

# 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

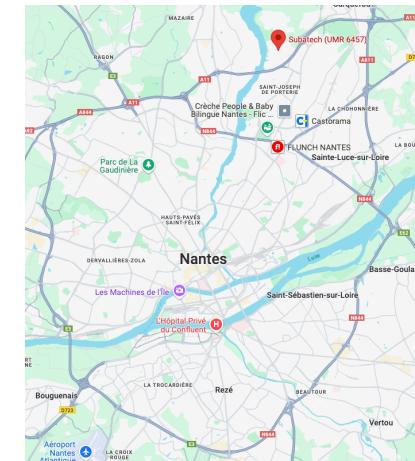


- 1. PRÉSENTATION**
- 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS**
- 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE**
- 4. RECOURS AUX ÉTUDES PROSPECTIVES**
- 5. AXES DE RECHERCHE**

# 1. PRÉSENTATION

## ► Subatech

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



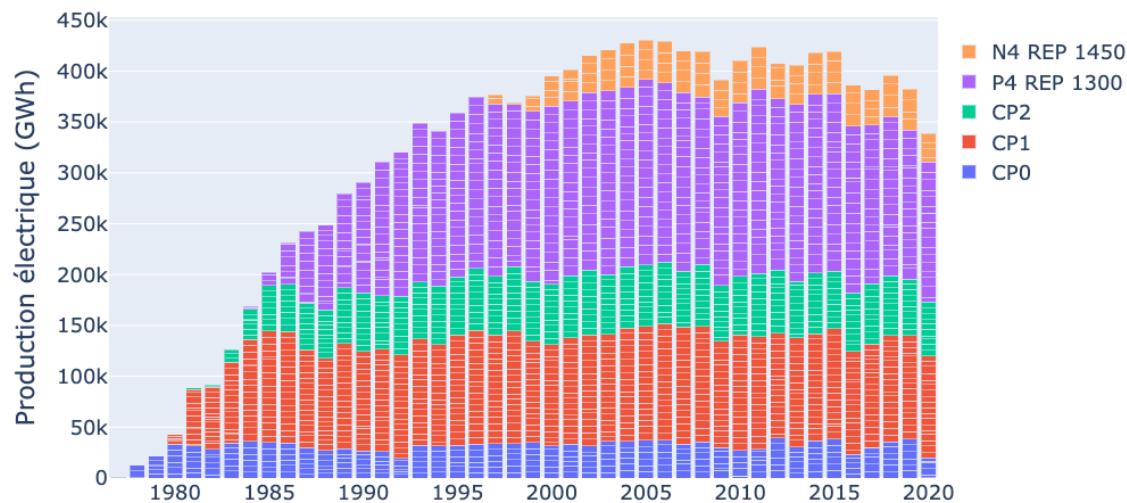
## ► Équipe SCENARIO (2 permanents + 2 doctorants)

