

Le cycle du combustible français

**Philippe Hatron,
Bureau SFEN Hauts de France
17 avril 2025**



orano

SOMMAIRE

01

L' Amont du cycle

02

Les transports

03

L' Aval du cycle

04

**La poursuite du traitement
recyclage**

05

**Le second cycle de
valorisation : le multi-
recyclage en REP**

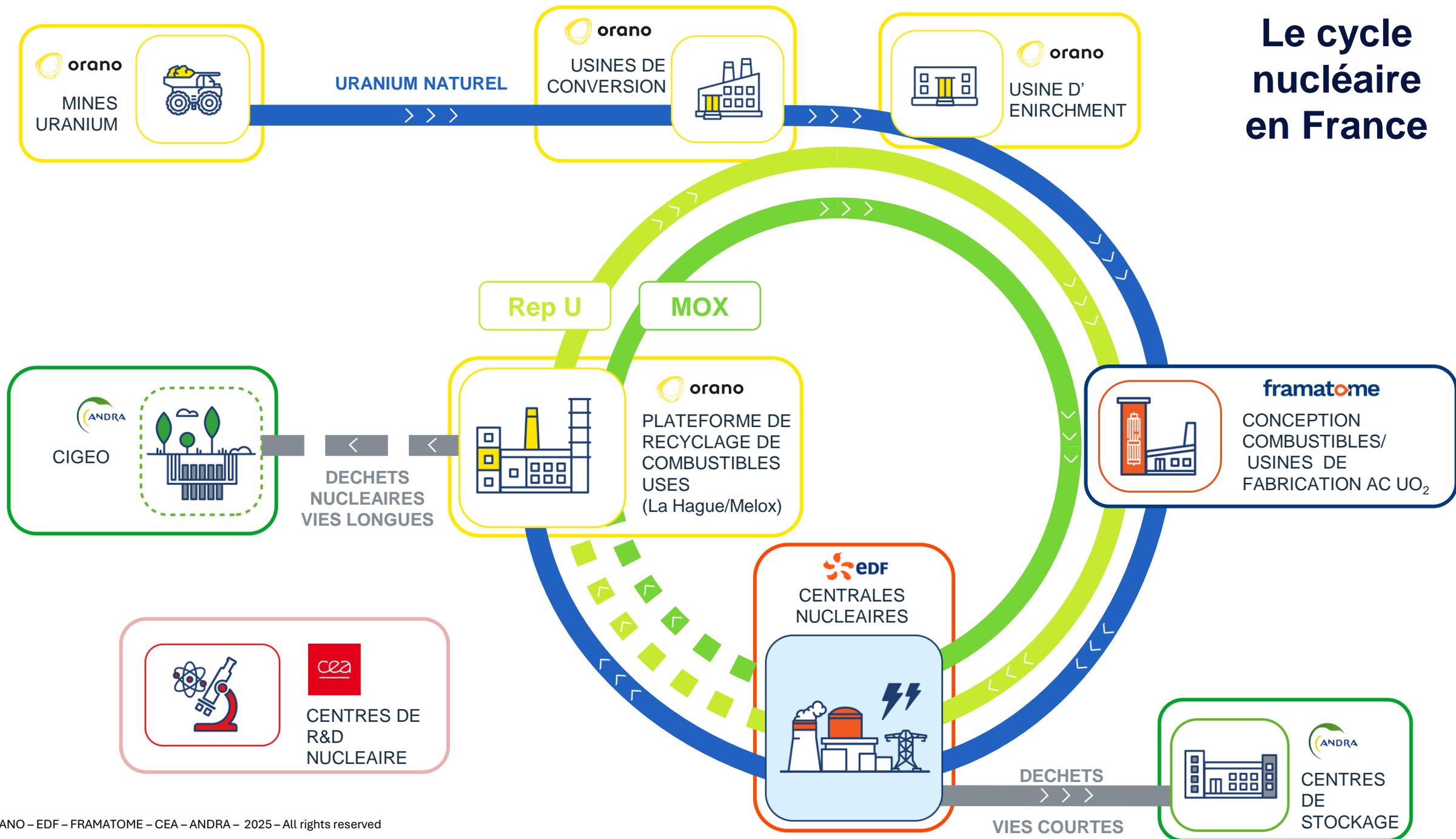
06

**Les Nouveaux
réacteurs**

07

**Positionnement Orano
vis-à-vis du Nouveau
Nucléaire**

Le cycle nucléaire en France

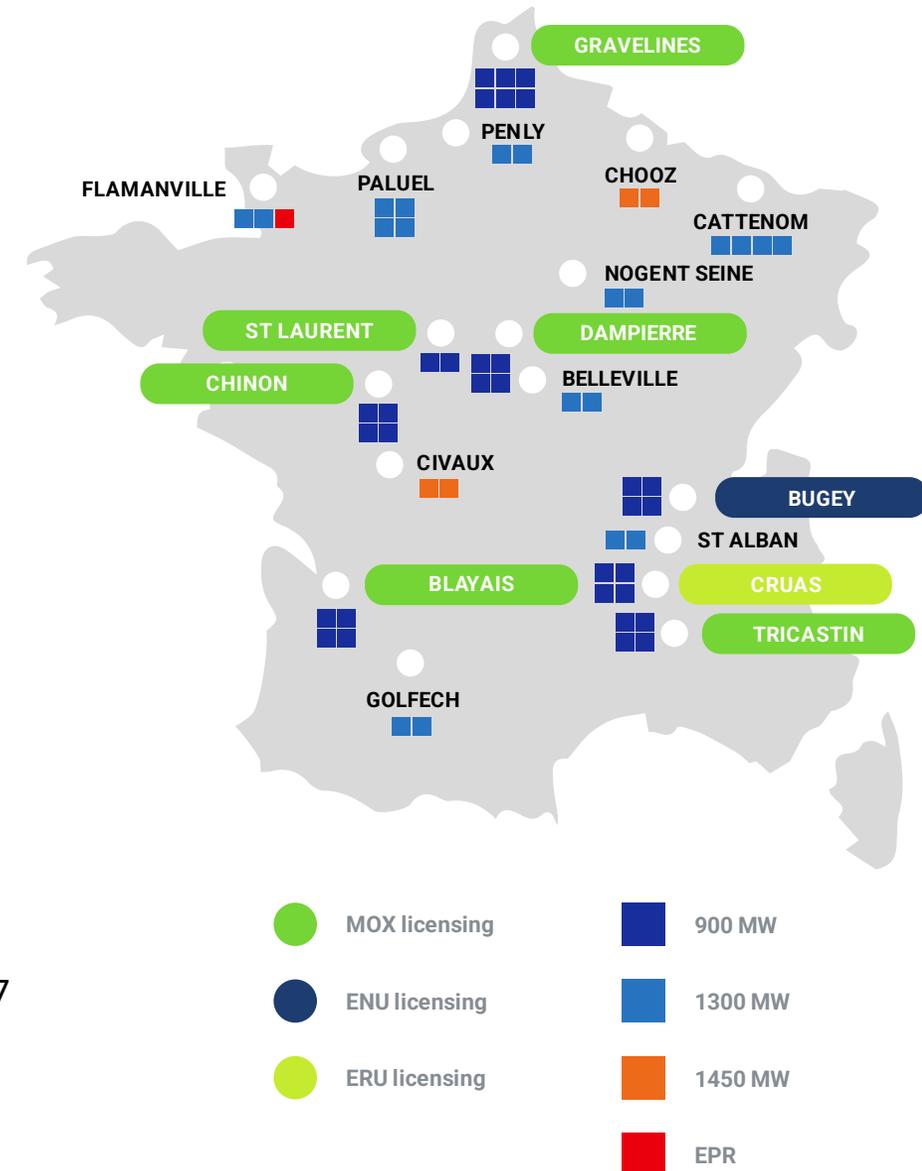


Le cycle du combustible en France

Le parc existant s'appuie sur une filière **MOX** et **URE** mettant en œuvre une stratégie de valorisation du **Pu** et de l'**URT** agile et modulable. Ce processus de **mono-recyclage** permet **une économie de ressource en uranium naturel** répondant au besoin d'EDF d'environ **25% voire plus**, et une **réduction considérable du volume et de la radiotoxicité des déchets nucléaires**.

