

framatome



Des outils de calculs vers la simulation pour la sûreté et la conception

Etudes du concept de Réacteur à Sels Fondus (MSR)

Thomas Sornay

Encadrants : Thomas Boisseau (Framatome), Axel Laureau (CNRS-LPSC), Elsa Merle (CNRS-LPSC), Arthur Lemarchand (Framatome)

Séminaire des doctorants de 2^e Années, LPSC Grenoble, 23 mars 2023

Table des matières

- 01 . Introduction et mise en contexte
- 02 . Enjeux et problématiques de la thèse
- 03 . Code couplé TFM-STAR
- 04 . Résultats des simulations
- 05 . Conclusions et perspectives

1. Introduction et mise en contexte

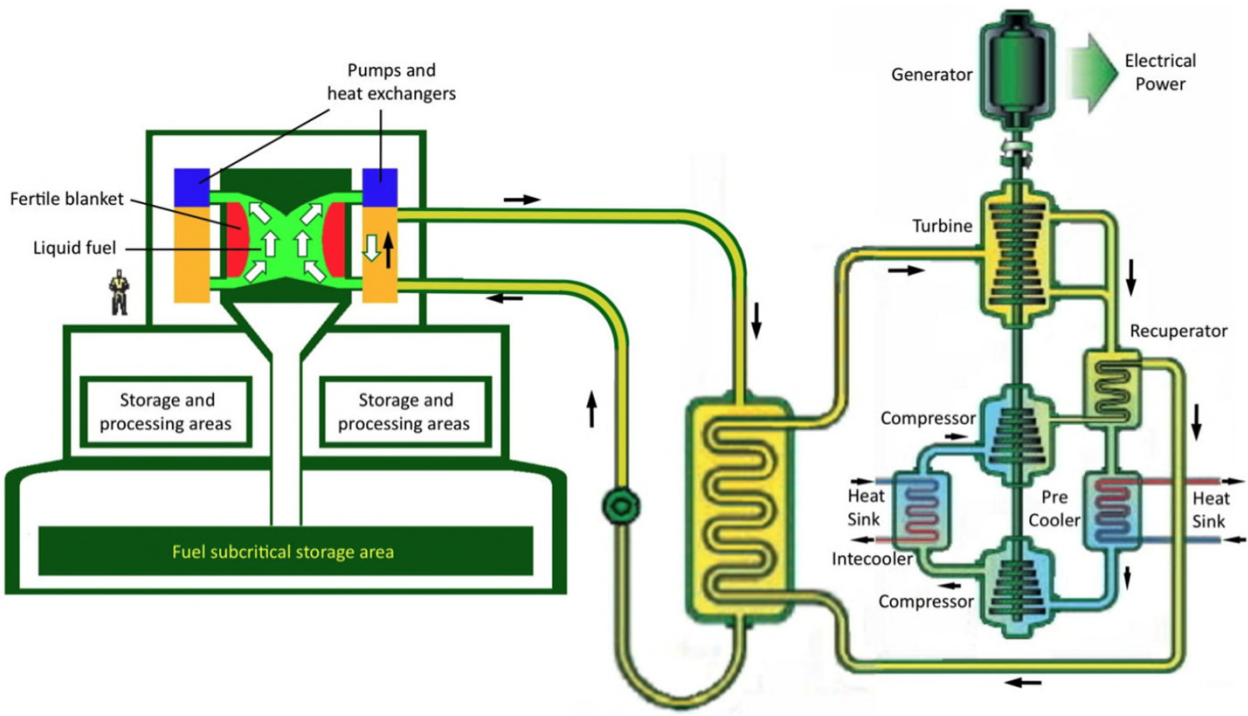


Illustration du système MSFR [1]

Contexte historique

Quel nucléaire pour les prochaines années ?

Objectifs de la GEN IV :

- Amélioration de la sûreté
- Diminution des coûts
- Meilleure utilisation des ressources naturelles via une régénération de la matière fissile.
- Résistance à la prolifération

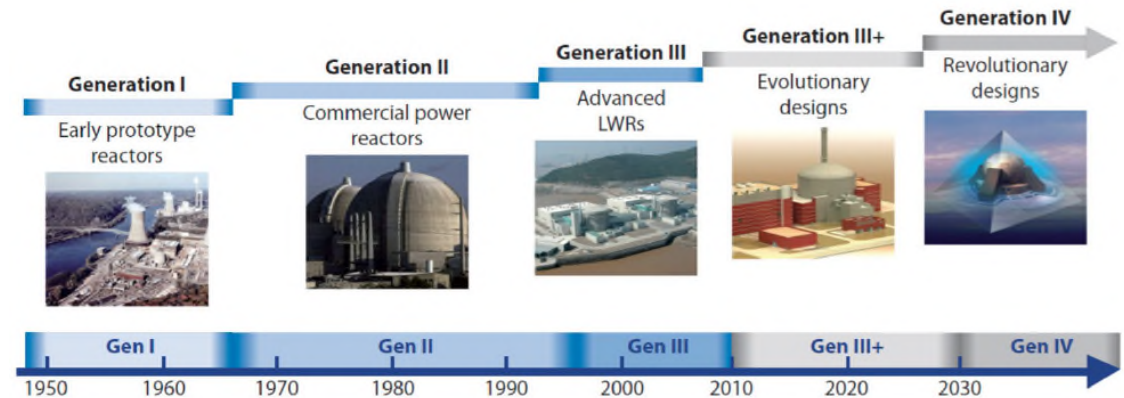
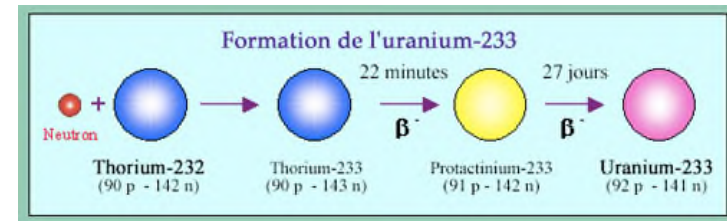


Illustration du développement des différentes générations de réacteurs d'après le Forum International GEN IV – GIF [2]



Cycle de formation de ^{233}U par capture neutronique du ^{232}Th [3]

Contexte Français

- Changement de paradigme pour le nucléaire en France : prise de conscience des enjeux énergétiques et du rôle potentiel du nucléaire
 - Forte dynamique des programmes nucléaires avec de nouveaux acteurs
- Programmes Français pour le nouveau nucléaire :
- Nuward (Small Modular Reactor)
 - EPR 2 (Réacteur à Eau Pressurisée)
- Programmes sur les sels fondus:
- ISAC (Collaboration entre les 5 acteurs historiques Français)
 - SAMOSAFER (Europe)

framatome

LPSC
Grenoble



Acteurs historiques



Programme Français



Start-up



<https://media.tenor.com/yMtzlUk9ab4AAAAC/orson-welles-welles.gif>

Etude du concept de Réacteur à Sels Fondus – Thomas Sornay – 23/03/2023

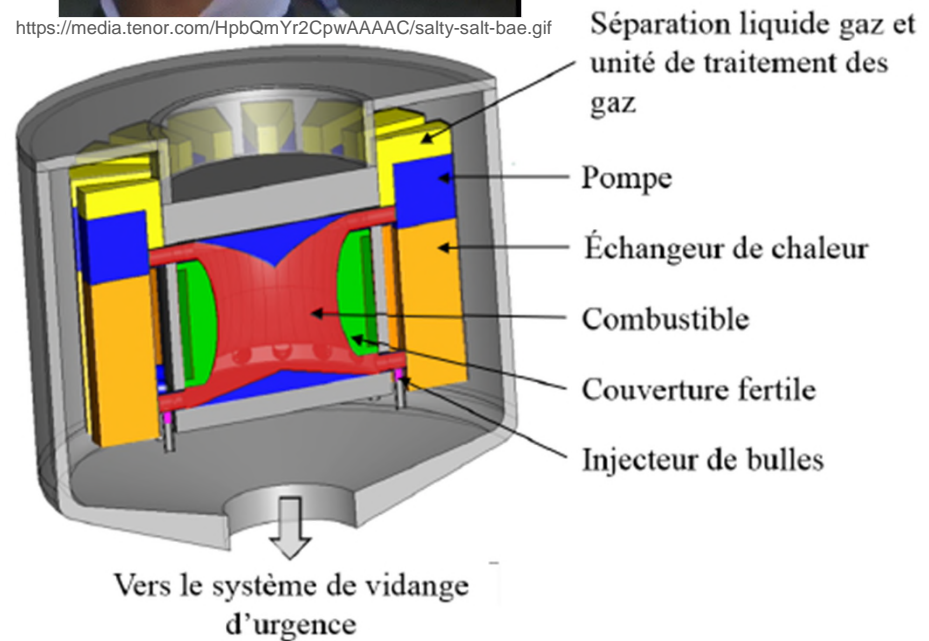
Quid du MSFR ?

En quelques mots :

- Un des concepts sélectionnés par le forum international génération IV.
- MSFR : Molten Salt Fast Reactor, Réacteur à neutrons rapides à sels fondus
- Combustible dissout dans le caloporteur
- Bonne sûreté intrinsèque
- Spectre rapide
- Incinération des actinides mineurs
- Régénération du combustible



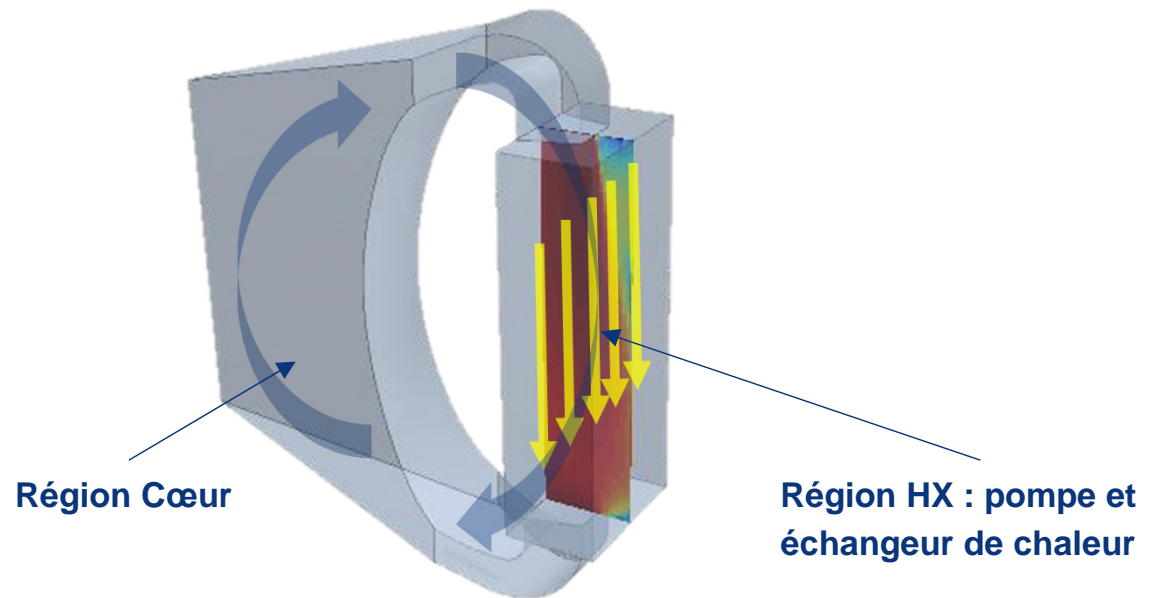
<https://media.tenor.com/HpbQmYr2CpwAAAAC/salty-salt-bae.gif>



Vue schématique du circuit combustible du MSFR [1]

