

# Les ramifications du cycle du combustible

Quelles perspectives d'avenir ?

Tristan Kamin

22/04/2021

Pour la SFEN Rhône-Ain-Loire



orano

# Sommaire

## 1. Le cycle actuel

- a. Traitement du combustible usé
- b. Monorecyclage du plutonium
- c. Cas de l'uranium issu du traitement

## 2. Perspective courte

- a. Pérennité du traitement
- b. MOX 1300
- c. Cas de l'uranium issu du traitement

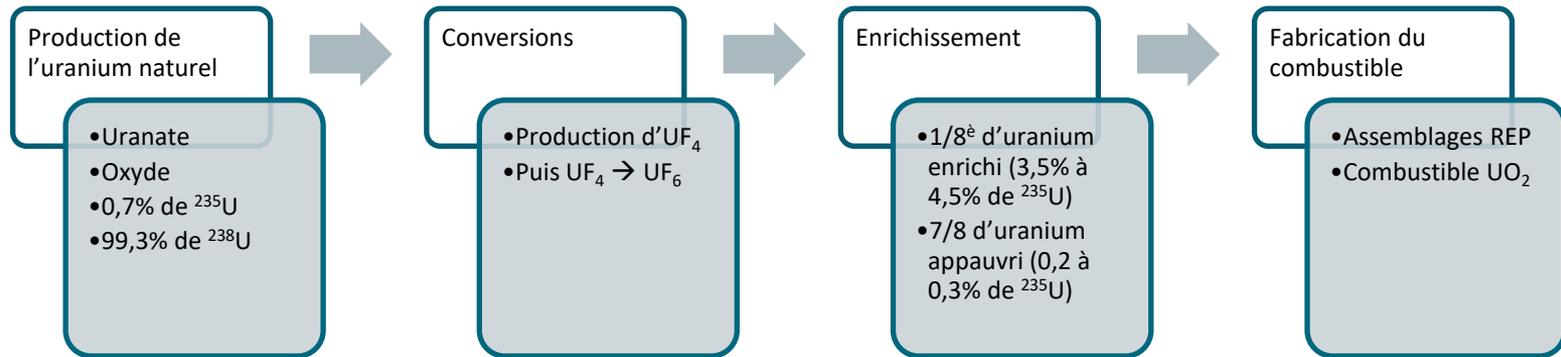
## 3. Perspectives longues

- a. Non-renouvellement du parc nucléaire
- b. Renouvellement du parc en EPR
- c. Renouvellement du parc en EPR puis RNR

# 01

**Le cycle actuel**

# L'amont du cycle



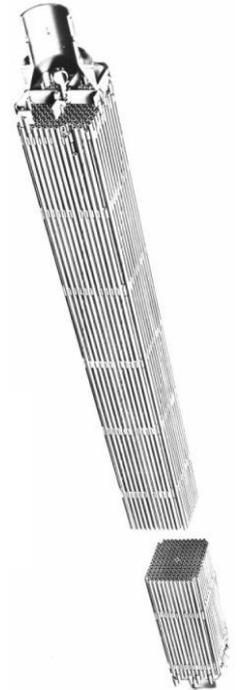
# Combustible « Frais »

Empilement de pastilles céramique UO<sub>2</sub>

Uranium enrichi entre 3,5% et 4,5% en 235U

Crayons de 4 à 5 m de long

Groupés 17x17 en « Assemblages combustibles »  
(dans le cas des REP français à minima)



# Combustible « usé »

Fission de  $^{235}\text{U}$  → Production de produits de fission (2/3 de l'énergie produite)

Captures de neutrons sur le  $^{238}\text{U}$  → transmutation en  $^{239}\text{Pu}$

Captures sur le Pu → production de  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ... et autres actinides dits mineurs : Np, Am, Cm

Fission du Pu (surtout du  $^{239}\text{Pu}$ ) → production de produits de fission (1/3 de l'énergie)

Très grande diversité de produits de fission :  $^3\text{H}$ , Ge, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba

Captures sur les structures métalliques → production de produits d'activation

Diversité des produits d'activation : C, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zr, Nb, Sn

# Bilan combustible

## Pour 1000 g d'uranium initialement...

- $^{238}\text{U}$  : 960 g
- $^{235}\text{U}$  : 40 g

+ Oxyde, hélium, gaines et structures métalliques.

