

COLLOQUE NEEDS

Les scénarios électronucléaires

La Chapelle sur Erdre

21 Octobre 2014



- Nicolas Thiollière^a
- Baptiste Mouginot^a
- Baptiste Leniau^a
- Xavier Doligez^b
- Marc Ernoul^b
- Adrien Bidaud^c
- Olivier Méplan^c
- Jean-Baptiste Clavel^d
- Isabelle Duhamel^d
- Gaétan Bellot^d
- Yann Richet^d
- Romain Eschbach^e
- Marion Tiphine^e
- Guillaume Kritchick^e
- David Freynet^e
- Claude Garzenne^f

a - Subatech, CNRS/in2p3, EMN, Univ. Nantes.
b - IPNO, CNRS-in2p3/Univ. Paris Sud.
c - LPSC, CNRS-in2p3/UJF/INPG, Grenoble.
d - LNC, IRSN, Fontenay aux Roses.
e - LECy, CEA Cadarache.
f - EdF R&D, Clamart.

~ 31 homme.mois sur le projet pour 2014.



- Introduction et motivations
 - La transition énergétique
 - Principe d'un scénario électronucléaire
 - Etat de l'art en France

- Les incertitudes dans les scénarios électronucléaires
 - Les hypothèses et les critères d'évaluation
 - Le modèle d'irradiation
 - Le modèle d'équivalence

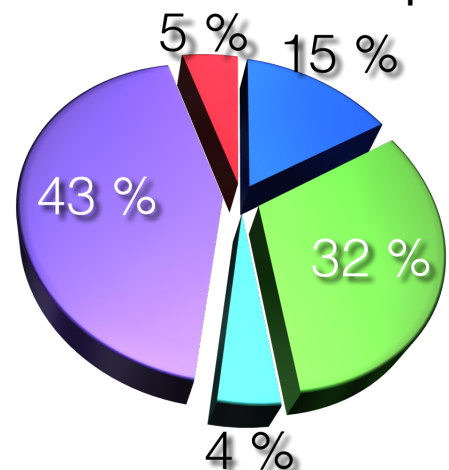
- Résultats et perspectives du projet COMPRIS
 - Modèles d'équivalence et d'irradiation
 - Propagation des incertitudes

- Conclusion et perspectives

- ⊕ Le contexte actuel est marqué par une probable transition énergétique
- ⊕ Les scénarios énergétiques fournissent des évaluations des choix possibles
- ⊕ Un scénario énergétique alimente des études technico/économiques/sociologiques



- Gaz naturel
- Pétrole
- Charbon
- Electricité primaire
- Renouvelables thermiques



- ⊕ L'énergie nucléaire est la principale source d'électricité en France
- ⊕ Le futur moyen terme (~100 ans) du nucléaire dépend de décisions politiques
- ⊕ Echantillon des choix possibles pour le futur du parc :
 - L'évolution de la puissance installée est une hypothèse ouverte
 - Optimisation du cycle GEN-II et GEN-III (REP et EPR, chargés UOx et MOx)
 - Déploiement des réacteurs rapide GEN-IV iso ou surgénérateur
 - Sortie du nucléaire à plus ou moins long terme

- ⊕ Besoins en installations
- ⊕ Coût du kWh nucléaire



Fortement corrélé à la stratégie étudiée



L'évaluation technico-économique d'un scénario implique nécessairement un calcul réaliste dynamique du cycle électronucléaire

- ⊕ Un scénario électronucléaire se construit à partir d'hypothèses explicites :

- Evolution de la puissance
- Disponibilité de la ressource
- Maturité technologique
- Coût des unités du parc

Deux types de scénarios

- ⊕ Hypothèses fixes

- ⊕ Hypothèses ouvertes
- ⊕ Algorithmes d'optimisation

- ⊕ Qui supposent des hypothèses implicites

CODE DE SCENARIO ELECTRONUCLEAIRE

➔ Simulation dynamique du cycle du combustible

- ⊕ Conditions initiales :
 - Mines
 - Usines d'enrichissement/fabrication/retraitement
 - Stockage combustibles usés/retraités/déchets
- ⊕ Calcul dynamique de l'évolution du parc :
 - Evolution sous flux / hors flux
 - Echange de matière entre les unités
 - Eventuellement, optimisation du parc

Critères d'évaluation (n. exh.)

