

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

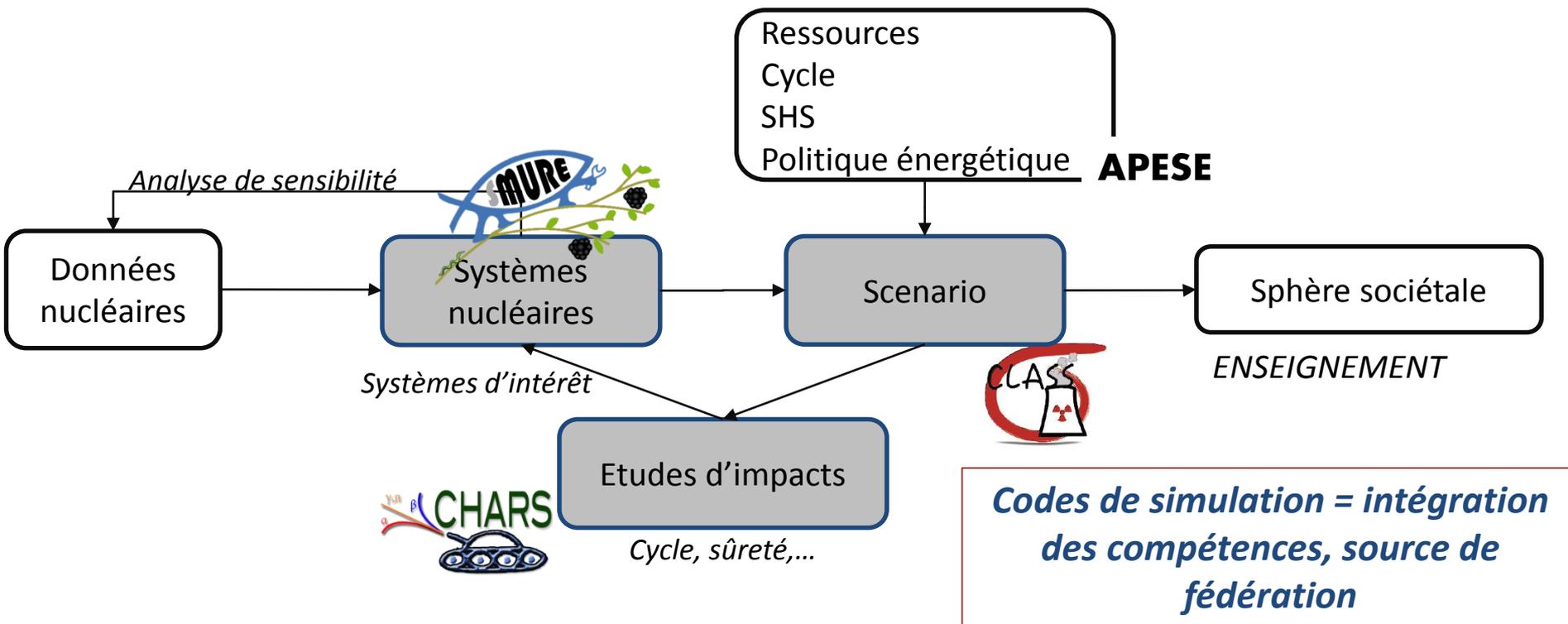
- Quelle va être l'évolution de la puissance nucléaire mondiale ?

C'est la rareté de la ressource ^{235}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

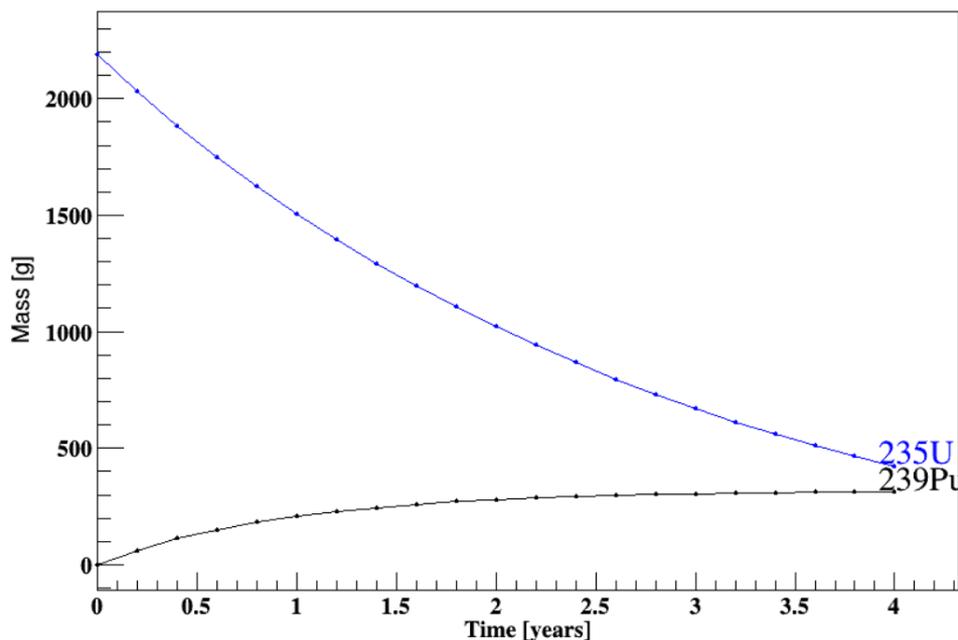
$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \sum_j \lambda_j^{j \rightarrow i} N_j(t) - \lambda_i N_i(t) + \sum_{j'} N_{j'}(t) \langle \sigma_{j'}^{j' \rightarrow i} \rangle \langle \Phi \rangle - \sum_r N_i(t) \langle \sigma_i^r \rangle \langle \Phi \rangle$$

