



Quand souveraineté rime avec durabilité

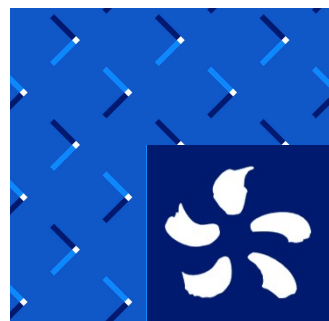
Relever les défis du cycle du combustible nucléaire de demain

Conférence SFEN Alpes
Grenoble, 3 février 2026

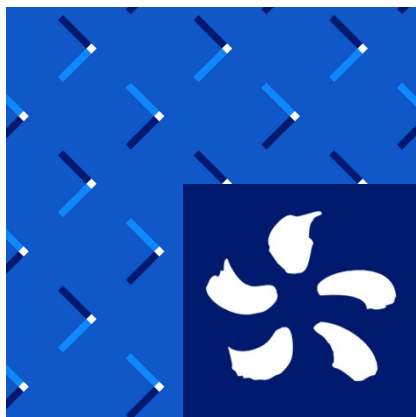


Guillaume Vaast, Frédéric Laugier (EDF)

Sommaire



- | | | | |
|----------|--|----------|---|
| 1 | Contexte | 5 | Le multirecyclage en RNR |
| 2 | Rappels sur les stratégies du cycle | 6 | Vers la fermeture du cycle |
| 3 | Le cycle actuel | 7 | Les développements dans le monde |
| 4 | Le multirecyclage en REP | 8 | Conclusion |



1. ■ Contexte

Communiqué de presse du CPN du 17 mars 2025



SERVICE DE PRESSE

Palais de l'Élysée, le lundi 17 mars 2025

COMMUNIQUÉ

Le Conseil de politique nucléaire a confirmé les orientations permettant d'atteindre la fermeture du cycle du combustible nucléaire dans la deuxième moitié du siècle et relancé un programme de travail en ce sens. Des développements technologiques importants sont nécessaires pour fabriquer les combustibles à partir de plutonium et d'uranium appauvri, la maîtrise des réacteurs à neutrons rapides ainsi que le retraitement des combustibles. Le Conseil de politique nucléaire demande que les industriels (EDF, Framatome, Orano), le CEA et l'ensemble des acteurs mobilisés sur les neutrons rapides, remettent à l'État un programme de travail et une proposition d'organisation industrielle pour la fin de l'année 2025, qui sera examiné lors d'un prochain CPN.

Communiqué de presse du CPN du 17 mars 2025



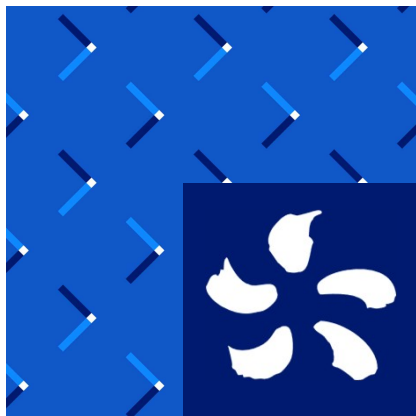
SERVICE DE PRESSE

Palais de l'Élysée, le lundi 17 mars 2025

COMMUNIQUÉ

Le Conseil de politique nucléaire a confirmé les orientations permettant d'atteindre la fermeture du cycle du combustible nucléaire dans la deuxième moitié du siècle et relancé un programme de travail en ce sens. Des développements technologiques importants sont nécessaires pour fabriquer les combustibles à partir de plutonium et d'uranium appauvri, la maîtrise des réacteurs à neutrons rapides ainsi que le retraitement des combustibles. Le Conseil de politique nucléaire demande que les industriels (EDF, Framatome, Orano), le CEA et l'ensemble des acteurs mobilisés sur les neutrons rapides, remettent à l'État un programme de travail et une proposition d'organisation industrielle pour la fin de l'année 2025, qui sera examiné lors d'un prochain CPN.





2. Rappels sur les stratégies du cycle

Le cycle ouvert

Pas de recyclage

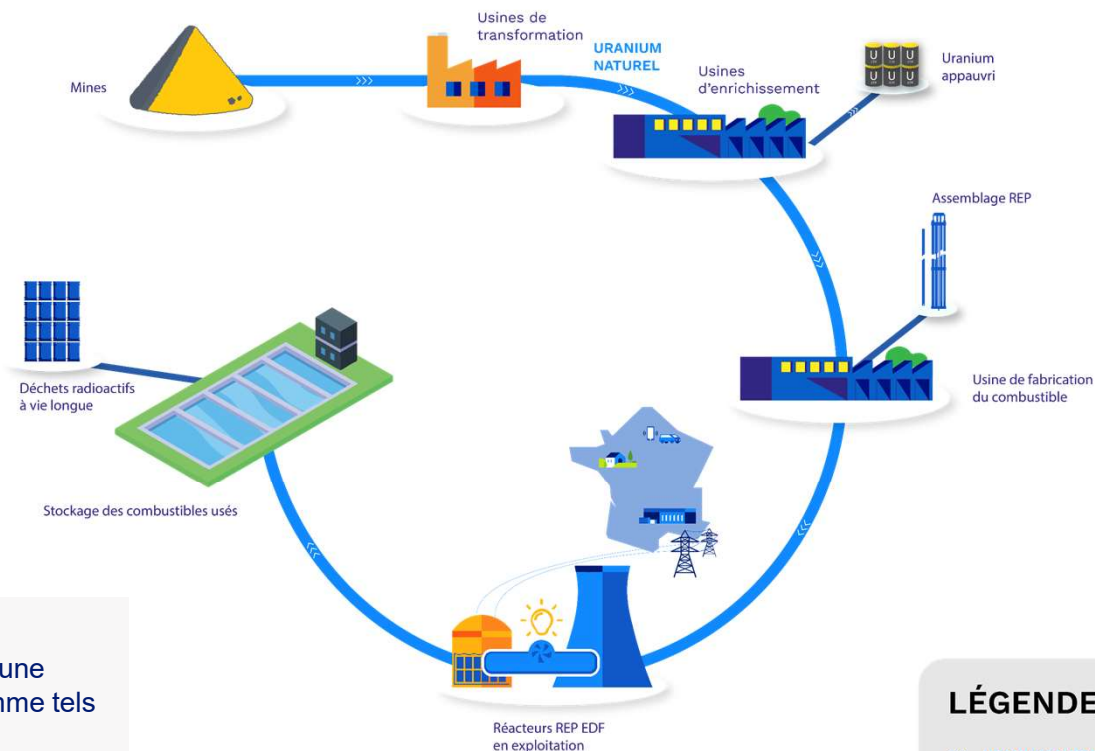
Les combustibles usés sont considérés comme des déchets (pas de réutilisation prévue des matières fissiles contenues).

⇒ Les combustibles usés sont entreposés (sous eau ou à sec) puis conditionnés en vue d'être mis au stockage géologique directement.

Article L542-1-1 du code de l'environnement

Les déchets radioactifs sont des substances radioactives pour lesquelles aucune utilisation ultérieure n'est prévue ou envisagée ou qui ont été requalifiées comme tels par l'autorité administrative en application de l'article L. 542-13-2.

Les déchets radioactifs ultimes sont des déchets radioactifs qui ne peuvent plus être traités dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de leur part valorisable ou par réduction de leur caractère polluant ou dangereux.



LÉGENDE

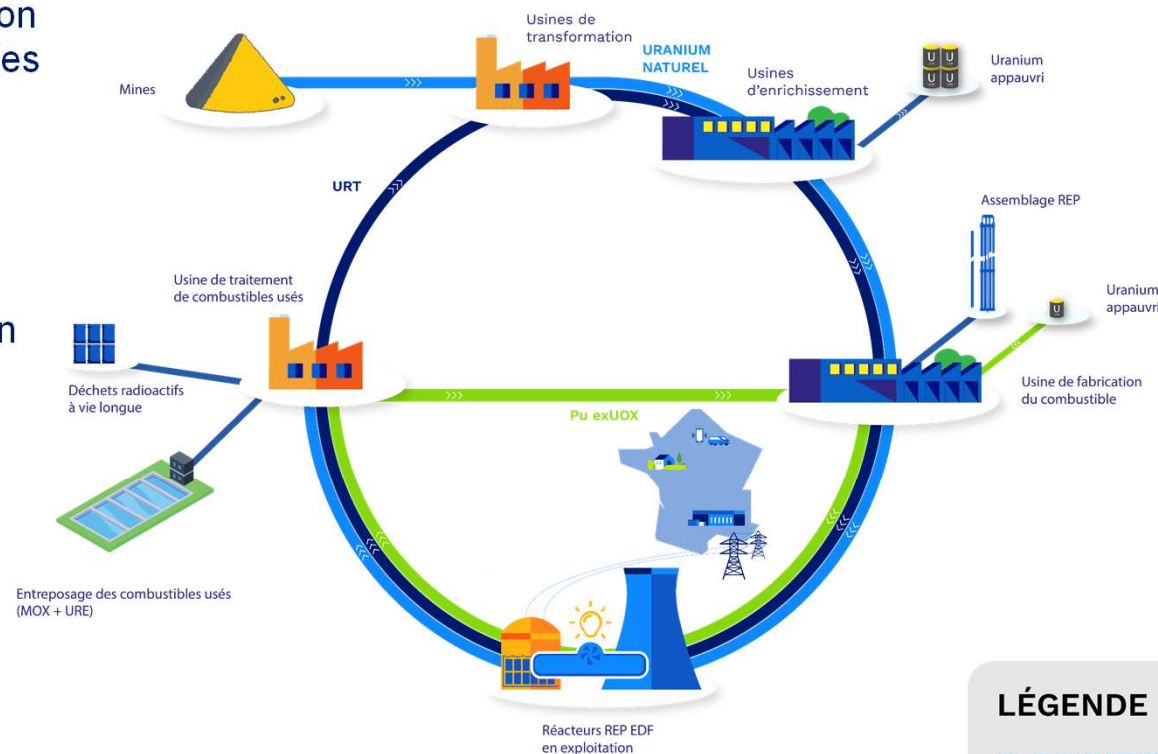
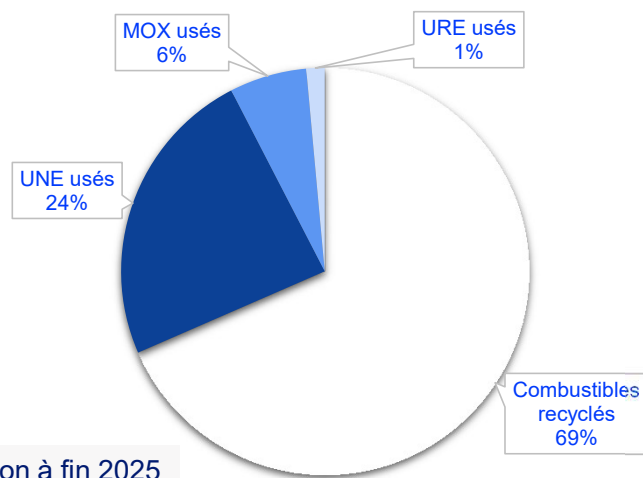
- >>> URANIUM NATUREL
- >>> URT
- >>> Plutonium exUOX
- >>> Plutonium exMOX

Le cycle actuel en France : le mono-recyclage

Recyclage des combustibles usés UNE et réutilisation des matières Pu et URT pour fabriquer des combustibles MOX et URE

Les combustibles usés MOX et URE sont entreposés sous eau dans l'attente de la prochaine étape.