- ⊕ Evolution de l'inventaire et des flux
 - Inventaire en plutonium
 - Masses aux déchets
 - Débits usines et mine
 - Non prolifération
 - Déplacement de matière
- ⊕ S.H.S.
 - Coût associé du kWh
 - Flexibilité du parc
 - exploitabilité / gestion du risque

Bonnes conditions d'utilisation d'un code de scénario:

- Maitrise des modèles physiques qui sous-tendent les calculs de scénario
 - Evolution de la composition isotopique d'un coeur de réacteur
 - Chargement des combustibles adapté au taux de combustion souhaité
- Code adapté aux besoins spécifiques de chaque instituts en fonction de ses missions
 - Priorités en terme de filières gérées par le code
 - Philosophie d'écriture du code, gestion des entrées, traitement des sorties

➔ Chaque acteur a développé son propre code

- AREVA : COSAC
- EdF : TIRELIRE-STRATEGIE
- CEA : COSI
- CNRS : CLASS



Projet COMPRIS

(COMparaison des Modèles et Propagation des Incertitudes dans les Scénarios)

- Comparaison entre COSI et CLASS
- Scénarios simples pour un accès aux modèles

COMPRIS dans NEEDS

- Projet fédérateur : Systèmes nucléaires et scénarios (CNRS, CEA, AREVA, EdF, IRSN)
- NEEDS est la structure qui regroupe les acteurs clés des études de scénarios électronucléaires
- NEEDS est le support financier adapté, notamment pour les optimisations des modèles physiques



- ⊕ Introduction et motivations
 - La transition énergétique
 - Principe d'un scénario électronucléaire
 - Etat de l'art en France

- ⊕ **Les incertitudes dans les scénarios électronucléaires**
 - Les hypothèses et les critères d'évaluation
 - Le modèle d'irradiation
 - Le modèle d'équivalence

- ⊕ Résultats et perspectives du projet **COMPRIS**
 - Modèles d'équivalence et d'irradiation
 - Propagation des incertitudes

