiques

Menace	Résilience offerte par l'enterrement
Chute d'avion	L'impact est absorbé en grande partie par le sol ; les bâtiments en surface (s'il y en a) sont séparés du cœur du réacteur.
Bombe classique ou missile non pénétrant	Le sol et le béton de protection offrent un blindage naturel et structural très difficile à percer.
Bombe pénétrante (bunker buster)	Protection relative : seule une attaque militaire délibérée avec armes spécialisées pourrait endommager un SMR enterré en profondeur – comme pour un silo nucléaire.
Tirs d'artillerie, drones	Inefficaces contre un réacteur enterré ; la cible est enfouie, non visible et inaccessible sans précision extrême.

Le niveau de sécurité est comparable à celui d'un poste de commandement militaire durci ou d'un silo nucléaire stratégique.

Amélioration de la sécurité passive :

- Isolation thermique : les parois terrestres contribuent à la dissipation lente de la chaleur résiduelle.
- Inertie thermique : le sol autour agit comme un tampon thermique en cas de perte de refroidissement.
- Gravité toujours opérationnelle : même en cas de coupure totale d'énergie, les dispositifs passifs (barres de contrôle qui chutent) restent fonctionnels.

La résilience en contexte de crise :

- Cyberattaque ou sabotage : accès physique rendu extrêmement difficile.
- Terrorisme : cible peu identifiable, très difficilement accessible, et dont le cœur est conçu pour s'éteindre en sécurité sans intervention humaine.
- Guerre : contrairement à une centrale classique visible sur satellite, un SMR enterré et camouflé peut devenir quasi invisible.

Les limites malgré tout :

- Face à une bombe pénétrante très puissante, seule une profondeur extrême (>50 m) et un coffrage béton/métal renforcé peuvent résister.
- La conception modulaire permet cependant de perdre un module sans perte globale : chaque SMR est indépendant.

L'enterrement en profondeur d'un SMR RNR 4G renforce significativement sa résilience passive, sa protection physique, et sa discrétion stratégique. Ce n'est pas invulnérable à un arsenal militaire avancé, mais c'est extrêmement robuste dans la quasi-totalité des scénarios, y compris terroristes ou accidentels.

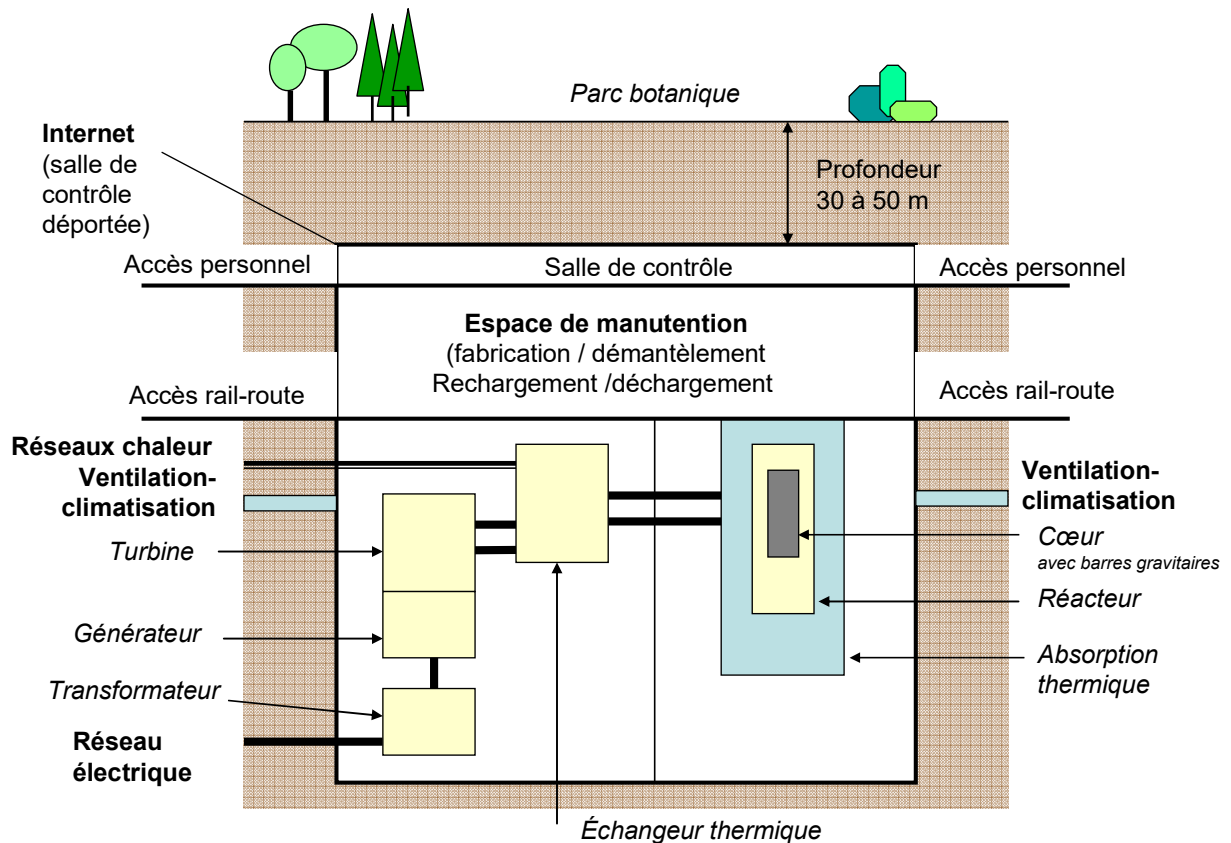


Schéma conceptuel d'un site de réacteur RNR 4G SMR enterré.

La dispersion des sites

La sécurité consiste à prévenir et empêcher les actes malveillants selon les risques suivants

- Plusieurs SMR installés sur des sites industriels répartis : multiplication des points sensibles à défendre.
- Transports de combustible neuf, de combustible utilisé, de matières radioactives transmutables : nœuds logistiques critiques.
- Centre CFRE (Centre de fabrication et retraitement du combustible et enfouissement des déchets) : point de concentration stratégique et de vulnérabilité.
- Lien éventuel avec un site d'enfouissement extérieur (ex : Cigéo) : dépendance longue distance, critiques de Green Peace sur le dimensionnement et la fragilité.

Un programme nucléaire décentralisé exige un dispositif de sécurité nucléaire adapté, fondé sur une doctrine de défense territoriale, intégrant les enseignements récents sur la résilience des infrastructures critiques.

Le site du réacteur

Sur chaque site SMR, il y a lieu :

- De définir un périmètre de protection nucléaire léger mais robuste.
- D'implémenter des systèmes de surveillance autonomes et passifs (capteurs, IA).

- De définir un plan de défense intégré à la sécurité industrielle (approche double-usage sécurité industrielle/sûreté nucléaire).

Les transports nucléaires

Pour les transports nucléaires, il y a lieu de prévoir :

- Un développement de conteneurs renforcés, ininflammables et inviolables (ex. standards CASTOR renforcés).
- Des itinéraires sécurisés, escortes, procédures de discrétion opérationnelle.
- Une mutualisation possible des flux logistiques entre SMR bretons.

La vulnérabilité liée au transport de matières nucléaires, y compris dans un parc composé de réacteurs modulaires (SMR), reste un maillon critique de la sûreté et de la sécurité globale.

Le transport de matières nucléaires

La fréquence et la visibilité : même si un SMR de 4e génération ne nécessite un rechargement que tous les 10 à 20 ans, un parc de 100 SMR impliquerait 5 à 10 mouvements de matières nucléaires par an (la colocation du site de fabrication et de retraitement ainsi que d'enfouissement dispense de transferts entre l'une et l'autre). Ces mouvements concernent :

- Combustible neuf (actinides mineurs ou MOX)
- Combustible usé (actinides résiduels)
- Déchets hautement radioactifs à vitrifier ou stocker

Le risque en cas d'accident ou d'action malveillante

- Vol de matière fissile (prolifération ou attentat).
- Action de blocage ou d'interception (cas Greenpeace 2003, convois bloqués).
- Détournement médiatique ou sabotage.

Les mesures de sécurité existantes (et leurs limites) :

Dispositif actuel	Limites
Conteneurs homologués (TN-X, Castor...)	Très résistants mais visibles et reconnaissables
Itinéraires variables et discrets	Peu transparents donc mal compris du public
Escorte policière/armée selon nature	Coût élevé, impact logistique
Notification à l'ASN + Ministère de l'Intérieur	Procédure opaque pour les citoyens

Les pistes d'amélioration dans un programme SMR-RNR :

- Concentration et mutualisation logistique
 - o Créer des hubs régionaux sécurisés (centre de recyclage ou d'entreposage) au lieu de mouvements individuels.
 - o Transport sous forme compactée et à faible activité résiduelle grâce à la capacité des RNR à consommer les actinides.
- Innovation sur les conteneurs

- Développer des conteneurs renforcés, discrets et traçables par blockchain ou système fermé GNSS.
- Conteneurs à signature thermique réduite et systèmes d'autoprotection en cas de tentative d'intrusion.
- Numérisation et pilotage sécurisé des convois
 - Traçabilité non connectée au réseau public.
 - Liaison satellite militaire ou réseau radio indépendant.
- Approche de sécurité « diluée »
 - Mélange de la matière nucléaire à d'autres substances durant le transport pour empêcher toute réutilisation directe (principe de « dénaturation logistique »).
 - Développement d'alliages auto-réactifs en cas de perçage.
- Du point de vue de la communication : éviter l'effet « convoi secret = danger »
 - Informer le public sans révéler d'informations critiques : fréquence annuelle, type de sécurité, autorité responsable.
 - Inclure dans la stratégie une campagne sur la sobriété des transports grâce aux SMR RNR : « Un SMR, c'est 10 à 20 ans sans déplacement de combustible. L'équivalent de 1 à 2 transports pour 200 000 foyers. »

Le transport ferroviaire

Nous considérerons que le développement du parc nucléaire sera concomitant d'une rénovation du réseau ferroviaire, que ce réseau ferroviaire bénéficiera de l'énergie nucléaire et que ce réseau reliera les différents sites SMR et que les transports de matières nucléaires pourront utiliser ce réseau avec des bretelles de raccordement aux sites SMR.

Un transport ferroviaire point-à-point pour les matières nucléaires dans un parc de SMR RNR améliorerait significativement la sécurité, la régularité et la durabilité de la chaîne logistique — à condition d'accepter un investissement initial dans l'infrastructure.

Les avantages du transport ferroviaire :

- Sécurité renforcée : trajet plus prévisible et maîtrisé qu'un itinéraire routier dispersé, voies dédiées ou partagées peu fréquentées, réduisant le risque d'interception ou d'accident, véhicules plus robustes, moins sensibles aux agressions ou accidents volontaires (véhicule kamikaze, collision...).
- Capacité et régularité : capacité à transporter plusieurs colis dans un même convoi avec un coût marginal réduit, possibilité de créer des fréquences annuelles fixes, simplifiant la surveillance et la maintenance.
- Acceptabilité environnementale : moins d'émissions que le transport routier, contribution à la décarbonation du fret nucléaire et non-nucléaire.
- Double usage de l'infrastructure : une voie construite pour le combustible peut aussi desservir dans les zones industrielles où les SMR seront implantés : des industries locales (béton, acier, logistique circulaire), des plateformes intermodales, des centres d'assemblage ou de démantèlement nucléaire. voire à terme des usines de recyclage électroniques ou chimiques.

Les limites ou obstacles :

- Coût initial élevé, surtout pour les derniers kilomètres (embranchements locaux).
- Risque de visibilité accrue des convois si la ligne est trop exposée.
- Besoin de coordination avec SNCF Réseau ou infrastructure ferroviaire régionale (longueurs de convoi, priorisation...).

Un réseau ferroviaire enterré

Une option pour la rénovation du réseau ferroviaire enterré tient à son enterrement comme pour un RER régional. Enterrer le réseau ferroviaire de transport de matières nucléaires (comme un RER ou métro de fret) renforcerait considérablement la sécurité, la discrétion et l'acceptabilité sociale du programme de SMR RNR 4G. Cela deviendrait un système de logistique nucléaire souterrain, à la fois ultra-sécurisé, multi-usages, et compatible avec une densité territoriale élevée.

Les avantages du réseau ferroviaire enterré (type RER)

- Discrétion et acceptabilité publique : aucune exposition des convois en surface = visibilité nulle pour le public, réduction drastique de l'opposition locale possible (pas de camions, pas de convois visibles), compatible avec des environnements urbains, sensibles ou densément peuplés.
- Sécurité maximale : inaccessible sans intrusion majeure, et même inviolable en cas d'attaque extérieure, pas de croisement routier : aucun accident ou sabotage possible depuis la surface, en cas d'attaque aérienne ou de missile, les matériaux sont protégés par la profondeur et la masse terrestre.
- Résilience opérationnelle : fonctionnement indépendant des conditions météo, embouteillages, ou crises en surface. Peut être intégré à des systèmes automatisés (robots, navettes sécurisées, trains sans conducteur).
- Synergies avec d'autres usages. Peut aussi transporter : béton recyclé (cimenteries souterraines ou hubs logistiques), matériaux aciérie ou électroniques, déchets vers des sites de traitement / stockage souterrains, chaleur par canalisation adossée (comme réseau de chaleur enterré).

