

# Les études systèmes et scénarios associés

Conseil scientifique IPNO  
12 - 13 Février 2018

*Sandra Bouneau, Xavier Doligez, Marc Ernoult, Lise Eychene,  
Abdoul-Aziz Zakari-Issoufou*

## → Le futur du nucléaire reste incertain

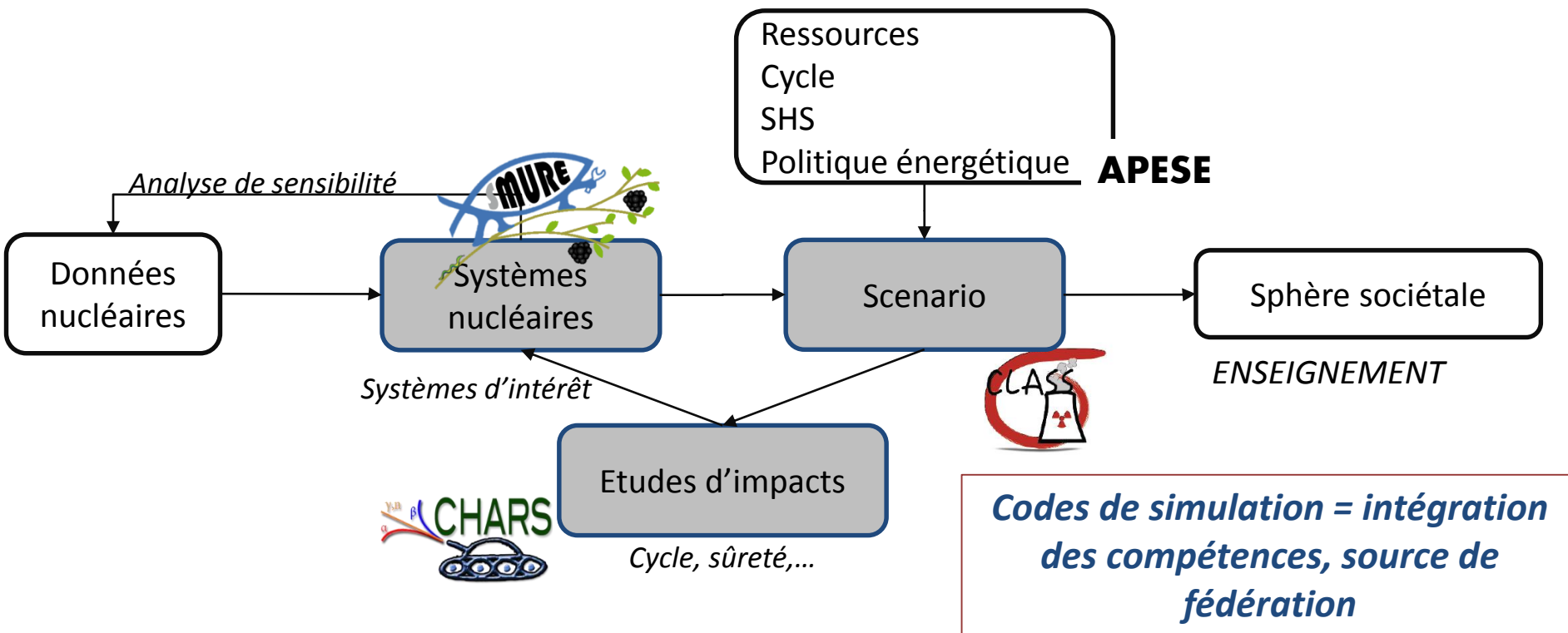
- Quelle va être l'évolution de la puissance nucléaire mondiale ?

*C'est la rareté de la ressource  $^{235}\text{U}$  qui pousse la fermeture du cycle*

→ Statut du plutonium = déchet ou matière valorisable ?

## → Etudier les potentialités des différents systèmes (type de réacteurs et type de combustible)

- Plusieurs futurs possibles qui impliquent des problématiques différentes
- Ressources naturelles, production de déchets, gestion du plutonium...
- Différents cadres géographiques et temporels



## → **Les études systèmes : vers la maîtrise des schémas de calculs...**

- Le code d'évolution SMURE
- La représentativité des calculs assemblages
- Les incertitudes induites par les données nucléaires

## → **Les scénarios nucléaire : vers l'optimisation sous contraintes...**

- Le code CLASS et les métamodèles de réacteurs
- Approche par Global Sensitivity Analysis
- Le projet PERMIS

## → **Les scénarios énergétiques : vers un couplage énergie/économie ...**

- L'intégration de l'économie dans CLASS : le projet DIESE
- L'analyse des scénarios énergétiques globaux
  - La méthode
  - Quelques résultats

- Rappel sur l'équation d'évolution du fuel : les équations de Bateman

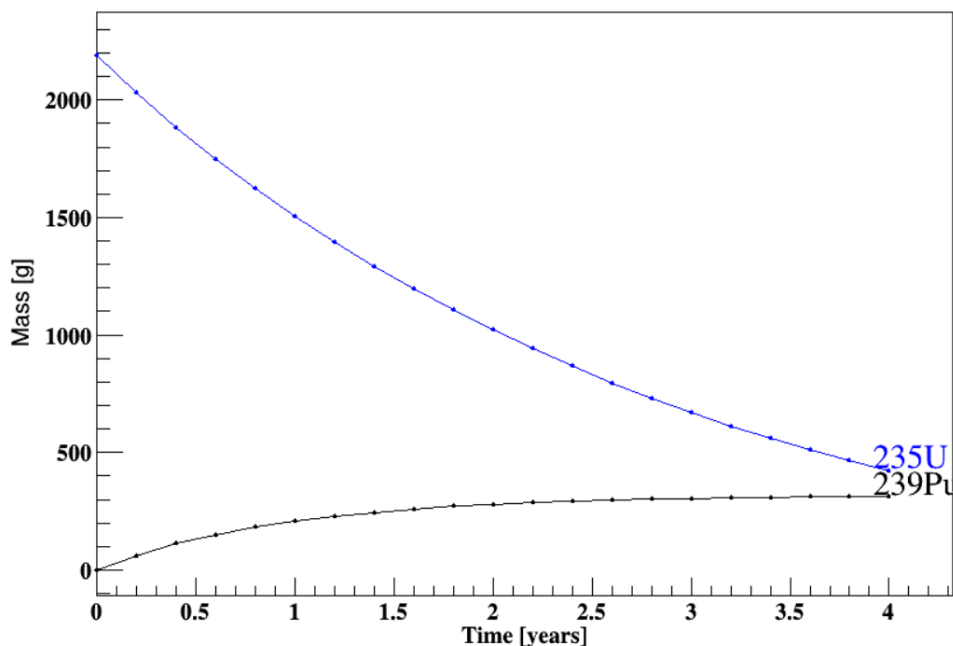
$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \sum_j \lambda_j^{j \rightarrow i} N_j(t) - \lambda_i N_i(t) + \sum_{j'} N_{j'}(t) \langle \sigma_{j'}^{j' \rightarrow i} \rangle \langle \Phi \rangle - \sum_r N_i(t) \langle \sigma_i^r \rangle \langle \Phi \rangle$$

- Equation valable pour chaque élément de volume dans le cœur
  - Résolution de l'équation du transport des neutrons par MCNP ou SERPENT
  - Calcul du spectre (et donc des  $\langle \sigma_i \rangle$ ) pour chaque élément de volume
  - Calcul du flux par normalisation de la puissance