- ⊕ Conclusion et perspectives

Hypothèses explicites

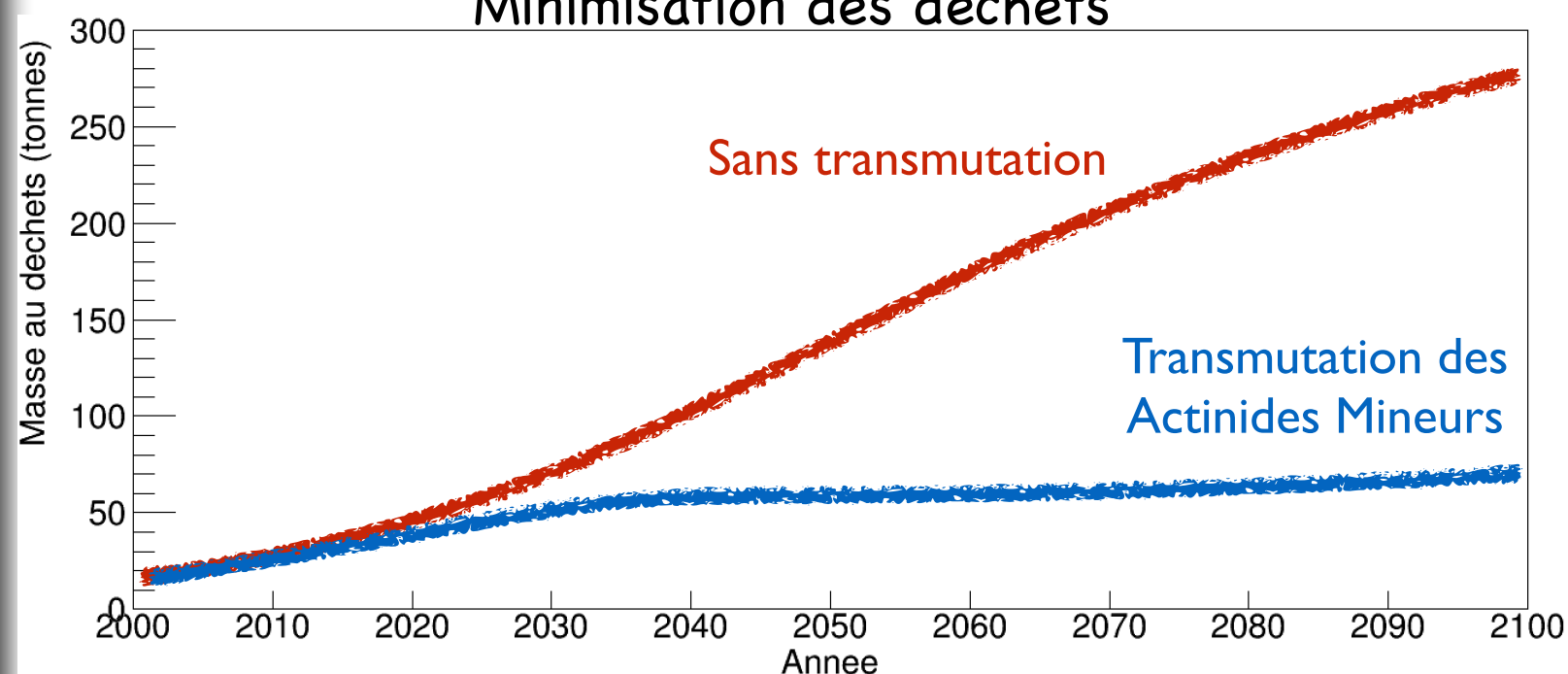
- Production électrique
- Disponibilité ressource
- Contraintes technologiques
- Coût des filières