Organisation type du réseau ferroviaire enterré, aspects de sécurité renforcée :

- Confinement souterrain naturel : évite toute dispersion de matière en cas d'incident.
- Surveillance autonome 24h/24 par IA, détection de mouvement, reconnaissance thermique.
- Segments indépendants pour éviter la propagation en cas de sabotage.
- Gestion automatisée de l'accès, couplée à la cybersécurité du réseau SMR global.

La réglementation

La réglementation nucléaire actuelle est principalement construite autour des grands réacteurs classiques (REP/REB), et n'est pas directement adaptée aux nouvelles technologies comme les RNR SMR. Cela crée un décalage réglementaire qui peut être un frein... ou une opportunité si bien anticipé.

L'État actuel de la réglementation nucléaire pour les RNR/SMR en France

Le droit nucléaire français repose sur :

- le Code de l'environnement (Installations nucléaires de base – INB),
- le contrôle par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN),
- et l'avis technique de l'IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire).

Tout nouveau réacteur doit :

- être autorisé par décret après enquête publique,
- disposer d'un dossier de sûreté complet,
- respecter les fondamentaux de défense en profondeur,
- prévoir la gestion des accidents graves,
- assurer la limitation des rejets radioactifs.

Ce cadre est applicable aux SMR RNR.

Pour les questions spécifiques des SMR RNR, les textes ne tiennent pas compte :

- de la petite taille,
- de la modularité,
- du refroidissement passif,
- ni du déploiement multi-sites (plusieurs petits réacteurs répartis).

Les normes de sûreté existantes (arrêté INB 2007, arrêté « nucléarisation ») sont taillées pour des réacteurs de 1000 MWe ou plus. Un SMR est donc aujourd'hui traité comme une grande centrale classique, ce qui :

- alourdit inutilement certaines exigences,
- ralentit la possibilité de déployer rapidement.

Les perspectives de modernisation réglementaire

En France, la loi sur l'accélération du nucléaire (2023) prévoit :

- un assouplissement administratif pour certaines INB, notamment pour les petits réacteurs.
- Des études spécifiques en cours à l'ASN pour adapter la réglementation aux SMR.

L'ASN a publié en 2023 un document de position sur les SMR :

- Réaffirme les principes fondamentaux de sûreté.

- Ouvre la voie à des adaptations pragmatiques : traitement modulaire, dérogations possibles pour les démonstrateurs, approches graduées selon la puissance et l'inventaire radiologique.

A l'international, l'IAEA (Agence internationale de l'énergie atomique) : travaille à des guides de sûreté spécifiques pour les SMR.

L'application expérimentale dans des sites pilotes

Pour les projets expérimentaux de SMR RNR, deux options s'ouvrent :

Option	Avantage	Inconvénient
Statut d'Installation Nucléaire de Base classique	Cadre existant, maîtrise juridique	Lourd, peu adapté à un démonstrateur rapide
Création d'un statut spécifique pour les sites expérimentaux (INB expérimentale)	Flexibilité réglementaire, échelle adaptée	Demande une évolution législative, un décret ou une ordonnance spécifique

Ce que préconisent certains experts : Créer un régime « INB expérimentale », réservé aux premiers SMR, avec : contrôles renforcés mais modulés, simplification des procédures d'autorisation, durée d'exploitation limitée initialement, revues de sûreté rapides et périodiques. Exemple proche : la centrale expérimentale EPR2 à Penly bénéficie déjà d'une procédure accélérée, qui pourrait être extrapolée.

En résumé :

Question	Réponse synthétique
Peut-on construire un SMR RNR aujourd'hui en France ?	<input checked="" type="checkbox"/> Oui, mais sous un régime lourd d'INB classique.
La réglementation va-t-elle évoluer ?	<input type="checkbox"/> Oui, accélération et adaptation prévues 2025–2030.
Un site expérimental breton serait-il possible ?	<input checked="" type="checkbox"/> Oui, en proposant un projet sous régime spécifique ou dérogatoire expérimental.
Risques majeurs ?	<input type="checkbox"/> Délai réglementaire si le dossier n'est pas porté politiquement très en amont.

Une stratégie politique recommandée consistera à

- Accompagner toute initiative SMR RNR par un projet législatif parallèle sur le cadre « INB expérimentale ».
- Négocier avec l'ASN en amont sur l'acceptabilité d'un concept modulaire sécurisé.
- Proposer à la Bretagne un rôle pilote dans l'expérimentation, à condition de copilotage avec les collectivités locales.

Le rôle de l'AIEA

L'AIEA joue un rôle moteur, mais pas de façon prescriptive : elle agit plutôt comme facilitateur international et producteur de standards et de lignes directrices pour le développement sécurisé des SMR (et indirectement des RNR au format SMR).

Le rôle concret de l’AIEA sur les SMR (et RNR SMR)

L’AIEA publie depuis plusieurs années des documents de référence destinés aux États membres :

- Safety Standards for SMR Deployment (Cadres de sûreté pour les SMR),
 - Technology Roadmaps for SMRs (Feuilles de route technologiques),
 - Regulatory Harmonization Initiatives (Initiatives pour l’harmonisation réglementaire),
 - Deployment Indicators for SMRs (Critères de préparation au déploiement).
- Elle publie également des guides spécifiques pour :
- la sûreté de conception,
 - la protection contre les agressions externes,
 - la sécurité physique (protection contre actes de malveillance).

Ces documents servent de référentiel mondial, mais chaque État reste souverain pour appliquer ou adapter les recommandations.

L’AIEA coordonne plusieurs initiatives pour aligner les exigences de sûreté entre pays :

- Facilite les discussions sur l’acceptation mutuelle des licences (ex. entre USA, Canada, France, Royaume-Uni).
- Encourage à créer des « cadres flexibles » adaptés aux SMR, permettant d’éviter des doubles standards (grands réacteurs vs petits réacteurs).

Son objectif stratégique est de permettre que les SMR puissent être conçus, construits et exportés sans que chaque pays exige une refonte complète de la sûreté.

L’AIEA agit comme support aux projets expérimentaux. Elle propose des services de revue par les pairs (comme IRRS ou INIR) aux pays qui souhaitent lancer des projets pilotes SMR. Elle fournit des missions de soutien réglementaire, notamment pour accompagner la création de nouvelles législations adaptées. Par exemple :

- MYRRHA (Belgique) bénéficie de missions de conseil de l’AIEA.
- Natrium (USA) s’appuie indirectement sur les standards de sûreté développés par l’AIEA.

Et sur les RNR spécifiquement ?

L’AIEA soutient aussi très activement la R&D sur les RNR :

- Programmes spécifiques comme INPRO (International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles),
- Publications techniques sur : la sûreté des réacteurs rapides au sodium, la transmutation des actinides, les combustibles avancés pour les cycles fermés.

Mais la combinaison spécifique RNR + SMR est encore émergente :

- Il existe des documents sur les RNR, et sur les SMR,
- Mais pas encore de standards combinés spécifiques pour les SMR RNR (en discussion dans certains groupes techniques de l’AIEA depuis 2022–2023).

En résumé :

Sujet	Rôle de l'AIEA
SMR en général	Fournit standards, feuilles de route, harmonisation, support réglementaire.
RNR en général	Fournit R&D, standards de sûreté, soutien la transmutation et les cycles avancés.
SMR RNR combinés	Soutien indirect, émergence récente, pas encore de normes dédiées.
Impact politique	Force d'influence indirecte majeure, soutien à la légitimité des projets SMR dans les pays membres.

S'adosser dès le début à l'AIEA pour tout projet RNR/SMR expérimental en France ou en Bretagne renforcerait la crédibilité internationale du projet, permettrait des audits positifs à présenter à l'opinion publique, et faciliterait l'ouverture aux coopérations européennes.

L'économie

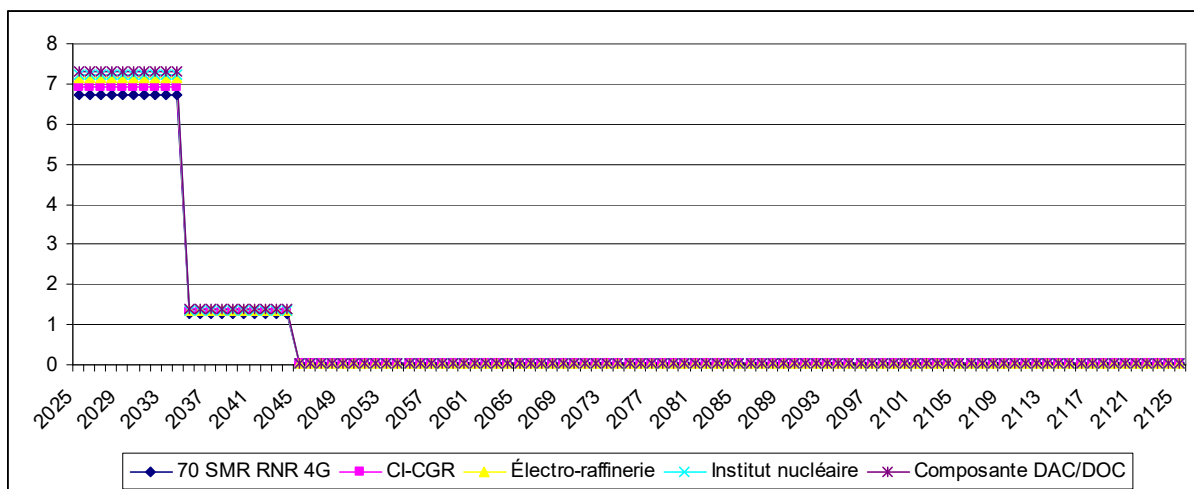
Le financement

Le coût du programme

Quelques considérations sur le financement d'un tel projet. D'abord, le coût « overnight » :

Poste	Élément	Coût estimé (Mds €)
0	70 SMR RNR 4G (à 1,2 Mds €/unité)	84.0
1	CI-CGR (stockage et retraitement régional)	2.5
2	Électro-raffinerie (production d'e-fuels, taille régionale)	3.0
3	Institut nucléaire Morlaix–Brennilis (formation + R&D)	0.8
4	Composante DAC/DOC (projets pilotes et couplage énergétique)	1.2
Total	TOTAL	91.5

Ce qui se décline sur une durée de 1 siècle selon le plan de financement suivant (coût de capitale t d'exploitation) comme suit (cumulé, en milliard d'euros) :



Comme tout projet nucléaire, l'effort financier porte sur le capital initial, les coûts d'exploitations étant ensuite très faibles.

Le LCOE

Nous retiendrons d'abord un taux d'actualisation de 4% qui correspond à une hypothèse modérée souvent retenue dans les évaluations publiques à long terme (par exemple par la Cour des comptes ou la CRE en France pour les projets nucléaires), un taux qui reflète une relative stabilité macroéconomique, une confiance dans la rentabilité à long terme du nucléaire, une approche publique ou quasi-publique de financement (taux souverain + faible prime de risque). Avec ce taux et une durée d'exploitation d'un siècle, on parvient à un LCOE extrêmement bas de 15,76 €/MWh. Ce qui confèrera une compétitivité économique considérable.

Avec une durée de vie ramenée à 60 ans (au lieu de 100), et en conservant un taux d'actualisation de 4 %, le LCOE passe à environ 17,05 €/MWh, soit 1,70 centime d'euro par kWh. Ce reste un niveau très compétitif, ce qui confirme la robustesse économique du projet même sur une durée plus conventionnelle.

Avec une durée d'exploitation de 100 ans et un taux d'actualisation élevé de 8 %, le LCOE monte à environ 24,52 €/MWh (soit 2,45 centimes d'euro par kWh). Ce coût reste très compétitif par rapport à d'autres sources décarbonées, mais reflète bien l'impact majeur du financement initial et du coût du capital dans les projets nucléaires.

Avec une hypothèse très prudente de 60 ans d'exploitation et un taux d'actualisation de 8 %, le LCOE estimé est d'environ 24,75 €/MWh, soit 2,48 centimes d'euro par kWh.

Cela reste extrêmement compétitif au regard des coûts actuels de l'électricité, y compris renouvelable (hors intermittence), tout en intégrant une prudence maximale sur le financement et la durée de vie.

En résumé :

Taux d'actualisation	60 ans	1 siècle
4 %	15,76	17,05
8 %	24,52	24,75

Du LCOE au prix de l'électricité « hors taxe »

Le LCOE représente un coût de production moyen de l'électricité (€/MWh), incluant :

- l'investissement initial,
- l'exploitation et la maintenance,
- le combustible,
- et le démantèlement,

actualisés sur la durée de vie de l'installation.

Le prix hors taxe de l'électricité facturé aux consommateurs inclut en plus :

1. Les coûts d'acheminement (réseau Enedis, RTE),
2. Les frais de gestion/commercialisation (fournisseur),
3. Les réserves techniques / capacité / interconnexions, etc.

