

# SCÉNARIOS DE RECYCLAGE DES MATIÈRES DANS LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

Fanny Courtin, Nicolas Thiollière et Baptiste Métivier  
IMT Atlantique / Subatech  
Equipe Scénario

[fanny.courtin@subatech.in2p3.fr](mailto:fanny.courtin@subatech.in2p3.fr)

27/05/2025 - Nantes

# SOMMAIRE

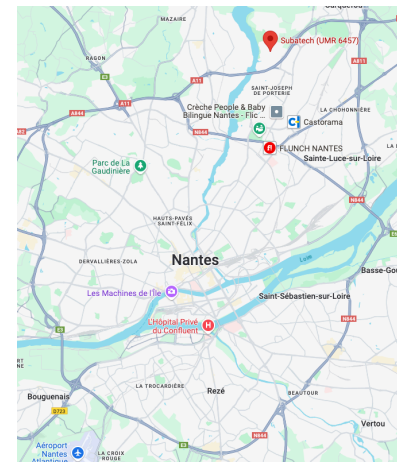
1. PRÉSENTATION
2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS
3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE
4. RECOURS AUX ÉTUDES PROSPECTIVES
5. AXES DE RECHERCHE

## ► Subatech

- Laboratoire de Physique nucléaire et subatomique
- UMR (NU, CNRS/IN2P3, IMT Atlantique)

## ► Equipe SCENARIO (2 permanents + 2 doctorants)

- Elaboration, modélisation et évaluation des **stratégies de gestion des matières** dans le **parc nucléaire français** à l'horizon 2050/2100
- Thématiques de recherche
  - **Modélisation des réacteurs nucléaires et des gestions combustibles**
  - **Modélisation des usines du cycle du combustible nucléaire**
  - **Modélisation économique du parc nucléaire et de son intégration dans le mix**

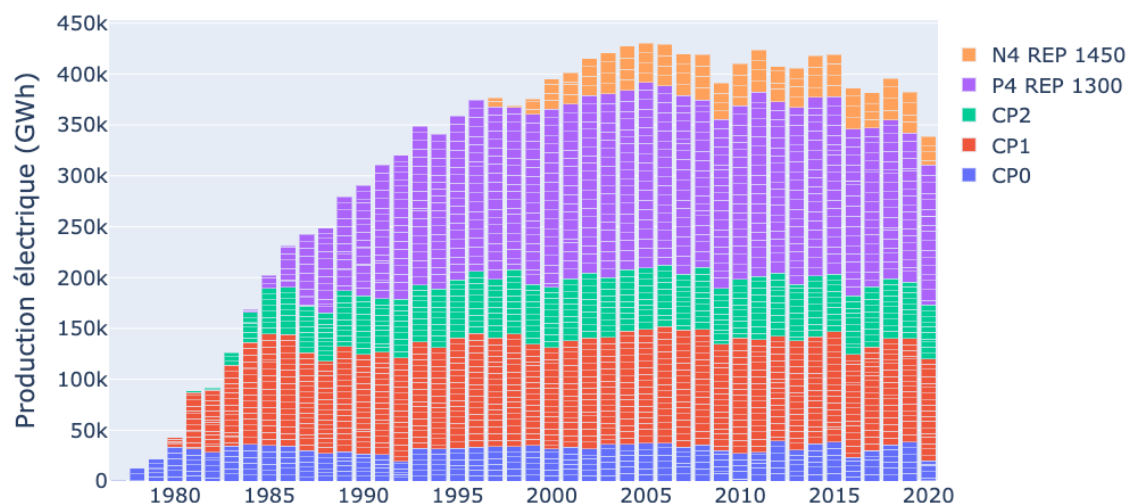




## 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

### 2.1 Le parc de réacteurs nucléaires

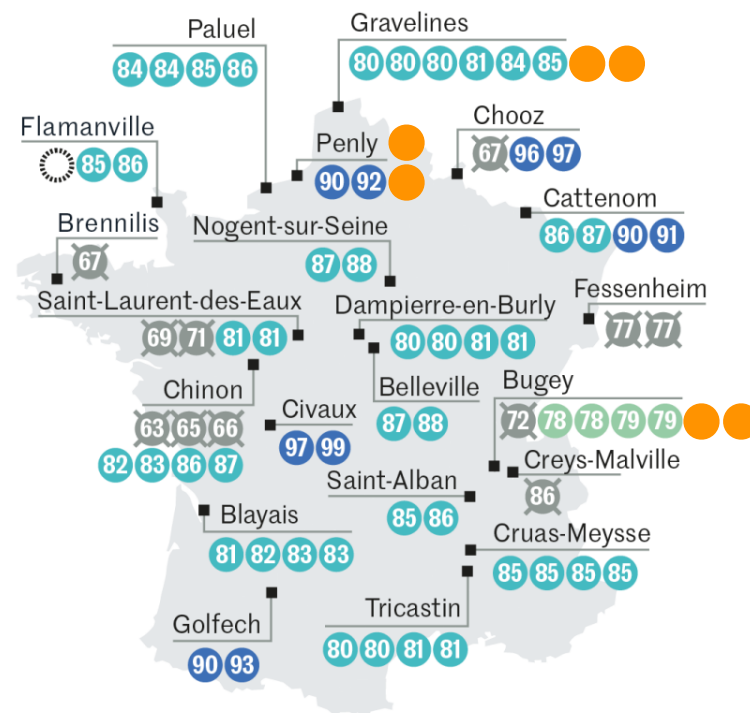
- ▶ 1978 - 2000 : déploiement massif du nucléaire
  - Technologies Réacteurs à Eau Pressurisée
  - Licence américaine (Westinghouse)
  - Capacité croissante de 900 MWe à 1450 MWe
  - 58 réacteurs déployés en 25 ans



### Le parc nucléaire français

Mises en service de chaque réacteur

- XX Années 1970
- XX Années 1980
- XX Années 1990
- En construction
- XX Réacteur arrêté
- Projets EPR2



N'ayant pas de centrale nucléaire sur son territoire, la Corse ne figure pas sur la carte.

