



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

# Modélisation d'insertions de réactivité dans un réacteur de génération IV à sels fondus

Le Meute Thibault, Bertrand Frédéric, Merle Elsa, Marie Nathalie, Heuer Daniel

- École doctorale :
  - Grenoble IMEP-2
- Thèse co-financée
  - CEA de Cadarache → 2 ans
  - LPSC → 1 an
- Début : octobre 2019
- Projet européen SAMOSAFER
- Encadrement :
  - LPSC
    - Elsa Merle (co-directrice)
    - Daniel Heuer (encadrant)
  - CEA de Cadarache
    - Frédéric Bertrand (directeur)
    - Nathalie Marie (encadrante)

- Présentation du réacteur
- Objectifs
- Méthodologie
- Avancement du travail
  - Coefficients de contre-réactions
  - Outils en cours de développement
- Conclusions et perspectives
- Bibliographie

## ■ Réacteur de puissance (MSFR : 3 GW)

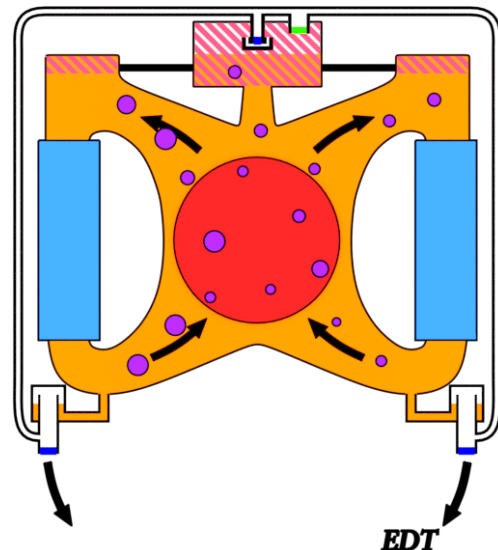
- Combustible circulant sous forme liquide (18 m<sup>3</sup> de sel)
- Circuit combustible composé de plusieurs parties
  - Cœur où le sel s'échauffe
  - Échangeurs de chaleur où le sel se refroidit en réchauffant le circuit intermédiaire
  - Réservoir d'expansion pour recevoir le sel en cas de dilatation
- Circuit intermédiaire : sel inerte

## ■ Compositions

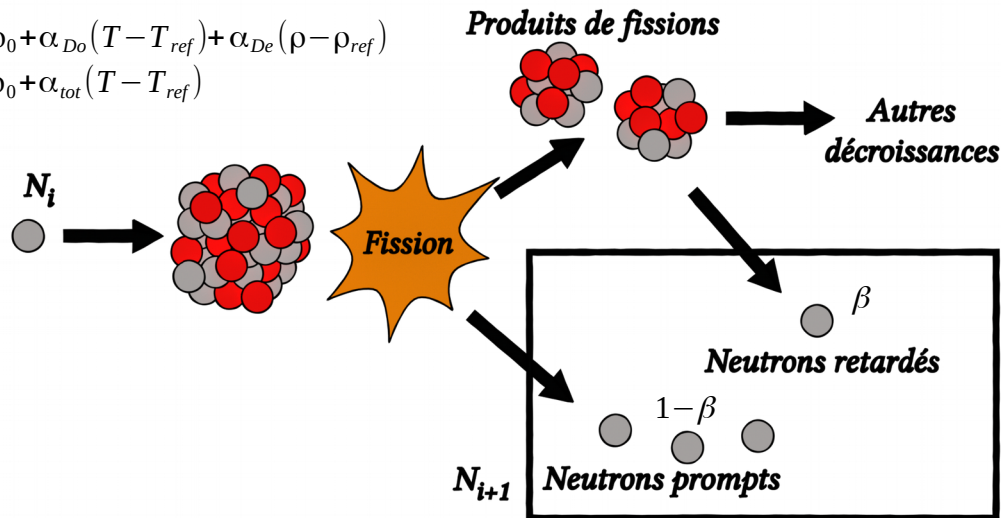
- Composition de référence
  - Noyaux fertiles et fissiles : Th/U
  - Sel : fluorure
- Composition alternative
  - Noyaux fertiles et fissiles : U/Pu
  - Sel : chlorure

