

Études de réacteurs à sels fondus de type convertisseur d'actinides et des scénarios de déploiement associés

Séminaire doctorant — 8 avril 2024

Louiliam Clot

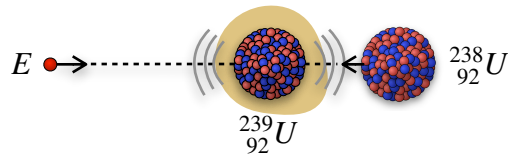
Encadrement :

Elsa Merle, Axel Laureau (Équipe MSFR / LPSC / CNRS)

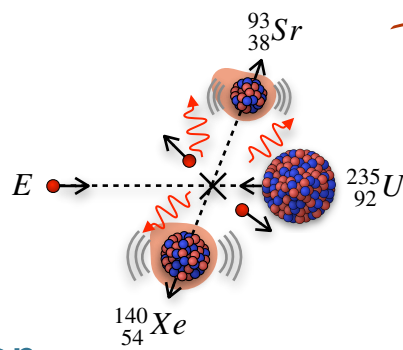
Léa Tillard, Gérald Senentz (Orano)

Reactions principales

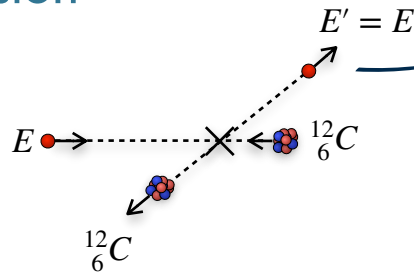
Capture d'un neutron



Fission



Diffusion

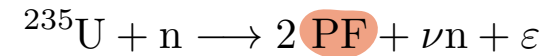


Effets

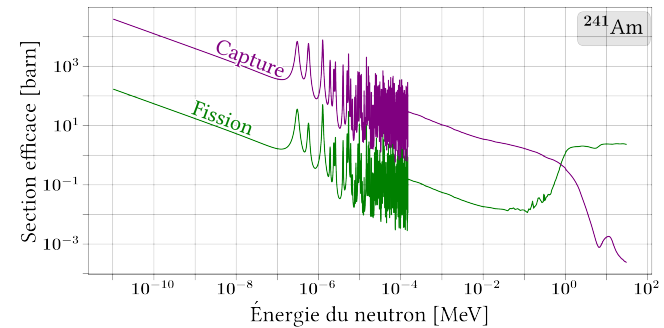
Actinides, dont actinides mineurs (AM)



Produits de fission (PF)