Source : EDF  
Infographie Le Monde

Recyclage des matières dans le parc nucléaire français

F. Courtin, N. Thiollière, B. Métivier

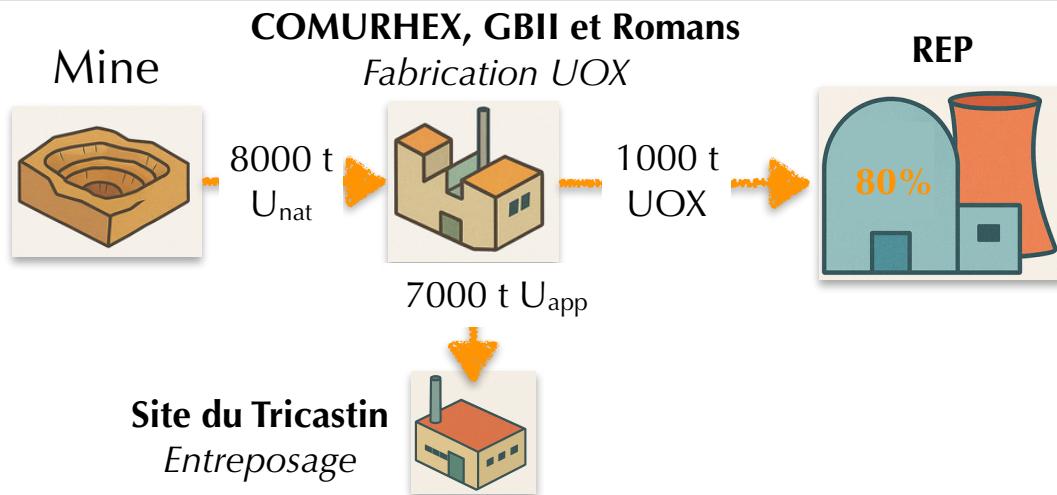
Journées Scientifiques - NU

Colloque n°08

27/05/2025 - Nantes

# 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 2.2 Le cycle du combustible nucléaire français

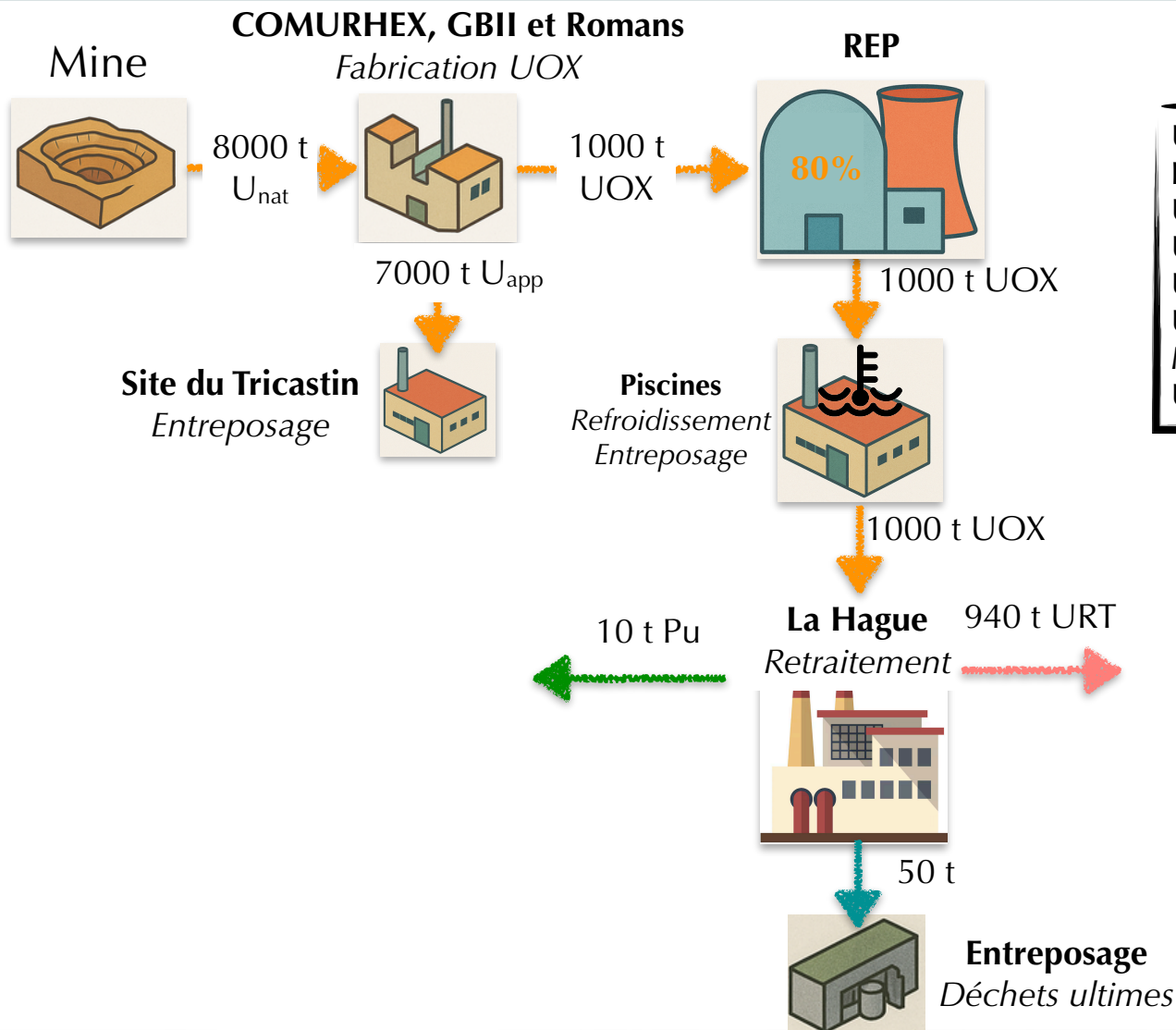


### Situation actuelle

**U** : Uranium  
**Pu** : Plutonium  
**U<sub>nat</sub>** : Uranium naturel  
**U<sub>app</sub>** : Uranium appauvri  
**URT** : Uranium de retraitement  
**UOX** : Combustible à