## ■ Cœur plus gros en chlorure

- Environ 30m<sup>3</sup>



- Coefficient multiplicateur,  $k$  tel que :  $N_{i+1} = k N_i$
- Réactivité : Écart à la criticité :  $\rho = \frac{k-1}{k}$ 
  - Dépend de nombreux paramètres dont : température, masse volumique,...
- Origine de l'insertion de réactivité :
  - Éjection de barre de contrôle, sel froid dans un MSR, matière fissile précipitée,...
- Expression :  $\rho = \rho_0 + \alpha_{Do}(T - T_{ref}) + \alpha_{De}(\rho - \rho_{ref})$   
 $\rho = \rho_0 + \alpha_{tot}(T - T_{ref})$



- Objectifs des études d'insertions de réactivité
  - Identifier leurs conséquences
    - En termes de phénomènes physiques (Quel est le comportement du réacteur face à une augmentation de puissance qui fait entrer en jeu tous les phénomènes physiques ayant un impact sur la réactivité et l'énergie stockée dans le sel)
    - En terme de nature : chargement statique, chargement dynamique, chargement thermique,...
  - En tirer des leçons pour le design :
    - Nous n'étudierons pas les solutions techniques, mais nous chercherons à définir les exigences pour la mitigation de ces accidents en terme de paramètres physiques (seuil de pression pour le déclenchement de la vidange, débit de la vidange, taille du volume d'expansion,...)
  - Confirmer la fiabilité du concept face aux accidents hypothétiques :
    - Confirmer de larges marges de sûreté entre les initiateurs plausibles et les conséquences d'insertions de réactivité extrêmes

- Identifier les échelles spatiales et temporelles des effets induits par une insertion de réactivité sans prendre en considération le début du scénario (insertion maximale de 2500 pcm [1])
  - Echelles temporelles variées :
    - Courtes : ondes de pression (1 – 10 ms)
    - Moyennes : transitoire de vidange (10 – 100 s)
    - Longues : refroidissement (jours - mois)
- Modéliser ces effets :
  - Modéliser les effets et leurs conséquences (ex : Augmentation de la pression et dégâts mécaniques sur la cuve)
    - Analyse phénoménologique
  - Développement d'outils de calculs rapides qui ne prennent en compte que les phénomènes pilotant les transitoires et leurs conséquences
    - Modélisation et validation
- Études paramétriques
- Évaluation des scénarios d'insertion de réactivité à partir des événements initiateurs

- Modèles simplifiés
  - Maillages simplifiés
  - Traitement des phénomènes pilotant le comportement du sel
    - Compressibilité pour les transitoires rapides
    - Modélisation de la neutronique
      - Rampe / marche de réactivité en condition d'entrée
      - Contres-réactions neutroniques
    - Vaporisation des espèces chimiques
      - Expansion rapide
    - Calcul des contraintes et déformation des structures
  - Évacuation de la puissance résiduelle
    - Dépôt d'énergie gamma
    - Liquéfaction du sel inerte
    - Solidification du sel combustible
- Temps court d'exécution
  - Études paramétriques