## ...après 47,5 GWj/t d'irradiation

- $^{238}\text{U}$  : 925 g
- $^{235}\text{U}$  : 7 g
- $^{236}\text{U}$  : 5 g
- $^{239}\text{Pu}$  : 6 g
- autresPu : 6 g
- Actinides mineurs : 1 g
- Produits de fission : 50 g

+ Oxyde, hélium, gaines et structures métalliques, dont produits d'activation.

# Bilan combustible

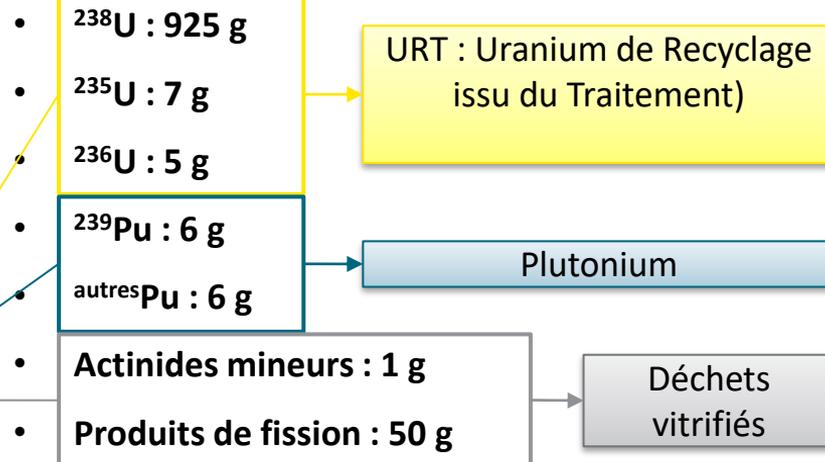
## Pour 1000 g d'uranium initialement...

- $^{238}\text{U}$  : 960 g
- $^{235}\text{U}$  : 40 g

+ Oxyde, hélium, gaines et structures métalliques.

Principe du traitement :  
Découpe, dissolution du combustible et  
séparation chimique

## ...après 47,5 GWj/t d'irradiation



+ Oxyde, hélium, gaines et structures métalliques, dont produits d'activation.

# Aval du cycle

Déchets → entreposage puis stockage

URT → Ré-enrichissement (URE : Uranium de retraitement enrichi)

- De 1994 à 2013, 4350 tonnes d'URT enrichies en 540 tonnes d'URE
- Depuis, 1030 tonnes/an d'URT entreposées
- Entreposage actuel d'environ 30 000 tonnes

