

# Simulations des systèmes nucléaires

## Scénarios associés

*Conseil Scientifique IN2P3 – 24/10/2013*

X. Doligez





## Permanents

A. Bidaud (MCF)  
N. Capellan (MCF)  
D. Heuer (DR)  
O. Méplan (MCF)  
E. Merle-Lucotte (PR)  
A. Nuttin (MCF)  
P. Rubiolo (PR)



L. Giot (MCF)  
M. Fallot (MCF)  
A. Porta (MCF)  
N. Thiollière (MCF)  
F. Yerma (MCF)

## Post-doctorants

B. Mougnot  
B. Leniau  
T. Shiba  
A. Cucoanes

## Doctorants

M. Brovchenko (2013)  
P. Sabouri (2013)  
A. Laureau (2015)

A. Onillon (2013)



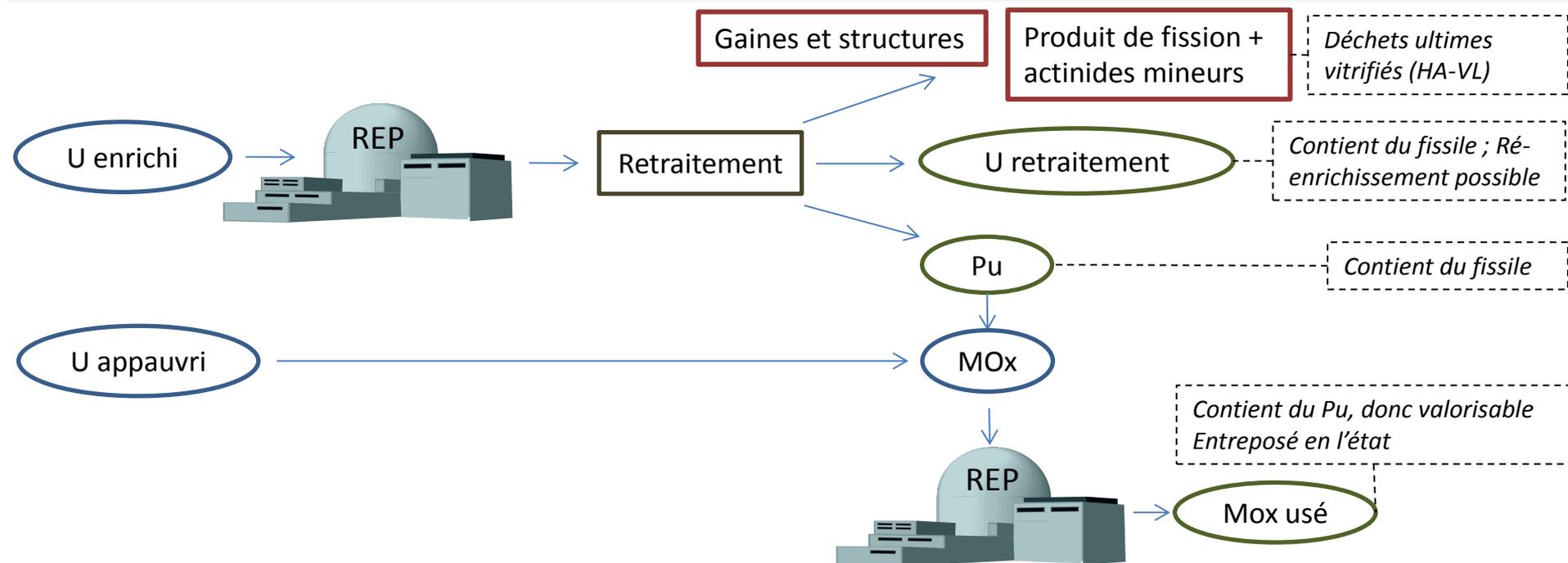
S. David (CR)  
X. Doligez (CR)

B. Leniau (2013)  
M. Ernout (2014)

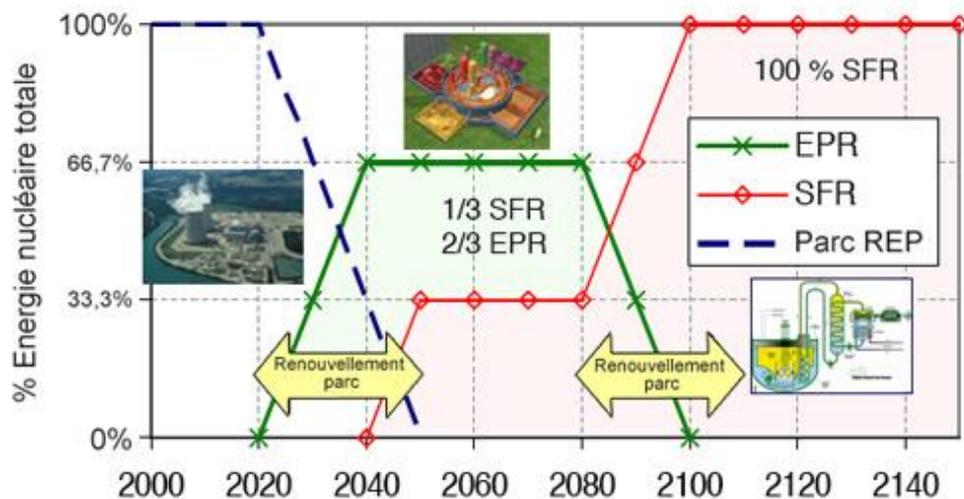
- Financement annuel :
- IN2P3 : ~ 40 k€
  - NEEDS/PACEN : ~ 55 k€

Les trois équipes travaillent de manière cohérente et concertée

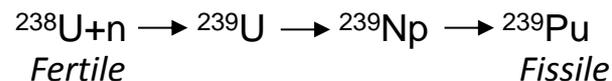
# Introduction : rappel de la situation française



➤ Une situation cohérente avec la stratégie de référence :



Il faut garder le plutonium pour les réacteurs à neutrons rapides (dont ASTRID en est le prototype)



## **L'avenir de l'énergie nucléaire est incertain**

- Incertitudes liées au contexte législatif
- Incertitudes liées au contexte énergétique

## **Les problématiques dépendent beaucoup de la « demande nucléaire » dans le monde**

- Le débat est national mais la problématique est internationale
- Le paysage Français dépendra du paysage asiatique

## **Système & Scénario : discipline centrale de la problématique « énergie nucléaire du futur »**

- Discipline tournée vers l'interdisciplinarité
  - Sciences dures (chimie du retraitement, matériaux, physique nucléaire,...)*
  - Sciences humaines (sociologie, économie de l'énergie,...)*

Historiquement, l'IN2P3 a investi cette discipline pour étudier la faisabilité de la transmutation des actinides

- Loi de 1991 puis de 2006

## **Aujourd'hui nous poursuivons deux objectifs :**

- La physique des systèmes et les conséquences sur les scénarios
- Apporter des éléments de débat dans la sphère sociétale

## **1/ Des codes innovants pour comprendre la neutronique**

L'évolution

Le couplage avec la thermohydraulique

Les incertitudes

## **2/ Quelques systèmes étudiés**

Réacteurs existants en cycle thorium

Réacteurs à neutrons rapides en cycle uranium

Réacteurs assistés par accélérateur

Réacteurs à sels fondus

## **3/ Un code de scénario pour appréhender les dynamiques dans le cycle**

➤ **Des calculs fiables de réacteurs sont fondamentaux pour les études de scénarios**

Les possibilités des systèmes sont étudiées à l'aide de calculs d'évolution du combustible

Chacune des options demande un calcul prédictif

→ *Production de déchets*

→ *Utilisation des ressources (d'uranium-235)*

➤ **La modélisation de la physique en jeu dans les réacteurs est un thème de recherche stratégique**