- 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

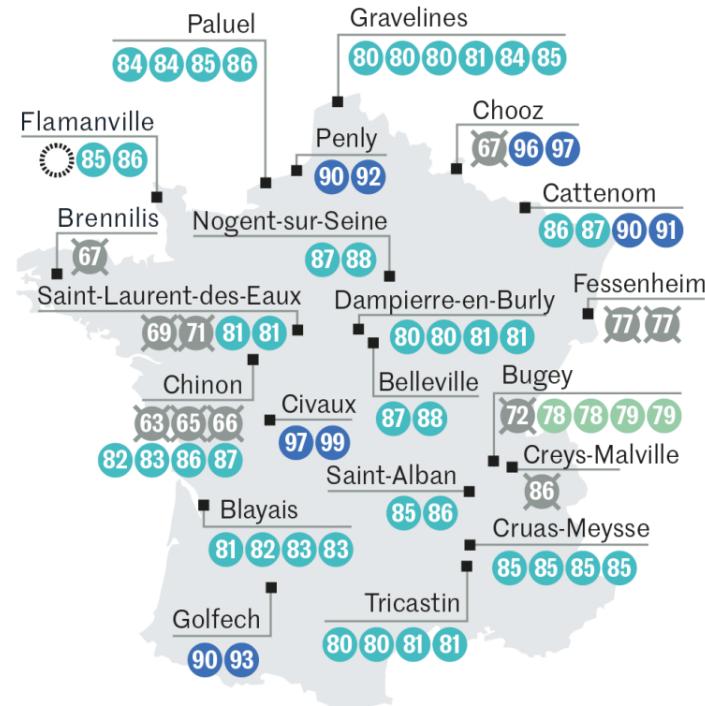


### Le parc nucléaire français

Mises en service de chaque réacteur

XX Années 1970 XX Années 1980 XX Années 1990

○ En construction XX Réacteur arrêté



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

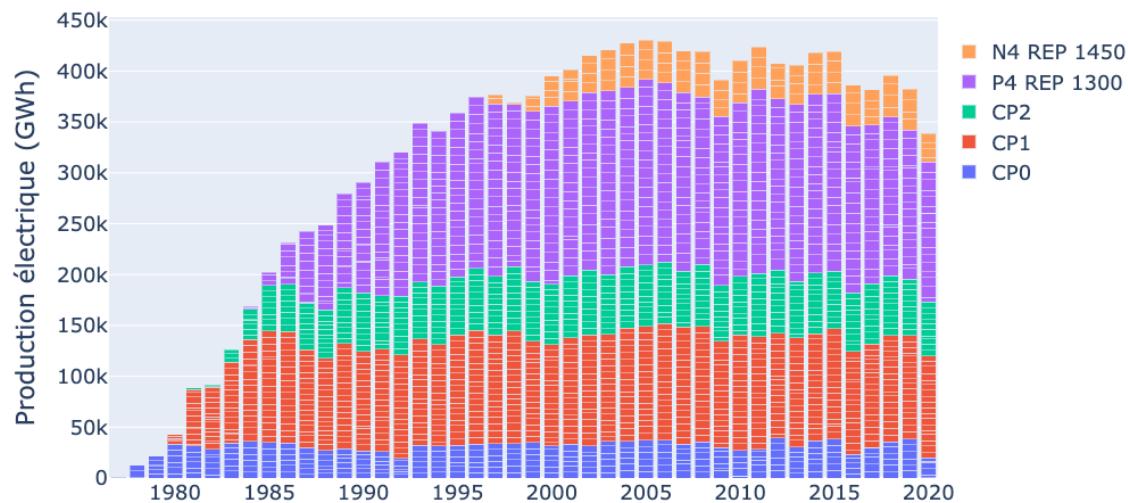
Source : EDF

Infographie Le Monde

# 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 2.1 Le parc de réacteurs nucléaires

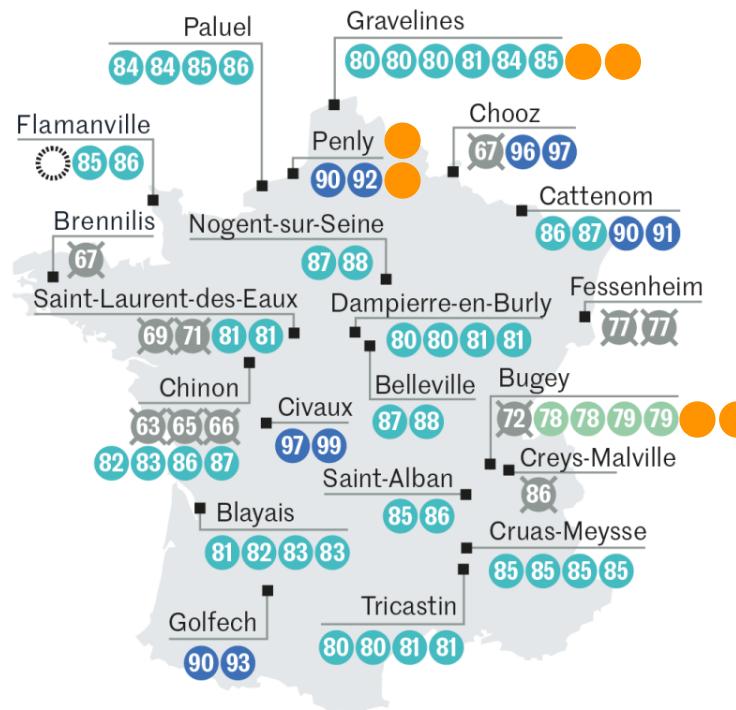
- ▶ 1978 - 2000 : déploiement massif du nucléaire
  - Technologies Réacteurs à Eau Pressurisée
  - Licence américaine (Westinghouse)
  - Capacité croissante de 900 MWe à 1450 MWe
  - 58 réacteurs déployés en 25 ans



## 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



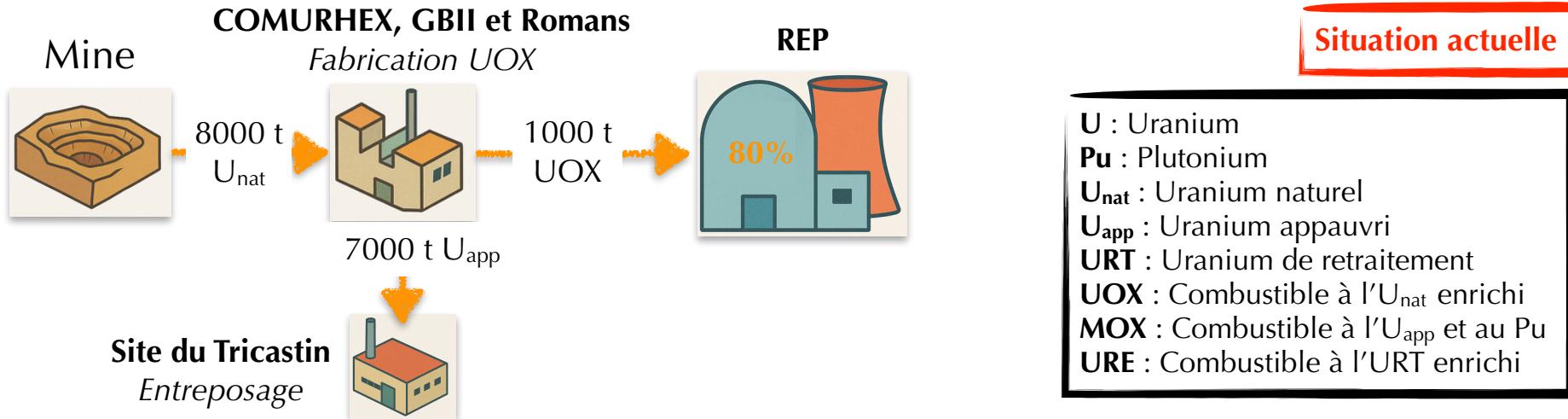
N'ayant pas de centrale nucléaire sur son territoire, la Corse ne figure pas sur la carte.