Hypothèses implicites

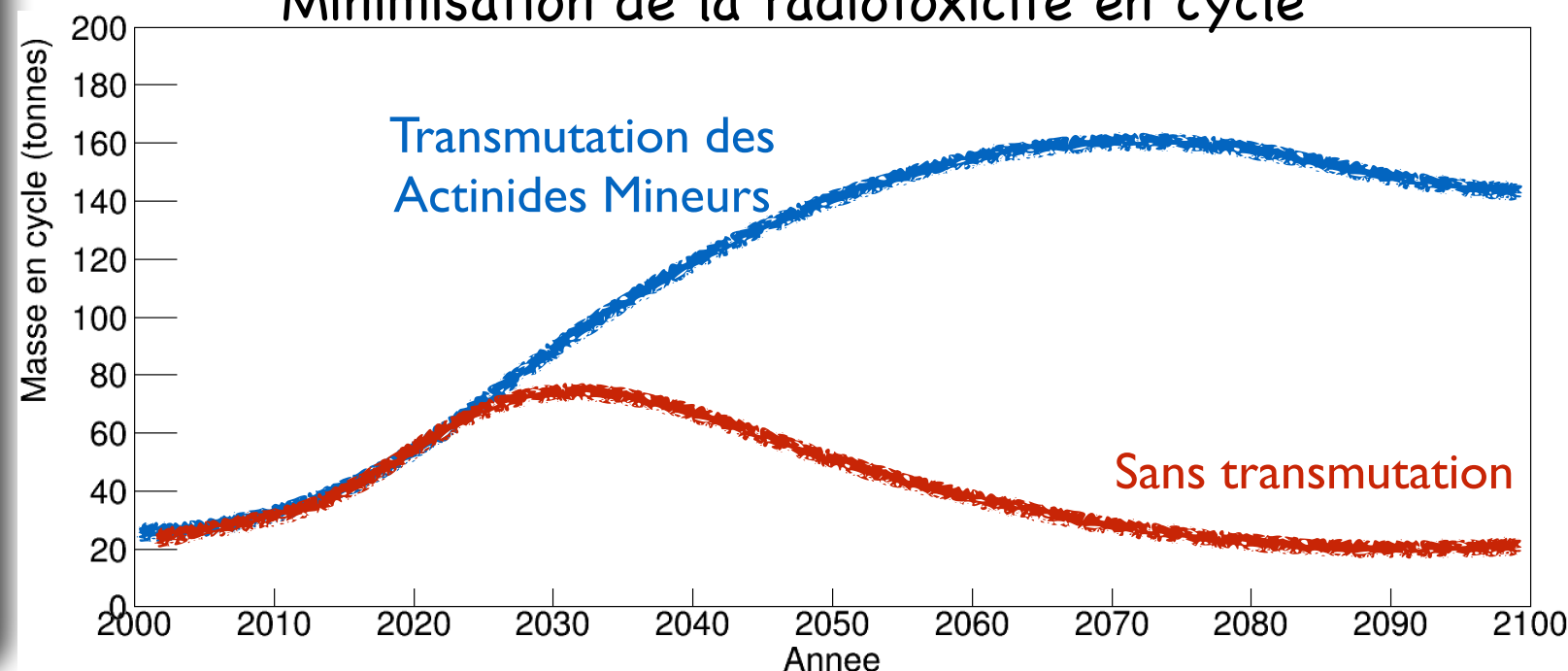
- Décisions politiques
 - Evolution démographique
 - Croissance économique
 - Contexte social
- Relation ressources=f(Prix U)
 - Sur-génération
 - Prix autres ressources
- Maturité des filières/technologies
 - Déploiement de la IV^{ème} génération
 - Transmutation et phase-out
- Théories économiques
 - Coût d'actualisation

Analyse multi-critère

Minimisation des déchets



Minimisation de la radiotoxicité en cycle



Stock I

Stock II

Stock N

Usine de séparation
ou d'enrichissement



- Temps de démarrage
- Durée de vie
- Temps de séparation
- Débit de séparation

Usine de fabrication



- Temps de démarrage
- Durée de vie
- Temps de fabrication
- Débit de fabrication

Modèle d'équivalence
→ Quantité de fissile à charger

Ex : REP

- k_{inf} en fin de cycle / référence
- $BU = f(\text{compo. initiale})$

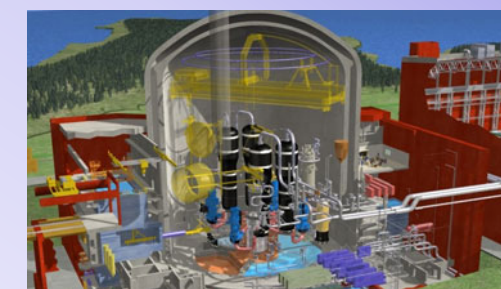
Exemple d'outils math.