Marges de fonctionnement mal prise en compte et mal modélisée

→ *Couplage multi-physique difficile à appréhender*

Les codes sont le lieu d'intégration des compétences et des connaissances

→ *Reconnaissance des autres acteurs de la recherche*

# La simulation des réacteurs : introduction

- Objectif : identifier les vecteurs isotopiques en fonction du temps  
 → Déduire les propriétés neutroniques en fonction du temps

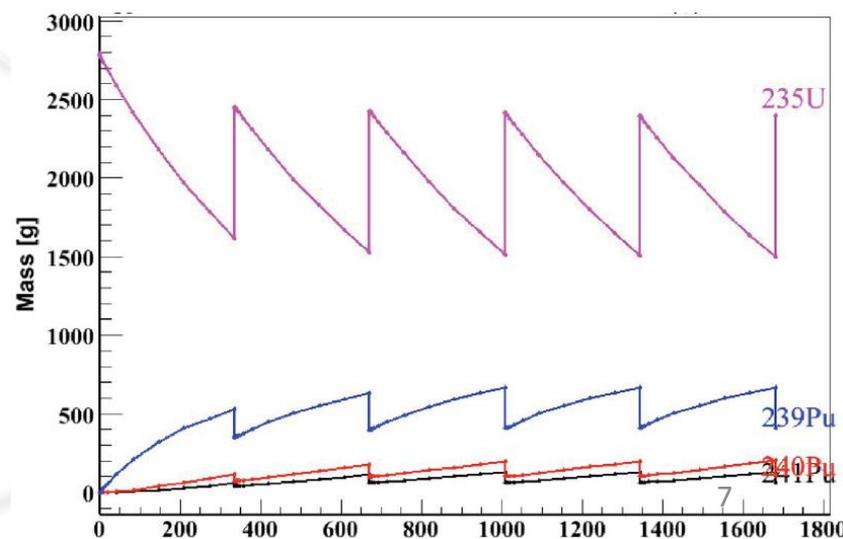
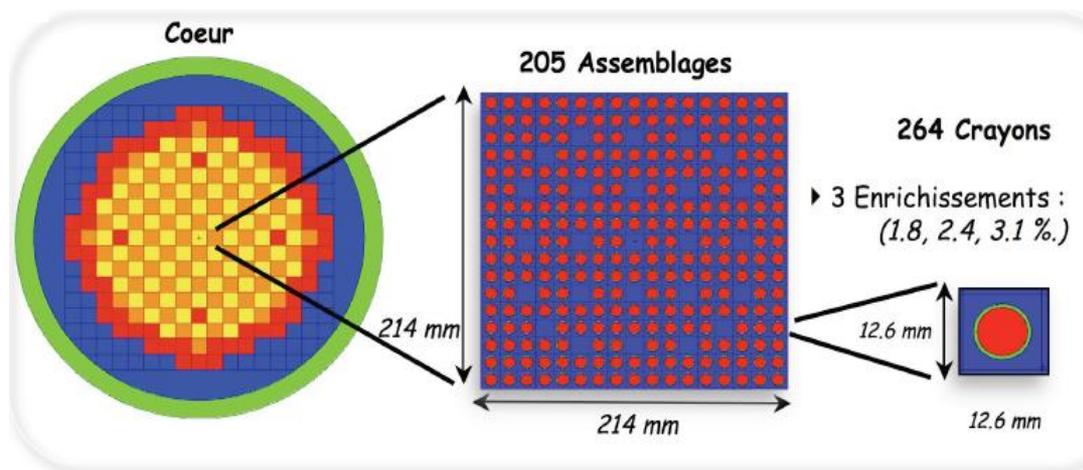
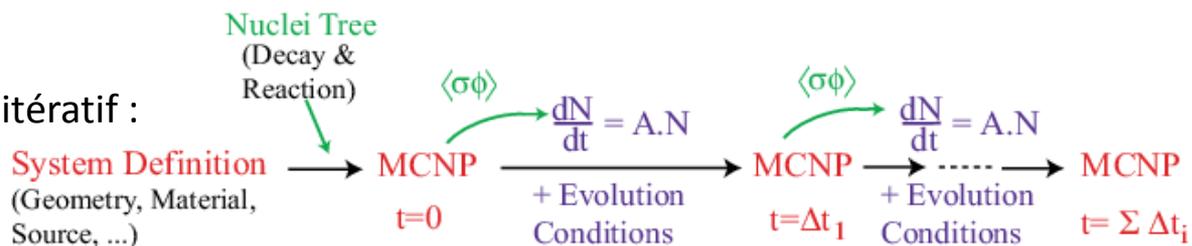
$$\frac{dN_i}{dt} = -N_i \underbrace{\sigma_i^{abs}} \phi - \lambda_i N_i + \sum_j N_j R_j \underbrace{\sigma_j^{j \rightarrow i}} \phi + \sum_j \lambda_j^{j \rightarrow i} N_j$$

Les taux de réactions dépendent du spectre et donc des noyaux présents



MCNP : code de référence qui minimise la modélisation

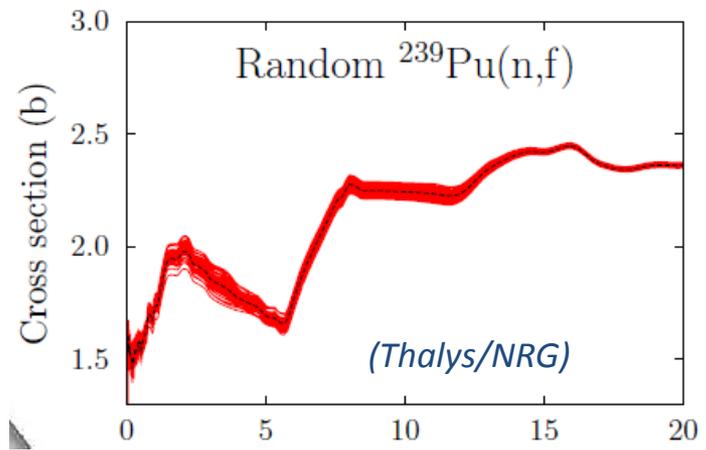
- Le schéma de calcul est itératif :



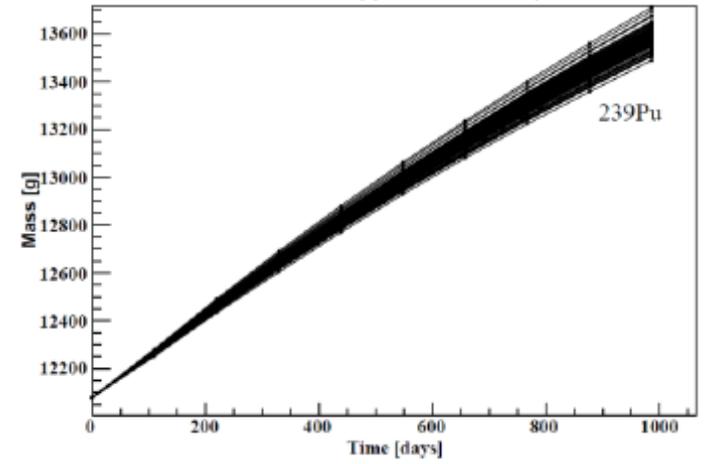
Aux incertitudes de modélisation s'ajoutent les incertitudes des données nucléaires

→ Il existe essentiellement deux méthodes : le TMC ou la théorie des perturbations

1/ En TMC, on calcule les incertitudes dues aux données nucléaires, mais il est difficile d'exploiter les résultats



N evolutions  
→



2/ Avec la méthode des perturbations, on calcule les sensibilités mais il est difficile d'estimer les incertitudes

$$\left. \begin{aligned} \frac{dN_j}{dt} &= A_{jk} N_k & N_i(0) \\ -\frac{dN_{ji}^+}{dt} &= A_{jk}^+ N_{ki}^+ & N_{ji}^+(T) = \delta_{ji} \end{aligned} \right\} \delta N_i(T) = \int_0^T N_k \delta A_{kj} N_{ji}^+ dt$$