- 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

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

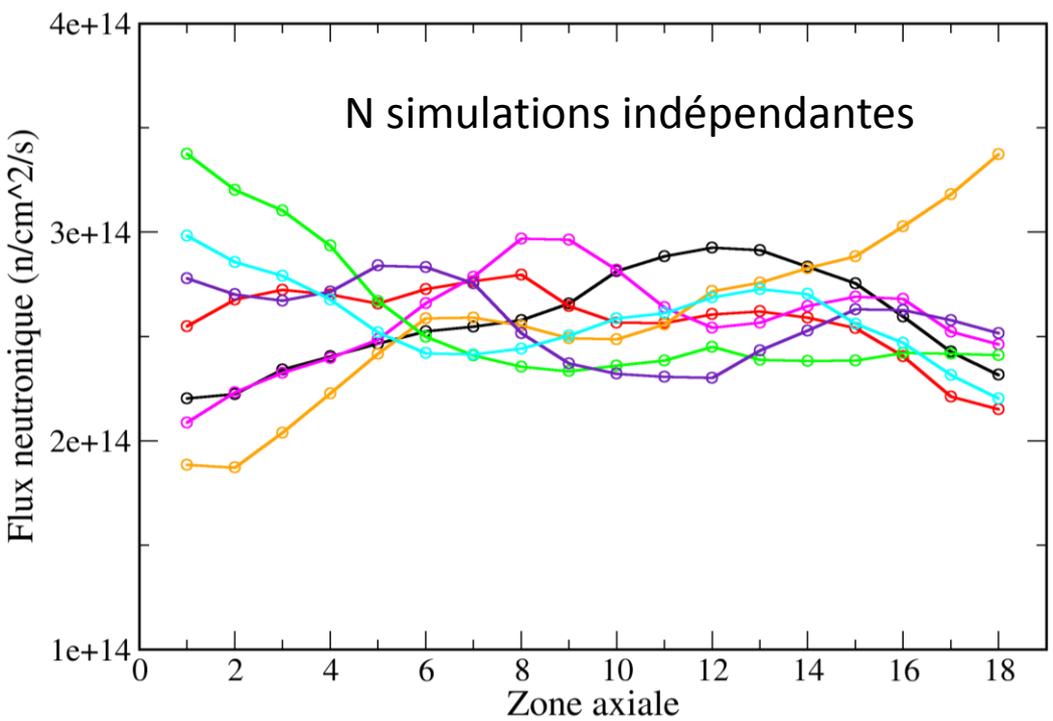


- Multi-recyclage du Pu en REP sur support uranium et thorium (*thèse Marc Ernoult, 2014*)
- Impact de l'utilisation des combustibles thoriés pour les installations du cycle (*thèse Baptiste Leniau, 2013*)
- Exploration de la transmutation en REP (*thèse Robert Sogbadgi, 2013*)
- Intérêt du cycle thorium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

SMURE : SERPENT/MCNP for Reactor Utility Evolution

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

$z \sim 4 \text{ m}$



→ Il est impossible de modéliser un cœur entier

➤ Séparation des variables : $\phi(\vec{r}, E) = \varphi(E) \cdot \psi(\vec{r})$

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

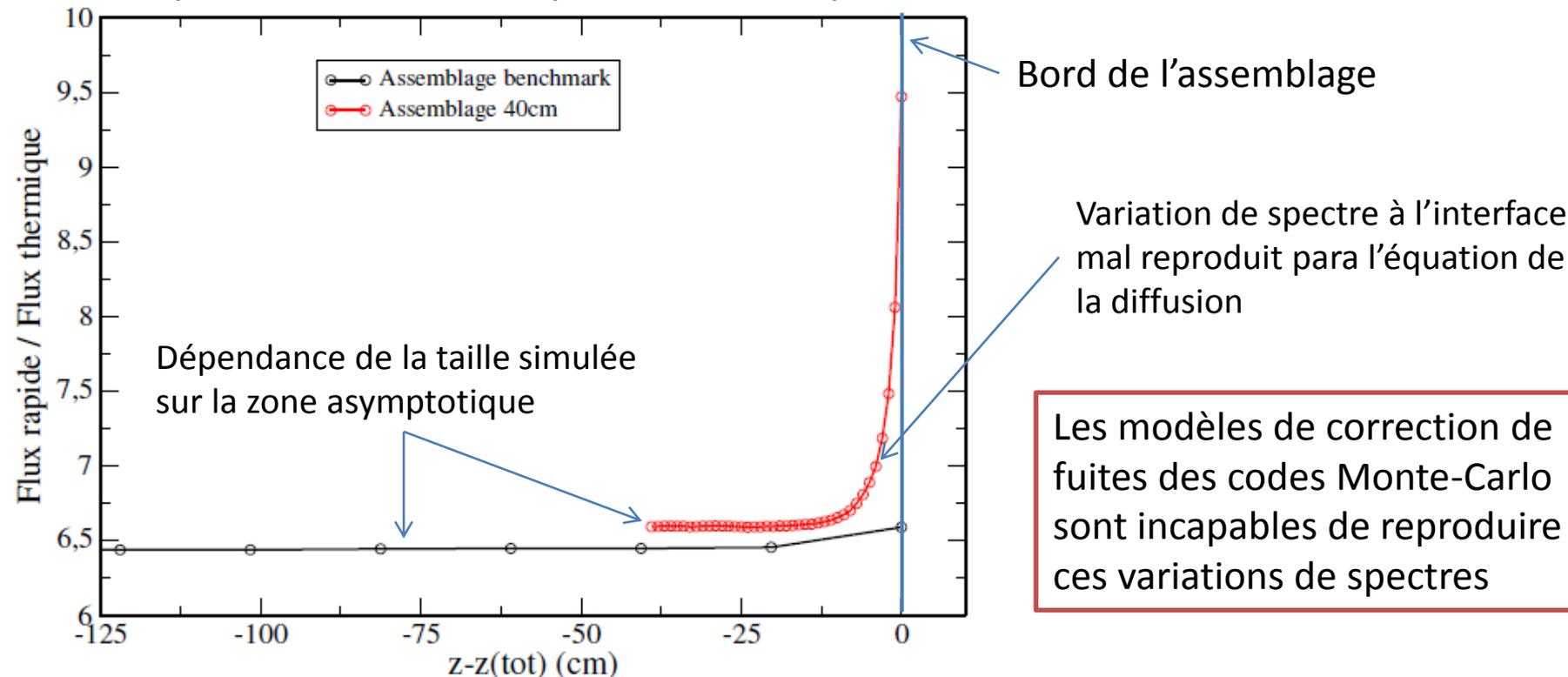
→ Pas d'interaction entre les assemblages