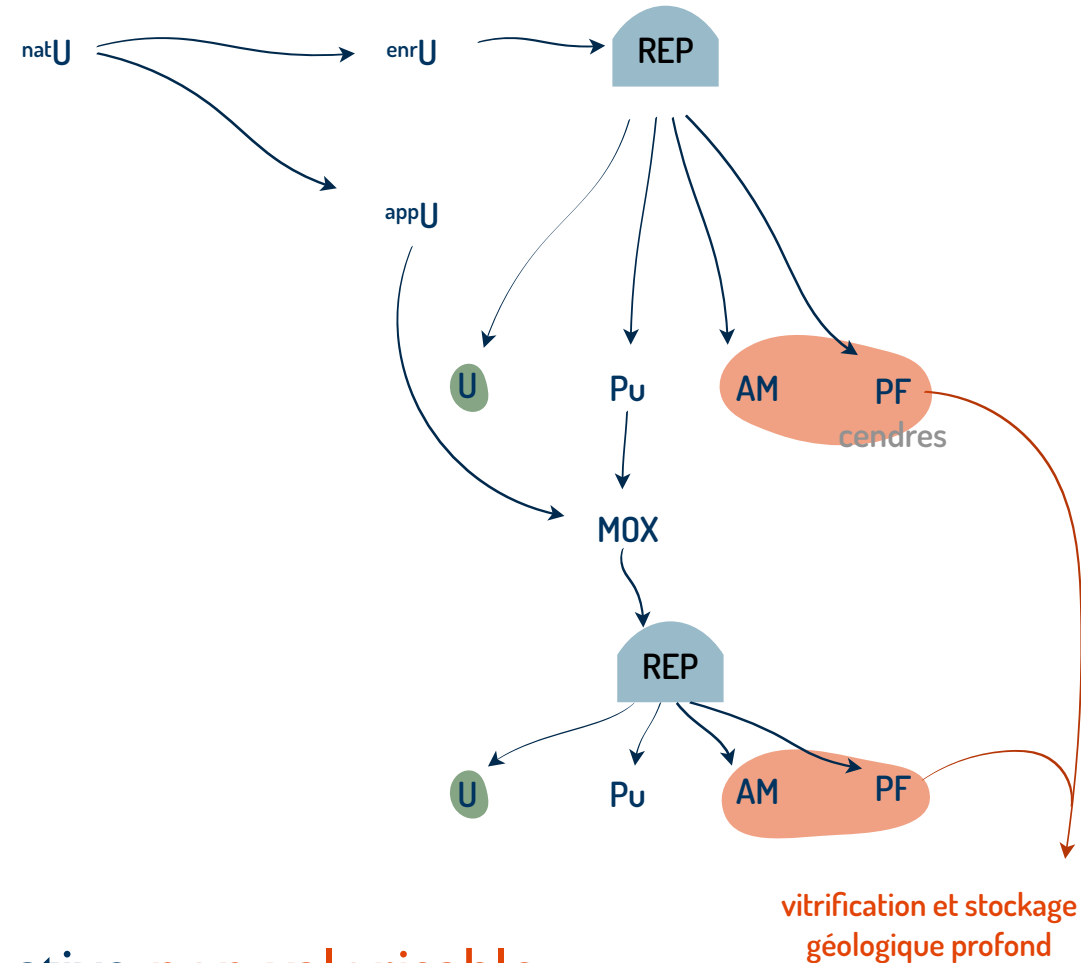


Ralentissement des neutrons



• Cycle français simplifié

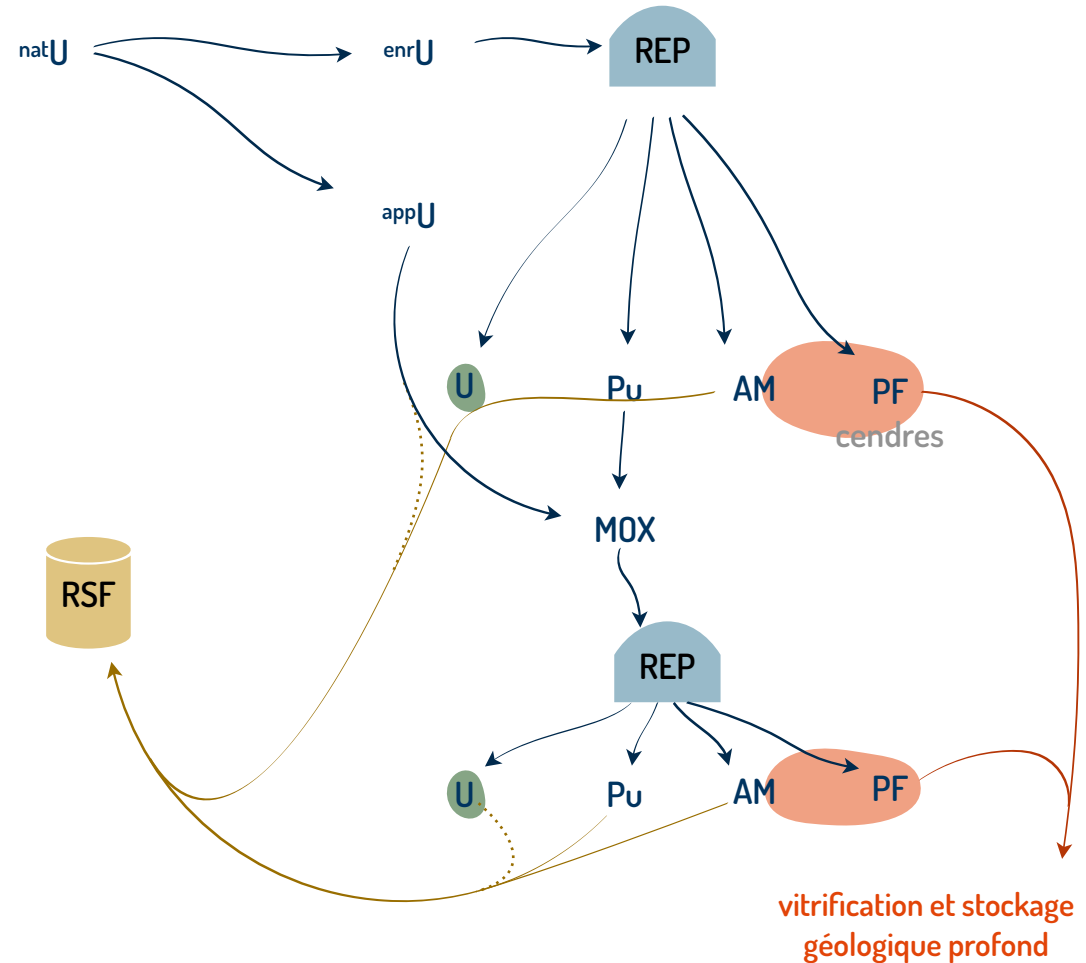
- U : Uranium (naturel, enrichi, appauvri)
- Pu : Plutonium
- AM : Actinides mineurs
- PF : Produits de fission
- MOX : Mélange d'oxydes (U, Pu)
- REP : Réacteur à eau pressurisée
- Filière de recyclage de l'U...



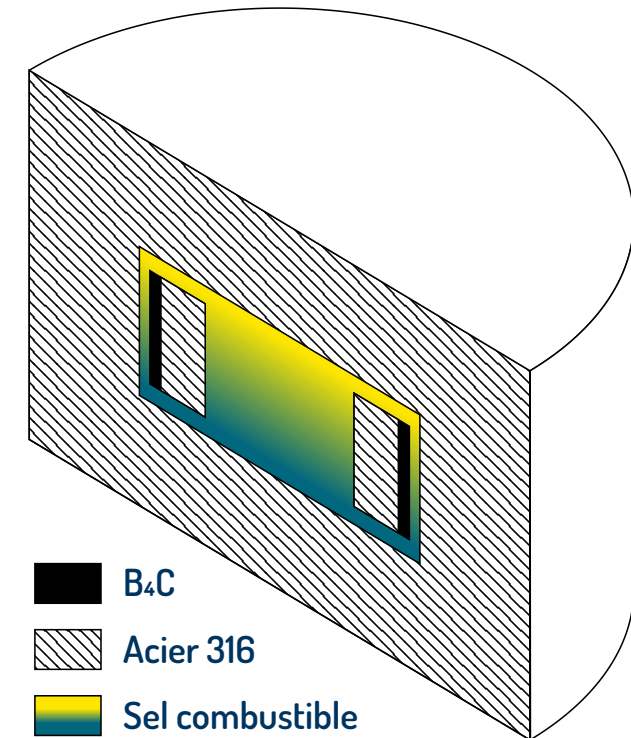
➤ Un déchet est une substance radioactive **non valorisable**