Il maîtriser l'ensemble de la chaîne de propagation des incertitudes :  
 Mesure → Evaluation → Calcul assemblage → Calcul cœur

## ➤ L'IN2P3 a développé des codes d'évolution

- MURE et REM : Monte-Carlo évolutif
- Validé par Benchmark
- Couplage avec la thermohydraulique et avec l'étude du cycle



Disponible à la NEA depuis 2009

## ➤ Ces codes possèdent les défauts des codes Monte-Carlo

- Convergence des sources
- Propagation des erreurs

## ➤ Voies actuelles de recherches :

- Représentativité des calculs

*Le calcul cœur étant impensable à grande échelle, on réalise des calculs assemblage*

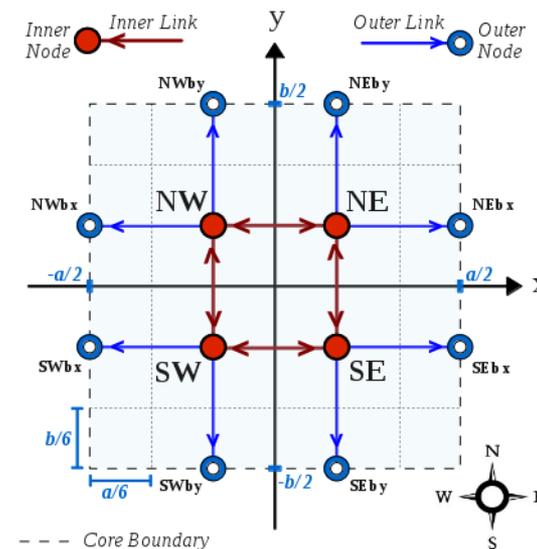
Impact du pilotage (bore, barres,...) et des fuites dans les calculs

- Etudes des transitoires en condition accidentelle

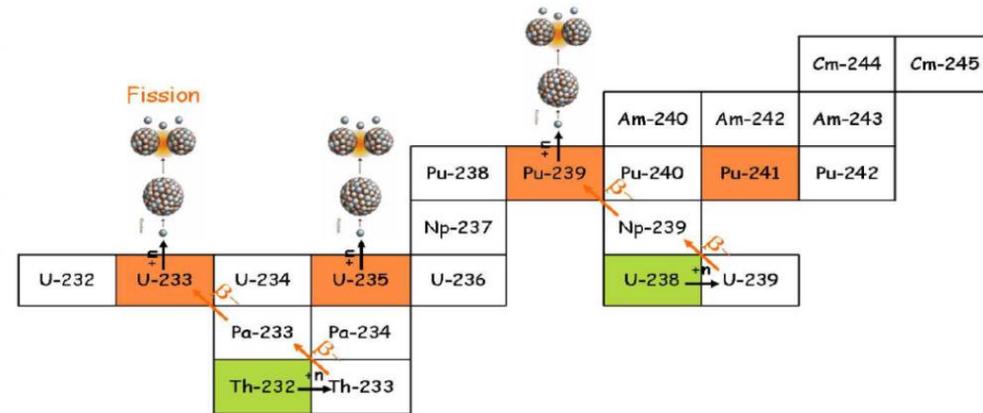
*Changement brutal des conditions du système*

Développement d'un code simplifié de cinétique nodale

## ➤ Aller vers un couplage méthodes déterministe/probabiliste



## Deux cycles possibles pour le combustible



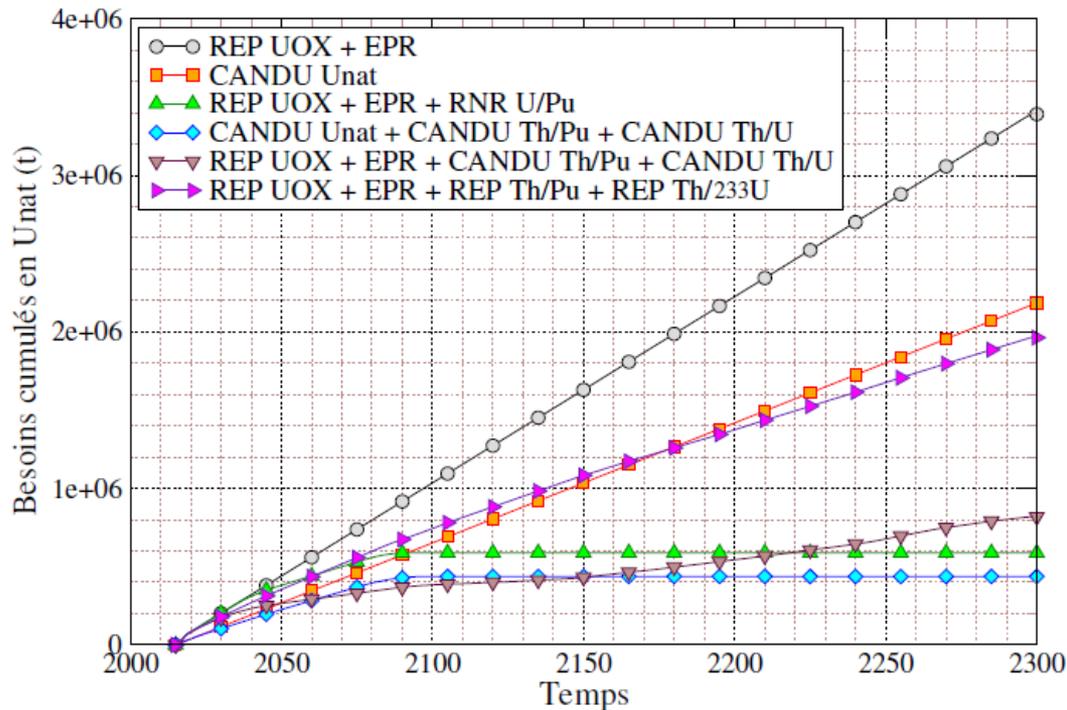
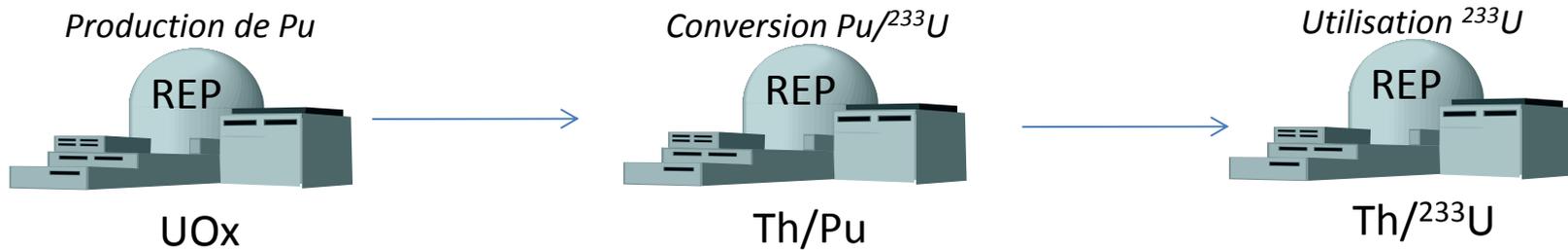
Réacteurs existants : *REP + CANDU*

Réacteurs du futur « standard » : *RNR-Na*

Réacteurs du futur innovants : *RSF + ADS*

- **Comparaison objective des différentes stratégies**
  - *Etudier sans a priori différents systèmes pour construire une vision globale*
- **Différents critères de comparaison**
  - *Production de déchets*
  - *Consommation de la ressource naturelle*
  - *Coefficients de sûreté de base*
  - *Inventaire en cycle*
  - *Résistance à la prolifération*
  - ...

L'utilisation du thorium permet-elle effectivement de réduire la consommation des ressources naturelles ?