Possibilité d'économiser jusqu'à 20% les ressources en uranium naturel.



LÉGENDE

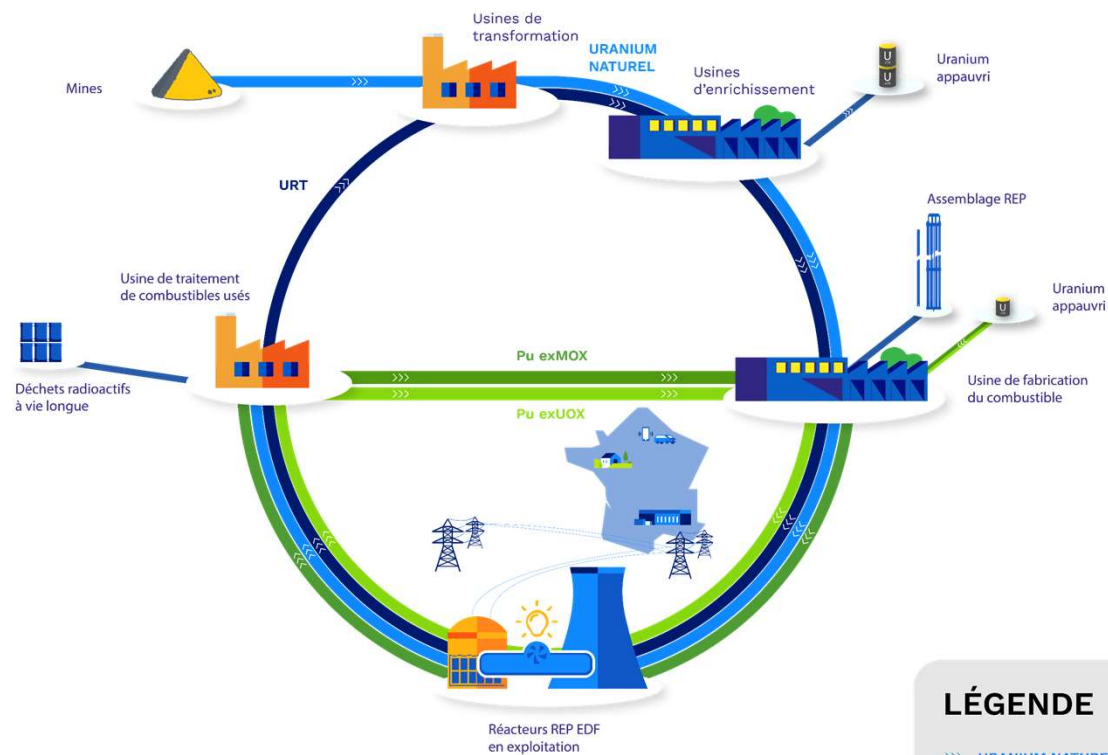
- >>> URANIUM NATUREL
- >>> URT
- >>> Plutonium exUOX
- >>> Plutonium exMOX

Le multi-recyclage en REP

Recyclage de tous les combustibles usés : UNE, MOX et URE et réutilisation des matières pour fabriquer des combustibles MOX/MOX-MR et URE, utilisés en REP

Stabilisation possible des inventaires de combustibles usés et du plutonium

Possibilité d'économiser jusqu'à 40% les ressources en uranium naturel.



La transition vers la fermeture du cycle

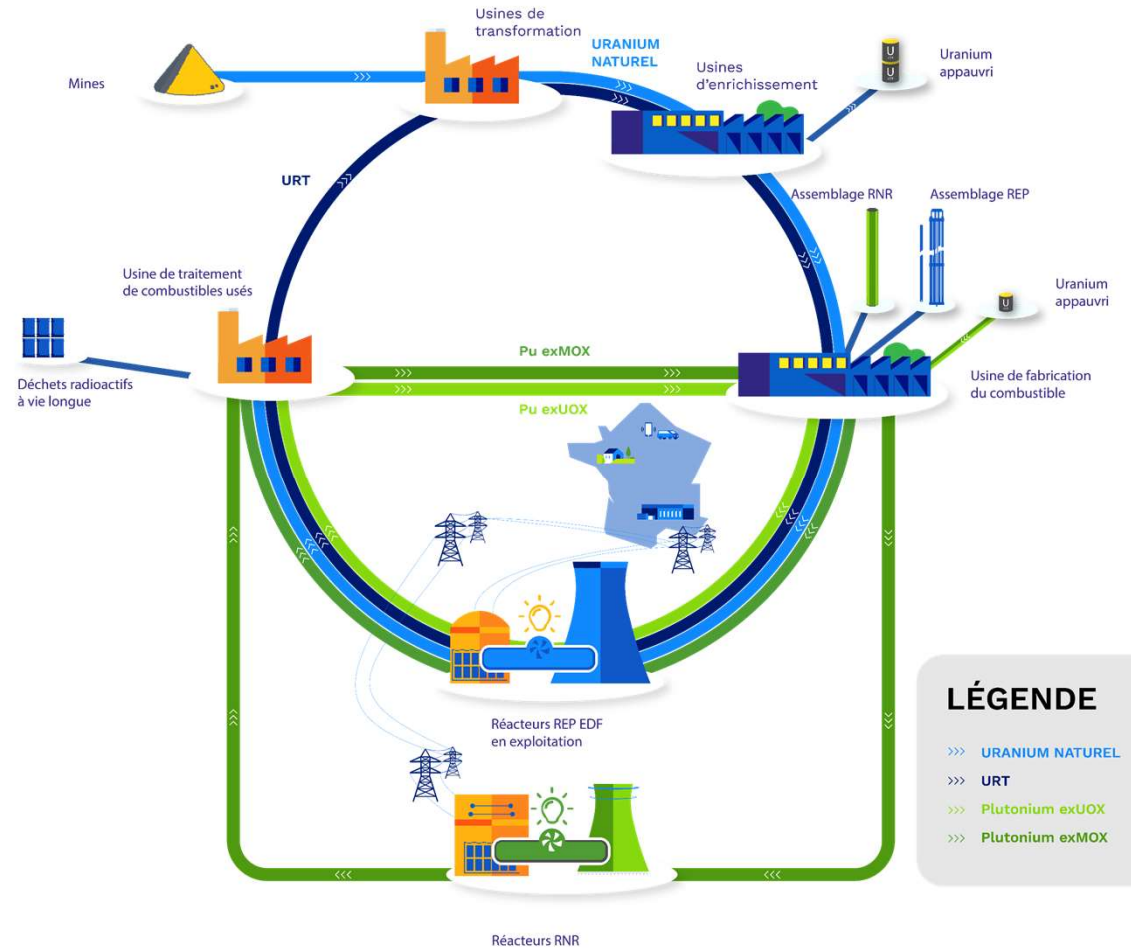
Recyclage de tous les combustibles usés UNE, MOX et URE et réutilisation des matières pour fabriquer des combustibles MOX-MR et URE en REP + MOX en RNR

Stabilisation possible des inventaires de combustibles usés et du plutonium

Possibilité d'économiser au-delà de 40% les ressources en uranium naturel



Réacteur SuperPhenix (Creys-Malville)



La fermeture du cycle

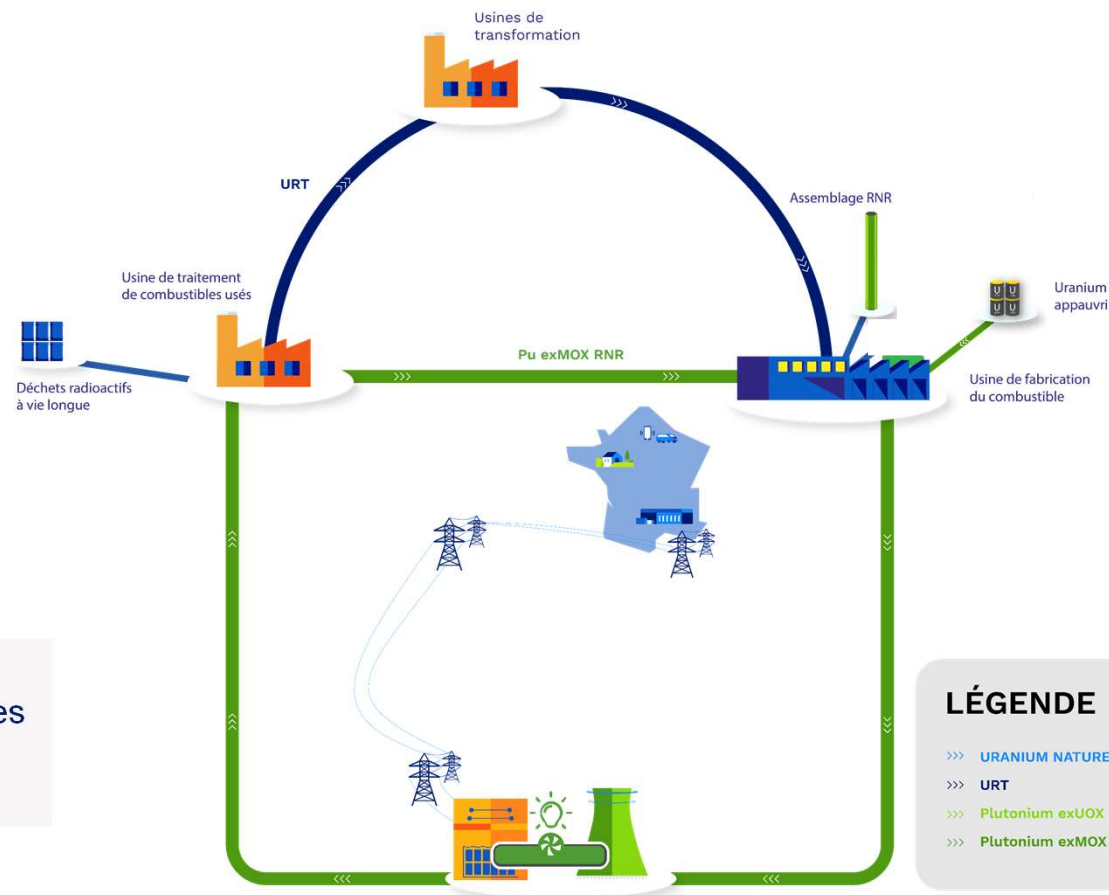
Recyclage de tous les combustibles usés en RNR