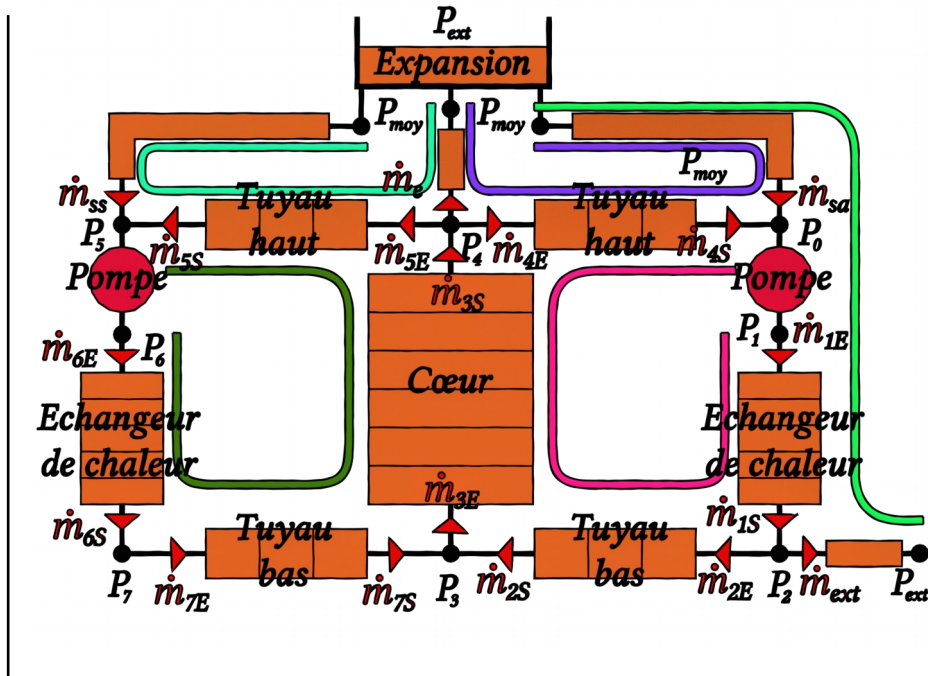
# Transitoires considérés

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) is displayed in white lowercase letters. A horizontal green line is positioned below the letters 'e' and 'a'. The logo is enclosed within a white L-shaped frame consisting of a vertical line on the right and a horizontal line on the bottom.

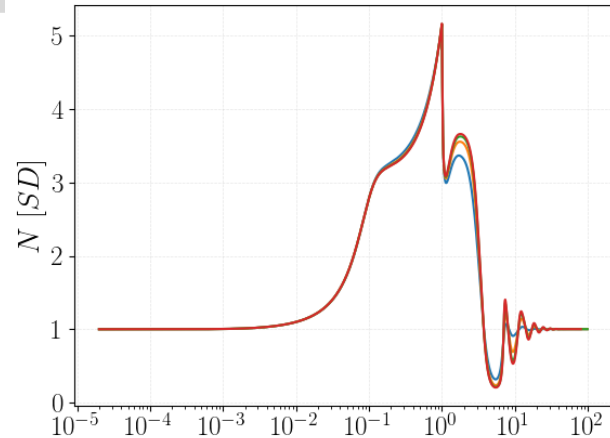
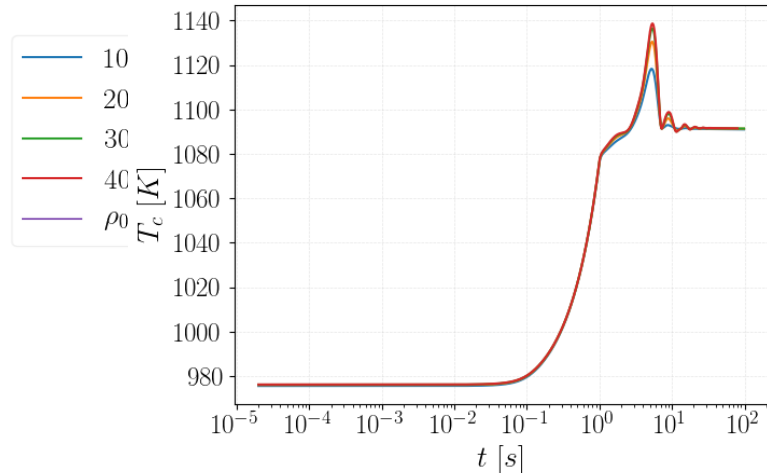
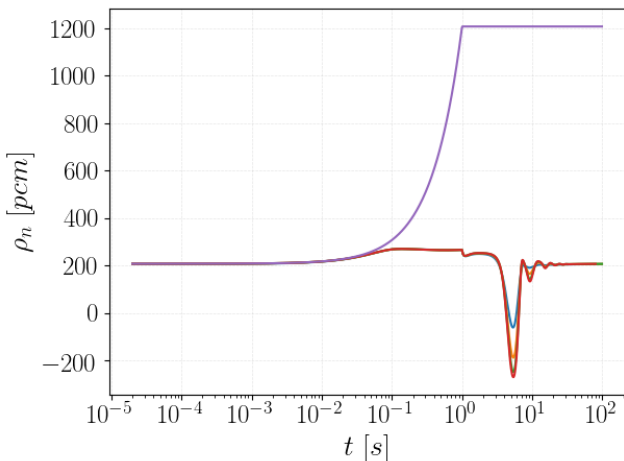
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Le Meute Thibault, Bertrand Frédéric, Merle Elsa, Marie Nathalie, Heuer  
Daniel