Etude du concept de Réacteur à Sels Fondus – Thomas Sornay – 23/03/2023

2. Enjeux et problématiques de la thèse



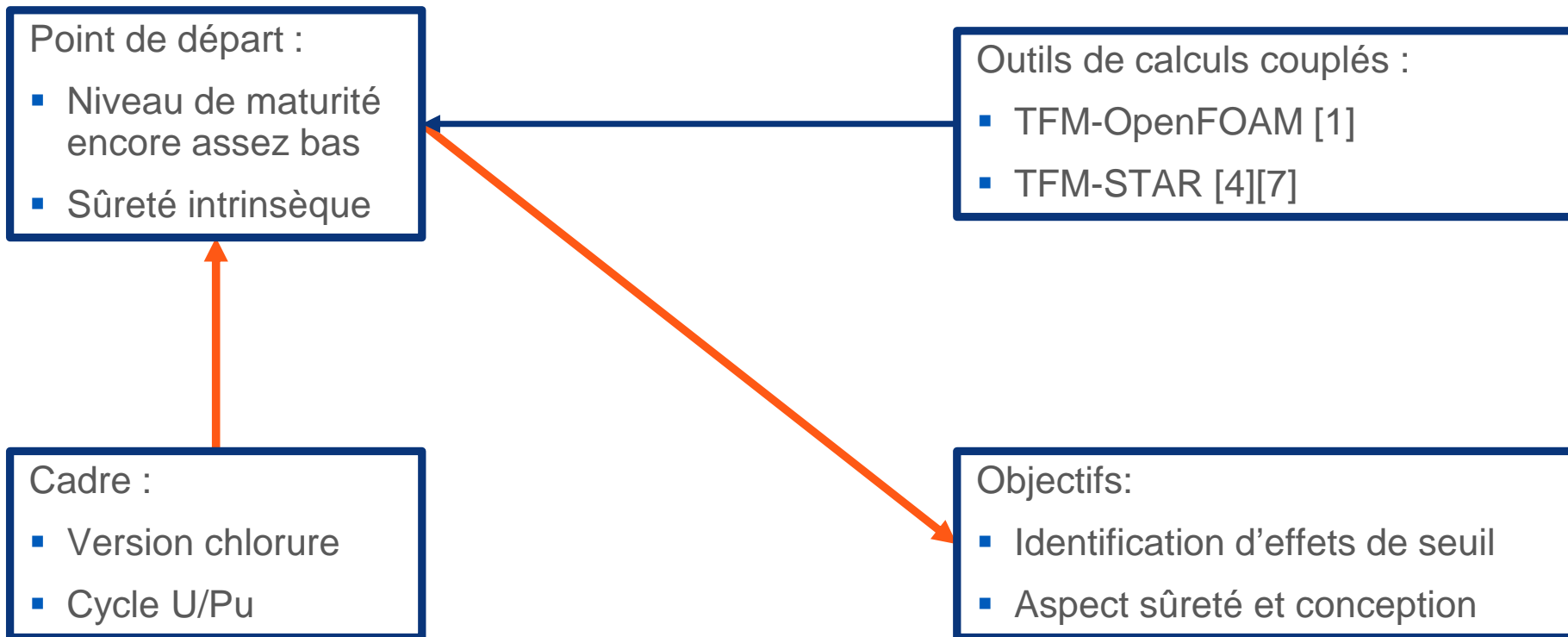
Vue schématique de la circulation du sel [4]

2. I. Et moi dans tout ça ?



<https://tenor.com/fr/view/pulp-fiction-john-travolta-lost-where-wtf-gif-10251428>

Une thèse sur un MSR de petite taille type AMR



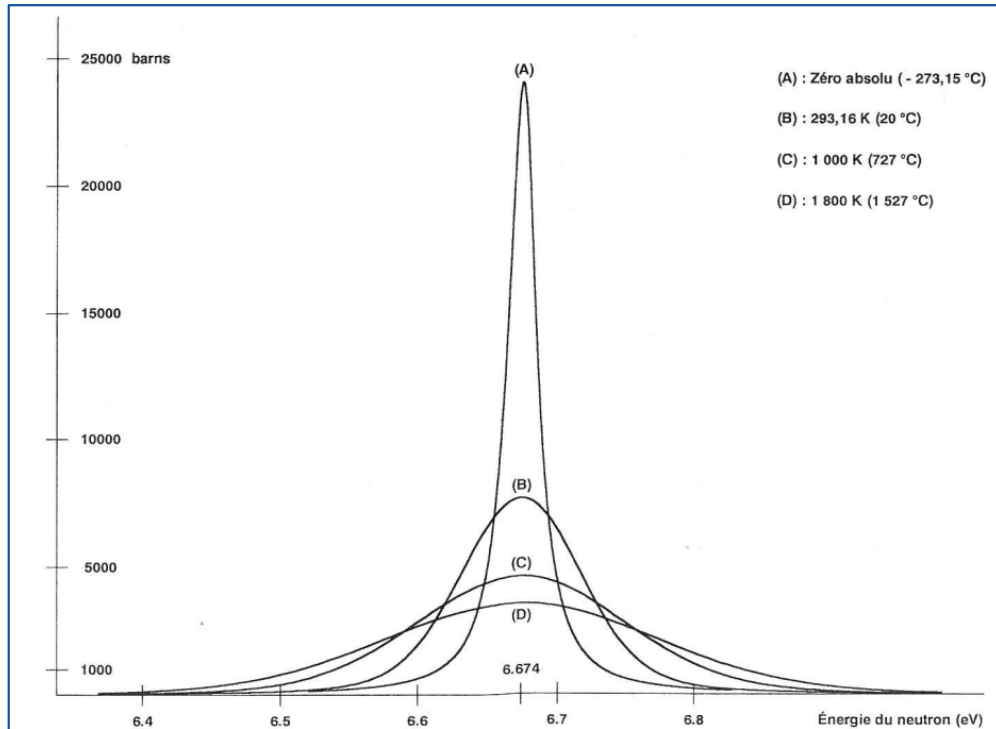
2. II. Un peu de physique



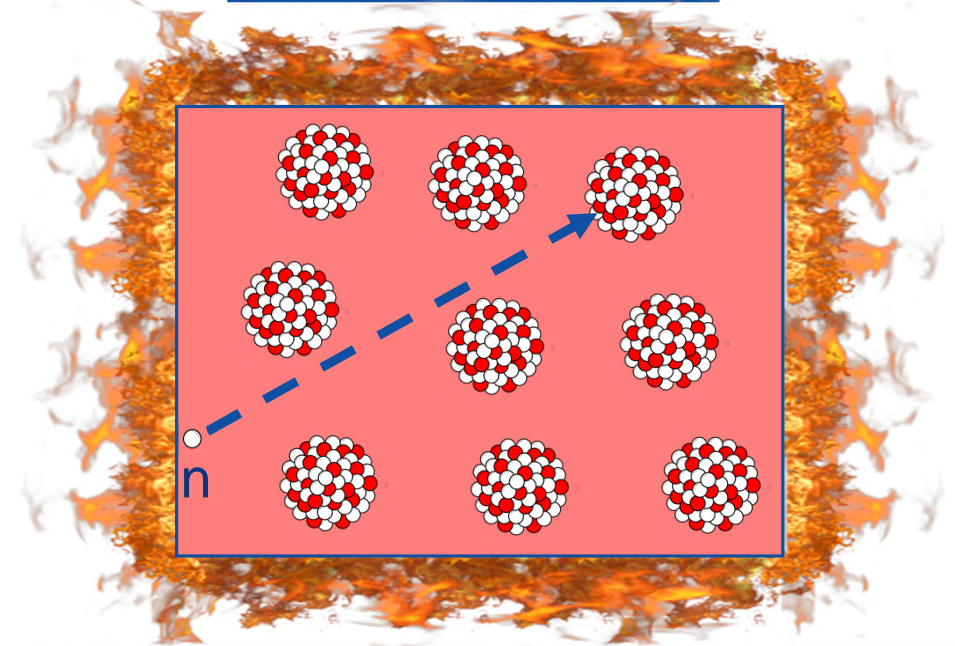
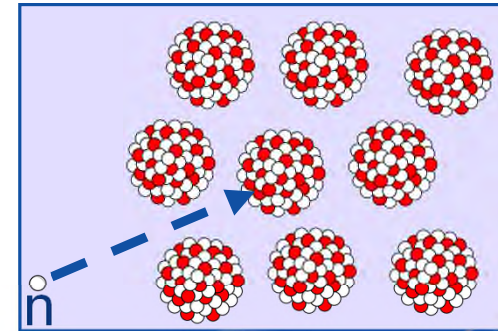
<https://laughingsquid.com/cat-does-crunches-at-gym/>

Contre-réactions

- Effet Doppler : dilatation des sections efficaces lors de l'augmentation de la température



Elargissement par effet Doppler de la grande résonance de l'uranium 238 [6]



- Effet densité : dilatation du caloporteur lors de l'augmentation de la température

Précurseurs de neutrons retardés

- Dans la réaction en chaîne, il faut prendre en compte les neutrons retardés émis quelques microsecondes après la fission (et jusqu'à quelques secondes)
- Sans neutrons retardés, on parle de régime critique prompt avec une cinétique très rapide lié au taux de fissions et avec des variations exponentielles
- Dans un réacteur à sels fondus, le combustible dissout dans le caloporteur se déplace donc il faut prendre en compte le lieu d'émission de ces neutrons retardés
- Pour la simulation, on va donc devoir tenir compte de ce couplage supplémentaire, avec le transport des précurseurs de neutrons retardés, en plus du couplage thermique.

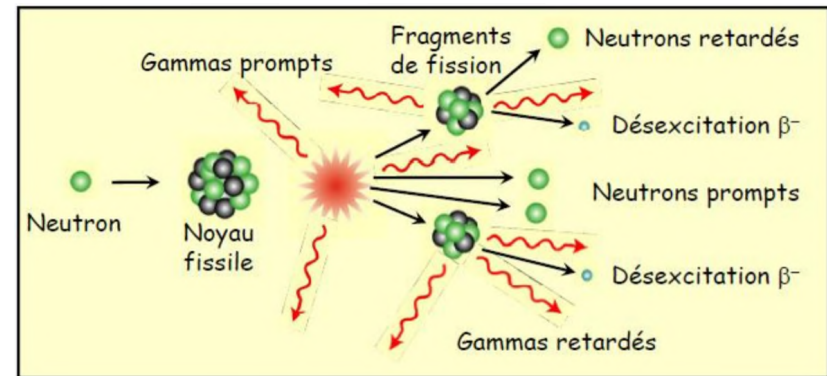
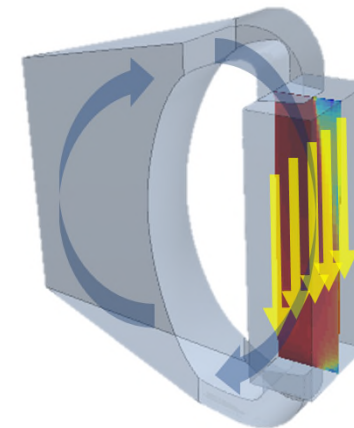
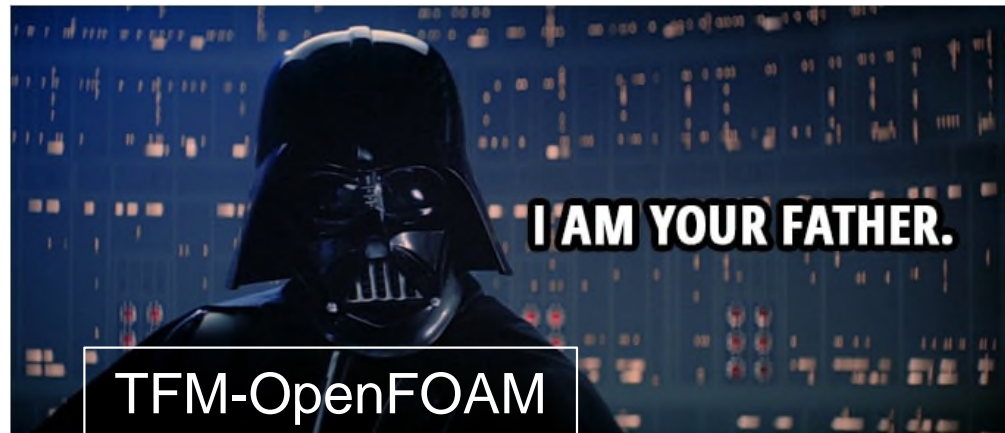


Schéma de principe d'une fission [5]



Vue schématique du déplacement du sel [4]

3. Le code TFM-STAR



<https://scatteredquotes.com/wp-content/uploads/2020/02/Star-Wars-Episode-V-The-Empire-Strikes-Back-4.jpg>