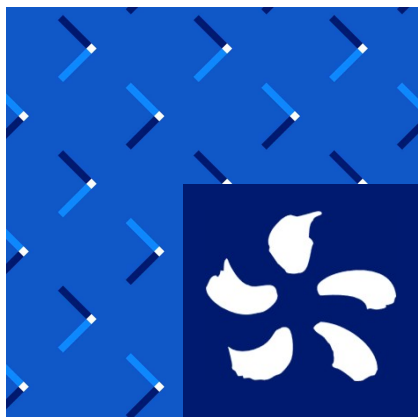
Stabilisation des inventaires de combustibles usés et du plutonium

Possibilité d'économiser jusqu'à 100% les ressources en uranium naturel. L'uranium appauvri devient le combustible du nucléaire.



Fermeture du cycle : recyclage des combustibles usés permettant la complète valorisation des matières nucléaires et ne nécessitant aucun nouvel apport d'uranium naturel pour produire de l'électricité





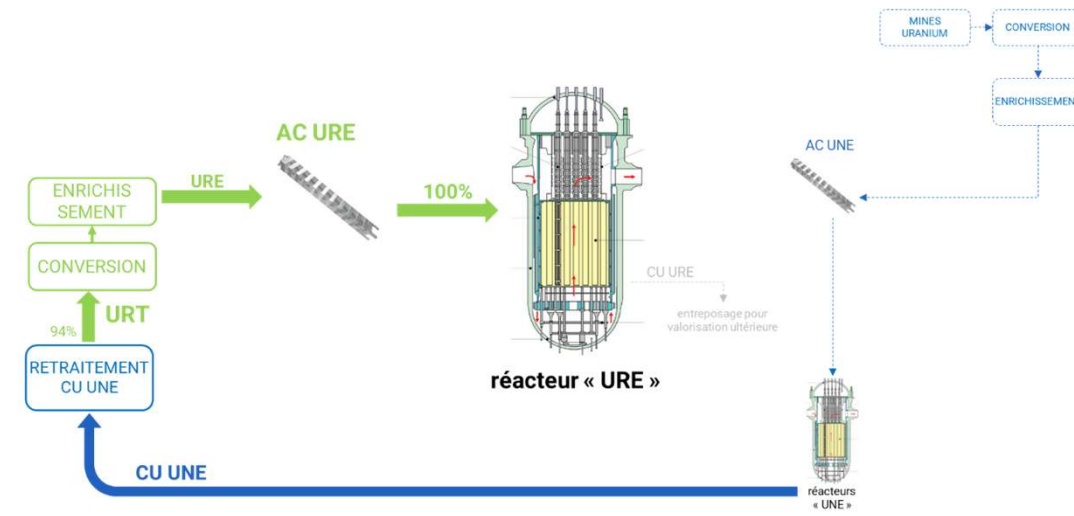
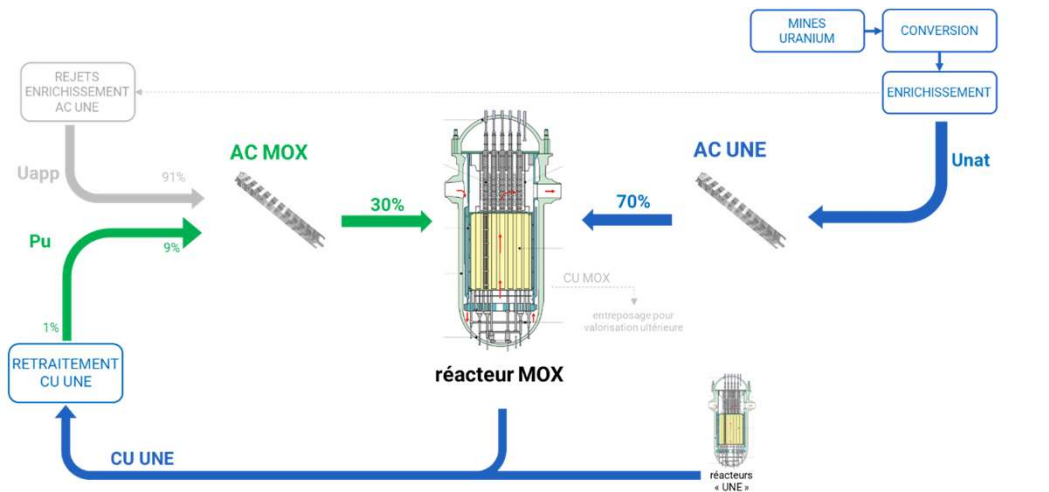
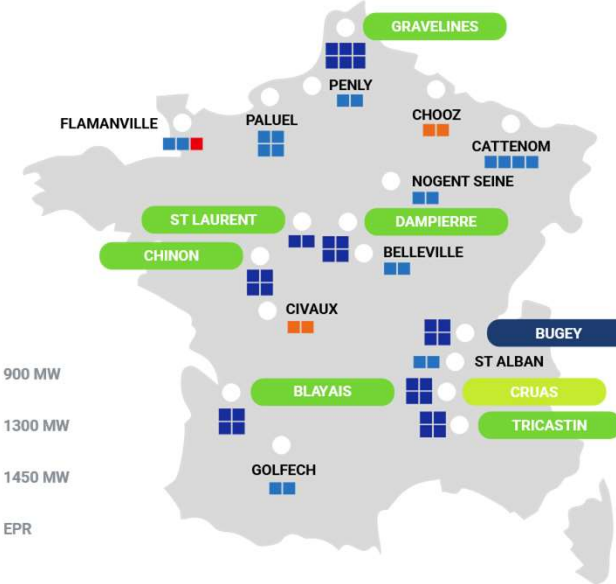
3. ■ Le cycle actuel

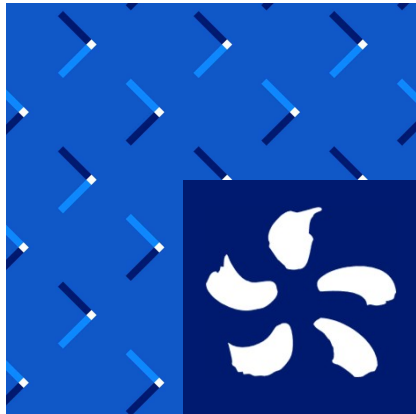
Le mono-recyclage dans le parc existant...

...permet déjà d'atteindre une économie en uranium naturel pouvant atteindre jusqu'à 25% (vs. cycle ouvert) !

La production annuelle de 360 TWh par le parc actuel consomme :

- de l'ordre de 100 à 120 t/an d'assemblages MOX
- de l'ordre de 80 t/an d'assemblages URE aujourd'hui (et potentiellement jusqu'à 180 t/an avec « l'urtage » du palier 1300 MWe)
- de l'ordre de 740 à 860 t/an d'assemblages UNE

