

Le Multi-Recyclage en REP

Conférence SFEN Ile-de-France Ouest
Paris La Défense, 18 novembre 2024



Cécile EVANS (Orano), Guillaume VAAST (EDF),
François SUDREAU (CEA), Olivier TOUGAIT (Framatome)

CONFIDENTIALITE

Ce document ainsi que toute information qu'il contient et divulguée dans le cadre de toute discussion en lien avec ce document sont protégés par des dispositions applicables en matière de propriété intellectuelle telles que définies selon l'accord Cycle, Scénarios, Réacteurs entre CEA, EDF, Framatome et Orano dit Accord 4P CSR.

Toute reproduction, modification, transmission à tout tiers ou publication totale ou partielle du document et/ou de son contenu est interdite sans l'accord préalable de son émetteur.

Ce document et toute information qu'il contient ne doivent en aucun cas être utilisés à d'autres fins que celles pour lesquelles ils ont été communiqués.



Règles de protection de l'information

- Accessibilité libre (C = 0)
- Accessibilité interne
limitée au projet
ou à certaines de ses
composantes (C = 1)
- Accessibilité restreinte
à des personnes ou fonctions
ayant à en connaître (C = 2)
- Accessibilité très limitée
(confidentiel) (C = 3)
- Ce document contient du Savoir-Faire**

1. Introduction
2. Objectifs stratégiques du multi-recyclage en REP
3. Projet MRREP : une approche systémique
4. Conception combustible et études du comportement en réacteur
5. Etudes de scénarios de déploiement
6. Conclusion

1. Introduction

LE CYCLE DU COMBUSTIBLE FRANCAIS

Chiffres clés

LE PARC FRANCAIS

- **56 REP en exploitation + EPR Flamanville 3 en phase de montée en puissance**
- **Capacité totale installée**
900 MWe: 32 tranches
1300 MWe: 20 tranches
1450 MWe: 4 tranches
1600 MWe: 1 tranche
- **Vers une augmentation de production** (réduction des durées d'AT, augmentations des durées de cycles, augmentation de puissance...)
- **Extension des durées d'exploitation au-delà de 40 ans**

A FIN 2023

101 400 Assemblages Combustibles (AC) chargés en réacteur
(incluant 6 100 AC MOX et 1 400 AC URE)

Parc

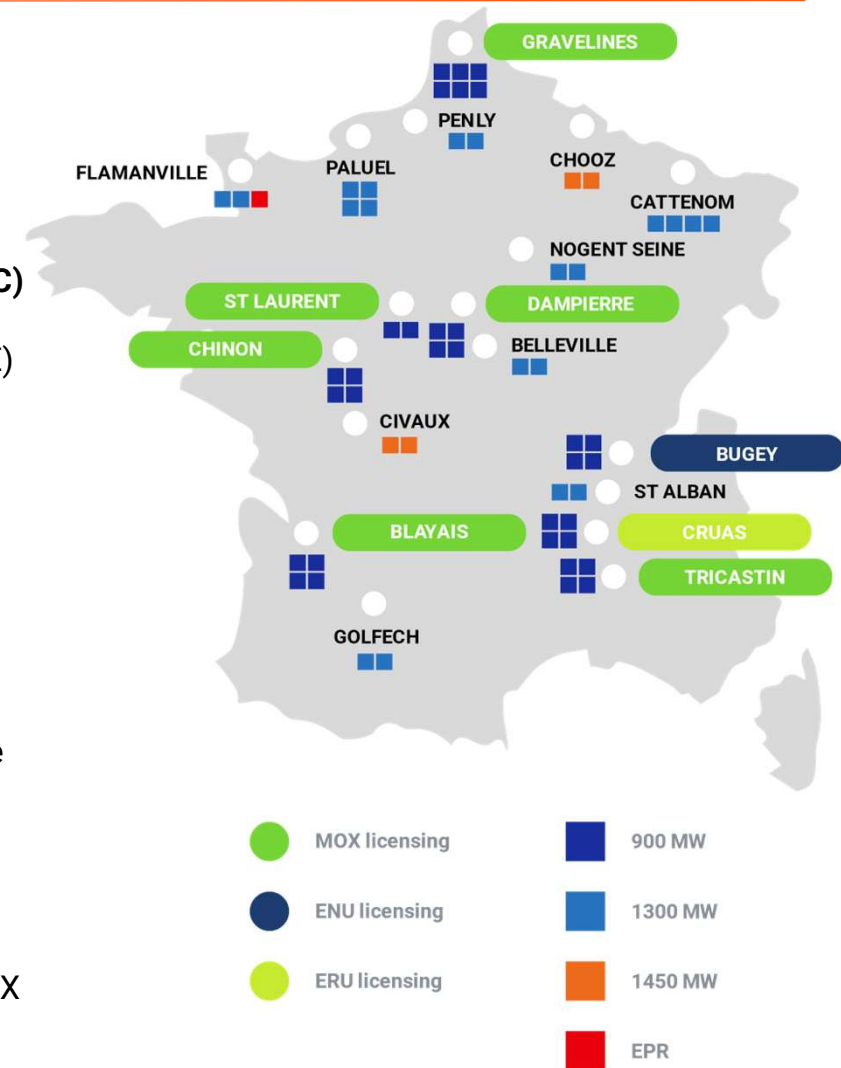
56 REP / 61.3 GWe
utilisant environ 7000 tonnes d'Unat/an