En REP, la première strate est toujours majoritaire

→ *Pas d'économie significative de la ressource naturelle*

Pour bénéficier de l'apport du thorium, il faut aller vers la haute conversion

→ En CANDU, la régénération est accessible moyennant des cycles courts

On peut aller vers un parc isogénérateur en CANDU → *Stratégie indienne*  
**L'innovation n'est pas dans les systèmes mais dans le cycle**

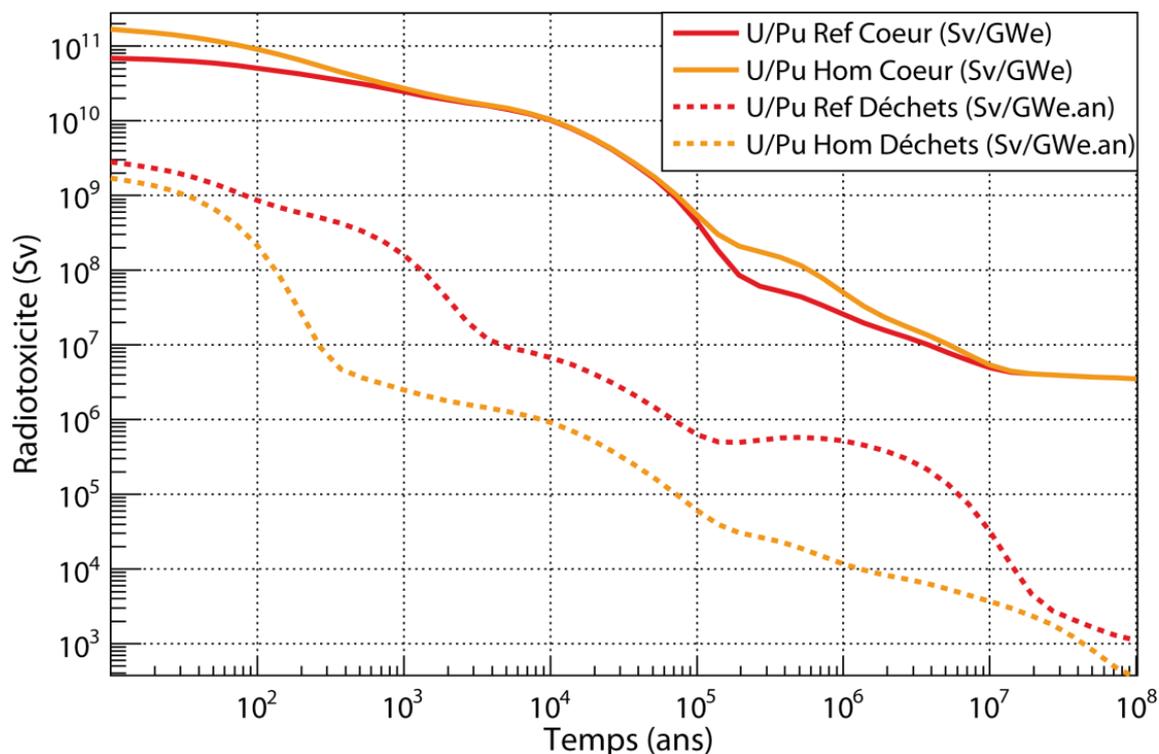
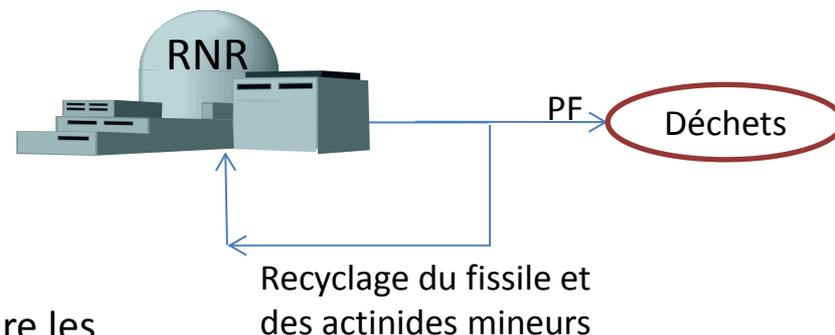
Déchets nucléaires = actinides (mineurs) + PF

**Les actinides mineurs sont valorisables en spectre rapide**

→ Inventaire fissile beaucoup plus important

*14 tonnes de Pu pour un cœur RNR*

→ Il faut 1000 ans de fonctionnement pour produire les déchets que contient le cœur

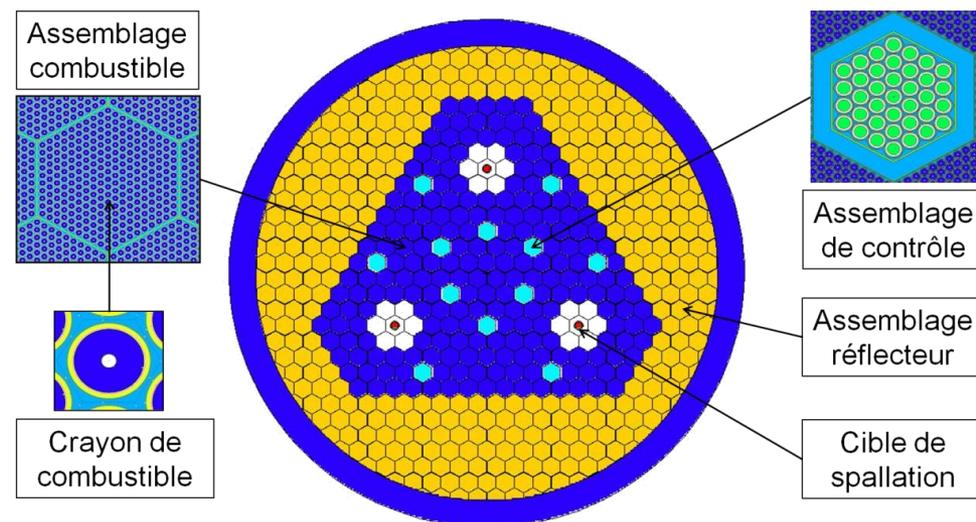
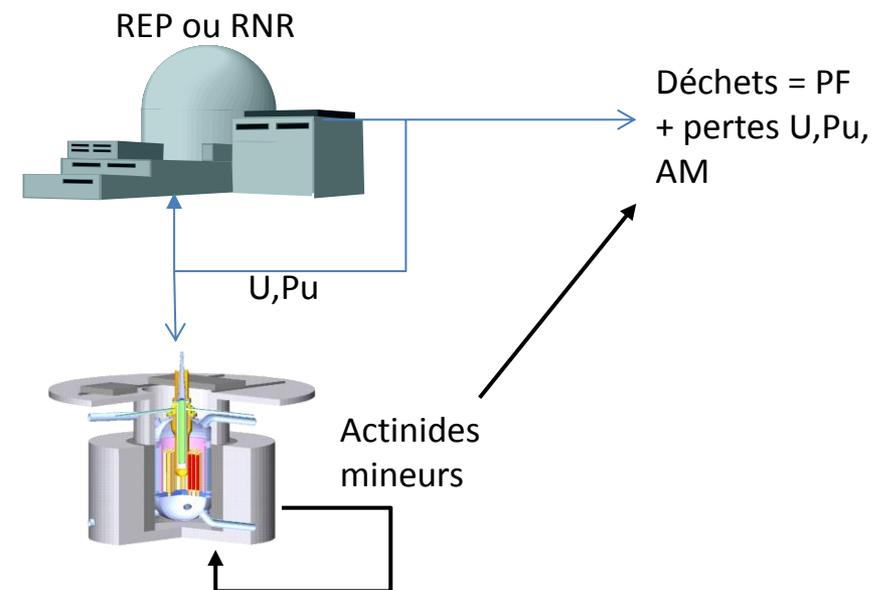


Le critère « inventaire en cycle » est un critère pertinent pour l'évaluation des scénarios

L'IN2P3 a montré l'importance des scénarios de « phase out » dans les options du nucléaire du futur