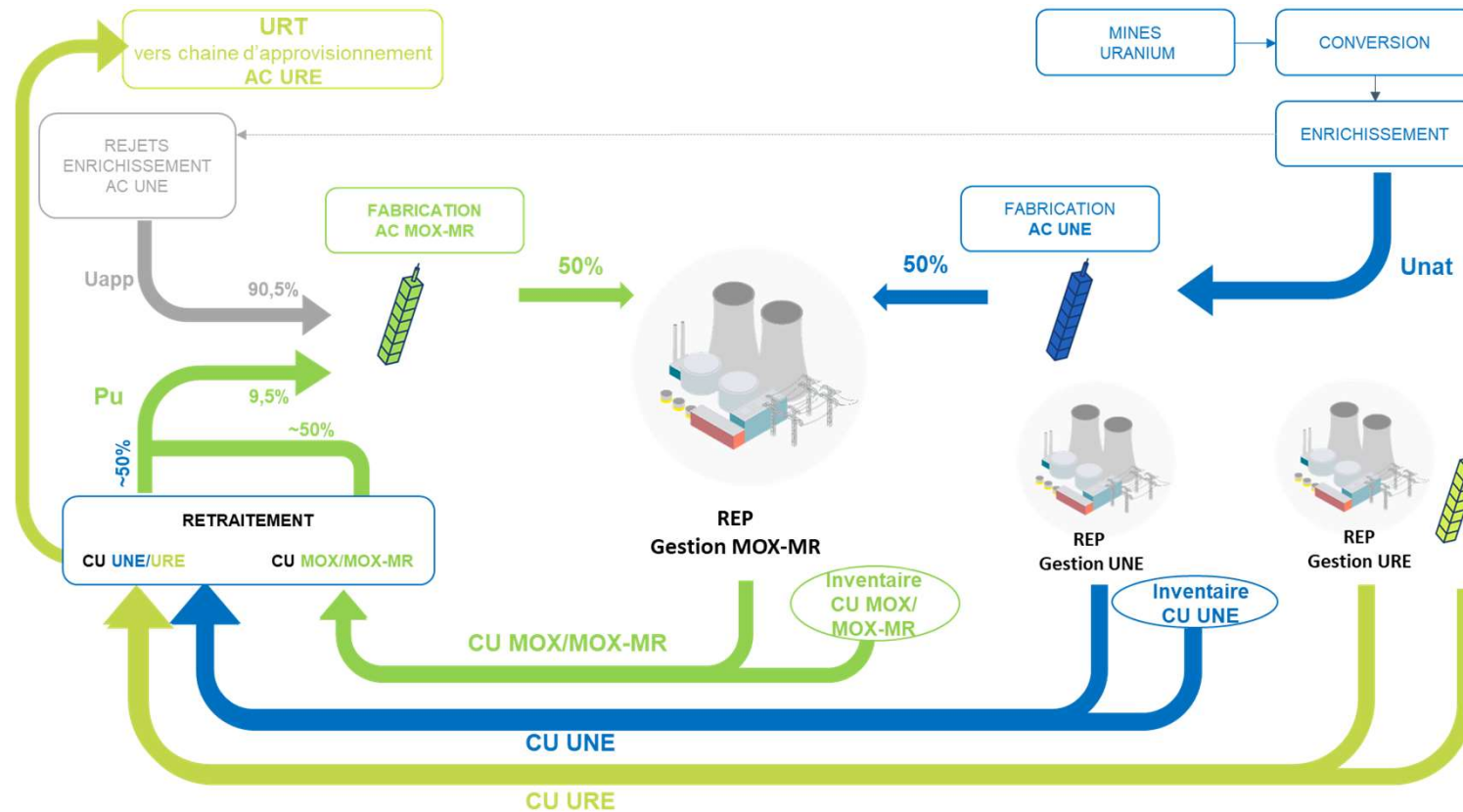




4. Le multirecyclage en REP

Une deuxième étape de recyclage dans le parc EPR2...

... permettant d'atteindre une économie de ressource en uranium naturel pouvant aller jusqu'à 40%



Un combustible de référence dérivé du MOX : le MOX-MR

Solution retenue pour permettre la mise en œuvre vers 2040-2050 du multirecyclage du Pu issu du traitement de MOX/MOX-MR + UNE/URE usés ⇒ combustible **MOX-MR en gestion partielle** (50% MOX-MR | 50% UNE)

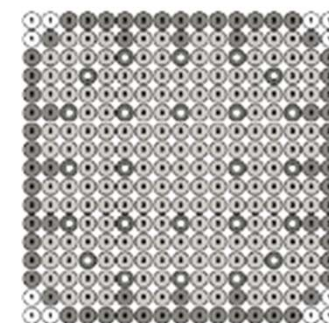
Les principaux éléments dimensionnants :

- Le produit MOX-MR **bénéficie du REX déjà acquis** sur la conception et l'exploitation du combustible MOX
- Le format de la recharge et le plan de chargement proposés présentent des **performances en matière de sûreté et d'exploitation et manœuvrabilité équivalentes** aux gestions 30% MOX (la gestion 50% MOX-MR | 50% UNE nécessite seulement des grappes d'arrêt enrichies en Bore 10)
- Le concept de référence MOX-MR **ne nécessite pas de faire évoluer la microstructure de la pastille** (même comportement thermomécanique et physico-chimique que le MOX standard): reconduite du procédé de fabrication MOX actuel (MIMAS VH)

Concept MOX-MR : Produit dérivé du MOX standard

- Tri-teneur en Pu de l'AC MOX EPR2
- Crayons MOX à support appauvri (0,25% ⁵U)
- Vecteur Pu qualité fissile Qf ~55% à ~52,5% (vs ~63% pour le MOX actuel): moins réactif que le MOX actuel (la plus faible Qf est compensée par l'évolution de la taille de recharge)

➔ Produit combustible restant dans la continuité du produit actuel



Concept **MOX-MR**

Une mise en œuvre qui ne nécessite pas d'évolutions technologiques majeures

Traitement des combustibles UOX, MOX et MOX-MR

Enjeu = **traitement plus capacitif de combustibles MOX**

Fonctions impactées:

- **Dissolution:** Cinétique de dissolution et solubilité Pu des MOX en acide nitrique vs. celles des UOX
Leviers: **Valorisation des marges opérationnelles** pour le traitement des MOX (gestion criticité, évolution possible vers un **Dissolveur roue plus capacitif**)
- **Cycles d'extraction :** Teneur Pu des MOX usés (~6%) vs. UOX usés (1%)
Leviers: **Adaptation du procédé PUREX** en cours d'étude, ou **changement de molécule extractante (procédé PUMAS)** si gains escomptés et maturité suffisants pour industrialisation
- **Vitrification :** ↗ Teneur en Am des MOX usés → mise en œuvre de la spécification CSD-V à borne α augmentée

Les autres fonctions (cisailage, Conversion U, Concentration des produits de fission, Gestion des effluents, ..) **ne sont peu ou pas impactées**



Fabrication des combustibles MOX-MR

Reconduction du procédé de fabrication actuel

Spécificités et enjeux pour permettre la fabrication des combustibles MOX-MR

- **Evolutions sur les additifs utilisés** (moins sensibles aux effets de thermique et de radiolyse)
- **Optimisation des boîtes à gants** pour réduire la dosimétrie opérateur
- **Optimisation de la stratégie de gestion des rebuts**

Procédé robuste pour la fabrication des produits MOX et MOX-MR



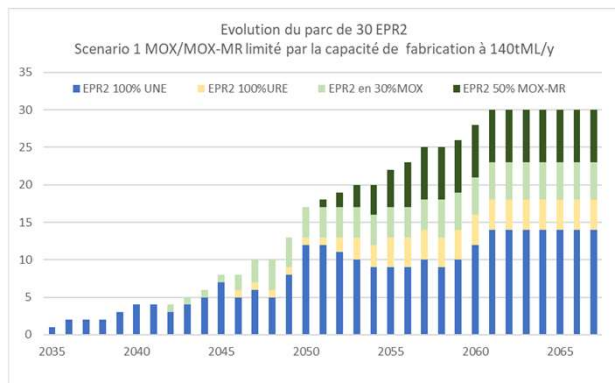
Simulations de scénarios de déploiement industriel

Scénario 1 considérant le schéma industriel de base

limité par une capacité de fabrication de MOX/MOX-MR de 140tML/an

Critères d'optimisation = maîtriser des inventaires de combustibles usés en cohérence avec les futures capacités d'entreposage sous-eau à La Hague tout en maximisant le gain sur la ressource Unat

Solution simulée: déployer un mixte de 5 gestions 30% MOX, 7 gestions 50% MOX-MR et 4 gestions 100% URE

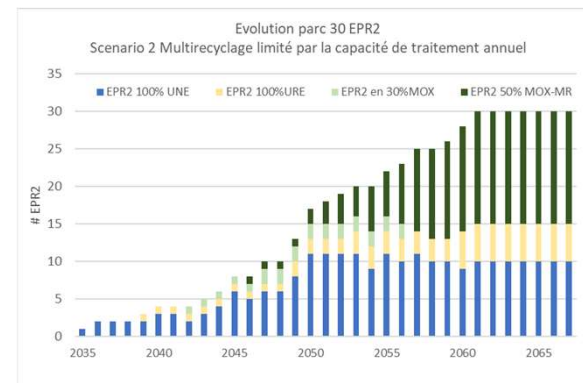


Scénario 2 considérant l'extension de capacité de fabrication MOX REL

limité par la capacité annuelle de traitement

Critères d'optimisation : maximiser le gain sur la ressource Unat tout en maîtrisant les inventaires de CUs

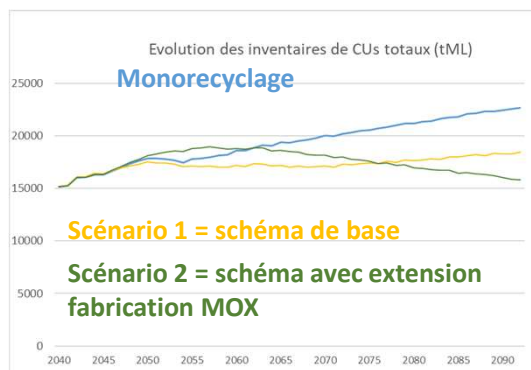
Solution simulée: déployer 15 gestions 50% MOX-MR et 5 gestions 100% URE



Le scénario de monorecyclage met en œuvre 9 gestions 30% MOX et 3 gestions 100% URE

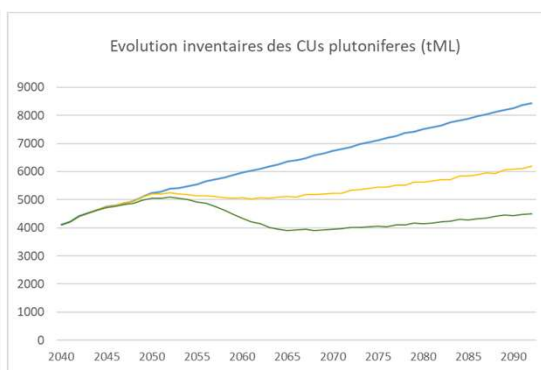
Critères de performance du MRREP vs. Monorecyclage

Evolution inventaires de CUs totaux



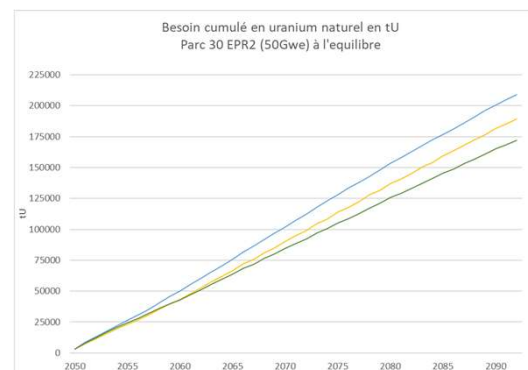
Décroissance des CUs totaux entreposés

Evolution inventaires de CUs plutonifères



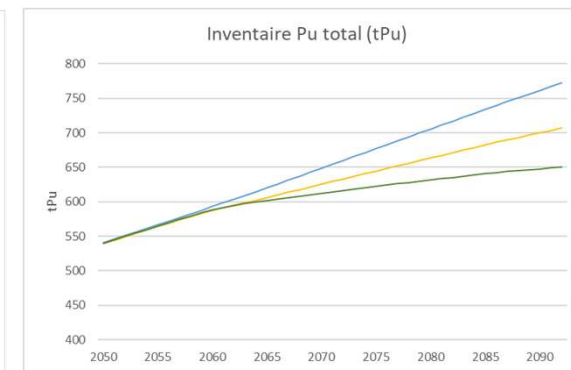
Maîtrise des CUs plutonifères
Résorption des CUs MOX

Gain ressource Unat



Gain sur la ressource Unat jusqu'à ~-37ktU en 2090

Inventaire total Pu








Pilotage de l'inventaire de Pu*

Bénéfices / mono-recyclage

- Le Pu présent dans les inventaires de CU reste valorisable en RNR, quelle que soit l'option mise en œuvre dans le parc EPR2 précédant le déploiement de RNR.
- La **réversibilité** des gestions MOX-MR vers des gestions UOx dans la phase transitoire permet également une **flexibilité** dans les flux et inventaires de Pu et CUs pour s'adapter au déploiement des RNR.