Environ 1 200 tonnes/an de combustibles frais chargés en REP

Environ 1 100 tonnes/an de combustibles usés traités à La Hague

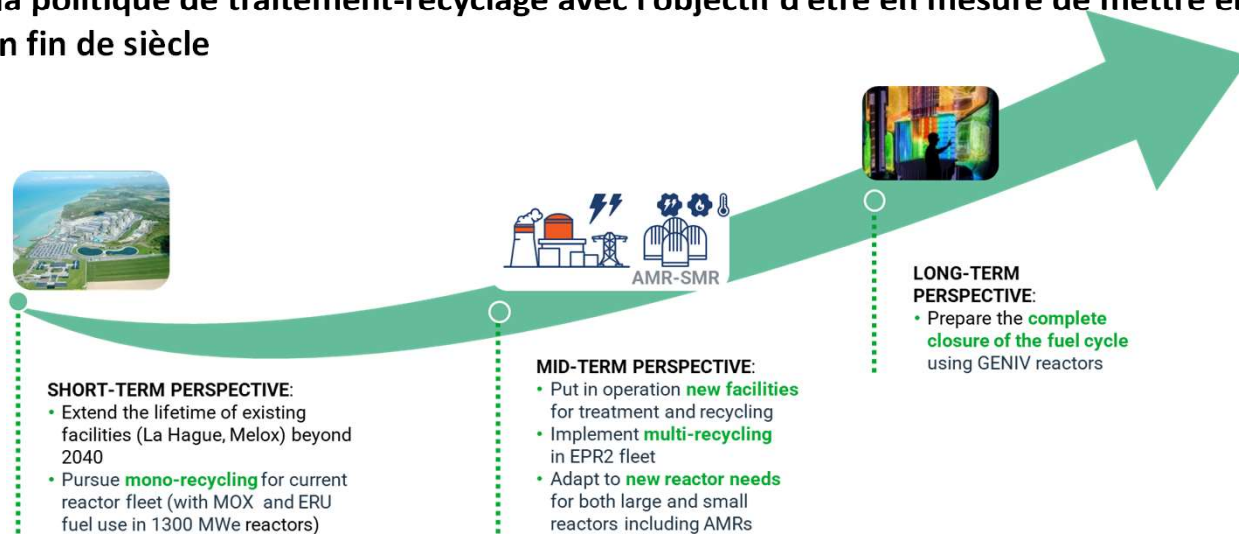
Environ 1 045 tonnes/an d'URT extrait à La Hague

Environ 100 tonnes/an de combustibles MOX fabriqués à MELOX



1. Introduction

- Le Pu et l'Uranium de retraitement (URT) des combustibles à base d'Uranium Naturel Enrichi (UNE) usés sont recyclés en France dans les réacteurs EDF
 - 4 tranches 900 MWe (Cruas) sont licenciées pour des gestions à base d'Uranium de Retraitement Enrichi (URE)
 - 22 tranches de 900 MWe utilisant du combustible MOX fuel (+2 tranches en 2028)
 - La pastille combustible MOX contient du Pu et de l'U appauvri
 - Environ 30% d'AC MOX sont chargés en réacteur
- Licensing en cours pour étendre l'utilisation d'URE et de MOX sur le palier 1300 MWe
- Depuis 2018, EDF-Framatome-CEA-Orano évaluent la faisabilité industrielle de recycler tous les combustibles usés, y compris les URE et les MOX, avec la technologie REP, en transition vers un parc de Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR) d'ici la fin du siècle
- En février 2024 le Conseil de Politique Nucléaire (CPN) a confirmé les principales orientations concernant l'aval du cycle jusqu'à la fin du siècle : poursuite de la politique de traitement-recyclage avec l'objectif d'être en mesure de mettre en œuvre la fermeture du cycle du combustible à horizon fin de siècle



2. Objectifs stratégiques du multi-recyclage en REP

En accord avec la stratégie définie, la faisabilité industrielle du MRREP est instruite au travers d'un projet dédié, soutenu par l'Etat.