Source : EDF

Infographie Le Monde

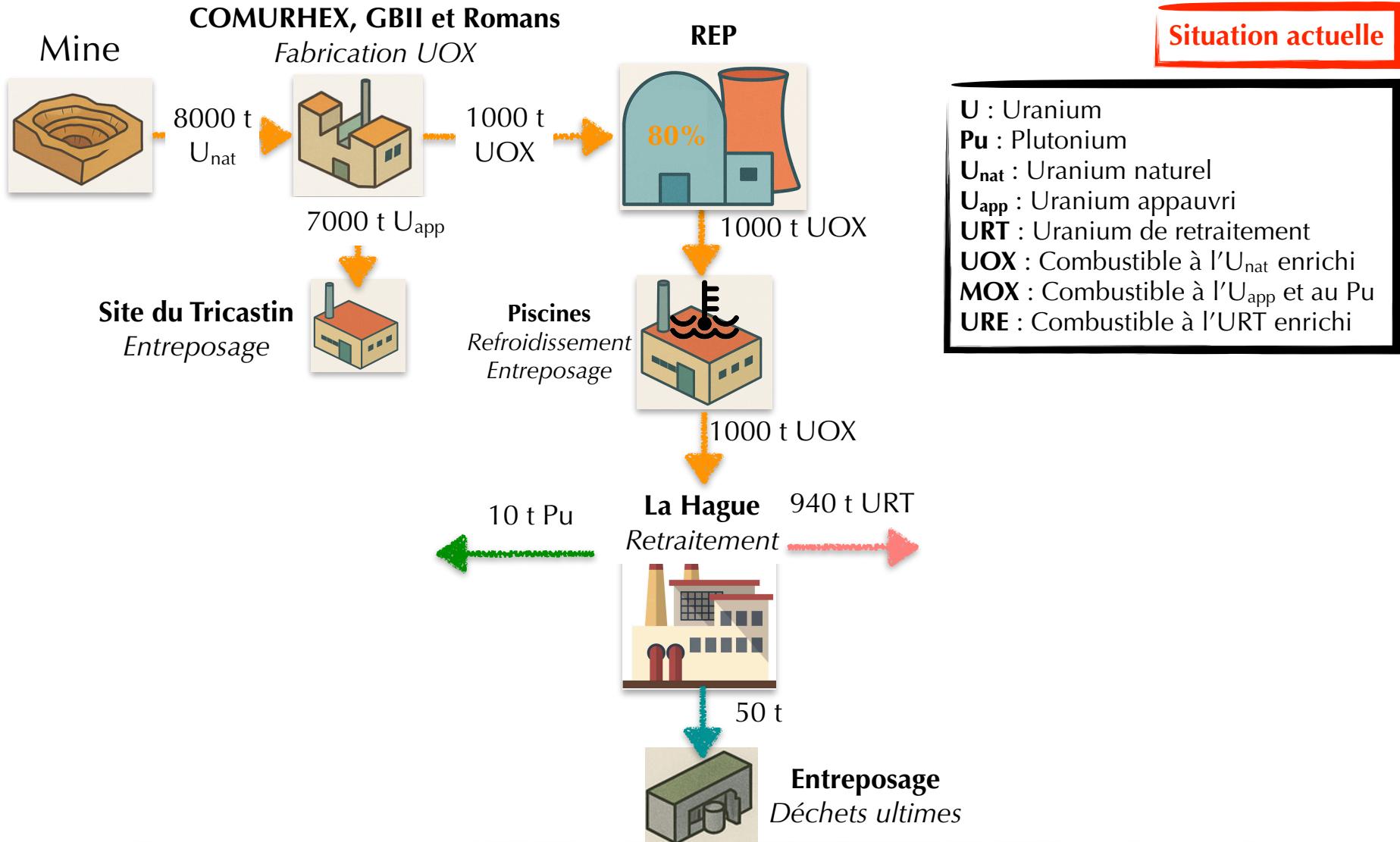
## 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