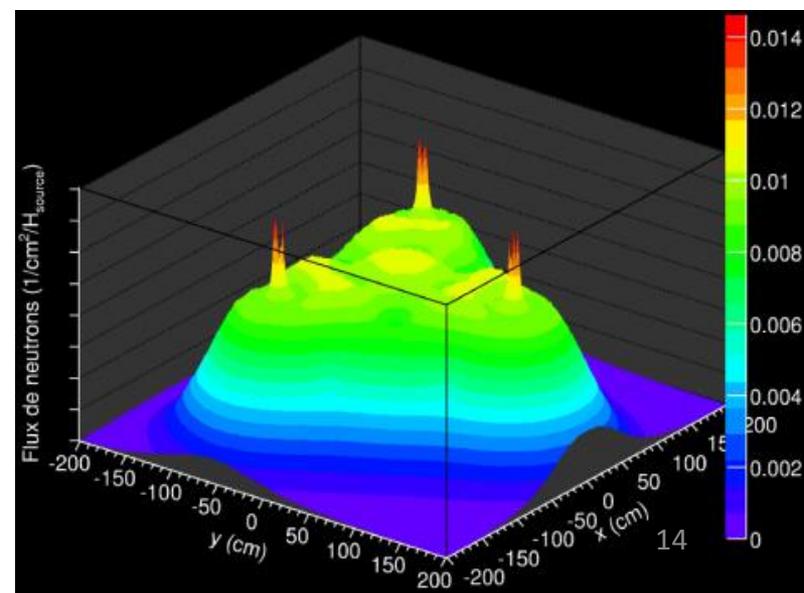
→ L'usage du thorium n'améliore pas sensiblement les résultats

La problématique de l'inventaire impose de penser l'incinération découplée des réacteurs électrogène

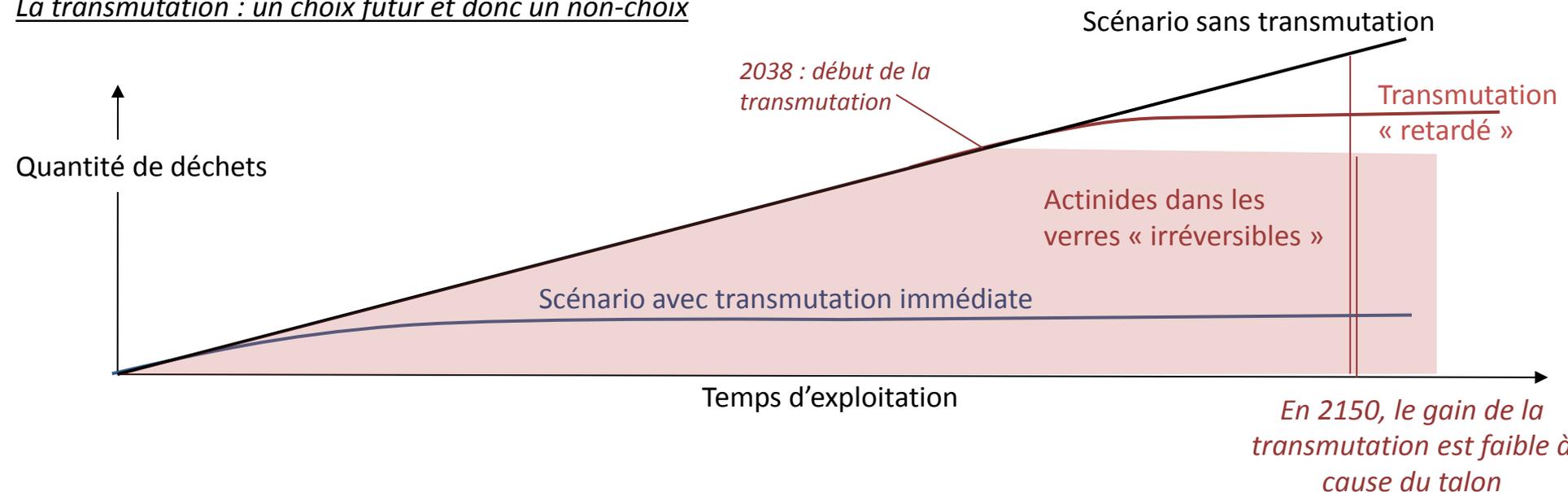


Pour améliorer l'efficacité, il faut augmenter la puissance des ADS et donc aplatir la nappe de flux  
→ *Concept multicible, voire cible annulaire*

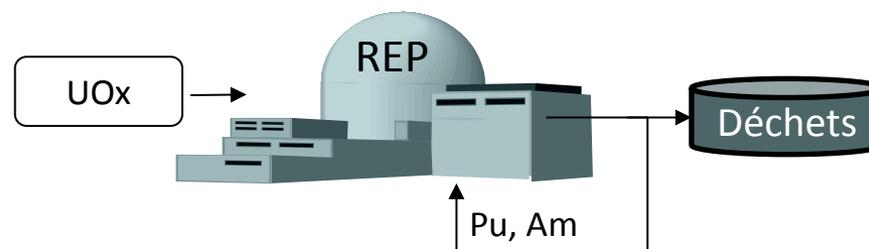
**Quels matériaux capable de tenir l'irradiation ?**



## La transmutation : un choix futur et donc un non-choix



- Les déchets produits avant le déploiement des RNR-Na représentent la part dominante
- Etude du mono-recyclage de l'Am pour préparer la transmutation éventuelle (stratégie d'attente)



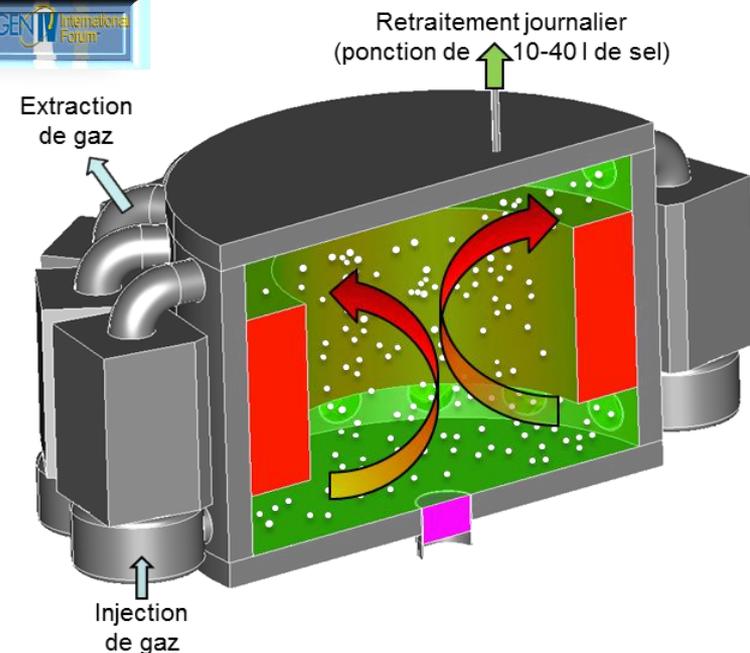
- L'impact sur la neutronique est raisonnable si le temps de retraitement est  $< 10$  ans

- Le gain sur la toxicité et la chaleur des déchets est immédiat

# Un futur du nucléaire alternatif : les réacteurs à sels fondus

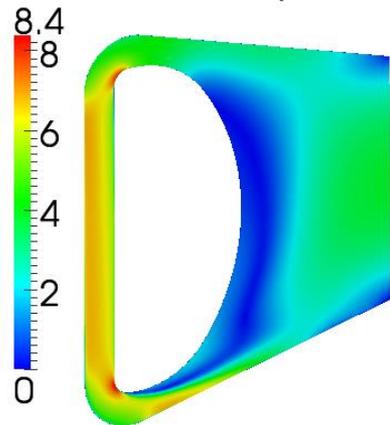
Définition en 2008 d'un concept innovant de RSF à spectre de neutrons rapide, baptisé MSFR (Molten Salt Fast Reactor)