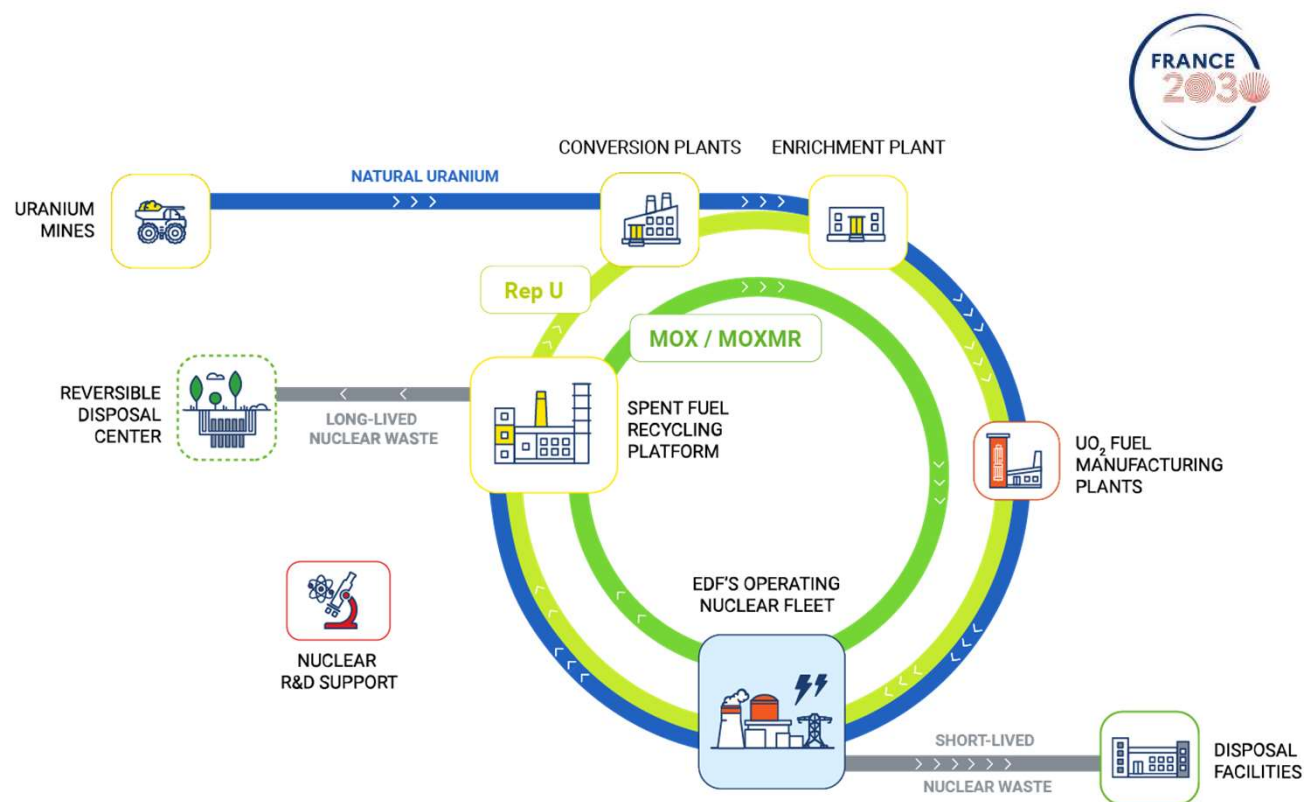
1. Minimiser les déchets/inventaires matières par rapport au mono-recyclage + capacité à transitionner vers une flotte de RNR

- Stabilisation des matières (Pu, URT) et des inventaires de CU totaux
- Réduction des besoins en U naturel

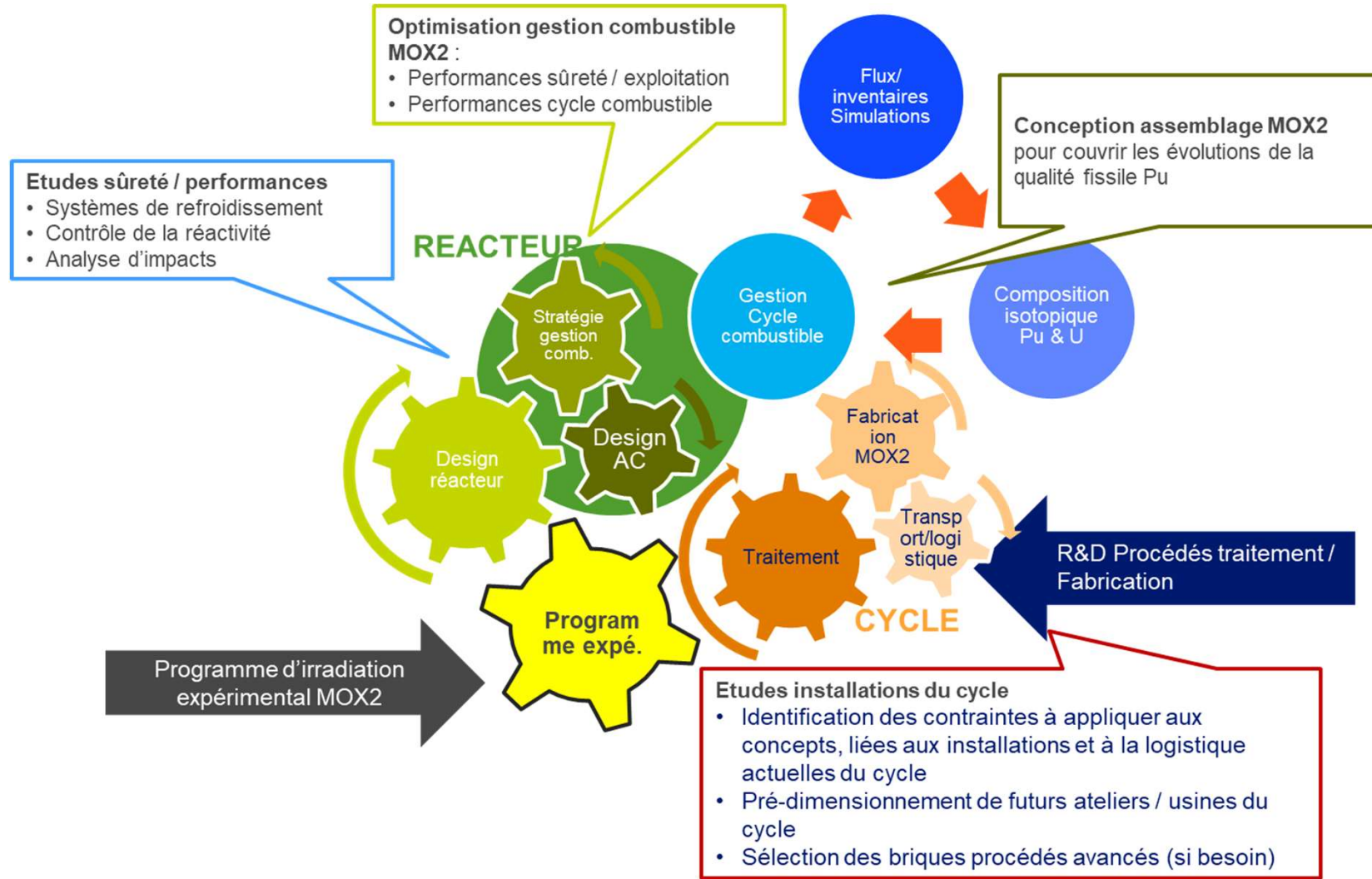
2. Evaluer la faisabilité industrielle du multi-recycling en REP :