Plutonium

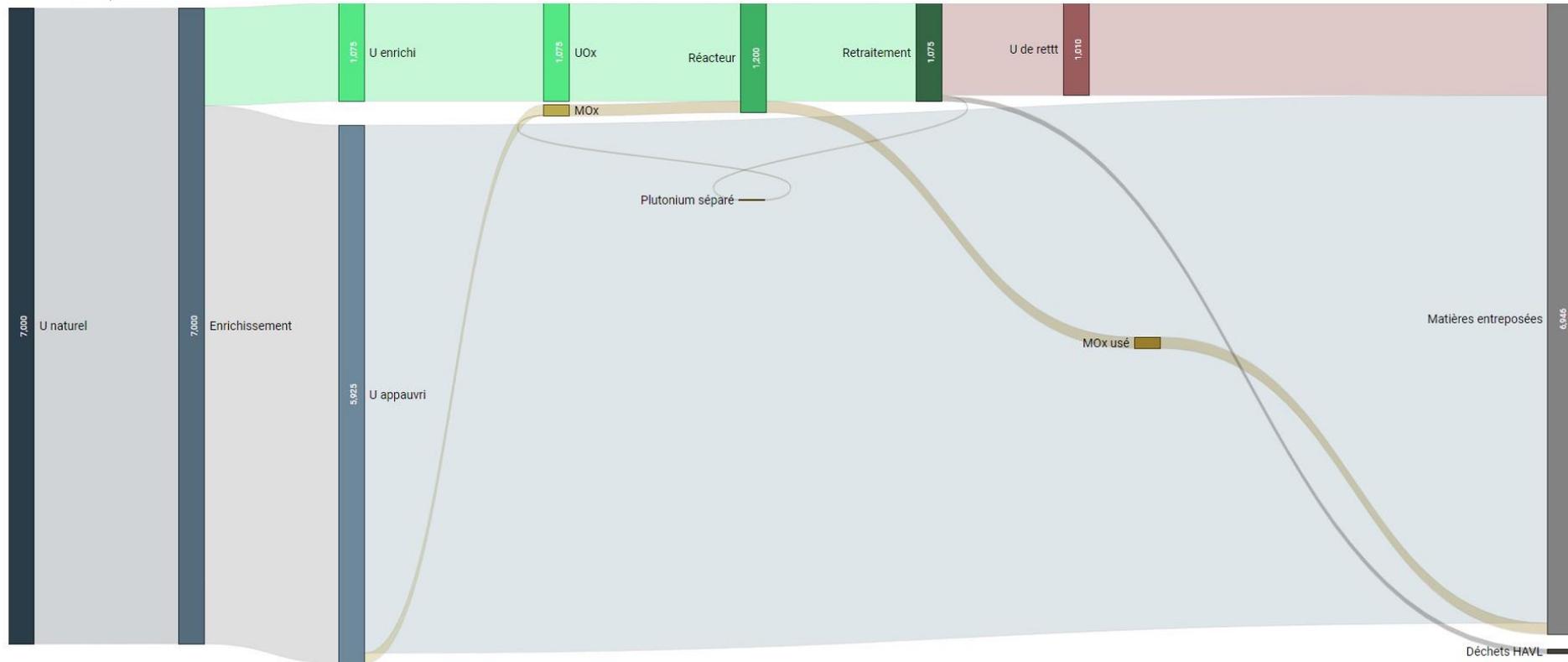
- Dilution des 11 tonnes séparées par an dans environ 100 tonnes d'uranium appauvri pour produire le combustible MOX (Mixed oxides)
- 22 réacteurs de 900 MW consomment du MOX à hauteur de 1/3 de leur combustible, sur 24 autorisés

# Aval de l'aval

Sur environ 1200 tonnes (ML) de combustible déchargées annuellement (les bonnes années)

- 100 tonnes de MOX usé → entreposé, ni traité, ni recyclé
- 1070 à 1100 tonnes de combustible ordinaire (UNE : Uranium naturel enrichi) traité et recyclé
- 0 à 30 tonnes d'URE usé → entreposé, ni traité, ni recyclé

# Bilan matière



# Entreposages actuels de matières

## Combustibles usés

### UNE, URE, MOX

Environ 13 800 tonnes fin 2016, dont  
11 400 d'UNE, 1 800 de MOX, 600  
d'URE

Dont 9 700 tonnes dans les piscines  
d'Orano La Hague, sur une capacité  
d'environ 14 000 tonnes.