Disponible @ NEA

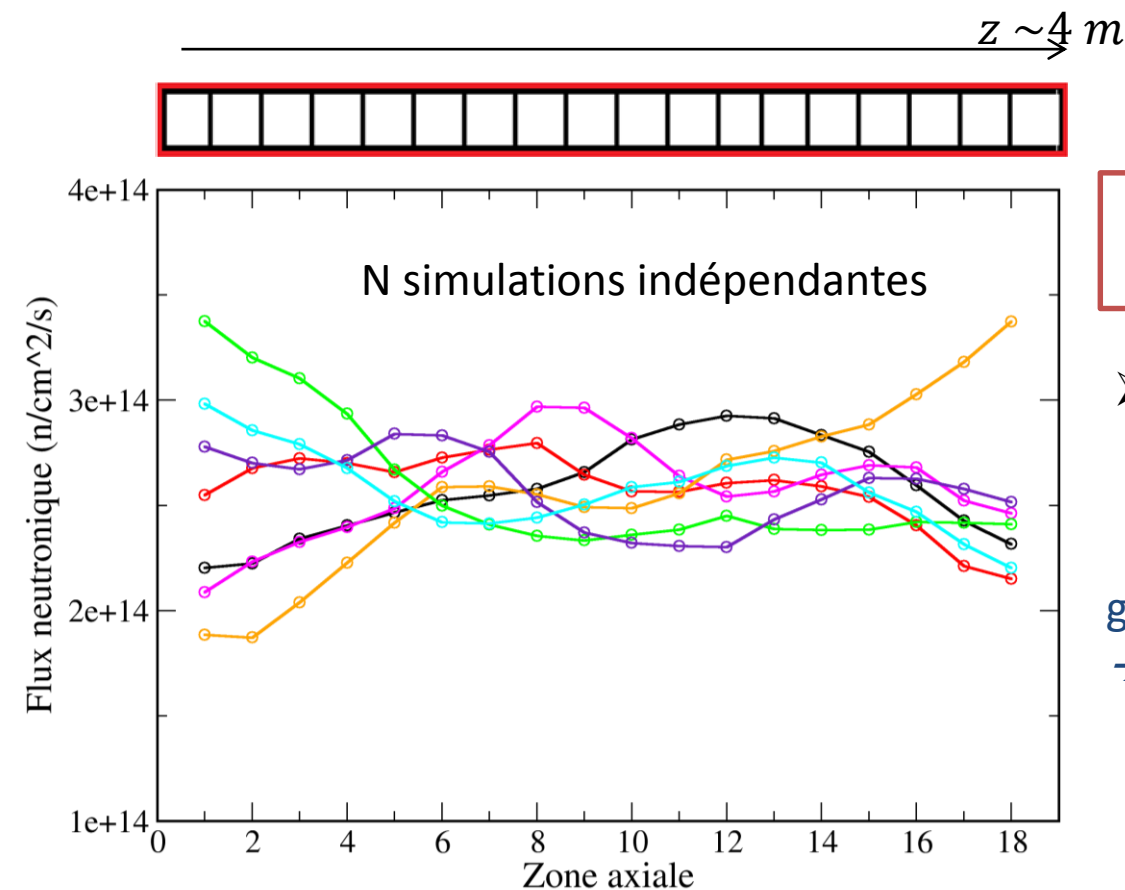
$$P = \langle \Phi \rangle \Sigma_f = \langle \Phi \rangle \cdot \sum_{fissile} N_i \langle \sigma_f^r \rangle$$



- Multi-recyclage du Pu en REP sur support uranium et thorium (*thèse Marc Ernoult, 2014*)
- Impact de l'utilisation des combustibles thoriés pour les installations du cycle (*thèse Baptiste Leniau, 2013*)
- Exploration de la transmutation en REP (*thèse Robert Sogbadgi, 2013*)
- Intérêt du cycle thorium pour la transmutation en RNR (*thèse Julie Brizi, 2010*)

# SMURE : SERPENT/MCNP for Reactor Utility Evolution

- SMURE = code Monte-Carlo évoluant
  - Avantage : pas de traitement d'auto-protection des sections efficaces
  - Inconvénient : convergence des sources !



→ Il est impossible de modéliser un cœur entier

- Séparation des variables :  
 $\phi(\vec{r}, E) = \underbrace{\varphi(E)}_{\text{géométrie « infinie »}} \cdot \underbrace{\psi(\vec{r})}_{\text{Calcul en diffusion à 2 groupes}}$

géométrie « infinie »

→ Codes stochastiques

Calcul en diffusion à 2 groupes

→ Codes déterministes

→ Thèse d'Alice Somaini (soutenue en septembre 2017) :

- Explorer les possibilités d'un couplage stochastiques/déterministes
- Propager les biais de modélisation du calcul infini dans un calcul cœur

# Représentativité des évolutions assemblages

## ➤ « Evolutions assemblages infinis »

→ Pas d'impact des fuites neutroniques sur le spectre

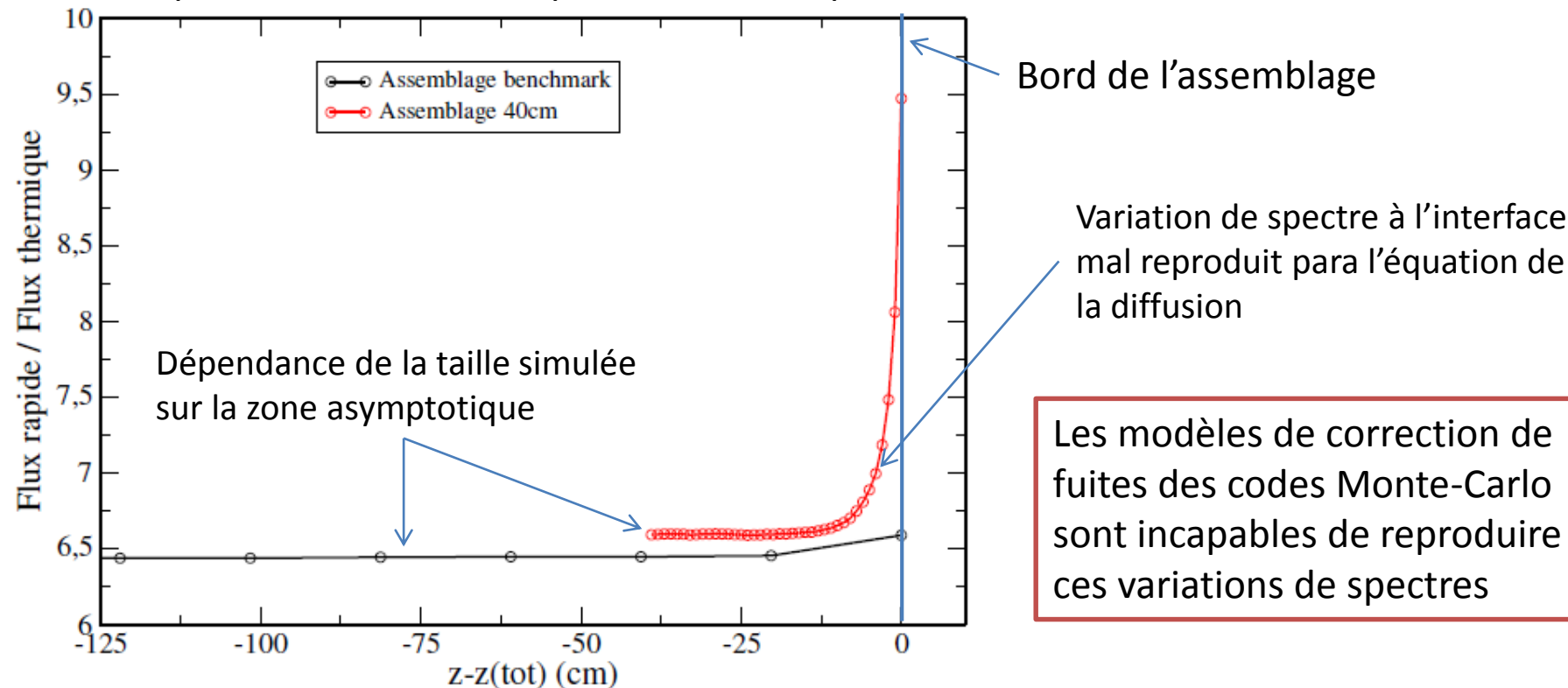
→ Pas d'interaction entre les assemblages

} Thèse A. Somaini

→ Pas de suivi de la réactivité (évolution à « bore constant »)