Ordre de grandeur typique (France)

Élément	Part approximative (€/MWh)
Production (LCOE)	~25 €/MWh
Acheminement (transport + distribution)	~50 €/MWh
Fournisseur / marge / capacité	~15 €/MWh
Taxes (CSPE, TVA...)	~35 €/MWh

Soit un prix final TTC autour de 120 à 140 €/MWh, donc un prix hors taxe autour de 85–100 €/MWh. Cela reste clairement compétitif, même dans une approche prudente et complète.

1. Compétitivité par rapport au marché actuel

Avec un LCOE nucléaire SMR RNR 4G prudent de 24,75 €/MWh, et un prix HT estimé autour de 65 à 75 €/MWh, on reste :

- en dessous des prix moyens de marché observés en Europe depuis 2021 (souvent entre 80 et 200 €/MWh),
- très inférieur aux pics de crise énergétique (jusqu'à 500 €/MWh en 2022).

Comparatif synthétique (prix HT, sans taxes) :

Source d'électricité	Prix HT estimé (€/MWh)	Remarques
SMR RNR 4G (prudent)	65–75	Bas carbone, stable, pilotable
Gaz (hors crise)	70–100	Volatile, carboné
Éolien terrestre	55–85	Intermittent, besoin de backup
Solaire photovoltaïque	50–90	Intermittent, localisation dépendante
Marché spot (2021–24)	80–200	Volatil, incertain

2. Avantages spécifiques du nucléaire SMR RNR 4G

- Prévisible (coût et production),
- Pilotable (contrairement aux ENR),
- Décarboné, sans intermittence,
- Rentable même à long terme, surtout dans une perspective de transition énergétique,
- Indépendance stratégique (combustible déjà en stock, production européenne possible),
- Rendement élevé sur le cycle de vie, avec valorisation des déchets et chaleur.

Même dans une hypothèse prudente (60 ans, 8 %), le nucléaire SMR RNR 4G reste largement compétitif, face aux énergies fossiles volatiles, et face aux ENR qui nécessitent stockage et renfort réseau.

Avec un coût d'électricité prudent (24,75 €/MWh) et un rendement de conversion de 55 % pour produire du méthane de synthèse, le coût du MWh de gaz de synthèse est estimé à environ 45 €/MWh. A comparer avec un gaz fossile actuel : entre 30 et 80 €/MWh selon le marché. Le gaz de synthèse ainsi produit est compétitif, surtout en période de volatilité ou de hausse du gaz fossile, tout en étant décarboné.

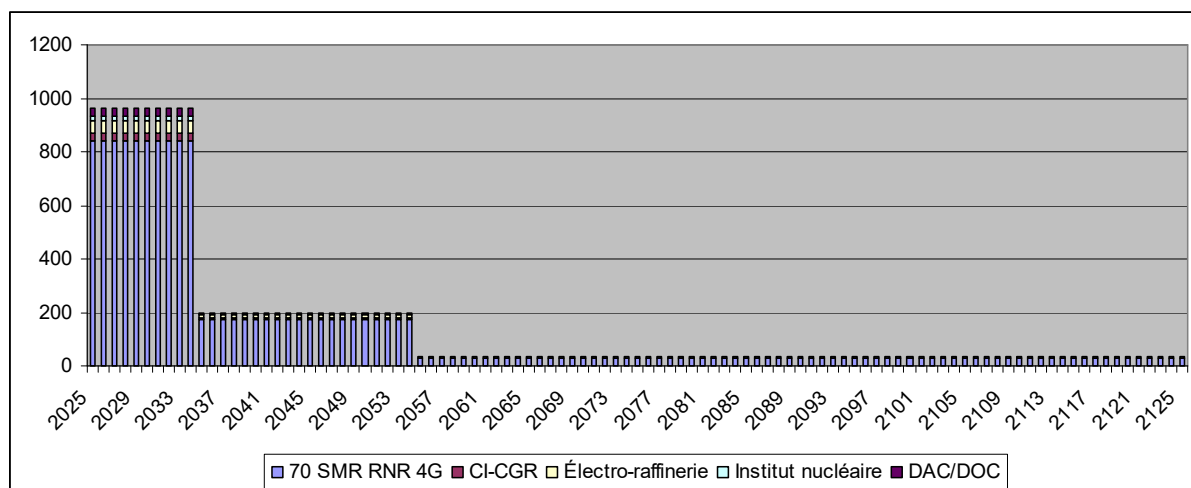
Avec un coût d'électricité prudent (24,75 €/MWh) et un rendement global de 40 % pour produire des carburants synthétiques (e-fuels), on obtient un prix de revient d'environ 0,61 €/litre, hors taxes. Le gazole fossile (hors taxes) : ~0,90 €/litre

Le carburant synthétique devient compétitif sur le plan économique si les taxes carbone augmentent ou si les cours du pétrole sont élevés.

L'emploi

Poste	Élément	Emplois
0	70 SMR RNR 4G (à 1,2 Mds €/unité)	14 000
1	CI-CGR (stockage et retraitement régional)	500
2	Électro-raffinerie (production d'e-fuels, taille régionale)	800
3	Institut nucléaire Morlaix–Brennilis (formation + R&D)	300
4	Composante DAC/DOC (projets pilotes et couplage énergétique)	400
Total	TOTAL	16 000

Ce qui représente ~1000 emplois directs par an en phase de lancement (2025–2035) puis une réduction progressive vers 300–400 emplois/an à partir de 2050.



Ces chiffres ne sont pas « énormes », surtout au regard :

- de l'ambition industrielle et énergétique du programme (70 réacteurs, infrastructures lourdes, DAC, électro-raffinerie),
- de la durée de vie d'un siècle,
- et du volume d'investissement engagé.

Ce nombre d'emplois semble raisonnable

Facteur	Explication
Nucléaire = industrie capitaliste	Faible intensité en main-d'œuvre rapportée à l'investissement (contrairement au bâtiment ou aux services)
SMR = format modulaire, automatisable	Réduction des besoins humains par standardisation, maintenance prévisible, télé-opération possible
Phase post-construction = faible effectif	Une fois construits, les réacteurs nécessitent peu de personnel permanent
Part du numérique croissante	Surveillance, simulation, contrôle à distance diminuent les besoins

	humains sur site
Répartition géographique	Les emplois sont distribués entre plusieurs sites, ce qui dilue leur perception globale

Le programme est énergétiquement massif, mais économiquement sobre en emplois directs, ce qui est typique du modèle nucléaire industriel avancé.

Les retombées économiques

L'impact économique d'une énergie bon marché, fiable, pilotable et durable est majeur, bien au-delà des seuls emplois directs.

1. Un coût de l'énergie bas (≈ 25 €/MWh) permet :

- une compétitivité accrue de l'économie productive.
- la réduction des coûts de production dans l'industrie (agroalimentaire, métallurgie, chimie...),
- une meilleure viabilité de procédés électro-intensifs (électrolyse, data centers, fabrication d'hydrogène),
- une attractivité territoriale renforcée pour les investissements industriels,
- une préservation du pouvoir d'achat des ménages (logement, mobilité, chauffage).

2. La fiabilité et pilotabilité confère la sécurité d'approvisionnement énergétique

- Moins de dépendance aux importations (gaz, pétrole),
- Capacité à absorber les pics de demande hivernaux,
- Complémentarité idéale avec les énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire),
- Réduction des besoins en stockage coûteux ou en importations de secours.

3. La durabilité (cycle RNR 4G) confère la soutenabilité intergénérationnelle

- Réduction des besoins en ressources primaires (moins d'extraction d'uranium),
- Gestion plus sobre des déchets radioactifs (quantité, durée),
- Acceptabilité sociale renforcée à long terme (critère ESG),
- Effet positif sur les bilans carbone nationaux, donc sur les exportations "vertes".

4. Environnement macroéconomique : la stabilité énergétique et politique

- Moins d'exposition aux volatilités géopolitiques (pétrole, gaz, guerre),
- Capacité à définir des tarifs régulés compétitifs pour les secteurs clés (logement, transport, PME),
- Réduction du déficit commercial via moindre importation énergétique,
- Soutien à une politique industrielle de relocalisation et à la souveraineté stratégique.

Résumé chiffré (effet multiplicateur)

Secteur	Effet potentiel
Industrie locale	Réduction des coûts de 10–30 % selon intensité énergétique
Commerce & services	Hausse de consommation via énergie moins chère
Investissement	+15 à 25 % d'attractivité selon études sur coût de l'énergie
PIB régional (long terme)	+1 à 2 points sur 20 ans estimés (modèles INSEE/Rexecode)

Une énergie bas carbone, bon marché et stable n'est pas seulement un atout industriel, c'est le socle d'un développement économique soutenable et un facteur structurant d'équilibre territorial et social à long terme.

Un nouvel essor économique

- La disponibilité d'énergie électrique mais aussi sous forme de chaleur accessible localement change fortement les possibilités de développement d'activités économiques. Les SMR-RNR 4G sont bien plus que des producteurs d'électricité : ce sont les cœurs thermiques d'un nouvel urbanisme industriel décarboné,

Ci-après quelques illustrations des possibilités nouvelles.

Les data center

Coupler un réseau de petits data center à une infrastructure énergétique locale de type SMR-RNR 4G, dans une approche décentralisée, présente une série d'avantages à la fois énergétiques, climatiques, économiques et géopolitiques.

Les data centers consomment une électricité constante, 24/7, tout comme un SMR produit une énergie stable, sans intermittence. Cette stabilité de charge est idéale pour lissage de la production, surtout dans un micro-réseau local (off-grid ou partiellement connecté).

Un data center produit beaucoup de chaleur résiduelle ($\sim 30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cette chaleur peut être utilisée pour préchauffer de l'eau (dans le dessalement par exemple), ou dans une serre agricole locale, si contexte rural.

Un réseau de petits data centers répartis géographiquement contribue à la souveraineté et résilience numérique car il est plus résilient face aux pannes, cyberattaques ou tensions géopolitiques, et il est également plus sobre en infrastructure longue distance (moins de fibres intercontinentales).

Pour un data center, une source d'électricité stable, bas carbone et prévisible, un bon refroidissement et des infrastructures de communication locales, dispense d'un hyperscale⁵ en Islande ou en Oregon.

Les fermes verticales

Associer un SMR-RNR 4G, un data center, une unité de dessalement, une installation de captage carbone (DOC ou DAC) et une ferme verticale constitue un écosystème énergétique, alimentaire et numérique résilient, décarboné, modulaire et circulaire.

⁵ Selon International Data Corporation, un datacenter est hyperscale s'il dépasse au moins 5000 serveurs avec environ 3000 mètres carrés d'espace physique. Un datacenter hyperscale typique peut utiliser presque la même quantité d'électricité qu'une petite ville.

Pourquoi intégrer une ferme verticale à ce cluster ? C'est un besoins parfaitement compatible avec l'écosystème :

Ferme verticale	Approvisionnement nécessaire
Lumière artificielle	Électricité stable (SMR)
Température régulée	Chaleur basse T° (recyclée)
Eau pure	Eau douce dessalée
Atmosphère enrichie en CO ₂	CO ₂ issu du DOC / DAC !

La ferme verticale valorise les excédents du cluster :

- CO₂ capté → fertilisation atmosphérique (effet d'engraisement),
- Eau douce du dessalement → irrigation contrôlée,
- Chaleur fatale du data center ou du réacteur → maintien de la température optimale.

Les avantages d'un cluster agri-énergétique intégré :

Avantage	Détail
Sobriété foncière	Production alimentaire en hauteur, intégrable dans une zone industrielle
Résilience locale	Production d'eau, d'énergie, d'aliments et de services numériques sur place
Réduction d'émissions	Zéro transport longue distance pour énergie, eau ou aliments
Modèle reproductible	Dupliquer l'écosystème dans toute zone littorale ou continentale adaptée

L'aquaponie

Associer aquaponie à un cluster SMR–DOC–data center–fermes verticales constitue un modèle de biorégion industrielle circulaire, hautement efficace et quasiment autonome.

Pourquoi ajouter l'aquaponie à ce cluster ? L'aquaponie combine la pisciculture (élevage de poissons) et l'hydroponie (culture de plantes sans sol), en circuit fermé, où les déjections des poissons fertilisent les plantes, et les plantes filtrent l'eau pour les poissons.

L'aquaponie dans l'écosystème nucléaire–énergie–climat

Ressource produite ou recyclée	Utilisation dans l'aquaponie
Eau douce du dessalement	Bassins d'aquaculture
Chaleur fatale du réacteur ou du data center	Maintien de température pour poissons tropicaux
Électricité bas carbone	Lumière, pompes, aération
CO ₂ capté par DOC/DAC	Accélération de la croissance végétale
Résidus végétaux (fermes verticales)	Nourriture ou compost pour les poissons
Effluents filtrés	Recyclés dans l'hydroponie ou pour biogaz

Résultat : une symbiose complète en produisant énergie, hydrogène, e-fuel, aliments végétaux, protéines animales, eau douce, stockage de CO₂ et services numériques dans un même site. Chaque sous-système valorise les flux du précédent, avec très peu de pertes (modèle en cascade), en entrant dans une logique d'écologie industrielle intégrale, inspirée de Kalundborg (Danemark), mais en version climatique.