} 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

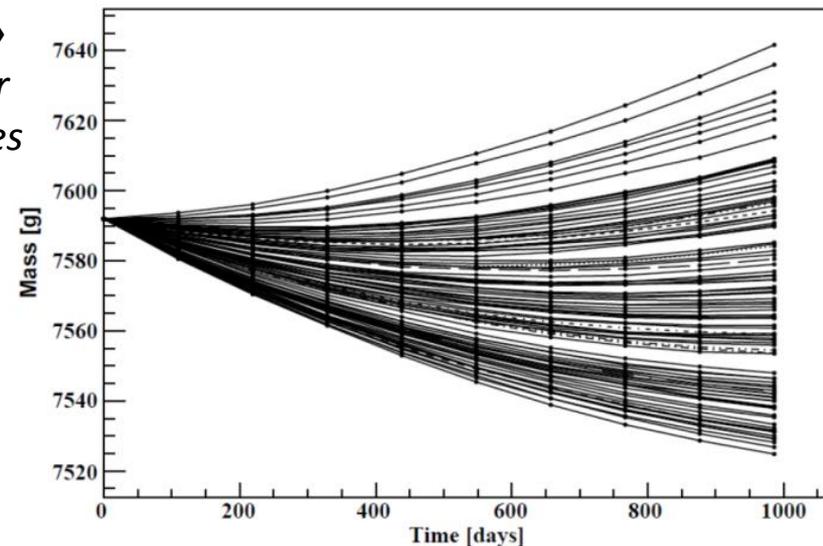


→ Propagation des biais : >5 % sur les actinides majeurs en fin d'irradiation

→ 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...**

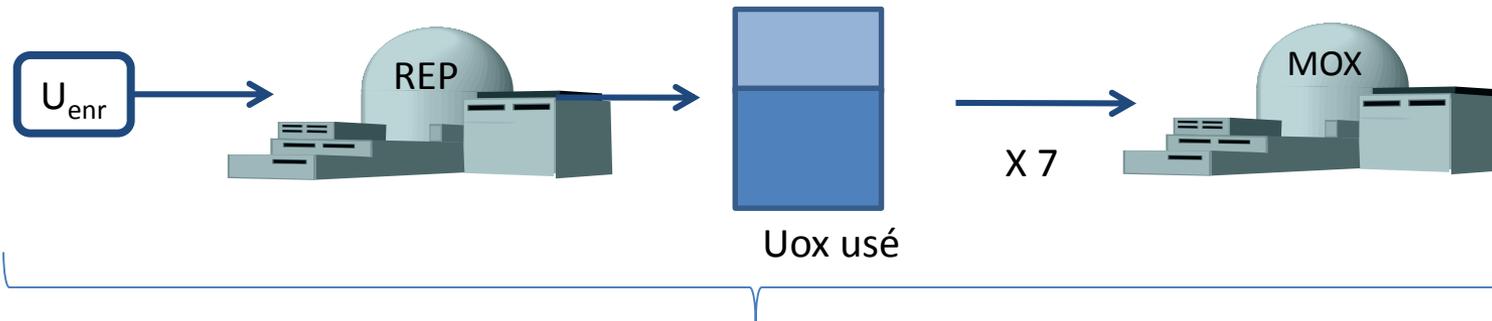
- Le code CLASS et les métamodèles de réacteurs
- Approche par Global Sensitivity Analysis
- Le projet PERMIS

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

Développement de CLASS

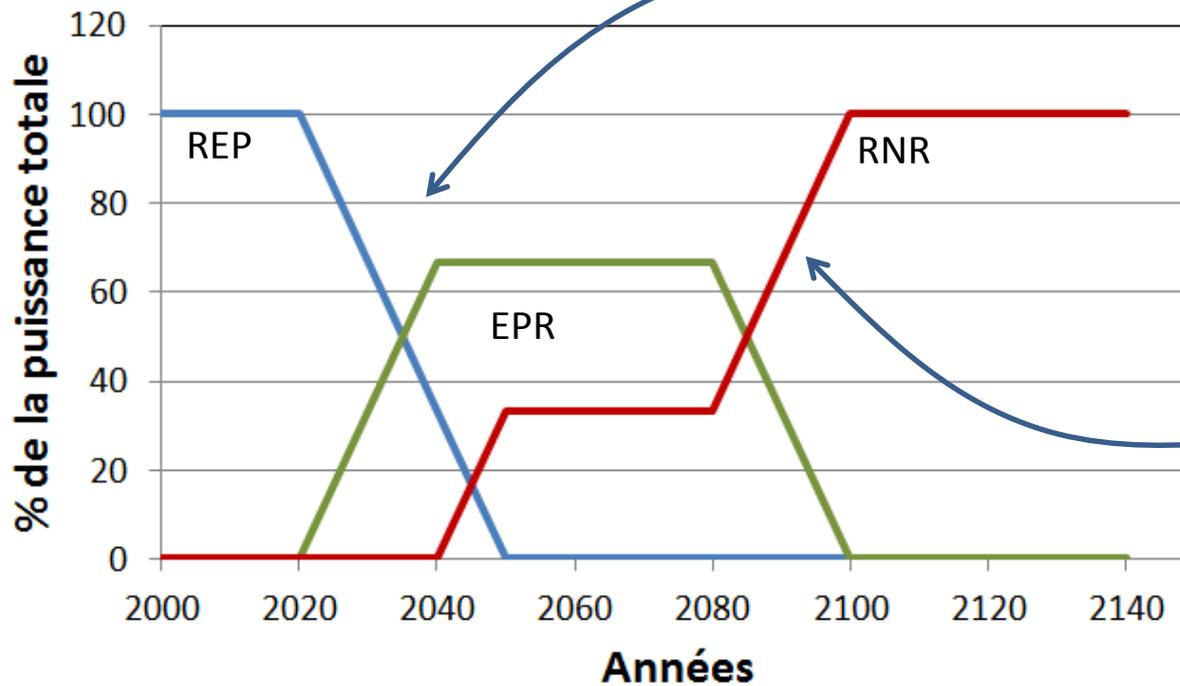
→ **Objectif : étudier des réacteurs en interaction entre eux !**

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



Calcul SMURE OK !