- **57 reactors totalisant 62.8 GWe**
- **~ 7,000 tonnes/an d'U Nat**
- **~ 1 200 tonnes/ an d'Assemblages Combustibles chargés en réacteurs**
- **~ 1 100 tonnes / an de combustibles usés retraités à La Hague**
- **~ 1 045 tonnes / an d'URT séparé à La Hague**
- **~ 100 tonnes / an d'Assemblages combustibles MOX fabriqués à MELOX**

A fin 2024 103 061 Assemblages Combustibles (ACs) chargés en réacteur (dont 6 227 MOX and 1 488 ERU)

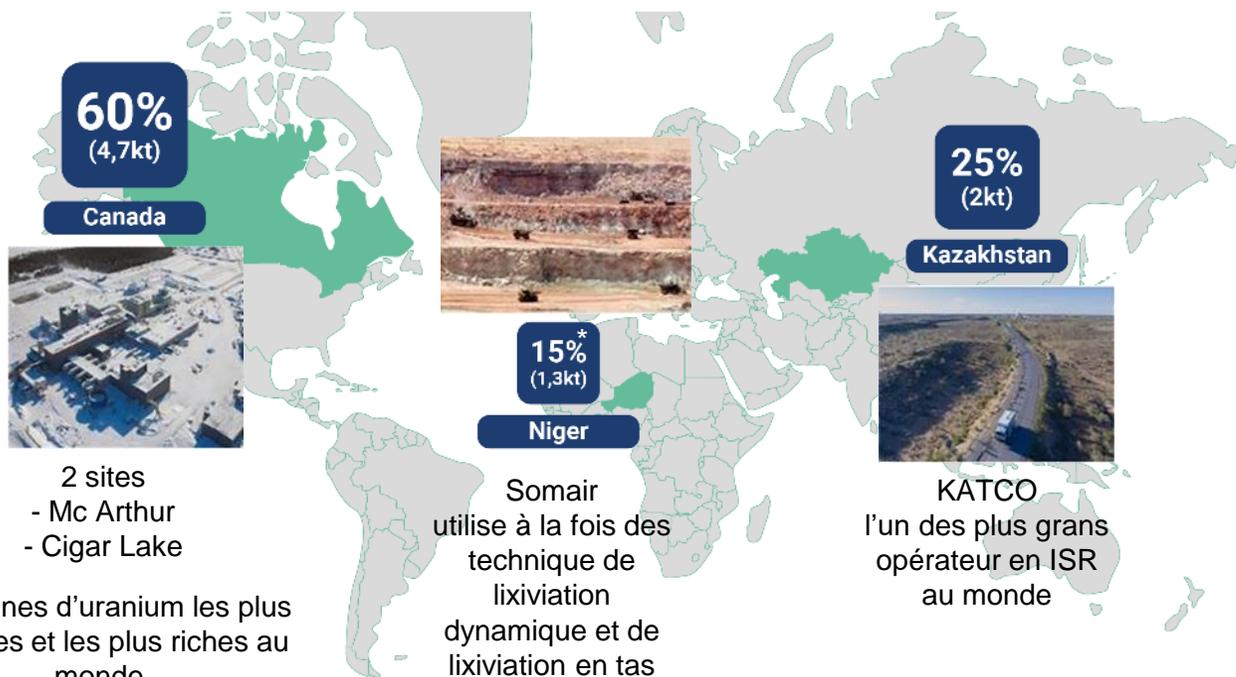


01 • L'amont du cycle

Orano, un important producteur d'uranium

REPARTITION DE LA CAPACITE DE PRODUCTION D'URANIUM D'ORANO (BASEE SUR LES DROITS D'ACHATS D'ORANO)

8 000 tU de capacité minière nominale par an dans 3 pays



Production à Mc Clean avec la technologie Sabre en 2025.

Validation du projet d'extension de Cigar Lake.

(*) En 2024, Orano a annoncé avoir perdu le contrôle des opérations de ses filiales nigériennes et a engagé une procédure d'arbitrage devant les juridictions internationales pour obtenir réparation de son préjudice...

TOP 3

Producteur mondial

50%

des exploitants de centrales nucléaires d'Asie, d'Europe et d'Amérique du Nord, actuellement approvisionnés par Orano



• Usines de Conversion d'Orano : les capacités, récemment renouvelées les plus importantes en Europe

MALVESI AND PHILIPPE COSTE FACILITIES (France)



15,000
tU/y nominal capacity

TOP 2
Worldwide

- L'unique capacité de conversion industrielle renouvelée opérant dans l'OCDE
 - Bénéficiant des **60 ans d'expérience** avec les anciennes usines (aujourd'hui à l'arrêt).
 - Des procédés innovants et des usines modernes répondant aux normes de **sûreté et de sécurité les plus élevées avec une empreinte environnementale réduite**
 - **Une production en croissance**, dans cette phase d'amélioration la fiabilité de cette nouvelle usine
- Capacité à traiter **toutes les formes de concentrés** provenant de toutes les mines du monde
- Offrant des capacités d'entreposage sûres pour les concentrés d'uranium et les stocks d'UF6 naturel appartenant à nos clients du monde entier.
- **Fournissant les opérateurs de centrales nucléaires sur le long-terme**

• Usine d'enrichissement d'Orano : des capacités importantes et renforcées en Europe

GEORGE BESSE II PLANT (France)



7.5 + 2.5 avec une montée en
capacité de 2028 et 2030

MUTS
capacité nominale

TOP 3
Producteur mondial

- Capacité actuelle de production d'Uranium Enrichi jusqu'à 6% : **7.5 MUTS**
 - Utilisation de la technologie la **plus efficace** et compétitive (centrifuges ETC)
 - Normes de **sûreté et de sécurité les plus élevées avec une empreinte environnementale réduite**
- **Extension actuelle : + 2.5 MUTS**, avec une montée en capacité entre 2028 et 2030
- Pour le **LEU+** destiné au parc nucléaire existant, une approche agile pour adapter les capacités aux besoins du marché : production et livraison d'Uranium Enrichi jusqu'à 6% dès 2025 et au-delà dès 2028
- **Approvisionnement des exploitants sur le long terme**
- Site préférentiel sélectionné, Oak Ridge (Tennessee, Etat-Unis) pour une future installation d'enrichissement d'uranium, projet IKE (études technique et de faisabilité en cours)

02 • Les transports

• Transports sécurisés par train, camion, et bateau

6,000 transports par an

- **2 500** dans l'Amont du cycle
- **400** dans l'Aval du cycle
 - Combustibles usés
 - Combustibles MOX
 - Déchets vitrifiés et compactés
- **160** pour les réacteurs de recherches et laboratoires
- **3 000** pour les déchets et matériels contaminés

Capacités logistiques clés

- **2 300** colis pris en charge jusqu'à 150t
- **150** camions, dont 70 dédiés aux colis lourds
- **65** wagons spécialisés pour le transport ferroviaire
- Partenariats long terme avec les compagnies maritimes et aériennes
- Gestion intégrée des risques liés aux transports (sûreté nucléaire, surveillance en temps réel, gestion de crise, communication etc.)
- Expertise en matière de transports exceptionnels et de masses indivisibles