- Possibilité d'un déploiement, au cours de la décennie 2040, dans les futurs EPR2
- Evaluer les adaptations éventuelles des usines de l'aval du cycle et intégrer au besoin les spécificités dès la conception des futures usines

3. Evaluer les intérêts technico-économiques du multi-recyclage en REP en comparaison avec le mono-recyclage



3. Projet MRREP : une approche systémique



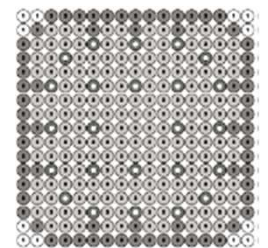
4. Conception combustible et études du comportement en réacteur 1/2

- Vecteur isotopique du Pu du combustible MOX2 frais : baisse de la quantité d'isotopes fissiles vs. MOX actuel (une partie du Pu recyclé provient d'AC MOX usés)
- Besoin d'un apport d'isotopes fissiles afin d'atteindre les valeurs cibles de taux de combustion / longueurs de campagne. Deux possibilités explorées :
 - Remplacer l'U appauvri par de l'U enrichi au sein de la pastille MOX pour compenser la plus faible qualité fissile au niveau AC = « concept MIX »
 - Conserver le MOX standard et compenser au niveau cœur l'apport en matières fissiles = « concept MOX-MR »
- Les 2 concepts ont été étudiés et leurs avantages / inconvénients analysés au regard d'une utilisation en EPR2 :
 - **MOX-MR = produit de référence**
 - Basé sur la technologie MOX bénéficiant d'un long retour d'expérience (en fabrication comme en exploitation)
 - Permettant d'atteindre les objectifs industriels, avec un moindre effort puisque le design d'AC est bien connu
 - MIX permettant d'envisager une qualité fissile encore plus dégradée mais nécessitant un effort de développement / qualification pastille important

MOX-MR = concept dérivé du MOX standard

- AC MOX Pu tri-teneurs : 4,04% - 7,15% - 10,78%
- U appauvri en support (0,25% ⁵U)
- Qualité fissile Pu ~55% à ~52,5% (vs ~63% pour le MOX): moins réactif que le MOX (compensation au niveau du format de la recharge)

➔ **Produit similaire au MOX actuel**



4. Conception combustible et études du comportement en réacteur 2/2

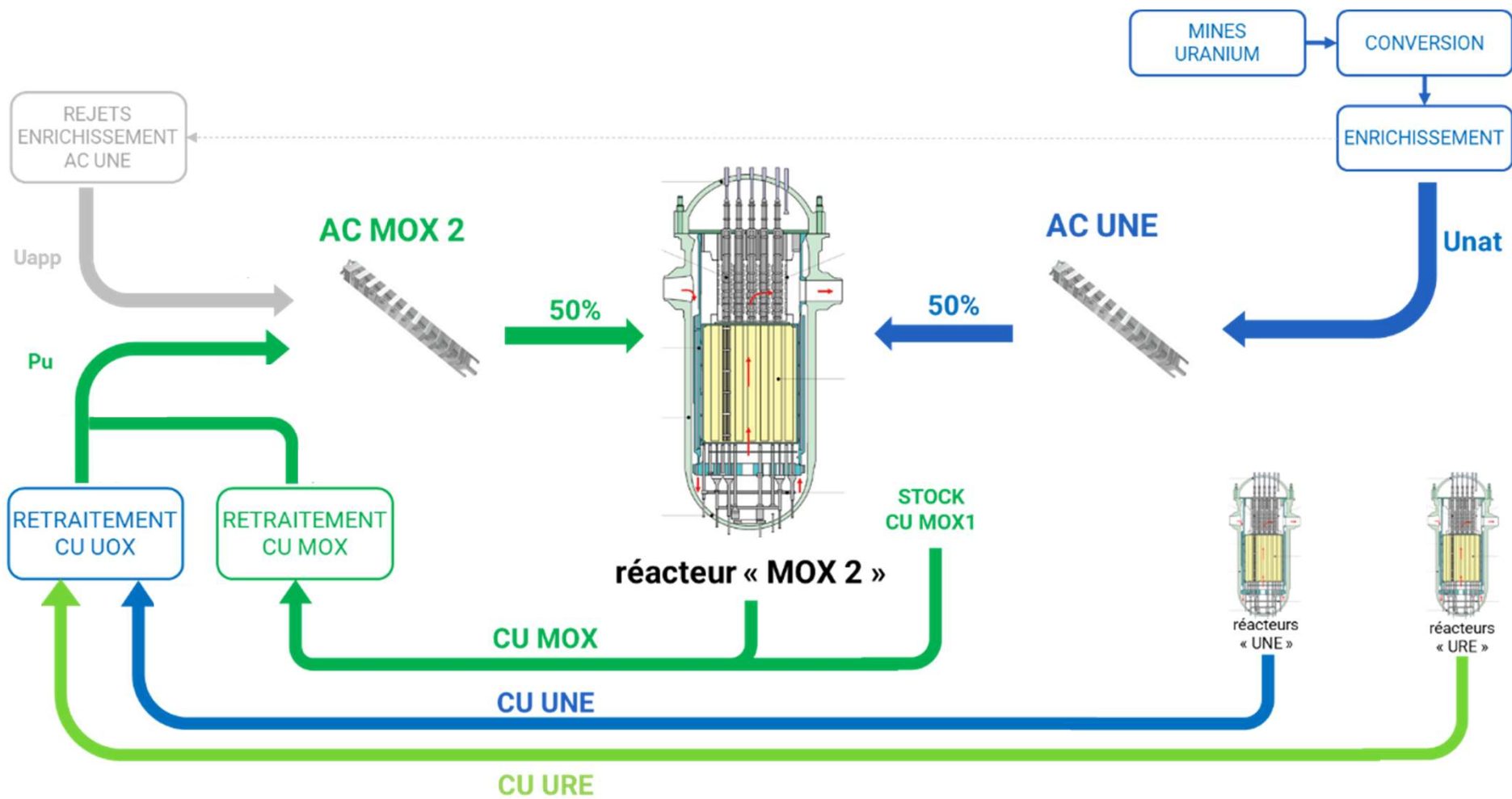
- Des plans de chargement 100% MOX2 et mixtes MOX2/UO2 ont été étudiés en considérant les critères de sûreté et de performance applicables à l'EPR2 (concentration bore, marges d'arrêt réacteur / manœuvrabilité) :