- Régressions multilinéaires
- Réseaux de neurones

Pistes d'amélioration

- Calculs et paramètres de référence
- Incertitudes induites par le modèle

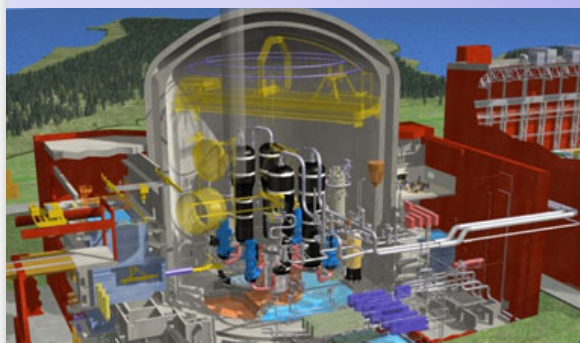
Réacteur nucléaire



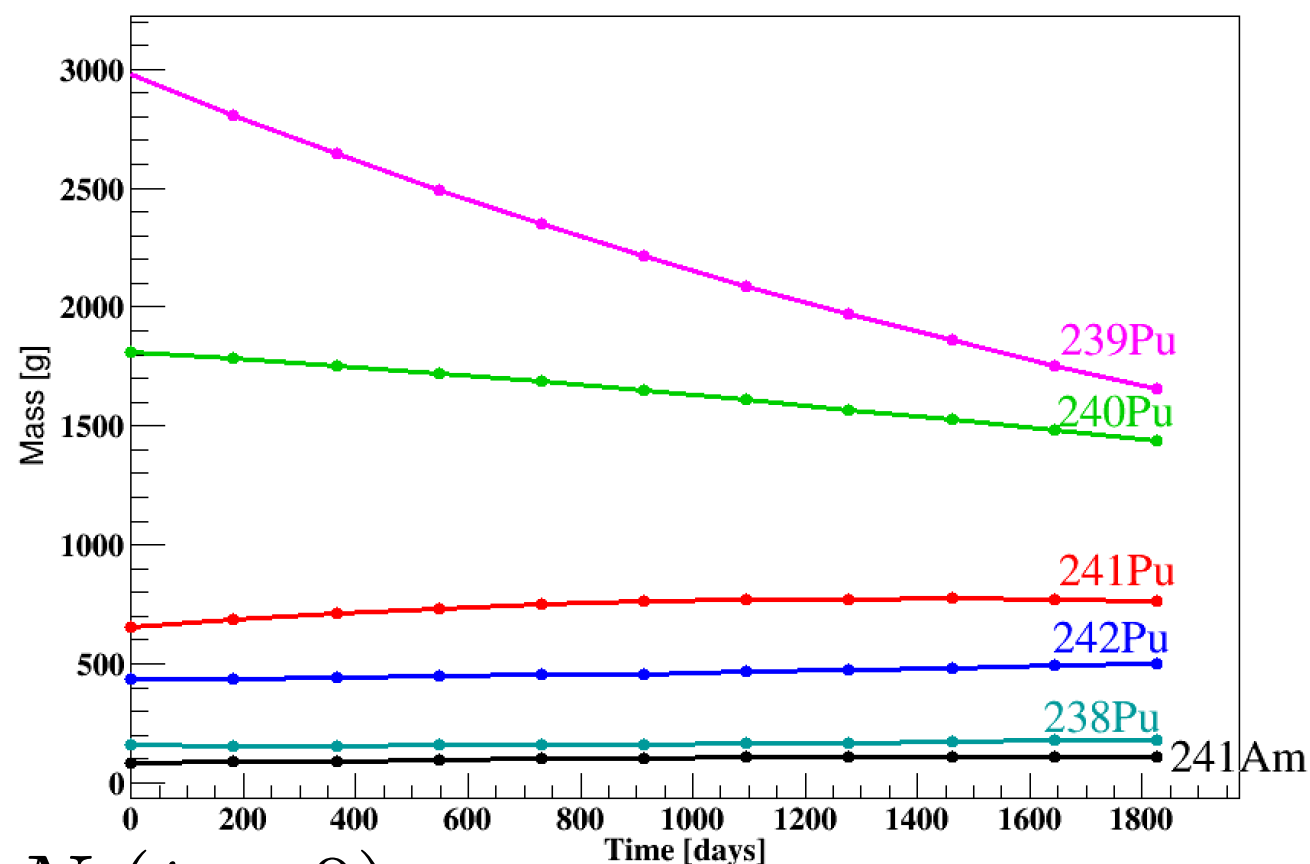
- Définition de la filière
- Puissance thermique
- Masse en coeur
- Burn-Up souhaité
- Facteur de charge
- Temps de démarrage
- Durée de vie
- Plan de chargement