- Fonctionne en fluorure fondus et en cycle thorium
- Tous les coefficients de contre-réaction thermiques sont largement négatifs
- L'absence de matériaux dans la zone de haut flux réduit la production de déchets de type « éléments de structure irradiés » et les interventions en cœur
- Le réacteur est régénérateur et multi-recycle les noyaux lourds

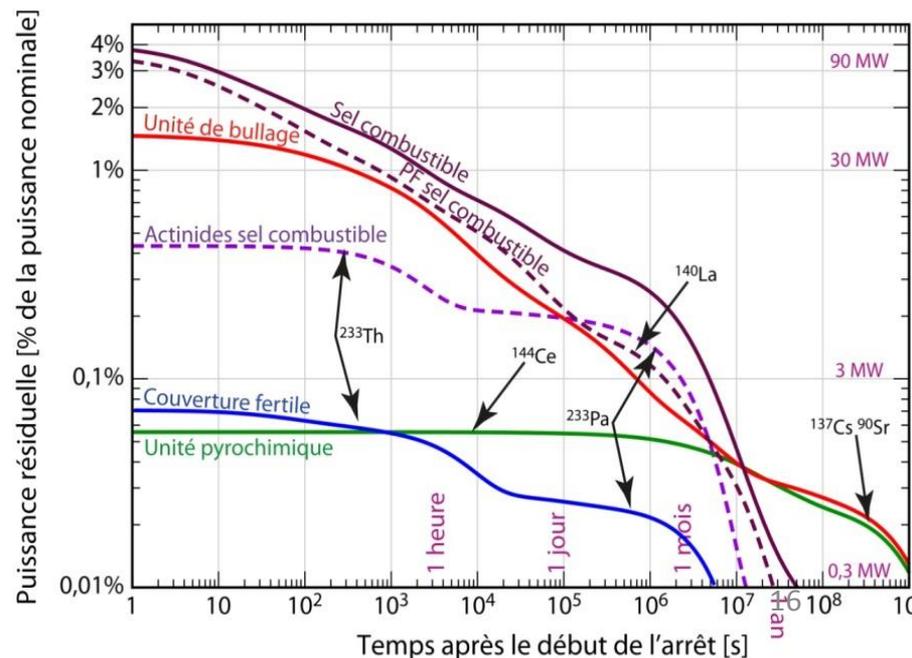
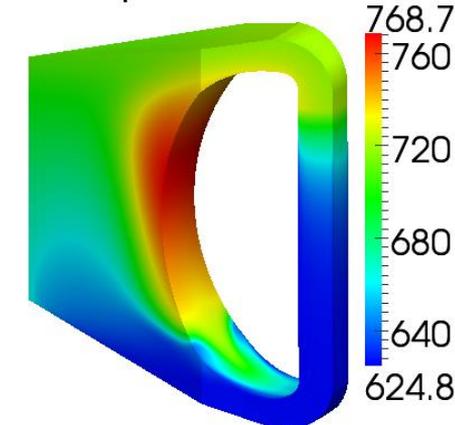


Le réacteur est couplé à son unité de retraitement

Vitesse - m/s



Temperature - °C



## Projet européen « EVOL »

Evaluation and Viability Of Liquid fuel fast reactor  
7<sup>ème</sup> PCRD (2011-2013) : coopération Euratom/Rosatom

- - Proposer la meilleure configuration de design, et commencer la définition d'un démonstrateur

## Projet structurant Grenoble-INP « CLEF »

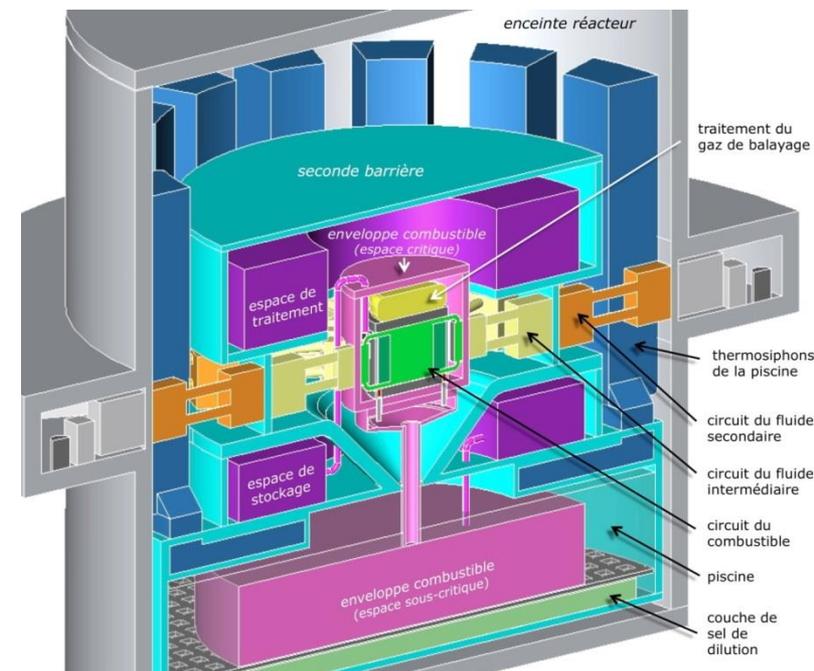
Combustible Liquide pour une Énergie Future



- - Développer les outils et modèles numériques nécessaires pour les études de Conception et de Sûreté du MSFR
- - Proposer une nouvelle approche des études de sûreté des réacteurs nucléaires adaptée au cas d'un combustible liquide

**Le projet MSFR mobilise une communauté « sels fondus » intégrant plusieurs autres spécialités :**

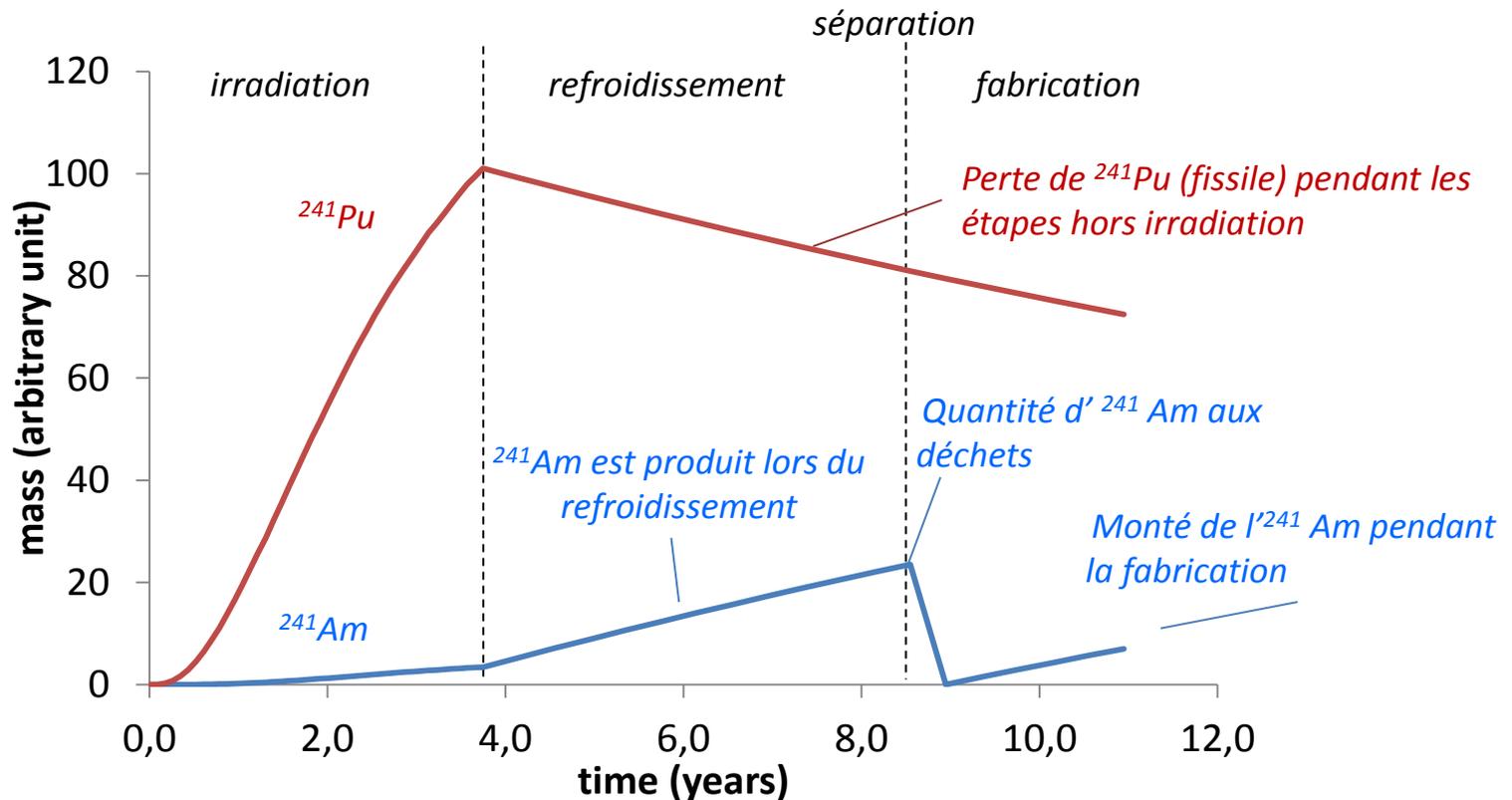
- radiochimie
- matériaux
- thermohydraulique