Les acquis de la transition passant par le MRREP

Objectifs de déploiement du multi-recyclage dans le parc EPR2	Résultats
 <p>1 – Mitiger le risque pouvant peser sur les ressources Unat en disposant d’une solution industrielle et opérante</p>	<p>✓ Jusqu’à 40% de gain / cycle ouvert si déploiement maximal Gain plus limité avec le déploiement d’intensité plus faible dans les EPR2</p>
 <p>2 – Mettre en œuvre la valorisation des matières issues des MOX et URE usés dans un objectif de renforcement de la circularité</p>	<p>✓ Valorisation possible des combustibles MOX, MOX-MR et URE en dilution avec les combustibles UNE sur le parc EPR2</p>
 <p>3 - Piloter les inventaires de combustibles dont MOX/MOX2 usés afin d’optimiser les capacités d’entreposage du site de La Hague</p>	<p>✓ Selon l’intensité MRREP, pilotage des inventaires totaux possible et stabilisation des inventaires plutonifères</p>
 <p>4 - Piloter l’inventaire de Pu en amont du développement d’un futur parc RNR</p>	<p>✓ Tous les scénarios de déploiement MRREP étudiés permettent de disposer du Pu nécessaire au démarrage d’un futur parc RNR.</p>
 <p>5 – Progresser vers la fermeture complète du cycle en développant industriellement les technologies permettant un flux accru de Pu</p>	<p>✓ Flux de Pu doublé ou triplé dans le cycle par rapport au monorecyclage selon l’intensité de déploiement de MRREP. Traitement industriel des MOX</p>

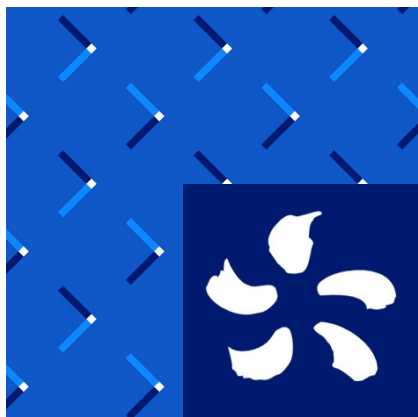
Les acquis de la transition passant par le MRREP

1. Une solution **flexible** et **réversible** qui apparait déployable industriellement à l'horizon 2050 :

- Respectant les principaux critères dimensionnants vis-à-vis de la sûreté
- Compatible avec les critères et objectifs de performance EPR2 (y compris critères accrus de manœuvrabilité)
- Sans modification significative de la conception systèmes EPR2
- Compatible avec le schéma directeur de renouvellement des usines du Programme AdF intégrant à la conception les aspects sûreté radioprotection liés :
 - au traitement des MOX usés,
 - à l'augmentation du flux de Pu et évolution de la qualité isotopique du Pu,
 - à l'augmentation du flux d'AC MOX+MOX-MR

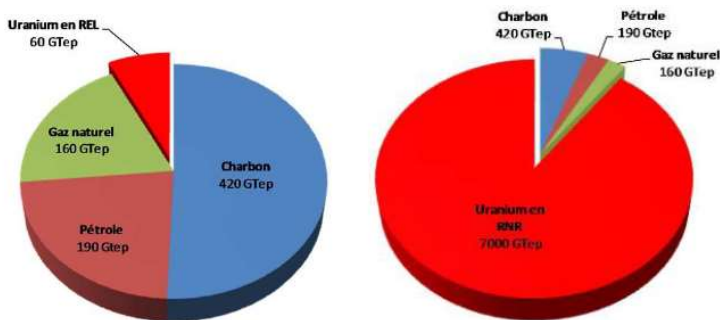
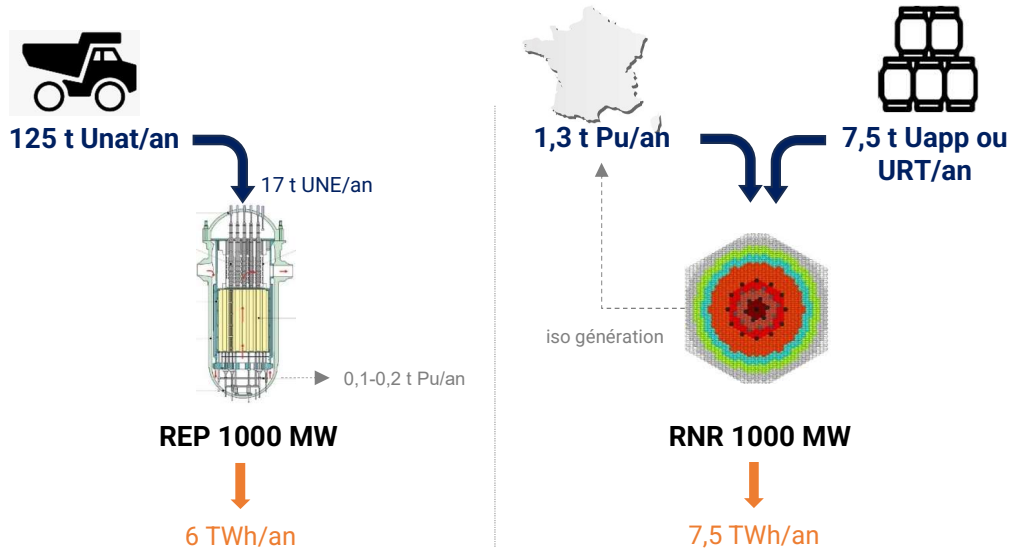
2. Une étape de **transition** et de **sécurisation** vers la fermeture du cycle permettant de :

- se désensibiliser encore davantage à l'Unat ⇒ Gain jusqu'à 40% en comparaison avec le cycle ouvert
- piloter les inventaires de CUs et optimiser les besoins d'entreposage
- disposer du Pu nécessaire au démarrage d'une filière RNR
- amplifier les savoir-faire français uniques sur le traitement-recyclage et le MOX, indispensables en vue du déploiement d'un cycle MOX-RNR, et promouvoir cette expertise en vue de potentielles collaborations



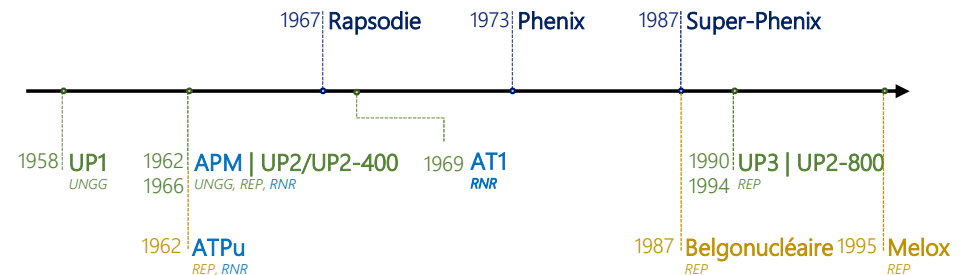
5. Le multirecyclage en RNR

Les RNR, au service de notre indépendance énergétique



Potentiel des combustibles dans le mix énergétique mondial

- Les RNR consomment **exclusivement de la matière recyclée** (plutonium et uranium de retraitement) et de **l'uranium appauvri**, tous deux présents sur le sol français
- La France dispose d'un retour d'expérience grâce au développement depuis 60 ans des technologies à neutrons rapides, ainsi que sur nos **savoir-faire industriels uniques au monde** en termes de traitement-recyclage du combustible nucléaire des Réacteurs à Eau Pressurisée



Particularités des réacteurs RNR

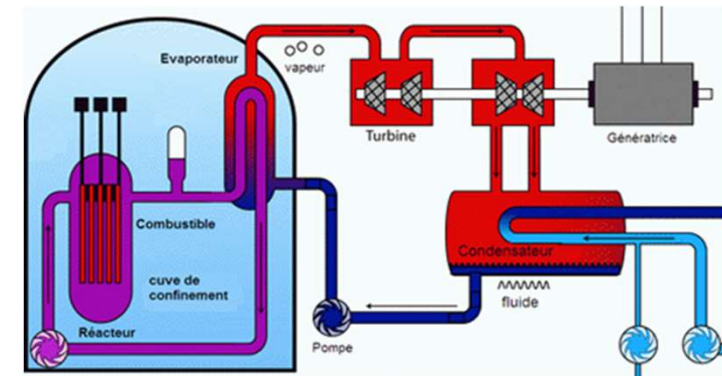
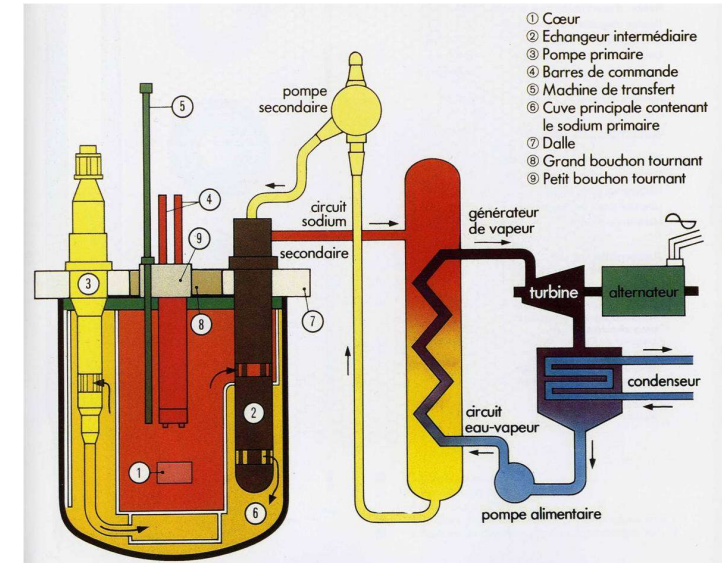
Les RNR-Na sont très différents des REP : réacteur « piscine » avec échangeurs et pompes dans la cuve, sans modérateur et avec un caloporteur sodium liquide. Les atouts des RNR-Na sont :