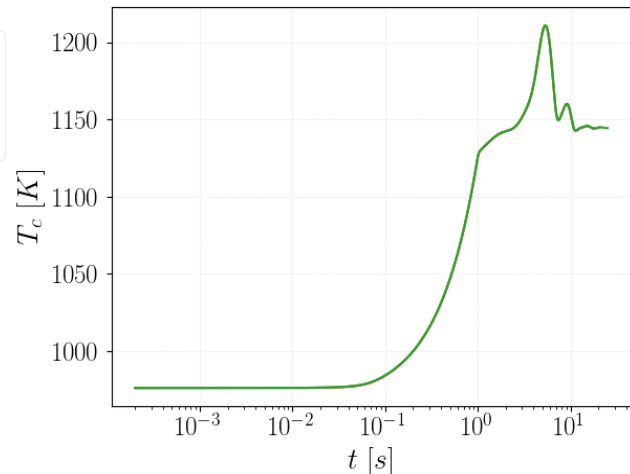
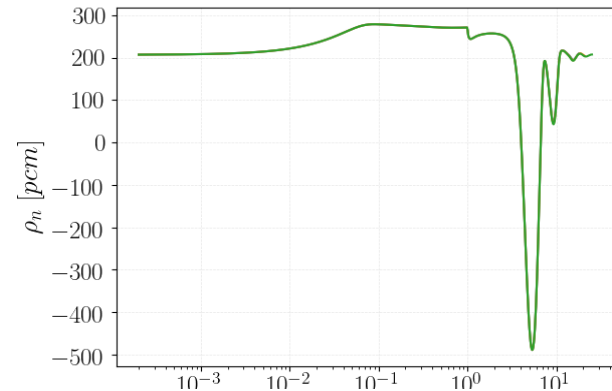
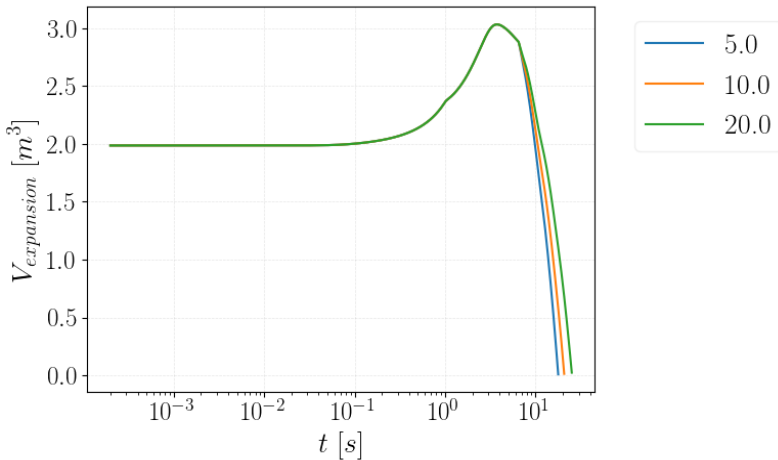
- Outil de calcul incompressible, circuit hydraulique
- Calcul des températures/précurseurs pour l'outil de transitoire rapide
- Code inspiré de LiCore (développé au LPSC par Axel Laureau [2]) pour le modèle neutronique. Comparaisons nécessaire pour la validation
- Maillage fixe.
- 1D
- Mouvement axial uniquement.
  - Pression motrice des pompes imposée
- Evolution de la température et de la vitesse avec :
  - Équation de conservation de l'enthalpie
  - Équation de continuité



- Réactivité du cœur suit la hausse de réactivité
- Hausse de puissance
- Hausse de température
- Baisse de la réactivité
- Retour à un état stable après des oscillations dues au transport du volume de sel chauffé par l'augmentation courte de puissance



- Même dynamique que précédemment
- Vidange se déclenche quand le volume de sel dans le réservoir d'expansion atteint  $2,5 \text{ m}^3$  et met 5 s à se déclencher
- Temps de vidange du réservoir dépend beaucoup des pertes de charges du système de vidange