➔ Une gestion partielle 50% MOX-MR permet de recycler le Pu issu des UNE/URE/MOX

Concept	MOX-MR
Pu content (low / medium / high) (%)	4.04 / 7.15 / 10.78
Pu average content (%)	9.54
Support ²³⁵ U enrichment in MOX assemblies (%)	0.25
²³⁵ U enrichment in UO2 assemblies (%)	4.2
Number of MOX pins	12 / 68 / 185 (265)

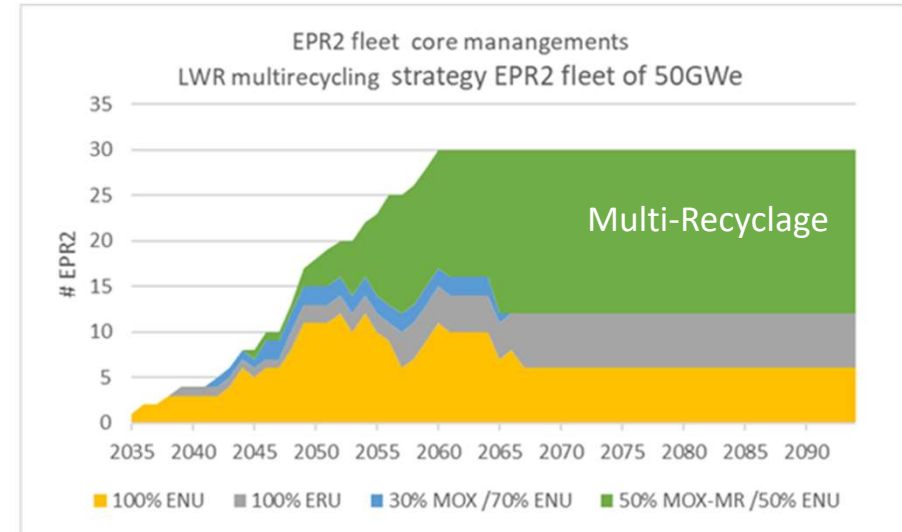
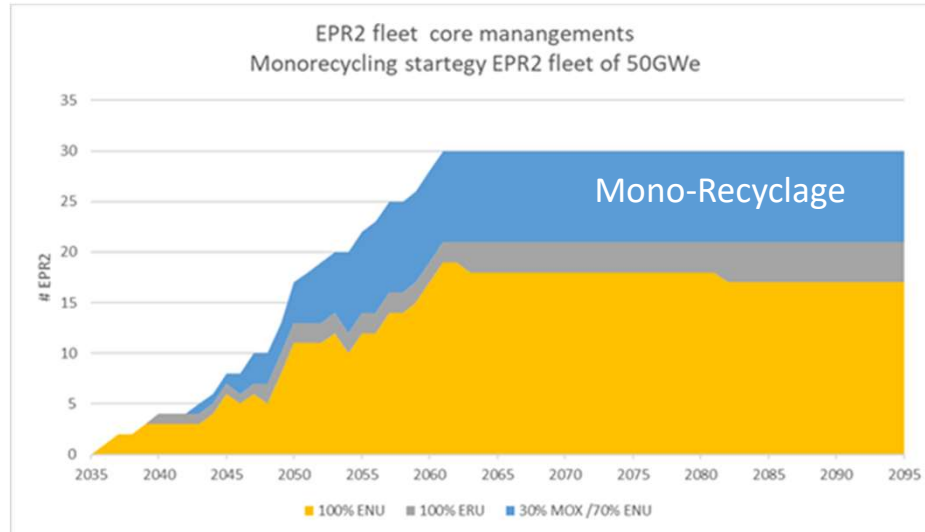
	Reference MOX2 assembly: Pu content: 9,54% ²³⁵ U enrich: 0.25 % (55% Pu fissile quality) UO ₂ assembly: ²³⁵ U enrich: 4.2 %
²³⁵ U consumption (kg/load)	800
Pu consumption (kg/load)	173
²⁴¹ Am production (kg/load)	3,4
²³⁷ Np production (kg/load)	17
²⁴² Cm production (kg/load)	5