- **Les codes développés sont mis à disposition pour les études systèmes**
  - La vision globale demande des études sur des systèmes diversifiées
  
  - Sélection de systèmes d'intérêt et études plus poussées
    - *Étude symbiotique du design et de la sûreté des RSF*
    - *Analyses de transitoires en CANDU (comparaison Th et U)*
    - *Recherche de la haute conversion en REP thorié*
  
  - Identification de nouveaux critères d'évaluation
    - *Inventaire en cycle*
    - *Possibilité de « Phase-out »*
  
- **Les performances de ces systèmes sont évaluées via des codes de scénarios simplifiés**
  - *Oscar, SDF, MURE*
  
- **Pour prendre en compte la transition ou l'historique du parc, il faut un nouvel outil**
  - *CLASS développé en collaboration avec l'IRSN*

## La simulation de l'ensemble du cycle est nécessaire !

Exemple  $^{241}\text{Pu} \rightarrow ^{241}\text{Am}$



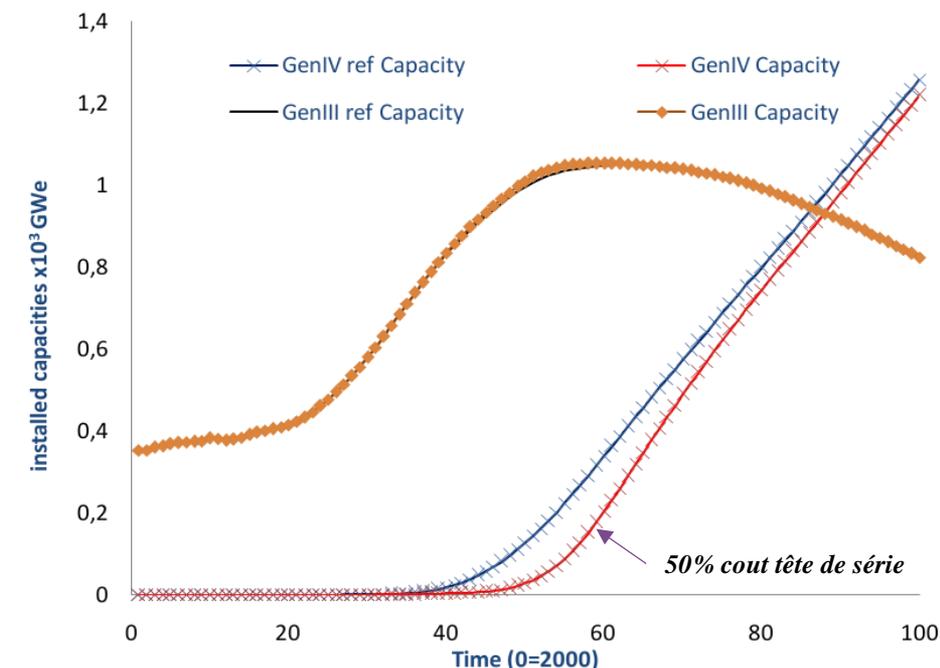
**Besoin d'un code de scénario ouvert dont on maîtrise de A à Z les modélisations, les approximations ainsi que les données d'entrées (calculs systèmes)**

La création d'un code permet aussi de :

- Capitaliser les connaissances
- Proposer des méthodes innovantes de simulation
- agréger une communauté CNRS/université

## 1/ Construire une « demande nucléaire »

*POLES : « Prospective Outlook on Long Term Energy System »*



- Réacteurs actuels et régénérateur ne seraient pas en concurrence
- Risque de tension sur les flux de matières et non sur les quantités

→ Quel impact si on généralise le recours au Mox ?

→ Quel impact des politiques locales ?

*Ex : taxe carbone, sortie de l'Allemagne*

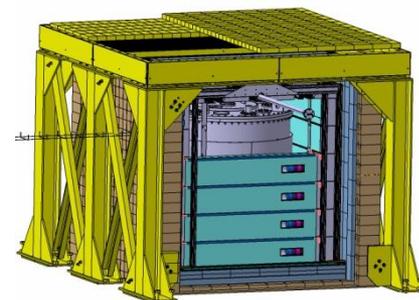
➤ **Collaboration avec les économistes de l'énergie, les géologues, les sociologues ... pour avoir un ensemble d'outils cohérent pour l'étude des scénarios nucléaires**

## 2/ Identifier des scénarios de proliférations

Simulation de « scénarios de détournement » pour l'AIEA

Et détection de ces scénarios via la détection d'antineutrinos

*Test expérimental : NUCIFER et Double-Chooz*



## **Maîtriser les calculs de réacteurs pour la physique des réacteurs et des études de scénarios**

→ *Porte ouverte sur l'interdisciplinarité*

## **Un lien entre la physique fondamentale et la sphère sociétale**

### ➤ Au niveau politique

Loi de 2006 sur les déchets nucléaires

Commission Nationale d'Evaluation (CNE-2)

Comité interministériel de Suivi sur les Systèmes Nucléaire du futur, et sur la recherche de l'Aval du Cycle (COSSYN & COSRAC)

Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifique et Technique (OPECST)

### ➤ Au niveau sociétal

Commission Nationale de Débat Public CNDP (CPDP2005 et CPDP2013)

## **Une forte demande en enseignement en physique des réacteurs**

### ➤ Il y a une forte sollicitation de l'IN2P3 dans l'enseignement

→ *L'enseignement nucléaire doit-il être porté uniquement par des industriels ?*

### ➤ Cet enseignement demande une activité de recherche spécifique en physique des réacteurs



## La simulation des réacteurs : vers la maîtrise des incertitudes...

Aux incertitudes de modélisation s'ajoutent les incertitudes des données nucléaires

→ Il existe essentiellement deux méthodes : le TMC ou la théorie des perturbations

1/ En TMC, on calcule les incertitudes dues aux données nucléaires, mais il est difficile d'exploiter les résultats