• Cycle français simplifié

- U : Uranium (naturel, enrichi, appauvri)
- Pu : Plutonium
- AM : Actinides mineurs
- PF : Produits de fission
- MOX : Mélange d'oxydes (U, Pu)
- Filière de recyclage de l'U...
- REP : Réacteur à eau
- RSF : Réacteur à sels fondus



- Un réacteur de IV^e génération (GIF)
 - MSRE (ORNL), MSFR de référence (CNRS)
 - Plusieurs start-up (Naarea, Stellaria, Thorizon)
- Concept flexible
 - Grande ou **petite** puissance
 - Spectre thermique, épithermique, **rapide**
 - Régénérateur, **incinérateur/convertisseur**
 - Combustible Th, U, **Pu, AM**, ...
- Sels combustibles liquides circulants
 - Diminuer les difficultés de fabrication dues aux AM
 - Sels liquides : fluorures ou **chlorures**
 - Rechargement **continu** ou par *batch*



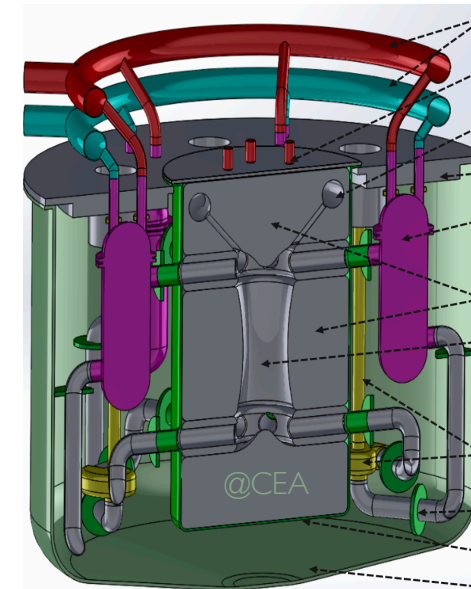
- RAPTOr [@L. Mesthiviers] : pour le Pu

- Étudié dans le cadre du projet MIMOSA (Horizon Europe)
 - CNRS, CVŘ, EDF, NRG, Orano, TU Delt
- Objectif d'incinération du plutonium et/ou des actinides mineurs



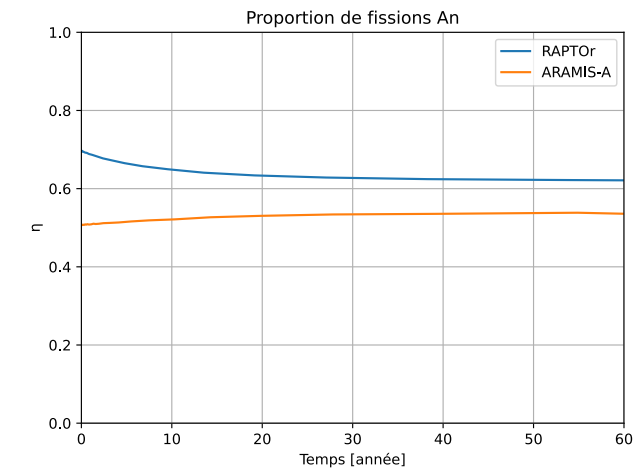
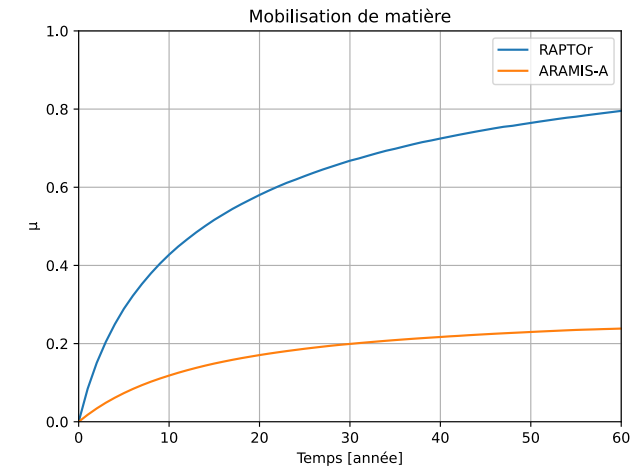
- ARAMIS-A : centré sur l'Am

- Développé et étudié dans le cadre du projet ISAC (France 2030)
 - CEA, CNRS, EDF, Framatome, Orano
- Objectif d'incinération de l'américium