Stage P. Boulard &  
Antony Nithesh

## Impact des fuites sur le spectre neutronique

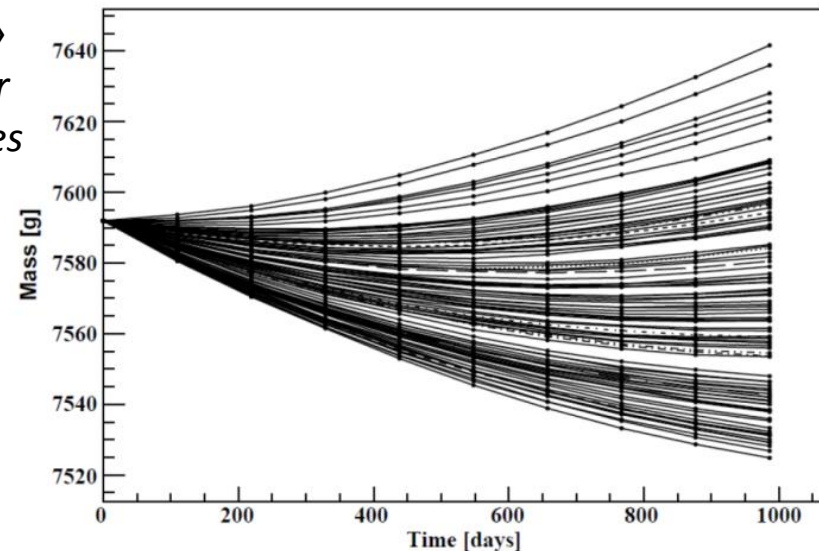


→ Propagation des biais : >5 % sur les actinides majeurs en fin d'irradiation

## → Depuis 2012, nous travaillons sur l'utilisation et le développement de méthodes pour la propagation des incertitudes aux données nucléaires

- Utilisation de la méthode « Total Monte Carlo »
  - *Echantillonnage des paramètres nucléaires pour construire un grand nombre de sections efficaces*

*Ex : impact des sections efficaces du Pu239 sur l'évolution du Pu240 dans un RNR-Na →*



## → Théorie des perturbations généralisées

- Exploration des calculs de sensibilités avec les codes Monte-Carlo
  - *Projet SEC (NEEDS 2016 et 2018)*
- Mise en application de la théorie des perturbations en évolution pour les systèmes à neutrons rapides

## → Vers des méthodes couplées

*- Collaboration équipe GRACE de l'IPHC*

- Simulation des systèmes pour l'évolution du combustible
  - Maîtrise des biais de modélisations
  - Propagation des incertitudes liées aux données nucléaires
    - Vers la physique à l'échelle cœur
    - Vers de nouveaux schémas de calculs

Collaborations à venir :

- IPHC pour les incertitudes
- Polytechnique Montréal pour les schémas de calculs
- CEA/SERMA pour les modèles simplifiés de réacteurs

→ **Les études systèmes : vers la maîtrise des schémas de calculs...**

→ **Les scénarios nucléaire : vers l'optimisation sous contraintes...**

- Le code CLASS et les métamodèles de réacteurs
- Approche par Global Sensitivity Analysis
- Le projet PERMIS

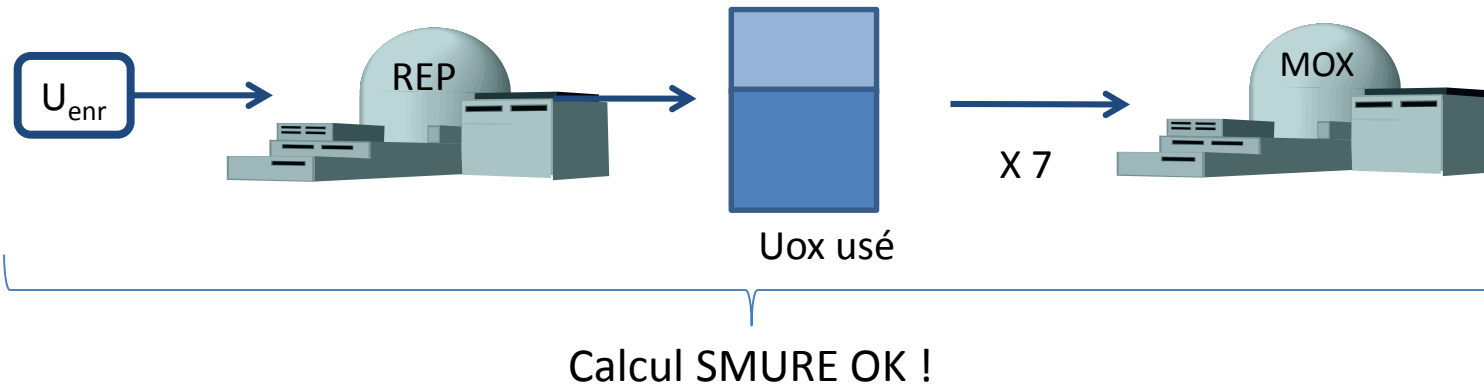
→ **Les scénarios énergétiques : vers un couplage énergie/économie ...**