→ **Exemple d'un scénario**

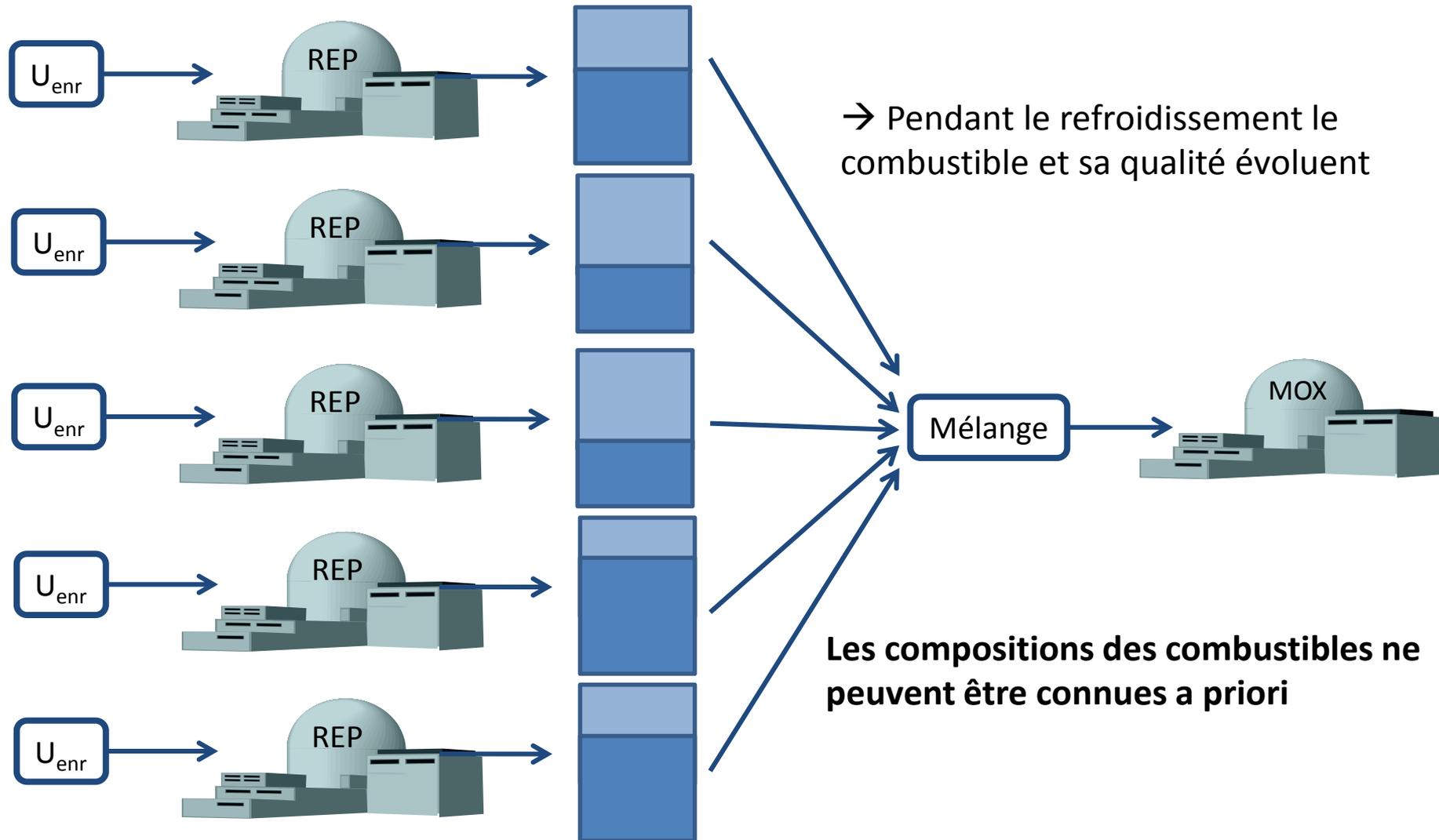


Le Pu est produit dans les REP aujourd'hui

... 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

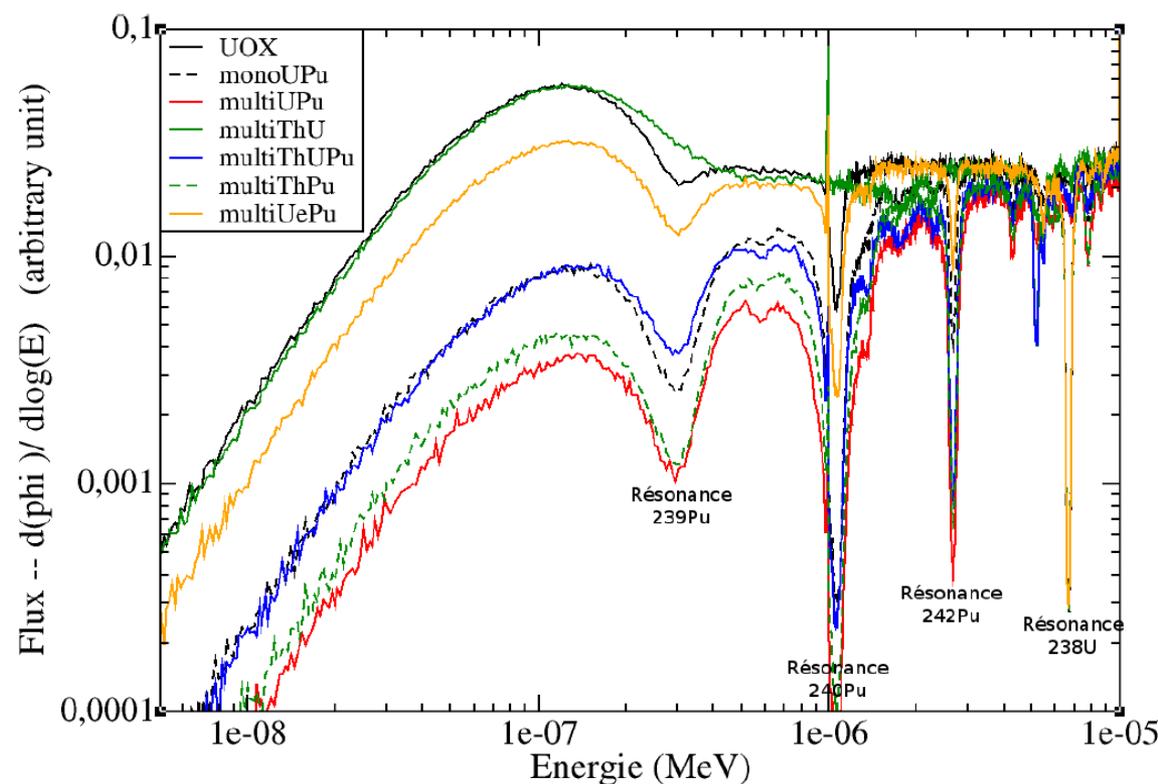


→ Le spectre neutronique dépend fortement des compositions

- 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

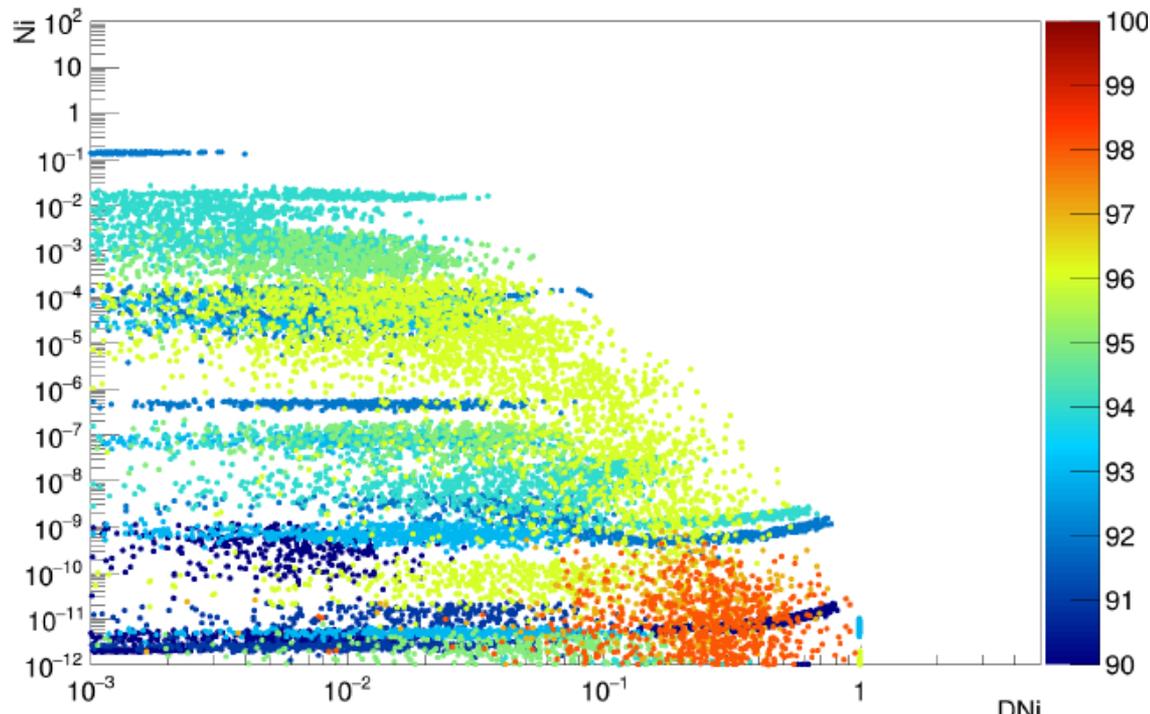
- Contrairement aux REP, la géométrie des RNR n'est pas bien définie
- Construction d'un modèle générique pour RNR sur ou sous générateur