Les modèles

TFM-STAR : Adaptation du code TFM-OpenFOAM

→ Intérêt : Ergonomie et outils apportés par le logiciel Star-CCM+ utilisé par Framatome

Problématique du couplage : calcul 3D, objectif de réduction du temps de calcul

Simulation de la neutronique (transport des neutrons – équation de Boltzmann) :

- Approche **TFM** (Transient Matrix Fission) : pré-calcul Monte-Carlo pour générer des matrices de fission (fonction de Green) qui représentent la propagation des neutrons en espace et en temps, ces matrices sont ensuite utilisées dans un calcul cinétique

Simulation de la thermohydraulique (transport du fluide – équation Navier-Stokes) :

- Code de CFD (Computational Fluid Dynamic) **Star-CCM+** avec des modèles associés (modèles de turbulence, loi de paroi)

Le couplage

- Schéma de couplage [1] :

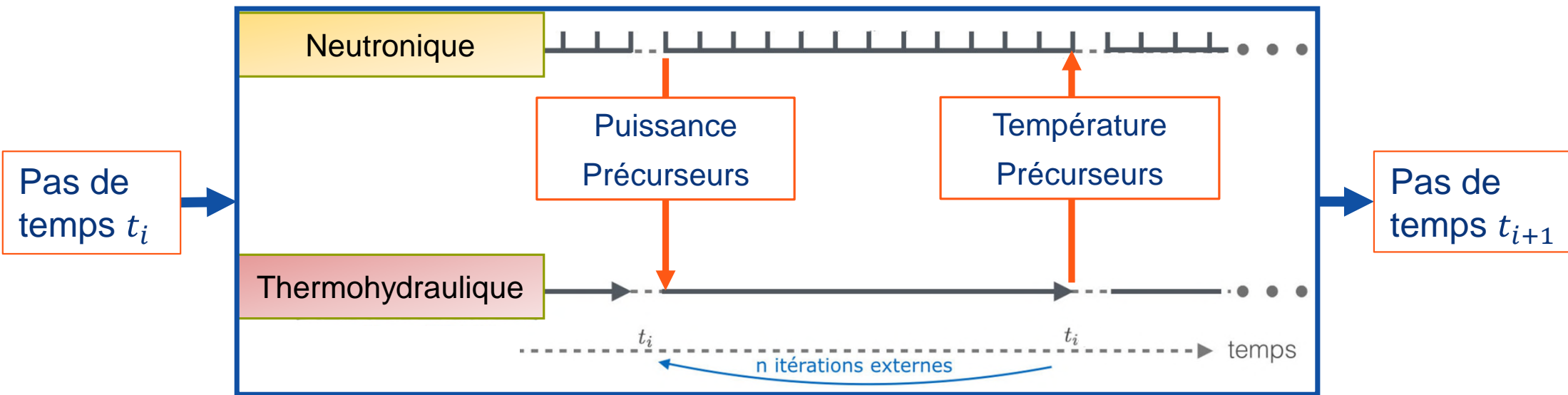
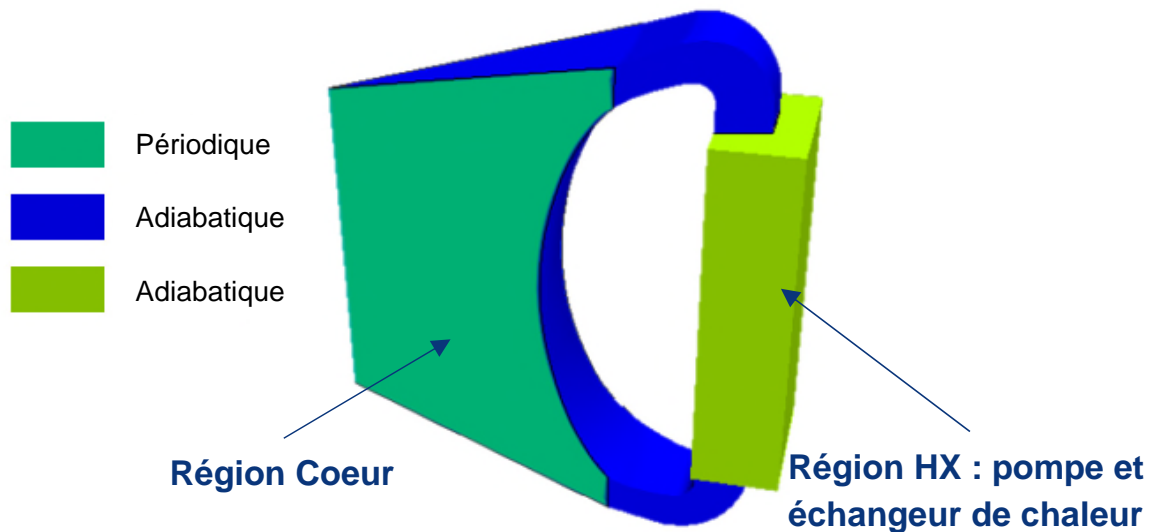


Schéma de couplage entre le code neutronique et le code de CFD [1]

Modélisation du réacteur pour la simulation



Vue schématique d'une tranche du MSFR pour la simulation [4]

- On simule une tranche du réacteur complet grâce à la périodicité du MSFR
- La région HX (Heat Exchanger) modélise 3 effets :
 - Un milieu poreux et des pertes de charge associées
 - Un puits de chaleur et des coefficients d'échange
 - La pompe par une source de quantité de mouvement

4. Résultats d'intérêt



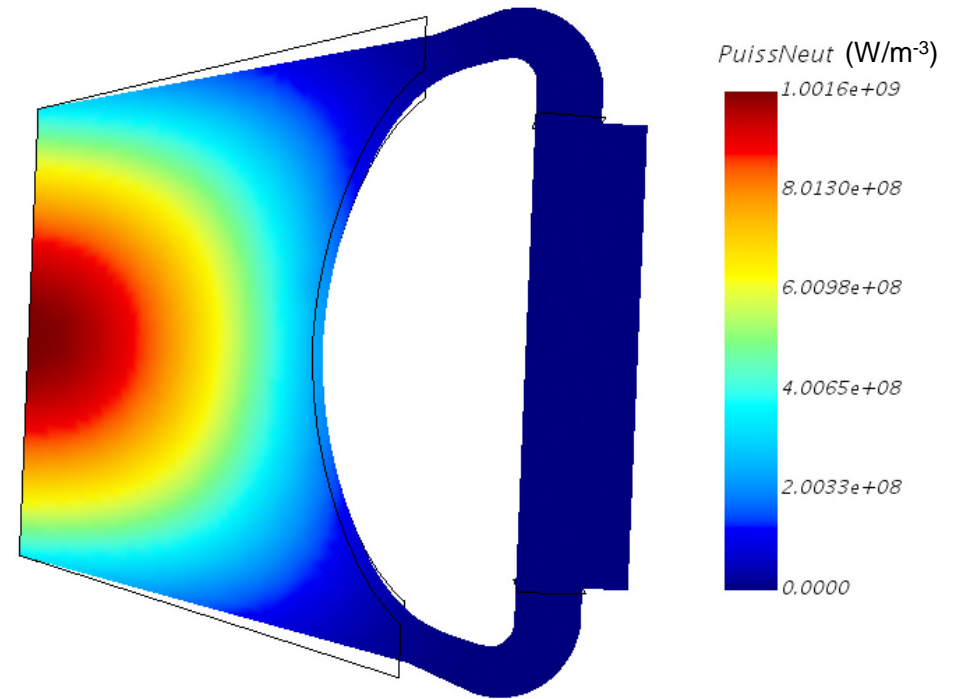
<https://tenor.com/search/interesting-gifs>

4. I. Régime nominal

Régime nominal

Puissance totale : 3 GW_{th}

- Pour la mise à l'équilibre, on simule un transitoire stabilisé en fixant la température moyenne et la puissance, le réacteur est critique.
- A l'équilibre la fraction effective de neutrons retardés vaut $\beta_{\text{eff}} = 1 - k_p = 113 \text{ pcm}$

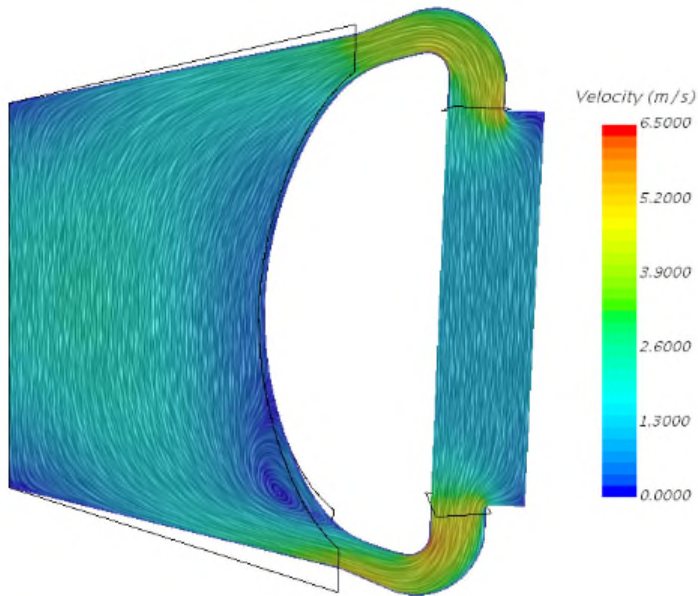


Champ de puissance à l'équilibre [7]

Régime nominal

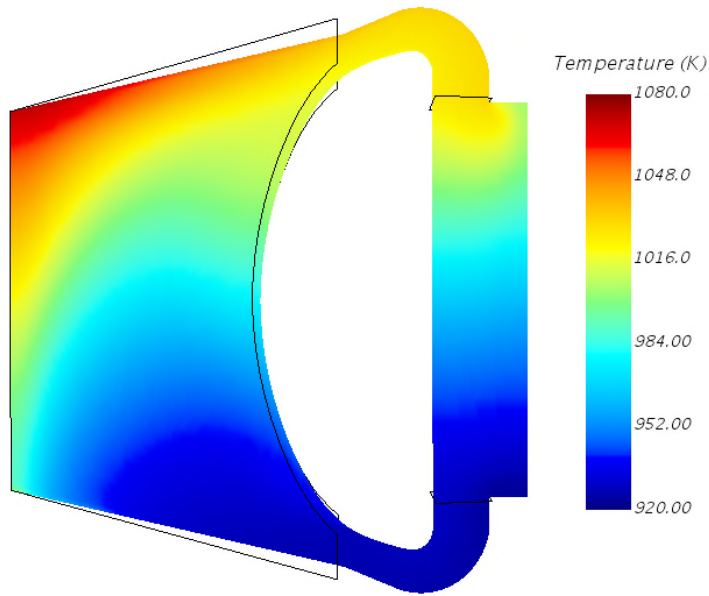
- Champs de vitesse, de température et de distribution des précurseurs

Débit : 1170 kg.s⁻¹



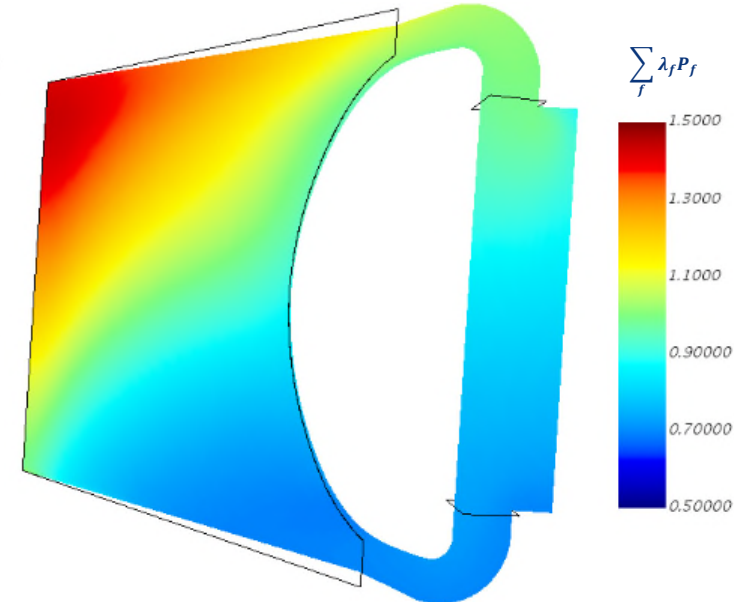
Lignes et champ de vitesse à l'équilibre [7]