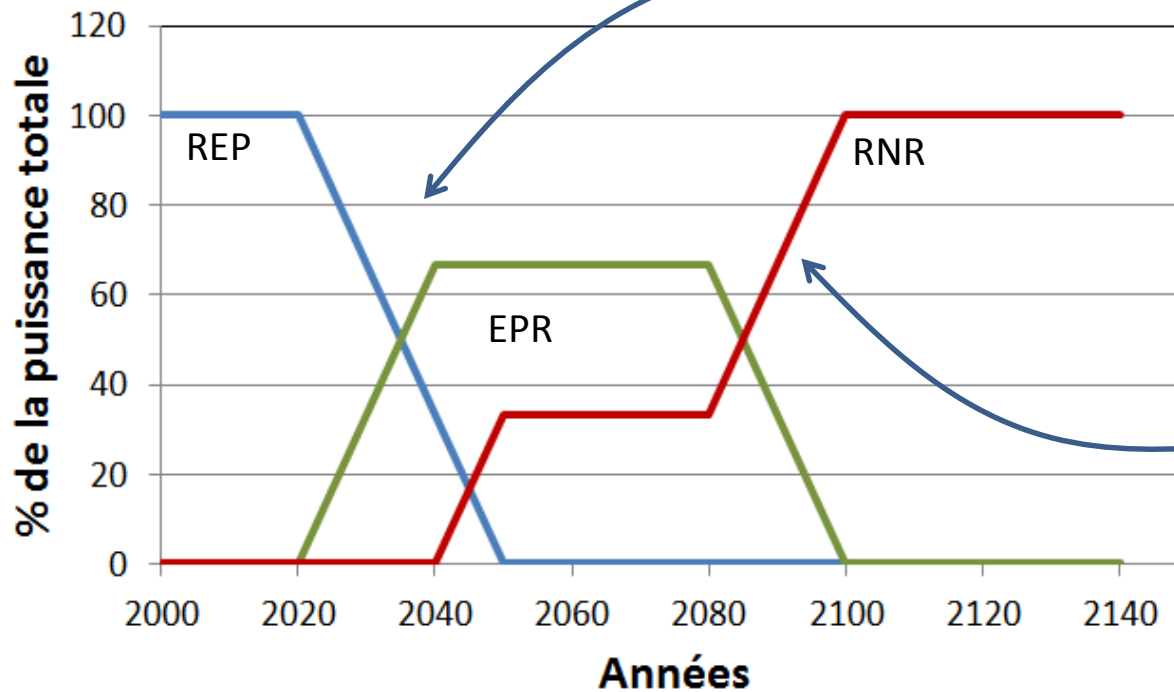
# Développement de CLASS

→ **Objectif : étudier des réacteurs en interaction entre eux !**

Dès que l'on considère la dynamique, SMURE ne suffit plus



→ **Exemple d'un scénario**

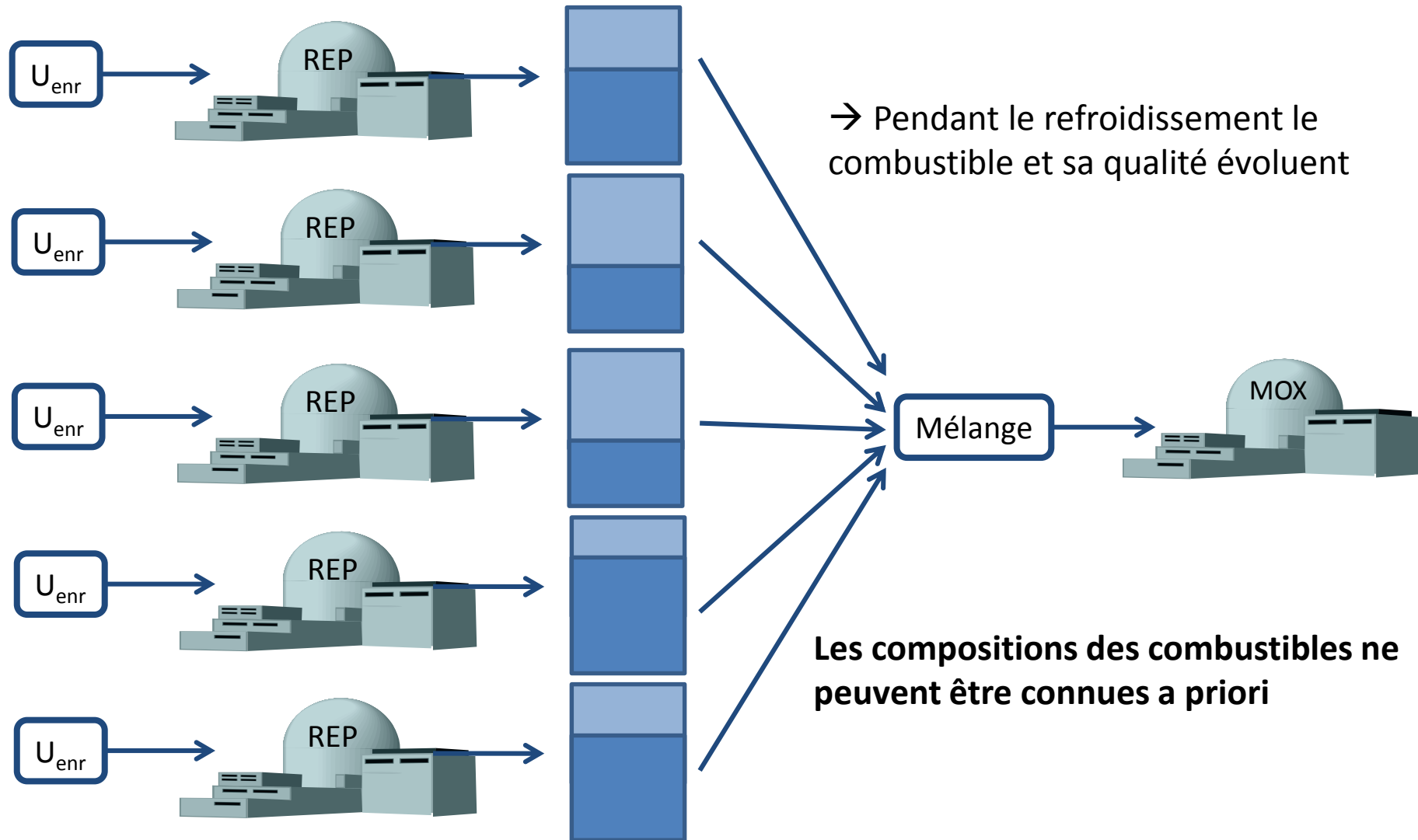


Le Pu est produit dans les REP aujourd'hui

... pour être utilisé dans les RNR dans 50 ans

→ **Objectif : étudier des réacteurs en interaction entre eux !**

Dès que l'on considère la dynamique, SMURE ne suffit plus

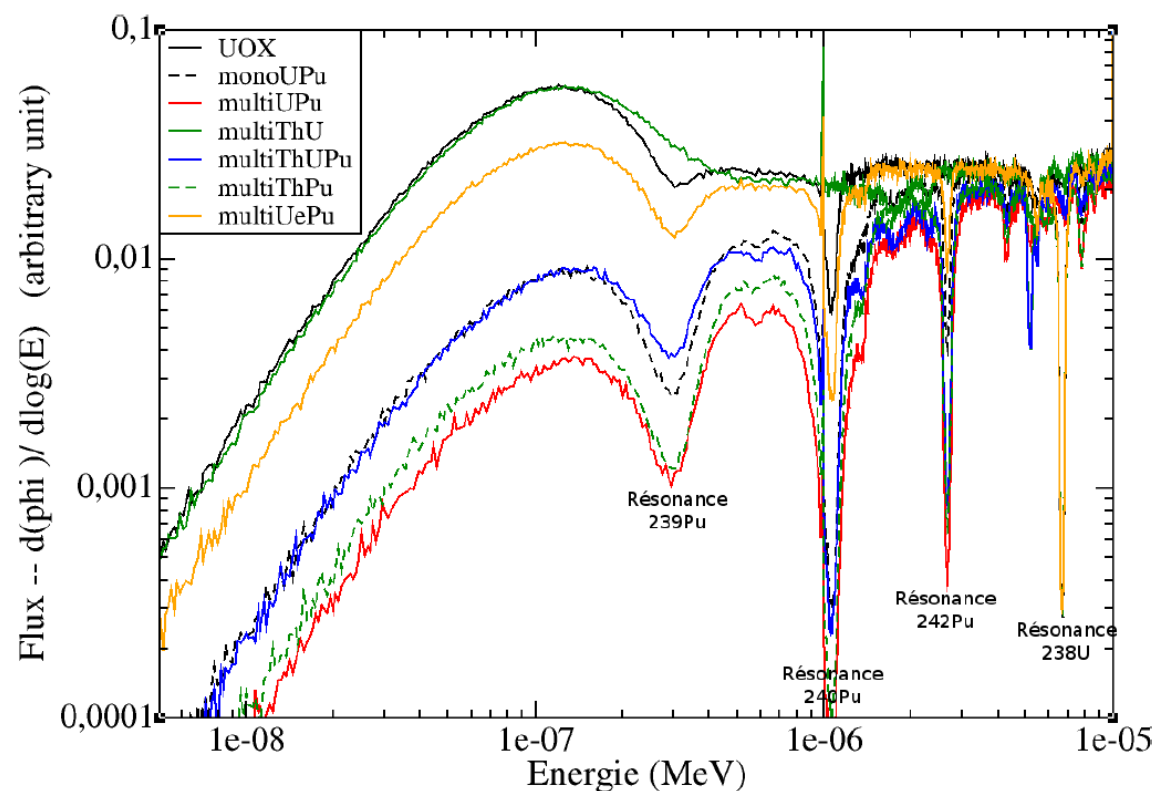


## → Le spectre neutronique dépend fortement des compositions

- Donc les sections efficaces
- Donc la criticité

*Ernault et al., 2014, Progress in Nuclear Energy 78*

## → Le calcul SMURE à la volée dans une étude de scénario est impossible pour des raisons de temps de calculs



- Les modèles physiques qui prévoient la criticité en fonction du vecteur isotopique du Pu sont en échec !
- On cherche à estimer les fonctions :

$$BU = f(\%_{Pu}, \overrightarrow{Pu})$$
$$\langle \sigma_r \rangle = g_r(\%_{Pu}, \overrightarrow{Pu})$$

## → Les matheux à la rescousse

1. *Identification de l'espace des compositions possibles*
2. *Pavage de cet espace uniformément et aléatoirement*
3. *Réalisation d'un calcul SMURE pour chaque point de l'échantillonnage*
4. *Application d'une méthode de régression non linéaire (réseau de neurones)*

