



Séminaire doctorant : Développement d'outils pour la simulation du bruit neutronique dans les réacteurs à sels fondus

Doctorant : Max Begue; équipe MSFR

max.begue@lpsc.in2p3.fr

Supervision: A. Laureau, E. Merle, J. Vukasin

17/03/2025

Sommaire

1. Introduction
 - a) Le bruit neutronique
 - b) Le Molten Salt Fast Reactor (MSFR)
 - c) Enjeux de la thèse
2. Couplage neutronique-thermohydraulique
 - a) La Computational Fluid Dynamics (CFD)
 - b) L'approche Transient Fission Matrix (TFM)
 - c) Travaux en cours
3. Simulation de bruit neutronique
 - a) Utilisation de TFM
 - b) Résultats préliminaires
4. Conclusions et perspectives

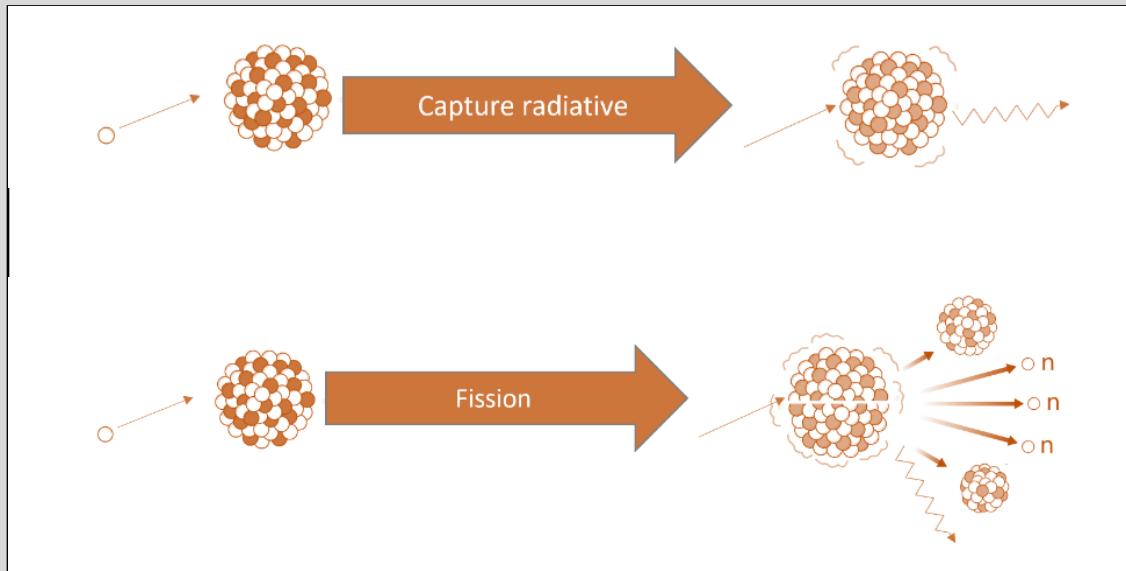
Partie 1 :

Introduction

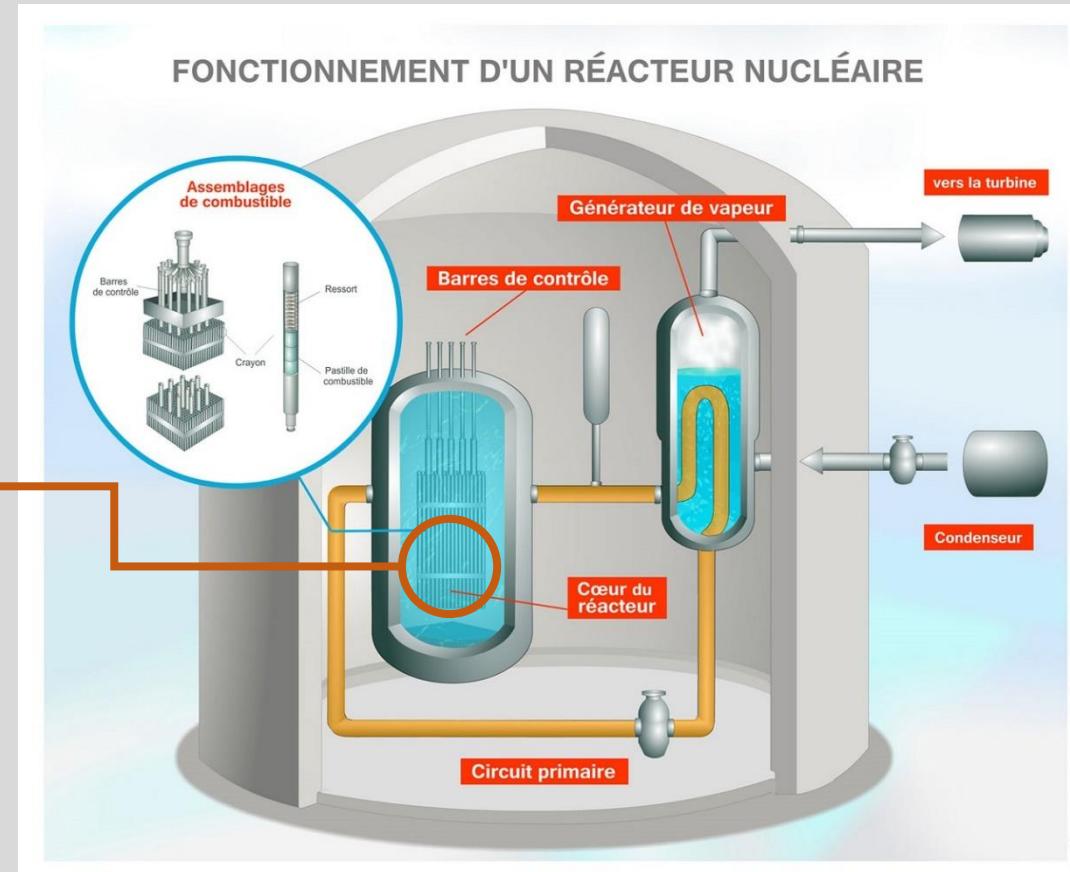
Les réacteurs nucléaires

57 réacteurs dans le parc français, tous des réacteurs à eau pressurisée

Les réactions sont *aléatoires*



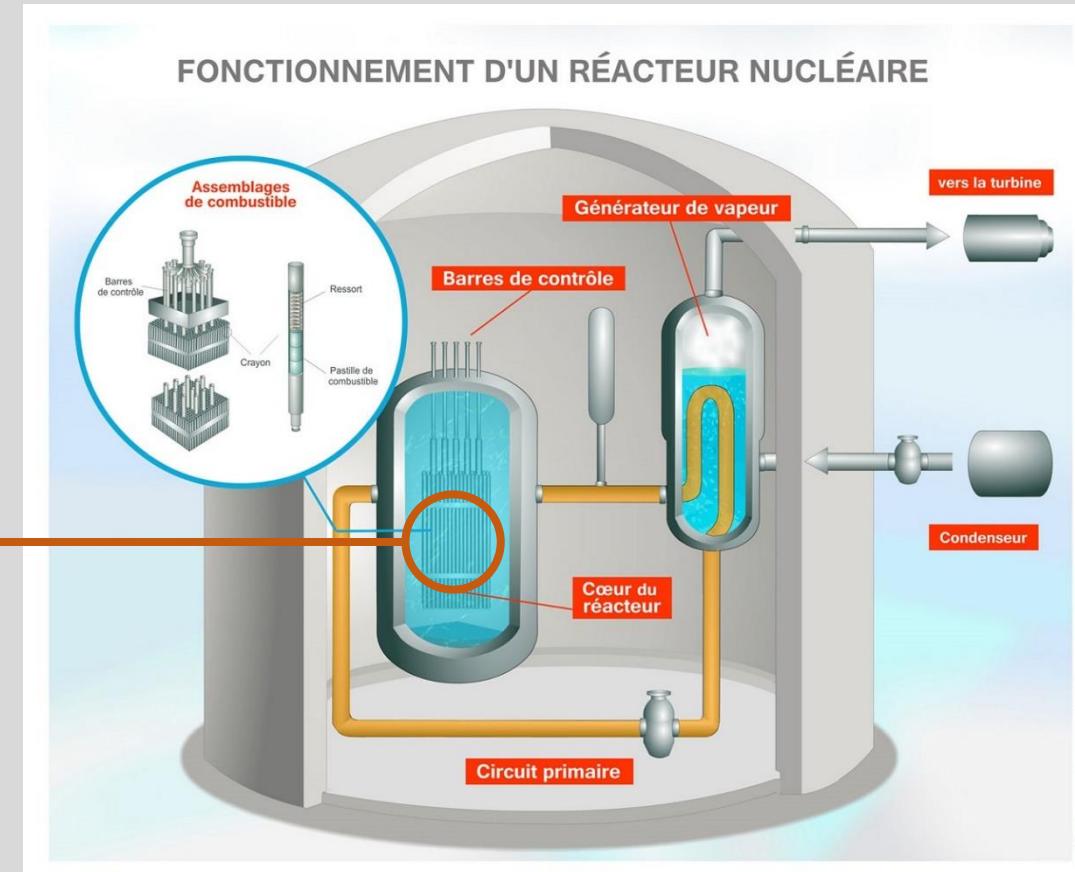
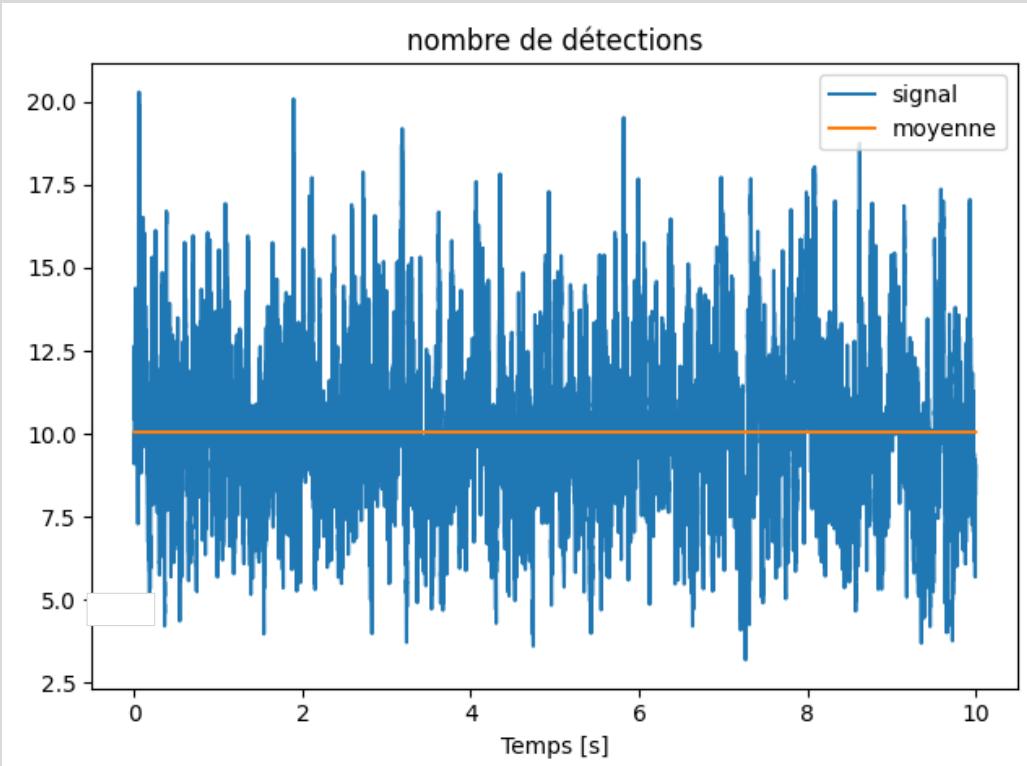
©Thomas Sornay / CNRS-Framatome



©C. Beurtey / CEA

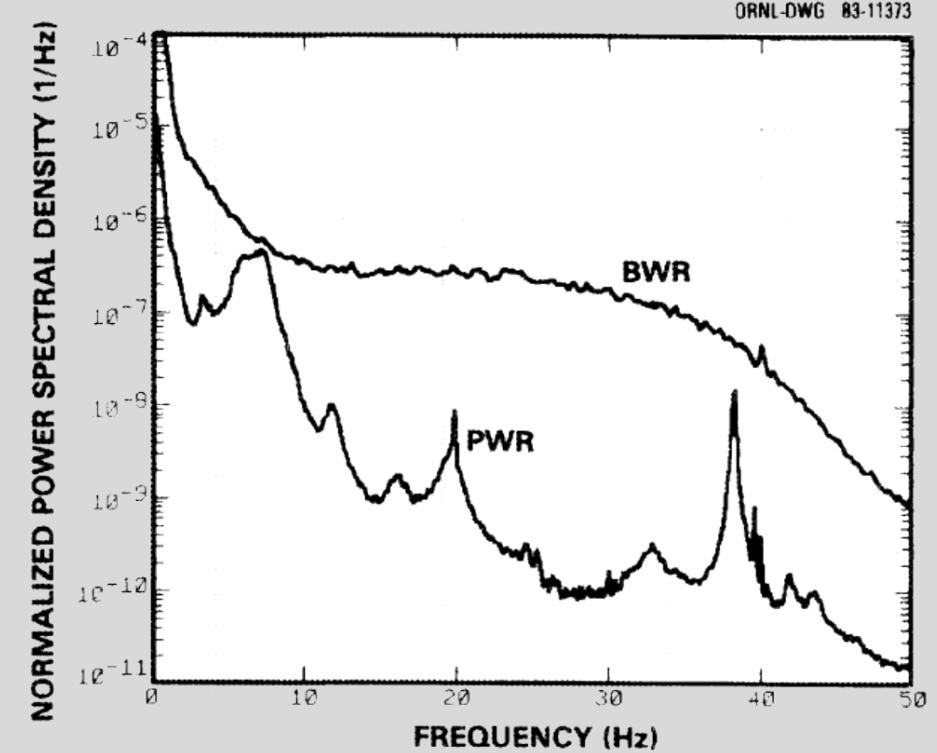
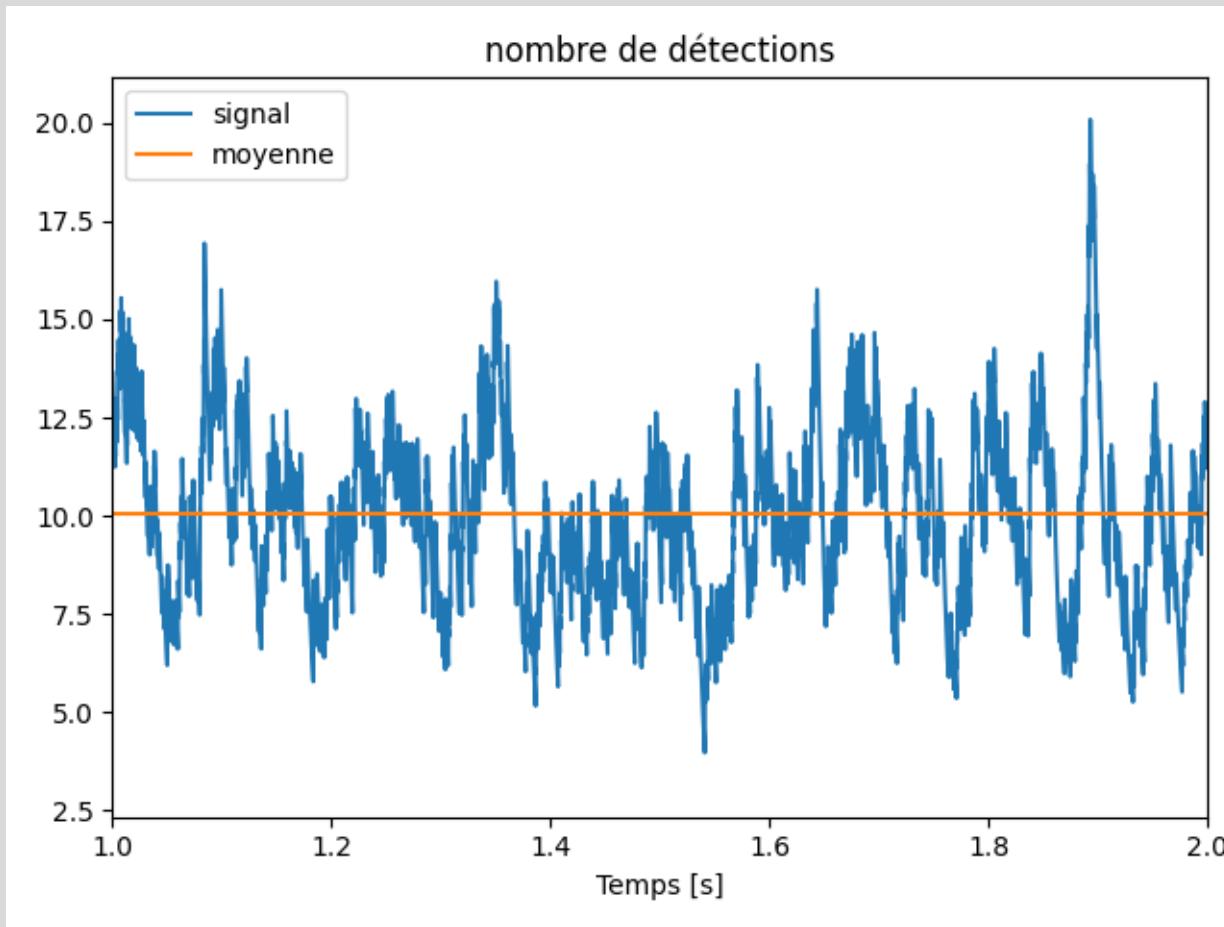
Le bruit neutronique