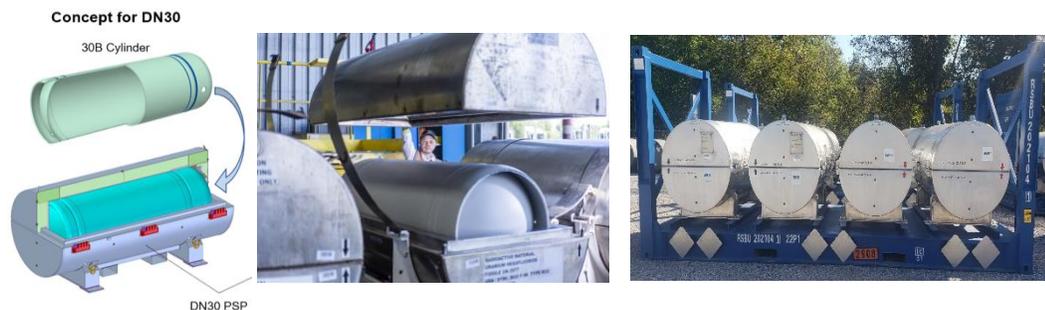


Les solutions de transport and entreposage d'UF6 Enrichi

Les produits sont livrés **mondialement** sur le site choisi par nos clients

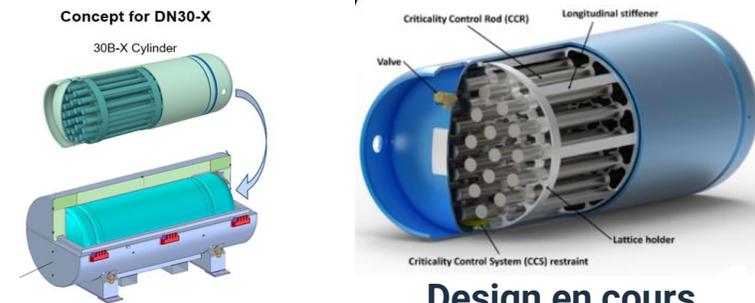
ENTREPOSAGE ET TRANSPORT D'UF6 ENRICHİ JUSQU'À 5%

TRANSPORT SÉCURISÉ ET ENTREPOSAGE AVEC DES CYCLINDRES 30B



TRANSPORT D'UF6 ENRICHİ À PLUS DE 5%

TRANSPORT SÉCURISÉ ET ENTREPOSAGE AVEC DES CYCLINDRES 30B-X



Design en cours



GBII PLANT
SUR LE SUTE
DU TRICASTIN

- ENTREPOSAGE D'URANIUM ENRICHİ DANS DES 30B
- TRANSPORT DE L'URANIUM ENRICHİ EN 30B DANS UN EMBALLAGE DN30

Orano dispose d'environ 1 500 cylindres 30BB

Conforme aux normes ANSI

Transport par route, mer et rail dans le monde entier

EMBALLAGE DN30

France (ASN/IRSN)

Premier CoC délivré en Decembre 2018
F/420/AF pour l'UF₆ de type commercial
F/420/IF for UF₆ retraité
F/420/B(U)F pour les pieds de cuve

Validations

Acquisies: Belgique, Brésil, Canada, Allemagne, Pays-Bas, Russie, Suède, Royaume-Uni, Etats-Unis (import/export), Japon, Corée du Sud

A developer : Chine

- ENTREPOSAGE D'URANIUM ENRICHİ DANS DES 30B-X
- TRANSPORT DE L'URANIUM ENRICHİ EN 30B-X DANS UN EMBALLAGE DN30

Deux versions: 30B-10 et 30B-20

Système interne de contrôle de la criticité (CCS)

Optimisation des treillis CCR pour augmenter la capacité UF₆

30B-10	10 wt.% ²³⁵ U	1460 kg UF ₆
30B-20	20 wt.% ²³⁵ U	1271 kg UF ₆
30B	5 wt.% ²³⁵ U	2277 kg UF ₆

Corps du cylindre identique au 30B standard

Dimensions, soupape et clapets identiques

- Pas de changement dans la manipulation et le fonctionnement

Matériau identique en acier au carbone

- Même acier au carbone utilisé pour le CCS

• Solutions de transport des combustibles usés

TRANSPORT SÉCURISÉ PAR TRAIN, CAMION, ET BATEAU



Emballages totalement compatibles avec l'usine de La Hague

DIFFERENTES OPTIONS EN FONCTION DES BESOINS

TN Eagle®

- Multimodal (route, rail, maritime)
- Emballage modulaire (dimensions-poids)
- Multiple options personnalisables
- Poids : entre 60 et 150 T
- Tous types de **grands assemblages combustibles**



TN Falcon®

- Multimodal (route/rail, maritime possible)
- Poids : ~120 T
- Assemblages REP (REB possible)
- **Puissance thermique élevée**



TN®Starling

- Multimodal (route, rail, maritime)
- Emballage modulaire (dimensions-poids)
- Poids : < 60 T (tbc)
- Tous types de **petits assemblages combustibles**



03 • L'aval du cycle

• Plateforme de recyclage d'Orano : une expérience opérationnelle

LA HAGUE USINE DE TRAITEMENT



TRAITEMENT DU COMBUSTIBLE REP

~31 000 tHM retraités pour la France

~10 500 tHM retraitées pour 6 autres pays

MELOX USINE DE FABRICATION DE COMBUSTIBLE



FABRICATION MOX REP :

~ 3 200 tHM de combustibles MOX produits,
dans 43 réacteurs du monde entier



UN ACTIF INDUSTRIEL STRATÉGIQUE AVEC 50 ANS D'EXPÉRIENCE,
PARTAGÉE DANS LE MONDE ENTIER

Les quantités rétraités

FUEL TYPE	REPROCESSED QUANTITIES AT LA HAGUE (at end of 2023)
UNGG (NATURAL URANIUM GRAPHITE GAS REACTOR)*	4 900 tHM
PWR (UO ₂)	~36 500 tHM
BWR (UO ₂)	3 800 tHM
LWR (MOX)	73 tHM
LWR (REPU)	24 tHM
FNR*	10 tHM
RTR (UAI, U ₃ Si ₂)	3 100 fuel assemblies

* Reprocessing in previous UP2-400 plant



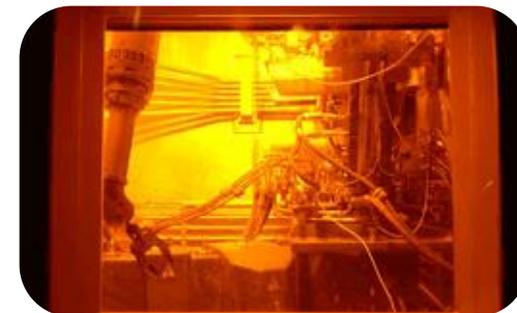
Transport de combustibles usés à La Hague, France



Dissolution des combustibles dans l'acide nitrique



Cellule de déchargement des assemblages



Process de vitrification



Piscine d'entreposage des combustibles usés



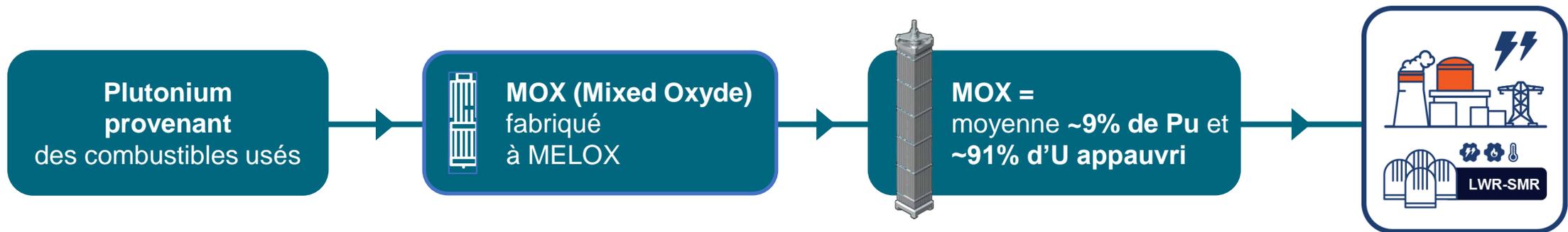
Vitrification Evaporateur



Compactage des structures métalliques

Le Plutonium, une ressource énergétique essentielle

- Dans le monde, 43 réacteurs ont été chargés en combustibles MOX depuis 1972
- En France : sur les 57 réacteurs en service, 22 '900 MWe' sont partiellement chargés en MOX (1/3 MOX dans le coeur) et des réacteurs 1300 MWe reactors le seront (la procédure d'autorisation est en cours).
Chaque année, le combustible MOX permet de produire 10% de l'électricité nucléaire en France.



Un combustible MOX contient suffisamment d'énergie pour alimenter en électricité une ville de 100 000 habitants pendant une année entière.