Objectif 1 du projet COMPRIS: Comparaison des prédictions des modèles d'équivalence de CLASS et COSI

Réacteur nucléaire



- Compo initiale
- Puissance thermique
- Masse en coeur
- Burn-Up souhaité
- Facteur de charge



Refroidissement en piscine



- Temps de cooling

$$N_i(t = 0)$$

$$\Rightarrow \frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_i \phi) N_i + \sum_{j \neq i} (\lambda_{j \rightarrow i} + \sigma_{j \rightarrow i} \phi) N_j$$

- Un code de scénario doit fournir la solution des équations de Bateman pour un temps de calcul minimisé
- Un modèle d'irradiation vise à produire les sections efficaces moyennes pour toute composition initiale

Objectif II du projet COMPRIS: Comparaison des prédictions des modèles d'irradiation de CLASS et COSI

CEA : Thèse de Guillaume Krivtchik. Le cycle du combustible électronucléaire et la propagation des incertitudes, 10 octobre 2014.

PARAMETRES SCENARIO

- Hypothèses
- Critères d'évaluation

CODE DE SCENARIO

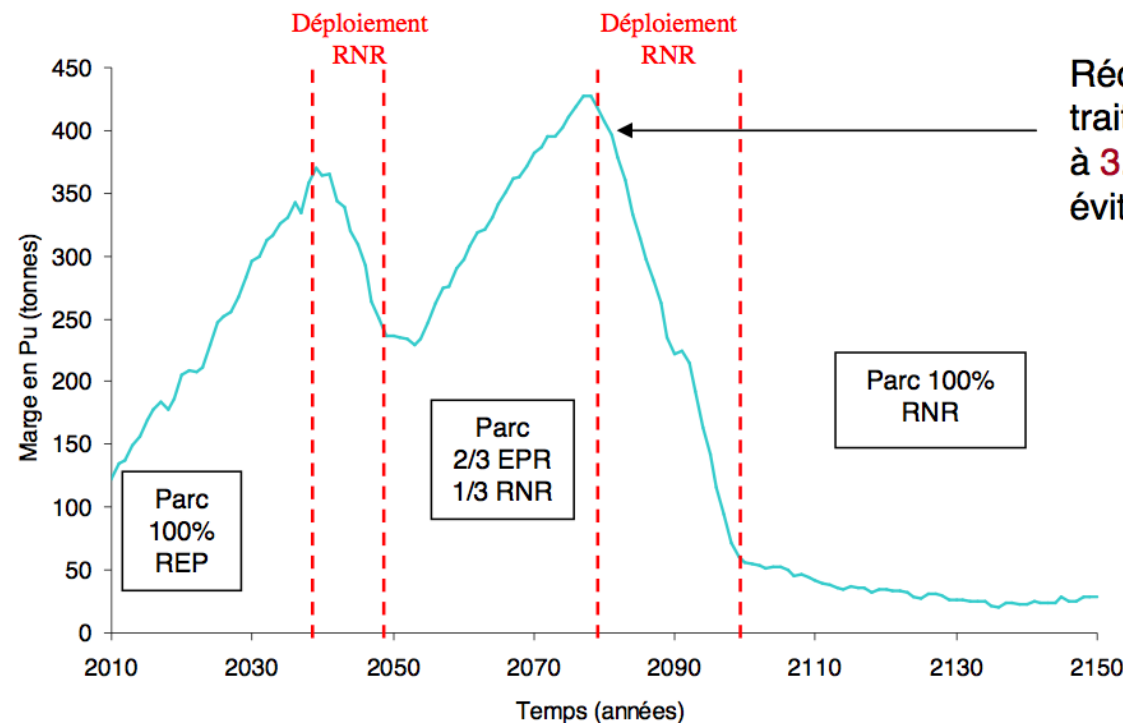
- Modèles physiques
 - Irradiation sous flux
 - Equivalence
 - Domaine de validité