l'U<sub>nat</sub> enrichi  
**MOX** : Combustible à l'U<sub>app</sub> et au Pu  
**URE** : Combustible à l'URT enrichi

# 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 2.2 Le cycle du combustible nucléaire français



**Situation actuelle**

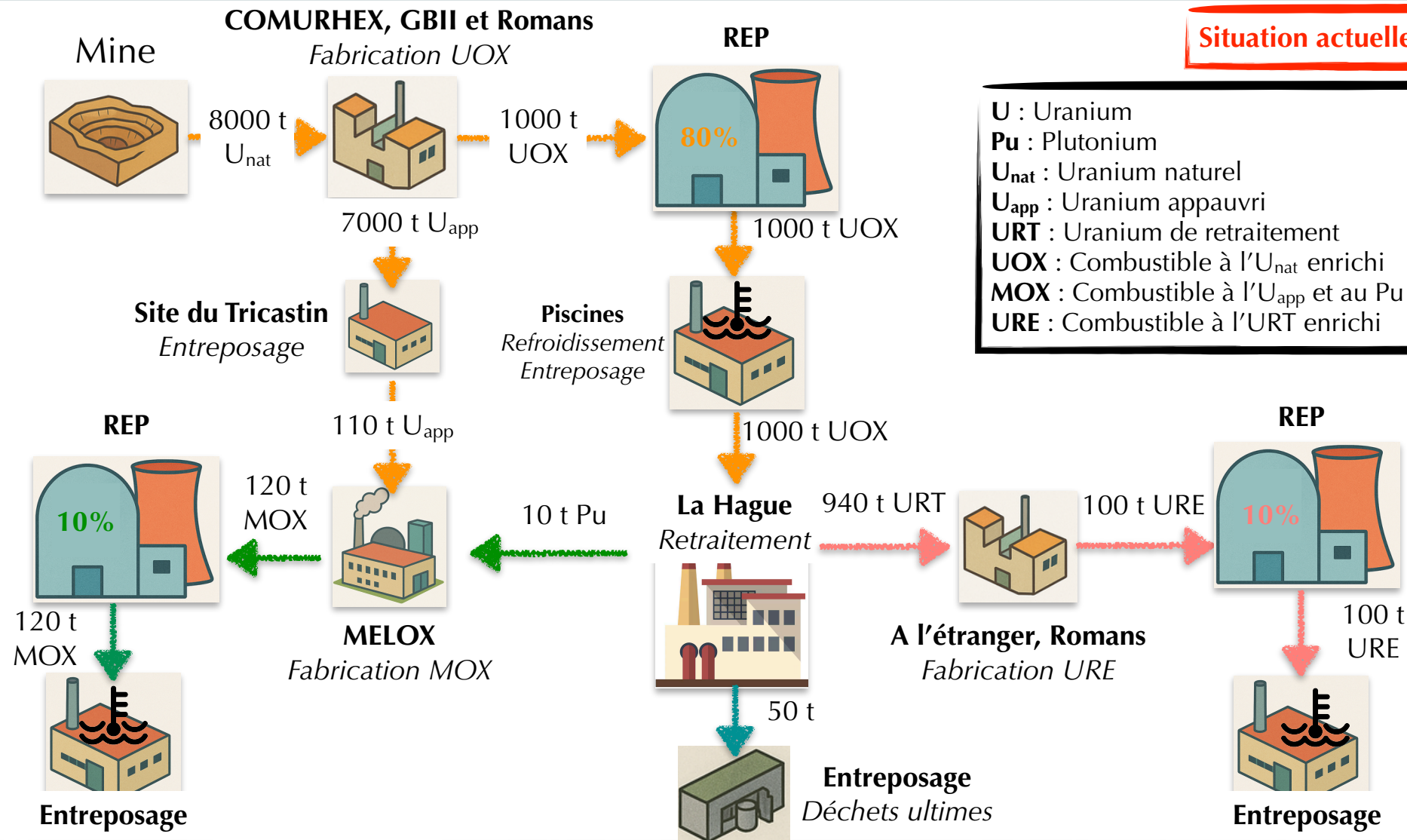
**U** : Uranium  
**Pu** : Plutonium  
**U<sub>nat</sub>** : Uranium naturel  
**U<sub>app</sub>** : Uranium appauvri  
**URT** : Uranium de retraitement  
**UOX** : Combustible à l'U<sub>nat</sub> enrichi  
**MOX** : Combustible à l'U<sub>app</sub> et au Pu  
**URE** : Combustible à l'URT enrichi