Température moyenne : 973 K



Champ de température à l'équilibre [7]

Précurseurs



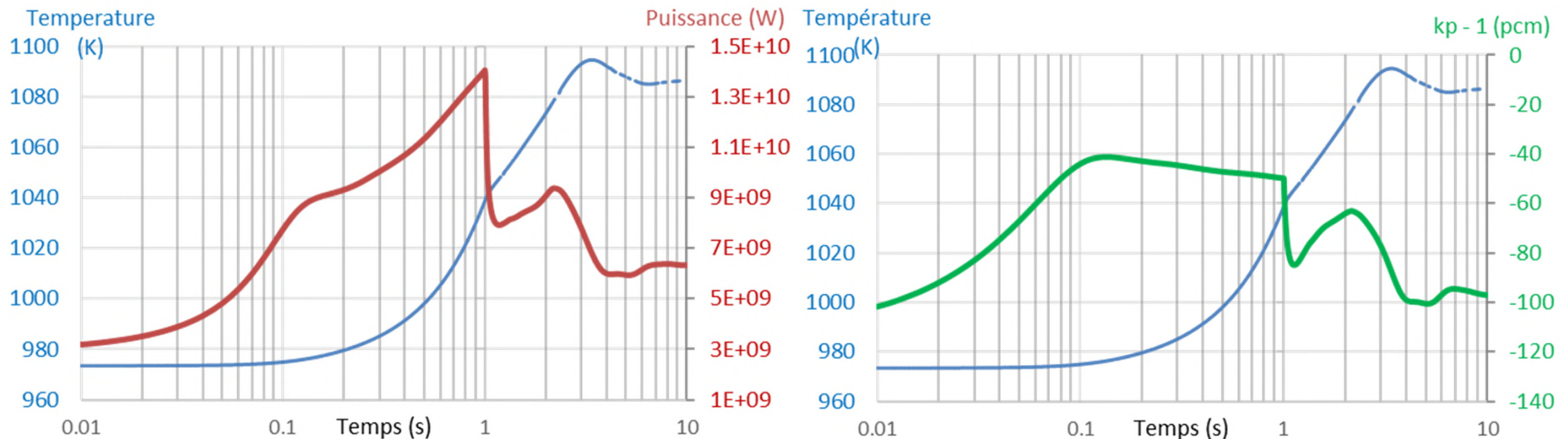
Champ de décroissance des précurseurs à l'équilibre [7]

4. II. Insertion de réactivité

Insertion de réactivité : 1000pcm en 1s

Transitoire : insertion de réactivité, 1000 pcm en 1s

- Exemple de scénario étudié : une insertion de réactivité

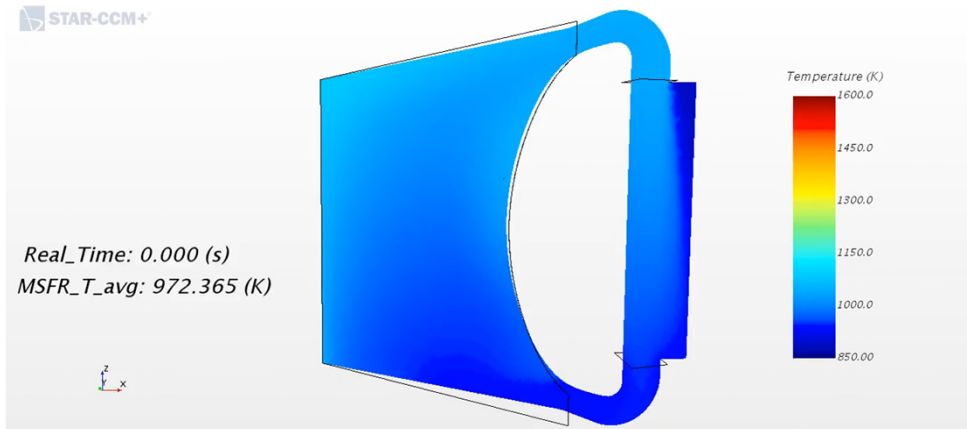


Evolution de la puissance, de la température moyenne et de la marge à la criticité prompte lors de l'insertion de 1000 pcm de réactivité en 1s [7]

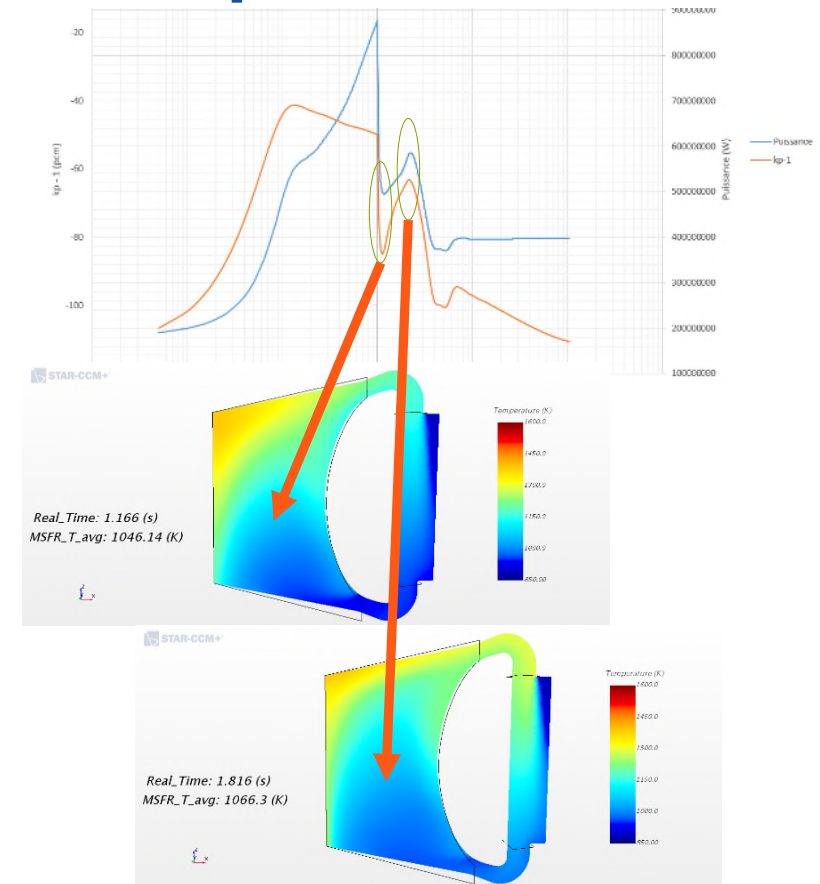
- Au début du transitoire, l'insertion de réactivité augmente rapidement la puissance
- Les effets de température sont négligeables jusqu'à 0,1s
- Les contre-réactions associées deviennent ensuite importantes ce qui ralentit l'augmentation de puissance

Transitoire : insertion de réactivité, 1000 pcm en 1s

- Le rebond de puissance vient de l'apport de sel froid dans le cœur alors qu'il n'y a plus d'insertion de réactivité
- Le sel froid remplaçant du sel chaud sous flux, la réactivité remonte par contre-réaction

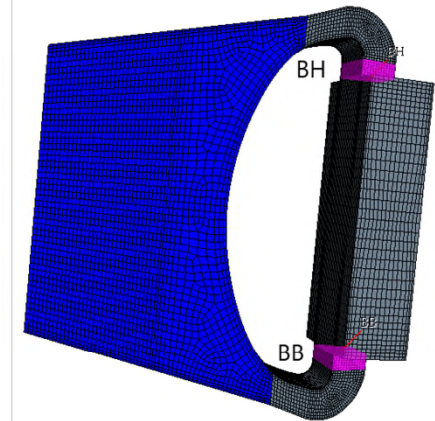
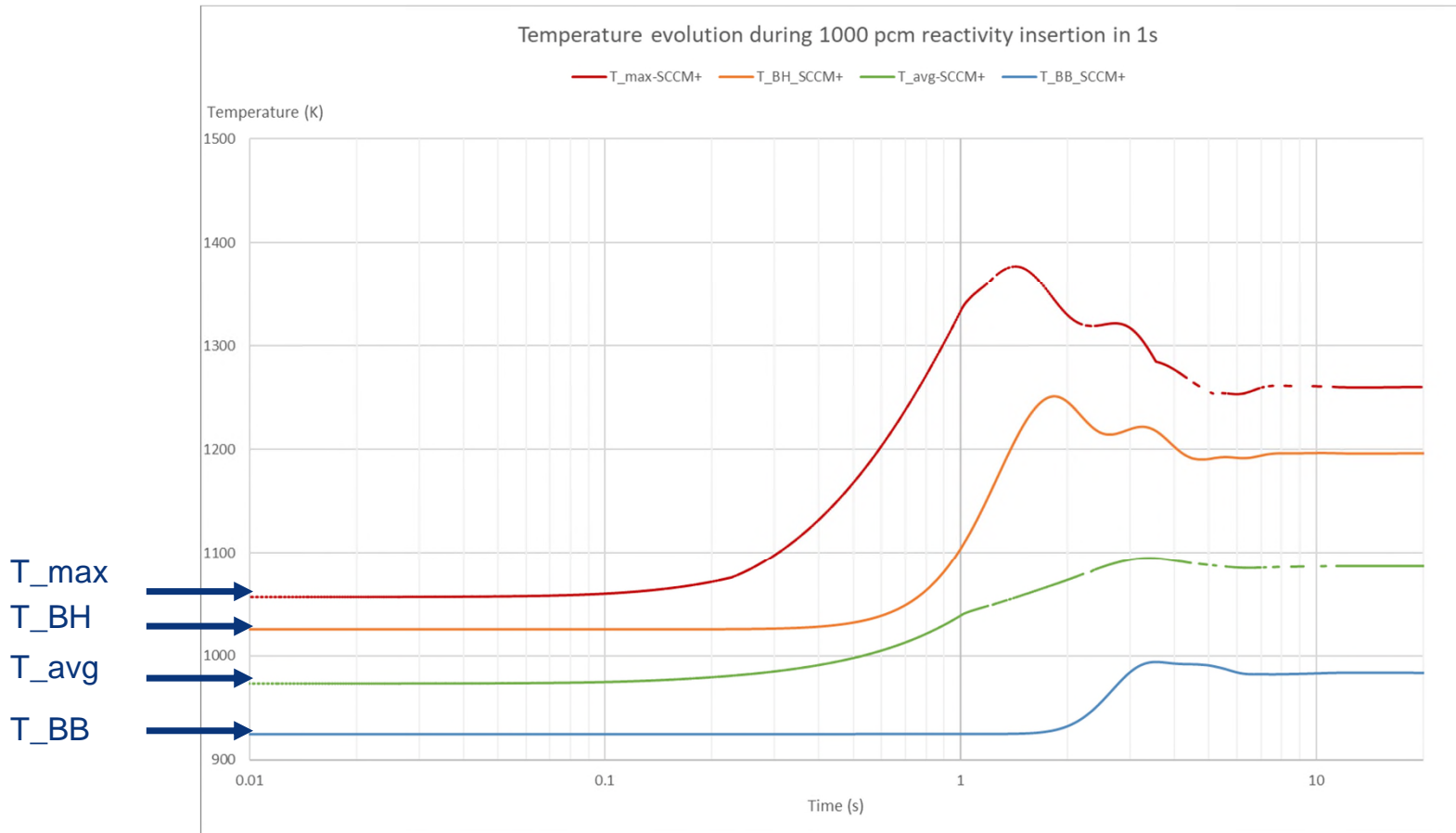


Evolution de la température lors de l'insertion de 1000 pcm de réactivité en 1s



Champs de température à deux instants (1.166s et 1.816s) pendant l'insertion de 1000 pcm de réactivité en 1s

