

TRUST-NK : un outil de calcul thermohydraulique-neutronique pour les réacteurs à sels fondus

Minisymposium SMAI 2025

Mathématiques et mécanique des fluides au CEA, de la recherche aux enjeux actuels

Matthieu Pauron — matthieu.pauron@cea.fr

Lidija Gajinovic — lidija.gajinovic@cea.fr

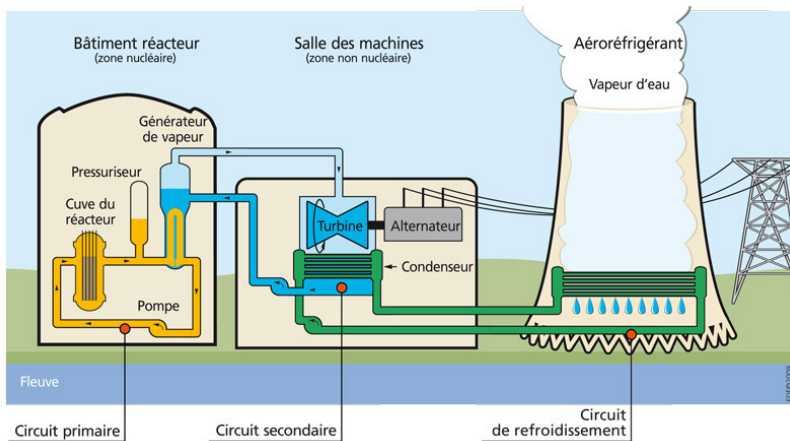
DES/ISAS/DM2S/STMF

05/06/2025

Introduction

- Il s'agit d'un travail sur des modèles innovants de réacteurs (c-à-d de 4ème génération), le département souhaite disposer d'outils de calculs spécifiques, par exemple dans le cadre de couplages forts thermohydraulique-neutronique ;
- C'est un travail sur un code interne CEA, co-développé par l'entreprise Stellaria (essaimée du CEA) qui conçoit un *réacteur à sels fondus* ;
- La conception de réacteurs de 4ème génération se fait dans des entreprises comme Stellaria dans le cadre de France 2030, volet "Mieux produire".

Les réacteurs français actuels - 2ème génération



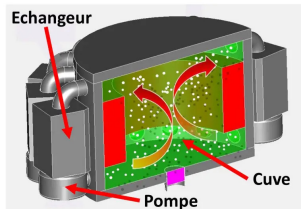
L'EPR - un réacteur industriel de 3ème génération

- EPR de Flammanville, Manche (décembre 2024) : 1er réacteur civil de 3ème génération construit en France ;
- EPR dans le monde : Finlande (2023), Chine (2018 et 2019), Royaume-Uni (en construction) ;
- Ses qualités :
 - Efficience : plus d'électricité avec un combustible de moindre qualité, multi-recyclage du combustible ;
 - Puissance totale : 1650 MWe contre 1500 MWe avant (1 MWe = entre 500 et 1000 foyers) ;
 - Sûreté : construction post-Fukushima ;
- Plus cher : coût initial de 3Mds et coût final de 12Mds ;
- Ne permet de décarbonner “que” l'électricité, et pas d'autres besoins industriels (p.ex. vapeur haute température pour la pétrochimie).



France2030 et les nouveaux concepts de réacteurs nucléaires

- France2030 et nucléaire : volonté de faire émerger de nouveaux concepts en co-finançant des projets externes aux acteurs historiques CEA-EDF-Framatome ;
- 4ème génération :
 - refroidis au métal liquide/au gaz/aux sels fondus ;
 - spectre neutronique + énergétiques ;
 - fabrication en série en usine de “petits” réacteurs ;
 - sûreté post-Fukushima dès la conception ;
- Nouvelles utilisations du nucléaire
 - chaleur industrielle (raffineries de pétrole, sidérurgie) ;
 - électricité moins chère que par les EPR ;
 - combustion du plutonium et de déchets produits par le parc actuel (actinides mineurs) ;



Les réacteurs à sels fondus — RSF

à combustible circulant

Avantages

- sûreté intrinsèque grâce la contre-réaction de dilatation : si on chauffe, le sel se dilate et on est moins dense en matière fissile, donc moins de fissions, moins de puissance déposée dans le sel, et donc on refroidit...
- possibilité d'ajouter du combustible en ligne : peu de réserve de réactivité ;
- basse pression : environ 1 bar contre 155 bars pour les réacteurs du parc actuel ;