### 2.2 Le cycle du combustible nucléaire français



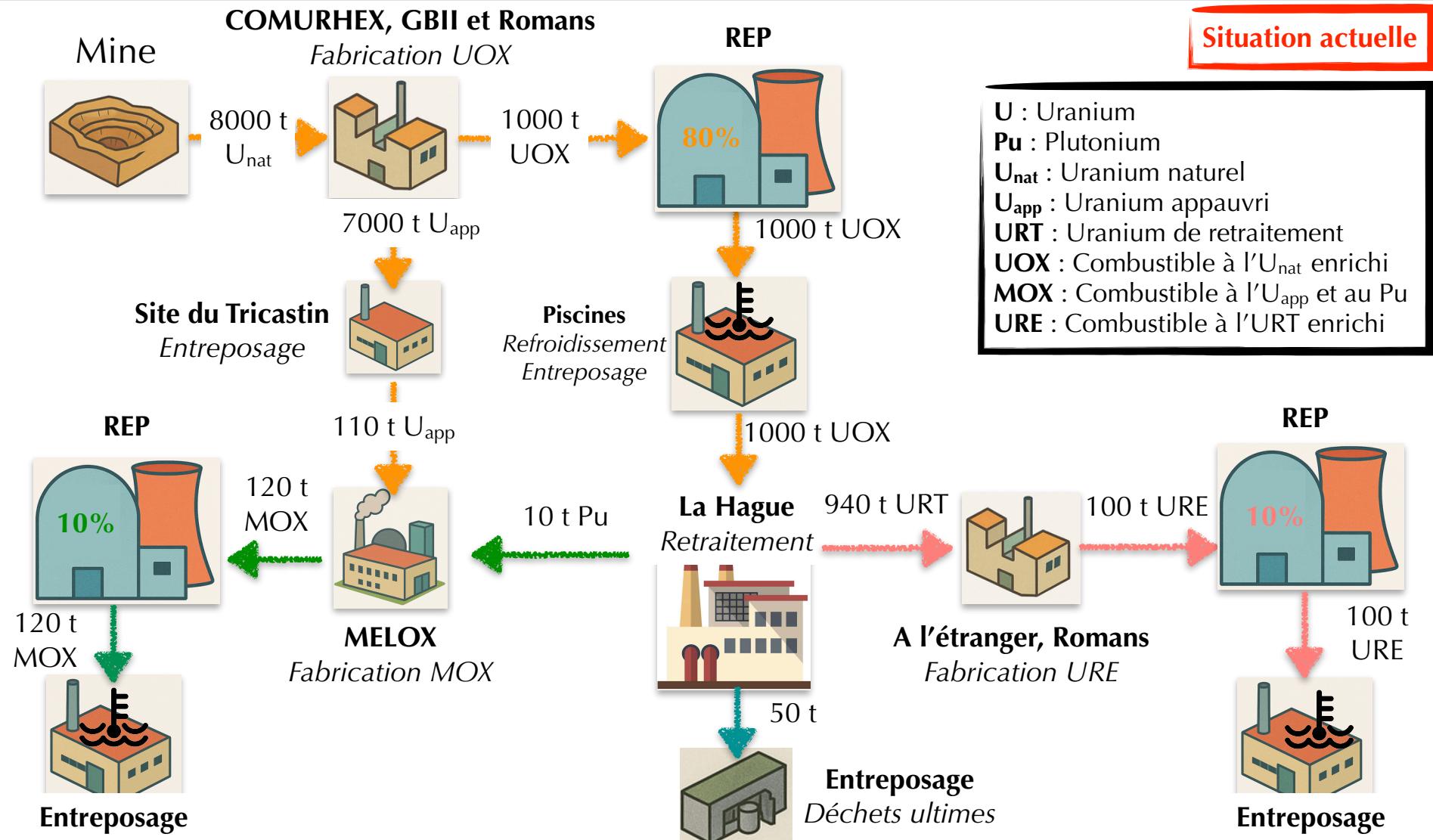
## 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

### 2.2 Le cycle du combustible nucléaire français



# 2. LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 2.2 Le cycle du combustible nucléaire français



## 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

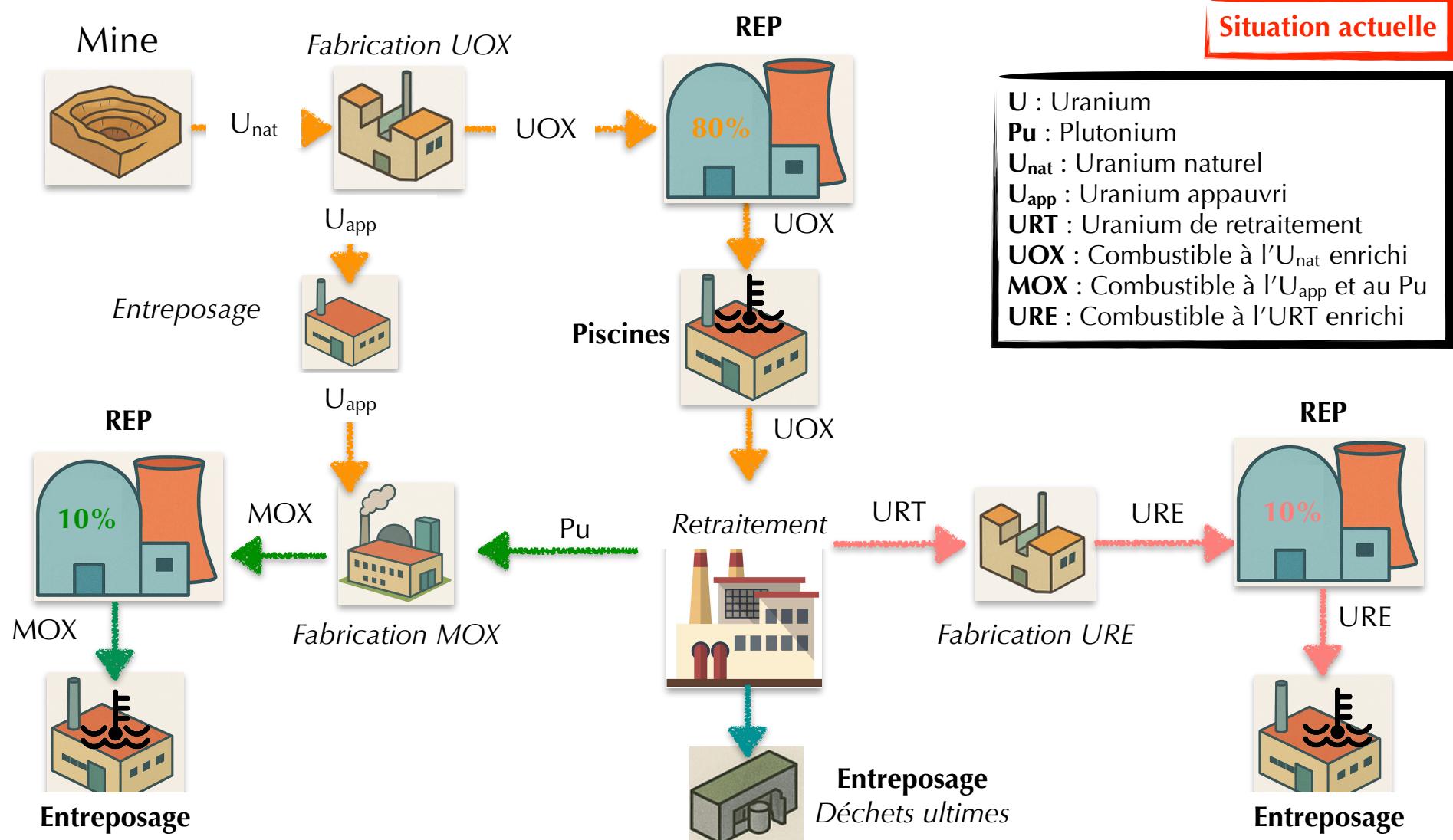
- Solution retenue : Stockage en couche géologique profonde (Projet Cigéo)