Transitoire : insertion de réactivité, 1000 pcm en 1s

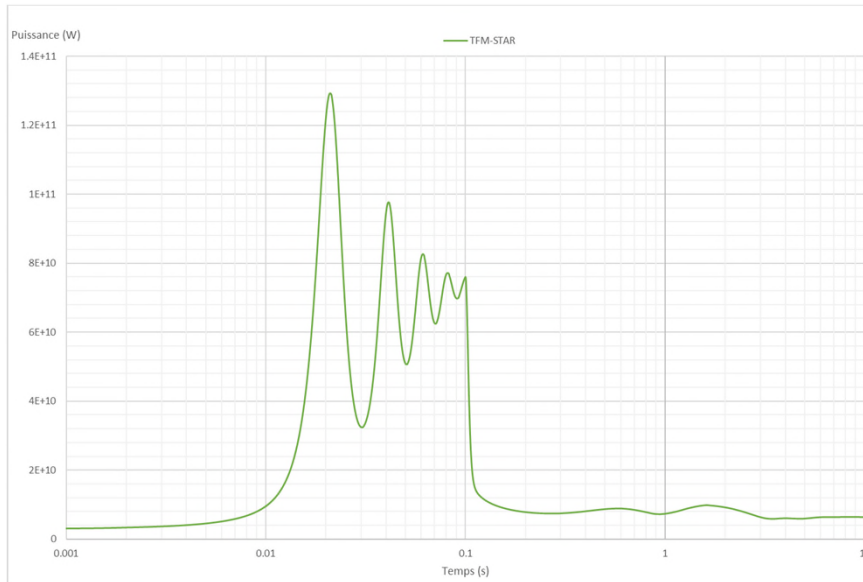


Evolution des températures lors de l'insertion de 1000 pcm de réactivité en 1s [7]

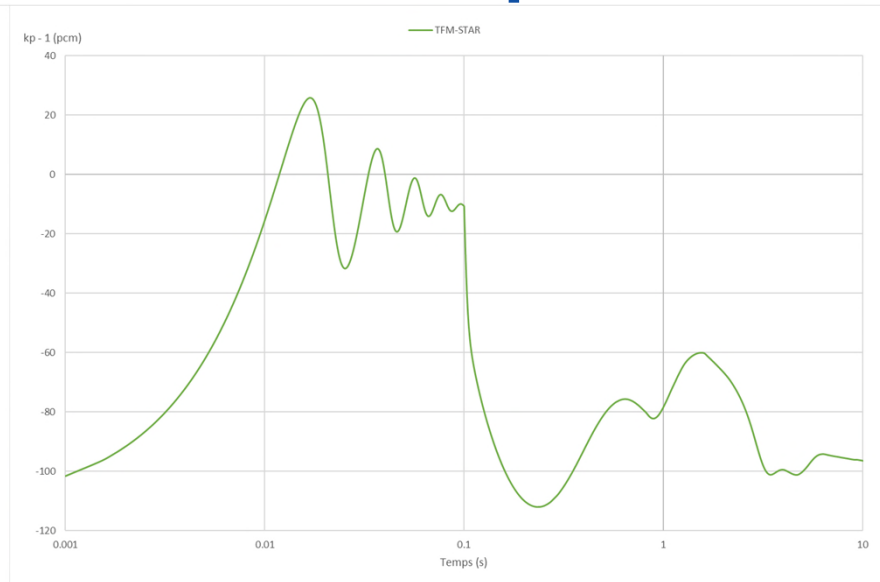
4. III. Insertion de réactivité

Transitoire : insertion de réactivité, 1000 pcm in 0,1s

Transitoire : insertion de réactivité, 1000 pcm en 0,1s



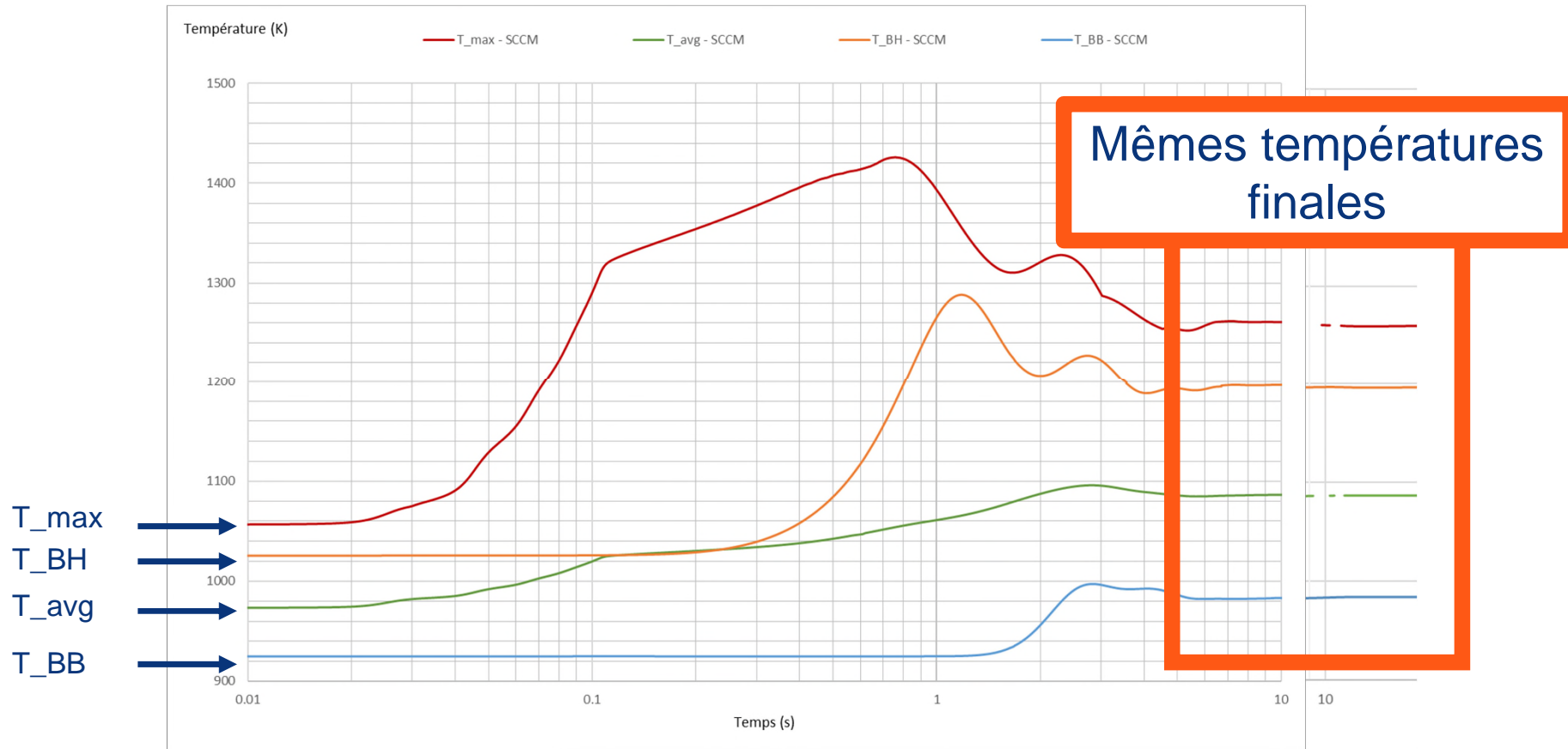
Evolution de la puissance lors de l'insertion de 1000 pcm de réactivité en 0.1s [7]



Evolution de la marge à la criticité lors de l'insertion de 1000 pcm de réactivité en 0.1s [7]

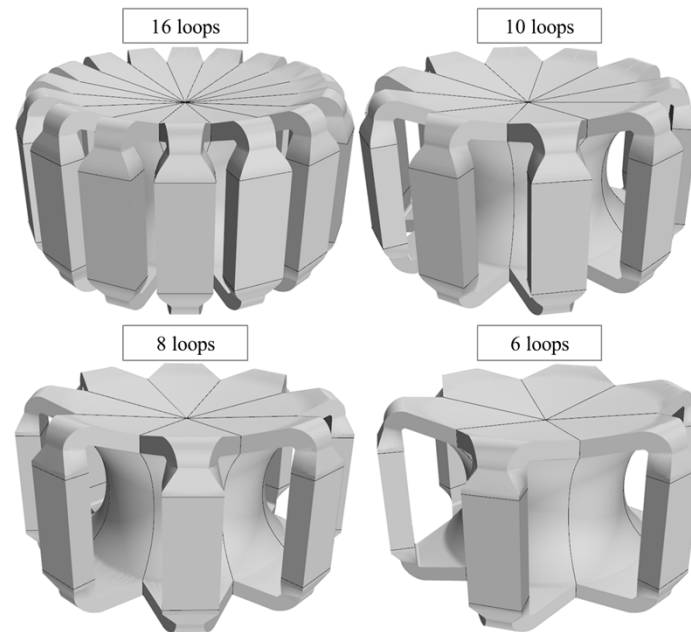
- Le système passe critique prompt et cela augmente fortement la puissance et donc la température
- Les contre-réactions deviennent importantes ce qui réduit la puissance et donc l'augmentation de température
- Le système redevient sous critique prompt jusqu'à ce que l'insertion de réactivité redevienne prépondérante

Comparaison température : 1s vs 0,1s



Evolution des températures lors de l'insertion de 1000 pcm de réactivité en 0,1s (devant) et 1s (derrière) [7]

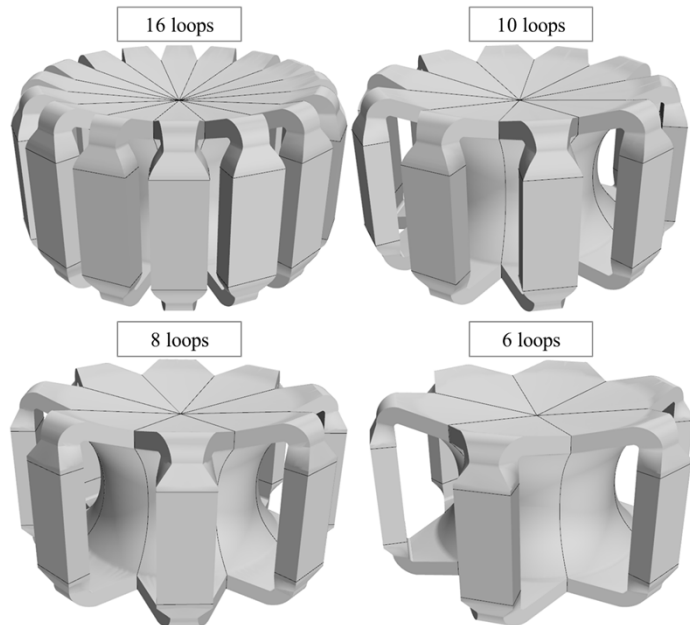
4. IV. Calculs sur d'autres géométries



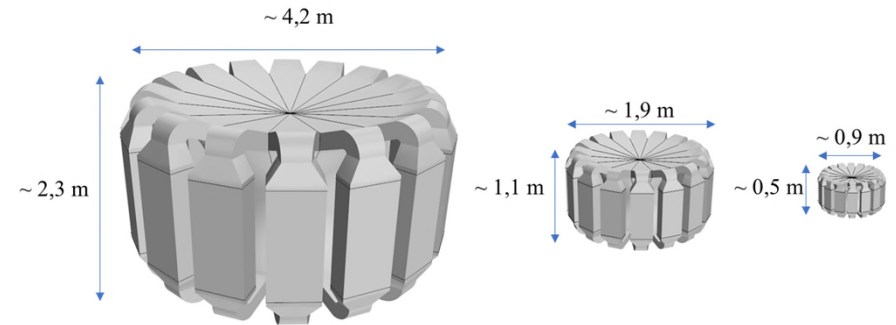
Version alternative avec 16, 10, 8 et 6 boucles

Calculs sur d'autres géométries

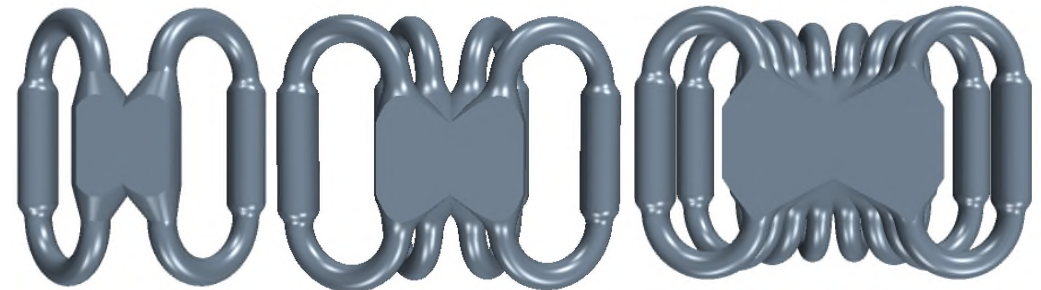
- Calculs sur d'autres géométries :
 - Influence du nombre de boucles
 - Influence de la taille du réacteur
 - Autres formes