- Recharge à 92 AC : 48 AC UNE à 4,2% of ²³⁵U + 44 AC MOX-MR 9,54% Pu
- Les paramètres obtenus respectent les principales exigences de sûreté et de performance
- La seule adaptation (mineure) identifiée afin de déployer en EPR2 une gestion MOX-MR à 50%, est d'enrichir à 50% minimum la teneur en Bore-10 des grappes d'arrêt
- Les analyses complémentaires se poursuivent afin de confirmer les résultats obtenus. En cas de besoin d'accroître les cycles d'irradiation avec une qualité fissile Pu encore plus faible, des leviers complémentaires existent tels que l'augmentation de la teneur en Pu, ou l'enrichissement en ²³⁵U des AC UO₂

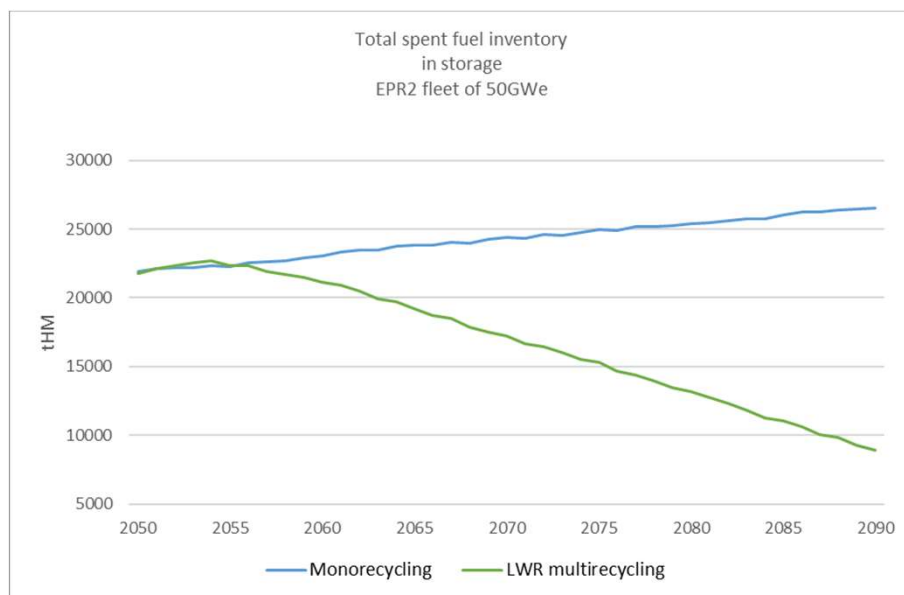


5. Etudes de scenarios de déploiement

- Sur la base d'hypothèses industrielles considérant la durée d'exploitation du parc actuel, leur renouvellement avec des EPR2, le déploiement de gestions combustibles UNE/URE/MOX/MOX-MR, ainsi que les capacités des usines de l'aval du cycle
- Plusieurs scénarios ont été simulés considérant à terme différentes tailles de parc EPR2 : 30 GWe, 40GWe et 50GWe (respectivement 18/24/30 tranches EPR2) :
 - Poursuite du mono-recyclage en EPR2
 - Transition du mono-recyclage vers le multi-recyclage en EPR2
 - Gestions partielles 50% MOX-MR déployées à partir de 2050 jusqu'à l'arrivée des RNR,
 - L'URT est recyclé dans les combustibles URE dans tous les cas (gestion 100% URE)

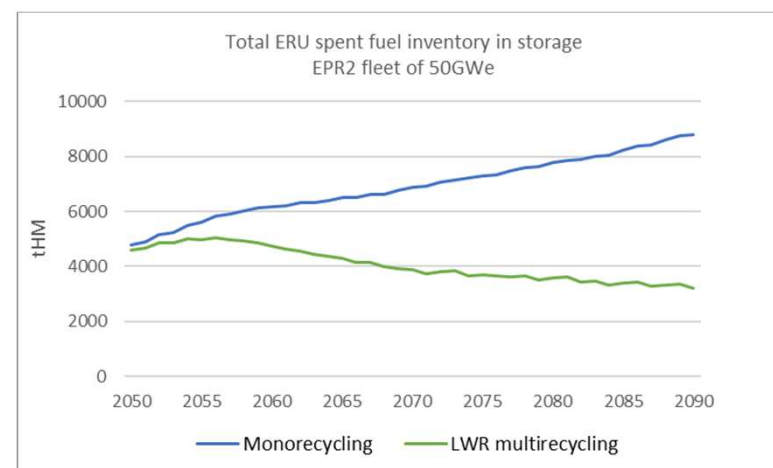
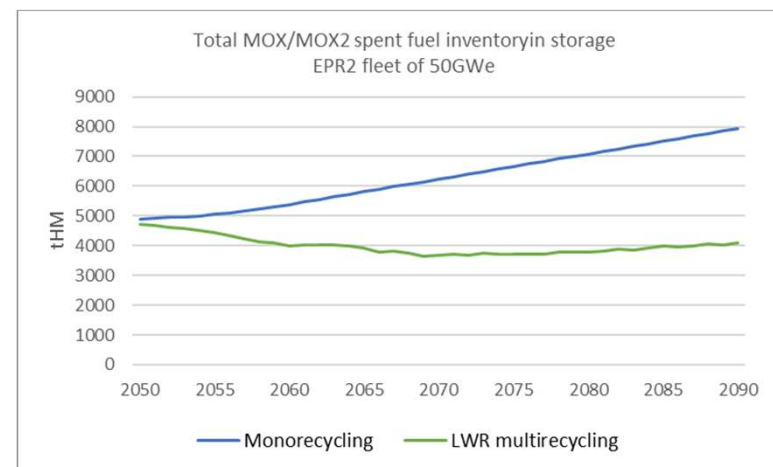