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



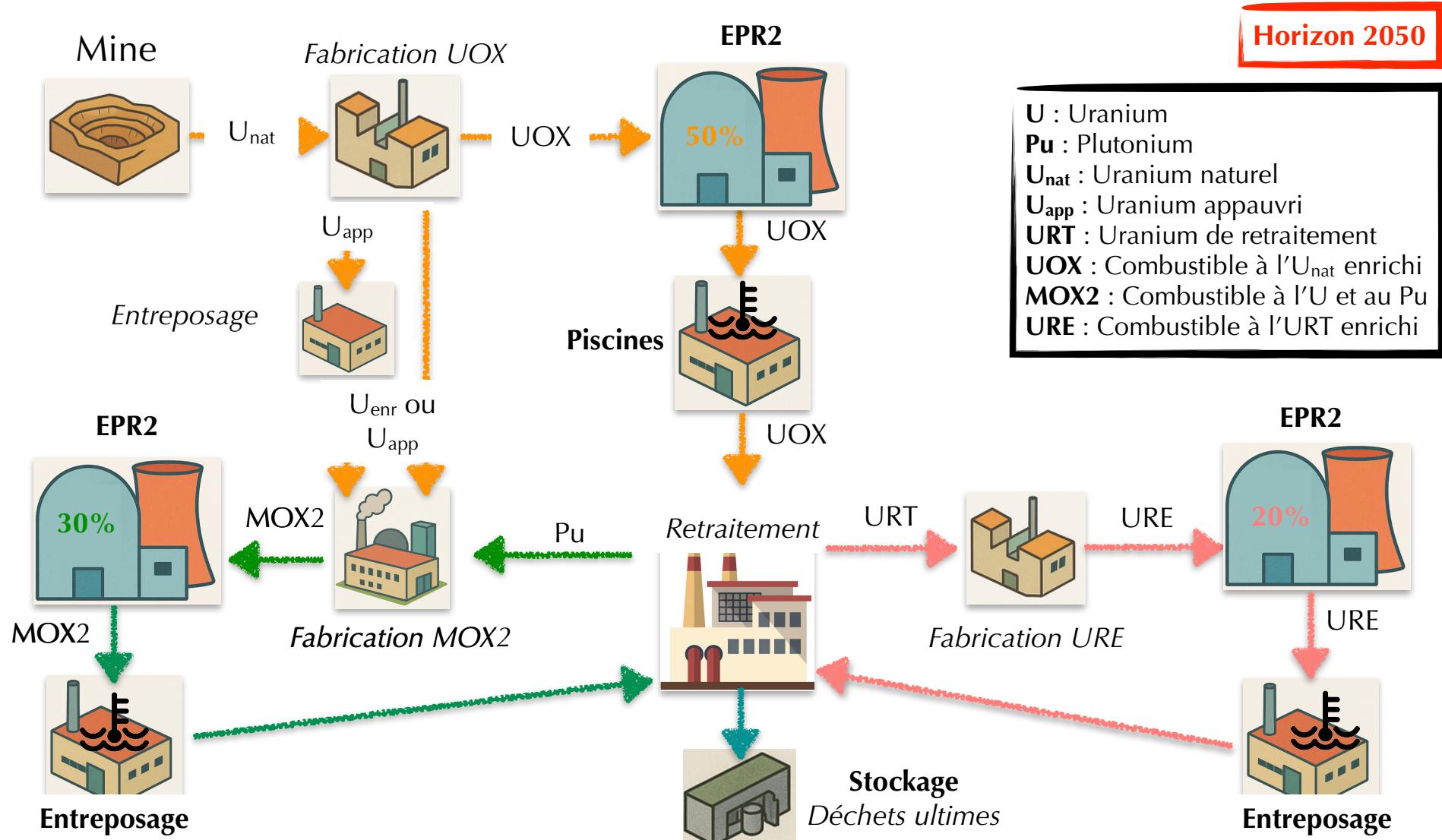
# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 3.1 Moyen terme : Multi-recyclage en REP