• Les avantages d'un conditionnement universel pour les déchets ultimes

Reduction des déchets d'un facteur 5

en volume impactant l'empreinte sur le site de stockage définitif et d'un **facteur 10 en radiotoxicité**

Transport facilité

Orano dispose d'emballages licenciés pour le transport des déchets conditionnés

Les conteneurs universels sont standardisés pour le transport retour des déchets chez les clients étrangers

Manutention facilitée

Les conteneurs sont de taille et dimension standard

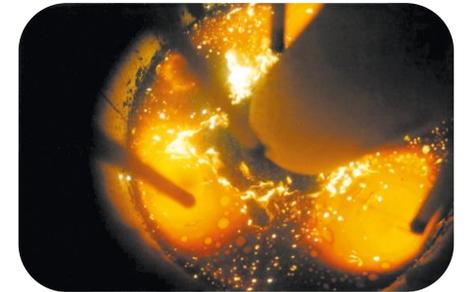
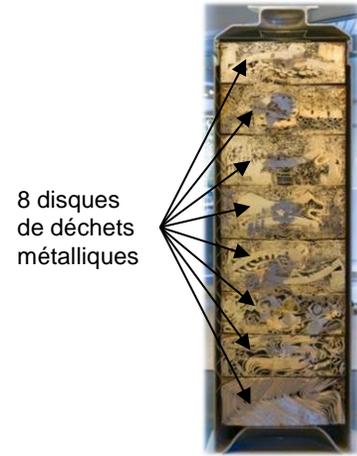
Soutien à la stratégie de futur stockage

Peut s'adapter à n'importe quel site de stockage définitif : Mines géologiques profondes, forages profonds, etc..

Simplifie la conception du site de stockage définitif

L'absence d'uranium ou de plutonium

Limite fortement les exigences en matière de garanties de l'AIEA et de criticité nucléaire



Les déchets des réacteurs français sont entreposés en toute sécurité dans le hall d'entreposage intermédiaire de La Hague jusqu'à l'ouverture du stockage géologique profond, Cigeo.

Les déchets étrangers issus du retraitement, sont renvoyés dans leur pays d'origine.



• Extension de la stratégie de recyclage

AUGMENTATION DU RECYCLAGE DU PU

Plus de 35 ans d'expérience et d'excellence opérationnelle du recyclage du Pu dans les réacteurs de 900 MWe d'EDF

- **Augmentation des combustibles MOX dans les réacteurs de 900 MWe d'EDF :**
Rechargement avec 16 assemblages MOX au lieu de 12
- **Possibilité d'utiliser du MOX dans les réacteurs de 1300 MWe après la 4^{ème} visite décennale**
Chargement des premiers assemblages MOX dans le réacteur de Paluel 4 (2026)

ADAPTATION DE LA GESTION DU COMBUSTIBLE MOX POUR DES CYCLES D'EXPLOITATION PLUS LONGS

Gestion du combustible "CAMOX" dans les réacteurs de 900 MWe:
L'objectif étant d'augmenter la durée du cycle d'exploitation.

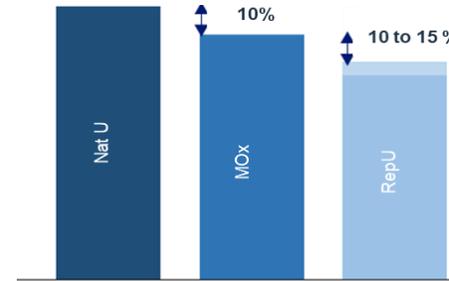


Centrale nucléaire de Paluel

Principaux avantages du recyclage pour assurer une gestion durable du combustible utilisé

Economie de ressource en Uranium naturel :

20-25% dans un schéma de mono-recyclage avec MOX et URE



Réduction d'un facteur 4 des besoins d'entreposage des combustibles usés

(plus de 28 000 tHM en France)

Réduction des déchets d'un facteur 5

en volume incluant l'emprise sur le site de stockage définitif et d'un **facteur 10 en radiotoxicité**

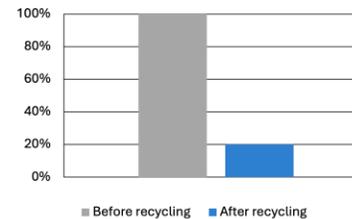
Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE)

actions concrètes ayant un **impact positif** sur l'acceptation du public, grâce à l'économie circulaire et une empreinte environnementale limité

Why Recycle Nuclear Fuel?

Reduce Waste Volume

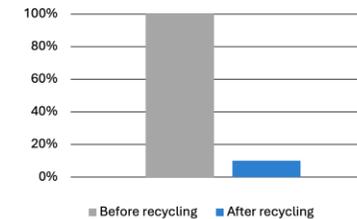
High Waste Volume Before and After Recycling



Recycling Reduces the Volume of High Level Waste by a factor of 5

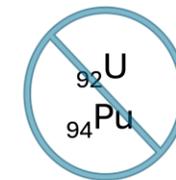
Reduce Toxicity

High level Waste Toxicity Before and After Recycling



Recycling Reduces the Toxicity of High Level Waste by a factor of 10

Reduce Liability



No Uranium or Plutonium at Waste Facility alleviates IAEA safeguards regime

04 • La poursuite du traitement recyclage

02 • Le Conseil de Politique Nucléaire du 26 février 2024 a confirmé la prolongation de la politique de traitement-recyclage en France



Lancement d'un programme de pérennité - résilience prolongeant les usines de la Hague et de Melox au-delà de 2040



Lancement des études pour une nouvelle usine de traitement des combustibles sur le site de la Hague



Lancement des études pour une nouvelle usine de fabrication de combustibles MOX sur le site de la Hague

• La stratégie française et la feuille de route pour la fermeture du cycle du combustible

- **La R&D des réacteurs à neutrons rapides au sodium est en cours.** Cependant, une transition massive vers ces réacteurs à l'échelle industrielle ne peut être envisagée avant la seconde moitié du siècle
- **A plus court terme, le recyclage multiple dans les réacteurs à eau pressurisée (REP) :** Le multi-recyclage en REP permettrait d'améliorer la gestion des matières et des déchets par rapport au mono-recyclage actuel, tout en progressant sur les technologies nécessaires au cycle des réacteurs à neutrons rapides.



PERSPECTIVE A COURT TERME :

- Assurer la pérennisation des usines existantes (La Hague, Melox) au-delà de 2040
- Poursuivre le **mono-recyclage** du parc actuel de réacteurs (avec du combustible MOX et URE dans les réacteurs de 1300 MWe)

PERSPECTIVE A MOYEN TERME :

- Mise en service des **nouvelles usines** pour le traitement et le recyclage
- Mise en oeuvre du **multi-recyclage** dans le parc EPR2
- Adaptation aux **nouveaux besoins** des grands et petits réacteurs, incluant les AMR

PERSPECTIVE A LONG TERME :

- Préparer la **fermeture complète du cycle du combustible** en déployant les réacteurs à neutrons rapides