- Fluctuations temporelles autour d'une valeur moyenne
- La valeur moyenne indique la puissance du réacteur
- Deux types de bruits :
 - Bruit de puissance
 - Bruit à puissance nulle (bruit de pile)



Le bruit de puissance

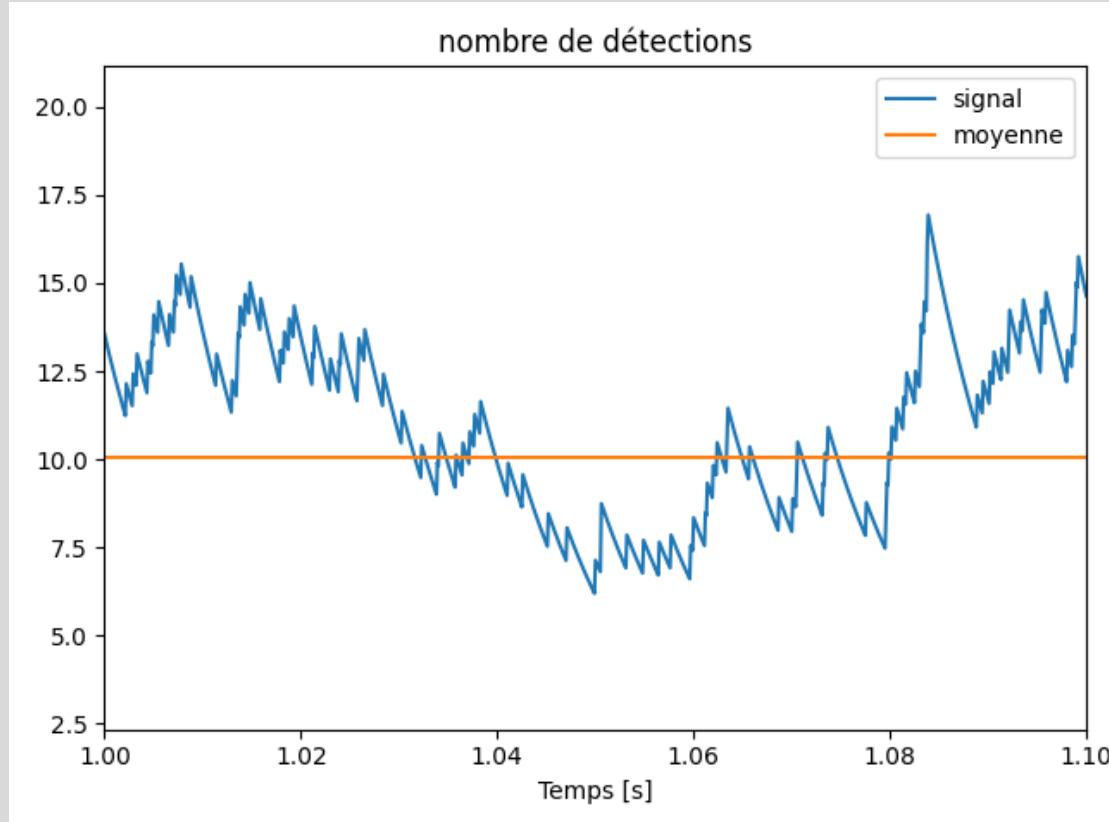
- Causé par les modifications du milieu (températures, géométries...)
- Permet la détection de défauts et de vibrations



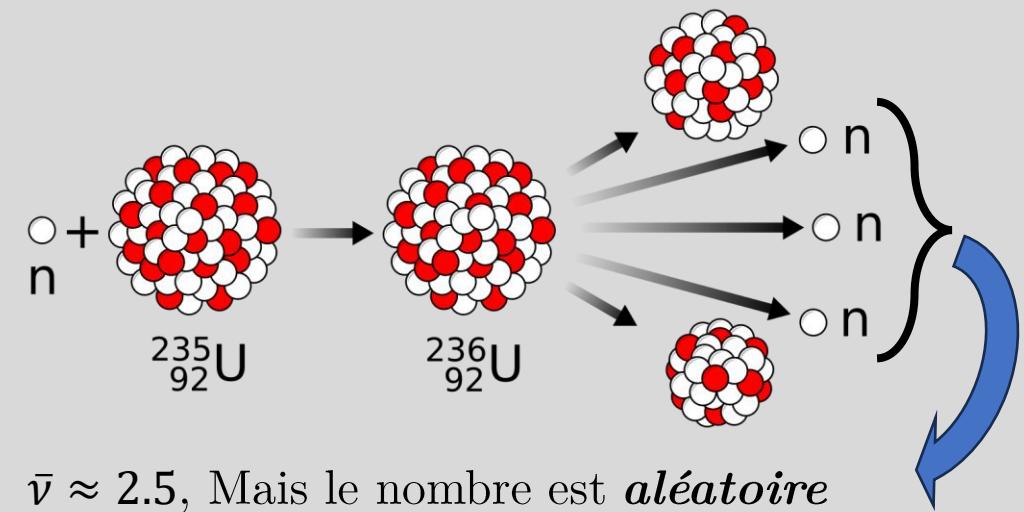
Densité spectrale de puissance pour des réacteurs à eau

Fry D. N., March-Leuba J. et Sweeney F. J., Use of neutron noise of diagnosis of in-vessel anomalies in light-water reactors.

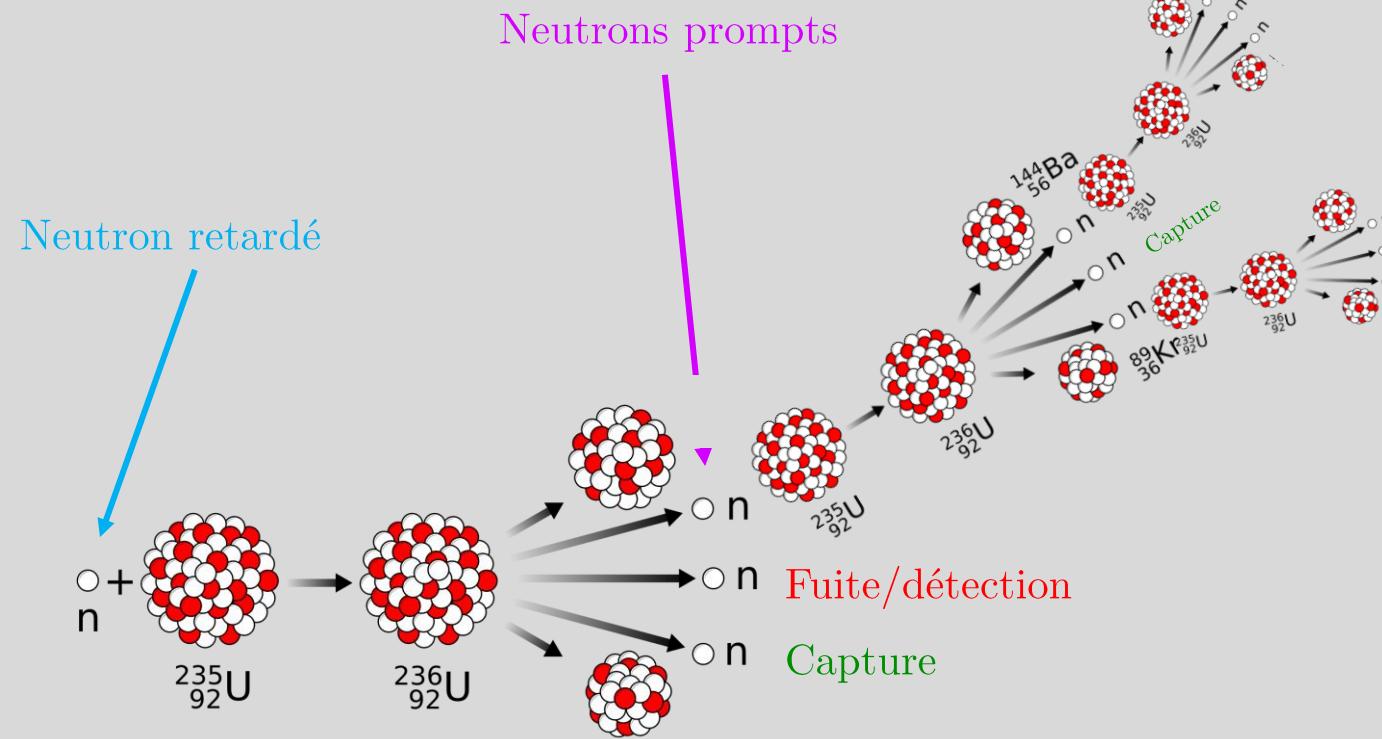
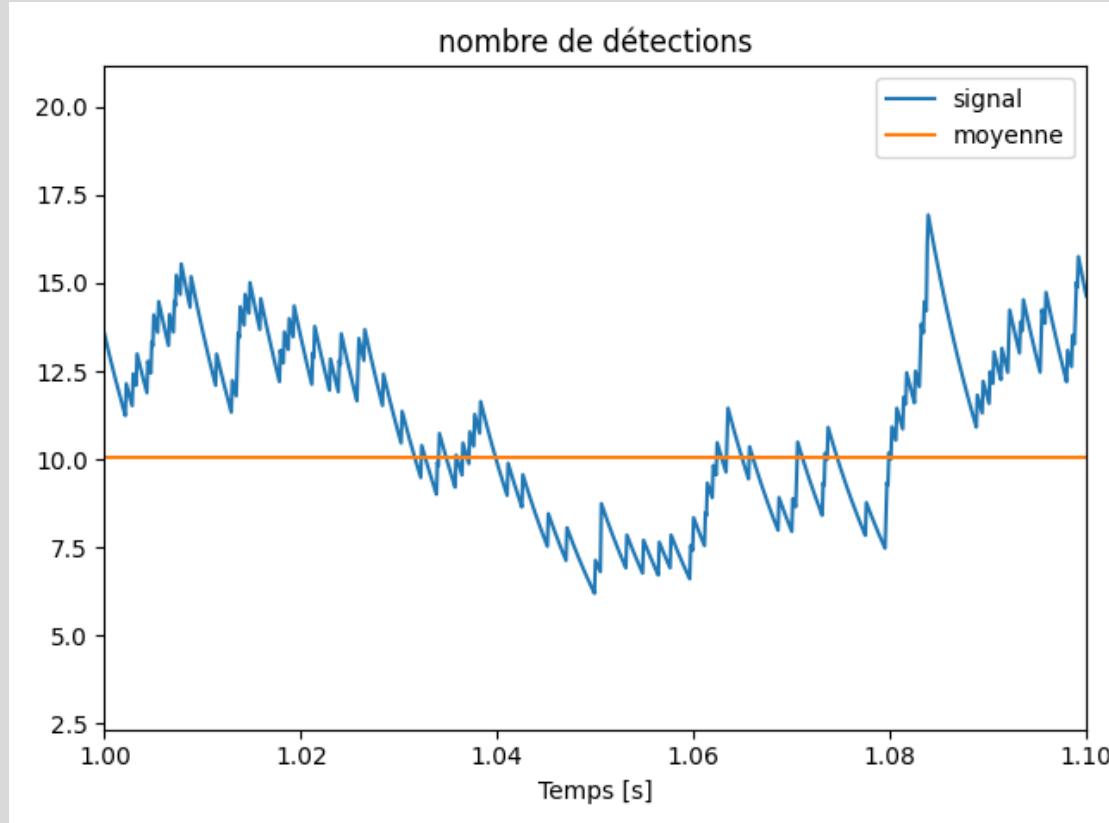
Le bruit à puissance nulle (bruit de pile)



Causé par la nature aléatoire des phénomènes nucléaires
→ Fluctuations statistiques



Le bruit à puissance nulle (bruit de pile)



Décroissance exponentielle des gerbes de neutrons prompts

$$N_p = N_0 e^{\alpha t} \quad \alpha = \frac{\rho - \beta}{\Lambda}$$

Le Molten Salt Fast Reactor (MSFR)

Ce concept est la base de la plupart des études réalisées. Les caractéristiques de la version de référence sont* :

- Le combustible est un sel (Li-F) à haute température (~ 950 K) et l'uranium est dissous dans le sel
- 3GW_{th} de puissance nominale
- Pas de structures internes (écoulement très turbulent)
- Spectre neutronique rapide

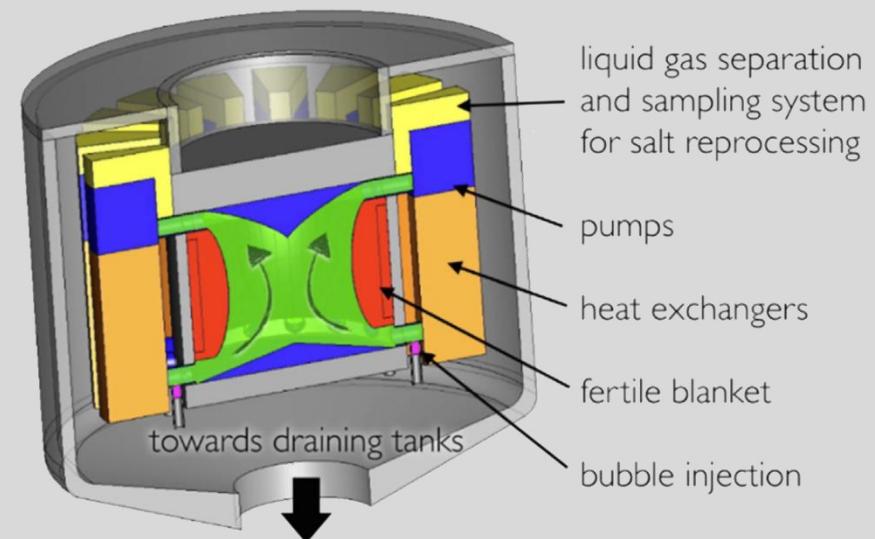
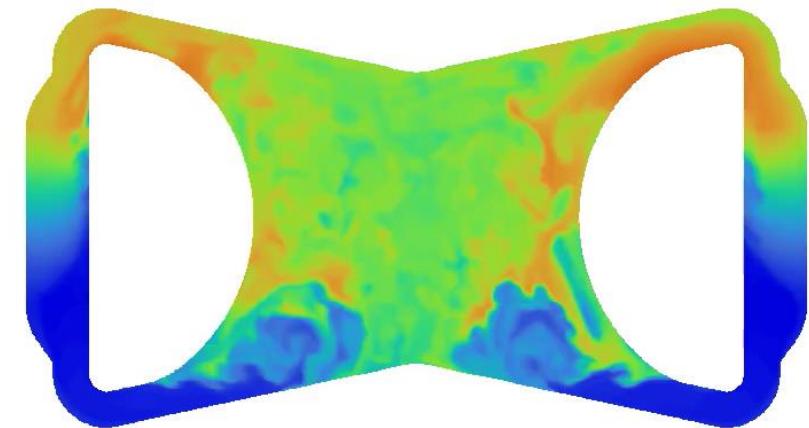
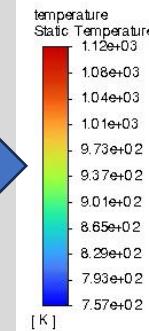
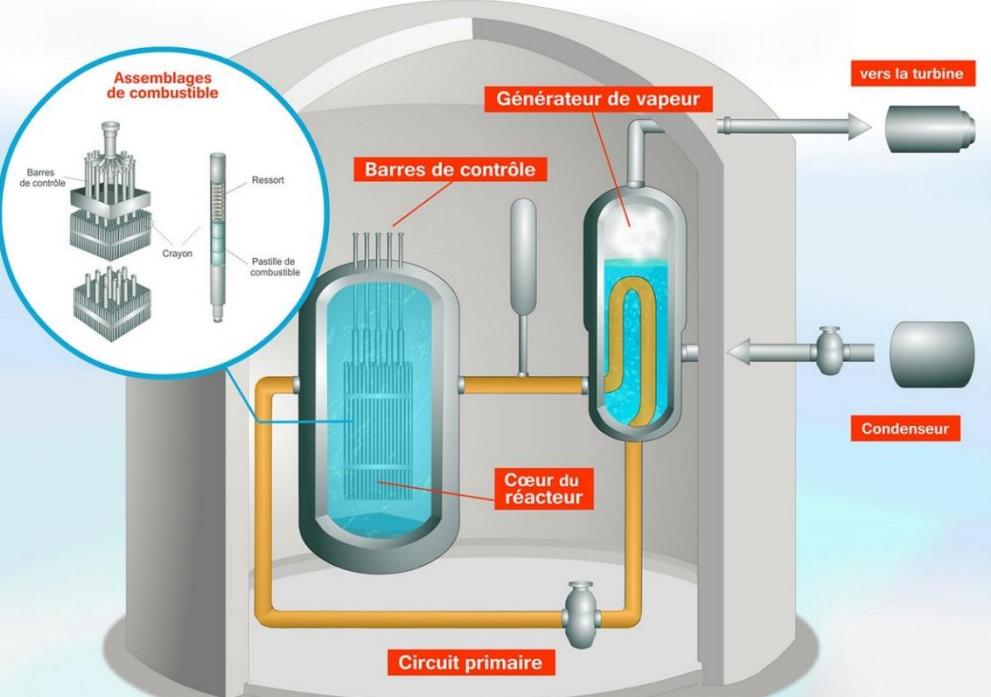