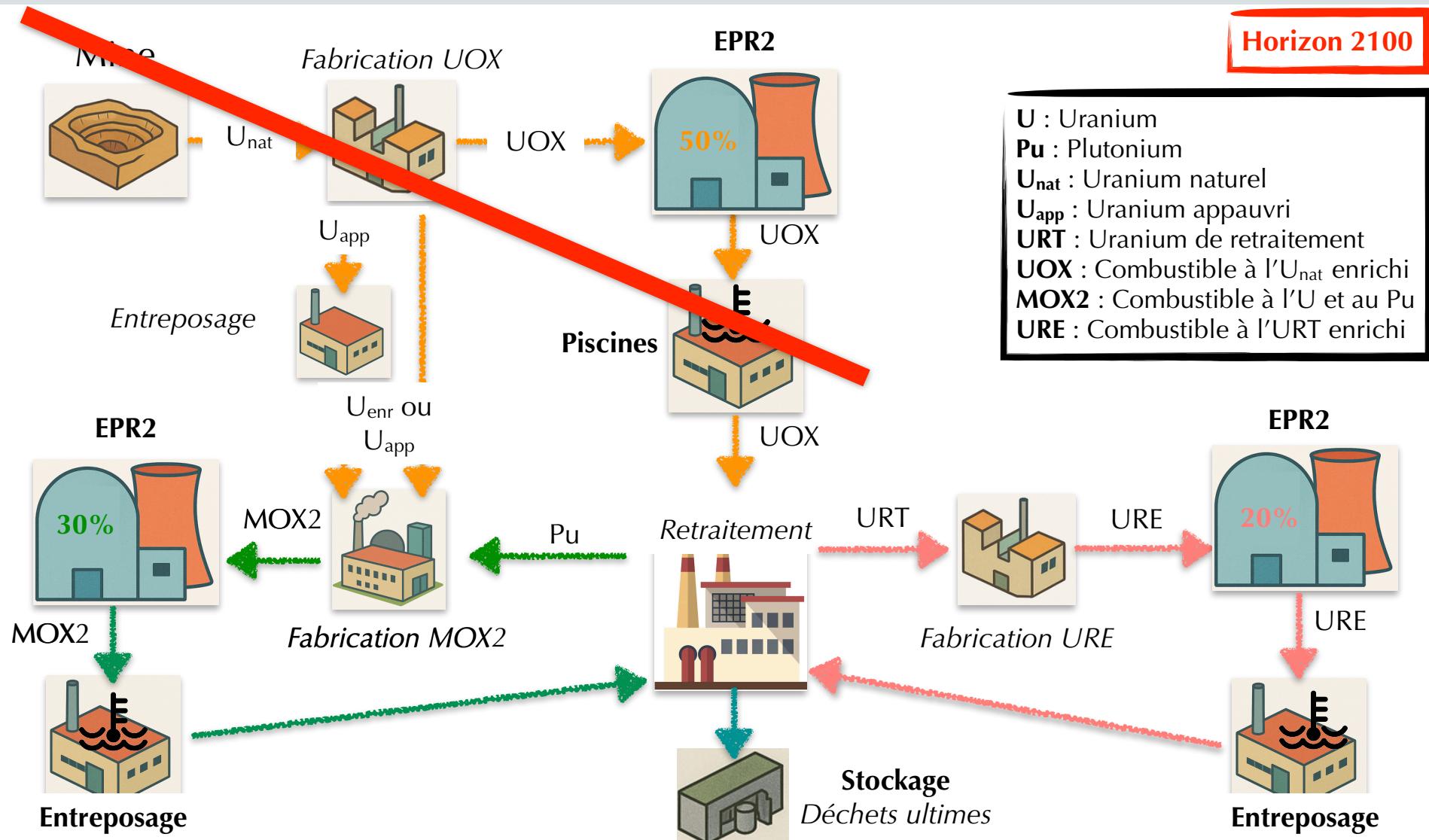
# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 3.1 Moyen terme : Multi-recyclage en REP



# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 3.3 Long terme : fermeture du cycle