• Programme Pérennité Résilience des installations Orano de l'aval du cycle



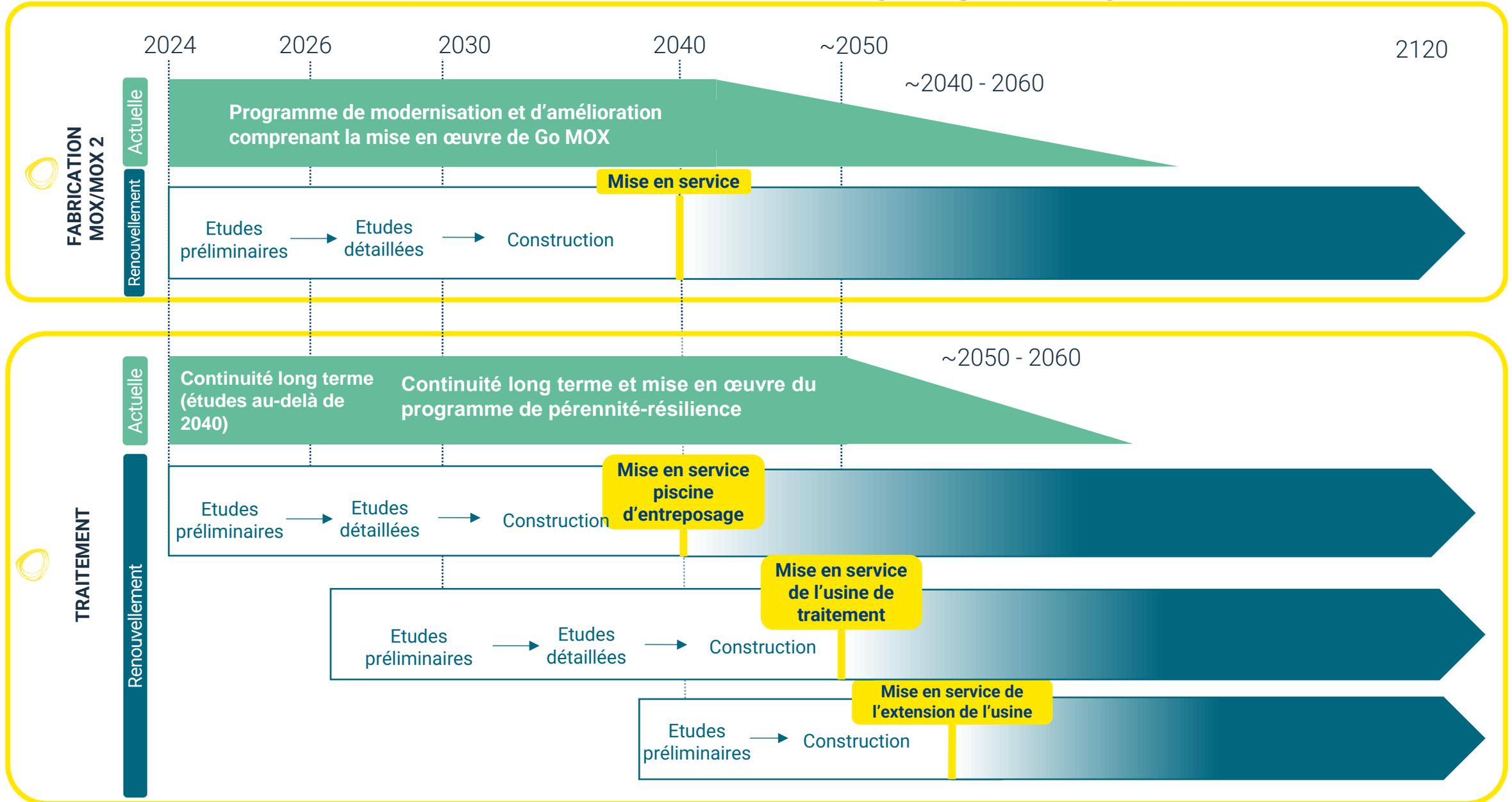
Les unités UP2-800 et UP3 de La Hague, en service depuis le début des années 90, ont été maintenues jusqu'alors pour un horizon de vie à 2040. Elles doivent maintenant connaître un programme de maintenance exceptionnelle pour être prolongée à 2060, échéance en lien avec la mise en service opérationnelle du projet Aval du Futur et le démarrage des nouvelles usines.

Objectifs :

- Prolonger la période de fiabilité des installations dans un objectif de production nominale conservée (Pérennité) et à se préparer aux aléas techniques avec des redondances permettant de garantir une production minimale même en cas de défaillances combinées sur les 2 usines (Résilience)
- Renforcer ses organisations depuis 2024 avec un programme d'études et d'investigations des équipements sur l'ensemble des installations dans l'objectif d'établir une feuille de route industrielle avec des projets de pérennité et de résilience devant terminer à ~2040.
- Lancer dès 2025 la structuration d'un programme de projets regroupés dans 5 familles de projets :
 - Cœur de procédé
 - Fonctions transverses
 - Sûreté agressions réexamen
 - Résilience
 - R&D



Le schéma industriel du programme Aval du futur vise à assurer la continuité d'activité et à développer des solutions de recyclage pour y répondre



05 • Le second cycle de valorisation : le multi-recyclage en REP

• Les objectifs de déploiement du multi-recyclage dans le parc EPR2



1. Mitiger le risque pouvant peser sur les ressources Unat en disposant d'une solution industrielle et opérante



2. Mettre en œuvre la valorisation des matières issues des MOX et URE usés dans un objectif de renforcement de la circularité



3. Piloter les inventaires de combustibles dont MOX/MOX-MR usés afin d'optimiser les capacités d'entreposage du site de La Hague



4. Piloter l'inventaire de Pu en amont du développement d'un futur parc RNR



5. Progresser vers la fermeture complète du cycle en développant industriellement les technologies permettant un flux accru de Pu

Conclusion

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 25% de gain/ monorecyclage si déploiement enveloppe. Gain ~10%/monorecyclage avec le déploiement de 10 EPR2 seulement</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>

06 • **Les Nouveaux réacteurs : Un foisonnement de concepts – et de cycles combustibles associés**

01 • Nouveaux réacteurs : Un foisonnement de concepts ... qui se regroupent en grandes familles, avec des finalités différentes (1)

	SMR GEN III	AMR GEN IV				
	SMR LWR	HTR	MSR		LMFR	
Définition	Réacteur à eau légère	Réacteur à (très) haute température	Réacteur à sels fondus (RSF)		Réacteur rapide refroidi au sodium ou au plomb	
Fluide caloporteur	Eau (sous pression ou bouillante)	Hélium/ Sel fondu (2)	Sel fondu (fluorure)	Sel fondu (chlorure)	Sodium liquide ou plomb liquide	
Combustible	UO ₂ LEU/LEU+	TRISO HALEU	Sels U (HALEU)	Sels U et/ou Pu	HALEU	MOX (U/Pu)
Spectre neutronique	Thermique	Thermique	Thermique	Rapide	Rapide	
Température de sortie	~300 °C	~400-700 °C, jusqu'à 1000 °C pour les VHTR	~550-800 °C		~500-600 °C	
Finalités spécifiques	Electricité (+chaleur)	Electricité et/ou usage de la haute température (hydrogène, dessalement, chauffage urbain, industriel, etc.)	Electricité + Usage de la haute température + potentielle contribution à la fermeture du cycle et transmutation des actinides mineurs en spectre rapide		Electricité + Chaleur + potentielle contribution à la fermeture du cycle (fonction du mode de fonctionnement iso-générateur / sous-générateur)	
Maturité de la filière réacteur (3)					  (sodium plomb)	

● Faible ● Moyenne ● Bonne

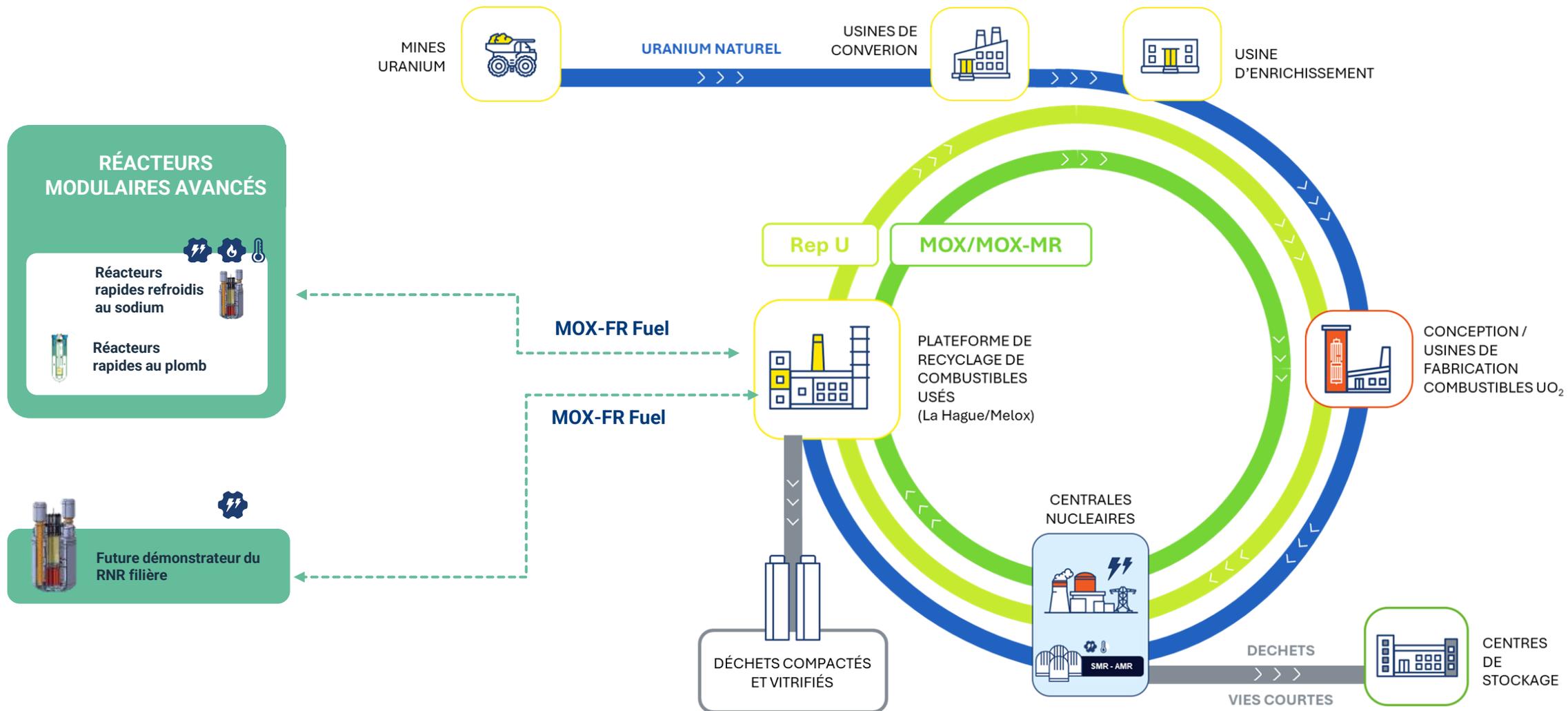
(1) Vision simplifiée, il existe d'autres types de réacteurs génération 3 (ex PHWR/Candu,...), des concepts « hybrides » de génération 4 ainsi que des projets de réacteurs à fusion (considérés comme génération 5)
 (2) Il existe aussi des réacteurs haute température refroidis aux sels fondus (liquide), ex : Blue Capsule
 (3) D'après « Point presse ASN sur les PRM – 29/02/2024