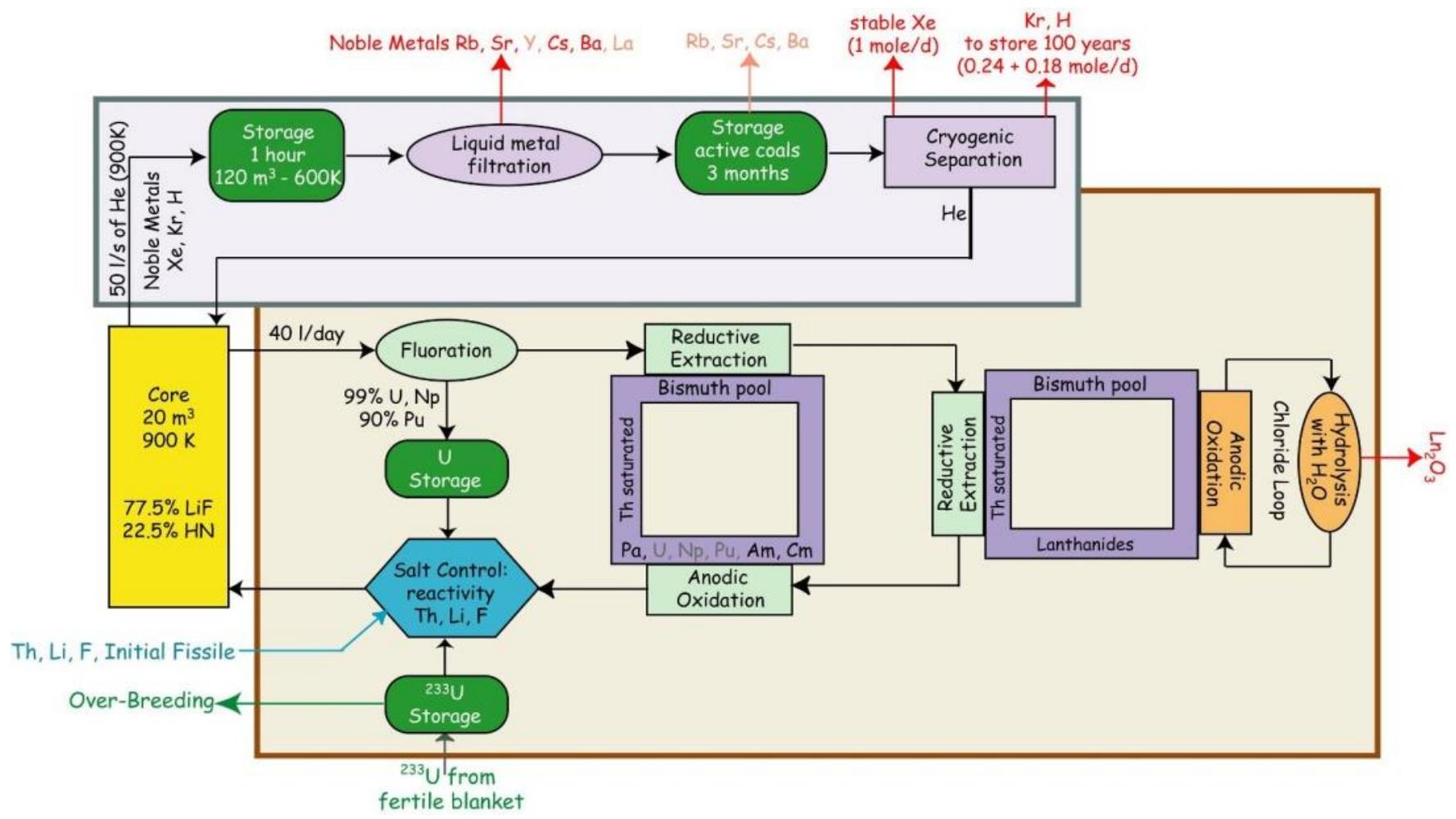
2/ Avec la méthode des perturbations, on calcule les sensibilités mais il est difficile d'estimer les incertitudes

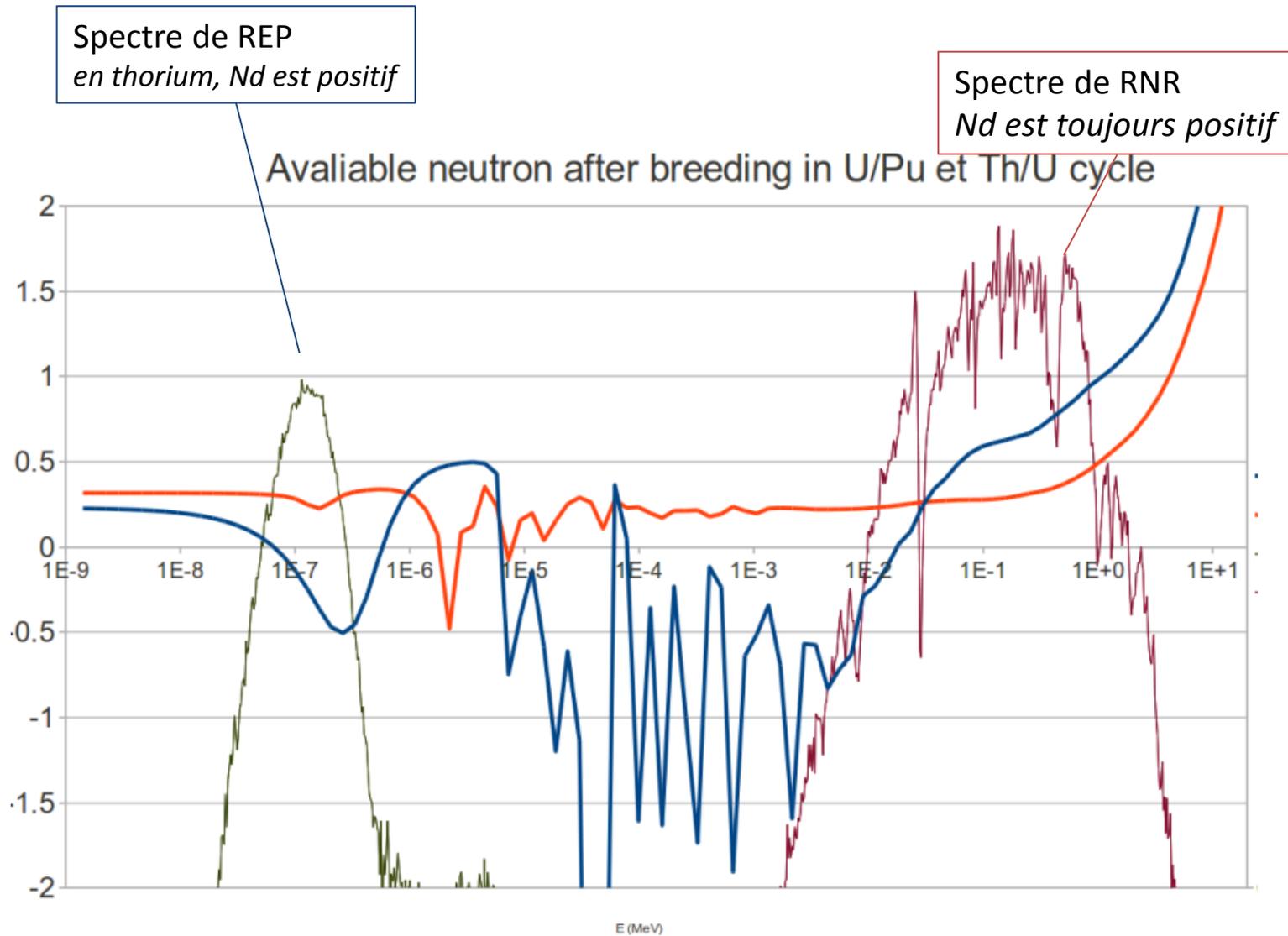
### Dispersion en fin de cycle

Isotopes	TMC calculations	Perturbation theory (constant power)	Perturbation theory (constant flux)
Am-243	0,91	0,71	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Pu-242	0,69	0,66	$1,4 \cdot 10^{-3}$
Pu-240	30	40	40
Pu-239	47	50	50
U-238	39	34	$5,5 \cdot 10^{-8}$

Dans nos calculs, la normalisation à la puissance impose des corrélations fortes et impose les incertitudes

# RSF : couplé à son unité de retraitement





La régénération est accessible en spectre thermique grâce à l'utilisation du thorium