Exemples réels d'intégration similaires (émergents)

- Des fermes aquaponiques chauffées par la chaleur fatale d'incinérateurs ou de datacenters en Suisse, Norvège, Canada.
- Microgrid nucléaire + serres + élevage à l'étude dans des zones polaires (Canada, Russie).

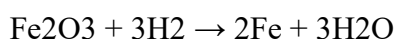
- Projets expérimentaux de clusters SMR + serres + pisciculture en Chine.

En résumé, un modèle rationnel d'un écosystème climatique post-fossile. Une telle zone pourrait devenir autonome, résiliente, et même exportatrice de solutions.

La sidérurgie

Les SMR RNR 4G sont bien adaptés pour alimenter une aciérie bas carbone, notamment via deux voies principales :

1. Production d'hydrogène par électrolyse haute température : les RNR 4G peuvent atteindre des températures de 500 à 700 °C, voire plus selon les modèles. Cela permet de coupler le réacteur à une électrolyse à haute température (SOEC - Solid Oxide Electrolysis Cell), plus efficace que l'électrolyse classique. L'hydrogène produit peut être utilisé dans la réduction directe du minerai de fer (DRI-H₂).
2. Fourniture de chaleur pour la réduction directe : la réduction directe du fer (DRI) avec de l'hydrogène nécessite une température d'environ 600 °C.



Cette température est compatible avec la chaleur produite par les SMR à neutrons rapides, notamment ceux à sodium ou gaz comme caloporteur.

Les avantages du couplage :

- Électricité bas carbone pour alimenter les procédés électriques de l'usine.
- Chaleur directe pour réduire les besoins de fours à combustion fossile.
- Hydrogène bas carbone pour une sidérurgie "verte".
- Intégration locale possible dans une zone industrielle alimentée par un ou plusieurs SMR.

Une mini-aciérie associée à un SMR RNR 4G est un scénario industriel crédible, notamment selon les paramètres suivants :

Besoins de la mini-aciérie :

- Température de réduction : 600–700 °C (réduction directe par H₂)
- Besoin d'énergie électrique : importante pour les fours à arc électrique ou pour l'électrolyse haute température
- Besoin en hydrogène : massif pour remplacer le coke

Ce que fournit un SMR RNR 4G :

- Chaleur à haute température (500–750 °C, selon le caloporteur – sodium ou gaz)
- Électricité (rendement thermique élevé avec cycle de Carnot optimisé)
- Source d'énergie stable et locale pour l'électrolyse haute température (SOEC)

Avantages du couplage :

Avantage	Détail
Décarbonation	Hydrogène bas carbone pour la réduction du minerai
Compacité	Le SMR est enterré ou semi-enterré, bien intégré dans une zone industrielle
Synergie énergétique	Chaleur + électricité au plus proche du besoin
Valorisation territoriale	Création d'emplois industriels à haute valeur ajoutée

Réduction des importations	Moins de dépendance au coke et aux minerais transformés à l'étranger
----------------------------	--

Exemple d'implantation possible :

- 1 ou 2 SMR RNR 4G (de 300 MWth) fournissent : chaleur pour l'électrolyse H₂, électricité pour le four à arc, chaleur pour les bâtiments
- La mini-acierie produit de l'acier bas carbone, avec boucle locale de recyclage (ferrailles, béton, CO₂ capté et minéralisé).

La centrale à béton et la mini-acierie s'inscrivent dans une logique de recyclage circulaire du béton et de l'acier, intégré autour d'un SMR RNR 4G.

Pour le béton :

- Déconstruction de bâtiments, d'ouvrages d'art, d'infrastructures.
- Concassage et tri des gravats.
- Réutilisation en granulats pour fabriquer un nouveau béton.
- Carbonatation minérale accélérée du béton recyclé (voir formule précédente), captant du CO₂ industriel ou atmosphérique.
- Le béton ainsi obtenu peut être :
 - utilisé en éléments préfabriqués normalisés (blocs, dalles, poutres...),
 - intégré dans des structures de bâtiments neufs (logements, usines, infrastructures),
 - valorisé comme puits de carbone.

Avec pour avantage, le stockage de CO₂ dans un matériau de construction utile, à vie longue et traçable.

Pour l'acier :

- Récupération de ferrailles issues de démolition et d'industries locales.
- Fusion dans un four électrique alimenté par un SMR (électricité bas carbone).
- Possibilité d'utiliser de l'hydrogène bas carbone (produit par électrolyse haute température avec la chaleur du SMR) pour remplacer le coke dans la réduction directe.
- L'acier est ensuite réutilisé dans les constructions, à la demande locale (poutrelles, armatures, profilés...).

Avec pour avantage, une réduction drastique de l'empreinte carbone de l'acier, tout en valorisant les rebuts locaux.

Le recyclage urbain

L'étalement urbain se poursuit inexorablement sur des schémas inadaptés aux transitions territoriales, urbaines, énergétiques, climatiques à gérer : le déploiement d'un réseau régional de réacteurs SMR RNR 4G offre une opportunité unique d'associer transition énergétique, économie circulaire et reconstruction des paysages urbains.

Le CO₂ extrait de l'atmosphère (DAC) ou de l'océan (DOC) est destiné à la filière hydrogène ou gaz et carburants de synthèse ou à être enfoui durablement dans des couches géologiques⁶. Le CO₂ peut aussi être enfoui assez durablement dans un cercle vertueux autour des SMR RNR 4G avec un recyclage urbain, béton et stockage du carbone. Ce qui se décline en :

1. Une filière béton bas carbone intégrée : Autour de chaque site de SMR peut être implanté un centre de recyclage des bétons de déconstruction (logements anciens, ouvrages d'art, zones industrielles...). Ces matériaux sont concassés, triés et revalorisés comme granulats pour la fabrication d'éléments en béton préfabriqués.

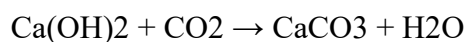
2. Une carbonatation industrielle utile : les granulats recyclés ou les nouveaux liants peuvent être soumis à une carbonatation minérale accélérée (fixation du CO₂ dans la matrice béton), utilisant du CO₂ capté localement (industrie, biomasse, ou réacteurs eux-mêmes). Cela permet :

- de stocker durablement du carbone dans des matériaux de construction,
- de réduire l'empreinte carbone des infrastructures.

3. Reconstruction et transformation des villes : les éléments préfabriqués issus de cette filière servent à reconstruire des logements, écoles, équipements publics, zones d'activités, ou à réaménager les entrées de ville. Ce couplage entre énergie, construction et climat permet une reconfiguration douce, durable et démocratique du territoire.

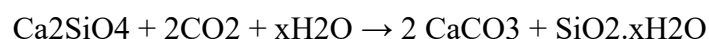
4. Un symbole d'unité et de régénération : les SMR deviennent ainsi non seulement des producteurs d'énergie, mais aussi des catalyseurs de renouveau local, ancrés dans une dynamique vertueuse : moins de déchets, plus de valeur, plus de résilience.

Note : la fixation du dioxyde de carbone (CO₂) dans des matériaux contenant du calcium (comme les silicates de calcium présents dans le ciment ou les roches) s'effectue selon les formule chimique typique de la réaction de carbonatation minérale accélérée,



Cette réaction représente la transformation de chaux éteinte (hydroxyde de calcium) en carbonate de calcium (CaCO₃), en présence de dioxyde de carbone, avec libération d'eau.

Une variante avec silicate de calcium : dans le cas du ciment ou du béton contenant du silicate de calcium hydraté (CSH) :



Cela illustre une réaction plus réaliste dans le béton, où le CO₂ réagit avec les phases silicatées du ciment pour former du carbonate de calcium et de la silice amorphe hydratée. Ces réactions sont exothermiques et se déroulent plus rapidement lorsqu'elles sont accélérées (par augmentation de température, pression partielle de CO₂ ou humidité).

Le recyclage des produits et matériaux électroniques

Le recyclage des produits et matériaux électroniques constitue une application stratégique essentielle à associer à un parc industriel bas carbone alimenté par des SMR RNR 4G.

⁶ BRGM, *Lignes de conduite pour la sécurité d'un site de stockage géologique de CO₂ - Rapport final*, BRGM/RP-60369-FR, Octobre 2011 (<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/lignesdeconduite-gtsecuriteco2-brgm-rp-60369-fr-1370529129.pdf>).

Le recyclage des produits électroniques permet :

1. Réduction de la dépendance aux mines : Les appareils électroniques contiennent :

- des métaux précieux (or, argent, platine, palladium),
- des métaux critiques (lithium, cobalt, nickel, terres rares, tantale, tungstène...),
- des matériaux non renouvelables (cuivre, étain, indium, gallium...).

Le recyclage permet :

- d'éviter l'extraction minière destructrice et souvent géopolitiquement instable,
- de boucler la chaîne d'approvisionnement de manière locale,
- de conserver la valeur ajoutée industrielle sur le territoire.

2. Économie circulaire bas carbone : l'extraction et le raffinage minier sont extrêmement énergivores. Le recyclage peut se faire à température et pression contrôlées, avec des solvants ou procédés électrochimiques, nécessitant :

- de l'électricité stable (fournie par un SMR),
- de la chaleur industrielle (fournie à basse ou moyenne température).

3. Nœud industriel pertinent autour d'un SMR : un centre de recyclage de DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) pourrait être adossé à un SMR RNR 4G :

- tri mécanique et manuel automatisé,
- fours à induction ou micro-ondes, électrolyse, traitement thermique,
- récupération des terres rares et métaux critiques,
- neutralisation de composants toxiques (ex. : mercure, arsenic).

Ce centre pourrait aussi recycler :

- panneaux photovoltaïques en fin de vie,
- batteries au lithium ou au nickel,
- éoliennes (composites + aimants néodyme).

4. Complémentarité avec la vision RNR : les SMR RNR valorisent les déchets nucléaires, de même que le recyclage électronique valorise les déchets technologiques avec une double symétrie : recycler les anciens déchets du passé et anticiper ceux du numérique et de la transition. En résumé :

Avantage	Détail
Économie de ressources	Moins d'extraction de terres rares, cuivre, lithium...
Souveraineté industrielle	Boucle locale de haute valeur ajoutée
Réduction CO ₂	Énergie bas carbone pour processus gourmands
Complémentarité	SMR → énergie + chaleur + pilotabilité pour recycler efficacement
Création d'emplois	Tri, traitement, ingénierie, maintenance, R&D

Perspectives

Le programme de RNR SMR 4G permet la vision d'une symbiose territoriale climat-énergie-nourriture-numérique avec éco-campus industriel ou une zone portuaire intelligente accueillant :

- Un SMR-RNR 4G cœur énergétique
- du froid et du chaud,
- du CO₂ pur,
- de l'hydrogène,
- des carburants synthétiques,
- de l'eau douce par dessalement couplée à
- Un DOC captant le CO₂ de l'eau de mer
- Une production d'H₂ via électrolyse haute température
- Une unité de synthèse de carburants
- Un data center modulaire refroidi par eau
- Une ou plusieurs fermes verticales optimisées en énergie/CO₂
- Des micro-usines d'emballage ou de transformation alimentaire
- Des plateformes logistiques ou portuaires locales
- de la nourriture
-

L'organisation institutionnelle

La gouvernance actuelle du nucléaire en France, très centralisée, est calibrée pour de grandes installations nucléaires nationales (type EDF/REP) — pas pour un programme de petits réacteurs déployés régionalement (SMR RNR). Si l'on veut réussir un tel programme, il faudra ajuster l'organisation institutionnelle, pour mieux intégrer les territoires tout en garantissant la rigueur nationale de sûreté et sécurité.

L'organisation actuelle du nucléaire en France :

Acteur	Rôle principal
ASN (Autorité de sûreté nucléaire)	Contrôle et autorise toute activité nucléaire (indépendante du gouvernement).
IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire)	Expertise technique pour l'ASN (en voie de fusion avec l'ASN, projet de réforme 2024).
Parlement	Contrôle via commissions parlementaires, valide les grandes lois énergétiques.
Gouvernement (ministère de l'Énergie)	Définit la politique énergétique et nucléaire nationale.
ANDRA	Gestion des déchets radioactifs.
EDF, CEA, Orano	Acteurs industriels (exploitants, constructeurs, retraitement).

Tout est donc organisé autour d'une gouvernance nationale fortement verticale. Cette organisation est mal adaptée au programme SMR RNR avec composante régionale :

- Déploiement multi-sites industriels → Besoin d'une interface régionale pour la concertation, la planification, l'autorisation.
- Acceptabilité locale essentielle → Le modèle purement centralisé est trop déconnecté du terrain.
- Spécificités territoriales (Bretagne, Normandie, PACA...) → Nécessité d'adapter la sûreté, la sécurité, l'urgence, les transports localement.

Si on reste dans le schéma actuel, on risque de bloquer sur :

- l'acceptabilité sociale (absence de concertation réelle),
- les lourdeurs administratives (autorisations centralisées longues),
- le défaut d'agilité face aux spécificités territoriales.