Schéma du MSFR de référence
(MSFR-F)

* Michel Allibert, Sylvie Delpech, Delphine Gerardin, Daniel Heuer, Axel Laureau, Elsa Merle, Chapter 7 - Homogeneous Molten Salt Reactors (MSRs): The Molten Salt Fast Reactor (MSFR) concept Editor(s): Igor L. Pioro, In Woodhead Publishing Series in Energy, Handbook of Generation IV Nuclear Reactors (Second Edition), 2023, Pages 231-257, ISBN 9780128205884

Problématique

FONCTIONNEMENT D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE



Quel impact sur le bruit neutronique a l'utilisation
d'un combustible liquide et circulant ?

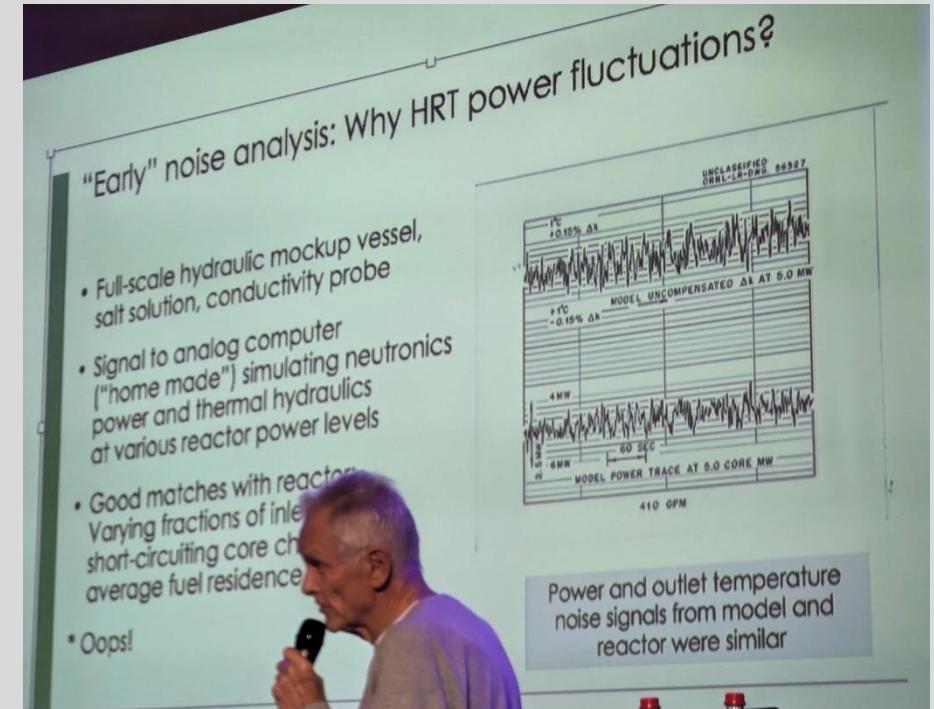
Le bruit neutronique dans les réacteurs à sels fondus (RSF)

Dans la littérature :

- Peu d'étude sur ce sujet
- La plupart des études utilisent l'approximation de la diffusion *

Objectifs de cette thèse :

- Développer les outils de simulation nécessaires
- Étudier les particularités du bruit neutronique dans les réacteurs à sels fondus
- Préparer le démarrage des prochains RSF (MCRE)



Syd Ball, opérateur du Molten Salt Reactor Experiment, présentant des mesures de l'impact de l'insertion de bulles sur le bruit neutronique dans le MSRE (bootcamp RSF, October 2023)

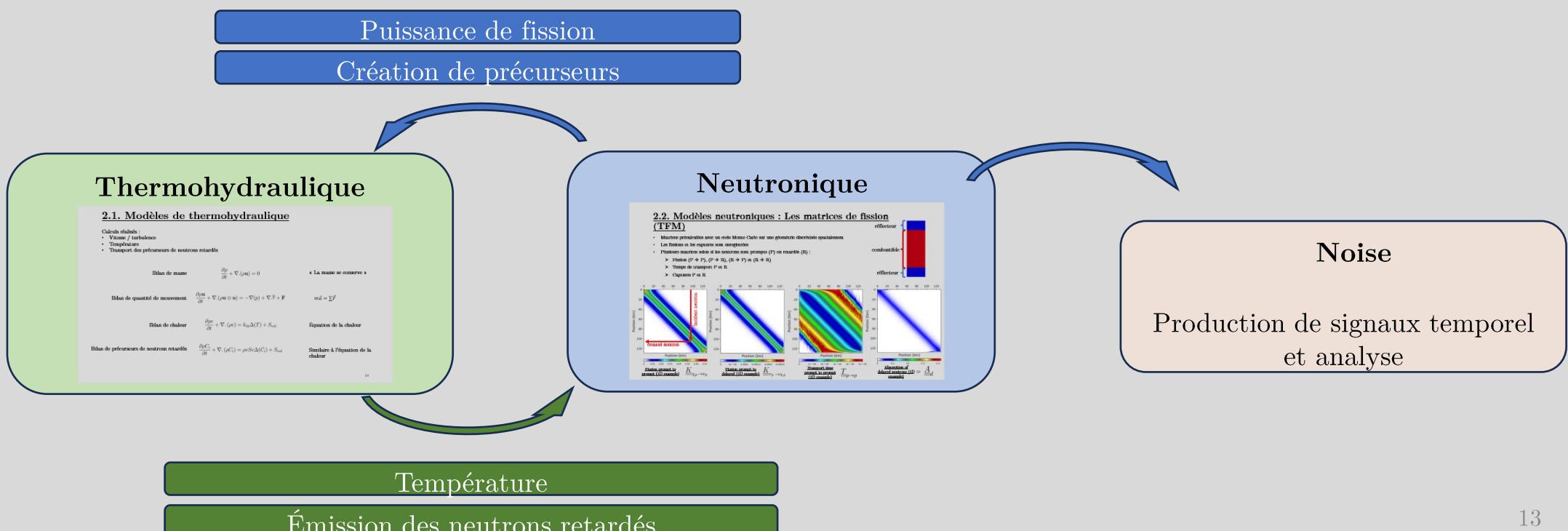
* Wang, Jiangmeng, and Xinrong Cao, 'Characters of Neutron Noise in Full-Size Molten Salt Reactor', *Annals of Nuclear Energy*, 81 (2015), pp. 179–87
Pázsit, I., V. Dykin, and R. Sanchez, 'The Point Kinetic Component of Neutron Noise in an MSR', *Annals of Nuclear Energy*, 64 (2014), pp. 344–52

Partie 2 :

Couplage neutronique-thermohydraulique

2. Couplage neutronique-thermohydraulique

- Pour calculer la forme de l'écoulement, la température, la concentration en précurseurs de neutrons retardés :
→ code de Computational Fluid Dynamics (CFD) (Ansys Fluent ou OpenFOAM)
- Pour **calculer la puissance** de fission, la cinétique du réacteur et la production de précurseurs :
→ approche des matrices de fission (TFM), développée précédemment au LPSC
- Pour créer des **signaux de bruit** :
→ Tirage de chaines de fission avec TFM



2.1. Modèles de thermohydraulique

Calculs réalisés :

- Vitesse / turbulence
- Température
- Transport des précurseurs de neutrons retardés

Bilan de masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

« La masse se conserve »

Bilan de quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla(p) + \nabla \cdot \bar{\tau} + \mathbf{F}$$

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}$$

Bilan de chaleur

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e) = k_{\text{th}} \Delta(T) + S_{\text{vol}}$$

Équation de la chaleur

Bilan de précurseurs de neutrons retardés

$$\frac{\partial \rho C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_i) = \rho \nu S c \Delta(C_i) + S_{\text{vol}}$$

Similaire à l'équation de la chaleur

2.1. Modèles de thermohydraulique

Calculs réalisés :

- Vitesse / turbulence
- Température
- Transport des précurseurs de neutrons retardés

Bilan de masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

« La masse se conserve »

Bilan de quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla(p) + \nabla \cdot \bar{\tau} + \mathbf{F}$$

$$m \vec{a} = \sum \vec{F}$$

Variation temporelle = transport par le fluide + Termes source

Bilan de chaleur

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e) = k_{\text{th}} \Delta(T) + S_{\text{vol}}$$

Équation de la chaleur

Bilan de précurseurs de neutrons retardés

$$\frac{\partial \rho C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_i) = \rho \nu S c \Delta(C_i) + S_{\text{vol}}$$

Similaire à l'équation de la chaleur

2.1. Modèles de thermohydraulique

Calculs réalisés :

- Vitesse / turbulence
- Température
- Transport des précurseurs de neutrons retardés

Bilan de masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

« La masse se conserve »

Bilan de quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla(p) + \nabla \cdot \bar{\tau} + \mathbf{F}$$

$$m \vec{a} = \sum \vec{F}$$

Puissance de fission
(fournie par la neutronique)

Bilan de chaleur

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e) = k_{\text{th}} \Delta(T) + S_{\text{vol}}$$

Équation de la chaleur

Bilan de précurseurs de neutrons retardés

$$\frac{\partial \rho C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_i) = \rho \nu S c \Delta(C_i) + S_{\text{vol}}$$

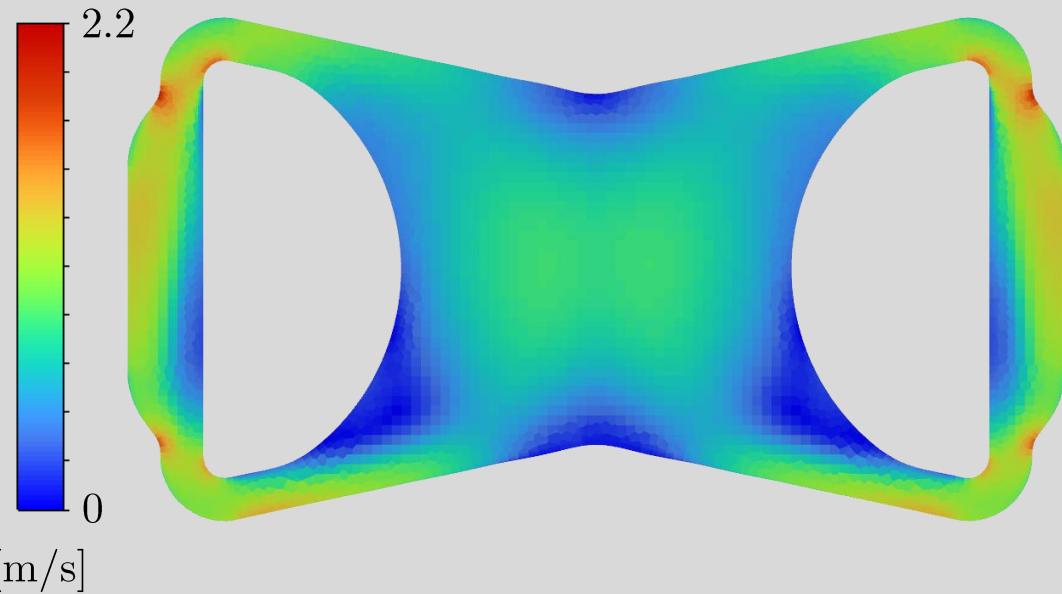
Similaire à l'équation de la chaleur

2.1. Modèles de thermohydraulique

Deux types de modèles généralement utilisés :

Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) :

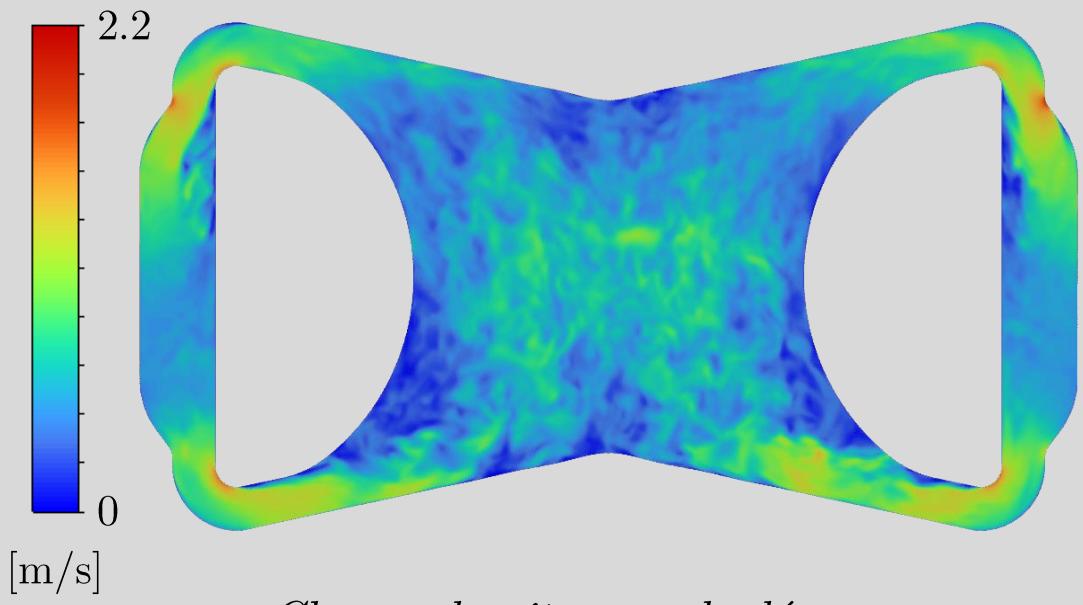
- Importance faible de la forme de l'écoulement
- Taille de maille ≈ 3 cm
- Peu de résolution temporelle
- Calculs rapides



Champ de vitesse calculé avec un modèle RANS

Detached/Large Eddy Simulation (DES/LES) :