## → Exemple : construction d'un modèle RNR-Na générique

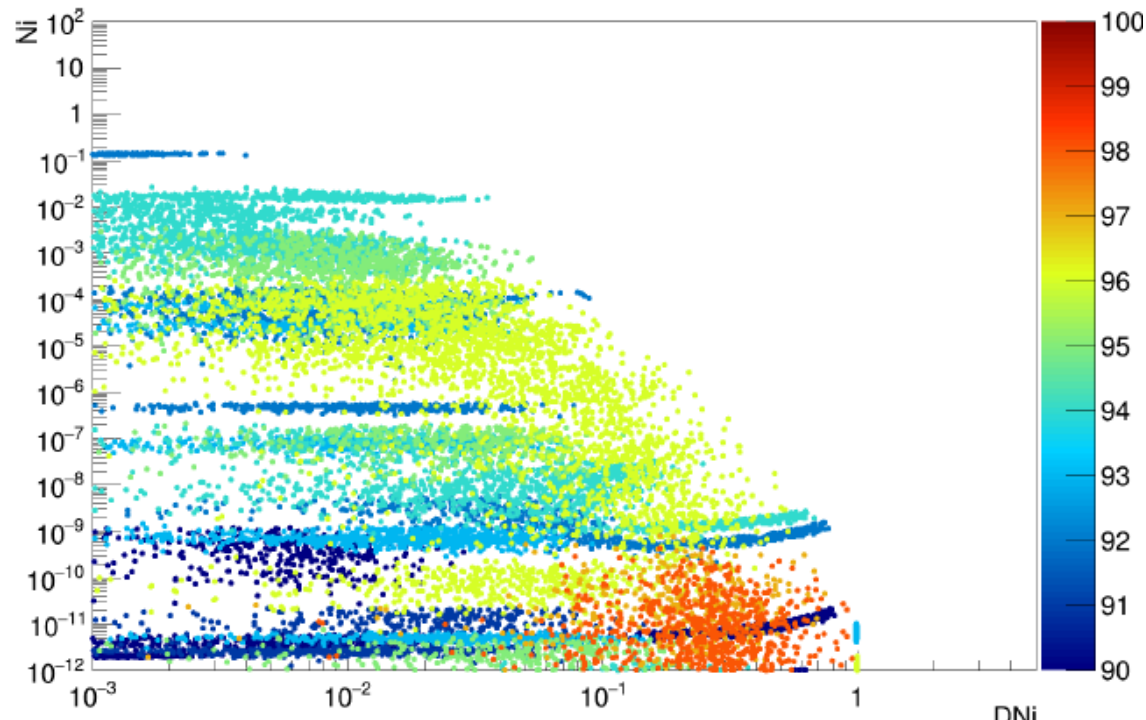
- Contrairement aux REP, la géométrie des RNR n'est pas bien définie
- Construction d'un modèle générique pour RNR sur ou sous générateur

M. Ernoult, et al. ; **Global and flexible models for sodium-cooled fast reactors in fuel cycle simulations** ; PHYSOR 2018

### Variables :

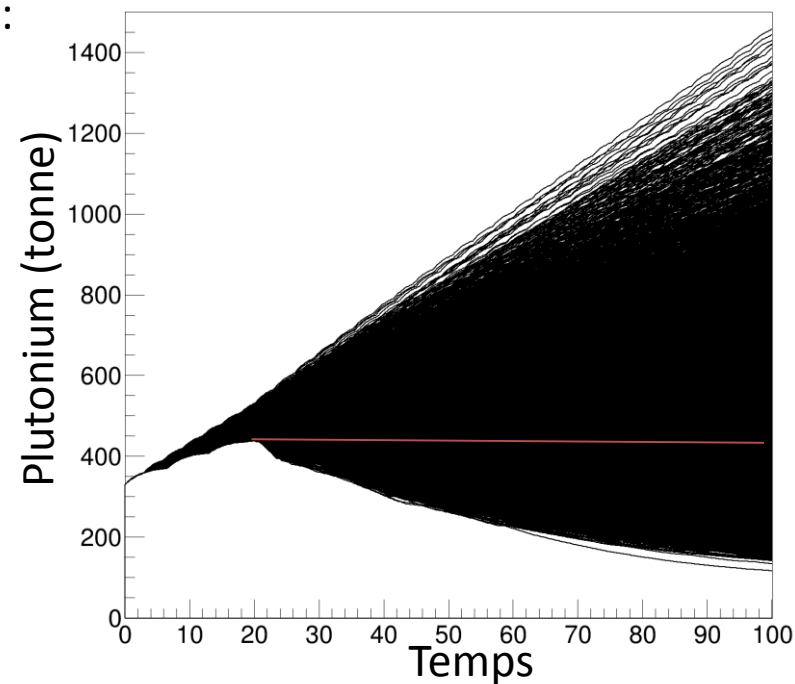
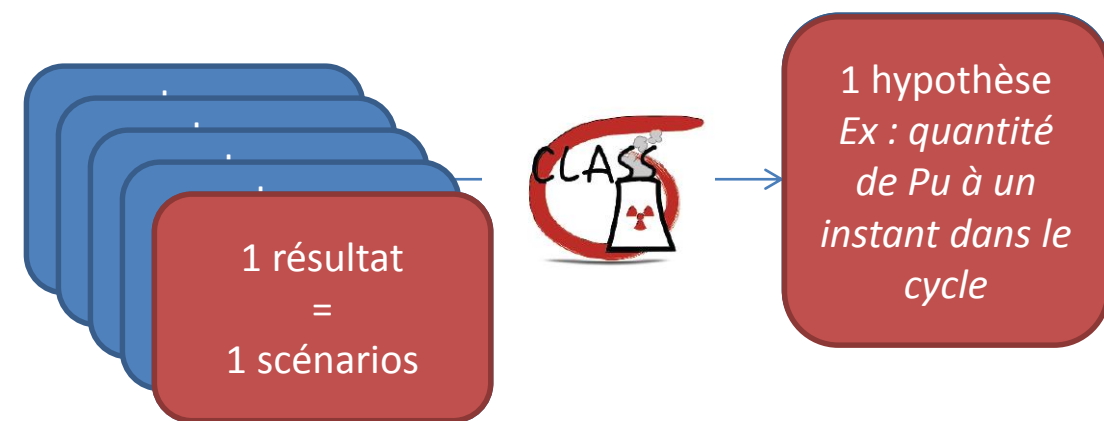
- Hauteur
- Rayon
- Enrichissement total
- Enrichissement interne/externe
- Couverture
- Puissance
- Composition Pu

→ **Collaboration thèse Léa Tillard (IRSN) pour RNR CFV**

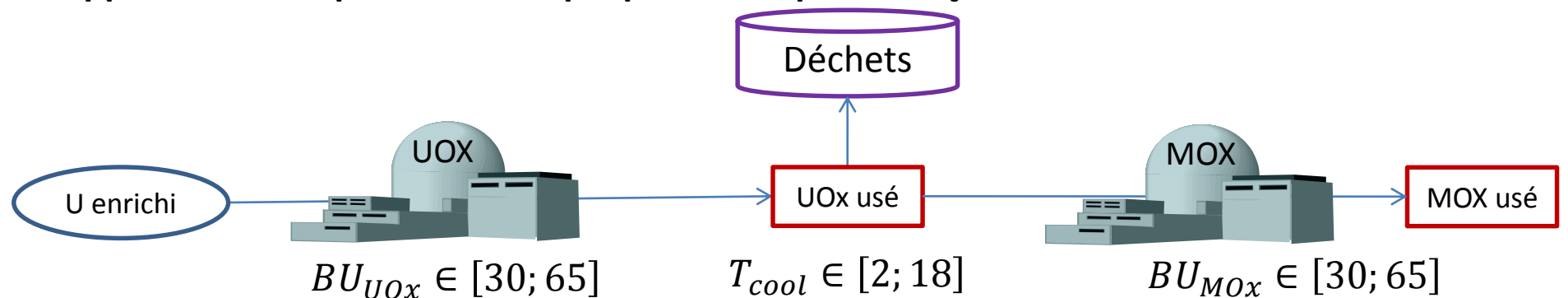


## → Applications des méthodes du machine learning

- Permet d'aborder la problématique différemment :