Fermetures de réacteurs moxés :

- Manque d'exutoire au Pu, donc moins de traitement
- Perspective de saturation des piscines début décennie 2030

## Uranium appauvri

320 000 tonnes entreposées en France  
à fin 2016

Forme  $UF_6$  ou  $U_3O_8$

Réparties entre le Tricastin et  
Bessines-sur-Gartempe (+ quelques  
centaines de tonnes entre Malvézi,  
Mélox et les sites CEA)

Potentiel fissile équivalent à environ  
60 000 t d'uranium naturel

## Uranium de retraitement

Environ 30 000 tonnes entreposées fin  
2016

Environ 10% appartiennent à des  
clients étrangers

# Entreposages actuels de matières

## En complément :

- **Combustibles usés RNR (120 t)**
- **Combustibles usés de la défense nationale (177 t)**
- **Plutonium séparé non irradié sous toutes ses formes (69 t dont 16 appartenant à des clients étrangers)**
- **Autres combustibles usés civils (59 t)**
- **Rebuts MOX (267 t)**

# 02

**Perspectives à court  
terme**

# Les principaux enjeux

## Optimisation des matières

- Maîtrise de l'inventaire URT
- Devenir de l'uranium appauvri

## Pérennité, dont les enjeux forts suivants :

- Saturation des piscines d'entreposage
- Limitation des entreposages de plutonium séparés
- Fermeture programmée de réacteurs moxables

# Optimisation : cas de l'URT

## Annonces d'EDF

- Reprise de l'enrichissement en 2023
- Retour à l'URE pour les 4 réacteurs de Cruas
- Conversion à l'URE de 3 réacteurs de 1300 MW à partir de 2027
- Économie annuelle d'uranium naturel d'environ 1000 tonnes
- Réduction progressive de l'inventaire

## Enjeux

- Démonstration de sûreté et, si besoin, adaptations des réacteurs de 1300 MW
- Équilibre économique : sous-traitance de l'enrichissement de l'URT, compétition avec l'uranium naturel

# Optimisation : cas de l'appauvri

## Réutilisations possibles

- Dans le MOX : environ 100 tonnes par an, à comparer aux 6 000 à 7 000 tonnes produites
- Ré-enrichissement : entre 0,2% et 0,3% de  $^{235}\text{U}$  (contre 0,7% initialement), donc enrichissement possible d'une partie en fonction de l'équilibre économique entre le coût de l'uranium naturel et le coût de l'enrichissement
- En surgénérateurs : perspectives lointaine mais potentiel considérable

## Enjeux

- Devenir de la matière entreposée selon les perspectives de la filière et du cycle
  - Même en se dirigeant vers un cycle fermé (surgénérateurs), il faudrait des siècles pour consommer l'uranium appauvri déjà entreposé.
- Vers un stockage définitif au moins partiel ?  
Demande ASN en ce sens.

# Trajectoire moyen terme (PPE)

**Arrêt de Fessenheim (2x900 MW non moxés) en 2020**

**12 réacteurs supplémentaires à fermer dès la 5<sup>ème</sup> visite décennale, soit entre 2029 et 2035**

- Réacteurs de 900 MW privilégiés
- Aucune fermeture complète de site
- Options pour 2 réacteurs supplémentaires et pour anticiper des fermetures entre 2025 et 2029 – très peu vraisemblable compte tenu du manque de marges sur le réseau

**Hors Fessenheim, sur 32 réacteurs de 900 MW :**

- 4 sont autorisés URE (Cruas)
- 24 sont autorisés MOX (tous sauf Cruas et Bugey)

**Avec une telle trajectoire, un impact inévitable des fermetures est à prévoir sur le cycle au travers du MOX et des flux de plutonium.**