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

Variables :

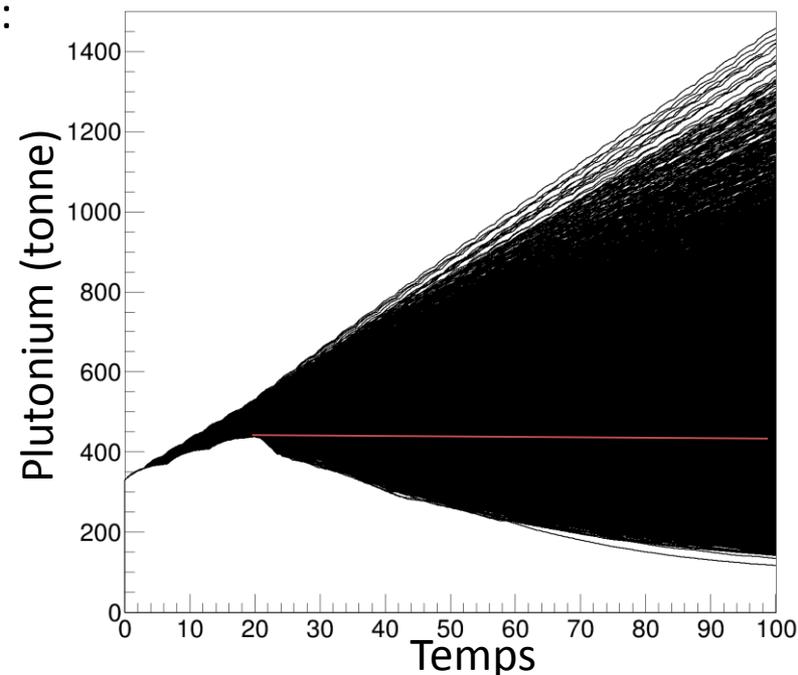
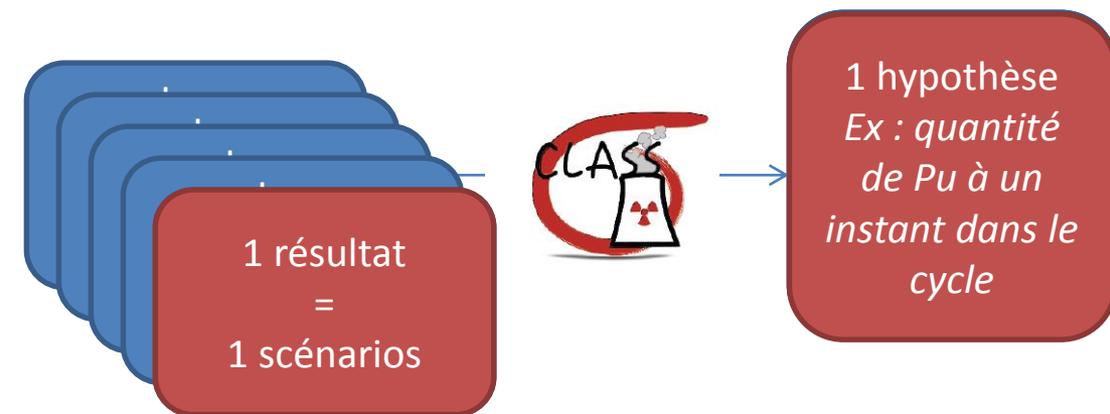
- Hauteur
- Rayon
- Enrichissement total
- Enrichissement interne/externe
- Couverture
- Puissance
- Composition Pu

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

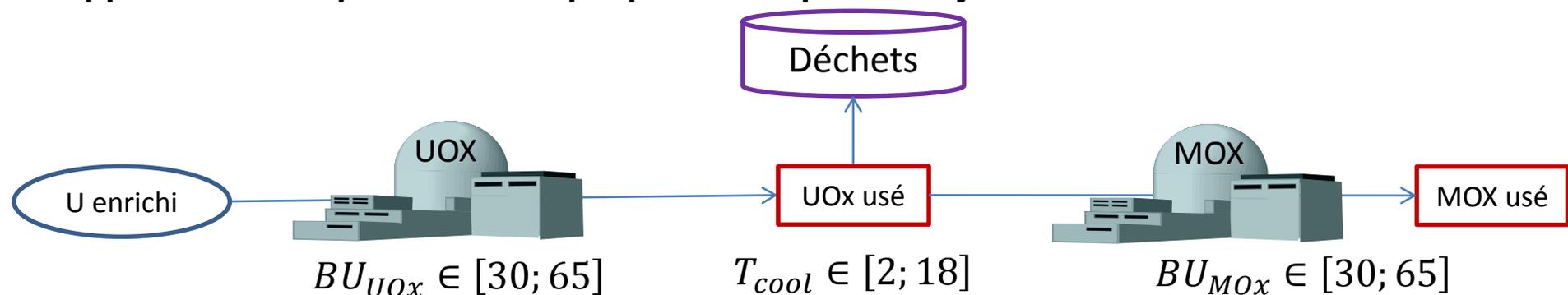


→ Applications des méthodes du machine learning

- Permet d'aborder la problématique différemment :