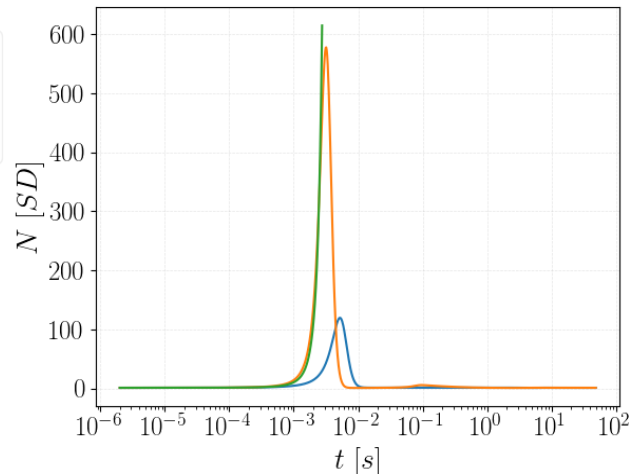
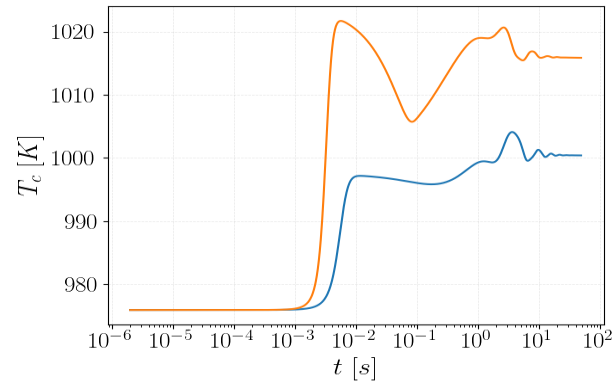
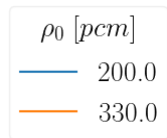
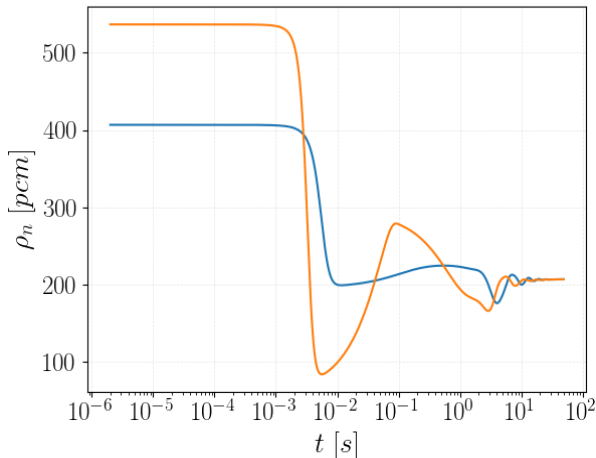
# Transitoire rapide

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et alternative) features the lowercase letters 'cea' in a white, rounded, sans-serif font. A horizontal green line is positioned directly beneath the letters. The logo is set against a dark red background that has a subtle pattern of lighter red dots of varying sizes.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Le Meute Thibault, Bertrand Frédéric, Merle Elsa, Marie Nathalie, Heuer  
Daniel

- Réactivité très élevée au début du transitoire
- Pic de puissance → Augmentation de la température
- Dilatation brutale du sel en cœur
  - Montée en pression
  - Transitoire de pression non pris en compte dans cet outil



# Conclusion et perspectives

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) is displayed in white lowercase letters. A horizontal green line is positioned below the letters 'e' and 'a'. The logo is enclosed within a white L-shaped frame consisting of a vertical line on the right and a horizontal line on the bottom.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Le Meute Thibault, Bertrand Frédéric, Merle Elsa, Marie Nathalie, Heuer Daniel

- Premier code qui nous a permis de prendre en main la physique et le comportement du réacteur
  - Limites des hypothèses d'incompressibilité
    - Passage d'un état de transitoire incompressible à un état compressible
- Validation en réalisant des comparaisons avec les outils LiCore et TFM OpenFOAM



- Code d'insertion de réactivités lentes
  - Modélisation du circuit intermédiaire et du circuit de conversion d'énergie
    - Design nécessaire pour le circuit de conversion
  - Optimisation du cœur pour le concept chlorure (Outil SONGES développé au LPSC)
- Réalisation d'un outil pour les transitoires de pression
  - Phase rapide
  - Prise en compte de la vaporisation de certaines espèces
- Chaînage des deux codes (insertions de réactivité multiples)
  - Passage lent vers rapide puis, dans les cas possible, rapide vers lent pour le retour à l'état stationnaire, la vidange