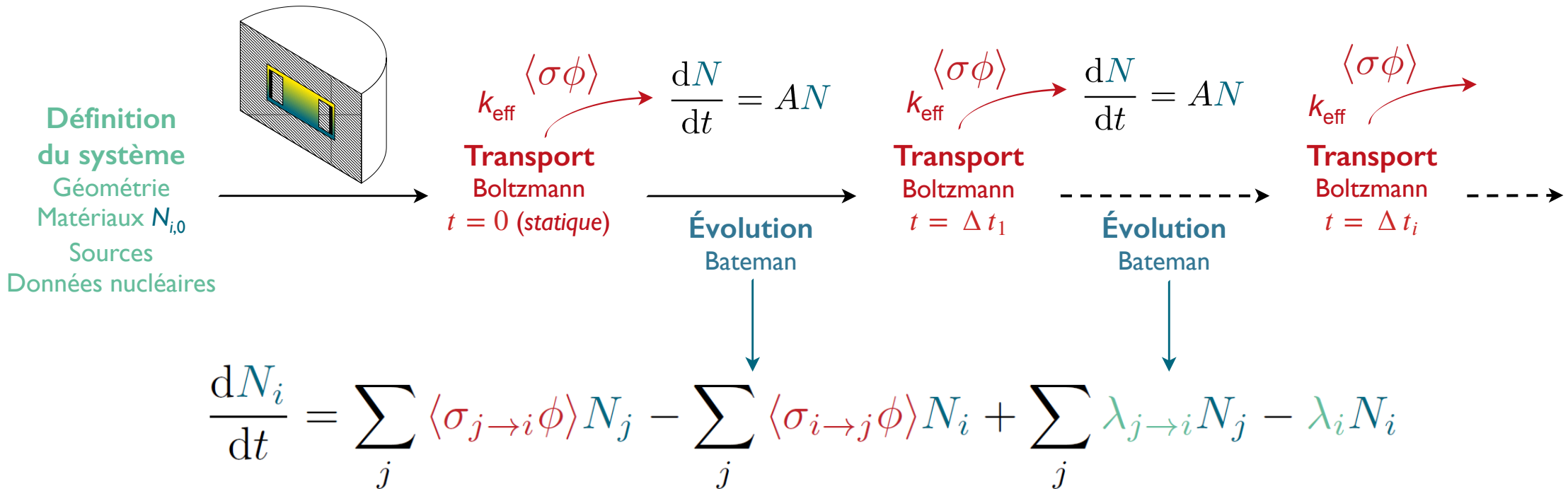


Comment évaluer l'efficacité d'incinération d'un RSF ?

- Critères développés par Laura Mesthiviers
- 1^{er} critère : Mobilisation de matières
 - Proportion d'actinides incinérés
- 2^e critère : Bilan de consommation et de production
 - Vitesse de consommation (production) d'une substance
- 3^e critère : Proportion de fissions
 - Compétition entre la fission et la capture d'un élément
- 4^e critère : Dégâts d'irradiation
 - Quantification des dommages aux structures



Principe d'un calcul neutronique en évolution



- Code de calcul neutronique en évolution adapté aux RSF
 - Résolution de l'équation de transport neutronique statique avec le code MCNP
 - Évolution des matières par résolution de l'équation de Bateman modifiée
 - Extraction des gaz et des insolubles métalliques pendant l'évolution
 - Alimentations dynamiques pilotées par des contraintes

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j \langle \sigma_{j \rightarrow i} \phi \rangle N_j - \sum_j \langle \sigma_{i \rightarrow j} \phi \rangle N_i + \sum_j \lambda_{j \rightarrow i} N_j - \lambda_i N_i - \lambda_i^{\text{traitement}} N_i - R_i + A_i$$

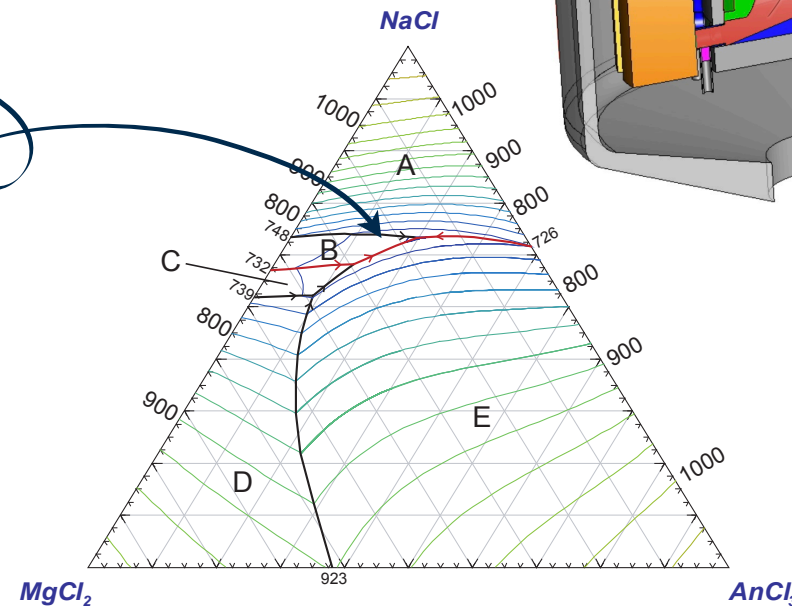
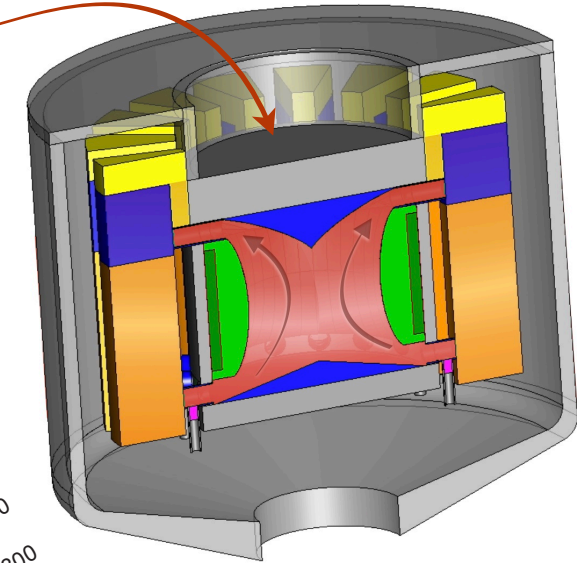
• Différents contrôles du sel

- Réactivité (entretenir la criticité)
- Volume du cœur (pour respecter la géométrie)
- Électroneutralité du sel (respecter la valence des éléments)
- Proportion molaire :

- Alcalins (Na)
- Alcalino-terreux (Mg)
- Actinides ou Transuraniens
- Autres éléments particuliers...