# 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 2.2 Le cycle du combustible nucléaire français

**Situation actuelle**

**U** : Uranium  
**Pu** : Plutonium  
**U<sub>nat</sub>** : Uranium naturel  
**U<sub>app</sub>** : Uranium appauvri  
**URT** : Uranium de retraitement  
**UOX** : Combustible à l'U<sub>nat</sub> enrichi  
**MOX** : Combustible à l'U<sub>app</sub> et au Pu  
**URE** : Combustible à l'URT enrichi



## 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

### 2.3 Enjeux techniques associés à la stratégie de gestion des matières actuelle

#### ❑ Approvisionnement en Uranium naturel

- Incertitudes liées à la situation géopolitique mondiale et à l'évolution de la demande/production

#### ❑ Accumulation de combustibles usés

- Combustibles MOX et URE usés ne sont pas retraités
- Capacités d'entreposage requises croissantes
- Risque de requalification en déchets sans perspective de valorisation

#### ❑ Perspectives pour les usines de traitement-recyclage

- Durée de vie de MELOX et La Hague

#### ❑ Gestion des déchets nucléaires ultimes

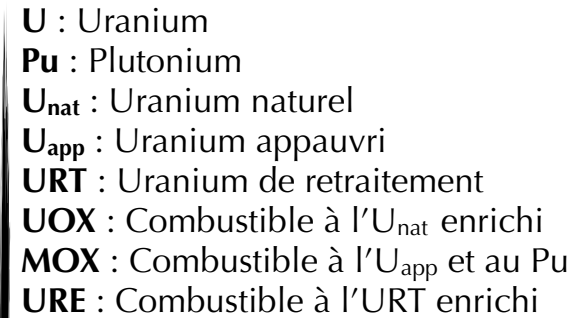
- Solution retenue : Stockage en couche géologique profonde (Projet Cigéo)



- Assurer la **sécurité de la chaîne d'approvisionnement** en Uranium naturel
- Renforcer la stratégie de **recyclage des matières valorisables**
- Mettre en oeuvre une solution de **stockage des déchets nucléaires ultimes**