Quelles adaptations institutionnelles seraient nécessaires ?

Niveau	Adaptation nécessaire
ASN	Délégations régionales spécialisées pour les SMR (pas seulement des délégations générales INB).
IRSN ou nouveau service de sûreté	Unité dédiée à l'évaluation rapide et modulée des SMR.
Gouvernement	Création d'un cadre réglementaire expérimental spécifique pour les SMR régionaux (statut « INB modulaire expérimentale »).
Parlement	Adoption d'une loi ou ordonnance dédiée à la gouvernance des nouvelles filières nucléaires modulaires.
Régions	Introduction d'un rôle formel des Conseils régionaux dans l'aval du cycle nucléaire (avis, planification, concertation).
Comités territoriaux nucléaires	Création de comités de concertation locaux, associant élus, industriels, autorités, citoyens, sur chaque projet SMR.

Conclusion politique : si l'on veut réussir un programme SMR RNR en Bretagne (ou ailleurs), il faut associer fortement la gouvernance régionale, tout en maintenant une souveraineté nationale sur la sûreté. Cela nécessiterait :

- Une nouvelle articulation entre État, ASN, et régions, par la loi.
- Un droit local d'alerte et de concertation, mais pas un droit de veto absolu (pour garantir l'intérêt général).
- Une adaptation pragmatique de la régulation nucléaire à la modularité, à la taille, et au rythme industriel des SMR.

En synthèse

Question	Réponse
L'organisation actuelle est-elle adaptée aux SMR RNR ?	<input type="checkbox"/> Non, elle est conçue pour des grands projets centralisés.
Faut-il réformer ?	<input checked="" type="checkbox"/> Oui, pour intégrer régionalisation et modularité.
Comment ?	Nouvelle loi nucléaire pour SMR, gouvernance régionale intégrée, délégation de concertation et de suivi local.

Le dérèglement climatique

L'enjeu d'un programme RNR SMR n'est pas seulement une question énergétique, de remplacement des énergies fossiles par une ou d'autres énergies. Un tel programme rejoint une préoccupation majeure pour la planète, l'humanité, la biodiversité et l'environnement :

- Ne plus émettre de gaz à effet de serre, en particulier de dioxyde de carbone,
- Etre capable de s'inscrire dans une démarche de réparation du climat selon des procédés technologiques émergents visant à extraire ce dioxyde de carbone de l'atmosphère, tous procédés consommateurs énergétiques.

Un besoin croissant d'énergie décarbonée pour l'atténuation climatique

La neutralité carbone d'ici 2050 implique de réduire fortement les émissions de CO₂ à la source (énergies fossiles, transports, industries), mais aussi d'extraire du CO₂ résiduel de l'atmosphère et des océans, car certains secteurs resteront inévitables (agriculture, aviation, chimie lourde). Cette extraction (« négatif net ») nécessitera des technologies en particulier :

- DAC (Direct Air Capture) : captation du CO₂ directement dans l'air.
- DOC (Direct Ocean Capture) : captation du CO₂ dissous dans les océans.

Ces procédés sont très énergivores (principalement en électricité et en chaleur) et ils nécessitent des sources d'énergie bas carbone massives, continues et sûres. Les SMR RNR sont des candidats idéaux pour alimenter ces procédés :

Critère clé	Contribution des SMR RNR
Électricité bas carbone	Production continue, indépendante des conditions météorologiques.
Production de chaleur	Chaleur industrielle disponible (>300°C), utile pour DAC/DOC thermiques.
Modularité	Implantation possible à proximité des unités de capture, y compris en sites industriels isolés ou côtiers.
Cycle durable	Réduction massive des déchets, compatibilité avec une économie circulaire énergétique.
Sécurité d'approvisionnement	Source nationale, stable, pilotable pour alimenter 24/7 les systèmes de captation.

Le programme SMR RNR permet non seulement de réduire les émissions, mais aussi de retirer du carbone de l'atmosphère, en sécurisant l'alimentation énergétique des dispositifs de captation.

Ordres de grandeur énergétiques, quelques chiffres pour comprendre l'enjeu : la captation d'1 tonne de CO₂ par DAC nécessite environ : 2000–3000 kWh d'énergie (électricité + chaleur basse température), soit, pour 1 million de tonnes de CO₂ captées/an : Une centrale d'environ 250–300 MW électriques en permanence.

Un SMR de 300 MWe peut donc alimenter à lui seul une unité de DAC de grande taille (>1 MtCO₂/an), ou plusieurs unités moyennes.

Et pour la Direct Ocean Capture (DOC) ? La captation du CO₂ océanique est aussi énergivore, mais souvent plus efficace thermodynamiquement que DAC air-ambiant. Les sites SMR RNR près des côtes (ex : Bretagne) peuvent être directement couplés à :

- des unités DOC industrielles,

- des infrastructures portuaires décarbonées,
- la production d'hydrogène vert par électrolyse, utilisant aussi la chaleur et l'électricité SMR.

En résumé :

Axe stratégique	Contribution du programme SMR RNR
Décarboner la production électrique	Oui, avec production stable, modulable, bas carbone.
Soutenir la captation directe du CO ₂	Oui, en fournissant chaleur et électricité 24/7 aux DAC/DOC.
Créer des hubs industriels climatiques	Oui, en associant SMR, DAC/DOC, hydrogène et industries portuaires.
Positionner la France en leader technologique	Oui, en intégrant nucléaire avancé et technologies climatiques émergentes.

Avec les SMR RNR, produire et réparer : l'énergie pour décarboner ET pour extraire le carbone.

Une stratégie de la transition climatique fondée sur la durabilité

En termes d'énergie, il convient de ne pas confondre

- renouvelabilité et « inépuisabilité » (soit des réserves infinies d'énergie),
- renouvelabilité et durabilité,
- durabilité et éternité.

Aucune énergie n'est durablement renouvelable, aucune énergie n'est éternelle. Nous vivons dans un monde fini, spatialement et temporellement. Les énergies renouvelables sont moins durables que le nucléaire qui apparaît, loin devant les énergies renouvelables (éolien et solaire photovoltaïque)⁷, comme l'énergie la plus durable (en particulier si l'on considère les réserves terrestres de thorium et la réserve la plus important d'uranium dans l'océan qui sera rentable tôt ou tard).

La transition énergétique doit être intimement liée à la transition et distinguer plusieurs échéances plus ou moins lointaines dans le temps :

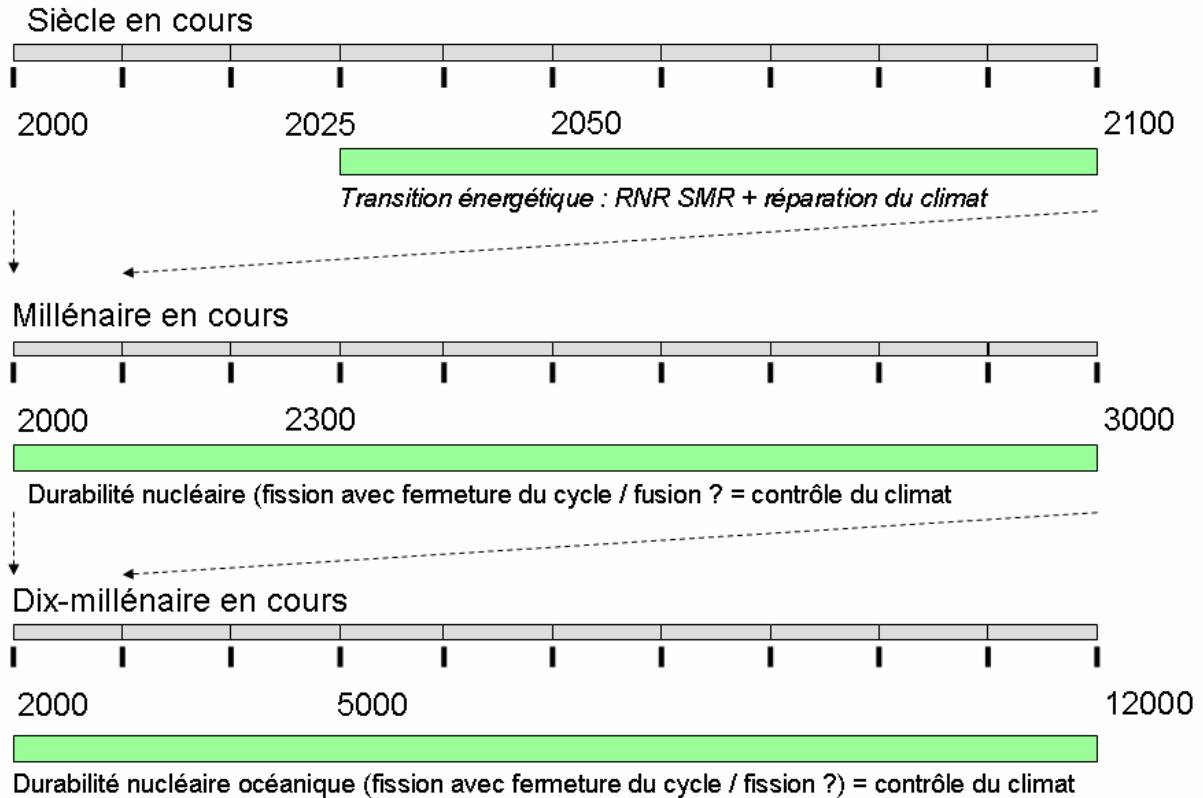
- A l'échelle du siècle en cours, fin des énergies fossiles, remplacement par du nucléaire durable tout en mettant fin au dérèglement climatique d'origine anthropique et même, en réparant le climat⁸
- A l'échelle du millénaire, contrôler le climat et fonder l'énergie sur le nucléaire de 4ème génération

⁷ Voir document en cours de rédaction par le Cercle Pierre Landais. Dans cet ordre d'idée, il convient de ne pas confondre le vent (durable) et l'éolienne (moyennement durable) ainsi que le soleil (très durable) et le panneau photovoltaïque (moyennement durable et assez durable selon les précautions prises lors de sa fabrication).

⁸ Yves Mervin, *Vers un nouvel accord international sur le Climat, 2025* (https://bibliotheque.idbe.bzh/data/cercle_pierre_landais/climat/Vers_un_nouvel_accord_international_sur_le_climat_4.pdf).

- A l'échelle du dix-millénaire, passer de l'uranium terrestre à l'uranium océanique ou au thorium

A chaque étape, le nucléaire par fusion peut prendre le relais du nucléaire par fission et passer alors à une autre échelle de durabilité au-delà du dix-millénaire.



L'énergie nucléaire représente un potentiel d'énergie permettant d'envisager la réparation des dégâts causés par l'activité humaine sur la planète.

La synergie nucléaire

La fusion nucléaire

La synergies entre les RNR 4G et la fusion : deux approches du nucléaire... mais des points communs.

Fission (RNR 4G)	Fusion
Rupture d'un noyau lourd (uranium/plutonium)	Fusion de noyaux légers (deutérium, tritium)
Maîtrisée industriellement	Pas encore industrielle (démonstration en cours)
Génère des déchets à long terme (réductibles via transmutation)	Génère peu ou pas de déchets à longue durée
Nécessité gestion fine du combustible et de la chaleur	Nécessite confinement extrême et énergie initiale très forte

La fission et la fusion sont deux approches du nucléaire... qui partagent des points communs et qui partagent :

- Une logique de cœur chaud, contrôlé et isolé,
- Des technologies extrêmes (matériaux, flux thermiques, environnement neutronique intense),
- Des enjeux communs sur les matériaux résistants aux neutrons, la thermohydraulique, ou la conversion de chaleur en électricité.

En Bretagne, l'Université de Rennes 1, ENSCR, Institut de Physique de Rennes (IPR), mène des recherches actives sur la fusion par confinement inertiel en collaboration avec le CEA. Ces recherches sont en lien avec le Laser MégaJoule (LMJ) avec études des plasmas produits par lasers intenses, pour simuler des cœurs de fusion par confinement inertiel (compression d'une microbille de deutérium par choc laser).

Ces recherches sont stratégiques dans la mesure où la fusion inertielle demande un savoir-faire en modélisation neutronique, en cinétique des matériaux, en dynamique du plasma et en métrologie extrême. Ce sont des compétences transférables à des RNR de très haute technologie, voire à des RNR expérimentaux hybrides fission/fusion.