Version alternative avec 16, 10, 8 et 6 boucles



Version alternative avec un volume total de 18 m³, 1.8 m³ and 0.18 m³

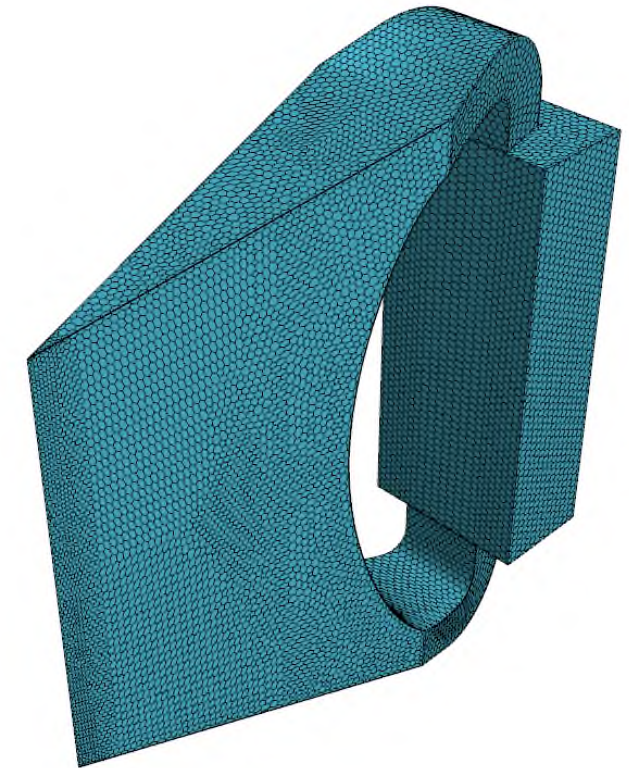


➤ Problématique d'optimisation du design pour un calcul thermohydraulique

Géométrie type EVOL modifiée

Géométrie du Benchmark EVOL
(Evaluation and Viability of
Liquid Fuel Fast Reactor
System) :
Optimisation d'un design
"pré-conceptuel" du MSFR en
2013

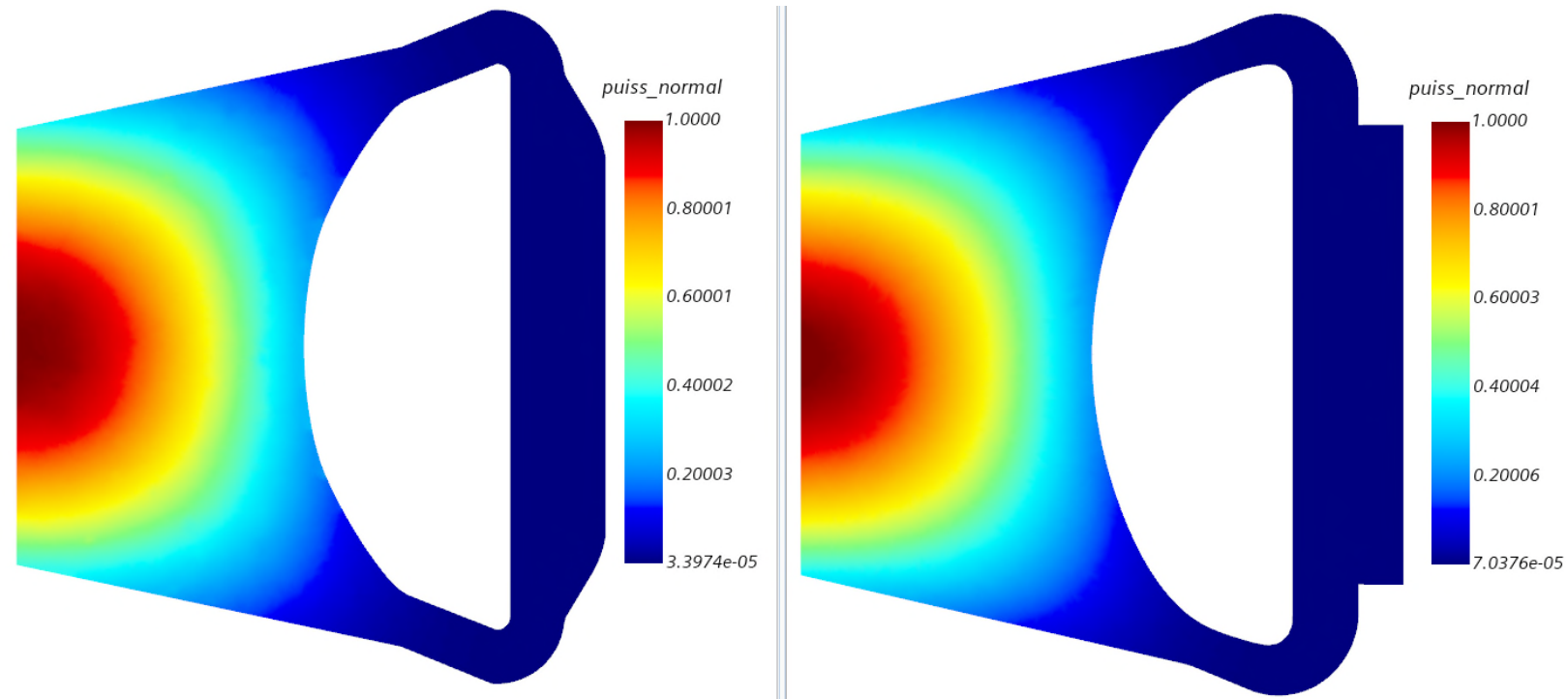
Géométrie modifiée EVOL :
Paramétrisation de la CAO pour
des études de sensibilité



Géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie initiale EVOL (à droite)

Champ de puissance à l'équilibre

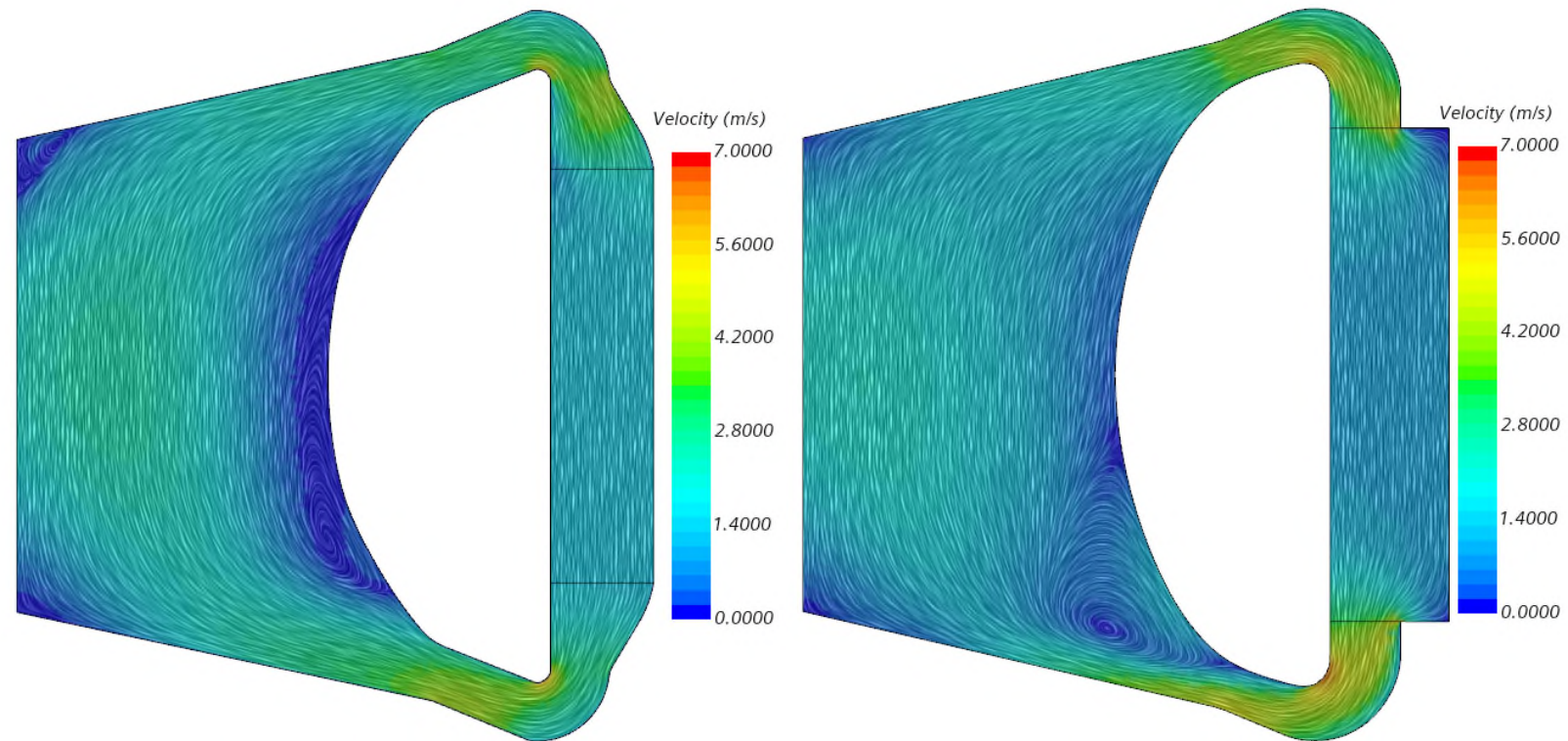
La distribution de puissance est similaire



Champ de puissance à l'équilibre sur la géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie d'origine EVOL (à droite)

Champ de vitesse à l'équilibre

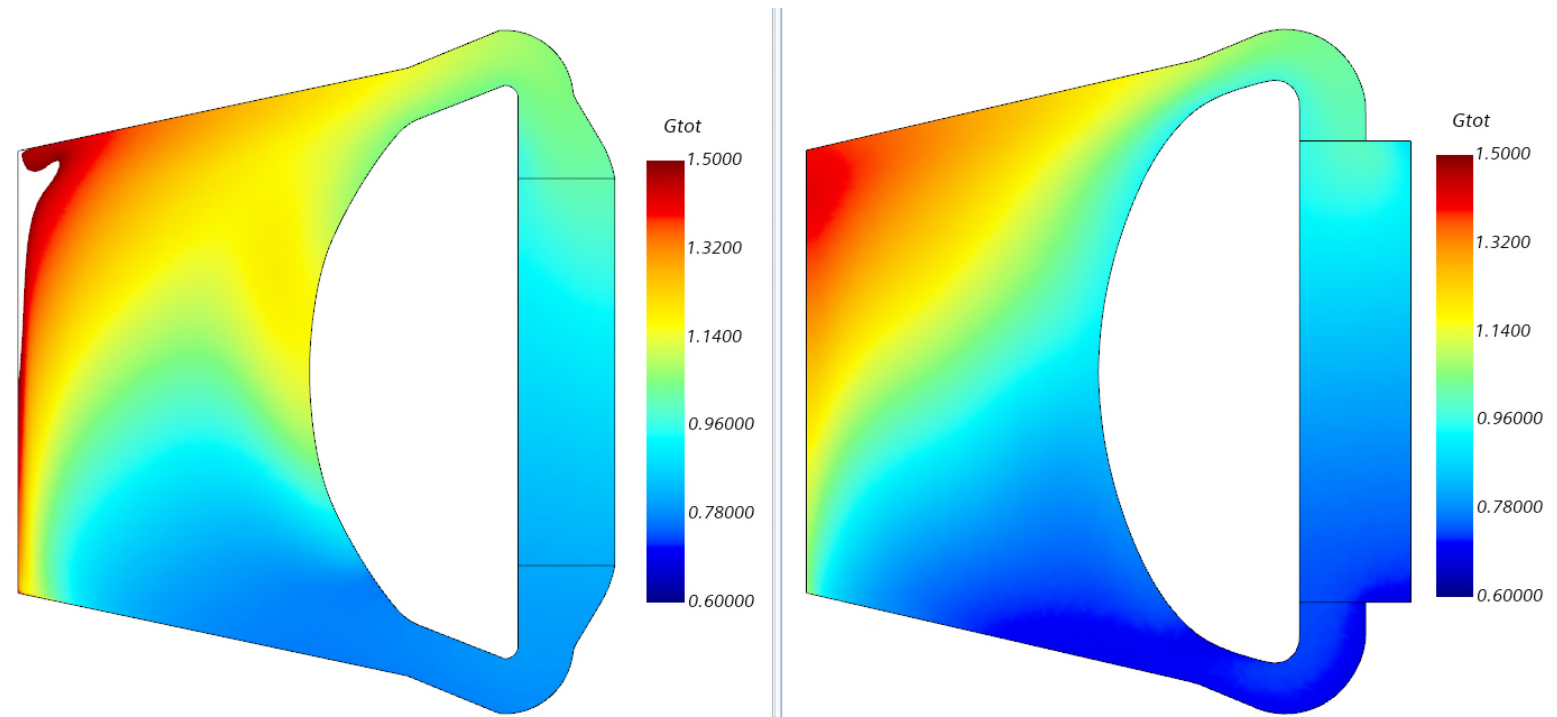
L'écoulement en sortie d'échangeur modifie la forme et la taille de la zone de recirculation en cœur.