# Pérennité : entreposage des combustibles usés

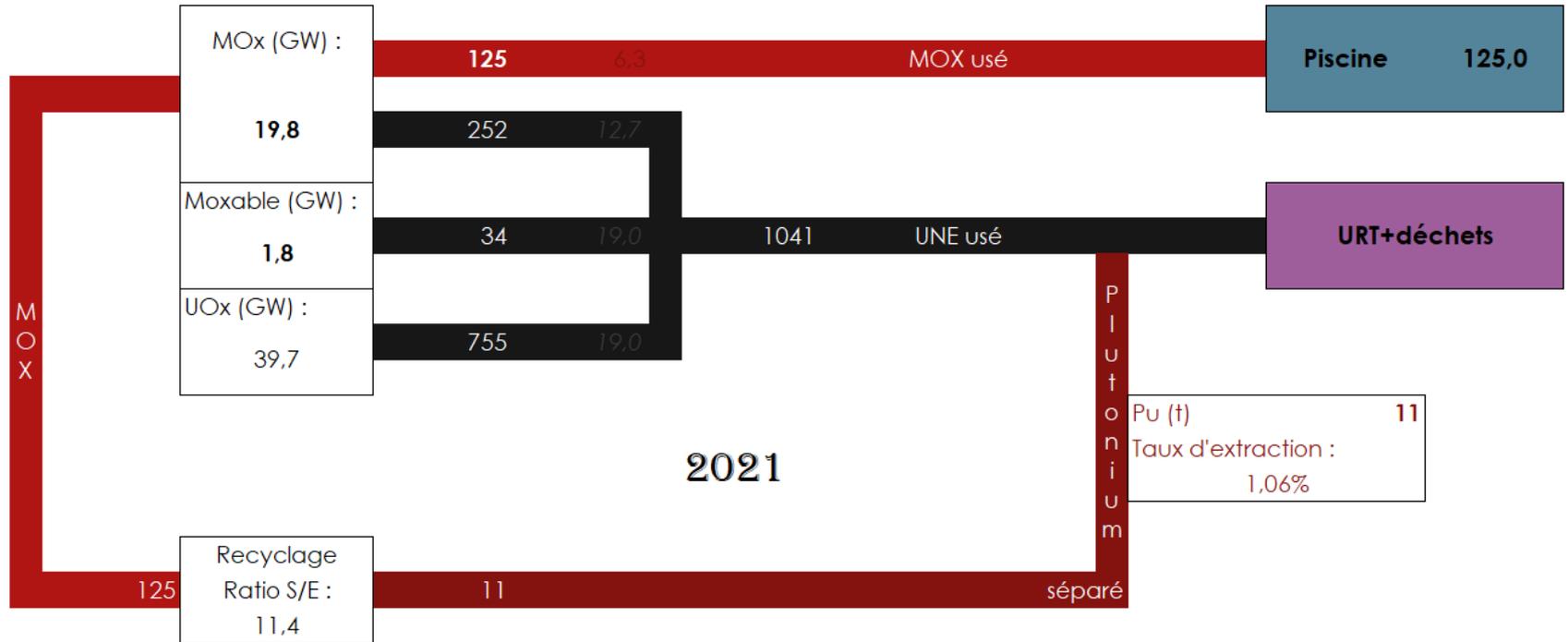
Perspective de saturation des piscines d'entreposage d'Orano La Hague à l'horizon 2030 – sous condition de libérer des emplacement actuellement occupés par des déchets technologiques

Place occupée par le combustible ordinaire utilisé en entreposage tampon avant traitement, par l'URE utilisé et par le MOX utilisé, l'un et l'autre sans exutoire aujourd'hui