ENSC Rennes (Institut de Physique de Rennes : <https://ipr.univ-rennes.fr/>, Ecole nationale supérieure de chimie de Rennes : <https://www.ensc-rennes.fr/>)

Les ponts technologiques possibles entre RNR et fusion :

Domaine	Apport du RNR 4G	Apport pour la fusion
Matériaux soumis aux neutrons	Développement de structures résistantes	Applicables aux parois des tokamaks ou cibles laser
Thermohydraulique extrême	Refroidissement sodium/plomb/gaz à haute température	Pertinent pour les systèmes de récupération d'énergie
Instrumentation nucléaire	Mesure en environnement hostile	Nécessaire pour diagnostic laser/fusion
Cycle des combustibles	Gestion fine des isotopes (actinides, lithium)	Utile pour tritium ou futures cibles hybrides

Envisager un pôle R&D « fission–fusion avancée » en Bretagne ? C'est cohérent et ambitieux :

Objectif	Lieu possible
Regrouper recherche sur SMR RNR, isotopes médicaux, fusion inertielle	Institut nucléaire à Brennilis ou Rennes
Former ingénieurs, physiciens, chimistes	Partenariat universités bretonnes + CEA + écoles

	d'ingénieurs
Devenir un pôle d'innovation sur l'énergie nucléaire du XXI ^e siècle	Bretagne comme région pilote européenne

La recherche en Bretagne sur la fusion par confinement inertiel peut s'articuler avec le développement d'un programme SMR RNR 4G, en mutualisant compétences, laboratoires, simulations, matériaux, instrumentation. Cela renforcerait le rôle de la Bretagne comme région nucléaire civile de haute technologie, non seulement dans la transition, mais dans la préparation du futur post-fossile à très long terme.

La santé

Les maladies professionnelles

Le paradoxe des maladies professionnelles dans le nucléaire tient à ce que la santé du personnel employé dans l'énergie nucléaire est meilleure que celle de la population en général, étant donné que ce personnel fait l'objet d'un suivi médical plus conséquent.

Des maladies professionnelles n'en sont pas moins constatées, en particulier dans le nucléaire militaire, et que ces maladies prennent des formes graves et mortelles⁹.

Le tribunal judiciaire de Brest avait en effet condamné la Direction des constructions navales (DCN), détenue à 100 % par l'Etat à l'époque des faits, pour faute inexcusable dans la survenance d'une myélodysplasie, [une forme de leucémie](#), chez un ancien électronicien de la base de l'Île Longue. Il avait été exposé durant son activité professionnelle, entre 1980 et 2011, aux rayonnements de têtes nucléaires.

Nonobstant la gravité des dommages aux personnes concernées, ces cas survenus sont limités et à comparer avec les autres activités industrielles.

Les risques accidentels

Ce risque accidentel concerne la population vivant aux abords d'une centrale nucléaire en cas d'accident avec émission de matières radiotoxiques inhalables dans l'atmosphère ou pouvant entrer en contact cutané.

La médecine nucléaire

Il existe des synergies réelles entre les technologies des RNR 4G et le domaine de la santé, notamment dans la production de radio-isotopes médicaux, domaine stratégique, en tension mondiale.

Les radio-isotopes sont indispensables en médecine nucléaire, pour :

- Le diagnostic : imagerie fonctionnelle (scintigraphie, TEP),
- Le traitement : cancers (radiothérapie métabolique, thérapies ciblées).

Exemples d'isotopes clés :

⁹ <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bretagne/finistere/brest/la-famille-d-un-monteur-d-armes-nucleaires-decede-d-un-cancer-demande-la-reconnaissance-de-la-faute-inexcusable-du-cea-3064279.html>, <https://france3-regions.francetvinfo.fr/bretagne/finistere/brest/irradies-de-l-ile-longue-la-faute-inexcusable-de-l-etat-confirmee-en-appel-3152744.html>.

- Technétium-99m (^{99m}Tc) : utilisé dans 80 % des actes de médecine nucléaire,
- Iode-131, Lutétium-177, Actinium-225 : pour thérapies ciblées de cancers.

La majorité de ces isotopes sont aujourd'hui produits :

- Dans des réacteurs de recherche vieillissants (Pays-Bas, Belgique, Canada, Russie...),
- Avec des chaînes d'approvisionnement fragiles, et parfois des pénuries graves.

Les RNR 4G, en particulier ceux :

- à neutrons rapides,
- à haut flux neutronique,
- avec des cœurs modulables,

... peuvent produire des isotopes médicaux à partir de cibles irradiées (comme les réacteurs de recherche), avec certains avantages :

Atout	Détail
Flux neutronique élevé	Permet la production rapide de radio-isotopes à demi-vie courte
Possibilité d'irradiation de cibles spécifiques	Capsules insérées dans les zones périphériques ou latérales du cœur
Souplesse du design SMR	Certains modèles peuvent intégrer des "poches" pour production cyclique ou continue
Réduction des dépendances extérieures	Renforce la souveraineté sanitaire et l'accès aux isotopes stratégiques

Quels isotopes peuvent-ils produire ?

Isotope	Utilisation	Production possible en RNR ?
Technétium-99m (à partir de Molybdène-99)	Diagnostic général	<input checked="" type="checkbox"/> Oui
Iode-131	Traitement thyroïde, radiothérapie	<input checked="" type="checkbox"/> Oui
Lutétium-177	Thérapie ciblée cancers (prostate, neuroendocriniens)	<input checked="" type="checkbox"/> Oui
Actinium-225 (alpha-thérapie)	Radiothérapie métabolique expérimentale	<input checked="" type="checkbox"/> Potentiellement (recherche en cours)

Exemples d'initiatives existantes

- Le projet MYRRHA en Belgique (sous-critique, plomb) inclut un volet production d'isotopes médicaux.
- Des projets SMR à neutrons rapides aux États-Unis (Oklo) et en Russie envisagent aussi des modules spécialisés.
- La Chine explore aussi le développement parallèle d'un parc de réacteurs thérapeutiques.

Intégration possible en Bretagne

Lieu	Rôle
Institut nucléaire de Brennilis	Recherche appliquée sur la production d'isotopes
Unité SMR spécialisée	Réacteur RNR modifié ou hybride dédié à

	l'irradiation médicale
Partenariat avec CHU de Rennes / Brest / Nantes	Distribution régionale rapide, recherche clinique

Cela renforcerait la dimension de santé publique du projet, la diversification de l'usage du nucléaire, au-delà de l'électricité, l'adhésion sociétale, notamment dans les milieux hospitaliers et universitaires.

Les RNR 4G peuvent devenir des plateformes régionales stratégiques pour la production d'isotopes médicaux, renforçant la souveraineté sanitaire, réduisant les pénuries, et associant le nucléaire à la santé, ce qui améliore grandement son acceptabilité.

Le militaire

Deux filières historiquement liées mais distinctes : bien que le nucléaire civil et le nucléaire militaire relèvent de logiques distinctes, ils partagent historiquement une base technologique, scientifique et industrielle commune. De nombreux États disposent de nucléaire civil sans arsenal militaire. La France, quant à elle, a construit dès les années 1960 un continuum technologique entre les deux domaines dans le cadre de sa stratégie de dissuasion.

Le contexte français : continuité de la dissuasion et place de la Bretagne. Avec la base de sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) de l'Île Longue et les sites rattachés, la Bretagne est en première ligne de la dissuasion nucléaire française. Cette situation est durable. La France a lancé le programme de nouvelle génération de SNLE (SNLE 3G), un programme déterminant pour la pérennité de sa dissuasion au-delà de 2040.

La doctrine nucléaire française, fondée sur le principe de stricte suffisance, de non-emploi en premier et de dissuasion tous azimuts, est l'une des plus stables et des plus adaptées à un contexte mondial imprévisible. Elle renforce la crédibilité de l'arsenal national tout en encadrant son usage potentiel dans une logique défensive.

Dérégulation stratégique mondiale : fin des traités de limitation. Depuis 2023, aucun dialogue de maîtrise des armements nucléaires n'est actif entre les deux grandes puissances que sont les États-Unis et la Russie. Les anciens piliers de la stabilité stratégique mondiale (INF, New START) ont été abandonnés ou suspendus, ouvrant la voie à une course aux armements. La Chine, l'Inde, le Pakistan et la Corée du Nord modernisent également leurs arsenaux. L'absence d'un cadre multilatéral de négociation (type SALT) accroît les incertitudes globales.

Évolutions technologiques : des vecteurs plus que des têtes. Les progrès récents portent moins sur les têtes nucléaires que sur leurs vecteurs : missiles hypersoniques russes (Avangard, Sarmat), américains (Sentinel, B61-12), chinois (DF-17). L'enjeu est aujourd'hui la vitesse, la manœuvrabilité, et la capacité à échapper aux systèmes antimissiles.

Propulsion nucléaire et SMR RNR 4G : liens indirects. Les RNR (sodium, gaz, métal liquide) ne sont pas adaptés à la propulsion mobile actuelle (SNLE, porte-avions). En revanche, les progrès sur les SMR civils peuvent inspirer des innovations sur les matériaux, la compacité, la sûreté passive. Des applications civiles maritimes (plateformes offshore énergétiques, cargos à longue autonomie) sont envisageables à moyen terme.

Synergies technologiques et industrielles à long terme

Domaine	Synergie possible
Matériaux nucléaires avancés	Recherche sur matériaux résistants aux flux neutroniques, utiles aux têtes nucléaires compactes et aux cœurs navals.

Cycle du combustible	Maîtrise des procédés d'enrichissement, de recyclage, de production d'actinides particuliers (ex : Pu-239).
Instrumentation nucléaire	Détecteurs, capteurs en environnement extrême, technologies applicables aux réacteurs et aux systèmes de contrôle d'ogives.
Sûreté et contrôle	Techniques de confinement, sécurité passive, robustesse aux chocs, autant pour réacteurs que pour charges sensibles.
Miniaturisation énergétique	Technologies SMR pouvant inspirer ou bénéficier des travaux sur chaufferies nucléaires navales (SNLE, porte-avions).
Souveraineté industrielle	Maintien des compétences humaines, chaînes d'approvisionnement, laboratoires spécialisés (ex : CEA, Naval Group, TechnicAtome).

Une dissuasion européenne en perspective : l'Union européenne ne dispose ni d'arsenal nucléaire partagé ni d'autonomie stratégique collective. Le contexte de la guerre en Ukraine a ravivé le débat sur l'extension de la dissuasion française à l'échelle européenne. C'est paradoxalement en disposant d'une dissuasion nucléaire que l'UE pourrait porter une parole crédible en faveur de la maîtrise des armements.

Conclusion : vers une souveraineté stratégique européenne. Le développement d'une filière nucléaire civile avancée, fondée sur les SMR RNR 4G, répond à la transition énergétique, à la décarbonation et à la relocalisation industrielle. Mais il contribue aussi, indirectement mais fondamentalement, au maintien de la capacité de dissuasion française. Cette synergie discrète mais réelle entre civil et militaire permettrait à l'Union européenne de peser davantage dans le nouvel équilibre mondial.

L'acceptabilité

Réparer les erreurs du passé

Le nucléaire a pâti de développements mal maîtrisés dont les conséquences ont été mal appréhendées. Quand bien même le programme de RNR SMR 4G s'inscrit dans une démarche affranchie de ces erreurs potentielles et qu'il porte un soin particulier à l'évitement de nouvelles erreurs qui lui seraient intrinsèques, ce programme donne l'occasion, en particulier par les financements qu'il suppose, de réparer ces erreurs. En particulier :

L'héritage de sites miniers d'uranium en Bretagne, dont certaines excavations ont été abandonnées à proximité. La recherche de fûts de déchets radioactifs largués dans les fonds sous-marins ;

Le démantèlement définitif du réacteur à eau lourde sur le site de Brennilis. Ce site pourra être réhabilité et rendu à l'environnement et à la biodiversité, ou, à défaut, accueillir un site d'enfouissement de subsurface.