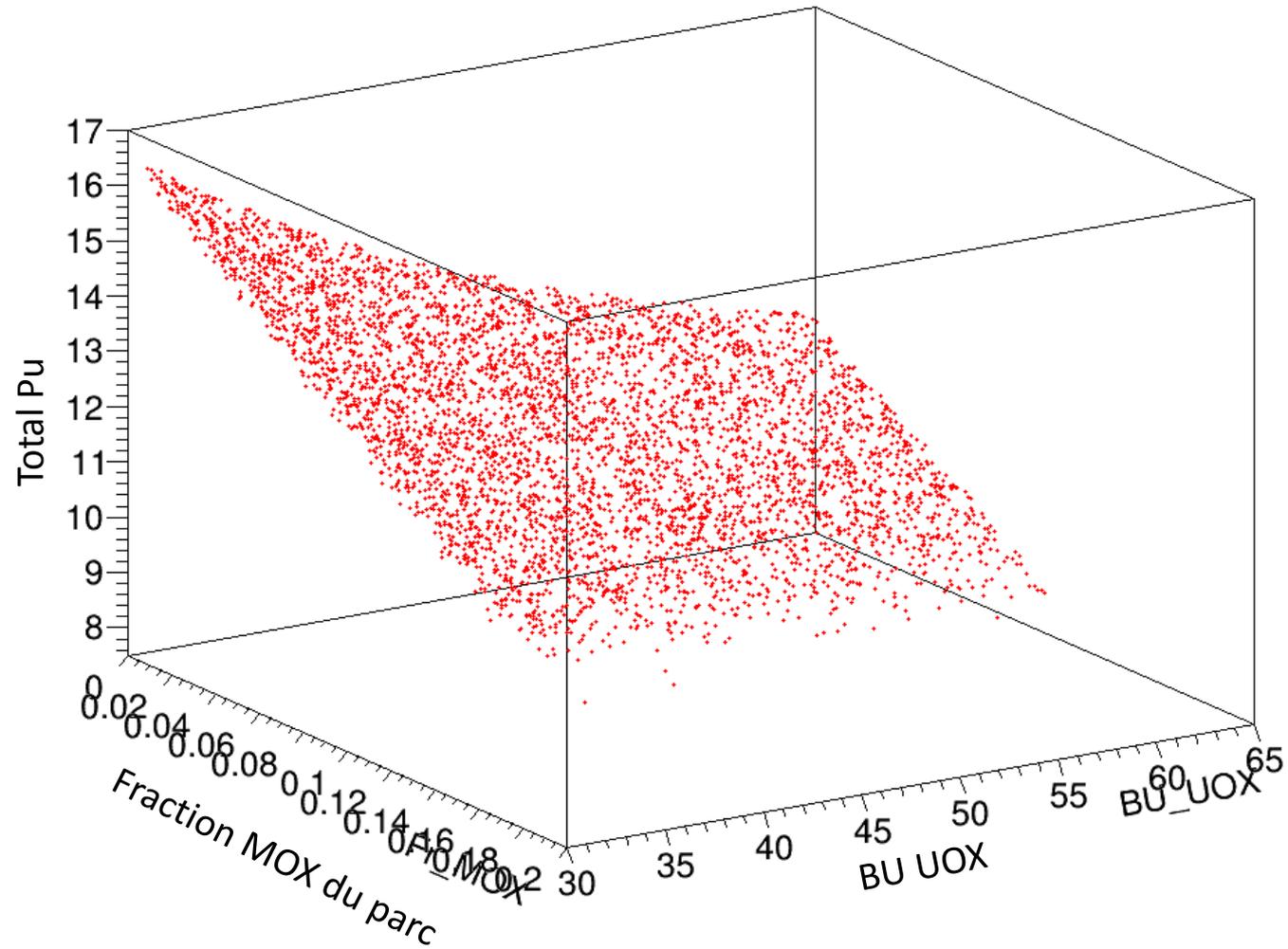
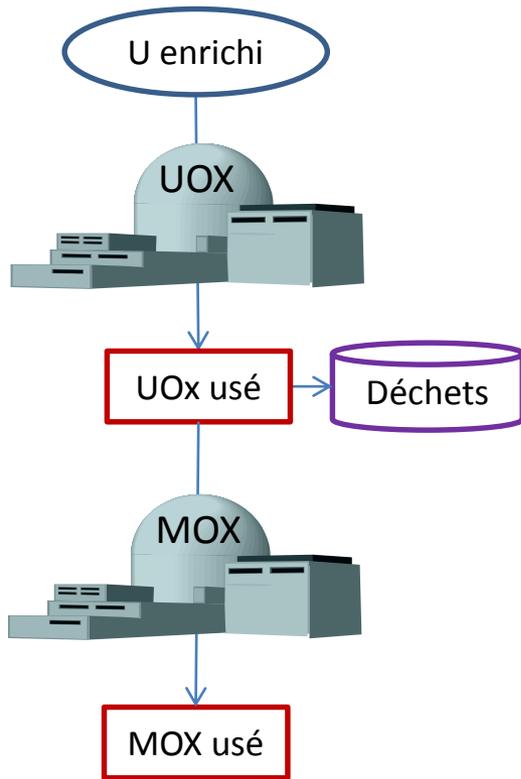
➤ Application à un parc académique proche du parc Français



Fraction de la puissance MOX [0 ; 20%]