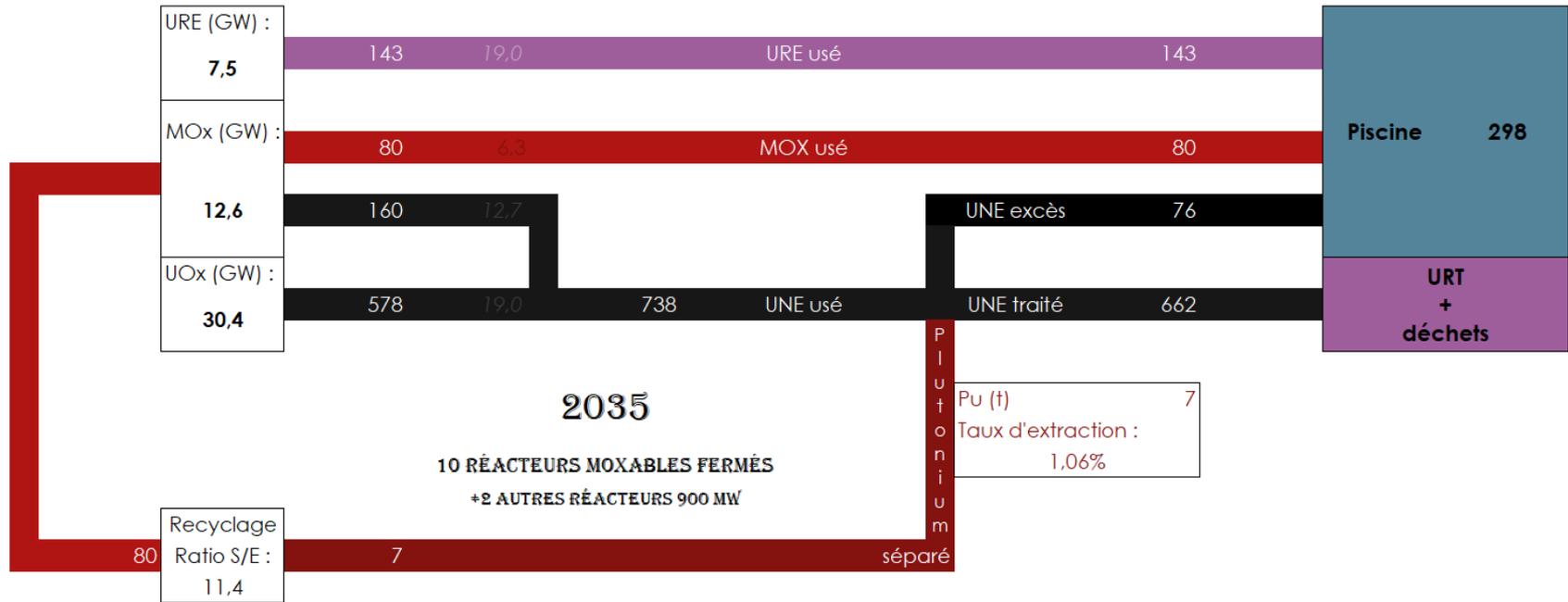
Projet « piscine centralisée » EDF sur le site de la Hague → Délais ?