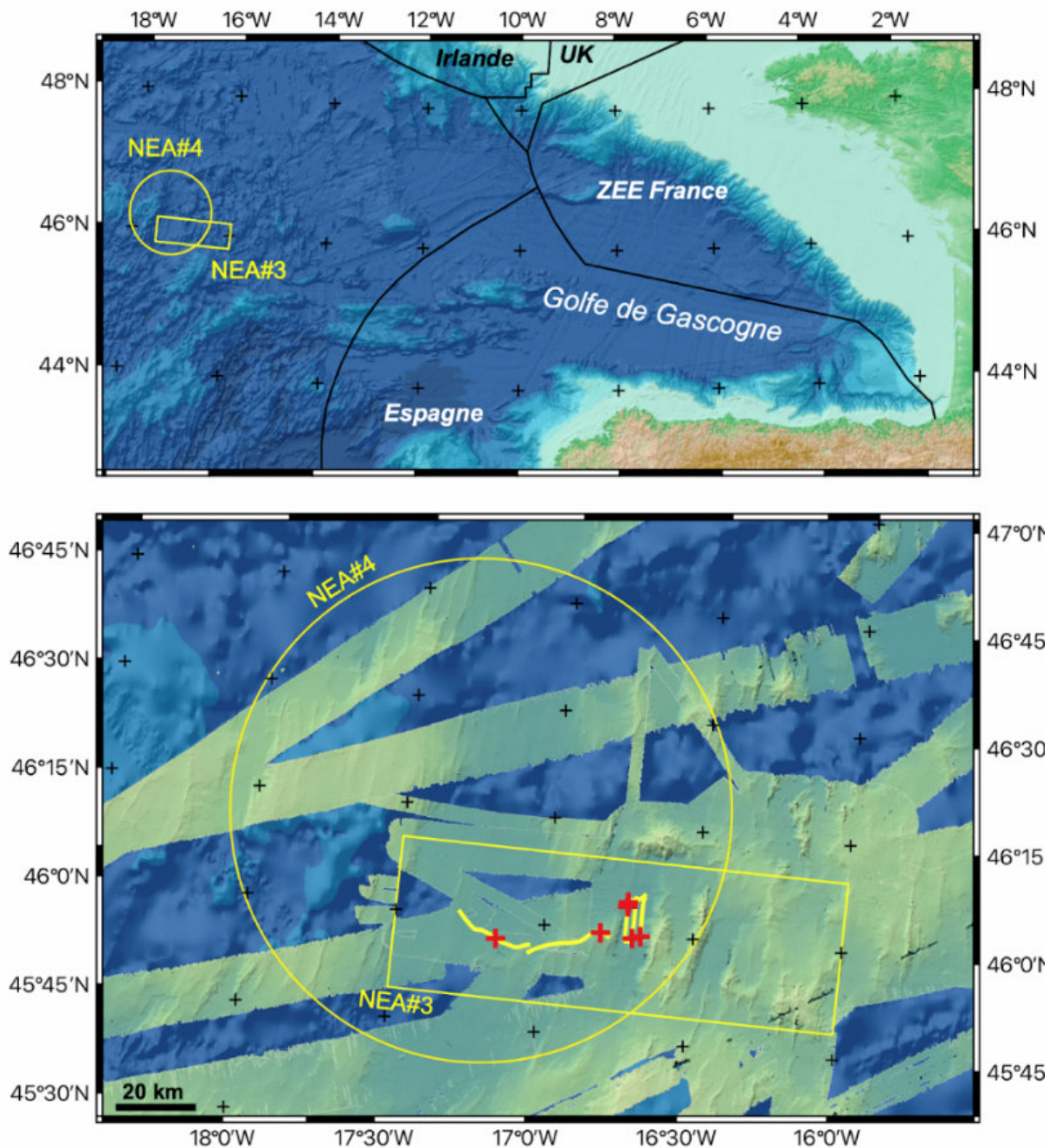
Les fûts immergés

Entre 1946 et 1990, plus de 200 000 fûts remplis de déchets radioactifs ont été jetés par plusieurs Etats européens dans la plaine abyssale de l'océan Atlantique Nord-Est, dans les eaux internationales, à plus de 4 000 mètres de profondeur. Ces fûts contiennent des déchets incorporés dans du bitume et du ciment afin de remplir les espaces libres des fûts.

Le projet NODSSUM, campagne interdisciplinaire associant nucléaire, géologie, océanographie, biologie et chimie marine vise à cartographier la zone d'immersion principale

et à comprendre le comportement des radionucléides dans les eaux profondes ainsi que leurs interactions avec les écosystèmes marins. Pendant un mois, les scientifiques parcourront les zones d'immersion des fûts radioactifs grâce à un sonar à très haute résolution, embarqué sur le submersible autonome UlyX qui réalise ses premières plongées scientifiques. Il survolera la zone à environ 70 mètres d'altitude afin de cartographier et repérer les fûts et se rapprochera à une dizaine de mètres environ pour les photographier. Cela permet d'identifier les zones de réalisation d'échantillonnage d'eau, sédiments et faune, dans un premier temps, à distance des fûts.

La première mission de la campagne NODSSUM, prévue du 15 juin au 11 juillet et portée par le CNRS, vise à cartographier la zone d'immersion principale des fûts et d'étudier les interactions avec la biodiversité marine. La deuxième mission permettra de cibler la proximité immédiate des fûts.



Localisation des zones dans la plaine abyssale de l'Atlantique Nord-Est des zones d'immersion de fûts radioactifs (NEA#3 et #4) en eaux internationales (haut). La carte de détail (bas) montre la bathymétrie disponible, ainsi que la localisation des 6 fûts (croix rouges) identifiés par le sous-marin Epaulard lors des plongées en 1985. (Ces identifications ont été réalisées dans le cadre de la campagne EPICEA du CEA/IPSN et IFREMER). © Projet NODSSUM, 2025 <https://www.cnrs.fr/fr/presse/dechets-radioactifs-une-mission-scientifique-part-cartographier-les-futs-immerges-de>

Le démantèlement du réacteur de Brennilis : un retour d'expérience nécessaire

La centrale de Brennilis, officiellement désignée EL4-D, fut le seul réacteur industriel français à eau lourde refroidi au dioxyde de carbone. Implantée au cœur des monts d'Arrée, en Bretagne, elle a fonctionné de 1966 à 1985, utilisant une technologie alors prometteuse — le cycle gaz-eau lourde — aujourd'hui abandonnée.

Conçue à une époque d'expérimentations multiples dans le nucléaire civil, cette centrale a représenté un pari technologique vite dépassé par les choix industriels standardisés de la filière à eau pressurisée (REP). Son combustible, ses circuits et sa conception même ont rendu son démantèlement particulièrement complexe.

Ce démantèlement, engagé dès les années 1990, a été ralenti par des incertitudes techniques, des évolutions réglementaires, et plusieurs recours juridiques. Ce n'est qu'en 2023 que la troisième et dernière phase a pu débuter, avec un objectif de finalisation d'ici 2041.

À ce titre, Brennilis constitue aujourd'hui un site pilote pour les démantèlements nucléaires de demain. De nombreuses innovations y seront mises en œuvre : interventions télé-opérées, cartographies radiologiques fines, récupération de structures irradiées en toute sécurité.

Mais au-delà de son rôle d'expérimentation technique, Brennilis incarne aussi un devoir de mémoire. Il rappelle que l'histoire du nucléaire français fut marquée par des bifurcations, des erreurs et des apprentissages. La nouvelle génération de réacteurs — en particulier les SMR RNR de 4e génération — entend tirer les leçons du passé : standardisation, simplification, retraitement complet des déchets, sécurité passive et maîtrise des coûts sur tout le cycle de vie.

Brennilis pourra, une fois démantelé, être soit entièrement réhabilité et rendu à la nature, soit, à terme, accueillir un site de stockage de subsurface à très faible impact, si le besoin s'en fait sentir à l'échelle régionale¹⁰.

Les sites miniers d'uranium bretons : un héritage à assumer

Entre 1946 et 2001, plusieurs sites bretons ont été exploités pour leur uranium, d'abord par diverses entreprises minières, aujourd'hui regroupées sous l'égide d'AREVA (devenue Orano). Ces mines, à ciel ouvert ou souterraines, ont permis d'extraire le minerai nécessaire à la filière nucléaire française naissante.

Mais à côté du minerai exploité, une grande quantité de roches faiblement radioactives — dites « stériles » — a été laissée sur place, souvent entassée à proximité dans des versants. Ces stériles, dont la radioactivité reste significativement supérieure à celle du fond naturel, peuvent encore aujourd'hui poser des risques sanitaires et environnementaux.

¹⁰ <https://www.asn.fr/reglementation/consultations-du-public/demantelement-de-l-inb162-denomme-el4-d-centrale-de-brennilis> et <https://www.andra.fr/centrale-nucleaire-de-brennilis-derniere-etape-de-la-deconstruction>.

Les effets identifiés incluent :

- des émissions de poussières contenant des radionucléides ;
- un dégagement de gaz radon, reconnu cancérogène pulmonaire ;
- une contamination possible des eaux de ruissellement et des sédiments alentour.

Plus problématique encore : ces stériles ont été utilisés, en partie, pour des remblais, des chemins ruraux, des routes, voire des fondations de bâtiments. La traçabilité de ces usages reste aujourd'hui lacunaire.

Depuis 2009, un plan d'action national piloté par AREVA est en œuvre avec quatre priorités :

1. Contrôler et surveiller les anciens sites miniers ;
2. Évaluer l'impact environnemental et sanitaire des anciennes exploitations ;
3. Identifier les usages passés des stériles et limiter les risques résiduels ;
4. Renforcer l'information des populations et le dialogue avec les territoires concernés.

Ce travail, encore en cours, doit être approfondi et prolongé. Il représente un volet essentiel d'une démarche globale de réparation des erreurs du passé, à laquelle pourrait contribuer le programme SMR RNR 4G. En assumant pleinement cet héritage, la filière nucléaire se donne les moyens de restaurer la confiance¹¹.

Construire la confiance

L'acceptabilité d'un programme nucléaire ne repose pas uniquement sur ses performances techniques ou économiques. Elle suppose la construction d'une relation de confiance durable avec les citoyens, les collectivités locales et les acteurs du territoire. Il ne s'agit pas de convaincre à tout prix, mais de reconnaître la légitimité des interrogations : sur la sûreté, les déchets, la gouvernance, les risques industriels ou les impacts environnementaux indirects.

Un dialogue sincère doit être engagé, non pour répéter un discours technique, mais pour entendre les réticences, les peurs héritées du passé ou les oppositions fondées sur des valeurs. La transparence sur les incertitudes, les dispositifs de contrôle, la traçabilité des décisions, ainsi que la participation citoyenne aux choix d'implantation ou à la gouvernance territoriale du programme, sont des conditions essentielles de son appropriation.

Le programme tient compte de l'histoire de la Bretagne (opposition à Plogoff) mais s'appuie sur les activités nucléaires discrètes déjà présentes (Indret, SNLE, consommation importée).

Il préconise une approche décentralisée : chaque territoire bénéficie de retombées directes (production, emploi, chaleur, carburants) et repose sur l'importance d'une gouvernance régionale associée à l'autorité nationale (ASN, Parlement, ministères).

Une hostilité aux grands projets imposés par l'Etat

La Bretagne est réputée hostile au nucléaire, suite au combat emblématique de Plogoff (1976–1981) lié à une combinaison de facteurs culturels, politiques, écologiques, et de méfiance envers l'État central.

¹¹ IRSN : https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/connaissances/environnement/expertises-locales/sites-miniers-uranium/irsn_mines-uranium_extraction-uranium_2017.pdf

Le site du Carnet (près de Paimbœuf, sur l'estuaire de la Loire) était prévu dans les années 1970 pour accueillir soit une centrale thermique charbon, soit une centrale nucléaire. Finalement, le projet de centrale thermique au charbon a été arrêté grâce à une forte mobilisation environnementale et locale.

En 1975, l'État envisage une centrale nucléaire à Plogoff, dans le Finistère. L'opposition populaire massive s'organise, impliquant habitants, élus locaux, écologistes, prêtres, instituteurs... Le rejet est motivé par la peur des risques technologiques (amplifiée après l'accident de Three Mile Island en 1979), le sentiment d'imposition par Paris, sans consultation, le lien fort au territoire et au paysage, chez les populations côtières, un ancrage écologique et pacifiste émergent et une mobilisation exceptionnelle de la presse et des artistes bretons.

Dans les années 2020, un projet de zone industrielle « énergies renouvelables » sur le site du Carnet a également été contesté (paradoxalement), avec occupation du site par des écologistes radicaux. La motivations des opposants était la sauvegarde des zones humides naturelles, la méfiance envers les grands projets industriels, perçus comme imposés d'en haut et l'attachement à une vision décentralisée de l'aménagement du territoire.

Même radicalement différent dans son approche, un programme de RNR au format SMR suscitera une opposition avec des formes radicales et minoritaires qui cristalliseront le refus de la technologie associé au refus de l'entreprise privée. Il reste que l'acceptation ne suppose pas une unanimité de la population.

L'opposition au nucléaire n'est pas fondamentalement liée au régionalisme au sens strict, mais le régionalisme breton a parfois servi de catalyseur ou de vecteur d'expression de cette opposition, sans en être la cause première. Le mouvement a pris une dimension régionaliste dans la forme, mais l'opposition était surtout territoriale, démocratique et écologique. Le régionalisme breton n'est pas intrinsèquement anti-nucléaire : il défend généralement la décentralisation, la souveraineté culturelle, la langue, la maîtrise locale du territoire. Mais certains courants régionalistes ou autonomistes se sont historiquement opposés à l'État central sur des projets imposés (nucléaire, camps militaires, etc.). Dans ce contexte, le refus du nucléaire à Plogoff a surtout été un refus du jacobinisme d'aménagement du territoire. La conscience territoriale forte, la valeur du paysage, et la tradition d'auto-organisation locale en Bretagne nourrissent une sensibilité plus vive aux projets perçus comme extérieurs ou imposés. C'est davantage une question de gouvernance, de transparence et de participation qu'un rejet dogmatique du nucléaire.

Paradoxalement, la Bretagne est largement électronucléaire... Il n'y a pas de centrale nucléaire en Bretagne, mais l'Île Longue (Finistère) abrite la base des sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE), Indret (près de Nantes) produit des réacteurs pour la propulsion nucléaire navale, les sites de Lorient, Brest, Lann-Bihoué accueillent des activités militaires stratégiques (pyrotechnie, renseignement).

Et la Bretagne consomme largement l'électricité nucléaire produite en Normandie (Flamanville, Paluel...). Ces éléments sont peu connus ou peu débattus dans l'espace public régional. Le nucléaire est donc largement présent en Bretagne, mais sans visibilité civile, et intégré dans le tissu militaire et industriel, avec une acceptation de fait, mais pas nécessairement assumée ou revendiquée.