## 10

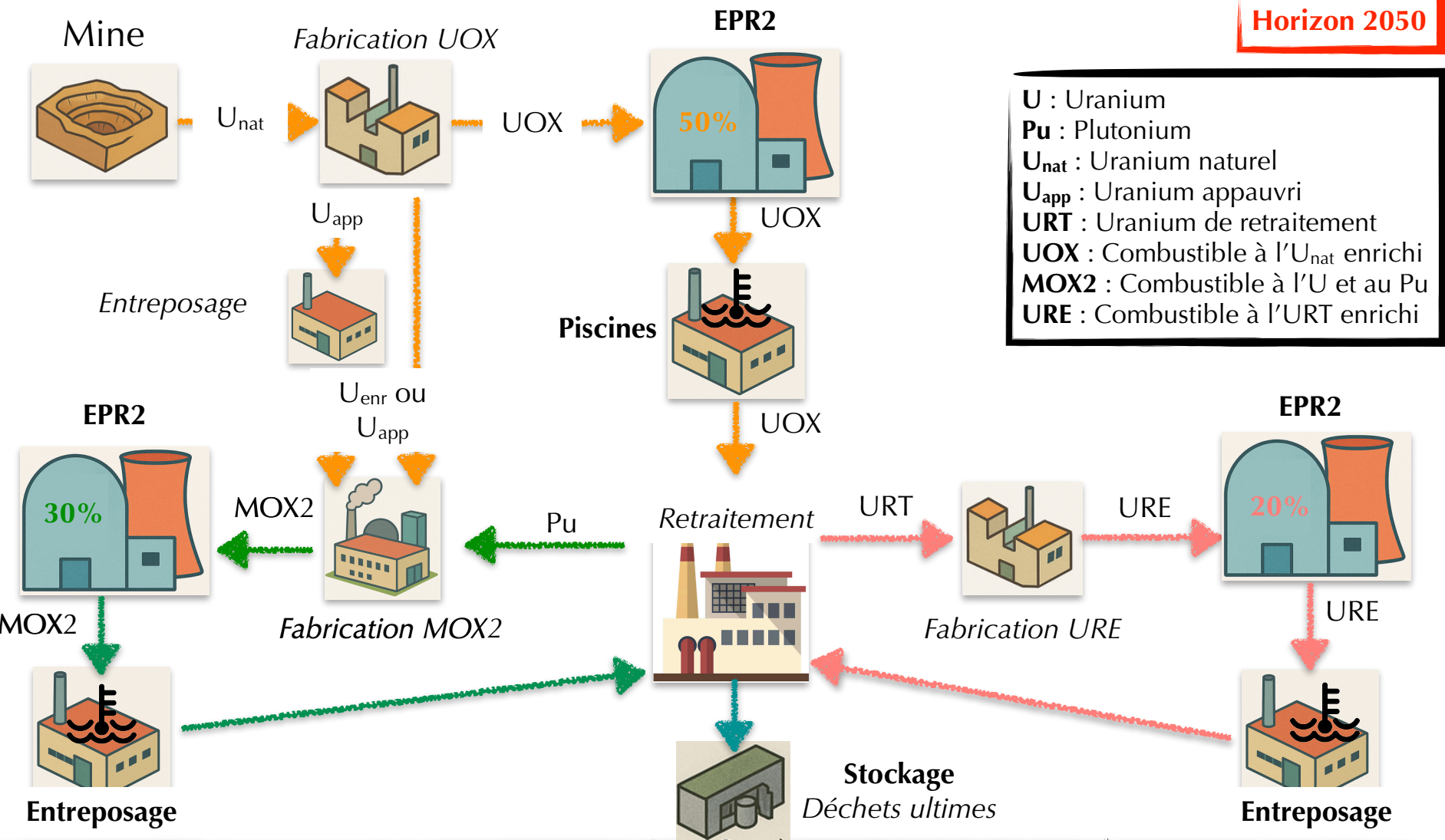
## Situation actuelle



# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

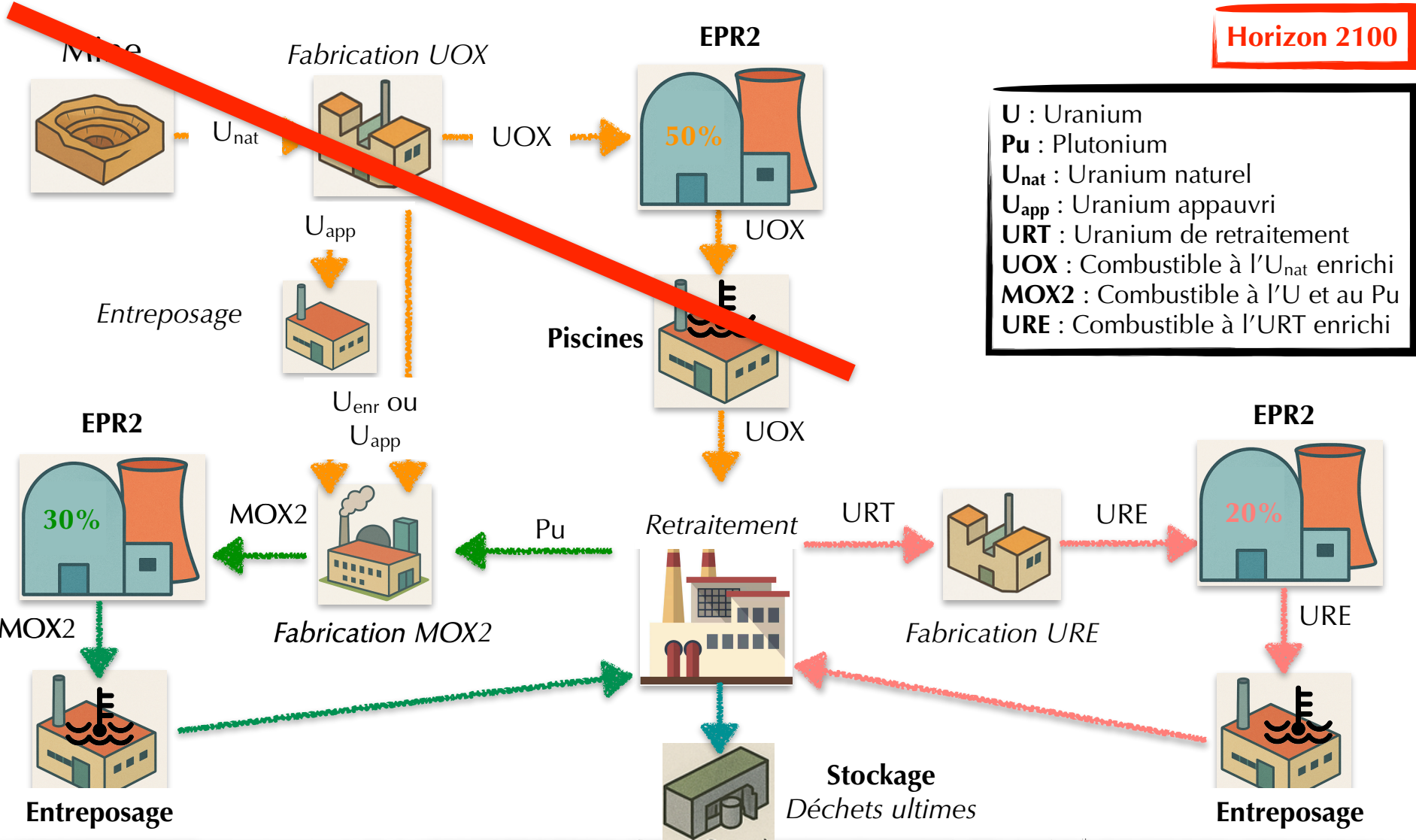
## 3.1 Moyen terme : Multi-recyclage en REP

Horizon 2050



# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 3.3 Long terme : fermeture du cycle