5. Etudes de scenarios de déploiement

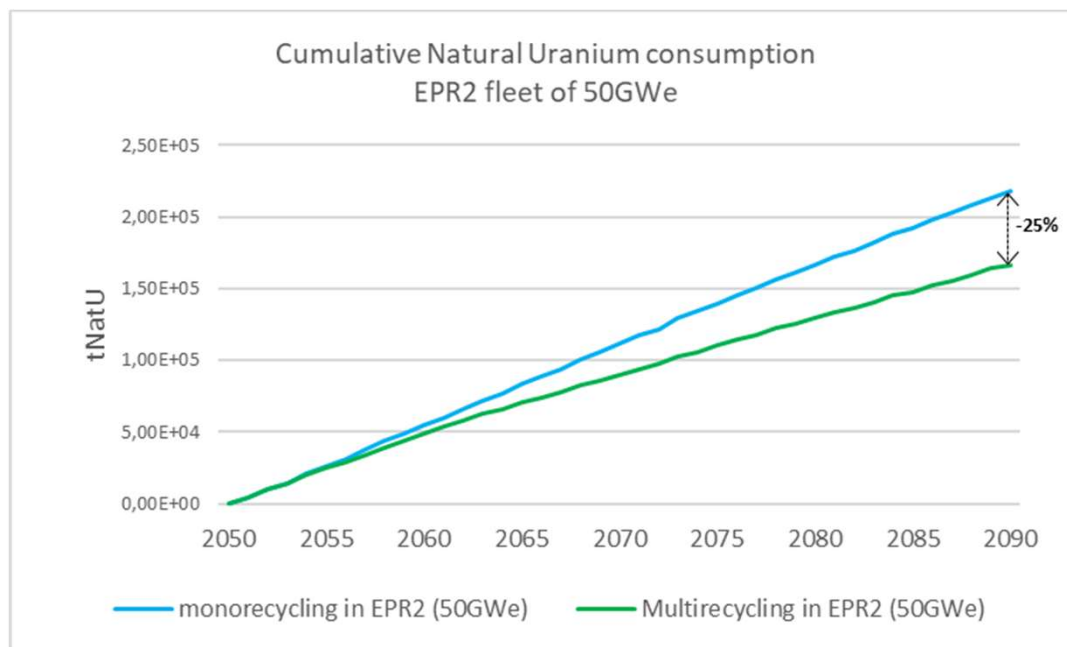


Les scénarios de déploiement du multi-recyclage permettent :

- **La valorisation de tous les types de CU et l'optimisation de l'inventaire total de CU : stabilisation et même réduction des inventaires en CU selon le niveau de déploiement des gestions**
- **Réduction de l'inventaire en MOX/MOX-MR ainsi que des URE**



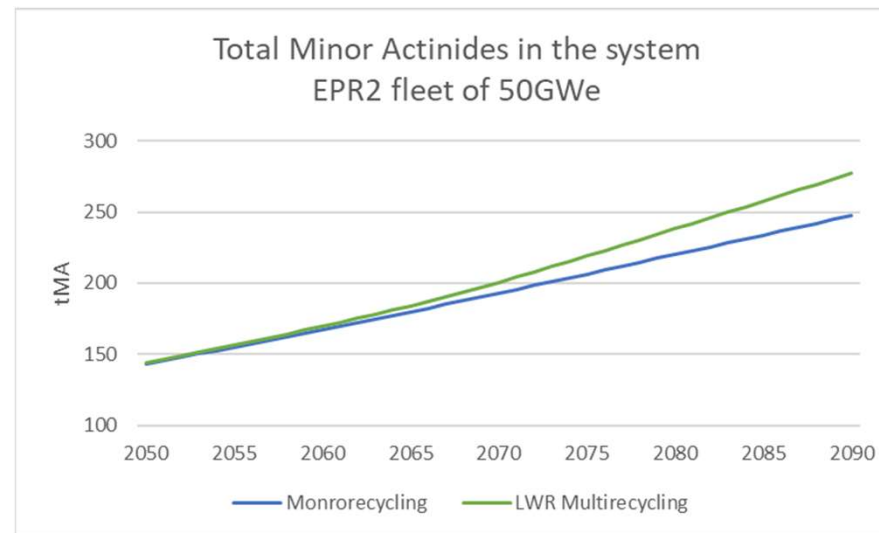
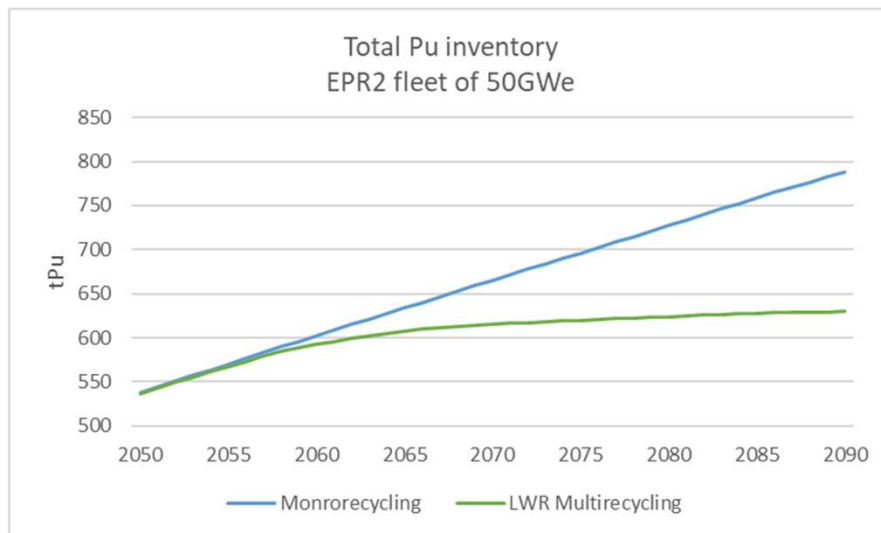
5. Etudes de scenarios de déploiement