02 • Positionnement d'Orano sur le marché du cycle des SMR/AMR



- Orano suit de façon très attentive le développement de toutes les nouvelles gammes de réacteurs innovants et souhaite accompagner leur développement en coopérant avec les acteurs de ces filières.
- Compte tenu de notre positionnement mondial dans le cycle du combustible nucléaire, Orano coopère aujourd'hui avec toutes les filières de réacteurs innovants et reste agnostique concernant les start-ups dans chacune de ces filières.
- En tant qu'industriel majeur du cycle fermé, Orano collabore plus étroitement avec les acteurs proposant des concepts compatibles avec une stratégie de recyclage des combustibles usés. Cela permet d'augmenter l'économie circulaire de la production d'électricité en économisant des ressources en uranium naturel, et d'avancer vers un nucléaire encore plus durable.

Plateforme de recyclage d'Orano : Un schéma industriel modulaire et flexible, adaptable au déploiement des nouveaux réacteurs avancés



07 • **Positionnement Orano vis-à-vis du Nouveau Nucléaire**

● Perspectives : approvisionnement en matières fissiles

URANIUM NATUREL, une approche durable à deux horizons

Avant l'horizon 2040 :

- Investir pour prolonger la durée de vie de nos sites de production, comme le projet d'extension de Cigar Lake
- Développer de nouveaux projets indépendants, notamment en Asie Centrale

Après 2040:

- Développer des solutions pour sécuriser de nouveaux gisements d'approvisionnement répondant aux défis posés par les tendances dans le secteur minier : plus profond, plus petit, moins riche, minerais complexes, éloigné.

CONVERSION & ENRICHISSEMENT, une approche agile qui s'appuie sur des actifs industriels récents et un savoir-faire reconnu

Sécuriser les approvisionnements en matières :

- Des installations récemment renouvelées et basées sur des technologies de pointe
- Une extension des capacités d'enrichissement en cours de construction

S'adapter aux nouveaux besoins du marché :

- Pour le LEU+ destiné au parc nucléaire existant, une approche agile pour s'adapter aux besoins du marché avec un taux d'enrichissement supérieur à 5%
- Pour les réacteurs modulaires avancés, HALEU (jusqu'à 20%), Orano s'appuie sur son **savoir-faire historique et ses capacités techniques d'enrichissement et de déconversion** pour développer des capacités industrielles, sous réserve d'engagement fermes du marché

Perspectives pour le cycle du combustible : trois étapes avec des besoins technologiques croissants



PROJET INDUSTRIEL À COURT TERME



Maintenir le mono-recyclage dans le parc actuel :
Poursuivre le recyclage avec l'URE et le MOX

Bénéfices vs cycle ouvert :

- 20 à 25% d'économie d'UNat
- Besoin d'entreposage des combustibles usés divisé par 4
- Volume des déchets destinés au stockage géologique profond divisé par 4 et toxicité divisée par 10

PERSPECTIVE MOYEN TERME



Multi-recyclage dans le future parc d'EPR2 avec le déploiement potentiel des combustibles MOX-MR

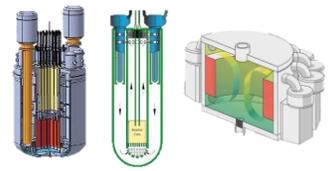


Soutenir le déploiement des nouveaux réacteurs nucléaires, incluant les SMRs and AMRs

Avantages complémentaires :

- Jusqu'à 40% d'économies d'UNat
- Retraitement de tous les types de combustibles (UNE, ERU, MOX)
- Stabilisation de l'inventaire des combustibles usés

AMBITION À PLUS LONG TERME

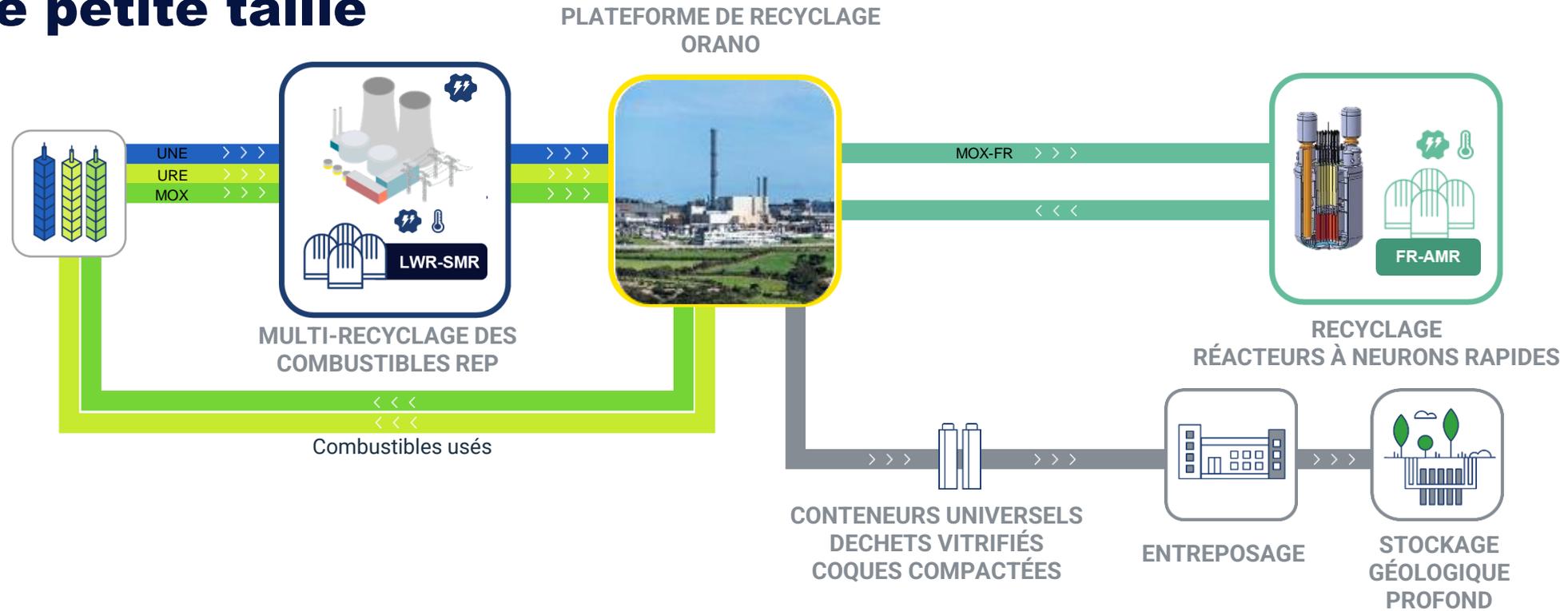


Déploiement futur des réacteurs à neutrons rapides

Vers la fermeture du cycle du combustible :