L'acceptabilité d'un programme de RNR au format SMR en Bretagne

Le succès d'un programme de RNR au format SMR dépendra moins de la nature nucléaire du projet que de la façon dont il est porté politiquement, localement, démocratiquement.

Le lien entre RNR (réacteurs à neutrons rapides) et SMR (Small Modular Reactors) est stratégique, notamment en Bretagne, où l'absence de centrales nucléaires classiques, la densité industrielle côtière et la demande en électricité décarbonée locale font émerger une fenêtre d'opportunité pour une approche territorialisée, modulaire et acceptable du nucléaire.

Les RNR et les SMR sont deux concepts compatibles. Les RNR sont historiquement des réacteurs de grande puissance (> 500 MWe), mais les avancées récentes permettent d'envisager des versions à petite ou moyenne échelle (100–300 MWe). Ces SMR à neutrons rapides (souvent refroidis au sodium, au plomb ou au gaz) sont : plus compacts, enterrables ou semi-enterrés, refroidis passivement, donc plus sûrs (même en cas d'accident grave), conçus pour être modulaires, produits en usine et installés rapidement sur site.

La Bretagne est-elle un terrain favorable à des SMR RNR ?

Il y a d'abord des arguments techniques : réduction des déchets (RNR) et sécurisation passive (SMR), installation en zone industrielle, loin des zones naturelles sensibles, adaptabilité à la consommation locale : production ajustable, sans besoin de ligne THT.

Il y a ensuite des arguments politiques : moins visible, moins invasif qu'une centrale classique, projet porté en co-maîtrise locale (région, État, opérateurs), possibilité d'emploi qualifié localement, reconversion des compétences (pyrotechnie, naval), investissement dans une excellence technologique de haut niveau et rôle pionnier dans le monde développé.

Et enfin des arguments culturels : non rupture avec l'identité territoriale, si inscrit dans une logique de résilience énergétique bretonne, un récit technologique renouvelé : du nucléaire lourd d'État au nucléaire intelligent localisé.

Les conditions de la réussite seront spécifiques à la Bretagne : une communication transparente, non technocratique, en français, en anglais et en breton si pertinent. Une concertation ouverte dès les premières études, avec les élus, les collectivités, les industriels et les associations. Un projet de démonstrateur territorial, avec évaluation environnementale, industrielle, éducative. Un couplage au développement de filières locales décarbonées : production d'hydrogène, électrification des ports, agriculture bas carbone.

La démarche peut donc tout à fait s'inscrire dans une logique de souveraineté énergétique régionale, de modernité technologique et de démocratie territoriale, à condition d'être clairement différenciée du nucléaire du passé, tant dans ses formes que dans sa gouvernance.

Facteur	Explication
Pas de centrale nucléaire existante	Moins de rejet « historique » lié à une implantation lourde
Consommation électrique élevée, mais importée	Forte dépendance à la Normandie, faibles capacités de production locale
Tissu industriel dense et réparti	Lorient, Brest, Saint-Nazaire, Rennes, Quimper... Des zones industrielles cibles pour des SMR
Port industriel et militaire	Liens logistiques et technologiques avec la propulsion navale nucléaire
Besoin de chaleur industrielle	Intérêt des SMR pour cogénération ou hydrogène bas carbone
Culture d'innovation	Acceptabilité potentielle dans une logique d'expérimentation

La référence suisse

La Suisse est un cas très intéressant, parce qu'elle intègre directement la population dans ses décisions énergétiques, par voie de votation populaire — y compris sur le nucléaire, à plusieurs reprises. Et en effet, les résultats ont souvent été plus nuancés que prévu, et parfois favorables au maintien du nucléaire, ce qui montre que la démocratie directe, bien encadrée, ne condamne pas nécessairement le nucléaire, même dans un pays très écologiste.

Le nucléaire en Suisse : historique rapide

La Suisse a développé un petit parc nucléaire civil à partir des années 1960–1980 : 5 réacteurs, fournissant environ 30–35 % de l'électricité nationale. Traditionnellement, la Suisse est très attachée : à son système démocratique participatif, à la protection de l'environnement, mais aussi à son indépendance énergétique.

La Suisse a mis en place des votations nucléaires dont les principales sont :

Date	Sujet	Résultat	Commentaire
1979	Interdiction de construire de nouvelles centrales nucléaires	✗ Refusée (majorité contre)	Volonté de conserver l'option nucléaire.
1984	Initiative pour sortir du nucléaire	✗ Refusée (majorité contre)	Confiance dans la sûreté des centrales.
1990	Moratoire de 10 ans sur la construction de nouvelles centrales	☑ Acceptée	Sous l'effet de Tchernobyl (1986).
2003	Sortie du nucléaire / Nouvelle initiative écologiste	✗ Refusée (majorité contre)	Maintien du parc existant.
2017	Loi sur la stratégie énergétique 2050 (arrêt progressif du nucléaire sans construction de nouveaux réacteurs)	☑ Acceptée	Volonté de sortir à terme, mais sans arrêt brutal.

Pourquoi ces résultats ?

- La confiance dans la qualité des installations existantes a longtemps prévalu.
- L'indépendance énergétique est un argument majeur dans un pays enclavé.
- Le réalisme énergétique : les Suisses comprennent très bien l'équilibre entre production, coût et environnement.
- Les initiatives anti-nucléaires radicales ont souvent échoué quand elles semblaient mettre en danger l'approvisionnement ou forcer une sortie rapide.

Message clé pour la France (et la Bretagne) : un projet nucléaire peut être accepté démocratiquement si :

- il est clairement présenté,
- il répond à un besoin énergétique local ou national identifié,
- il rassure sur la sûreté,
- et il respecte l'autonomie et la concertation des citoyens.

Fondement démocratique pour un projet SMR RNR en France/Bretagne

En s'inspirant de la Suisse, on peut envisager :

- Un référendum local ou régional consultatif autour du principe d'accueil d'un site expérimental SMR.
- Des assemblées citoyennes en amont du projet pour co-construire la concertation et la surveillance.
- Un engagement clair de transparence sur la sûreté, la gestion des déchets et la sécurité.
- Une garantie de réversibilité ou d'évaluation régulière (comme en Suisse pour l'énergie 2050).

Cela donnerait un fondement démocratique solide à un projet industriel sensible, et difficilement contestable politiquement. En résumé :

Question	Réponse synthétique
La démocratie directe est-elle compatible avec le nucléaire ?	<input checked="" type="checkbox"/> Oui, l'exemple suisse le montre.
Les votations suisses ont-elles favorisé le nucléaire ?	<input checked="" type="checkbox"/> Majoritairement jusqu'à 2017, avec une sortie progressive prévue ensuite.
Peut-on s'en inspirer pour un projet SMR en Bretagne ?	<input checked="" type="checkbox"/> Oui, via référendum consultatif régional, assemblées citoyennes, et engagements forts de sûreté et de transparence.

L'acceptabilité d'un projet nucléaire suppose une légitimité démocratique.

Glossaire

SMR	: Small Modular Reactor (réacteur modulaire de petite taille)
RNR	: Réacteur à Neutrons Rapides
4G	: Quatrième génération de réacteurs nucléaires
CI-CGR Résidus	: Centre Industriel de Conditionnement et de Gestion du Combustible et des Résidus
DAC	: Direct Air Capture (captage direct du CO2 dans l'air)
DOC	: Direct Ocean Capture (captage du CO2 dissous dans les océans)
LCOE	: Levelized Cost of Electricity (coût actualisé de l'électricité produite)
MOX appauvri)	: Mixed Oxide fuel (combustible mélangé à base de plutonium et d'uranium appauvri)
ASN	: Autorité de Sûreté Nucléaire (France)
SNLE	: Sous-marin Nucléaire Lanceur d'Engins

Bibliographie

Barre Bertrand, *Pourquoi Le Nucléaire*, De Boeck Supérieur, 2017

Chatelier Michel, Criqui Patrick, Heuer Daniel, Huet Sylvestre, *Nucléaire, quels scénarios pour le futur ?* La Ville brûle, 2011, [Montreuil]

De Ravignan Antoine, *Nucléaire, stop ou encore ?* Les Petits Matins, 2022

Kerboul Claire, *L'urgence du nucléaire durable*, De Boeck Supérieur, 2023, (<https://nucleairedurable.fr/>).

Sezin Topçu, *La France nucléaire : l'art de gouverner une technologie contestée*, Seuil, 2013

Tripathi Myrto, *La bataille pour le climat - Avant tout, une victoire sur nous-mêmes*, Genèse, 2020

Faucheux Jacques, *Le laboratoire*, 2013, Coop Breizh.

Sommaire long

Synthèse	2
1. Objectif général.....	2
2. Contexte énergétique régional.....	2
3. Proposition technique et économique	3
4. Emploi et retombées économiques.....	3
5. Acceptabilité et territorialisation.....	3
6. Dimension stratégique et internationale.....	4
7. Conclusion	4
Sommaire	5
Présentation	5
La consommation	7
Le réacteur.....	9
Le réacteur à neutrons rapides de quatrième génération (RNR 4G)	9
Les SMR	11
Les SMR RNR 4G	13
Les développements en cours	14
Acteurs industriels et startups engagés sur les SMR RNR 4G	14
Hexana (France)	16
Stellarium (France).....	16
Newcleo (franco-italien et UK ?)	17
Naarea (France)	17
Le fluide caloporteur.....	18
Le sodium (Na).....	18
Le plomb ou Plomb-Bismuth (Pb / Pb-Bi)	18
Les gaz (CO2 ou helium).....	18
Les sels fondus (fluorures, chlorures).....	19
La maturité.....	20
Phénix (1973-2009) - Réacteur RNR sodium expérimental.....	20

Superphenix (1986-1997) - Prototype industriel de 1 200 MWe	20
ASTRID.....	20
Le cycle du combustible.....	21
Le cycle du combustible classique.....	22
Le principaux cycles.....	24
MAOX : le combustible pour RNR et transmutation	24
La maturité des procédés	25
Les déchets ultimes.....	26
L'intensité et la durée de vie des déchets	26
Le stockage géologique profond.....	27
Un centre intégré de fabrication et de retraitement du combustible et d'enfouissement des déchets (CFRE).....	28
L'extraction de l'uranium océanique	30
Les matières dissoutes dans l'eau de mer	33
Le parc nucléaire	35
L'architecture du parc	36
La production	36
Le combustible.....	36
Le réseau électrique	37
Le réseau existant : un atout partiel.....	37
De nouveaux raccordements.....	38
Echange d'électricité ou logique d'autoconsommation ?	38
L'électro-raffinerie.....	39
Le dimensionnement.....	39
Grosse usine unique ou petites unités modulaires ?	39
Localisation intérieure ou côtière ?.....	39
La capture de carbone	40
Synthèse du schéma d'organisation.....	40
La sûreté et la sécurité.....	40
Les accidents de référence	41
La sûreté intrinsèque des RNR SMR	42
La sûreté passive	42
L'enterrement du réacteur.....	44
La dispersion des sites.....	45
Le site du réacteur	45
Les transports nucléaires.....	46
Le transport de matières nucléaires.....	46
Le transport ferroviaire.....	47
Un réseau ferroviaire enterré	48
La réglementation.....	49
L'État actuel de la réglementation nucléaire pour les RNR/SMR en France.....	49
Les perspectives de modernisation réglementaire.....	49
L'application expérimentale dans des sites pilotes	50
Le rôle de l'AIEA	50
Le rôle concret de l'AIEA sur les SMR (et RNR SMR)	51
Et sur les RNR spécifiquement ?	51
L'économie.....	52
Le financement.....	52
Le coût du programme.....	52

Le LCOE	53
Du LCOE au prix de l'électricité « hors taxe »	53
L'emploi.....	55
Les retombées économiques	56
Un nouvel essor économique	57
Les data center	57
Les fermes verticales	57
L'aquaponie.....	58
La sidérurgie.....	59
Le recyclage urbain	60
Le recyclage des produits et matériaux électroniques	61
Perspectives	62
L'organisation institutionnelle	63
Le dérèglement climatique	65
Un besoin croissant d'énergie décarbonée pour l'atténuation climatique.....	65
Une stratégie de la transition climatique fondée sur la durabilité	66
La synergie nucléaire.....	67
La fusion nucléaire.....	67
La santé	69
Les maladies professionnelles	69
Les risques accidentels	69
La médecine nucléaire.....	69
Le militaire.....	71
L'acceptabilité.....	72
Réparer les erreurs du passé.....	72
Les fûts immergés.....	72
Le démantèlement du réacteur de Brennilis : un retour d'expérience nécessaire.....	74
Les sites miniers d'uranium bretons : un héritage à assumer	74
Construire la confiance	75
Une hostilité aux grands projets imposés par l'Etat.....	75
L'acceptabilité d'un programme de RNR au format SMR en Bretagne	77
La référence suisse	78
Le nucléaire en Suisse : historique rapide	78
Fondement démocratique pour un projet SMR RNR en France/Bretagne	79
Glossaire.....	79
Bibliographie.....	80
Sommaire long	80