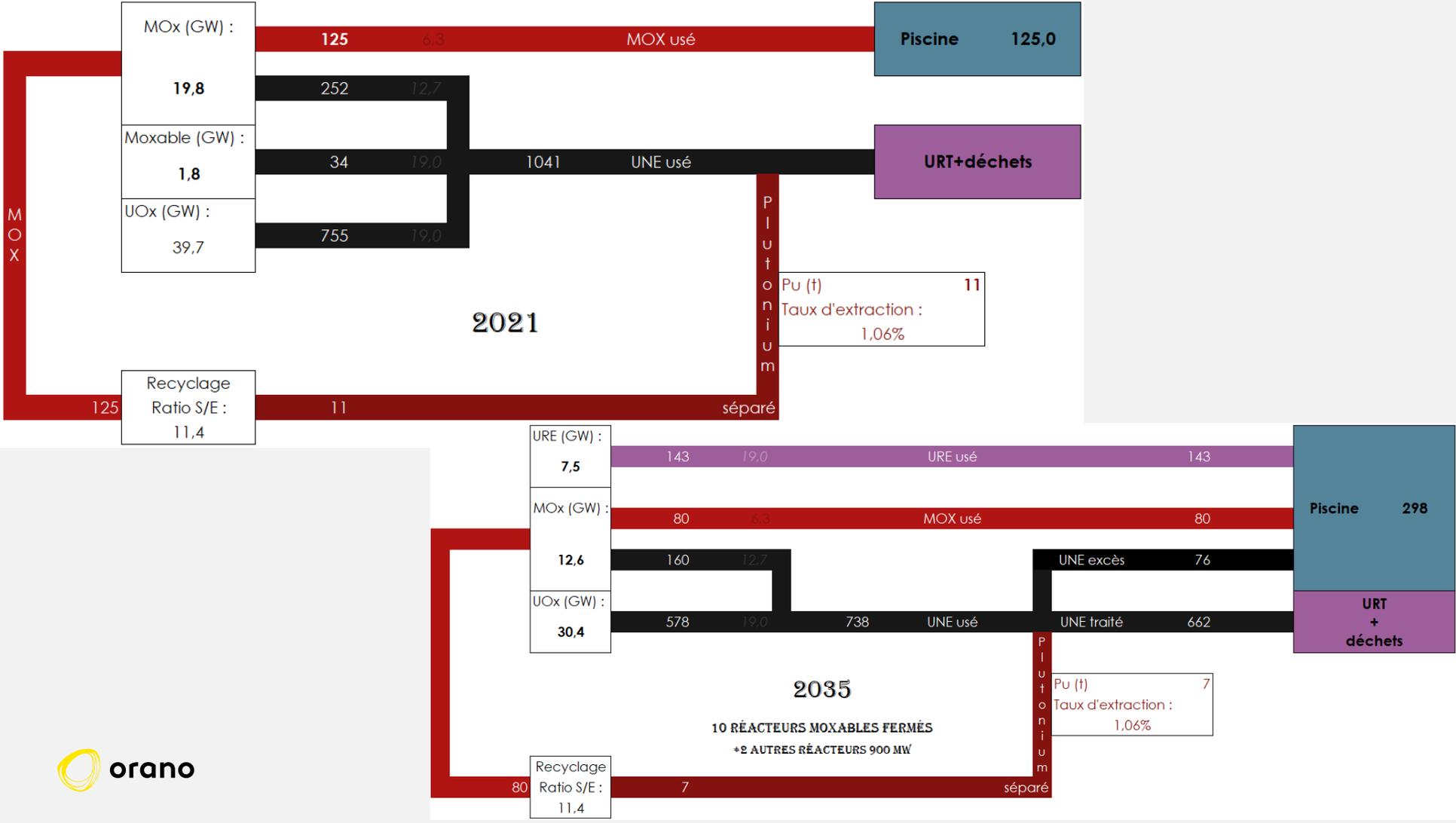
Discussions, dans le cadre du débat public sur le PNGMDR, sur l'option de l'entreposage à sec → Solution connue, adaptée et proposée à certains électriciens, mais adéquation délicate avec le traitement.

# Pérennité : réduction du MOX



# Pérennité : réduction du MOX





# Pérennité : flux plutonium

La fermeture de réacteurs moxés chamboule l'équilibre actuel du flux de plutonium.

## Deux remédiations possibles :

- Continuer à traiter du combustible et accumuler du plutonium → Non souhaitable (géopolitique, installations adaptées, gestion des déchets si abandon...)
- Réduire le traitement et accumuler du combustible usé → Impact sur l'emploi Orano, sur les capacités d'entreposage, sur la gestion des déchets.

Issue proposée : étendre le MOX aux réacteurs de 1300 MW pour maintenir la cadence du traitement → Pas avant la décennie 2030, compte tenu des études, démonstrations, instructions, modifications, essais... nécessaires.