- ⇒ **Conduite simplifiée** : fluide primaire sans pression, forte inertie thermique, pas d'effet xénon, pas de poison neutronique soluble et fonctionnement possible sans perte de réactivité → pilotage avec des barres de contrôle à faible antiréactivité.
- ⇒ Avec des combustibles au plutonium, **possibilité de régénérer les noyaux fissiles** grâce à des neutrons disponibles pour fertiliser l'U238.
- ⇒ **Libre Parcours Moyen des neutrons très grand** qui tend à réduire les points chauds et possibilité de cœurs hétérogènes.

Les réacteurs RNR ont néanmoins des caractéristiques moins favorables :

- **Réactions Na-H₂O violentes, feux de sodium** → circuit intermédiaire supplémentaire, ciel de cuve inerté à l'argon.
- **Configuration du cœur qui peut-être rendue plus réactive** en cas de compaction du cœur ou de vidange du sodium → risque de choc énergétique puissant en cas d'excursion de réactivité, études d'accident avec des transitoires non protégés par la chute des grappes d'arrêt
- **Opacité du sodium** → inspection et réparation ou remplacement des structures et composants du réacteur plus difficile, besoin de prévention et détection d'une erreur de manutention combustible

**Surcoûts importants
défense en
profondeur**



Un savoir-faire français unique sur les réacteurs RNR-Na

Nom du réacteur	Période d'exploitation	Puissance	Remarques
Rapsodie	1967–1983	20/40 MWth	
Phénix	1973–2009	250 MWe	2 ^e durée d'exploitation la plus longue
Superphénix	1984–1997	1240 MWe	RNR le plus puissant exploité au monde
ASTRID (projet)	2009-2019 (projet)	600 MWe / 150 MWe (prévu)	



Particularités du cycle des réacteurs RNR

Caractéristiques spécifiques des combustibles :

- Aiguilles MOX de faible diamètre, séparées par un fil espaceur, rassemblées en faisceau dans un tube hexagonal.
- Gaines et tube hexagonal en acier
- Déprimogène au pied d'assemblage pour régler le débit Na et homogénéiser la T° cœur

- ⇒ **Géométrie la plus compacte possible** pour éviter le risque de compaction et bénéficier de la dilatation thermique en cas d'élévation de T° du cœur
- ⇒ Faibles σ_{eff} en flux rapide → **Teneur en Pu de 20% à 30%** fonction qualité Pu
- ⇒ Régénération du Pu → faible perte en réactivité → **temps d'irradiation limité par la tenue de la gaine sous irradiation (dpa max)**

Les RNR-Na permettraient :

- **Fermeture complète du cycle** et réduction des stocks d'ACU grâce à la valorisation des matières de tous les combustibles REP usés (y c. MOX et URE)
- Grâce à la surgénération, le RNR-Na ne nécessite qu'un apport d'uranium appauvri pour continuer à fonctionner. Consommation annuelle d'environ 50 t d'uranium appauvri dans un parc de 60 GWé sachant que le stock d'Uapp français est de 341 000 t à fin 2023 d'après ANDRA :
- ⇒ **Des milliers d'années d'autonomie en ressource énergétique...**

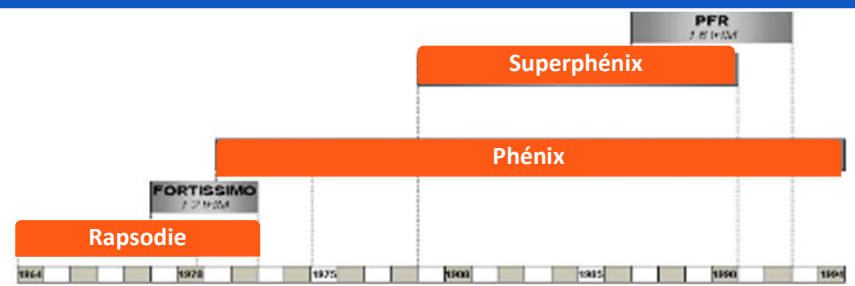


Un savoir-faire français unique sur la fabrication du combustible RNR

Historique :

- Fabrication à l'AtPu d'environ **106 tonnes de combustible étalé sur 50 ans** (MOX pour les réacteurs Rapsodie, Phénix et Superphénix)
- 35 ans de fabrication de combustible et un bon fonctionnement en réacteur
- Une amélioration constante des matériaux de gainage et de tube hexagonal a permis une augmentation significative du taux de combustion
- R&D pour l'ATC d'ASTRID (2009 – 2019 ; capacité de 5-10 t/an)
- Projet Smetana (2019-2024)

ATPu (1961 – 2003)



R&D post AFC : le projet SMETANA (2019-2024)
fabrication de premières pastilles MOX RNR avec du Pu issu d'un crayon MOX REP usé

© CEA

The block contains a photograph of a white, circular MOX fuel pellet with a central hole and several smaller holes around the perimeter. Below the photo are the logos of EDF, CEA, Orano, and France Relance.

Perspectives pour les futures usines :

- Augmentation significative de la capacité pour alimenter un parc RNR : **passage à qqs centaines de tonnes/an**
- **Évolution de l'isotopie du plutonium** : Pu issu des combustibles REP (UOX ou MOX) et non des combustibles UNGG → Impacts thermiques et dosimétriques
- Évolutions du référentiel de sûreté pour une nouvelle usine

Un savoir-faire français unique sur le traitement du combustible RNR

Historique :

- Traitement à La Hague et à Marcoule de **plus de 25 tonnes de combustible, en batch en dilution, étalé sur 50 ans.**
- Démantèlement du combustible sur site (CEI Phenix)



CEI Phenix

Perspectives pour les futures usines :

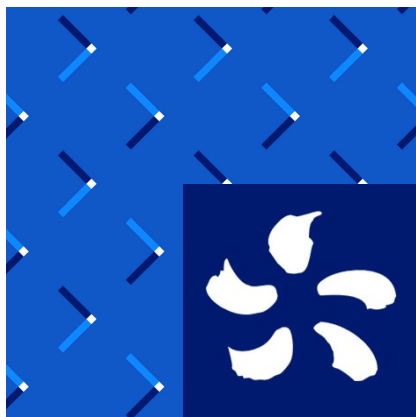
- Accès aux aiguilles et à l'oxyde : **passage du démontage de 10 assemblages/an (CEI Phénix) à 10 assemblages/jour ; passage du cisailage de 1 000 aiguilles/an à 1 000 aiguilles/jour**
- Dissolution :
 - les teneurs élevées en plutonium rendent la gestion de la criticité complexe → impact géométrie
 - Pu piégé dans les indissous à récupérer industriellement (étape supplémentaire de digestion ?)
- Séparation-Purification : limites du procédé historique PUREX, nouveau procédé PUMAS (développé pour le traitement des MOX-REP) plus adapté aux nouvelles cadences
- Conversion en PuO_2 : technologies à adapter aux nouvelles cadences
- Impact déchets :
 - Vitrification : Présence de + de platinoïdes dans les produits de fission et de produits de corrosion de la gaine (Fe, Cr, Ni)
 - Déchets MAVL : Volumes de CSD-C plus important que pour les REP (plus de structures par assemblage, exutoire du B_4C des grappes de contrôles contaminé par le sodium)



AT1 à La Hague (1969-1978)



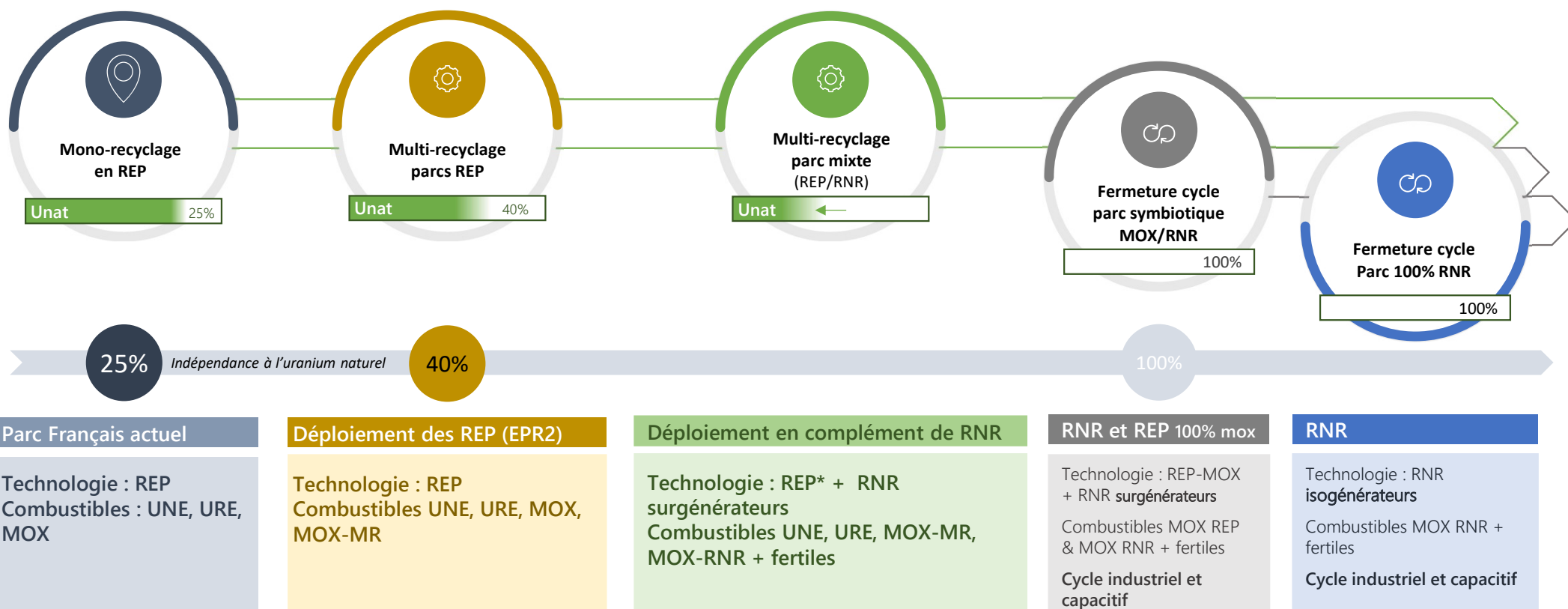
APM à Marcoule (1979-1995)



6. Vers la fermeture du cycle

Un programme pour une désensibilisation progressive à l'uranium naturel...