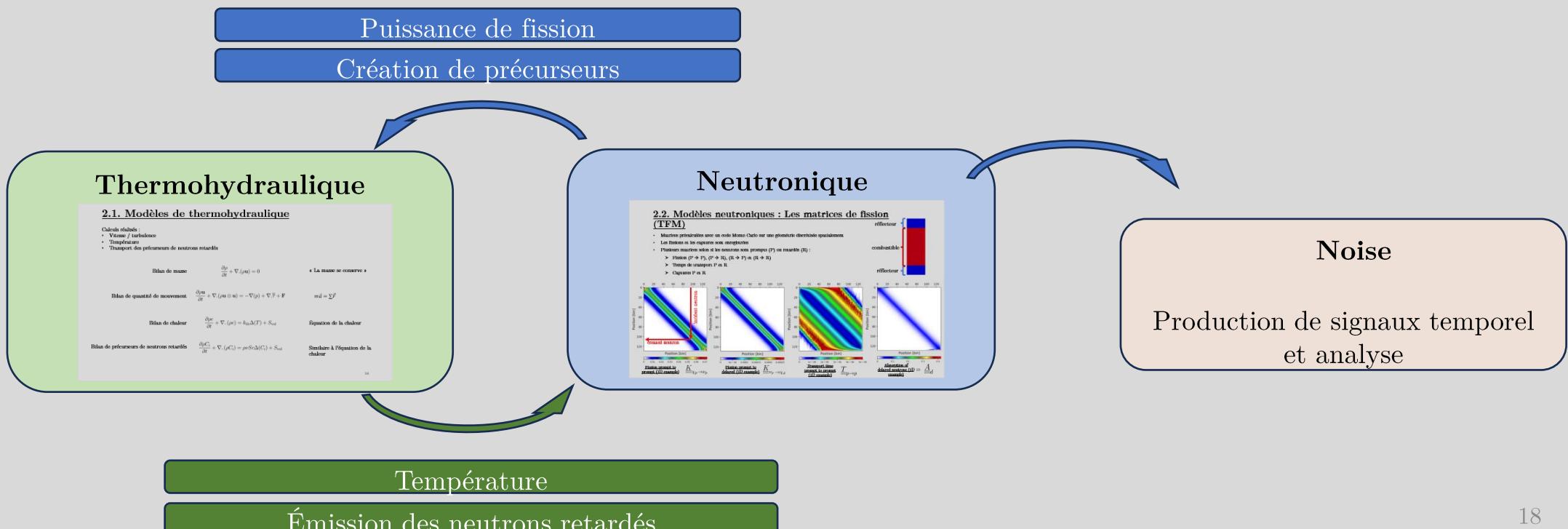
- Moins d'approximations que les modèles RANS
- Taille de maille ≈ 1 cm
- Résolution des petites échelles de turbulences
- Calculs lents (voire très lents)



Champ de vitesse calculé avec un modèle DES

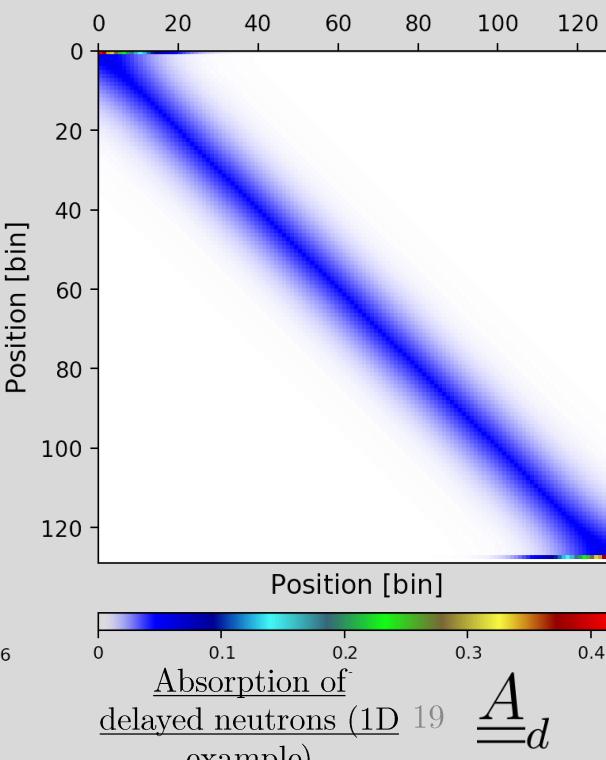
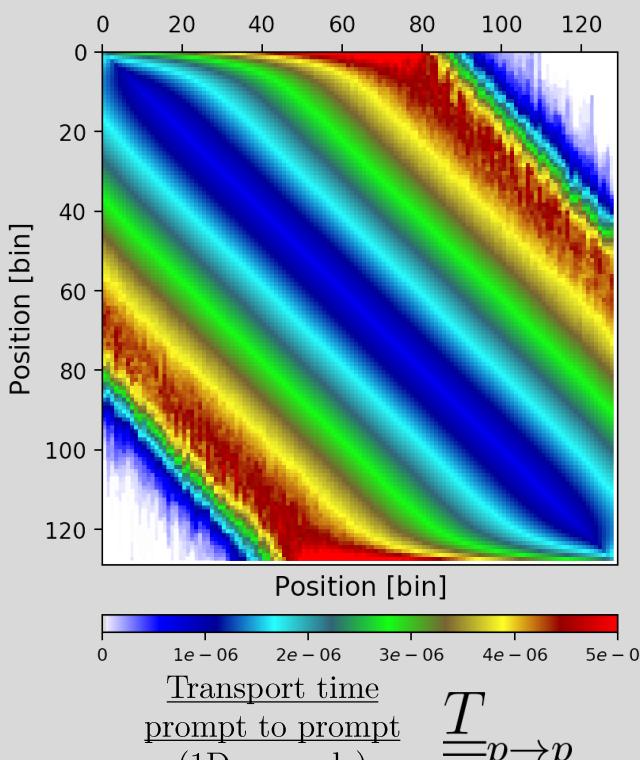
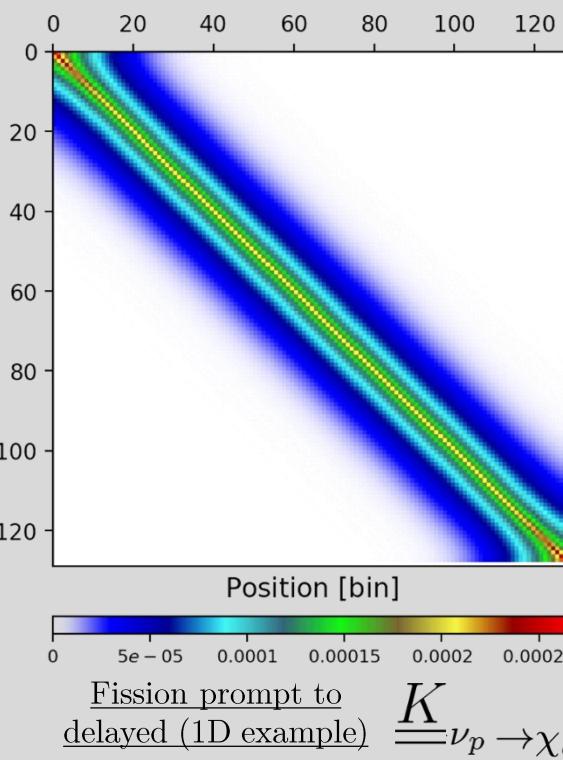
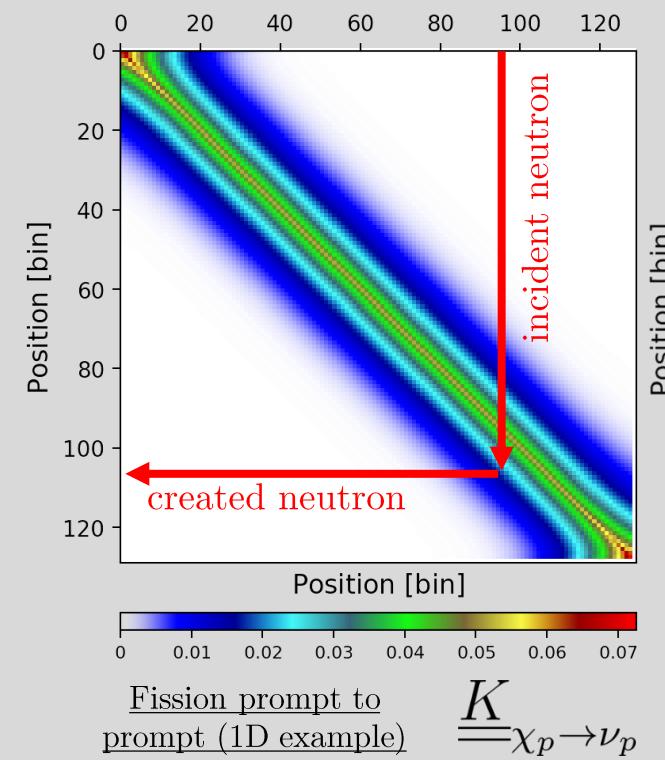
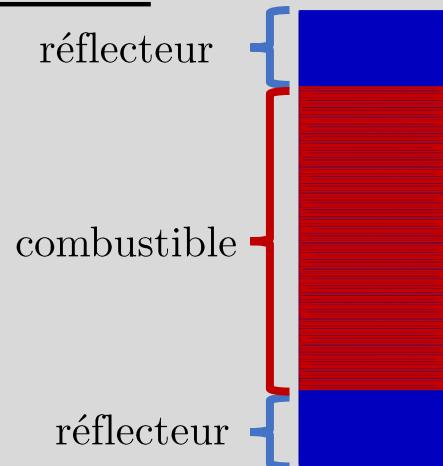
2. Couplage neutronique-thermohydraulique

- Pour calculer la forme de l'écoulement, la température, la concentration en précurseurs de neutrons retardés :
→ code de Computational Fluid Dynamics (CFD) (Ansys Fluent ou OpenFOAM)
- Pour **calculer la puissance** de fission, la cinétique du réacteur et la production de précurseurs :
→ approche des matrices de fission (TFM), développée précédemment au LPSC
- Pour créer des **signaux de bruit** :
→ Tirage de chaines de fission avec TFM



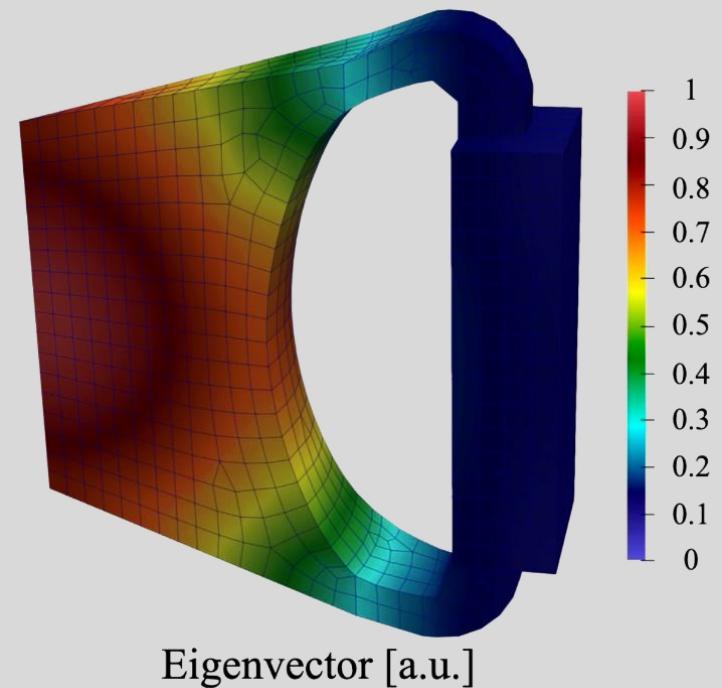
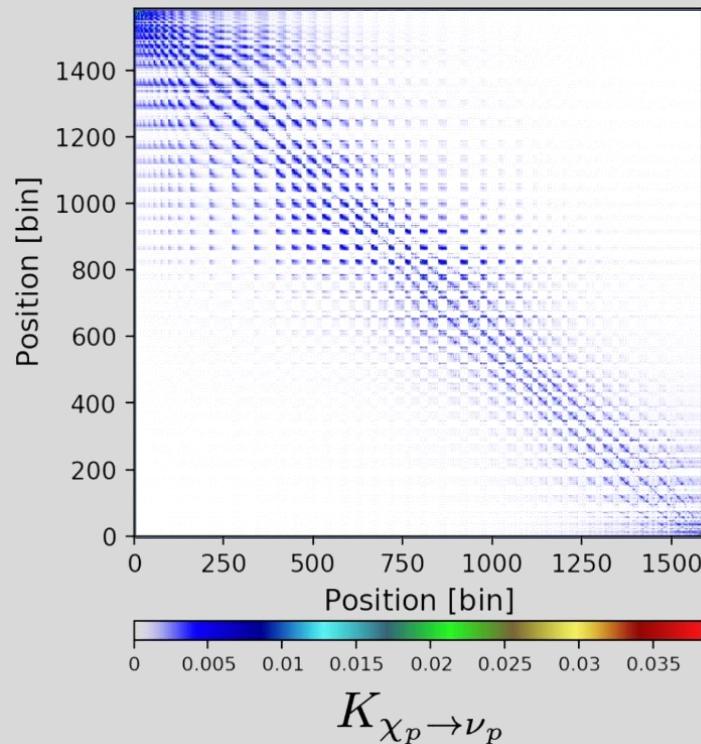
2.2. Modèles neutroniques : Les matrices de fission (TFM)

- Matrices précalculées avec un code Monte Carlo sur une géométrie discrétisée spatialement
 - Les fissions et les captures sont enregistrées
 - Plusieurs matrices selon si les neutrons sont prompts (P) ou retardés (R) :
 - Fission ($P \rightarrow P$), ($P \rightarrow R$), ($R \rightarrow P$) et ($R \rightarrow R$)
 - Temps de transport P et R
 - Captures P et R



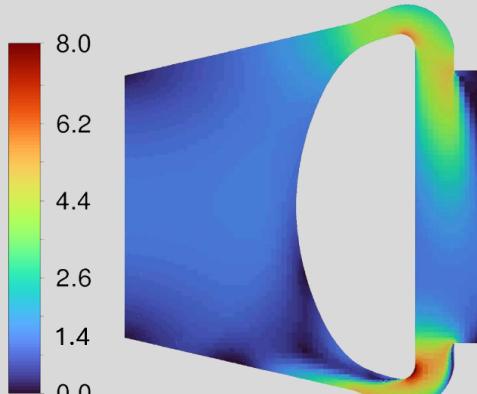
2.2. Modèles neutroniques : Les matrices de fission (TFM)

- Matrices précalculées avec un code Monte Carlo
- Les fissions et les captures sont enregistrées
- Plusieurs matrices selon si les neutrons sont prompts (P) ou retardés (R) :
 - Fission ($P \rightarrow P$), ($P \rightarrow R$), ($R \rightarrow P$) et ($R \rightarrow R$)
 - Temps de transport P et R
 - Captures P et R

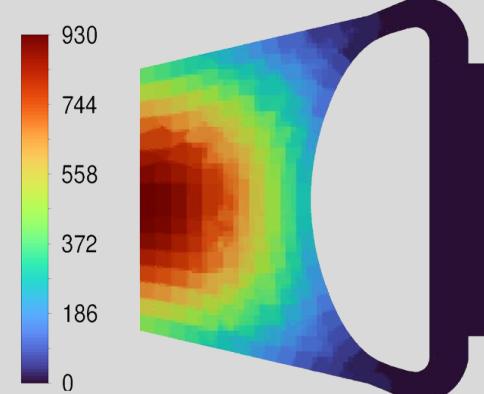


2.3. Études couplées : calculs à l'équilibre

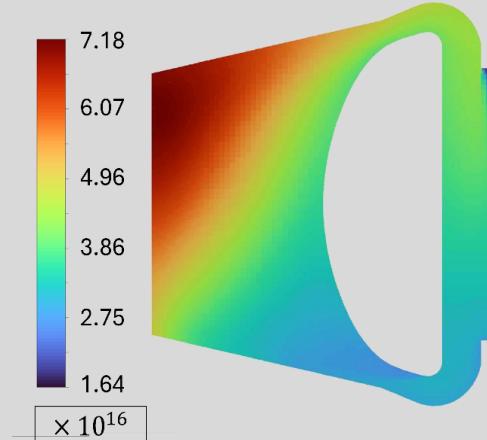
- L'équilibre est obtenu en forçant l'intégrale de la puissance et l'intégrale de la quantité de précurseurs (mais la forme reste donnée par TFM)
- Les calculs thermohydrauliques sont réalisés avec des modèles RANS
- Modèle de cinétique point ou de matrice de fission pour la neutronique