Inconvénients

- tenue des matériaux (corrosion en sels fondus, haute température, irradiation, présence de nombreuses espèces en solution) ;
- gestion de la chimie du sel ;

Modélisation des RSF à combustible circulant

Les physiques en jeu

- circulation du sel : équations de Navier-Stokes (turbulentes)
- échauffement et transferts thermiques dans le sel : équation de conservation de l'énergie
- évolution du flux de neutrons : cinétique neutronique (équations sur les flux de neutrons)
- et beaucoup de chimie !

Le code thermohydraulique open source TRUST (<https://cea-trust-platform.github.io/>)

- Navier-Stokes turbulente + équation d'énergie + thermique du solide ;
- permet des calculs hautement parallélisables (2Md de mailles, 50000 processeurs) ;
- compatible avec la construction d'applicatifs pour des couplages natifs (au sein d'un seul exécutable) multiphysiques : neutronique, chimie, magnéto-hydrodynamique, ...

TRUST-NK

Equations du couplage thermohydraulique turbulente-neutronique

$$\frac{1}{\nu^g} \frac{\partial \phi^g}{\partial t} - \nabla \cdot (D^g \nabla \phi^g) = -\Sigma_t^g \phi^g + \chi_f^g (1 - \beta) \sum_{g'} \frac{\nu^{g'}}{k_1} \Sigma_f^{g'} \phi^{g'} + \sum_{g'} \Sigma_s^{g' \rightarrow g} \phi^{g'} + \sum_l \chi_l^g \lambda_l c_l \quad (1)$$

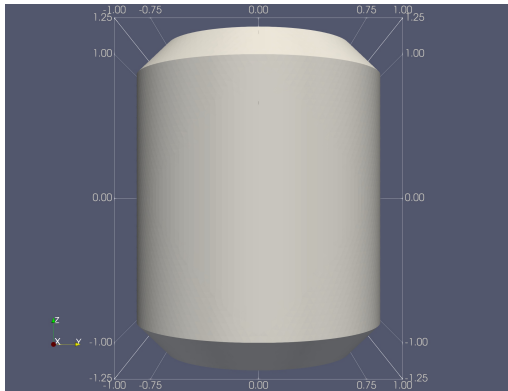
$$\frac{\partial c_l}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} c_l) - \nabla \cdot \left(\frac{\nu}{S_c} \nabla c_l \right) = -\lambda_l c_l + \sum_g \beta_l \frac{\nu^g}{k_1} \Sigma_f^g \phi^g \quad (2)$$

$$\frac{\partial d_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} d_m) - \nabla \cdot \left(\frac{\nu}{S_c} \nabla d_m \right) = -\lambda_m^h d_m + \sum_g \beta_m^h \kappa^g \phi^g \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = \sum_g \kappa^g \phi^g + \sum_m \lambda_m^h d_m \quad (4)$$

$$\text{et Navier-Stokes Turbulent} \quad (5)$$

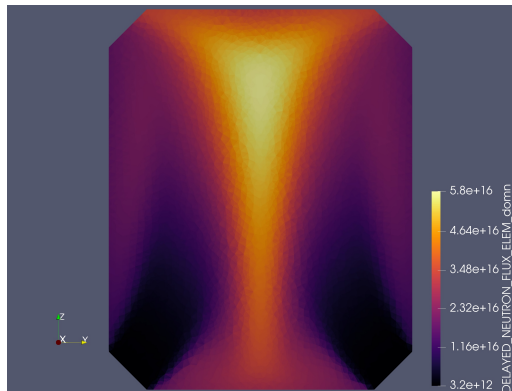
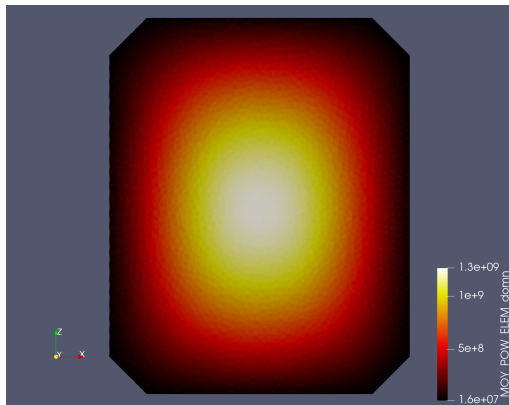
NB : la température intervient également dans les valeurs des sections efficaces (coefficients Σ_y^x)