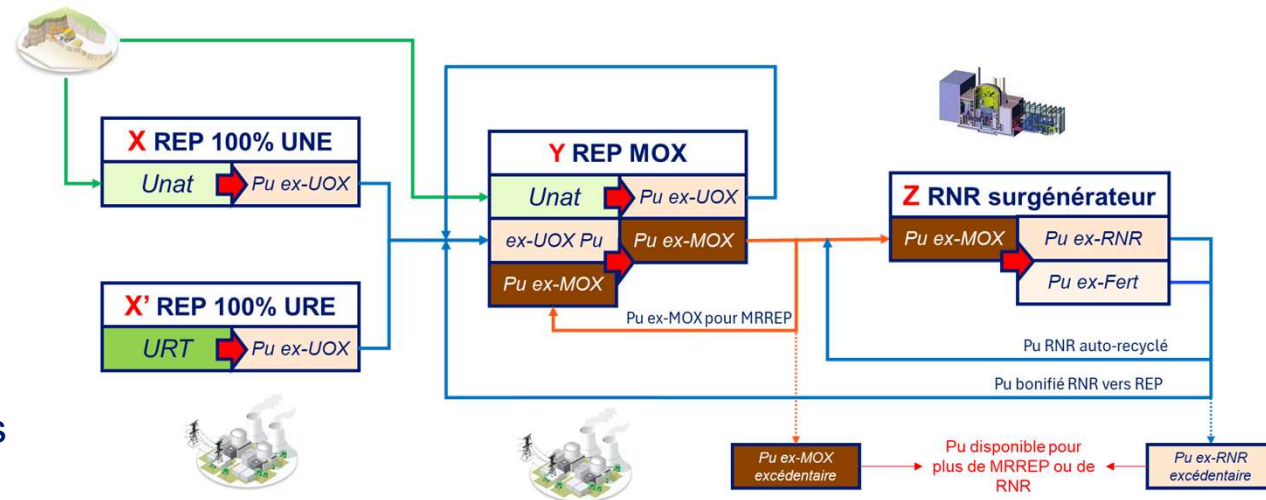
...pour atteindre une **indépendance totale** via des technologies de réacteurs nucléaires REP et RNR à consolider



Enjeux des systèmes réacteurs-cycles

Le déploiement d'un système optimisé réacteur-cycle composé de RNR et de REP nécessite des études pour

1. Etablir des trajectoires permettant de faire des choix d'orientation stratégique : **fermeture du cycle au plus tôt ou désensibilisation Unat progressive avec les technologies RNR**
2. déterminer **les capacités de déploiement des RNR en lien avec les flux et stocks de plutonium** et déterminer les besoins en traitement-recyclage de combustibles RNR
3. déterminer les paramètres les plus impactant sur ces trajectoires justifiant des efforts de développement importants, ou non
4. **s'assurer de la cohérence des choix industriels pour les systèmes du futur** : trajectoires industrielles des usines du cycle et des futurs réacteurs (MSI, gestions, DDV)
5. Réaliser des estimations économiques (€/MWh investissements) de ces scénarios et les comparer avec d'autres



L'augmentation de la quantité de plutonium mobilisé dans le système : un facteur déterminant pour la transition vers la fermeture du cycle

Quantité de Pu dans le système

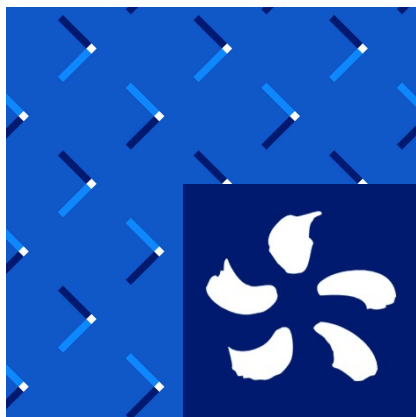
► BILAN DES STOCKS DE MATIÈRES RADIOACTIVES (en tML, excepté pour les combustibles usés de la défense nationale en tonnes d'assemblages)

N°	Catégorie de matières	A fin 2023	Évolution 2023/2022	Part étrangère
3	Combustibles UNE usés, en attente de retraitement	11 000	- 500	0,2 %
6	Combustibles URE usés, en attente de retraitement	625	- 3	-
7	Combustibles mixtes uranium-plutonium avant utilisation ou en cours de fabrication	32	+ 7	-
8	Combustibles mixtes uranium-plutonium en cours d'utilisation dans les centrales électronucléaires	185	- 5	-
9	Combustibles mixtes uranium-plutonium usés, en attente de retraitement ⁽¹⁾	2 510	+ 50	-
10	Rebuts de combustibles mixtes uranium-plutonium non irradiés en attente de retraitement	375	+ 16	-
12	Combustibles usés RNR, en attente de retraitement	131	+ 6	-
15	Autres combustibles usés civils	62	+ 1	2 %
17	Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes physico-chimiques	72	+ 2	19 %

Plutonium plus difficilement récupérable

Pu disponible avec les usines actuelles

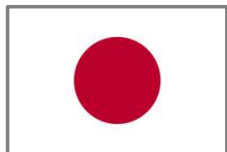
Extrait de l'inventaire national des matières et déchets radioactifs – Les essentiels 2025 (ANDRA)



7 ■ Les développements dans le monde

Les programmes nationaux
Les initiatives privées : AMR

Les programmes nationaux



Engagé dans une stratégie de fermeture du cycle

- Réacteurs expérimentaux et démonstrateur de technologie RNR-Na au MOX, avec usines pilotes de traitement/fabrication MOX aujourd'hui arrêtés
 - Réacteur expérimental Joyo (100 MWth) démarré en 1977, à l'arrêt depuis 2007 mais avec des perspectives de redémarrage annoncé pour 2026-27
 - Monju 250 MWe démarré en 1994 et arrêté définitivement en 2016
- 2024 : relance du développement des RNR-Na
 - Projet de démonstrateur RNR-Na de 600 MWe (d'ici 2050), APS en partenariat avec la France
 - Puis conception d'un RNR industriel ~1000 MWe

Dès l'origine du programme nucléaire russe, la fermeture du cycle du combustible a été identifiée comme une cible

- Réacteur :
 - Réacteur expérimental BOR 60 (Na ; 1969), qui sera remplacé par MBIR (150MWTh ; Na / boucles multi-calor) en construction
 - RNR-Na : BN 600 et 800 en fonctionnement + Projet BN 1200 (combustible MOX)
 - RNR-Pb : démonstrateur BREST-OD-300 (2027-28) à combustible nitrure U/Pu
- Cycle : usines pilotes à Zelenogorsk



- Etude de design RNR-Na (PGSFR)
- Projet de RNR-Na KALIMER-600 par KAERI (combustible U-Pu-Zr)
- R&D sur les procédés de traitement (pyrochimique en particulier)

Les programmes nationaux



Programme de fermeture du cycle basé sur des RNR-Na autochtones, développement à un rythme soutenu :

- Réacteur expérimental CEFR (20 MWé) depuis 2015
- Deux démonstrateurs CDFR (600 MWé) en cours de démarrage (cœurs HALEU)
- Construction d'installations pilotes du cycle (MOX)
- Projet réacteur industriel CiFR 1200 (combustible MOX / métal ?)