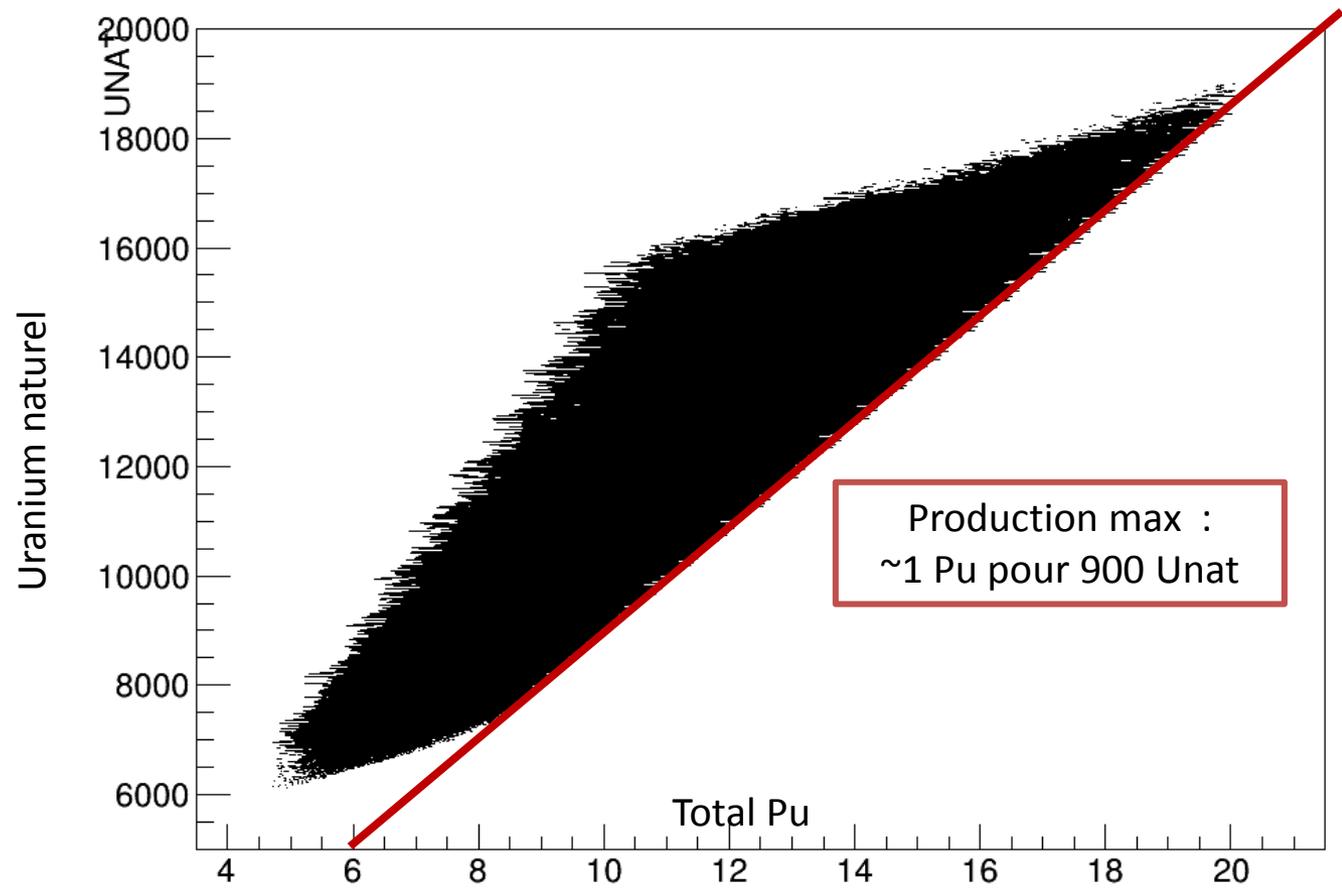
Production de Pu

- 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

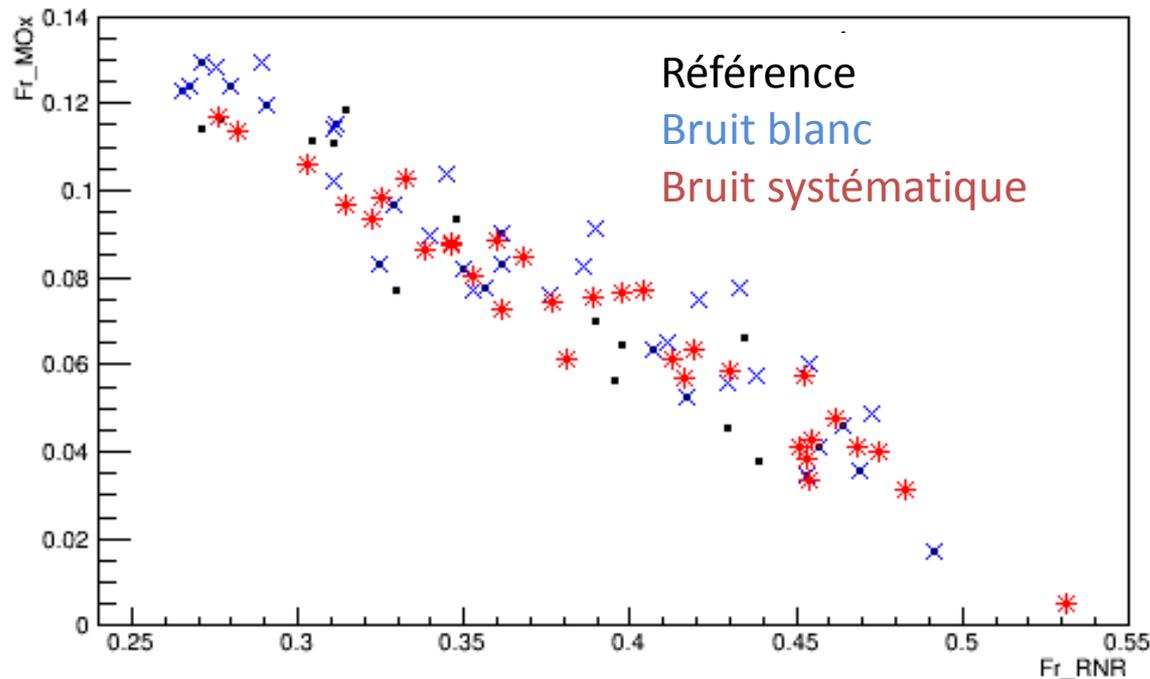
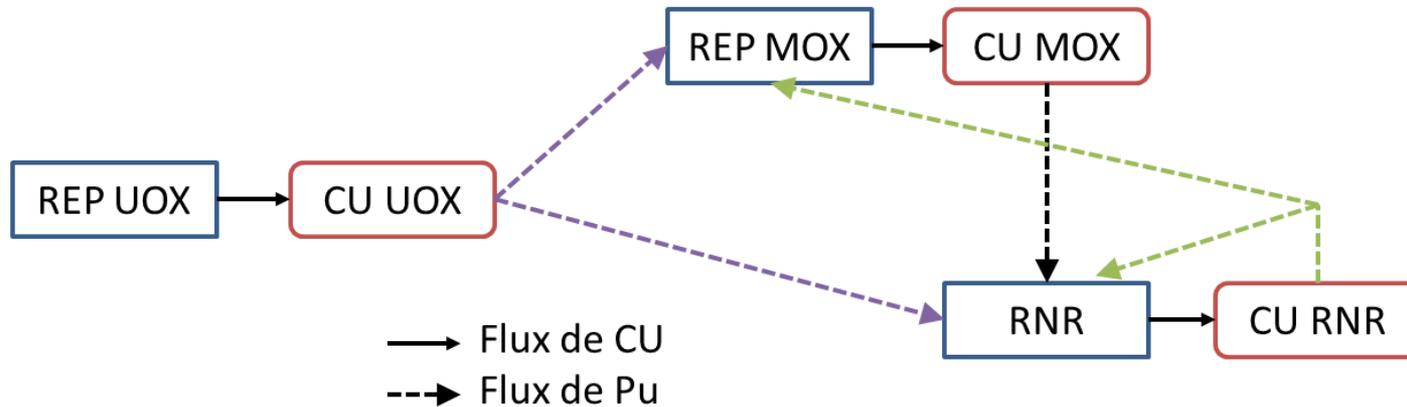
→ Entre 500 et 700 RNR possibles