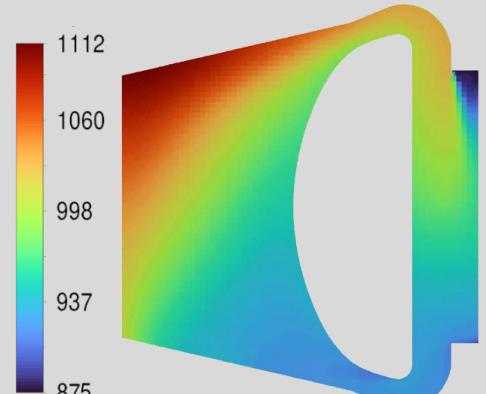
Vitesse [$m.s^{-1}$]



Puissance volumique [$MW.m^{-3}$]



Taux volumique d'émission de neutrons retardés [$m^{-3}.s^{-1}$]

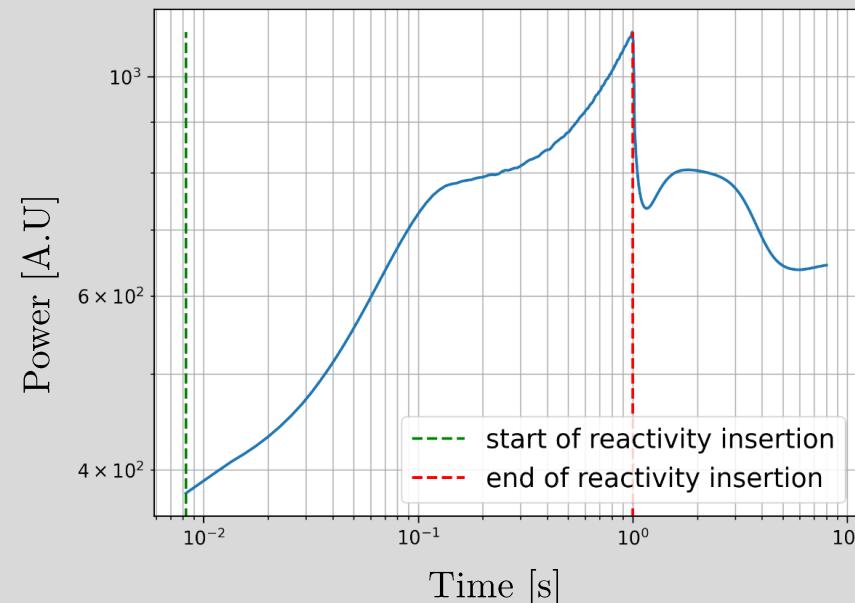


Température [K]

2.3. Études couplées : calculs à l'équilibre

- L'équilibre est obtenu en forçant l'intégrale de la puissance et l'intégrale de la quantité de précurseurs (mais la forme reste donnée par TFM)
- Les calculs thermohydrauliques sont réalisés avec des modèles RANS
- Modèle de cinétique point ou de matrice de fission pour la neutronique

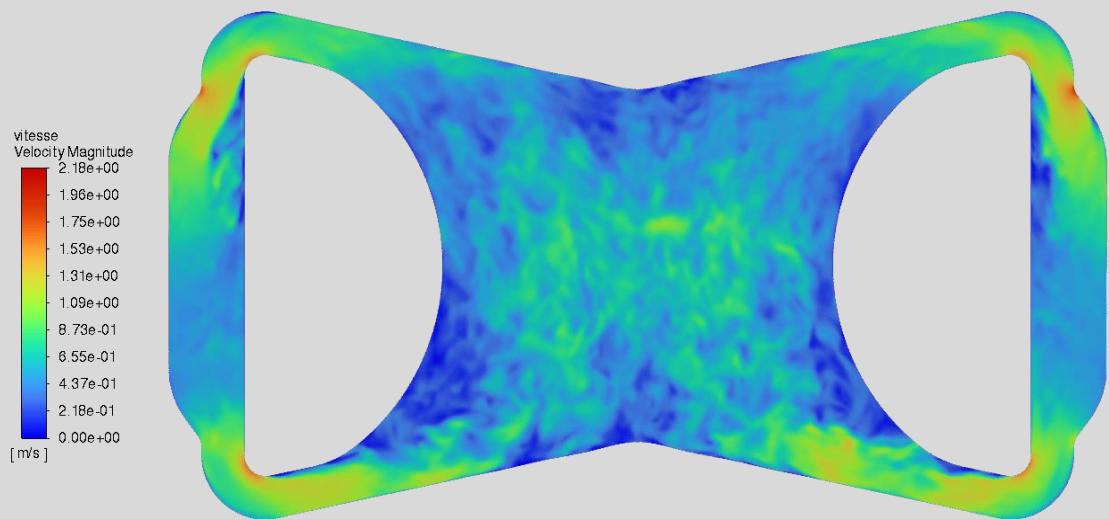
- Transitoires d'insertion de réactivité réalisables avec la même configuration



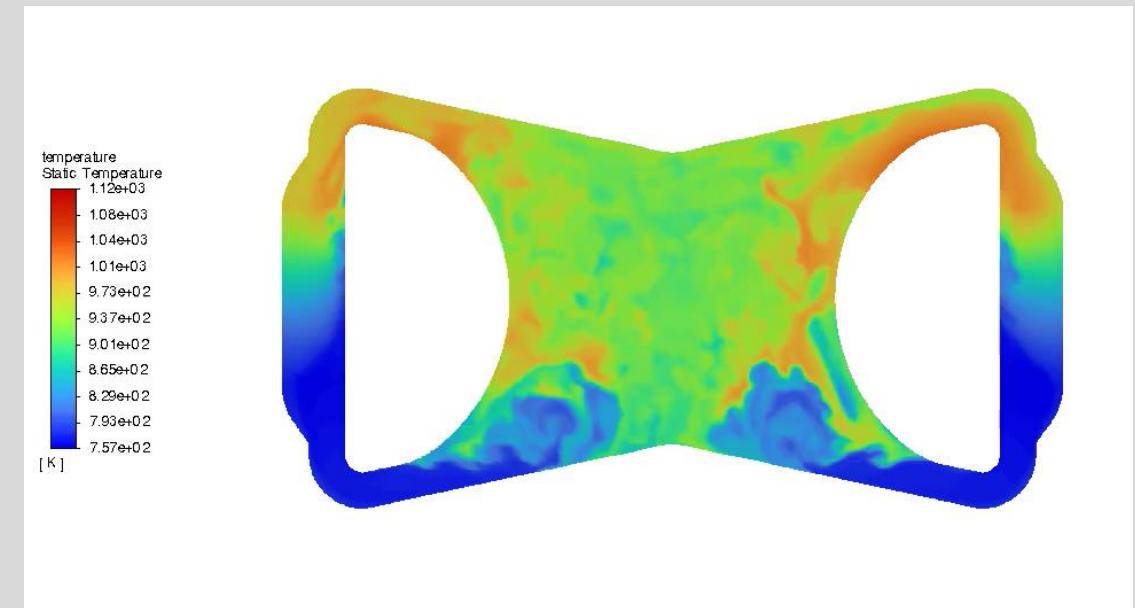
Insertion de réactivité de 1000 pcm en
1 seconde dans le MSFR de référence

2.4. Travaux en cours : benchmark

- Benchmark réalisé par CEA/CNRS/Framatome/Orano sur une version du MSFR en sel chlorure de petite taille (@Thomas Sornay's PhD thesis, CNRS-Framatome)



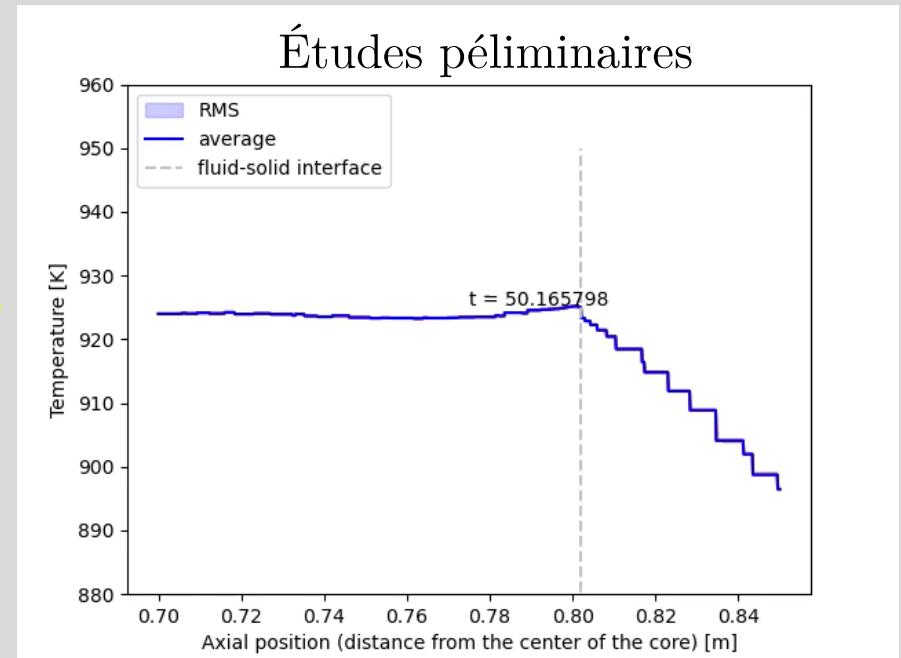
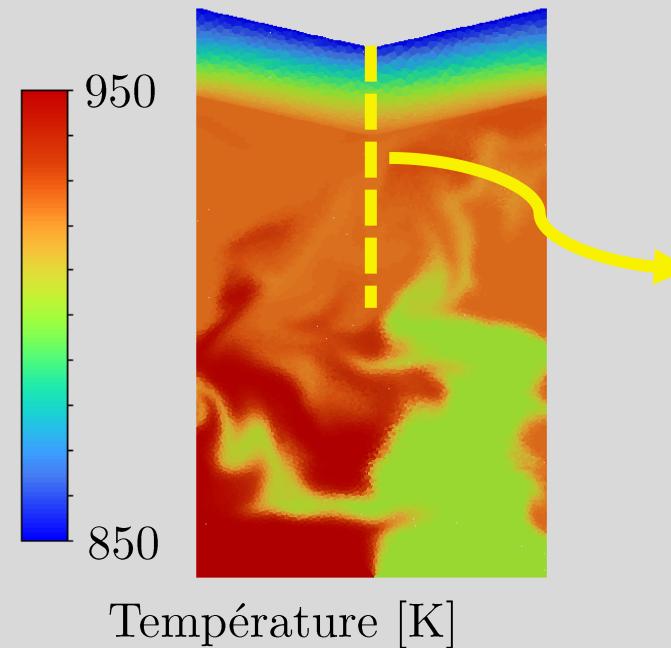
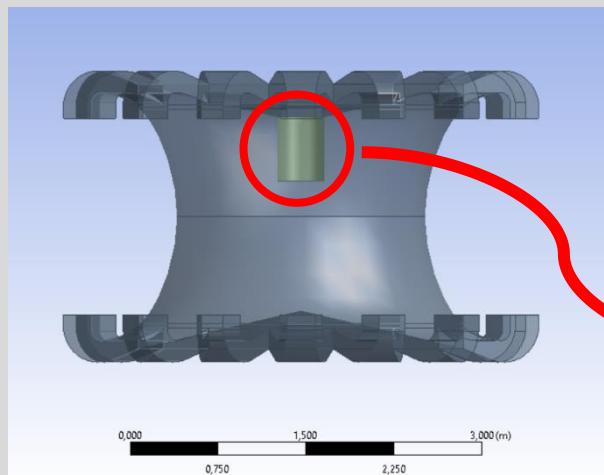
Exemple champ de vitesse obtenu pour
le benchmark



Exemple champ de température obtenu
pour le benchmark

2.4. Fluctuations de température dans la cuve du MSFR

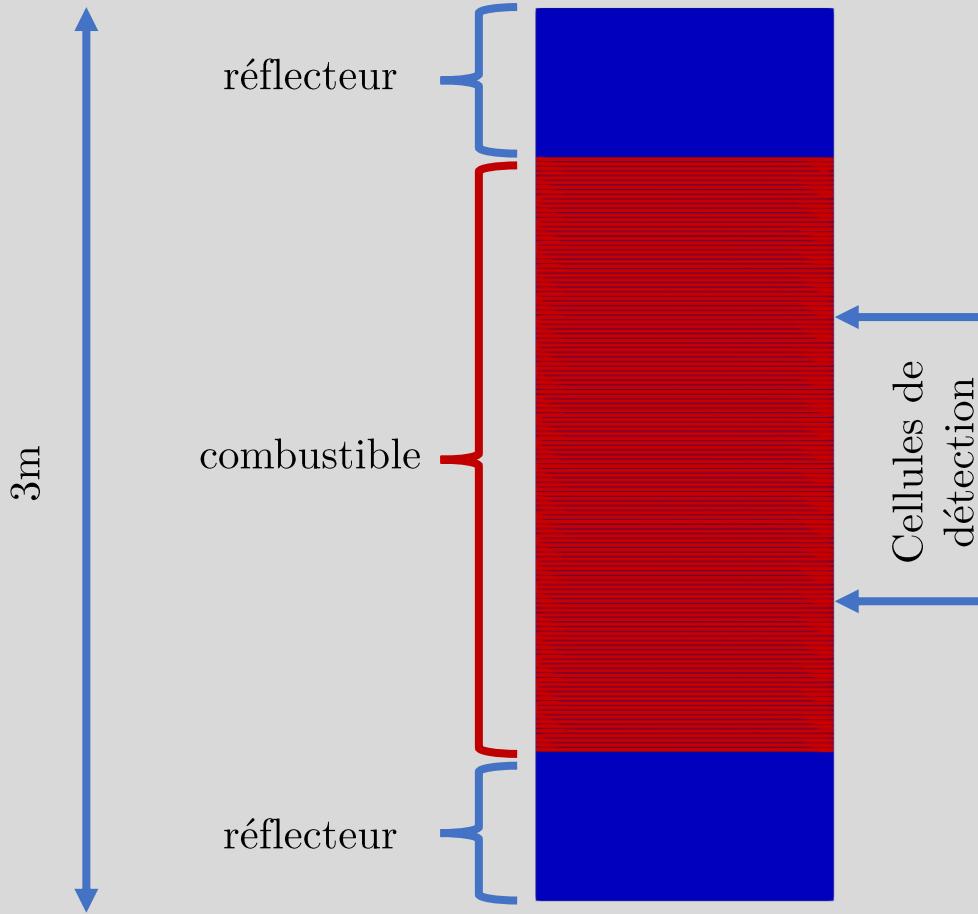
- Comparaison de modèles thermohydrauliques (IDDES, SBES, impact du raffinement du maillage)
- Extraction de la zone d'intérêt de l'écoulement pour réduire le temps de calcul