- [1] D.Gerardin, Développement de méthodes et d'outils numériques pour l'étude de la sûreté du réacteur à sels fondus MSFR, PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2006
- [2] A.Laureau, Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2006
- [3] M.Brovchenko, Etudes préliminaires de sûreté du réacteur à sels fondus MSFR. PhD thesis, Université Grenoble Alpes, 2013
- [4] D.H.Cho, R.O.Ivins, and R.W.Wright, A rate-limited model of molten-fuel / coolant interaction : Model development and preliminary calculations 1972

# Annexes



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Le Meute Thibault, Bertrand Frédéric, Merle Elsa, Marie Nathalie, Heuer Daniel

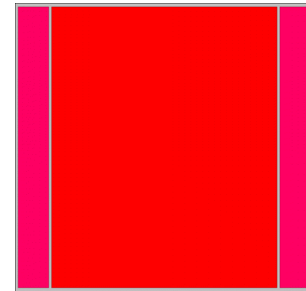
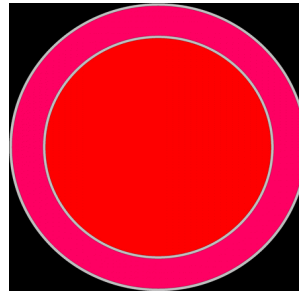
# Coefficients de contres-réactions

The logo for CEA (Commissariat à l'énergie atomique et alternative) features the lowercase letters 'cea' in a white, rounded, sans-serif font. A horizontal green line is positioned directly beneath the letters. The logo is centered within a white square that is part of a larger white L-shaped graphic element.

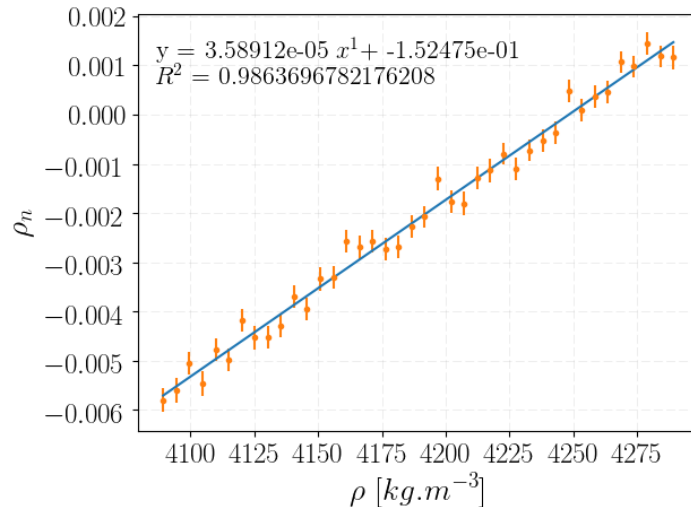
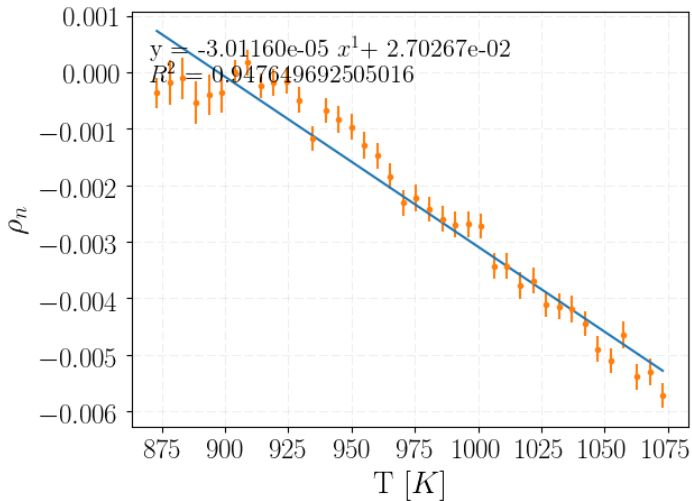
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Le Meute Thibault, Bertrand Frédéric, Merle Elsa, Marie Nathalie, Heuer Daniel