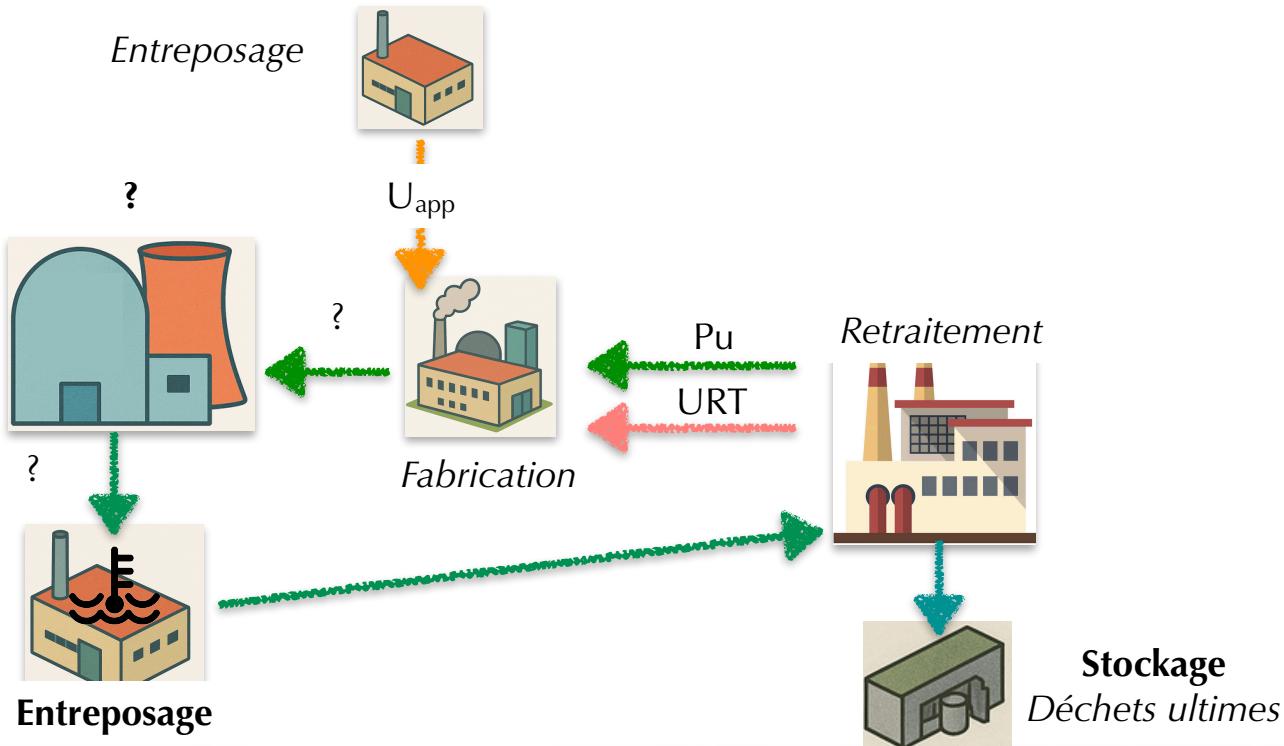


# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 3.3 Long terme : fermeture du cycle