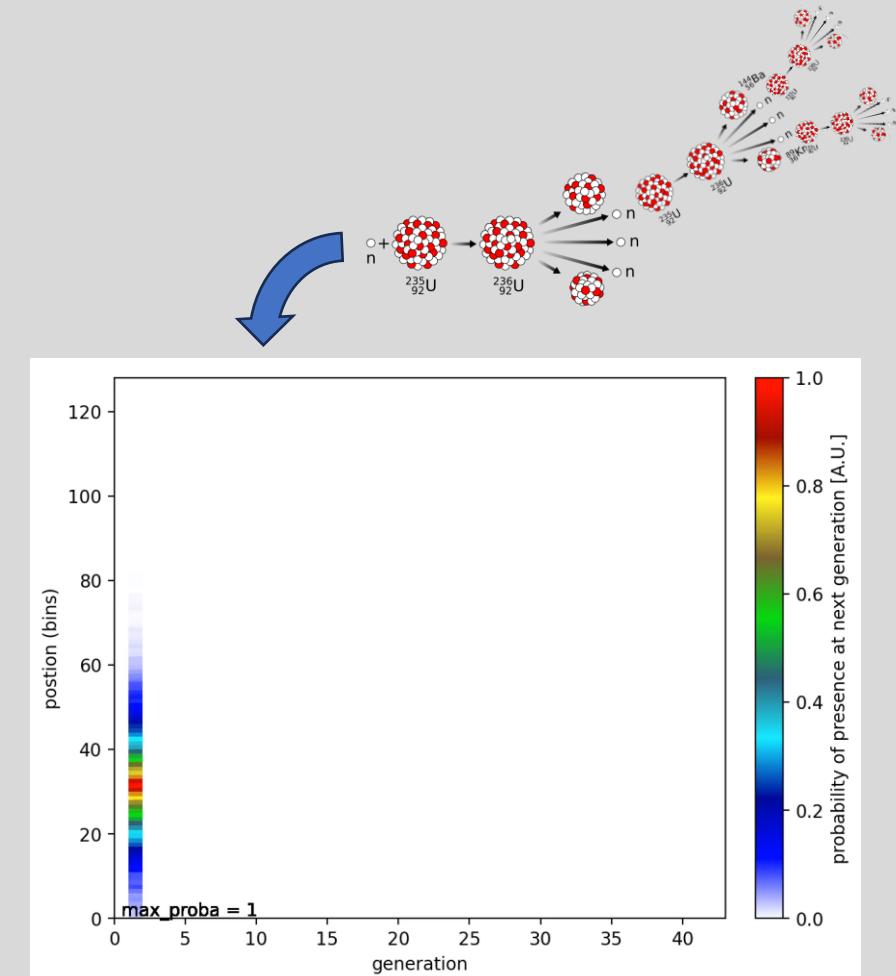
Partie 3 :

Simulation de bruit neutronique

Exemple de chaînes de fission dans un réacteur 1D



Réacteur 1D utilisé pour l'exemple

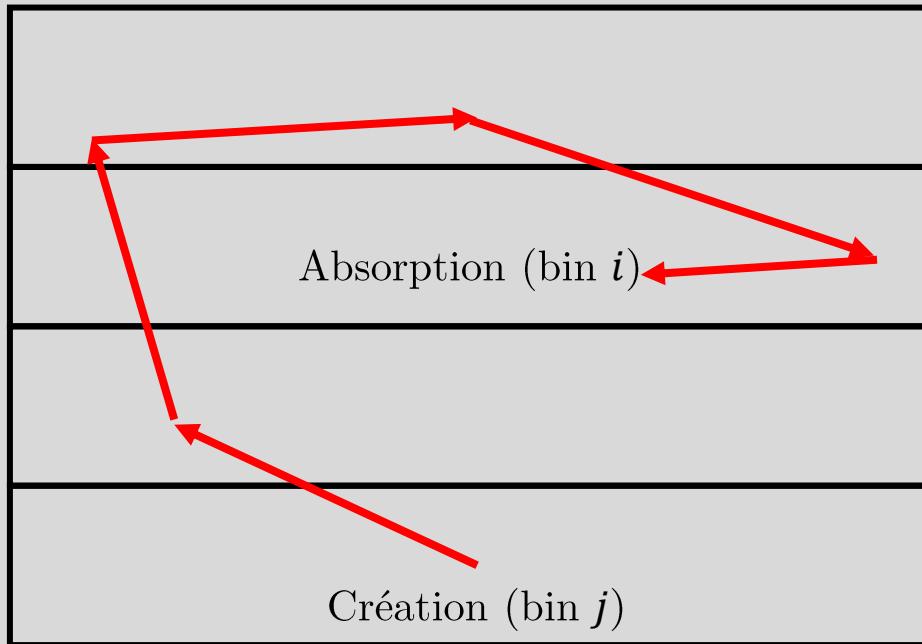


Chaine de fission dans le réacteur 1D
Position des neutrons en fonction de la génération

Accélération du tirage de chaines de fission avec TFM

- TFM est une approche **macroscopique**, réduisant le nombre d'interactions à calculer
- Rappel : seules les réactions d'absorption et de fission sont représentées

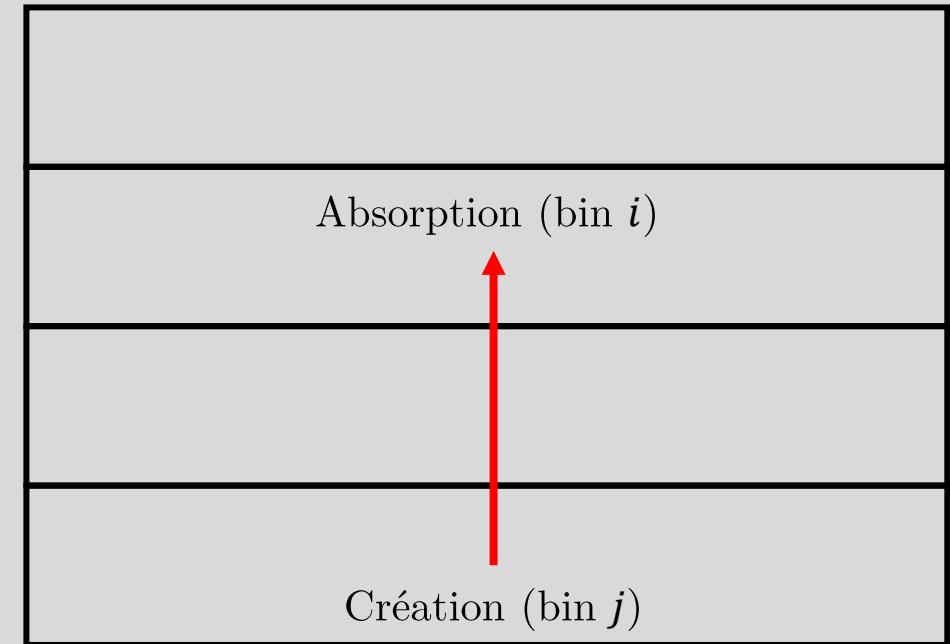
Simulation Monte Carlo classique (cellule j à i)



Beaucoup d'interactions à tirer

$\sim 10^4$ neutrons par seconde

Simulation Monte Carlo avec TFM (cellule j à i)



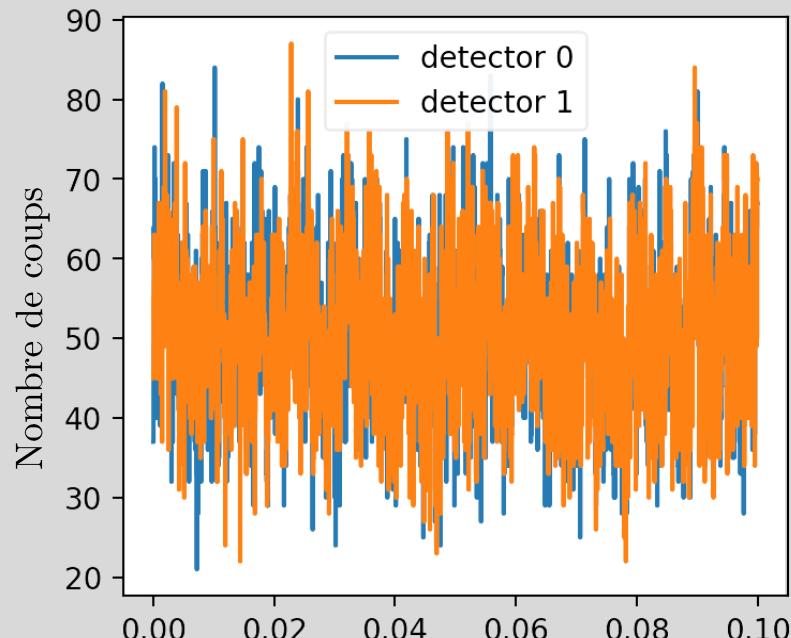
Seule la destination et le choix entre fission et capture à tirer

$\sim 6 \times 10^7$ neutrons par seconde

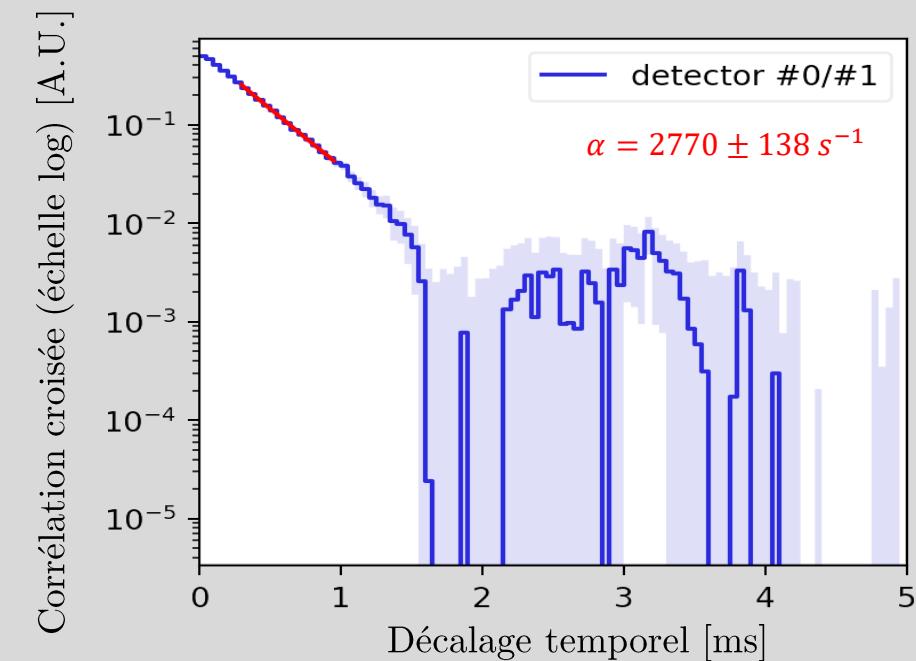
Signaux temporel et traitement du signal (corrélation croisée)

- Méthode utilisée : α -Rossi
 - corrélation croisée de deux signaux temporels
 - Régression avec un modèle exponentiel

$$N(t) = Ae^{-\alpha t} + c$$



- Corrélation croisée des signaux
- Régression
- Jackknife



Signaux temporels d'un signal avec 10^6 détections/sec et une efficacité de détection de 1%. La largeur des bins est de 5.10^{-5} sec

Corrélation croisée du signal avec la régression associée.
L'incertitude est obtenue avec un jackknife.

Partie 4 :

Conclusions et perspectives

Conclusions...

- Un couplage neutronique-thermohydraulique utilisant Ansys Fluent et TFM a été développé
- Les premières études utilisant cet outil ont commencé
 - Benchmark avec CEA/CNRS/Framatome/Orano
 - Études des fluctuations de température dans la cuve du MSFR
- Une méthode pour accélérer la production de chaines de fission a été développée
- Des signaux temporels peuvent être produits et analysés pour retrouver des paramètres cinétiques du réacteur

... et perspectives !

- Produire des chroniques de variation de réactivité pour pouvoir comparer à une expérience dans le réacteur CROCUS (@EPFL)
- Continuer le benchmark CEA/CNRS/Framatome/Orano (rédaction d'un article)
- Générer des signaux de bruit dans un réacteur de grande taille (type EPR) pour étudier des effets de spatialisation et tester les limites des méthodes utilisées
- Creuser le traitement du signal nécessaire pour séparer le bruit lié à la turbulence du bruit lié à la nature aléatoire des chaines de fission à puissance nulle
- Tenter d'utiliser le bruit comme outil de diagnostic sur le MSFR
 - Malfonction d'une pompe
 - Dépôt solide sur les parois du réacteur
 - Mesure de la vitesse de l'écoulement
- (bonus) le développement de la méthode de l'entrée avec les ondes stationnaires

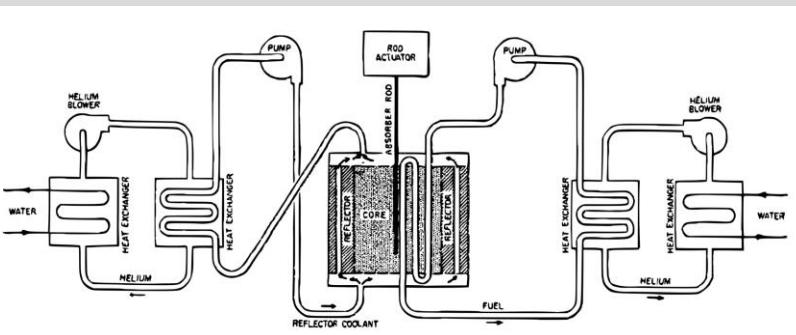
Merci pour votre attention

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à faire du bruit...

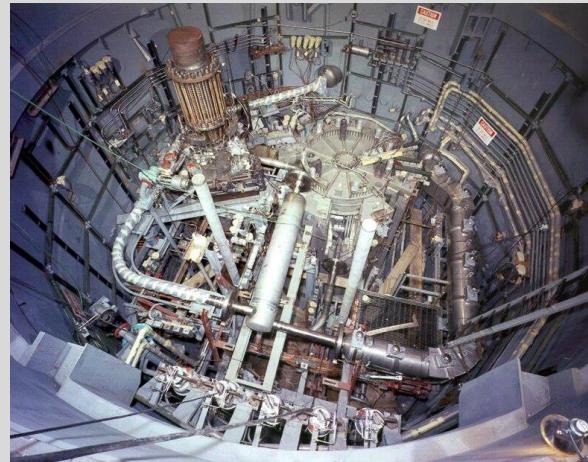
General information on neutron noise

Molten Salt Reactors (MSR) considered:

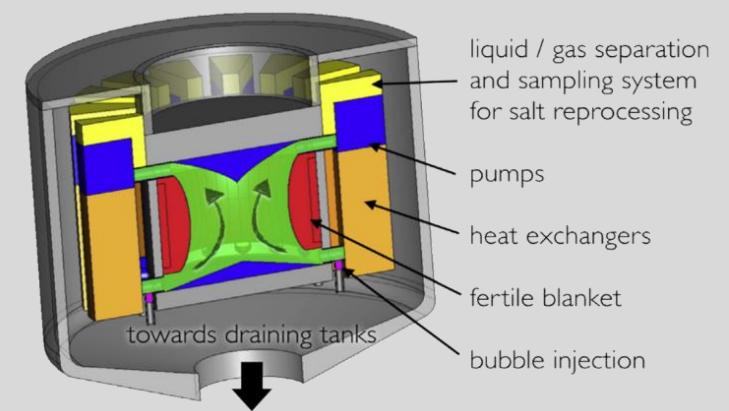
- Liquid fuel
- The fuel is also circulating and serves as coolant (as in most of the concepts)



Scheme of the aircraft reactor experiment (ORNL 1954)



Molten salt reactor experiment (ORNL 1964 – 1969)



Scheme of the molten salt fast reactor (2000 – nowadays)

2.2. Paramètres cinétiques

$\underline{\underline{K}}_{tot} = \begin{pmatrix} \underline{\underline{K}}_{pp} & \underline{\underline{K}}_{dp} \\ \underline{\underline{K}}_{pd} & \underline{\underline{K}}_{dd} \end{pmatrix}$ est l'opérateur de transport complet

- La valeur propre la plus basse est le coefficient de multiplication k_{eff}
- Le vecteur propre est la distribution de neutrons à l'équilibre

$$\underline{\underline{K}}_{tot} \underline{V}_{tot} = k_{eff} \underline{V}_{tot} \quad \text{avec} \quad \underline{V}_{tot} = (\underline{V}_p, \underline{V}_d)$$

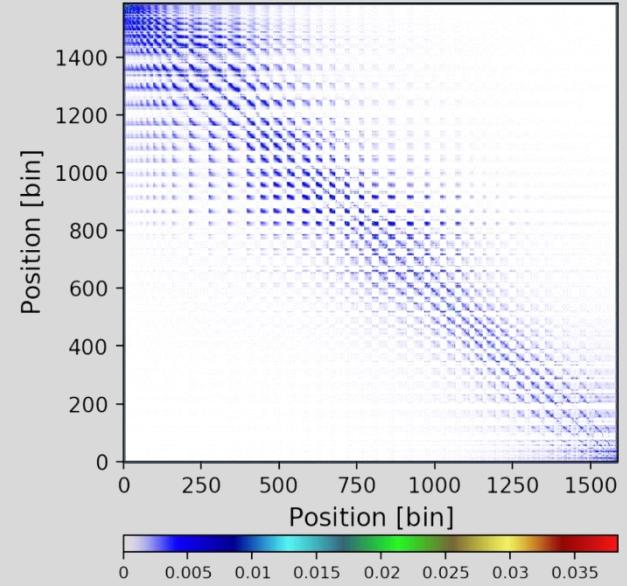
On peut aussi définir l'importance des neutrons en calculant le vecteur propre de l'opérateur transposé (flux adjoint)

$$\underline{\underline{K}}_{tot}^* \underline{V}_{tot}^* = k_{eff} \underline{V}_{tot}^*$$