• Certains contrôles ont été implémentés pour l'étude des incinérateurs

- Plus de variations en cœur, composition plus instable



- Des alimentations pour les contrôler tous

- De l' AnCl_3 pour la réactivité

$$\Delta k_{\text{eff}} = \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial A_{\text{AnCl}_3}} \Delta A_{\text{AnCl}_3}$$

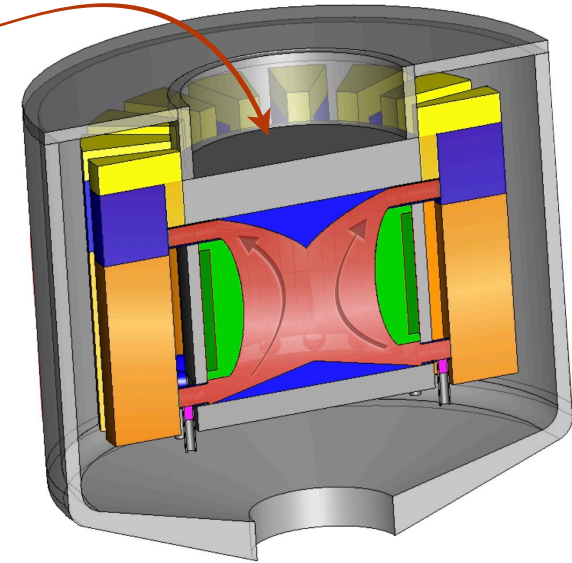
- Du NaCl pour la fraction d'alcalins

$$\Delta f_A = \frac{\partial f_A}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial f_A}{\partial A_{\text{NaCl}}} \Delta A_{\text{NaCl}}$$

- Du MgCl_2 pour le volume

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial V}{\partial A_{\text{MgCl}_2}} \Delta A_{\text{MgCl}_2}$$

- Mais le NaCl et l' AnCl_3 modifient aussi le volume...



- Des alimentations pour les contrôler tous

- De l'AnCl₃ pour la réactivité

$$\Delta k_{\text{eff}} = \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial A_{\text{AnCl}_3}} \Delta A_{\text{AnCl}_3} + \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial A_{\text{NaCl}}} \Delta A_{\text{NaCl}} + \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial A_{\text{MgCl}_2}} \Delta A_{\text{MgCl}_2}$$

- Du NaCl pour la fraction d'alcalins

$$\Delta f_A = \frac{\partial f_A}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial f_A}{\partial A_{\text{NaCl}}} \Delta A_{\text{NaCl}} + \frac{\partial f_A}{\partial A_{\text{AnCl}_3}} \Delta A_{\text{AnCl}_3} + \frac{\partial f_A}{\partial A_{\text{MgCl}_2}} \Delta A_{\text{MgCl}_2}$$

- Du MgCl₂ pour le volume

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial V}{\partial A_{\text{MgCl}_2}} \Delta A_{\text{MgCl}_2} + \frac{\partial V}{\partial A_{\text{AnCl}_3}} \Delta A_{\text{AnCl}_3} + \frac{\partial V}{\partial A_{\text{NaCl}}} \Delta A_{\text{NaCl}}$$

- Mais le NaCl et l'AnCl₃ modifient aussi le volume...



- Des alimentations corrélées aux contrôles
 - Une vision vectorielle (avec une matrice jacobienne)

$$\Delta \vec{C}(\vec{A}) = \frac{\partial \vec{C}(\vec{A})}{\partial t} \Delta t + \bar{\bar{J}}_C(\vec{A}) \Delta \vec{A}$$