Visé à long terme un système basé sur le cycle du thorium. Les RNR-Na permettraient de valoriser U et Pu du parc actuel (étape intermédiaire)

- Réacteur expérimental RNR-Na FBTR (40MWTh, combustible carbure métallique PuC-UC) depuis 1985
- Démarrage du démonstrateur RNR-Na PFBR (500 MWe) en 2025 (combustible MOX). Objectif lointain d'un palier ~1000 MWe
- Projet de RNR-Na CFBR (600 MWe ; MOX) et de RNR-Na combustible métal
- Installations pilotes de traitement-recyclage



Fonctionnement en cycle ouvert (inflexion en cours avec la réouverture d'options intégrant le traitement/recyclage) mais pas de combustible Pu

- Relance via des partenariats public/privé
- Projet AMR Natrium (Terrapower) : RNR-Na 345 MWe (HALEU / ZrU)
- Projet AMR Aurora (Oklo) : RNR-Na 0,5-75 Mwe (HALEU / Umétal)

Zoom sur les SMR-AMR lauréats du programme



nuward SMR Une plateforme multi-énergies conçue pour répondre aux besoins des années 2030

Proven technologies

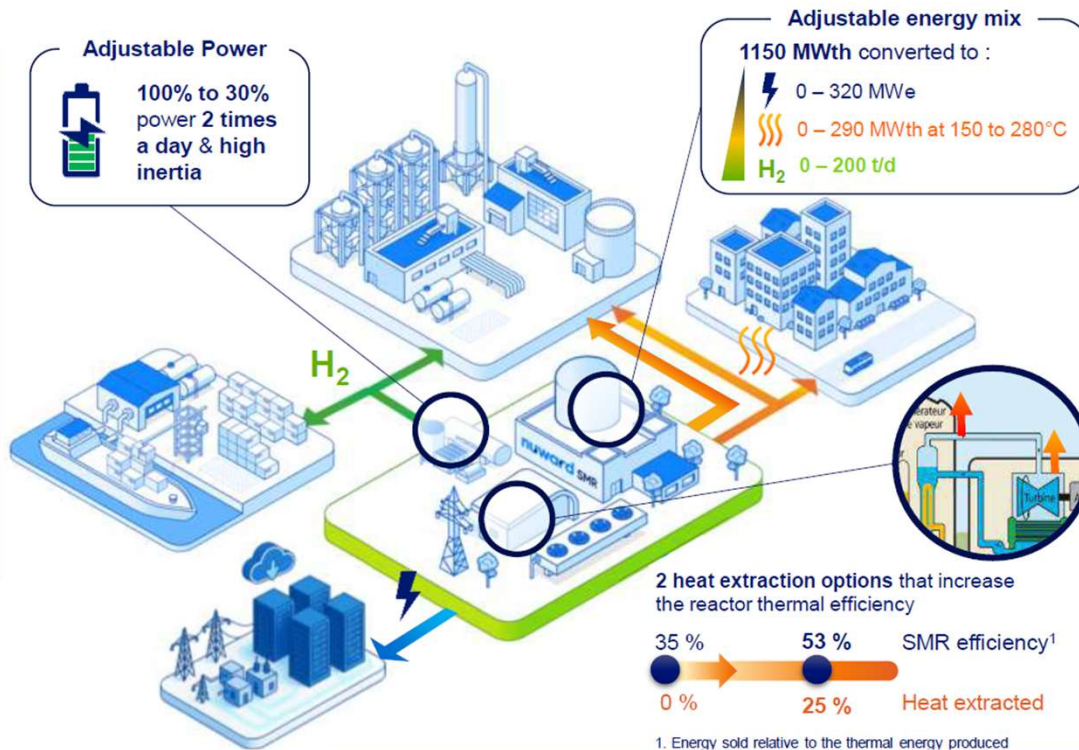
Architecture and systems based on proven technologies used on the existing EDF fleet and EPR2 reactor technology. A primary circuit to deliver a thermal power of 1150 MWth, that can be manufactured with existing industrial facilities.

Established industrial sector

NUWARD SMR relies on the EDF Group's technical and industrial expertise and Framatome's industrial infrastructure, and integrates partners to enhance its construction and modularity skills, such as Tractebel and Ansaldo Nucleare.

Proven and sustainable fuel cycle

Fuel assemblies similar to those currently used in the French nuclear fleet. A reactor designed to operate with MOX fuel and enriched reprocessed uranium (ERU).
NUWARD SMR: the only SMR that helps reducing the natural uranium consumption and spent fuel volumes.



A **Pressurised Water Reactor**, Generation 3+ with an optional high temperature electrolyser



Capable of producing on demand decarbonized **electricity, heat and hydrogen**



Construction in **48 months**



Modular approach and off-the-shelf components



Safety targets that meet the highest international safety standards

Conceptual design

2026

Basic design

Detailed design

Erection & Commissioning

2035



Zoom sur les SMR-AMR lauréats du programme



Les réacteurs calogènes



PWR type reactor
30 MWth
District heating

- **Marché adressé** : chaleur décarbonée à 110°C pour chauffage urbain (résidentiel et tertiaire)
- **Spécificités** : réacteur modulaire type piscine, basse pression, fonctionnant en convection naturelle ; combustible « type REP » ; délivrant une température adaptable au réseau (70 à 110 °C)

Jimmy
HTR reactor
20-60 MWth
Industrial heat

- **Marché adressé** : chaleur industrielle pour des besoins inférieurs à 500°C sous forme de fluide (vapeur, eau chaude, air chaud, huile thermique) et ciblant 3 industries : chimie, agroalimentaire, papeterie
- **Spécificités** : micro-réacteur à haute température délivrant en sortie une chaleur jusqu'à 500°C ; utilisant du combustible triso



HTR Na cooled reactor
150 MWth / 50MWe
Industrial heat / electricity

- **Marché adressé** : chaleur industrielle (400-800°C) pour des secteurs difficiles à décarboner par électrification (chimie)
- **Spécificités** : réacteur haute température refroidi au sodium, modéré au graphite ; utilisant du combustible triso faiblement enrichi ; délivrant en sortie de l'air chaud à 700°C

Les réacteurs rapides à caloporteur métal liquide



Sodium cooled fast reactor
400 MWth / 150 MWe
Industrial heat / electricity

- **Marché adressé** : électrogène et calogène pour des clients industriels énérgo-intensifs
- **Spécificités** : réacteur constitué de deux modules nucléaires de 400 MWth chacun ; couplé à des installations de stockage thermique et de conversion d'énergie et délivrant électricité et chaleur à 500°C



Sodium cooled fast reactor
110 MWe
Industrial heat / electricity

- **Marché adressé** : électrogène et calogène, avec un cahier des charges significativement modifié par rapport aux réacteurs historiques
- **Spécificités** : technologie basée sur une architecture modulaire et à boucles ; comprenant trois cuves en fonctionnement alterné



Lead cooled fast reactor
200 MWe
Electricity, heat, radio-isotopes

- **Marché adressé** : électrogène et autres usages, associé à une usine de production du combustible MOX
- **Spécificités** : technologie de RNR refroidi au plomb

Zoom sur les SMR-AMR lauréats du programme



Les réacteurs à sels fondus



Molten salts reactor - Stellarium
250 MWth / 110 MWe
Industrial heat / electricity

- **Marché adressé** : iso-générateur, fourniture d'électricité / chaleur
- **Spécificités** : technologie à sels chlorure fondus ; avec un fonctionnement simplifié (convection naturelle) ; combustible issu du recyclage des combustibles usés



Molten salts reactor
250 MWth / 100 MWe
Industrial heat / electricity

- **Marché adressé** : fourniture d'électricité/chaleur
- **Spécificités** : technologie de RNR à sels chlorures fondus ; cœur constitué de cartouches autoportantes ; combustible issu du recyclage des combustibles usés



Molten salts reactor - XAMR
80 MWth / 40 MWe
Industrial heat / electricity

- **Marché adressé** : fourniture d'électricité et chaleur, décentralisée et pilotable (territoires peu connectés aux réseaux)
- **Spécificités** : technologie de RNR à sels chlorure fondus ; concept de cœur/échangeur ; combustible issu du recyclage des combustibles usés

Les réacteurs de fusion



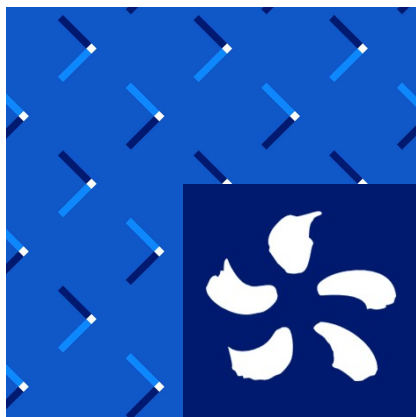
Fusion (inertial confinement)
1 GWe
Electricity

- **Marché adressé** : production d'électricité issue de réactions de fusion nucléaire obtenues par confinement laser à haute énergie
- **Spécificités** : fusion deutérium tritium par confinement inertiel (lasers solides de forte énergie, attaque directe des cibles, haute fréquence) et convertissant l'énergie en électricité



Fusion (magnetic confinement)
1 GWe
Electricity

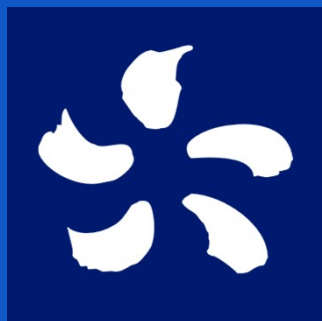
- **Marché adressé** : production d'électricité par le développement d'un réacteur de fusion à confinement magnétique de type Stellarator
- **Spécificités** : développement de briques technologiques basées sur trois innovations destinées à rendre le réacteur plus sûr, plus compact et plus simple à fabriquer : parois épaisses à base de métaux liquides, utilisation d'aimants supraconducteurs haute température, conception et fabrication simplifiée du Stellarator



8. Conclusion

Points clés

- ✓ **La France s'est résolument engagée à réduire sa dépendance à l'uranium naturel en fermant progressivement le cycle du combustible nucléaire.**
Cette stratégie de long terme vise à renforcer l'indépendance du système français de production d'énergie en diminuant les besoins en ressources naturelles et en soutenant la durabilité de l'énergie nucléaire dans un contexte mondial en évolution.
- ✓ **Une stratégie progressive est mise en œuvre : du mono-recyclage, au multi-recyclage dans les Réacteurs à Eau Pressurisée, puis à terme au déploiement des réacteurs rapides.**
Chaque étape accroît le recyclage de matériaux valorisables, réduit les déchets (volume, radiotoxicité) et renforce la résilience du parc nucléaire français. La transition vers les réacteurs rapides permettra le recyclage complet des matières nucléaires, supprimant à terme le besoin en uranium naturel et améliorant la gestion des déchets.
- ✓ **La collaboration et l'innovation sont essentielles à la réalisation de ces objectifs.**
Le succès repose sur des partenariats solides entre l'industrie, la recherche et les acteurs internationaux. L'innovation continue dans les technologies du cycle du combustible et la conception des réacteurs permettra à la France de rester à la pointe d'un nucléaire sûr, performant et durable.
- ✓ **La France possède des atouts scientifiques et techniques majeurs dans les réacteurs rapides comme dans le cycle du combustible.**
Elle s'appuie sur une longue expérience en modélisation, conception, réalisation et exploitation de réacteurs rapides, ainsi que sur une maîtrise industrielle unique des procédés de traitement et de fabrication de combustibles recyclés. Cet ensemble de compétences renforce sa capacité à développer et à déployer un cycle du combustible fermé, souverain et durable.



Merci