MARGES DISPONIBLES

DONNEES NUCLEAIRES

- Sections efficaces :
 - Fission/capture des actinides
 - Capture et diffusion des produits de fission
- Rendements de fission
- Energie par fission

cea



Evaluation de la faisabilité du déploiement d'un parc RNR de 60 GWé en 2100

Objectif III du projet COMPRIS: Propagation des incertitudes dans les scénarios électronucléaires

- ⊕ Introduction et motivations
 - La transition énergétique
 - Principe d'un scénario électronucléaire
 - Etat de l'art en France

- ⊕ Les incertitudes dans les scénarios électronucléaires
 - Les hypothèses et les critères d'évaluation
 - Le modèle d'irradiation
 - Le modèle d'équivalence

- ⊕ **Résultats et perspectives du projet COMPRIS**
 - Modèles d'équivalence et d'irradiation
 - Propagation des incertitudes

- ⊕ Conclusion et perspectives

Comparaison des modules de décroissance

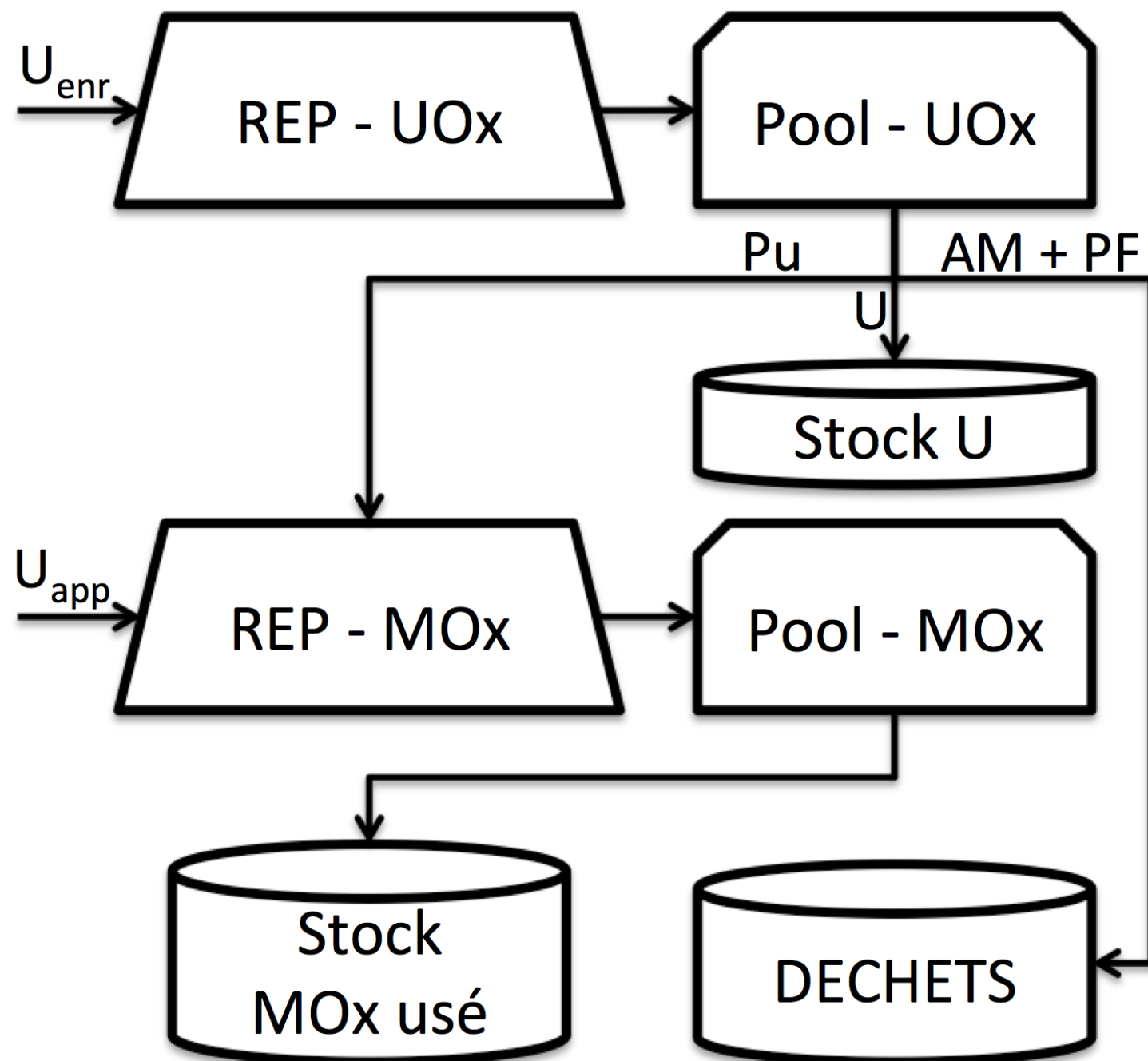
- Composition initiale fixée sur 5 isotopes du Curium
- Quelques pour-cent d'écart sur les actinides après 100000 ans de décroissance
- ➔ Comparaison des temps de demi-vie et des rapports de branchement