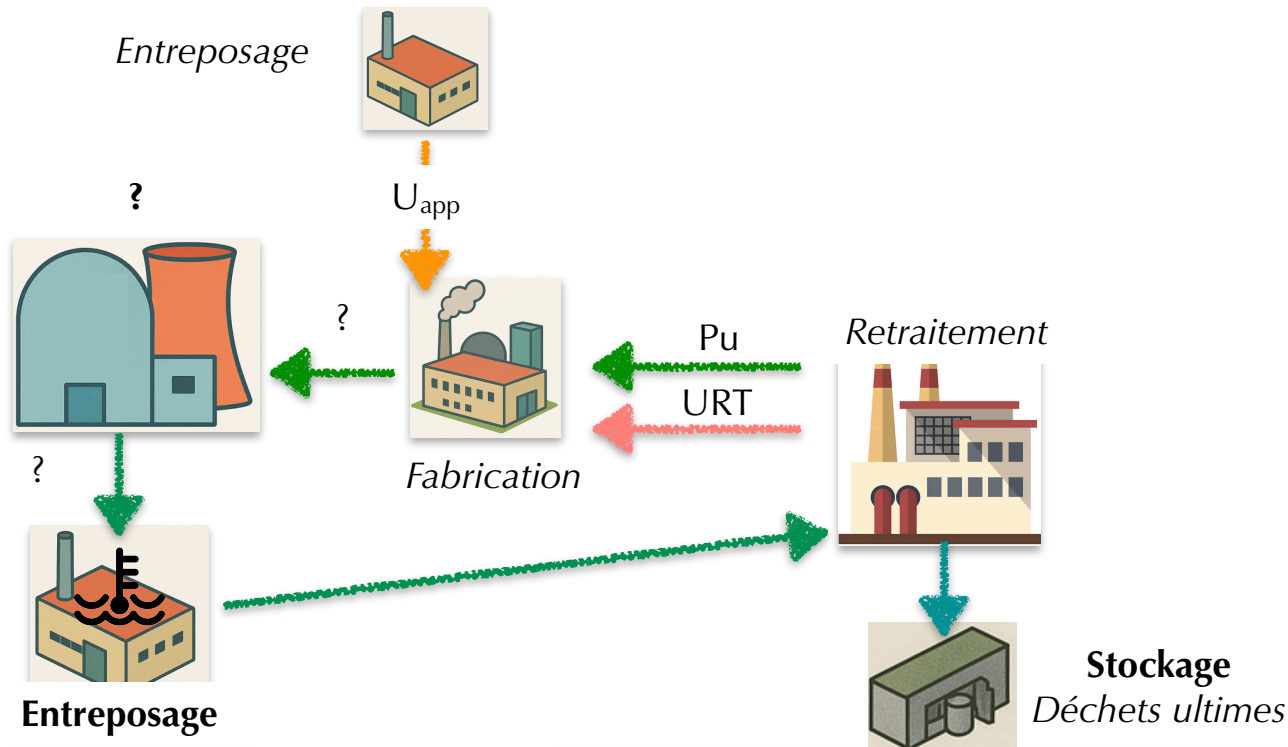


# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 3.3 Long terme : fermeture du cycle

**Horizon 2100**

**U** : Uranium  
**Pu** : Plutonium  
**U<sub>app</sub>** : Uranium appauvri  
**URT** : Uranium de retraitement



# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 3.3 Long terme : fermeture du cycle