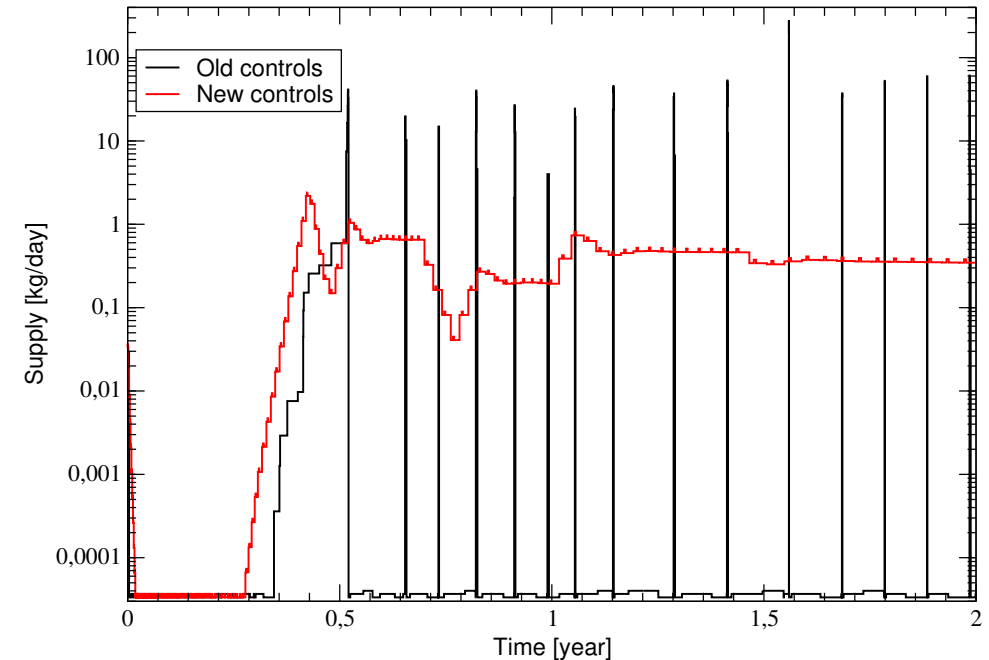
- Avec

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} A_{\text{AnCl}_3} \\ A_{\text{NaCl}} \\ A_{\text{MgCl}_2} \end{bmatrix} \quad \vec{C}(\vec{A}) = \begin{bmatrix} k_{\text{eff}} \\ f_A \\ V \end{bmatrix} \quad \bar{\bar{J}}_C(\vec{A}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial A_{\text{AnCl}_3}} & \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial A_{\text{NaCl}}} & \frac{\partial k_{\text{eff}}}{\partial A_{\text{MgCl}_2}} \\ \frac{\partial f_A}{\partial A_{\text{AnCl}_3}} & \frac{\partial f_A}{\partial A_{\text{NaCl}}} & \frac{\partial f_A}{\partial A_{\text{MgCl}_2}} \\ \frac{\partial V}{\partial A_{\text{AnCl}_3}} & \frac{\partial V}{\partial A_{\text{NaCl}}} & \frac{\partial V}{\partial A_{\text{MgCl}_2}} \end{bmatrix}$$


- Ce qui permet de calculer la variation des alimentations à appliquer

$$\Delta \vec{A} = \bar{\bar{J}}_C^{-1}(\vec{A}) \left(\vec{C}^{\text{cible}} - \vec{C}(\vec{A}) - \frac{\partial \vec{C}(\vec{A})}{\partial t} \Delta t \right)$$

- Amélioration du schéma de calcul pour améliorer la stabilité
 - Exemple avec le concept « MSFR de référence » (développé au LPSC)
 - Gain de temps de simulation
 - Meilleure estimation des flux de matières
 - Entrées et sorties
 - Intégration des réacteurs plus facile dans des Études de cycle
 - Alimentation annuelle plus représentative

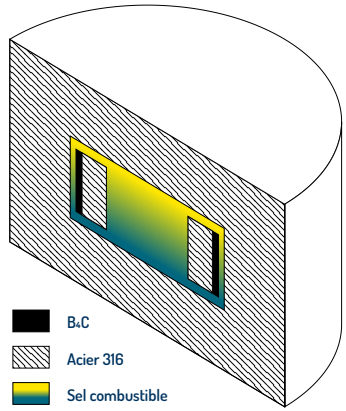


- Publication soumise en conférence internationale (SNA + MC 2024)