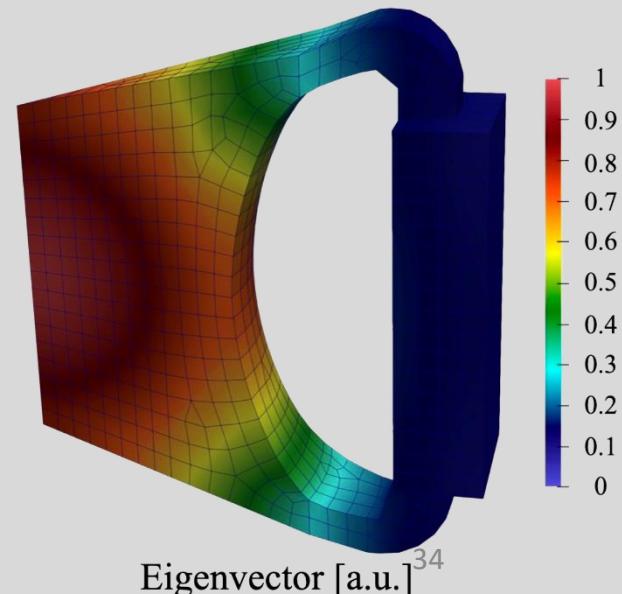
D'autres paramètres cinétiques peuvent être calculés (les versions effectives sont obtenues par pondération par le flux adjoint):

Fraction de neutrons retardés $\beta_0 = \frac{\sum_i (\underline{V}_d)_i}{\sum_i (\underline{V}_{tot})_i}$ et $\beta_{eff} = \frac{\underline{V}_d^* \cdot \underline{V}_d}{\underline{V}_{tot}^* \cdot \underline{V}_{tot}}$

Temps entre deux fissions $l = \frac{\sum_i (\underline{\underline{K}}_{pp} \underline{T}_{pp} \underline{V}_p)_i}{\sum_i (\underline{\underline{K}}_{pp} \underline{V}_p)_i}$ et $l_{eff} = \frac{\underline{V}_p^* \cdot (\underline{\underline{K}}_{pp} \underline{T}_{pp} \underline{V}_p)}{\underline{V}_p^* \cdot (\underline{\underline{K}}_{pp} \underline{V}_p)}$

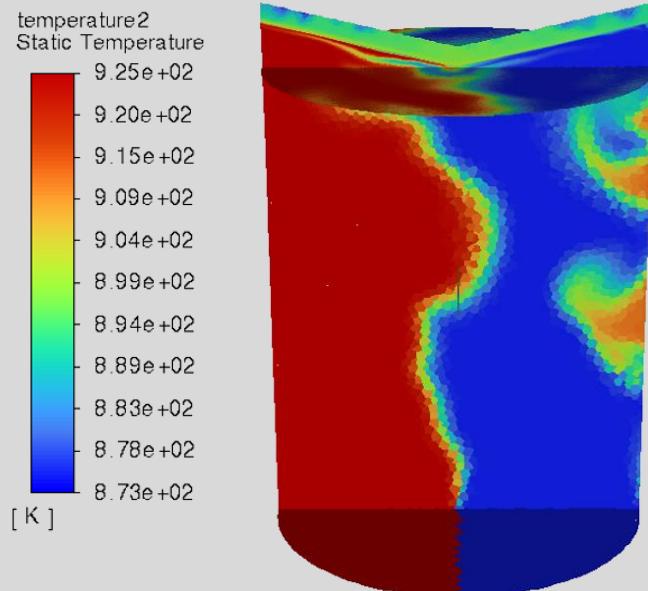


$K_{\chi_p \rightarrow \nu_p}$
Fission : prompt vers
prompt (cas 3D)

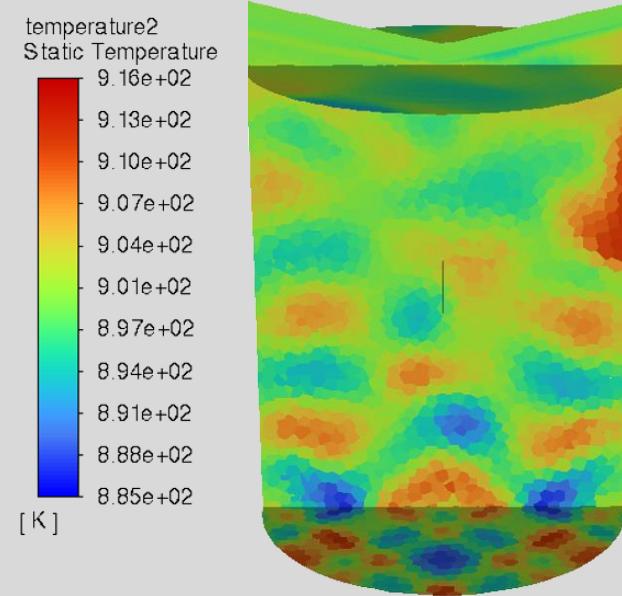


2.4. Fluctuations de température dans la cuve du MSFR

- Développement d'une méthode pour reproduire les variations de vitesse et de température à l'entrée du domaine



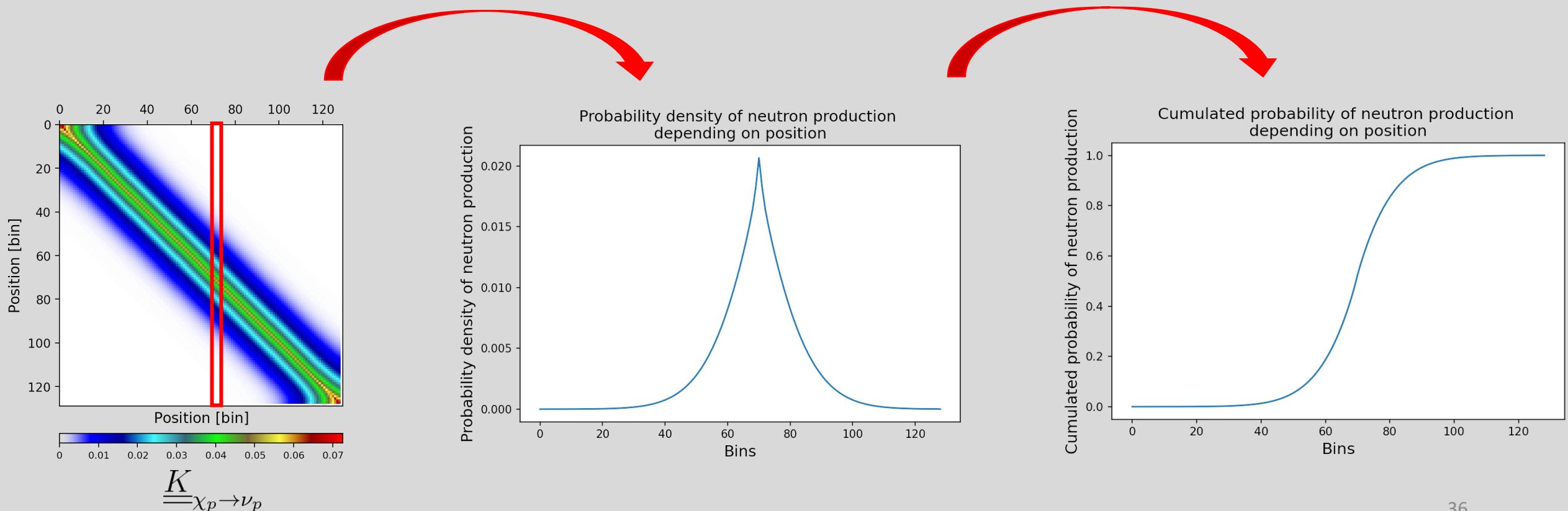
Champ de température obtenu avec une entrée à deux régions



Champ de température obtenu avec une entrée utilisant le modèle d'onde stationnaires

How to sample?

Extract the column from the matrix where the neutron is emitted



$$\frac{K}{\chi_p} \rightarrow \nu_p$$

How to sample?

The cumulated density function is obtained from the matrix column j to choose one destination cell

- Pick a random number in $[0, 1]$ and find which bin i corresponds in the cumulated density function
- Pick another random number in $[0, 1]$. If the result is lower than $\frac{(\underline{\underline{K}} p)_{i \leftarrow j}}{v_p (\underline{\underline{A}} p)_{i \leftarrow j}}$, it is a fission!
- Pick between 2 or 3 neutrons to produce ($\text{avg} = v_i$)
→ Repeat from last fission position for all created neutrons

ction is obtained from the e destination cell

[0, 1] and find which bin i ted density function

ber in [0, 1]. If the result is a fission!

ons to produce ($\text{avg} = v_i$)

n position for all created

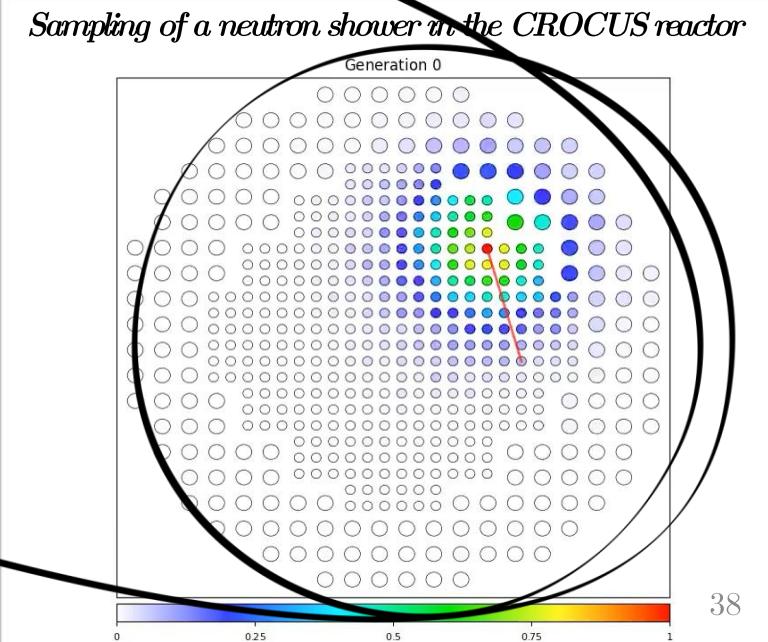
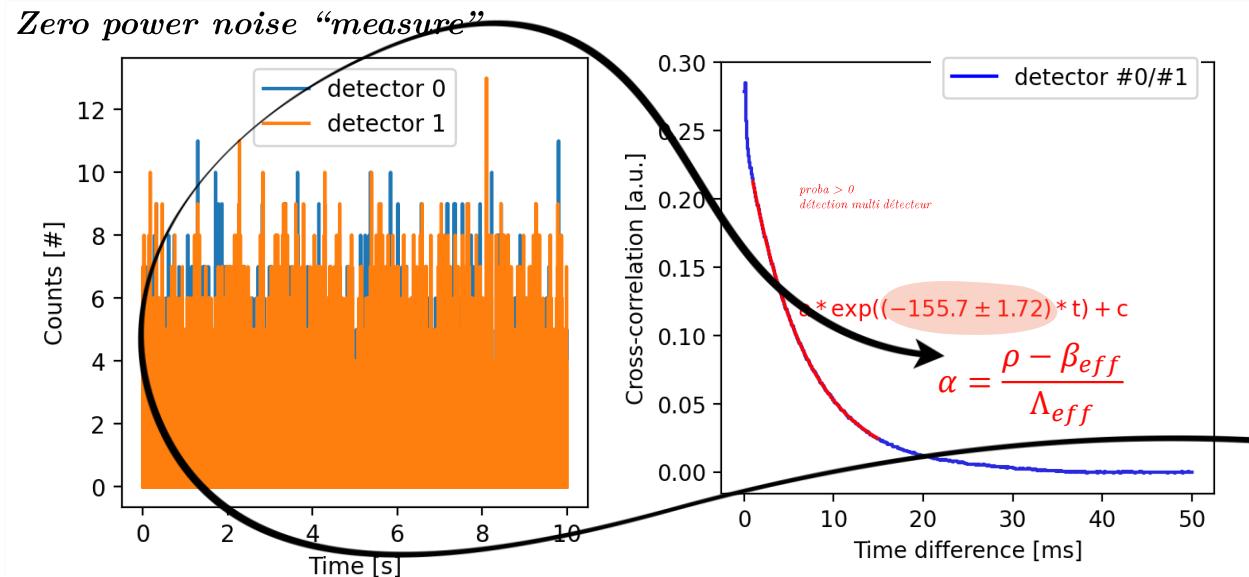
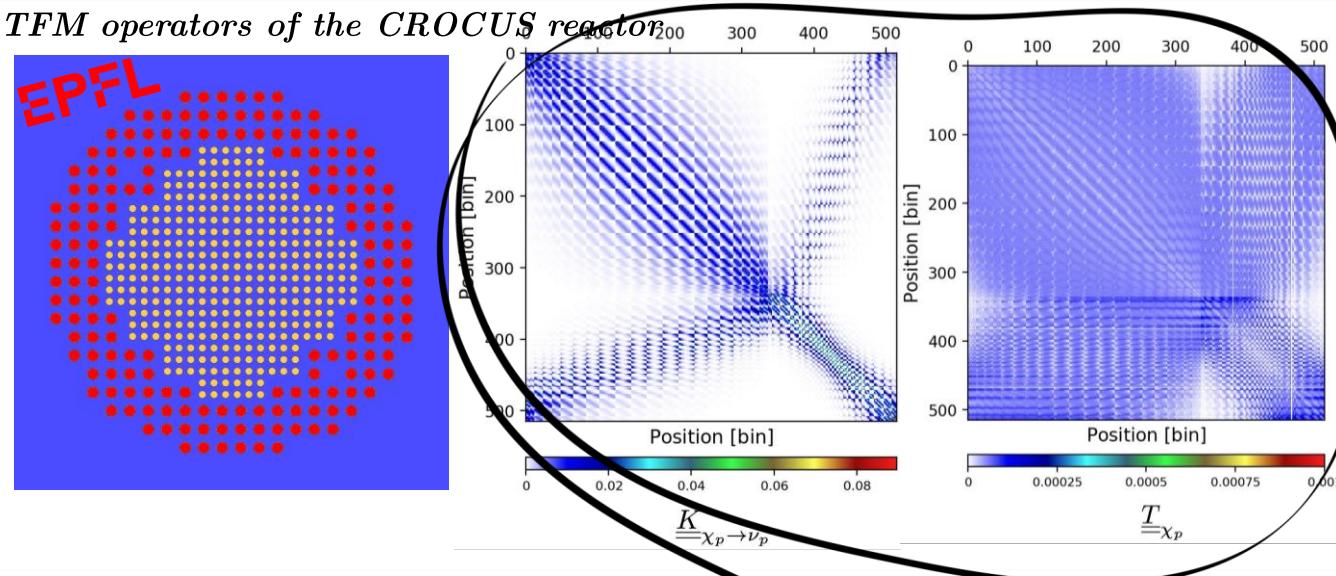
Studies on the CROCUS experimental reactor

Challenges :

- Zero power noise characterizes neutron chains from delayed neutrons
→ What impact does turbulence have on the delayed source ?
- Monte Carlo simulations are excessively long