**Horizon 2100**

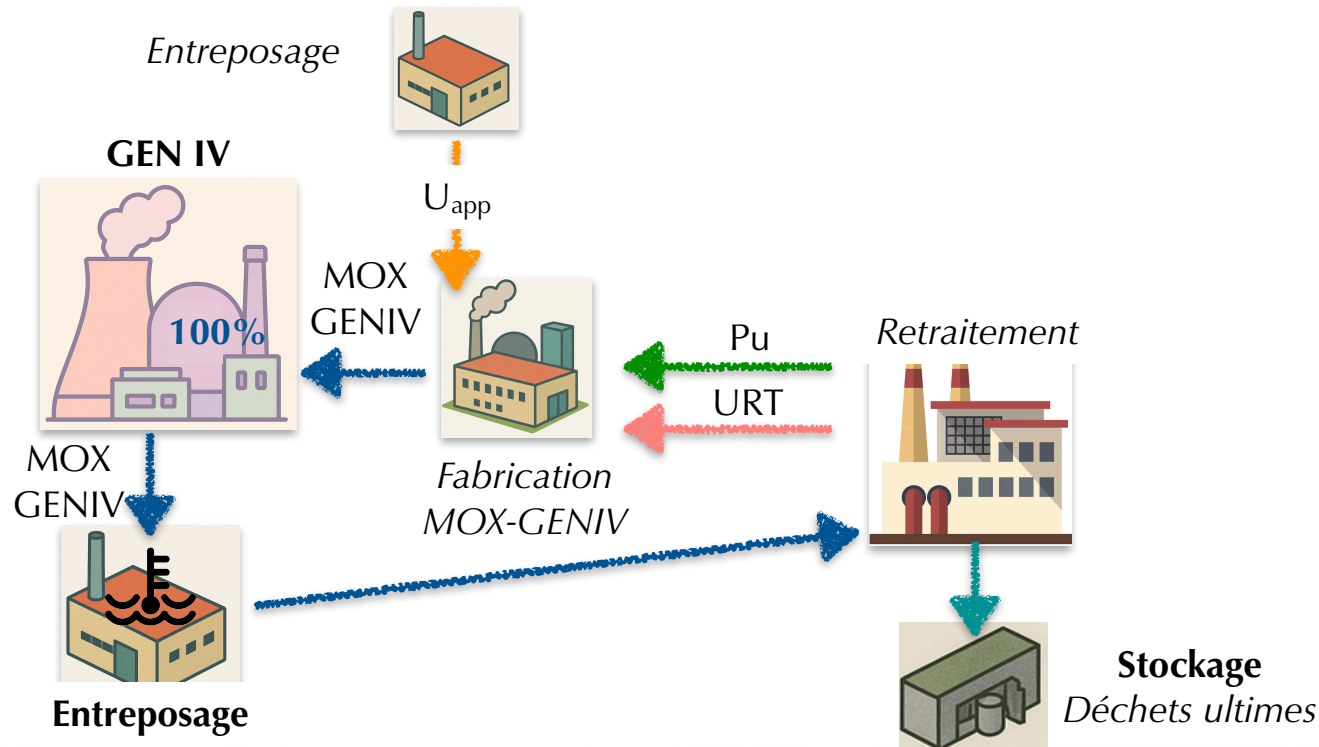
**U** : Uranium

**Pu** : Plutonium

**U<sub>app</sub>** : Uranium appauvri

**URT** : Uranium de retraitement

**MOX-GENIV** : Combustible à l'U et au Pu



# 4. RECOURS AUX ÉTUDES PROSPECTIVES

## 4.1 Une stratégie française mouvante

- ❑ Loi relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs – 1991-2006
  - Recyclage du plutonium en réacteur à neutrons rapides (GEN IV) **ASTRID**
  - Stockage en couche géologique profonde des déchets nucléaires ultimes **CIGEO**
- ❑ Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) - 2019
  - Déploiement des RNR **repoussé à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle**
  - Cadre de R&D sur le **multi-recyclage en REP** **MRREP**
- ❑ Loi d'accélération - 2023
  - Abrogation de la part nucléaire dans le mix électrique à 50%
- ❑ **France 2030** - « Nucléaire de demain » - 2023
  - Petits réacteurs modulaires (SMR)
  - Petits réacteurs modulaires innovants (AMR)
- ❑ « **Conseil de Politique Nucléaire** » - 2024 et 2025
  - Validation de l'extension/renouvellement de La Hague/MELOX jusqu'en 2100
  - Relance d'un programme de travail sur les réacteurs à neutrons rapides



**nuward**



**Perturbations récurrentes de la stratégie de référence du parc nucléaire français**  
**Forte incertitude associée à un multitude de « futurs possibles »**  
**Conflit entre temporalités des décisions politiques et projets nucléaires**

# 4. RECOURS AUX ÉTUDES PROSPECTIVES

## 4.2 Les études prospectives sur l'évolution du parc nucléaire

### ❑ L'outil « scénario »

- \* **Récit cohérent** permettant d'analyser les mécanismes et interactions du système et d'identifier les **drivers prépondérants** et les **incertitudes/fragilités** (Pierre Wack, 1985)

### ❑ Outil très utilisé pour la réalisation d'études prospectives en dehors du nucléaire



### ❑ Dans notre cas, le **système** à étudier est constitué du

- Parc de réacteurs nucléaires,
- Cycle du combustible nucléaire et de toutes les **usines** associées.

### ❑ Objectifs de nos études de scénarios nucléaires

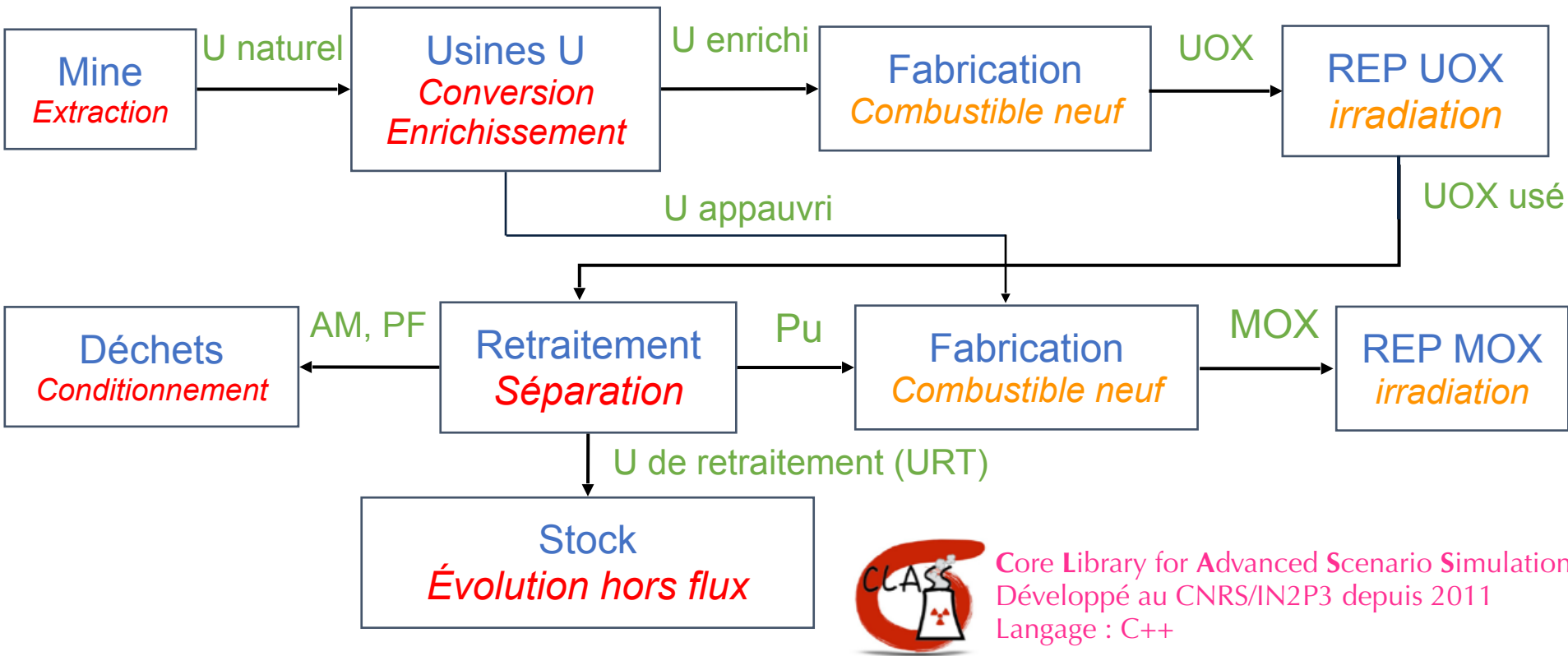
- **Quantifier les impacts** d'un **changement de stratégie** sur un **cycle du combustible nucléaire**
- Analyser les mécanismes physiques dans le cycle du combustible nucléaire
- Identifier les incertitudes associées aux trajectoires considérées