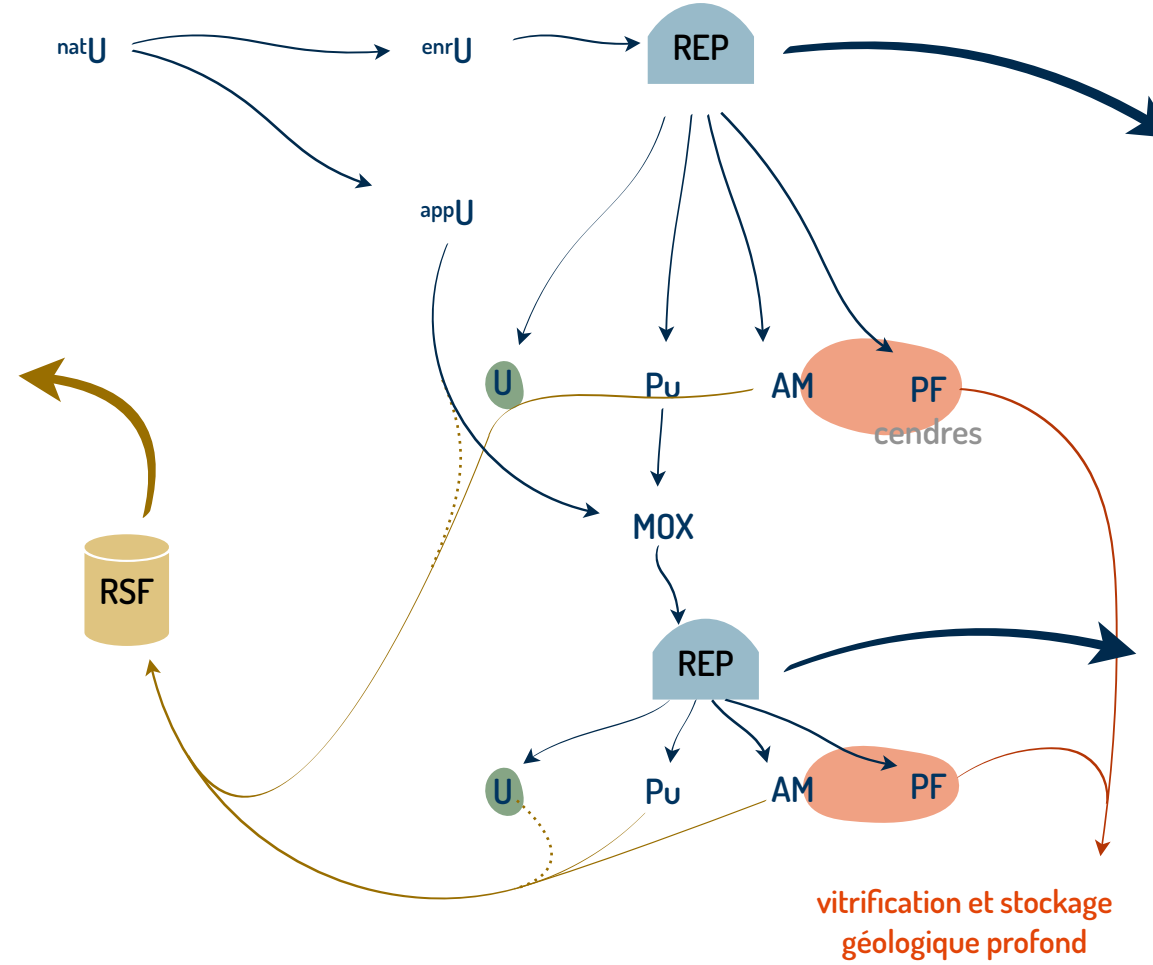



Simulations REM pour les RSF incinérateurs

Utilisé pour analyser la capacité du RSF à recycler les actinides issus des autres réacteurs du parc

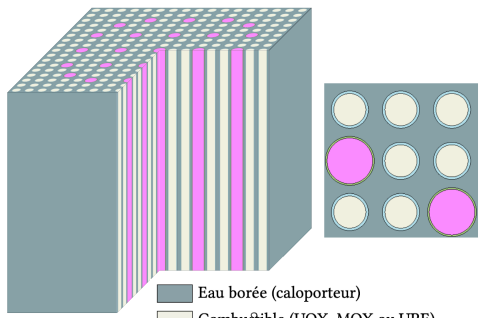


- B.C
- Acier 316
- Sel combustible

Simulations SMURE pour les REP (et les RNR-Na)

Utilisé pour calculer les quantités de matières en fin d'irradiation en fonction de l'isotopie du combustible frais



- Eau borée (caloporteur)
- Combustible (UOX, MOX ou URE)
- Gaine en zirconium (crayons combustibles)
- Eau borée (tubes guides)
- Gaine en zirconium (tubes guides)

- Code statique de scénario piloté par une **demande de puissance** et développé pour optimiser l'utilisation de ressources

- Démarrage de réacteurs pour satisfaire la demande

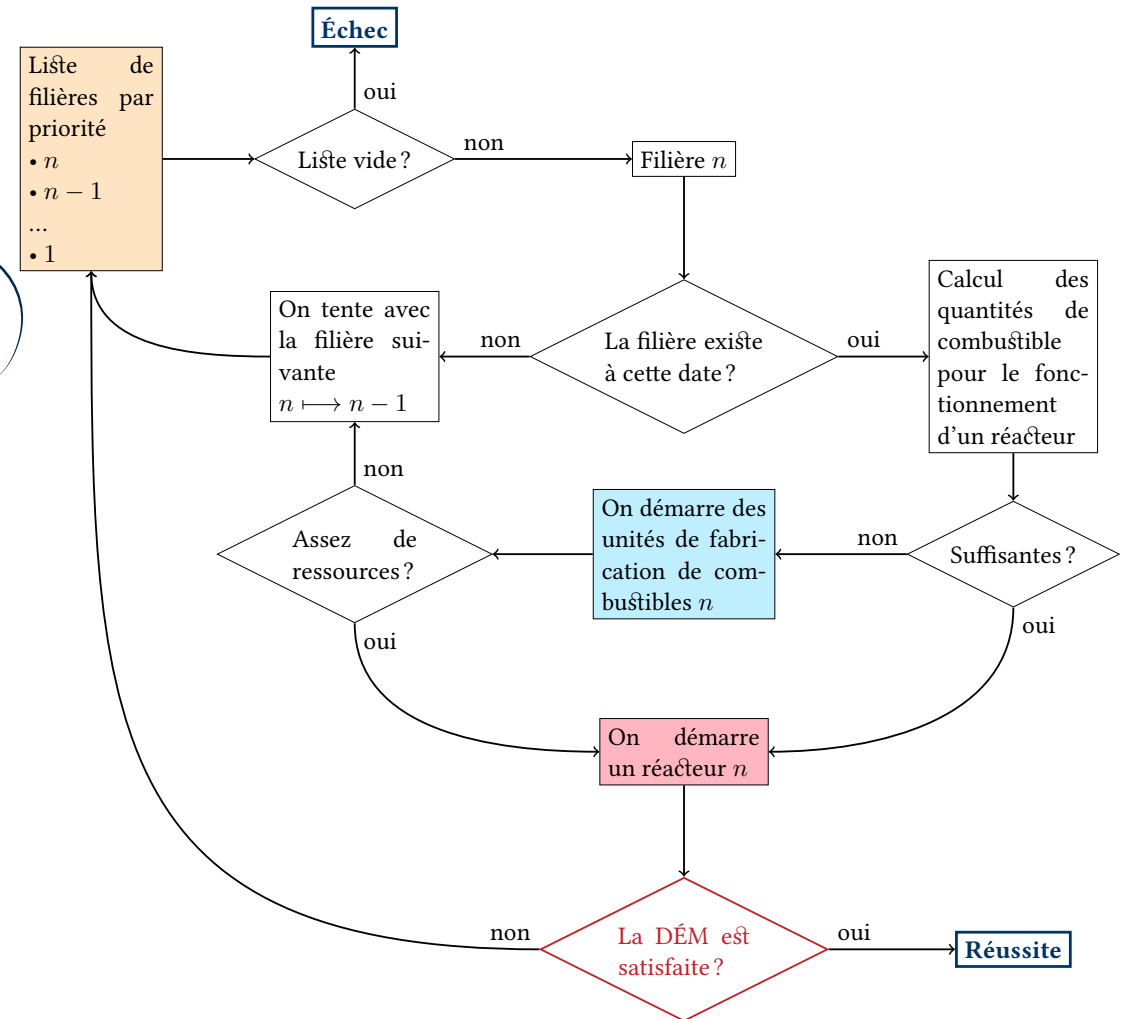


- Calculs et limitations par les quantités de matières (ressources ou combustibles)