- Pour les calculs de transitoires, il est nécessaire d'avoir les valeurs des coefficients de contres-réactions :
  - Géométrie ortho-cylindrique
  - Volume de 9 m<sup>3</sup> pour le sel fluorure et 15 m<sup>3</sup> pour le sel chlorure
  - Paroi en Hastelloy de 4 cm et une couverture fertile de 50 cm.
    - Pour les chlorures, le matériau de structure est l'acier 316

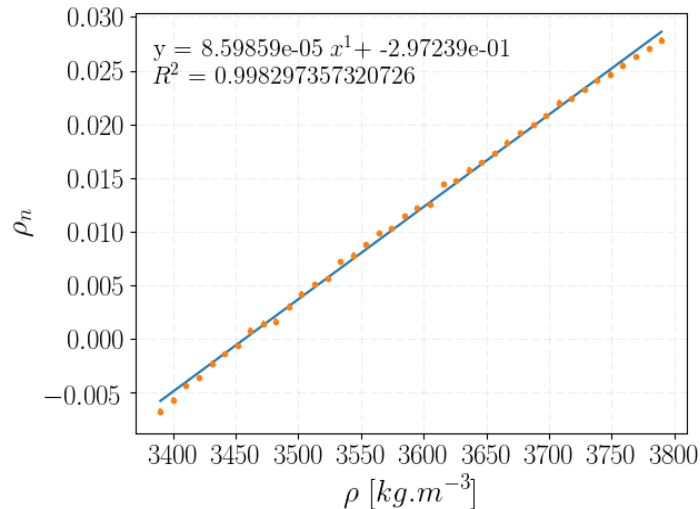
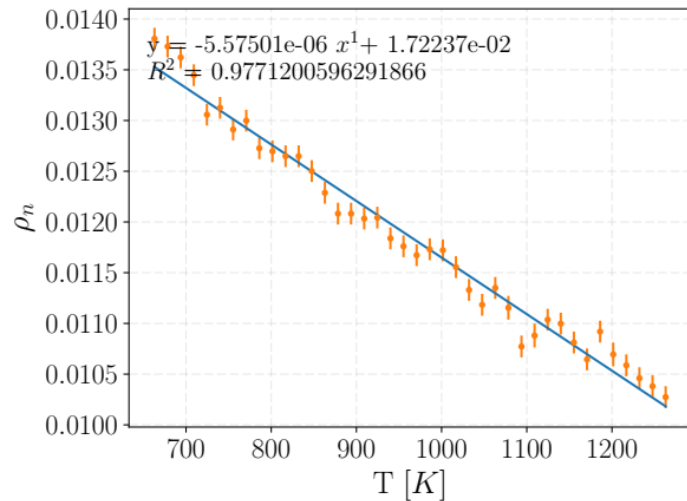


- Compositions :
  - Sel fluorure : 77.5 % LiF – 20 % ThF<sub>4</sub> – 2.5 % UF<sub>3/4</sub>
  - Sel chlorure : 55% NaCl – 40.5 % UCl<sub>3</sub> – 4.5 % PuCl<sub>3</sub>
- Outil de calcul :
  - Serpent2 avec la base de donnée JEFF3.1.1



## ■ Coefficient de contre-réaction total -6.2 pcm/K

- $\rho_{\text{doppler}} = -3.01 \text{ pcm/K}$  et  $\rho_{\text{density}} = 3.59 \text{ pcm/(kg/m}^3\text{)}$
- Plus faible que la valeur calculée par Axel Laureau [2] -8pcm/K
  - Géométrie
- Avec la géométrie cylindrique, Mariya Brovchenko [3] a calculé :
  - -6.67 pcm/K pour pour un sel neuf
  - -5.07 pcm/K pour la composition à l'équilibre



## ■ Coefficient de contre-réaction total de -11.1 pcm/K

- $\rho_{\text{doppler}} = -0.56 \text{ pcm/K}$  et  $\rho_{\text{density}} = 8.60 \text{ pcm/(kg/m}^3\text{)}$
- Plus qu'avec un sel fluorure
  - Grande stabilité neutronique
- Effet Doppler très faible
  - Problème pour les insertions rapides
- Pas encore de calcul pour la composition à l'équilibre