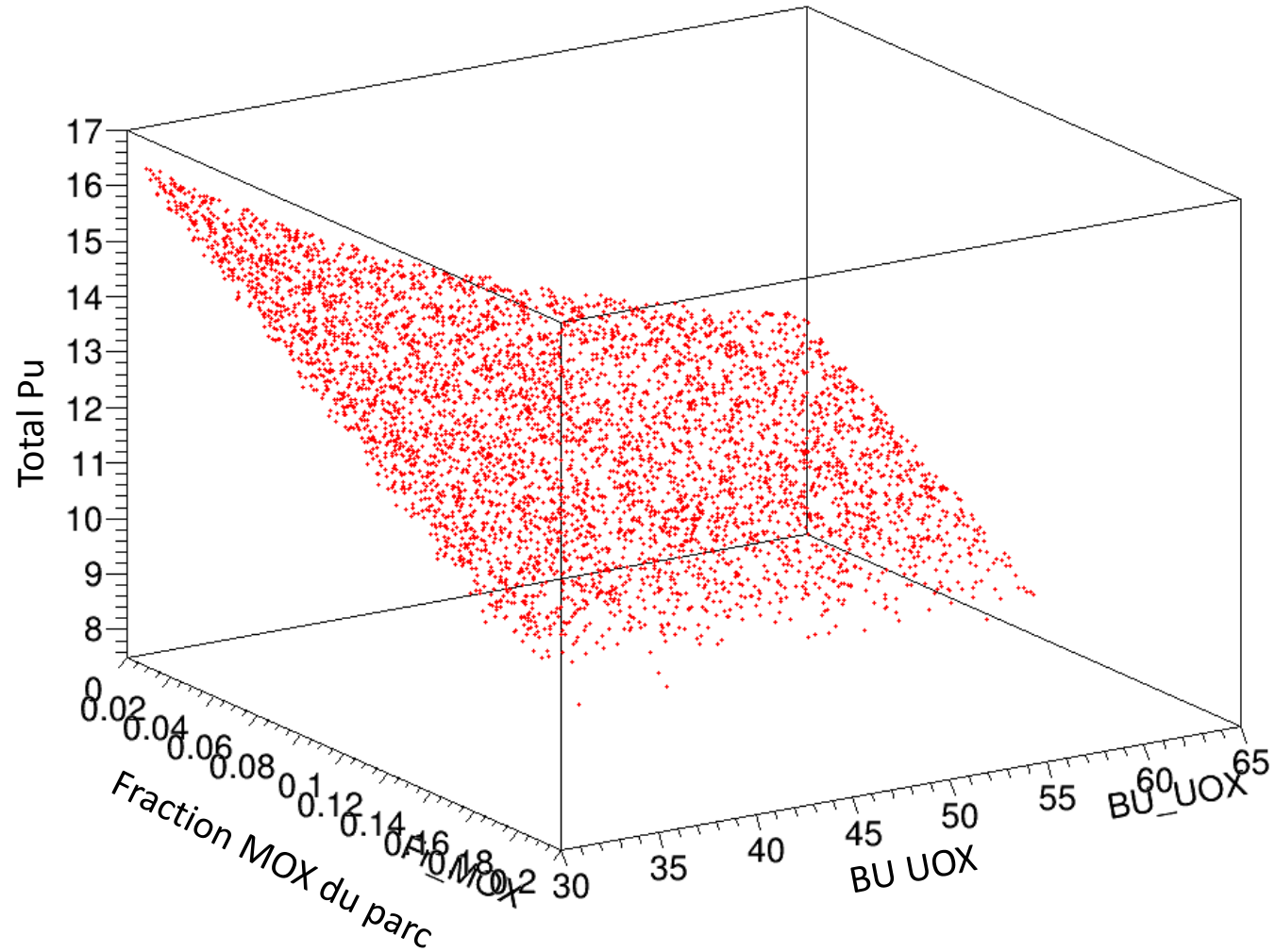
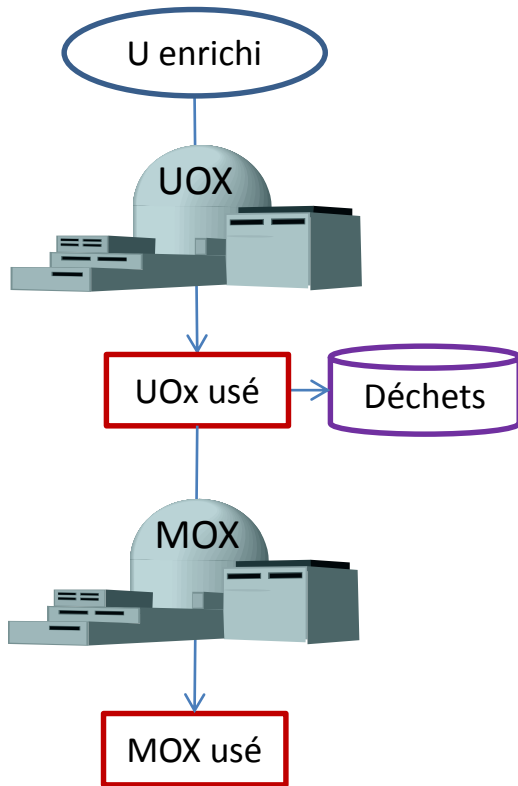
## ➤ Application à un parc académique proche du parc Français



Fraction de la puissance MOX [0 ; 20%]

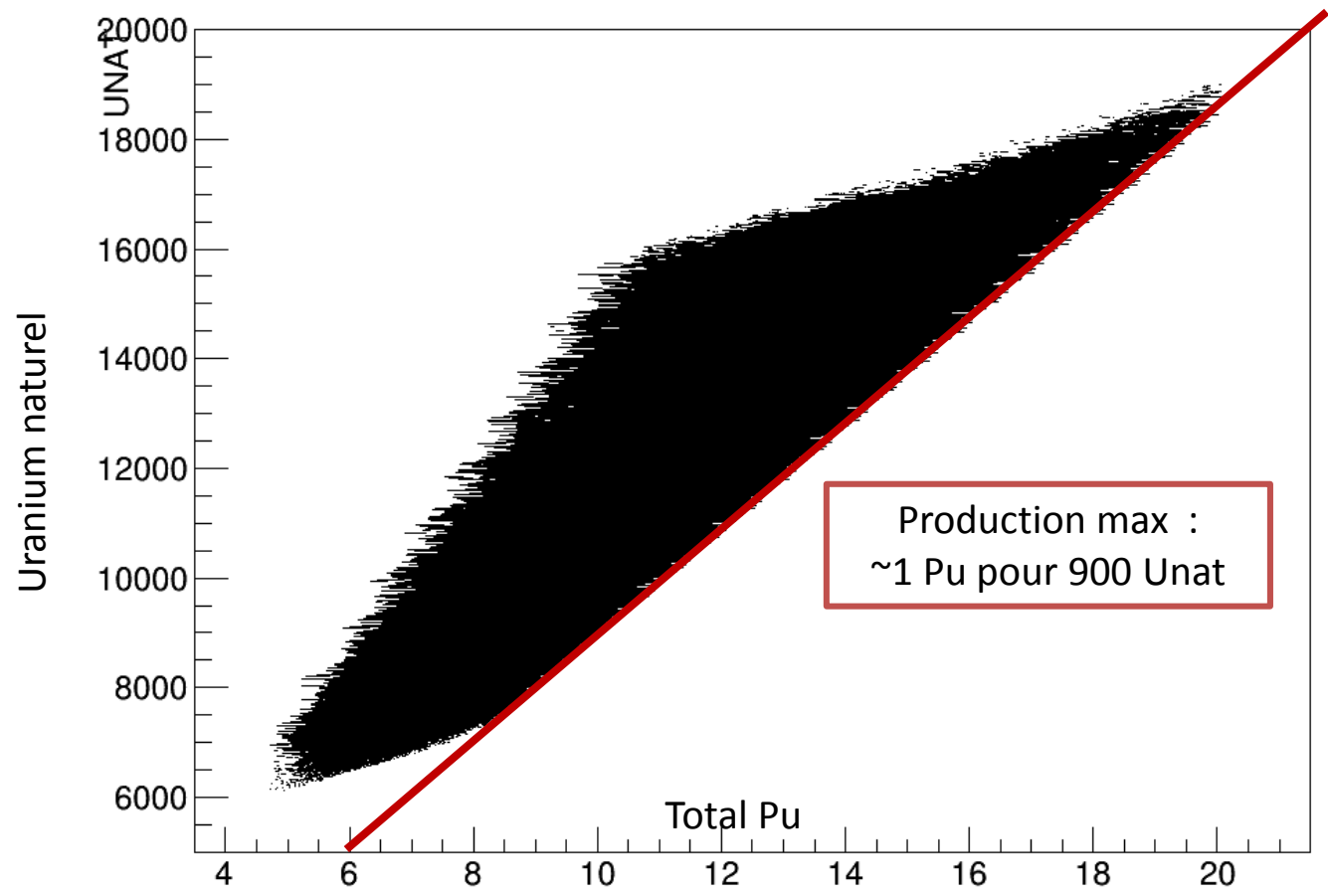
# Production de Pu

- A un instant donné, on caractérise la quantité de Pu dans le parc avec 2 variables uniquement  
Ex : après 80 ans de fonctionnement