Comparaison des modèles d'irradiation

- Quelques compositions initiale fixées pour des REP-UO_x et REP-MO_x
- Jusqu'à la dizaine de pour-cent d'écart sur les actinides en fin de cycle
- ➔ Optimisation des bases de données réacteurs à la base de CLASS

Comparaison des modèles d'équivalence

- Quelques stocks de Pu fixés. La comparaison est faite sur la fraction de Pu demandée
- Ecart proche de la vingtaine de % sur la fraction de Pu entre CLASS et COSI
- ➔ Réflexions et redéfinition du critère de fin de cycle pour les simulations REP-MO_x



Observables

- Masse totale de combustible irradié
- Inventaires totaux : Pu, U, A.M.
- Répartition dans les stocks
- Vecteur et fraction Pu entrant

Sortie

- $T_0 = 15 \text{ ans} + 6 \text{ mois}$
- 1 dump tous les 10 ans

Méthodologie

- Variation unique de la variable
- Tirage aléatoire homogène

Variables perturbées

- Stratégie sur l'âge du stock Pu
- Fractionnement du coeur
- Burn Up UOx
- Temps de refroidissement UOx

- ⊕ Introduction et motivations
 - La transition énergétique
 - Principe d'un scénario électronucléaire
 - Etat de l'art en France

- ⊕ Les incertitudes dans les scénarios électronucléaires
 - Les hypothèses et les critères d'évaluation
 - Le modèle d'irradiation
 - Le modèle d'équivalence

- ⊕ Résultats et perspectives du projet *COMPRIS*
 - Modèles d'équivalence et d'irradiation
 - Propagation des incertitudes

- ⊕ Conclusion et perspectives

- Une évaluation technico-économique rigoureuse des différents scénarios énergétiques possibles ne peut se faire sans l'apport des **simulations dynamiques de l'évolution du parc nucléaire**.
 - Les scénarios électronucléaires étant multi-échelles, ils nécessitent une connaissance précise des phénomènes physiques associés, d'où le **développement de plusieurs codes complémentaires**.
-
- Le défi NEEDS (PF systèmes nucléaires et scénarios) du CNRS finance en 2014 le projet **COMPRIS (CNRS, IRSN, CEA et EdF)** centré sur la comparaison fine des modèles dans les codes de scénario.
 - La **poursuite du soutien financier de NEEDS** sur la thématique des scénarios électronucléaire est souhaitée car c'est la seule structure qui regroupe les acteurs du domaine dans le cadre français.
-
- Le projet **COMPRIS** a deux phases :
 - Comparaison des **modèles d'irradiation et d'équivalence** entre CLASS et COSI.
 - Comparaison des **incertitudes** propagées dans un scénario simple.
 - La première phase, en cours d'analyse, a initiée une réflexion sur les critères de validation des bases de données réacteur REP-MOx.