- Poursuivre les économies d'Unat, au-delà de 40%
- Réduire d'avantage le volume, la durée de vie et le niveau de toxicité des déchets
- Fermer complètement le cycle du combustible avec les RNR : jusqu'à 100% d'économie d'UNat

Assurer la continuité et l'amélioration des solutions de recyclage pour soutenir le déploiement de nouveaux réacteurs, de grande et de petite taille



- Réduire les besoins en uranium naturel et limiter l'exposition à la volatilité du marché
- Fournir une solution pour la gestion de tous les types de combustibles usés, y compris les combustibles MOX
- Réduire le volume et la toxicité, ainsi que l'alléger les exigences en matière de garanties des déchets de hautes activités destinés au stockage géologique profond

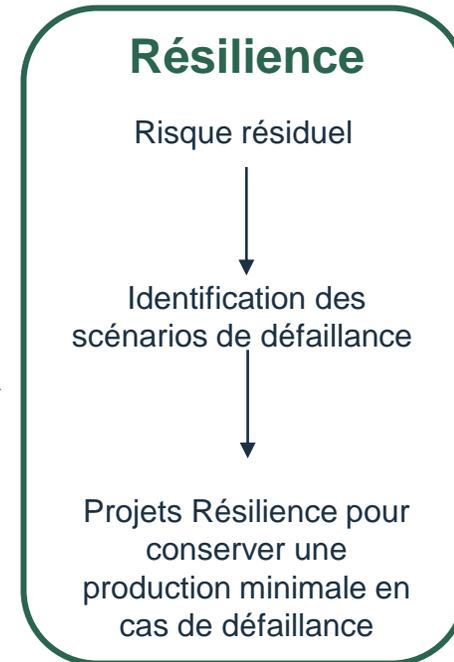
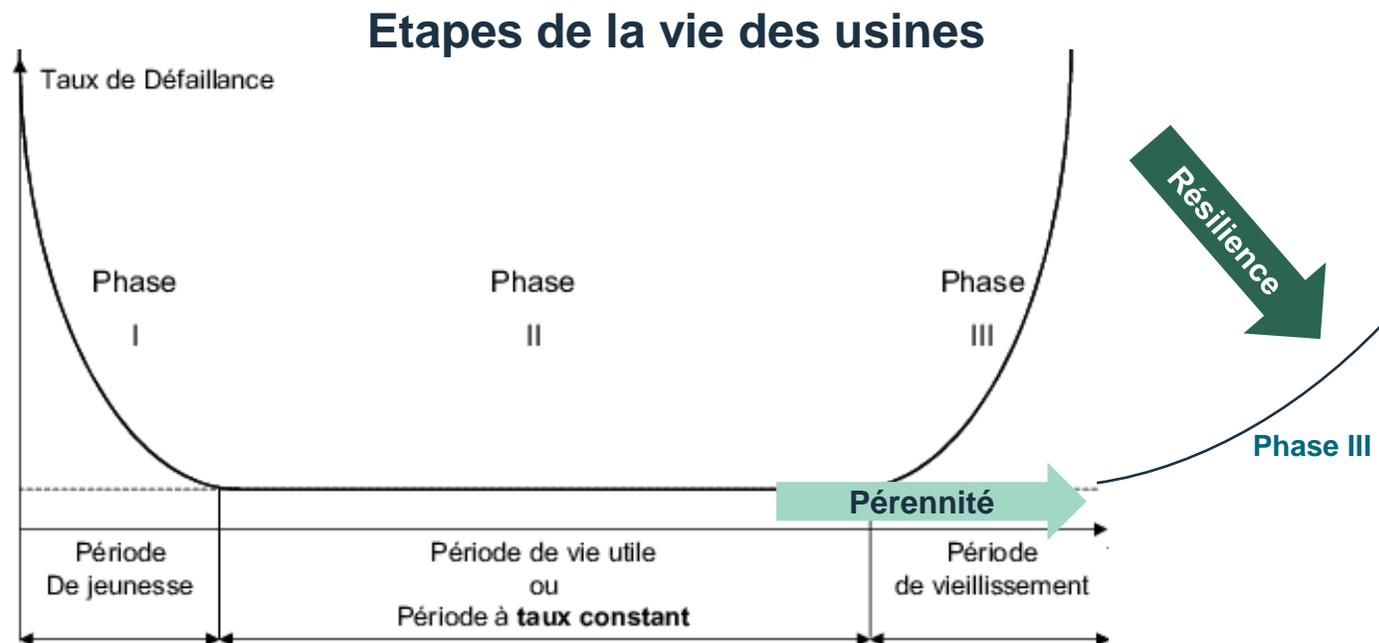
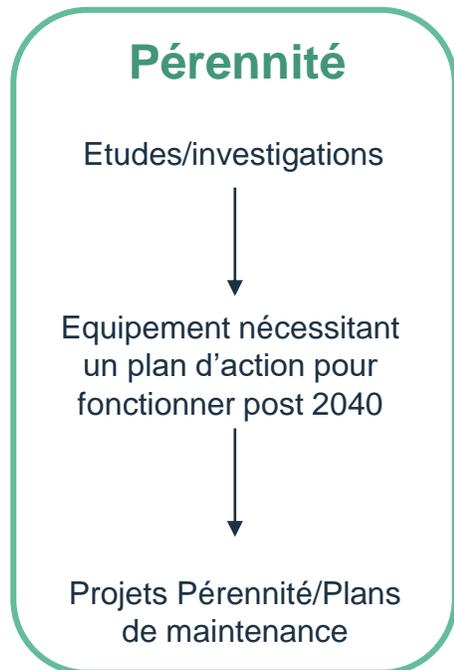
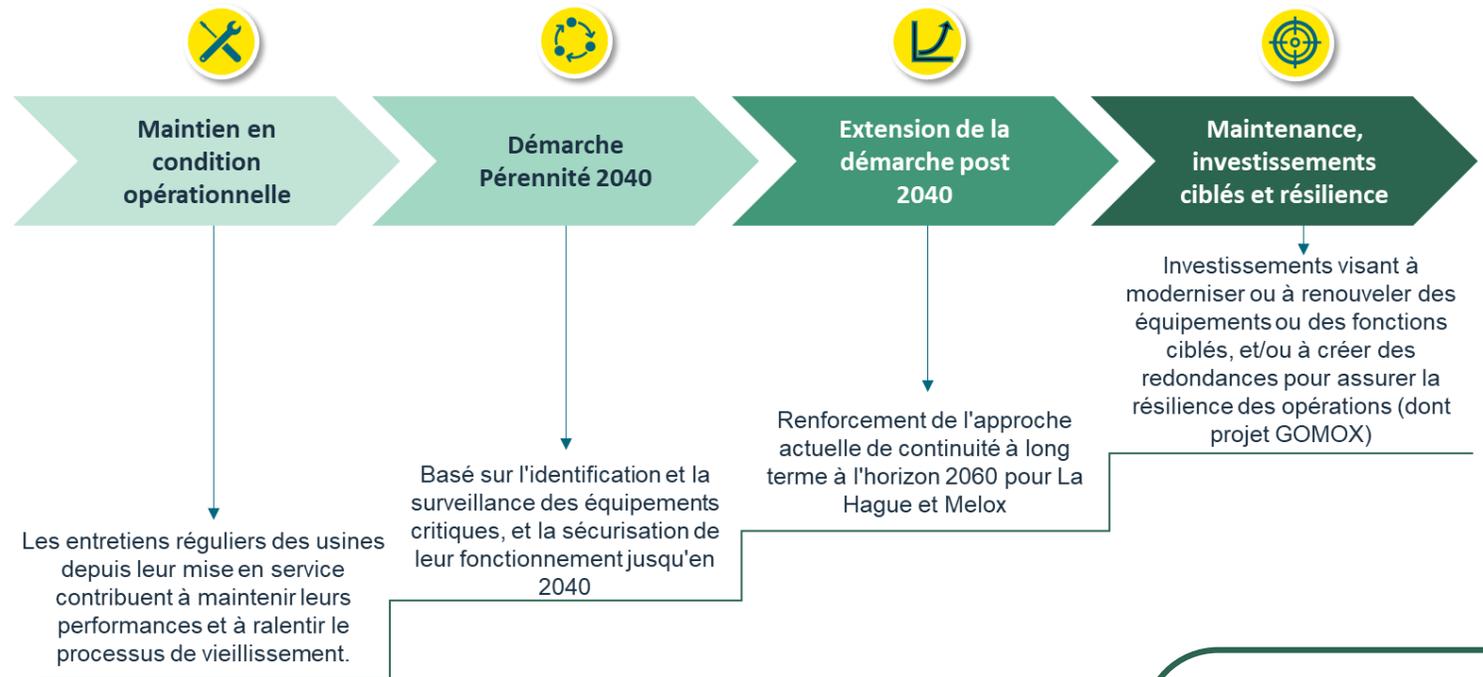