Horizon 2100

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

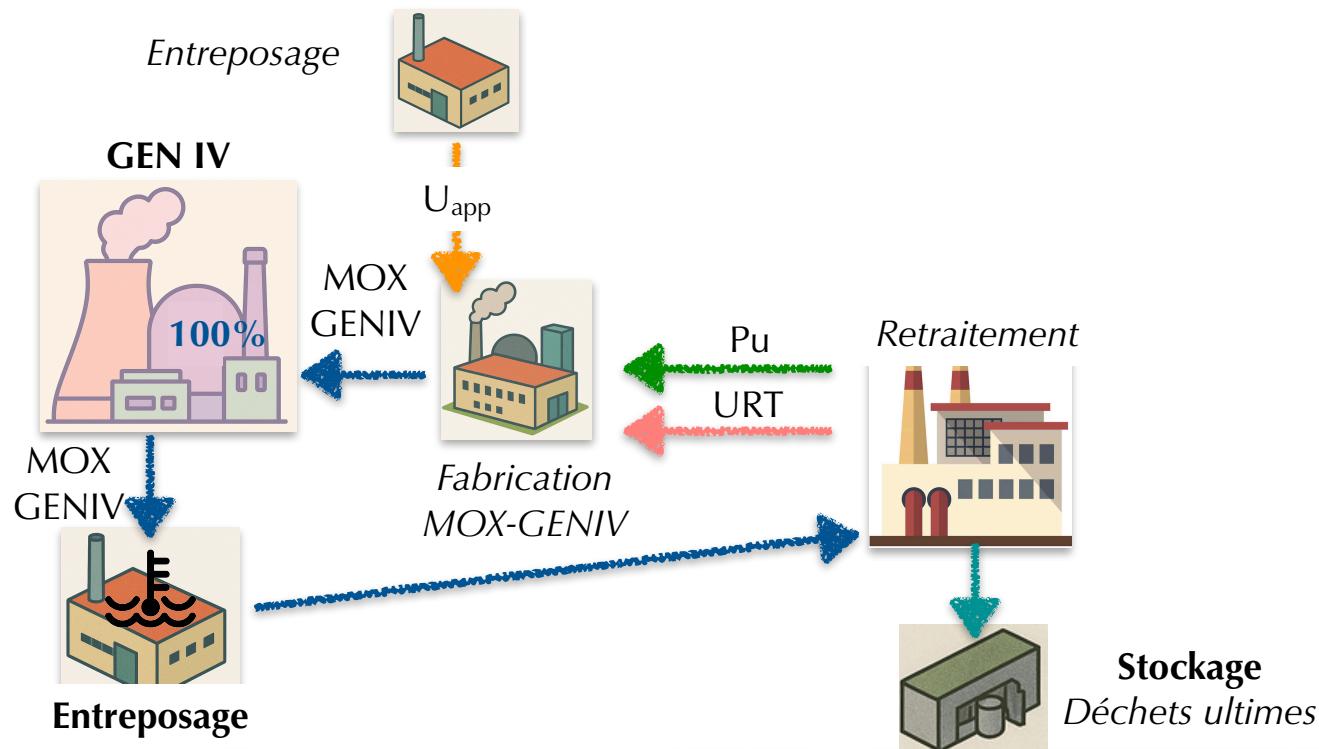


# 3. EVOLUTION DU PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS

## 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**

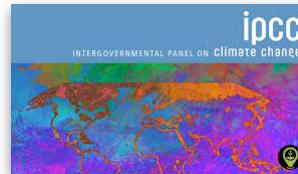
# 4. RECOURS AUX ÉTUDES PROSPECTIVES

## 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

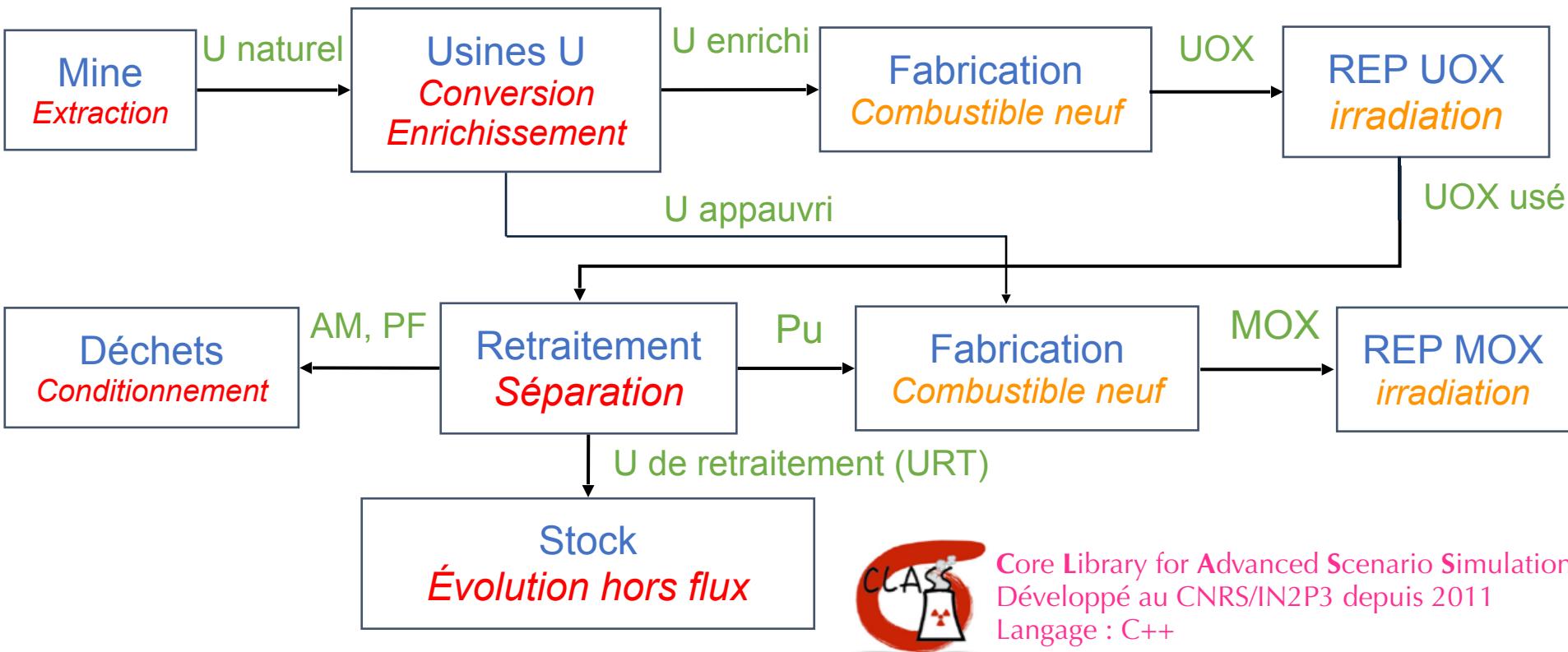
- Quantifier les impacts d'un changement de stratégie sur un cycle du combustible nucléaire
- Analyser les mécanismes physiques dans le cycle du combustible nucléaire
- Identifier les incertitudes associées aux trajectoires considérées

# 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++

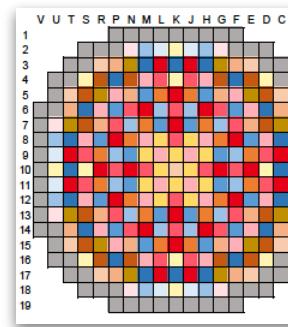
# 5. AXES DE RECHERCHES

## 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

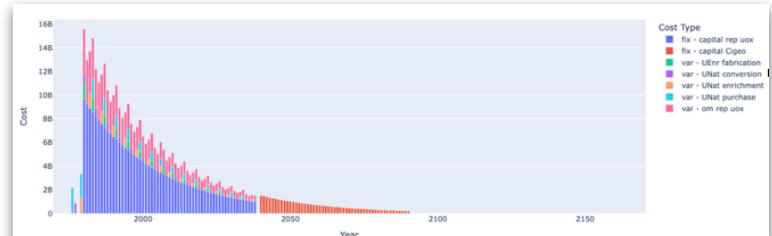
- Conception de modèles basés sur des calculs à l'échelle du cœur REP pour le Pu recyclé
- Amélioration de la représentativité des usines du cycle dans les codes de simulation



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**

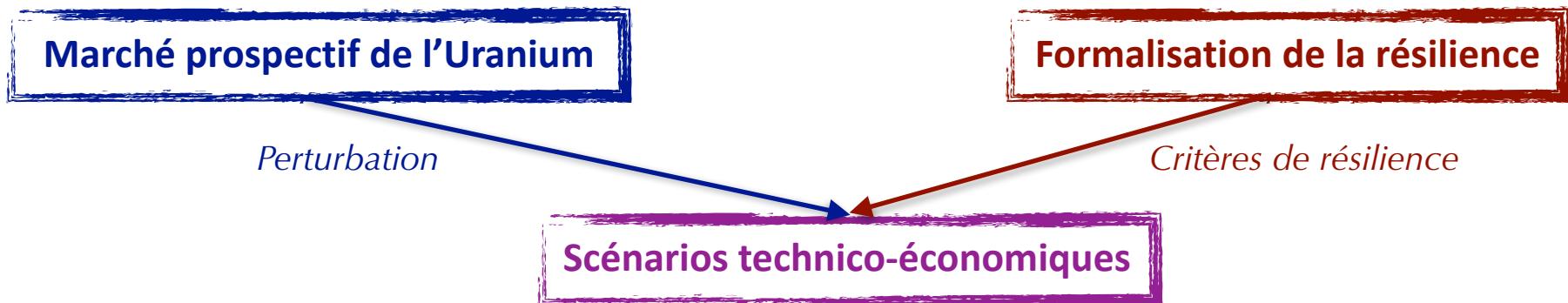
Dépôt ANR  
2026 envisagé

- **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