# 03

## Perspectives au long cours

# Scénarios prospectifs ANDRA

## SNR : non renouvellement du parc

- Arrêt progressif de la production électronucléaire
- Durée de fonctionnement des REP de 40 ans, sauf EPR : 60 ans
- Arrêt anticipé du traitement des combustibles, pas de plutonium séparé à charge
- Non-traitement des MOX et URE usés

## SR1 : renouvellement du parc par EPR puis RNR

- Poursuite de la production électronucléaire
- Durées de service étalées entre 50 et 60 ans
- Renouvellement progressif par des EPR puis par des RNR
- Traitement total des combustibles usés : mono-recyclage dans les EPR, multi-recyclage dans les RNR

## SR2 : renouvellement du parc par EPR puis RNR (bis)

- Identique SR1 sauf durée de service uniforme de 50 ans pour le parc actuel

## SR3 : renouvellement du parc par EPR uniquement

- Poursuite de la production électronucléaire
- Durées de service étalées entre 50 et 60 ans
- Renouvellement progressif par des EPR seuls
- Traitement des combustibles UNE seulement, MOX et URE non-traités et stockés

# Uranium

## SNR : non renouvellement du parc

- $U_{app}$  requalifié déchet
  - 400 000 t
  - 1900 Mtep de  $^{235}U$
  - 780 000 Mtep de  $^{235|8}U$  (RNR)
- URT requalifié déchet
  - 34 000 t
  - 500 Mtep de  $^{235}U$
  - 66 000 Mtep de  $^{235|8}U$  (RNR)

## SR1 : renouvellement du parc par EPR puis RNR

- Possible part variable d'uranium appauvri requalifié en déchet (perspective de recyclage trop lointaine)

## SR3 : renouvellement du parc par EPR uniquement

- $U_{app}$  requalifié déchet
  - 470 000 t
  - 2300 Mtep de  $^{235}U$
  - 920 000 Mtep de  $^{235|8}U$  (RNR)

# Plutonium

SNR : non renouvellement du parc

- Plutonium séparé éliminé
- Fin précoce du traitement, maintien du MOX pour épuiser les stocks
- MOX non irradié requalifié déchet : 290 t
- Exports ?

SR1 : renouvellement du parc par EPR puis RNR

- Multi-recyclage du plutonium à terme

SR3 : renouvellement du parc par EPR uniquement

- MOX non irradié requalifié déchet : 290 t

# Combustibles utilisés

## SNR : non renouvellement du parc

- UNE+URE usé requalifiés déchets
  - 25 000 t
  - 300 Mtep de  $^{235}\text{U}$
  - 46 000 Mtep d'U+Pu (RNR)
- MOX usé requalifié déchet
  - 3 300 t

## SR1 : renouvellement du parc par EPR puis RNR

- Traitement continu des combustibles usés, y compris, à terme, MOX
- Traitement des URE usés possible mais peu vraisemblable → requalification possible en déchet

## SR3 : renouvellement du parc par EPR uniquement

- UNE+URE usé requalifiés déchets
  - 3 700 t
  - 50 Mtep de  $^{235}\text{U}$
  - 6 800 Mtep d'U+Pu (RNR)
- MOX usé requalifié déchet
  - 5 400 t

# Enjeux politiques

Stratégie cycle actuelle pérennisée jusqu'à l'horizon des années 2040.

Décision capitale attendue de renouveler ou non le parc, et dans quelles proportions.

Si volonté de pérenniser le cycle au-delà de 2040, nouvelles installations à envisager dès décennie 2020 (UP4, Mélox 2, GB3 avec enrichissement laser...).

Oubli ou résurrection des RNR ? Sous quelle forme ?

Gérer les urgences : saturation des capacités d'entreposage de combustible usé, moxage 1300 MW, essais de bi-recyclage du Pu

# Sources et ressources

- **Le Cycle du combustible nucléaire, Louis Patarin, EDP Sciences**
- **Présentation du « Cycle du combustible » français en 2018, Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire**
- **Les inventaires prospectifs, ANDRA**
- **Inventaire national des matières et déchets radioactifs, Rapport de synthèse, ANDRA**
- **Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR) – Le cycle du combustible nucléaire, EDF**
- **Clarification des controverses techniques – Note de synthèse, Débat public Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs**

Merci pour votre attention.



**orano**

Donnons toute sa valeur au nucléaire