# Production de Pu et consommation d'uranium naturel

➤ La consommation d'uranium naturel est directement liée à la fraction de MOX dans le parc



➤ Rappels :

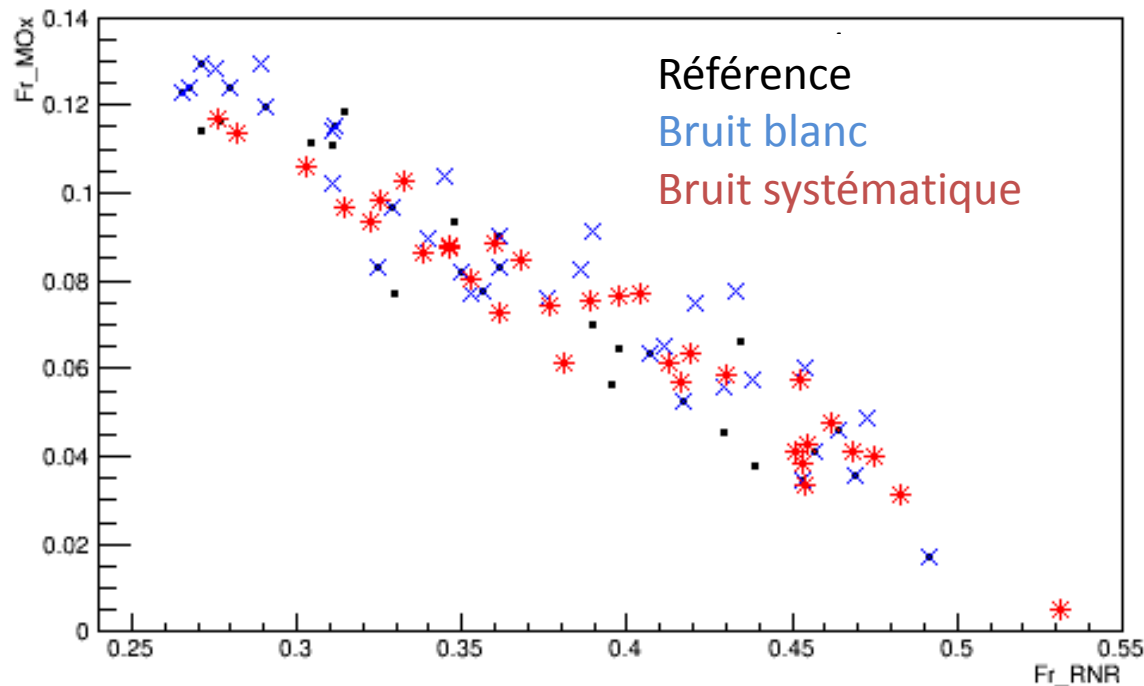
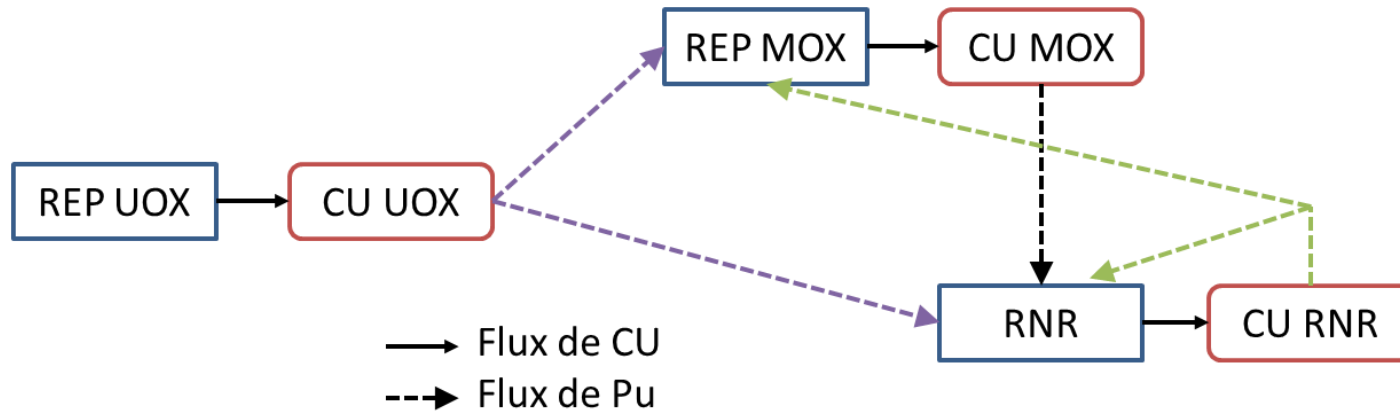
- 1 RNR = 15 à 20 tonnes de Pu
- $\sim 10^7$  tonnes d'uranium naturel disponible

→ Entre 500 et 700 RNR possibles

Optimisation des RNR, surgénération et systèmes innovants pour un déploiement au niveau mondial

## ➤ Projet collaboratif avec le CEA et l'IRSN :

- Objectif : caractériser et étudier la robustesse des équilibres avec un parc symbiotique



➔ Quel que soit le jeu de paramètres, la condition d'équilibre corrèle la fraction de MOX et de RNR dans le parc

➔ L'introduction d'un bruit ne perturbe pas cet équilibre !

➔ Pas de changement de la composition du parc, juste une adaptation des flux de combustible



- La maîtrise de la simulation des réacteurs permet une approche physique de l'étude des scénarios
  - Développement de métamodèles innovants pour les réacteurs
  - Etude de scénarios multiparamétriques
    - Nouvelle approche des scénarios
  
- Le développement de CLASS nous a permis de développer nos collaborations (nationales et internationales) et notre visibilité
  - Organisation des Fuel Cycle Workshop 2016 & 2018
  - Intégration de l'Expert Group fuel cycle de la NEA

→ Les études systèmes : vers la maîtrise des schémas de calculs...

→ Les scénarios nucléaire : vers l'optimisation sous contraintes...

→ Les scénarios énergétiques : vers un couplage énergie/économie ...