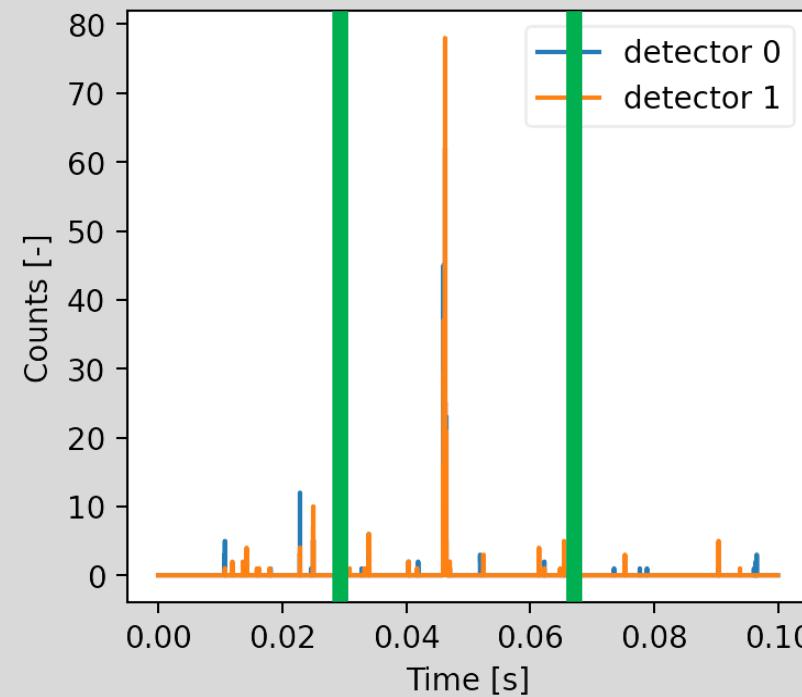
Method

- Use the operators from the TFM approach
→ Space and time
- Sampling of neutron showers and study of the influence of turbulence



3.2. Studies and preliminary results: The jackknife technique

Issues can occur if the count rate is too low and the detector efficiency is high:

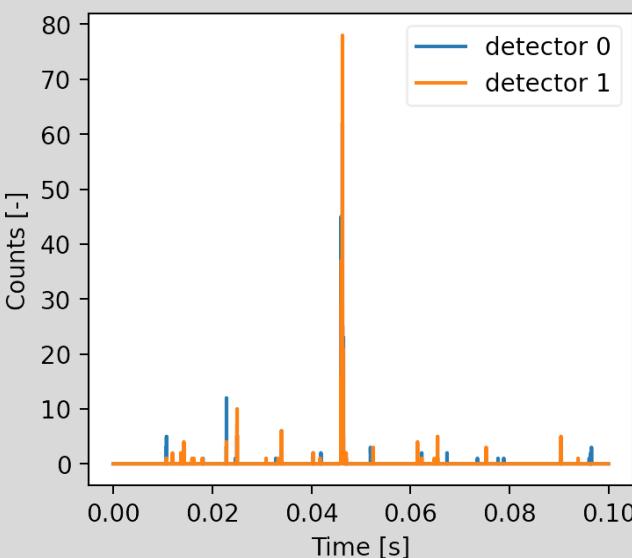


In this case the value of α_i will vary a lot, yielding poor results

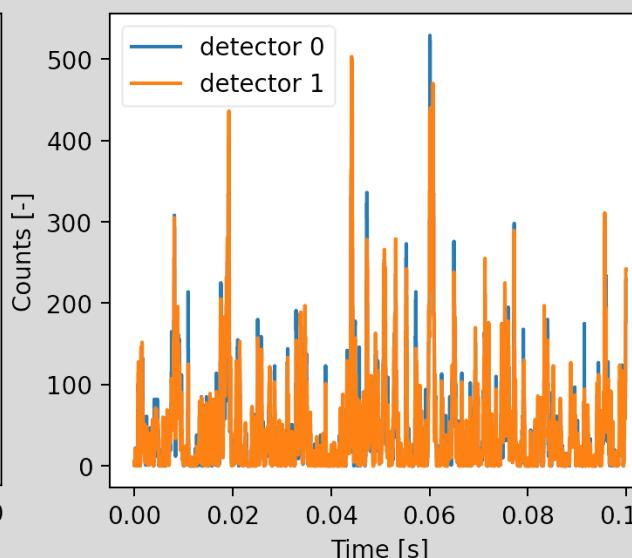
Influence of simulation (“experiment”) configuration

→ Reactor power and detector efficiency can be easily modified

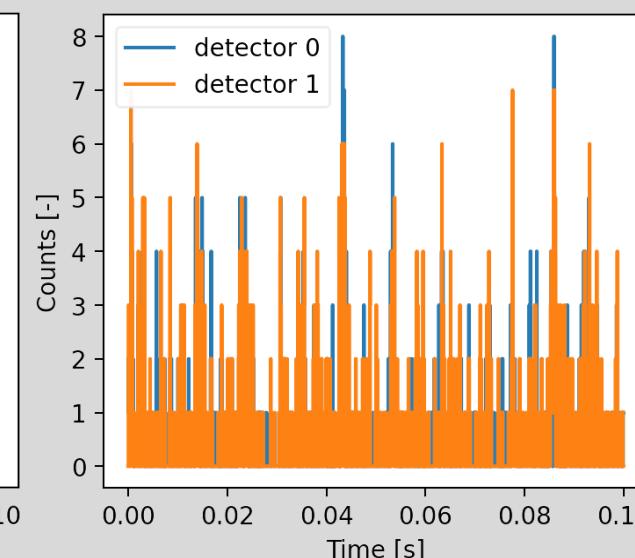
Detections per second = 10^4
Detector efficiency = 100%



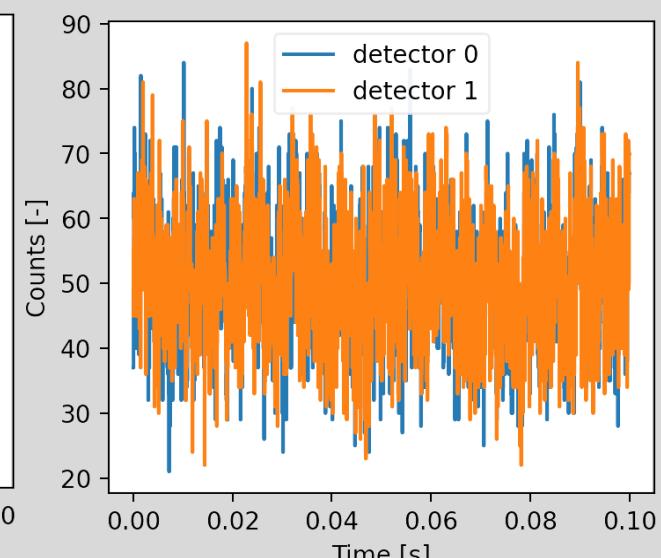
Detections per second = 10^6
Detector efficiency = 100%



Detections per second = 10^4
Detector efficiency = 1%



Detections per second = 10^6
Detector efficiency = 1%

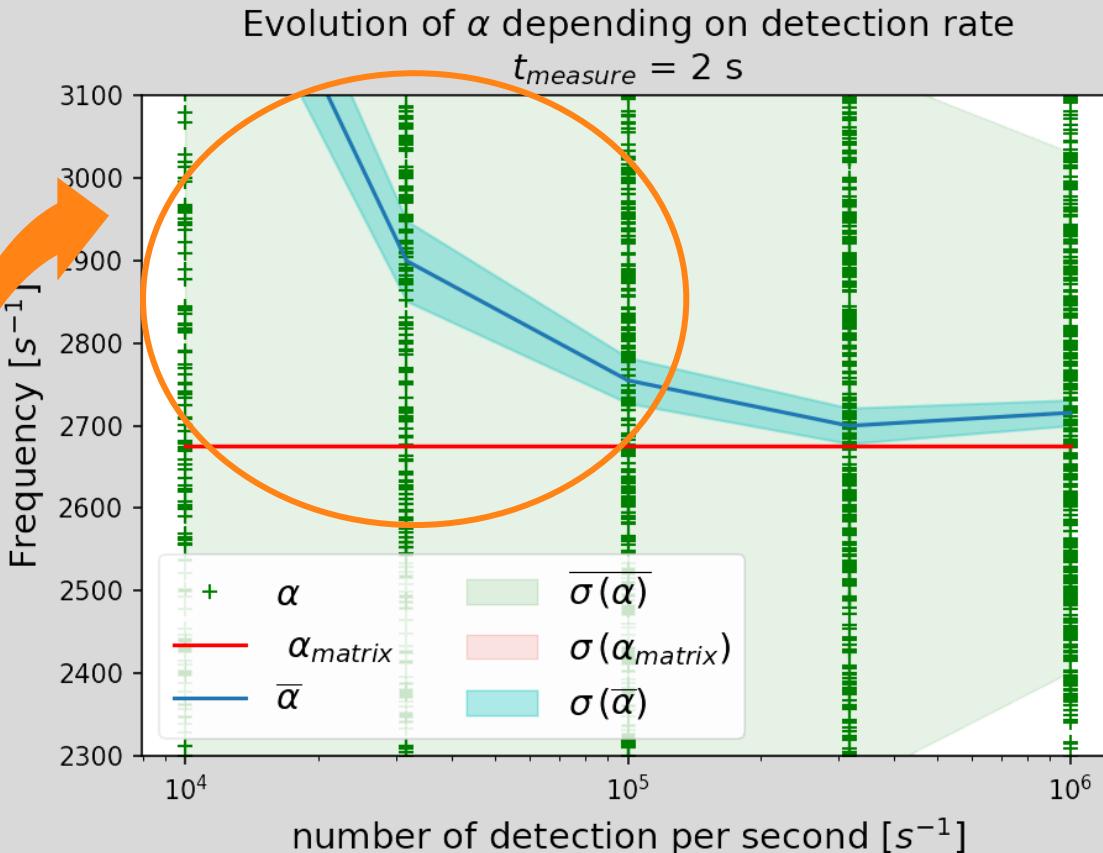


High detector efficiency
Low detector efficiency

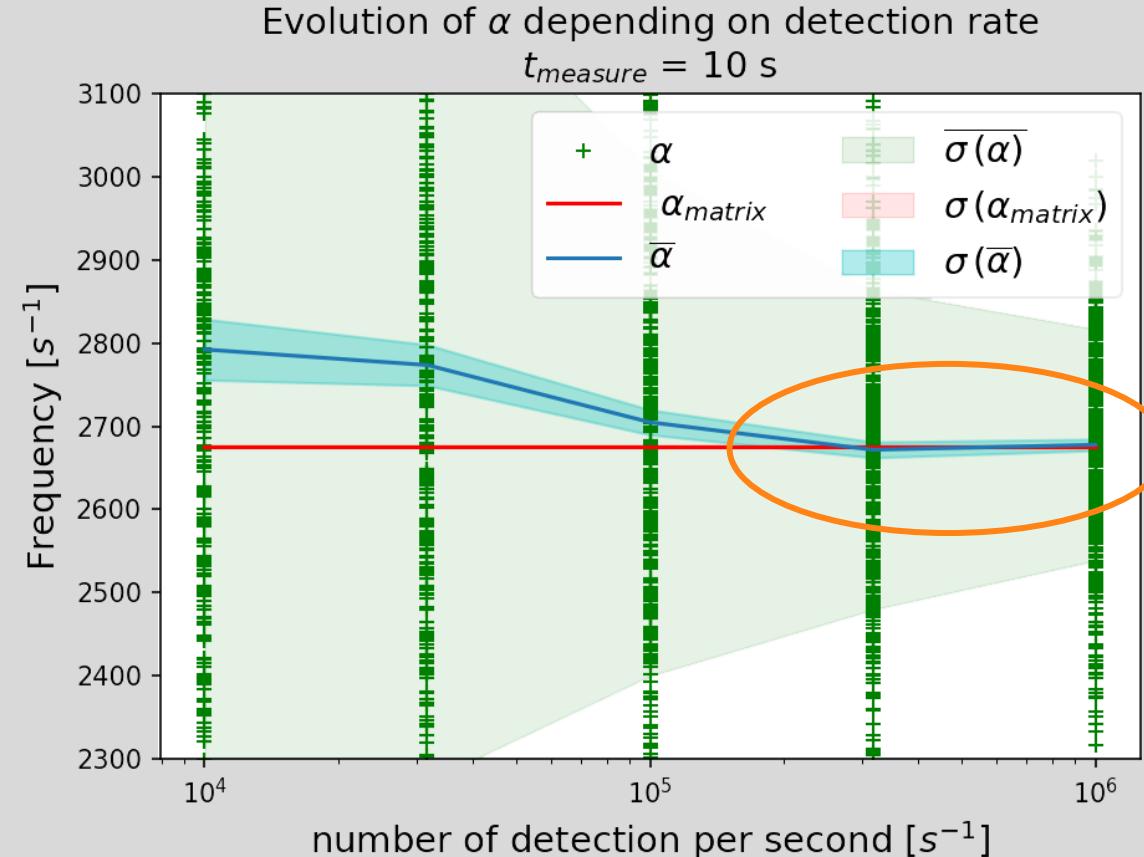
⇒ more time correlated detections
⇒ higher baseline

- Realistic signal requires low detector efficiency
- Typical physical time 2-10 seconds (up to few minutes)

Influence of simulation (“experiment”) configuration: Impact on the α -Rossi

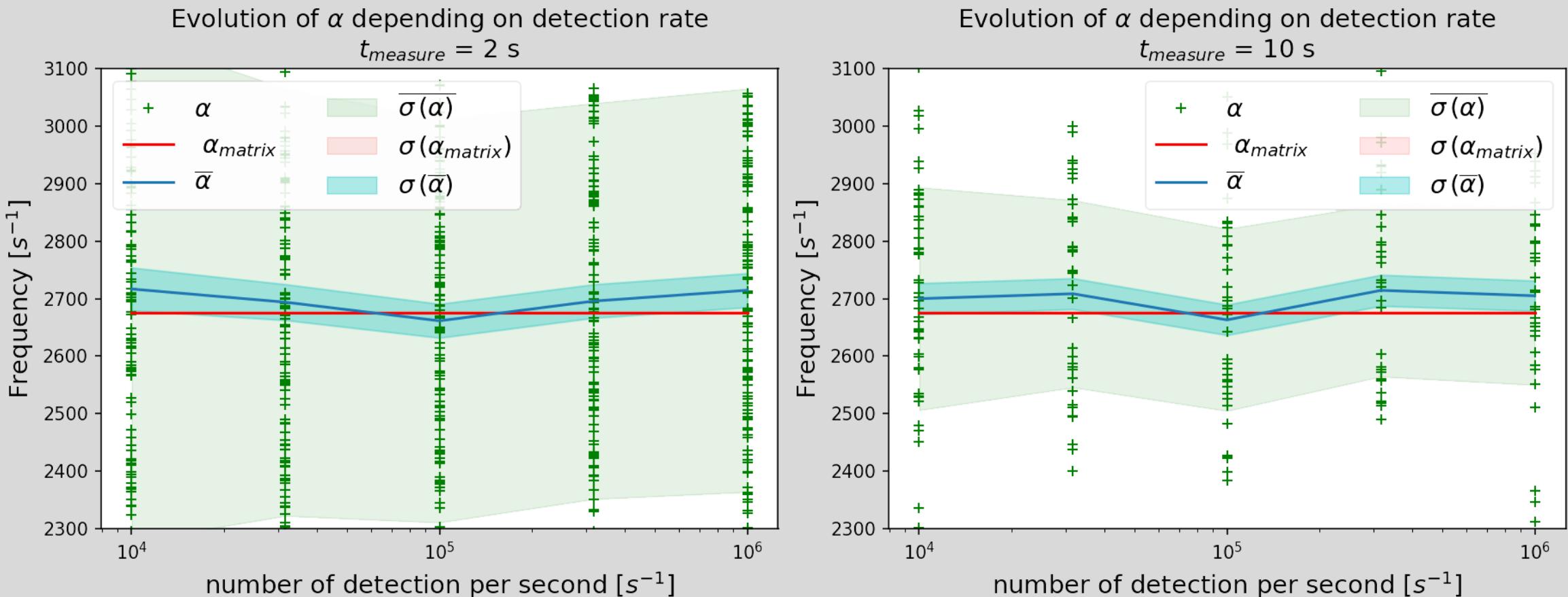


Detector efficiency = 100% → lot of singular events
 → poor results with low count rates and low measure times



Good results requires a longer simulated time and high count rate, especially if the detector efficiency is high

Influence of simulation (“experiment”) configuration: Impact on the α -Rossi



With lower detector efficiency (1%), the **results are compatible with the expected value**. To confirm this conclusion, more simulations need to be carried out to reduce further the uncertainty on the “measurement”. Unfortunately, this requires a lot of time (1% detector efficiency \rightarrow thousands of simulations and ~ 15 minutes per simulation on 160 threads)

Estimation des erreurs liées au modèle



Les résultats sont compatibles avec la valeur attendue (calculée avec TFM)