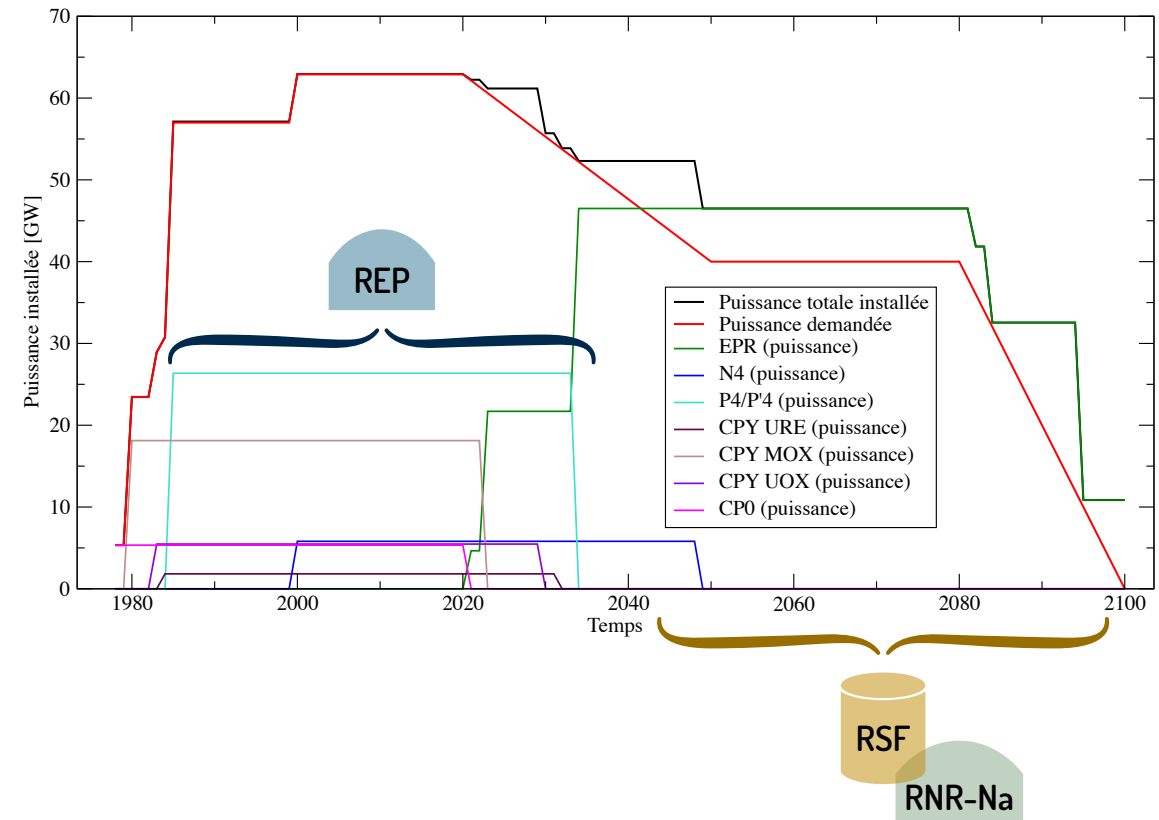
- Adapté pour l'intégration de RSF électrogènes

- Projet de réécriture du code courant 2024

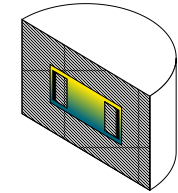
- Adaptable au déploiement de réacteurs pour décrire un parc spécifique



- Simulation du parc français historique
 - Objectif : calculer la quantité d'AM produite par les REP pour dimensionner un parc de **RSF incinérateurs**
 - Avec ISF : **encadrement d'un stage MI** sur la simplification du parc
- ISF2 : nouveau code de scénario
 - Code « semi-statique »
 - Pilotage par la puissance, les entrées/sorties ou historique
 - Intégration plus poussée des **RSF incinérateurs** (réseaux de neurones, ...)
 - Pilotage dynamique (isotopie variable)



- Étudier la capacité de petits RSF rapides à incinérer les AM
- À l'échelle du réacteur
 - Détermination des flux de matières tout au long du fonctionnement du RSF pour tous types d'actinides alimentés
 - Analyse des performances résultantes : critères d'efficacité d'incinération et optimisation
 - Amélioration du schéma de calcul REM pour mieux quantifier les flux de matières
 - Perspectives : étude d'un éventuel modèle d'équivalence pour les études de cycles (scénarios)
- À l'échelle du parc
 - Simulation du parc actuel français ou européen
 - Quantification du déploiement de RSF nécessaire pour recycler les AM produits dans les REP et/ou RNR-Na (projets MIMOSA et ISAC)
 - Réécriture du code ISF pour l'adapter à ces besoins de simulations courant 2024
 - Objectif : code « semi-statique » avec une intégration poussée des RSF incinérateurs





Merci de votre attention