La mise en œuvre du multi-recyclage en REP de manière intensive permet de :

- réduire le besoin en ressource Unat de 20% supplémentaire comparé au mono-recyclage, soit un gain d'environ 40% comparé au cycle ouvert
- réduire les émissions carbone de l'industrie nucléaire, l'extraction minière étant le principal contributeur, réduisant ainsi l'impact environnemental











5. Etudes de scenarios de déploiement



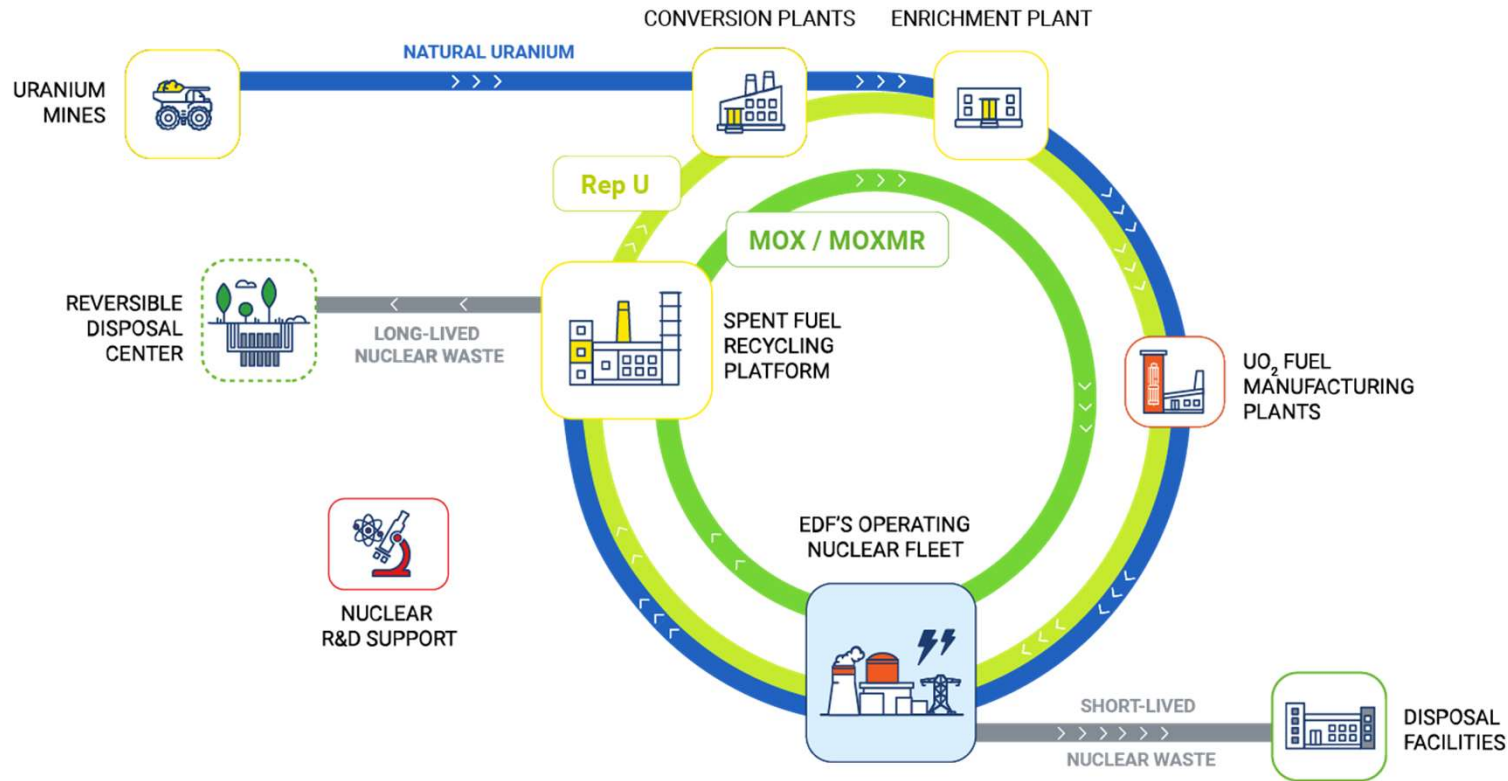
L'option de transition du multi-recyclage en REP permet :

- **La stabilisation de l'inventaire en Pu** via un équilibre entre génération de Pu lors de l'irradiation des UOx et consommation de Pu avec les MOX-MR
- Avec une légère augmentation de l'inventaire en actinides mineurs, comparé au mono-recyclage, en raison d'une utilisation accrue du Pu en réacteur

6. 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 de CU</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>	

Merci !



orano



edf

framatome