→ L'intégration de l'économie dans CLASS : le projet DIESE

→ L'analyse des scénarios énergétiques globaux

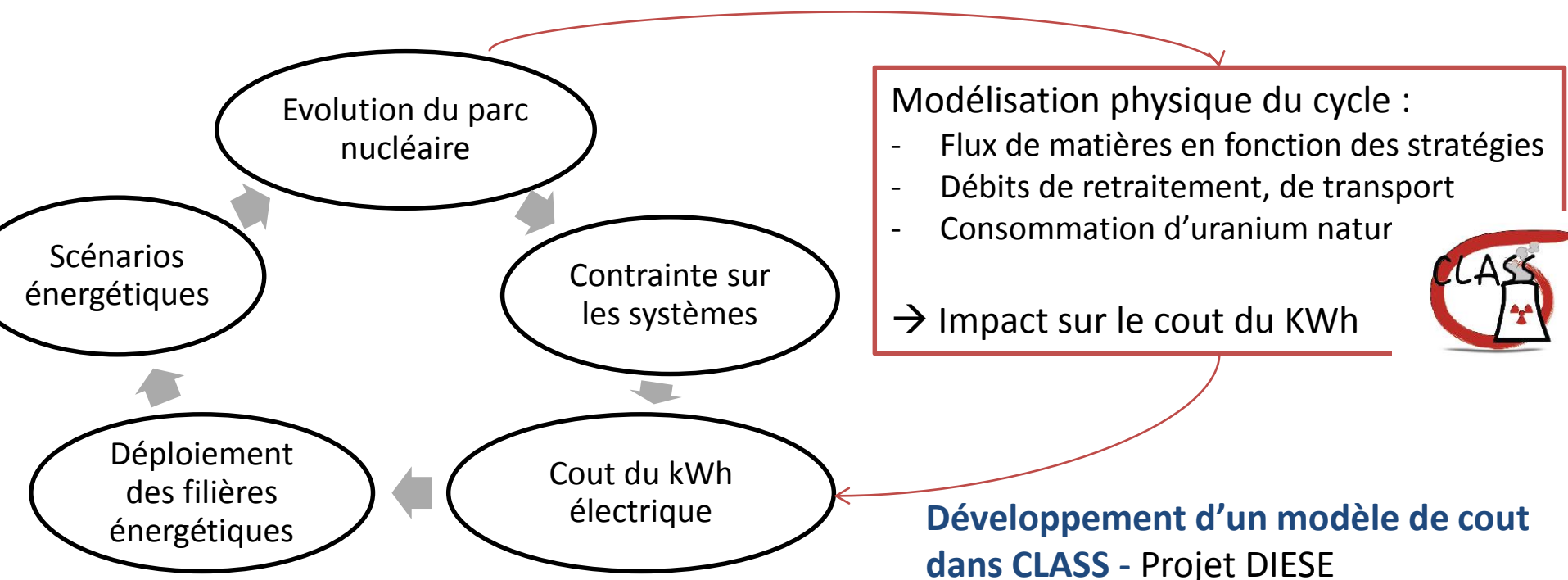
→ La méthode proposée

→ Quelques résultats

- **L'évolution de la puissance nucléaire mondiale et Française est le paramètre fondamental**
  - Il faut comprendre les mécanismes qui conditionne cette évolution mondiale
- **Avec la GSA, on peut s'affranchir de cette hypothèse**
  - Mais les études du REP MultiMox montrent qu'une stabilisation du Pu dans un parc REP imposent une réduction de la puissance installée

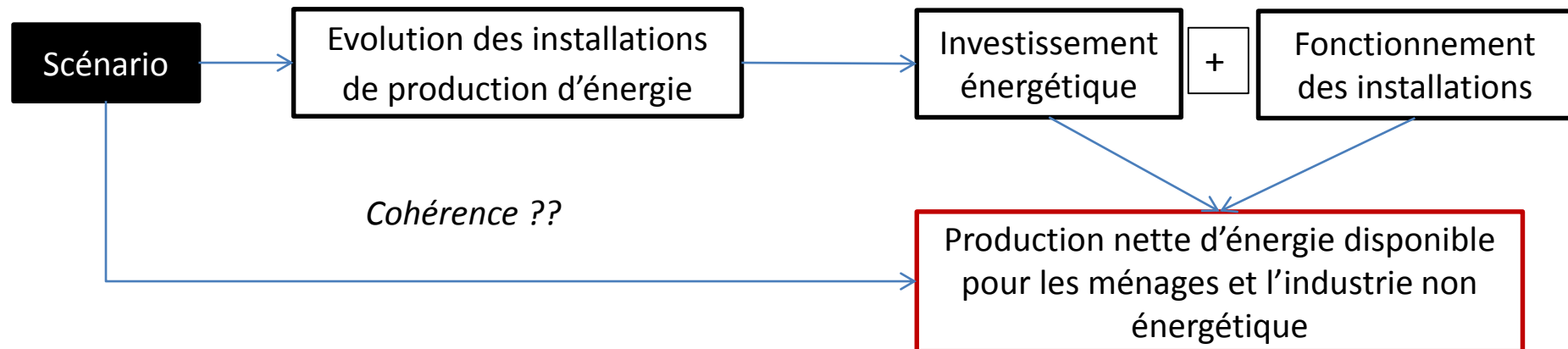
F. Courtin, **Neutronic predictors for PWR fuelled with multi-recycled plutonium and applications with the fuel cycle simulation tool CLASS**. Progress in Nuclear Energy. 100. 33-47. ,2017

## → **Modèle Nucléaire/Economie de l'énergie**



## → Elaborer une méthodologie et un outil commun à l'analyse des scénarios de transitions énergétiques et leur impact sur l'économie

- Projet issu d'une collaboration avec G. Giraud (Univ. Paris 1)
- approche volontairement « physique » du secteur de l'énergie pour analyser la « faisabilité » physique des scénarios de transition et leur cohérence entre
  - L'énergie appelée pour la transition elle-même
  - L'énergie finalement disponible pour la consommation des ménages et de l'industrie



## → Estimer les besoins en énergie pour le fonctionnement des installations et surtout la construction des nouvelles sources de production

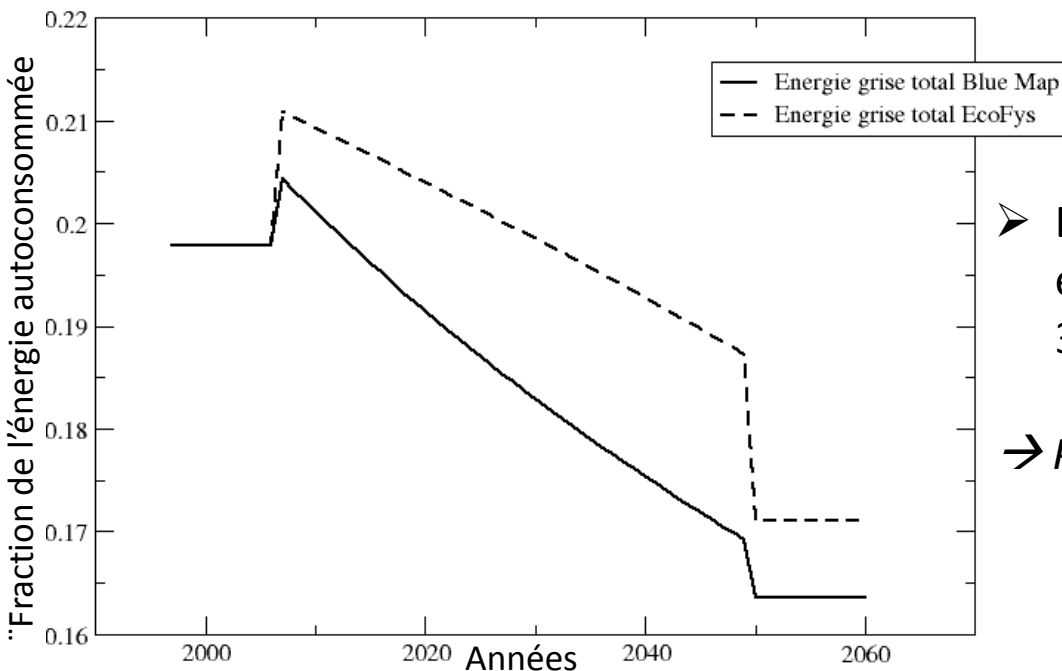
## → Calculer l'énergie grise (par vecteur énergétique) du scénario et quantifier l'impact sur l'économie (pib, emploi, dette,...)

## → Analyse comparée des scénarios Blue Map de l'AIE et de Ecofys de WWF

- Ecofys : scénario 100% renouvelable
  - ❑ Sortie du pétrole et du nucléaire
  - ❑ Recours massif à la biomasse
  - ❑ Diminution de la production d'énergie finale
- Bluemap : réduction d'au moins 50% les émissions mondiales de CO2
  - ❑ Technologie plus mature
  - ❑ Accent sur les technologies bas carbone (nucléaire x3)

## → Quelle faisabilité pour ces scénarios ?

*Calcul de l'énergie consommée pour l'investissement et le fonctionnement :*



- Le scénario Ecofys appelle 20% de capital en plus pour une production nette finale 39% plus faible !

→ *Prospective : couplage avec l'économie*

## → **Objectif : appréhender l'énergie nucléaire du futur à toutes les échelles**

- **Place de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique mondial**
  - Etudes des scénarios énergétiques
- **Atouts des différents systèmes suivant les évolutions possibles**
  - Scénarios nucléaires
    - Evolution des combustibles en réacteurs
      - Neutronique et criticité

## → **Approche multi-échelle pour comprendre les limitations de chaque modèle**

- Depuis 2014, forte progression de la production scientifique grâce notamment au développement de CLASS assuré à Nantes
- Cette production nous a permis de nous (ré)affirmer sur la scène internationale et nationale (comme le montre nos projets de collaboration)
- Nous travaillons à la hauteur de nos moyens pour que nos travaux puissent avoir des échos chez les industriels et dans nos formations universitaires.

Merci pour votre attention