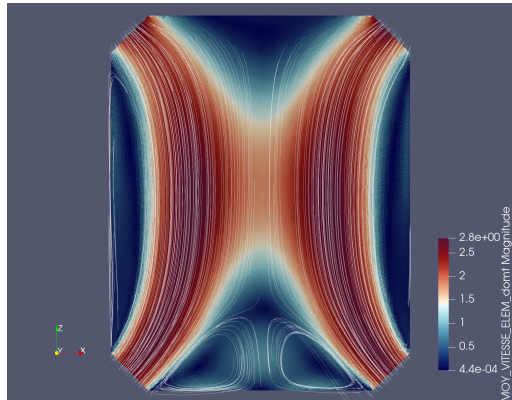
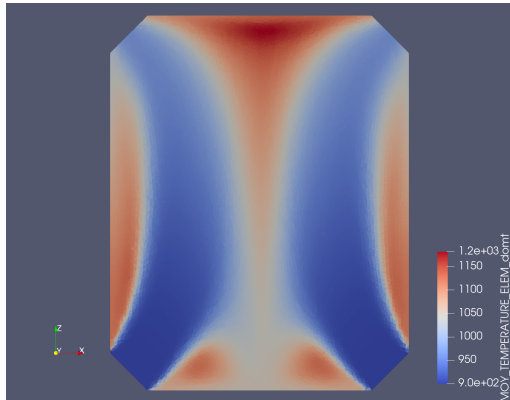
Fluctuations de puissance

- Calculs sont issus du travail d'*Ayoub Ouazzani* : thèse en cours au CEA sur les fluctuations de puissance en cœur de réacteur à sels fondus ;
- Spécification :
 - Puissance nominale : 1GWth ;
 - Viscosité : $4e-5\text{m}^2/\text{s}$;
 - Reynolds : $70e3$;
 - Hauteur $\times$ diamètre : $2.5\text{m} \times 2.0\text{m}$.
- Géométrie et dynamique “représentatives” du point de vue de la turbulence ;

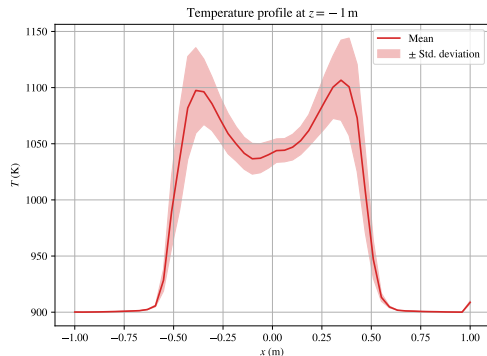
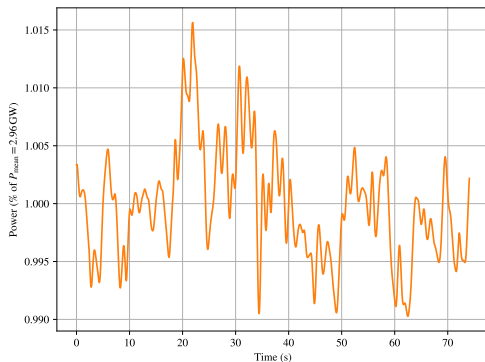
Résultats calcul turbulent RANS - neutronique



Résultats calcul turbulent RANS - thermohydraulique



Fluctuations de puissance en LES



Conclusions

- TRUST-NK = code de neutronique basé sur la plateforme thermohydraulique TRUST ;
- Permet de faire des simulations multiphysiques thermohydraulique turbulente-neutronique sur des cœurs complets de réacteurs à sels fondus ;
- Code “jeune” : il faut encore fournir un travail pour le faire qualifier et pouvoir faire des dossiers de sûreté avec ce code ;
- Pour avoir plus de détails sur le calcul présenté : *Coupled neutronics and thermal-hydraulics using TRUST-NK for high performance computing in molten salt reactor simulation* par A. Ouazzani, Y. Gorse et A. Gerschenfeld.

Merci pour votre attention !