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

Projet PERMIS et la recherche de l'équilibre

➤ 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

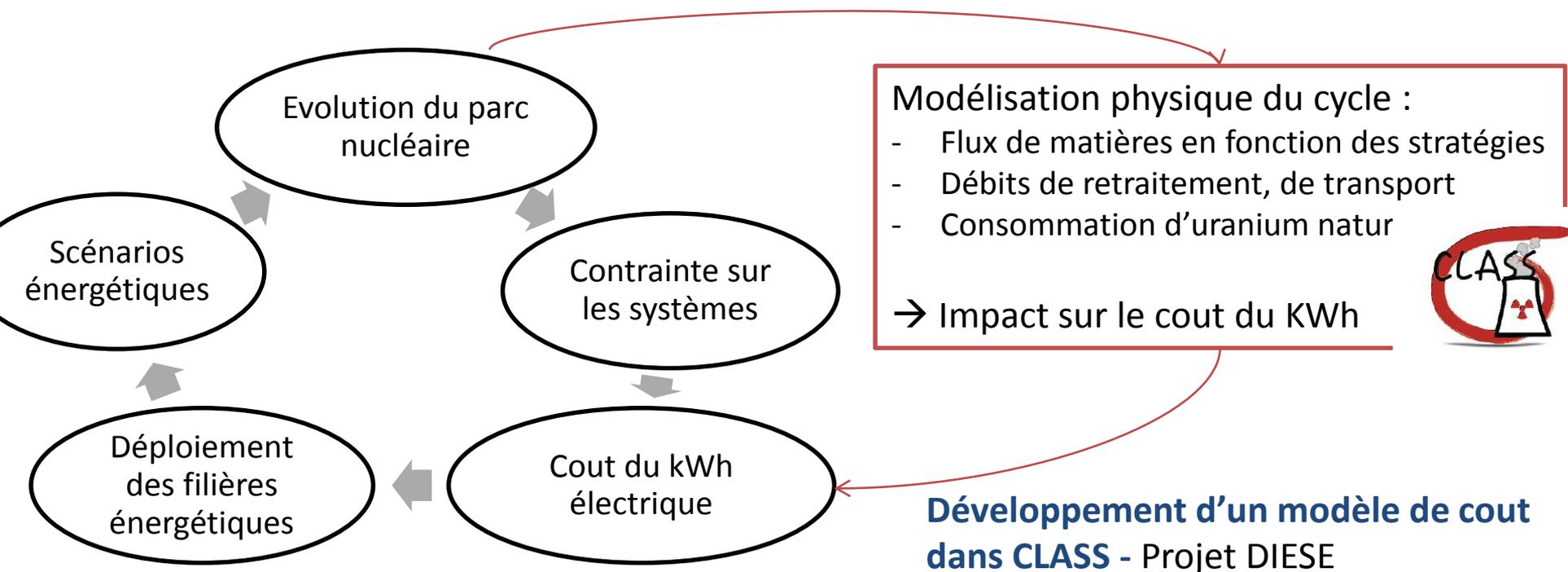
→ La méthode proposée

→ 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

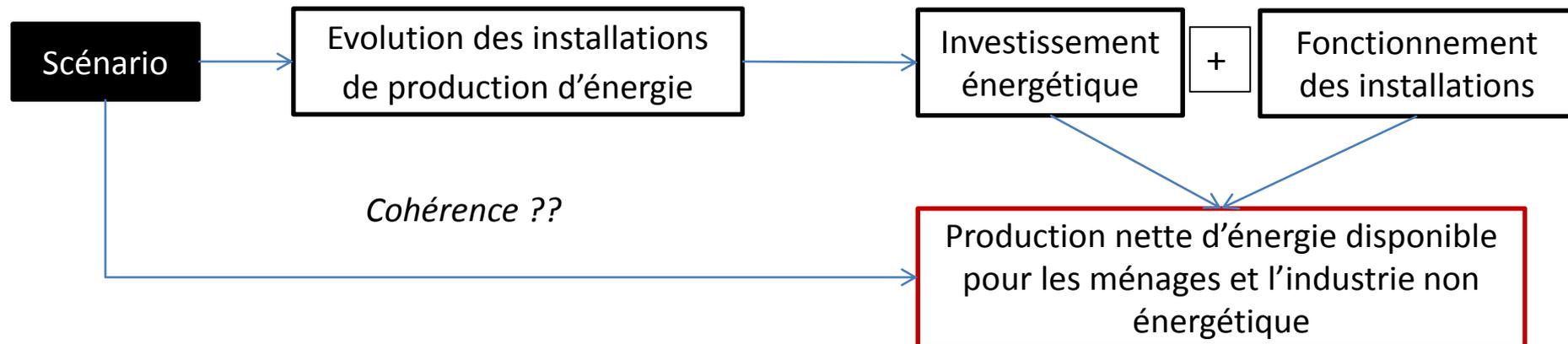
F. Courtin, **Neutronic predictors for PWR fuelled with multi-recycled plutonium and applications with the fuel cycle simulation tool CLASS**. Progress in Nuclear Energy. 100. 33-47. ,2017

→ **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

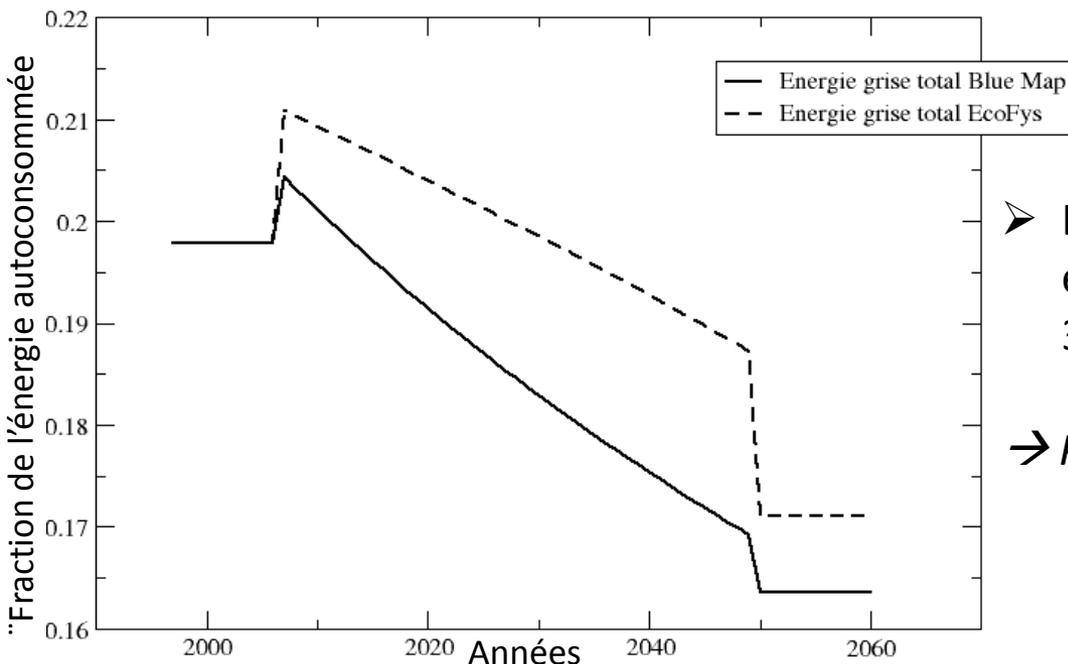
→ Calculer l'énergie grise (par vecteur énergétique) du scénario et quantifier l'impact sur l'économie (pib, emploi, dette,...)

→ 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