orano

Donnons toute sa valeur au nucléaire

● EXHIBITS

Démarche Pérennité / Résilience



Le combustible de référence MOX-MR

La solution identifiée pour permettre la mise en œuvre à l'horizon 2040/2050 du multirecyclage du Pu issu du traitement de MOX, MOX2, UNE et URE usés est le combustible MOX-MR en gestion partielle (50% MOX-MR-50% UNE).

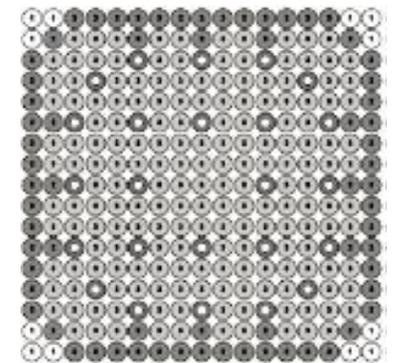
Les principaux éléments dimensionnants :

- 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** : un combustible MOX-MR MIMAS VH

Concept MOX-MR : Produit dérivé du MOX standard

- Tri-teneur en Pu de l'AC MOX EPR2 : 4,04% - 7,15% - 10,78%
- 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

Les caractéristiques des MOX-MR usés sont proches de celles des MOX EPR2 étudiés par l'ANDRA dans le cadre de NNF 2021. L'étude ANDRA avait conclu qu'il n'y avait pas d'impossibilité technique pour stocker ces combustibles.

SMR/AMR: New Needs for New Fuels

○ Back-end management of Advanced Reactors can be approached through their fuel types

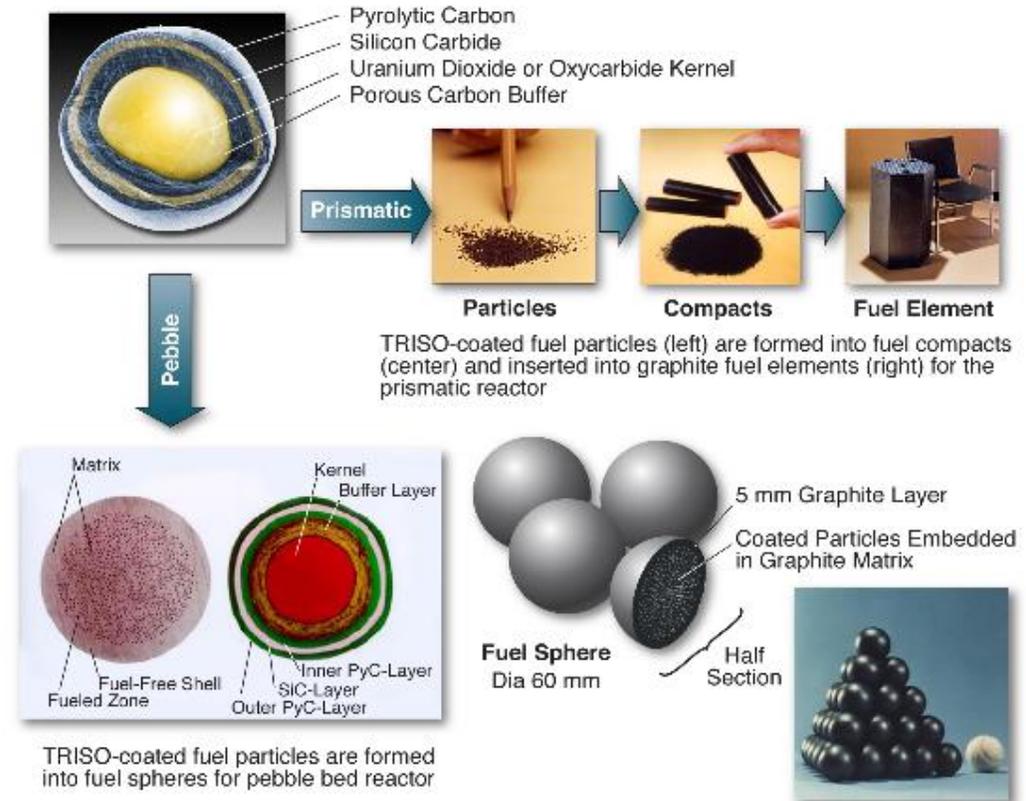
- Oxide/ceramic fuels with cladding
- TRISO fuels
- Metallic fuels
- Liquid salt fuels

- LEU < 5% enriched U-235
- LEU+ 5%-10% enriched U-235
- HALEU 10%-20% enriched U-235
- HEU \geq 20% enriched U-235
- Mixed U & Pu (oxide, metal, or salt)
- Thorium (oxide, metal, or salt)

SMR/AMR: New Needs for New Fuels

Example of the TRISO fuels

- Fuel kernel encapsulated by four layers of SiC and carbon-based materials
- Arranged in prismatic blocks of graphite or in billiard ball-sized pebbles of graphite
- For use in either high-temperature gas or molten salt-cooled reactors, with high burn-up potential
- Containment of fission products remain in TRISO particles for temperatures up to 1600°C
- No successful recycling efforts demonstrated yet and will have high waste-to-fuel ratio
- Residual salt removal may be necessary for MSR fuels
- Treatment of fuel to remove/reduce graphite content potentially needed for storage and for disposal



09-GA00711-01-R1

SMR/AMR: Treatment and Reprocessing/Recycling

Fuel Type	First Option	Second Option
Oxide/Ceramic	<p>Aqueous Reprocessing & Recycling</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demonstrated mature process 	<p>Electrochemical/Pyro-Processing Recycle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demonstrated at lab-scale - Maturation of final waste forms needed
Metallic	<p>Electrochemical/Pyro-Processing Recycle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demonstrated process in need of industrialization - Maturation of final waste forms needed 	<p>Aqueous Reprocessing & Recycling</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demonstrated process (with UNGG)
TRISO	<p>Conditioning</p> <ul style="list-style-type: none"> - Remove/reduce graphite in preparation for direct disposal 	<p>Aqueous Polishing Recycle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Challenge to remove SiC & PyC layers - Lab-scale demo to be performed first
Liquid	<p>Aqueous Reprocessing & Recycling</p> <ul style="list-style-type: none"> - Performed on-line for fuel salt 	<p>Electrochemical/Pyro-Processing Recycle</p> <ul style="list-style-type: none"> - Potentially performed for bled off wastes

SMR/AMR: Takeaways

- **Advanced Nuclear Reactors will offer promising solutions for low-carbon, safe, reliable and affordable power generation, process heat, and/or hydrogen production**
- **Designing the backend of the fuel cycle from the beginning as a system is essential, vital to the success of new reactors**
- **When possible, closed fuel cycle offers many advantages from a sustainability point of view (waste minimization, preservation of resources, reuse of valuable materials, optimization of final disposal)**
- **Ultimately multiple solutions exist for the backend of the fuel cycle for these advanced reactors and their fuel types**
- **Orano is willing to support the sustainable deployment of the next generation of Advanced Reactors fuel cycle systems and the implementation of efficient solutions for backend management**