# 4. RECOURS AUX ÉTUDES PROSPECTIVES

## 4.3 La modélisation du parc nucléaire et du cycle associé

### ➤ Scénarios nucléaires reposent sur l'utilisation d'un **code de simulation**

- Qui modélise les **phénomènes physiques** dans toutes les **unités du cycle**
- Qui calcule **les flux et inventaires isotopiques en matière**
- Qui se base sur des **méta-modèles réacteurs** construits sur des calculs neutroniques



**Core Library for Advanced Scenario Simulation**  
 Développé au CNRS/IN2P3 depuis 2011  
 Langage : C++

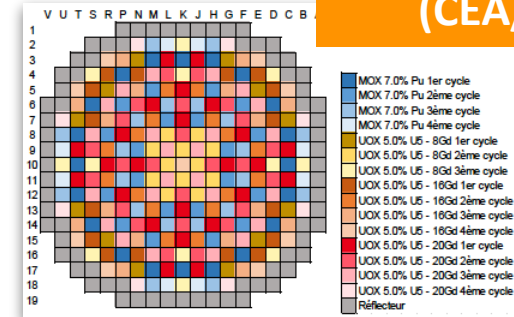
# 5. AXES DE RECHERCHES

## 5.1 Focus sur nos sujets de recherche actuels

- Analyse **technico-économique** de la stratégie de **multi-recyclage en REP**

### Modélisation du recyclage en REP

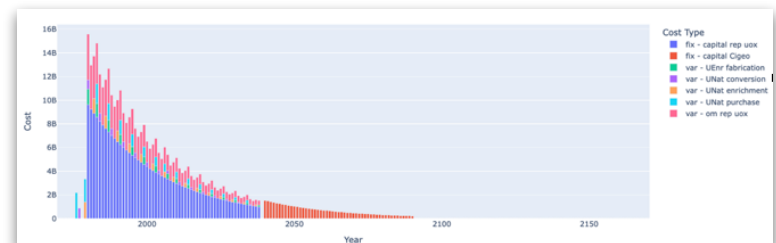
- Conception de modèles basés sur des calculs à l'échelle du coeur REP pour le Pu recyclé
- Amélioration de la représentativité des usines du cycle dans les codes de simulation



Thèse de S. Eveillard  
(CEA/CNRS)

### Développement d'un module de calcul de coût dans CLASS

- Décomposition des coûts fixes et variables pour chaque installation du cycle
- Calcul du coût de production nucléaire intégré dans le code de simulation



Thèse de B. Métivier  
(IMT ATLANTIQUE)

# 5. AXES DE RECHERCHES

## 5.2 Perspectives

- Analyse de la **résilience** du **parc nucléaire** à une **perturbation d'approvisionnement en Uranium naturel**

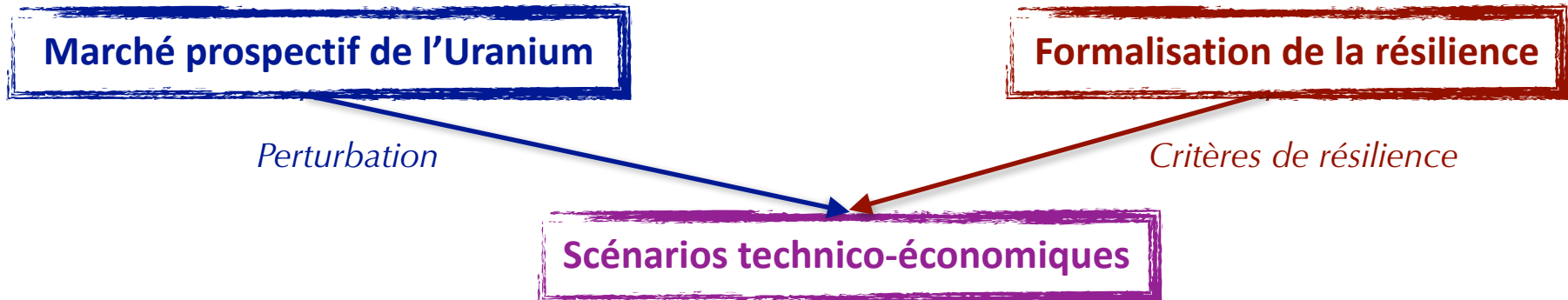
Dépôt ANR  
2026 envisagé

- **Contexte**

- Incertitudes liées à la situation géopolitique et à l'évolution de la demande / production
- Les vulnérabilités induites par une rupture d'approvisionnement en uranium pourraient être mitigées par le **recyclage des matières** dans les réacteurs actuels et futurs.

- **Problématiques**

- Quels leviers d'adaptabilité ? Sur quelle durée ?
- Quels impacts sur les coûts ? Sur le mix électrique ?



# SCÉNARIOS DE RECYCLAGE DES MATIÈRES DANS LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

Fanny Courtin, Nicolas Thiollière et Baptiste Métivier  
IMT Atlantique / Subatech  
Equipe Scénario

[fanny.courtin@subatech.in2p3.fr](mailto:fanny.courtin@subatech.in2p3.fr)

27/05/2025 - Nantes