Lignes et champ de vitesse à l'équilibre sur la géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie d'origine EVOL (à droite)

Champ des décroissance des précurseurs à l'équilibre

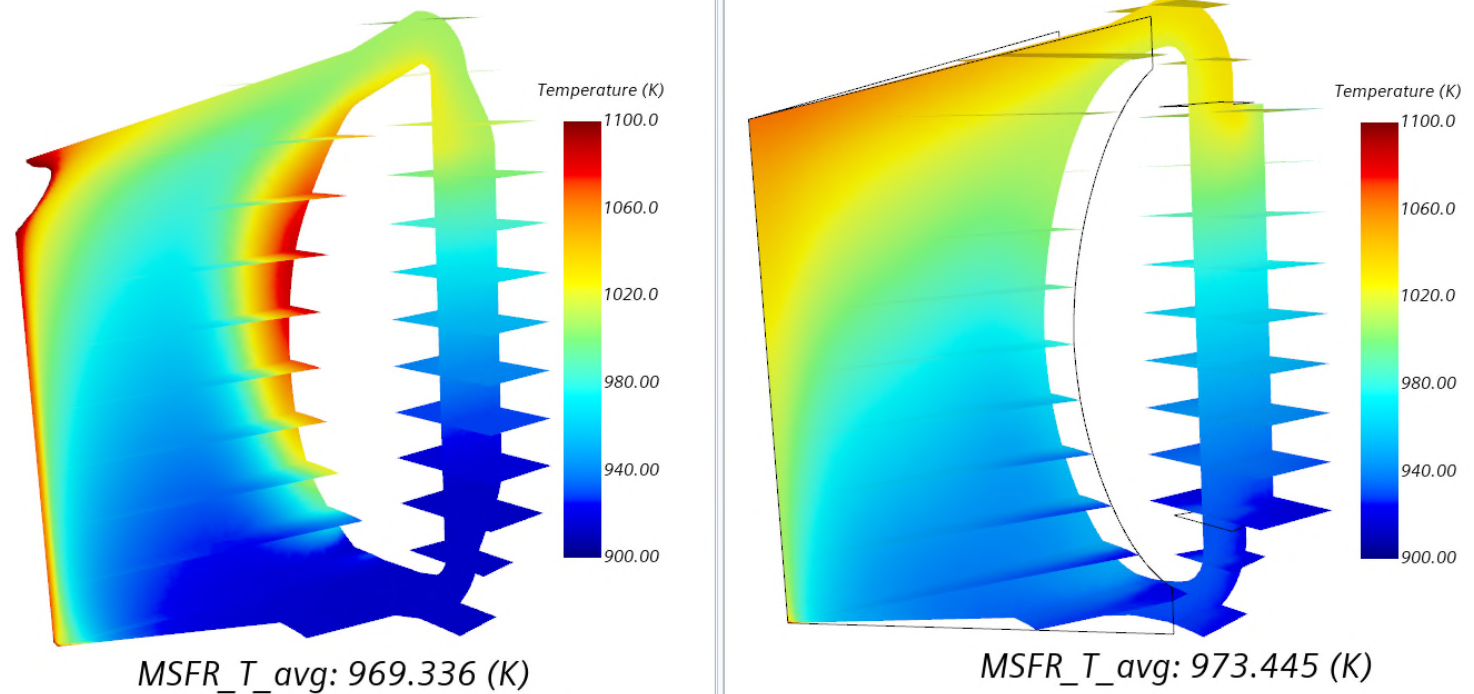
La distribution de vitesse modifie le transport des précurseurs



Champ de décroissances des précurseurs à l'équilibre sur la géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie d'origine EVOL (à droite)

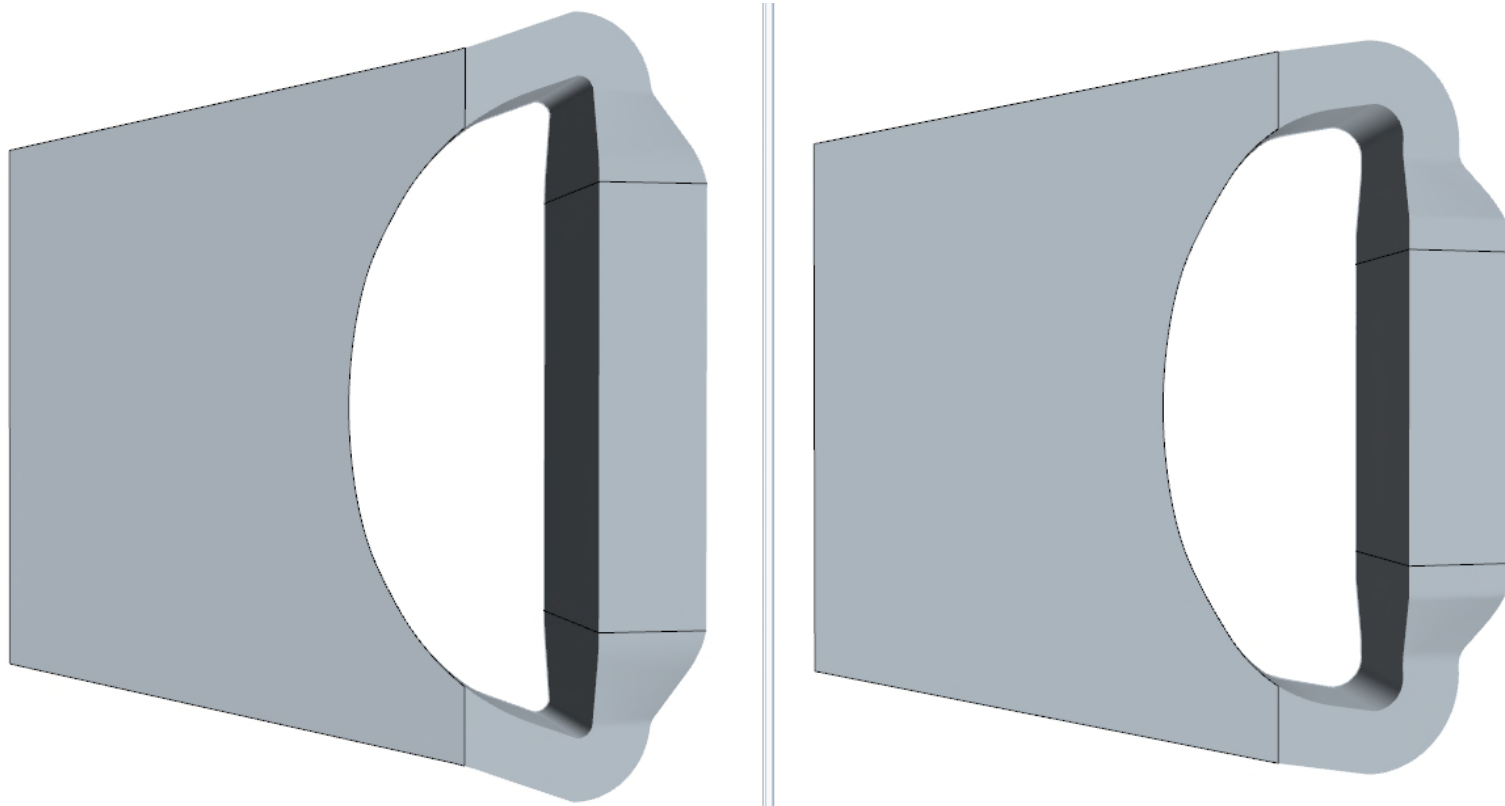
Champ des température à l'équilibre

La distribution de vitesse induit également des points chauds, qui sont problématiques par exemple pour la tenue des matériaux



Champ de température à l'équilibre sur la géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie d'origine EVOL (à droite)

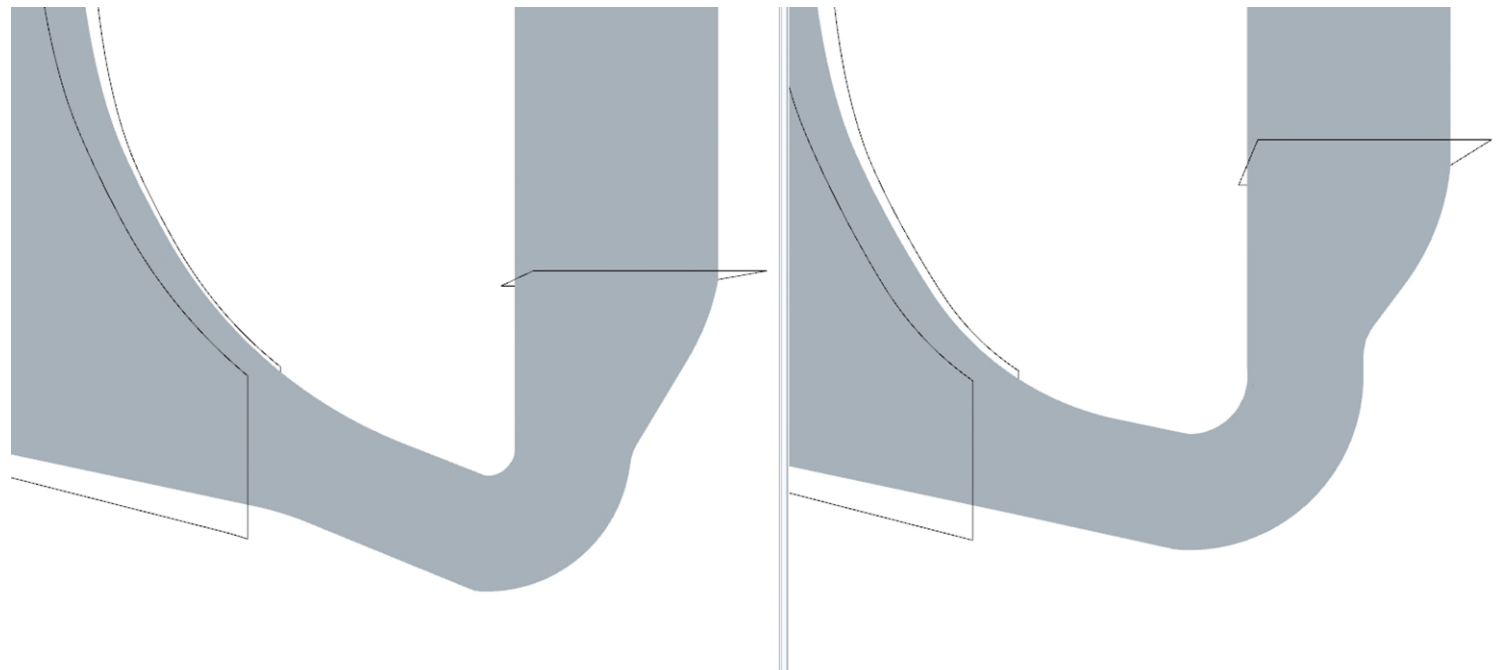
Amélioration du design pour la thermohydraulique



Géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie améliorée EVOL (à droite)

Amélioration du design pour la thermohydraulique

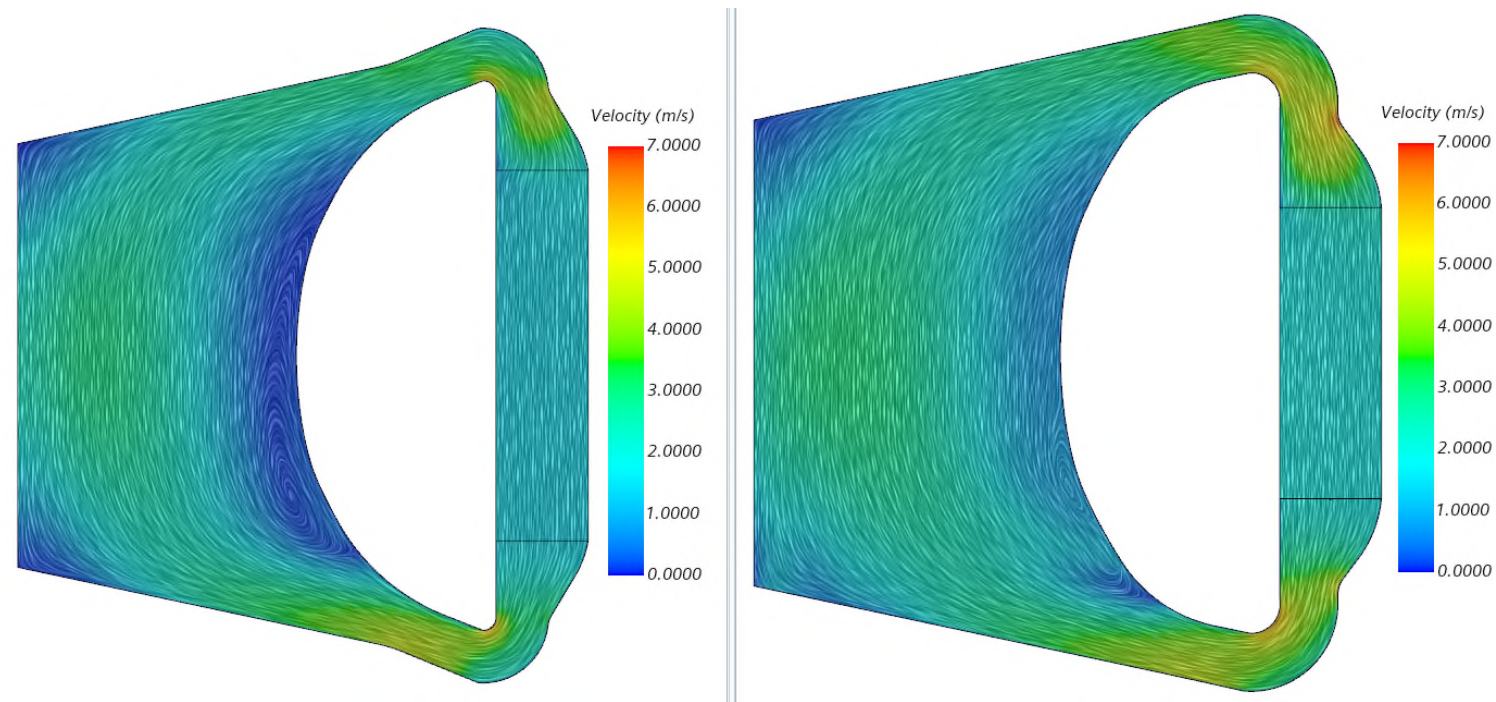
Modification de l'angle d'injection (plus horizontal)
Augmentation du rayon de courbure du coude



Géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie améliorée EVOL (à droite)

Amélioration du design pour la thermohydraulique

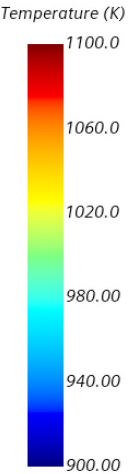
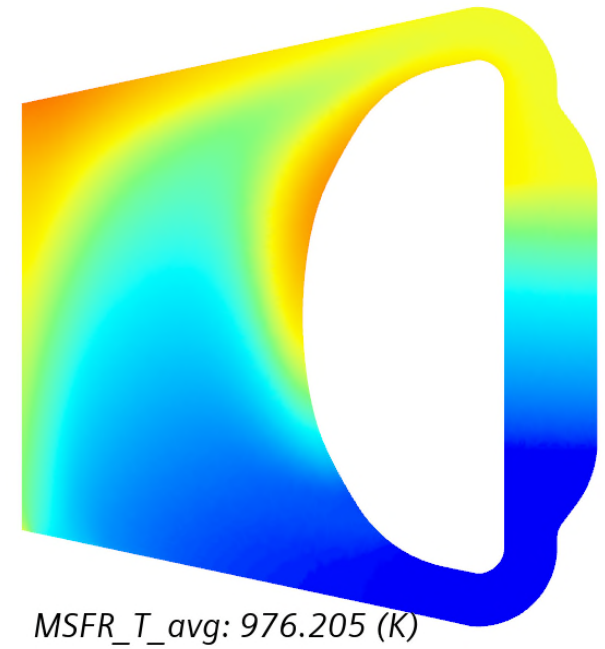
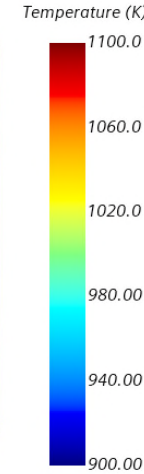
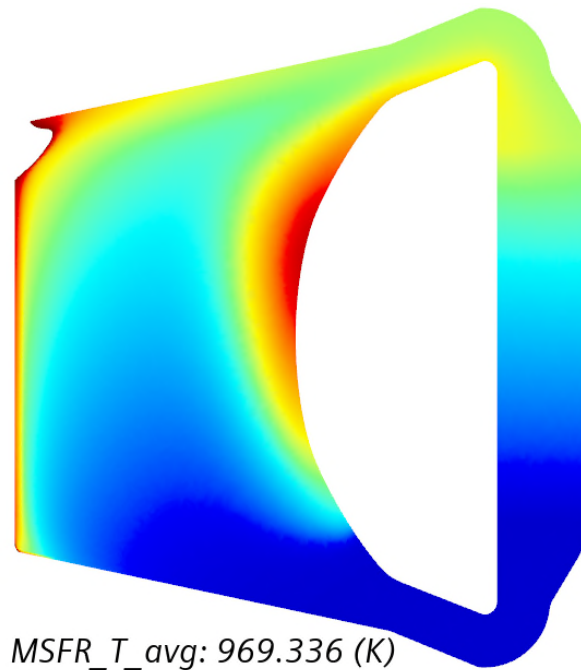
Le champ des vitesses est plus homogène dans la géométrie optimisée. La zone de recirculation est plus localisée et ralentit moins l'écoulement en proche paroi



Lignes et champ de vitesse à l'équilibre sur la géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie améliorée EVOL (à droite)

Amélioration du design pour la thermohydraulique

La modification du design a permis de réduire les points chauds de manière conséquente



Champ de température à l'équilibre sur la géométrie modifiée EVOL (à gauche) et la géométrie améliorée EVOL (à droite)

5. Conclusion



<https://tenor.com/fr/view/kaamelott-leodagan-fini-cest-fini-bientot-fini-gif-18206412>

Conclusion et perspectives

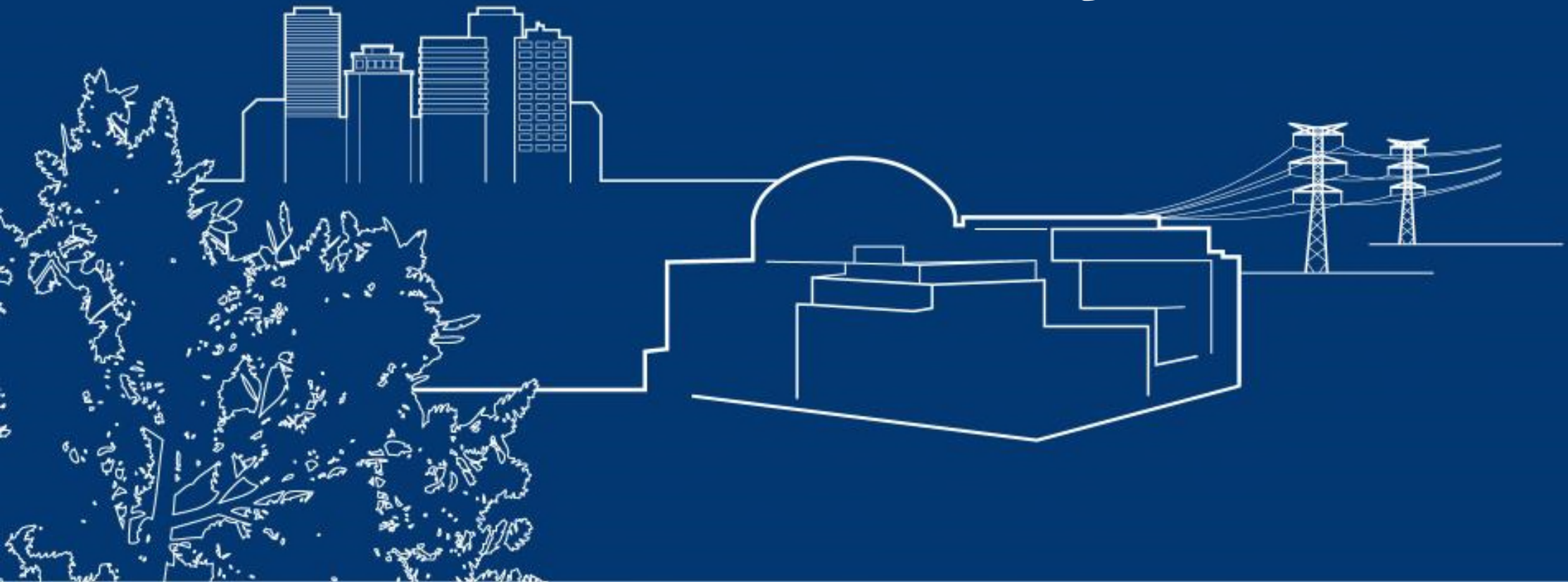
- La physique des réacteurs à sels fondus a des caractéristiques assez différentes de la physique des réacteurs à combustible solide
- Les deux codes sont utilisables pour faire des calculs couplés, en particulier, TFM-STAR donne des résultats comparables à TFM-OpenFOAM
- Perspectives :
 - Etudes paramétriques avec divers transitoires réalisés (perte de pompe, sur-refroidissement ...)
 - Modification et optimisation de design (forme du cœur, nombre de boucles, puissance...)
- Etablir des liens entre les résultats des simulations et l'approche de sûreté et la conception

Références

- [1] : A. Laureau, «Développement de modèles neutroniques pour le couplage thermohydraulique du MSFR et le calcul de paramètres cinétiques effectifs», Thèse, Grenoble, 2015.
- [2] : Generation IV International Forum, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems. Rapport technique, 2014.
- [3] : IN2P3. Formation schématique de l'uranium 233 : <https://www.laradioactivite.com/site/pages/combustiblesauthorium.htm>.
- [4] : G. Bourdon, «Développement d'outils pour la simulation de la physique des réacteurs à sels fondus», Rapport de stage, Framatome Lyon, 2020.
- [5] : Delayed neutrons : <https://www.nuclear-power.com/nuclear-power/fission/delayed-neutrons/>
- [6] : Effet densité : https://laradioactivite.com/energie_nucleaire/controledesreacteurs
- [7] : T. Sornay, «Développement d'outils pour la simulation de la physique des réacteurs à sels fondus», Rapport de stage, Framatome Lyon, 2021.

framatome

Thank you



Toute reproduction, modification, transmission à tout tiers ou publication totale ou partielle du document et/ou de son contenu est interdite sans l'accord préalable et écrit de Framatome.

Ce document et toute information qu'il contient ne doivent en aucun cas être utilisés à d'autres fins que celles pour lesquelles ils ont été communiqués. Tout acte de contrefaçon ou tout manquement aux obligations ci-dessus est passible de poursuites judiciaires.