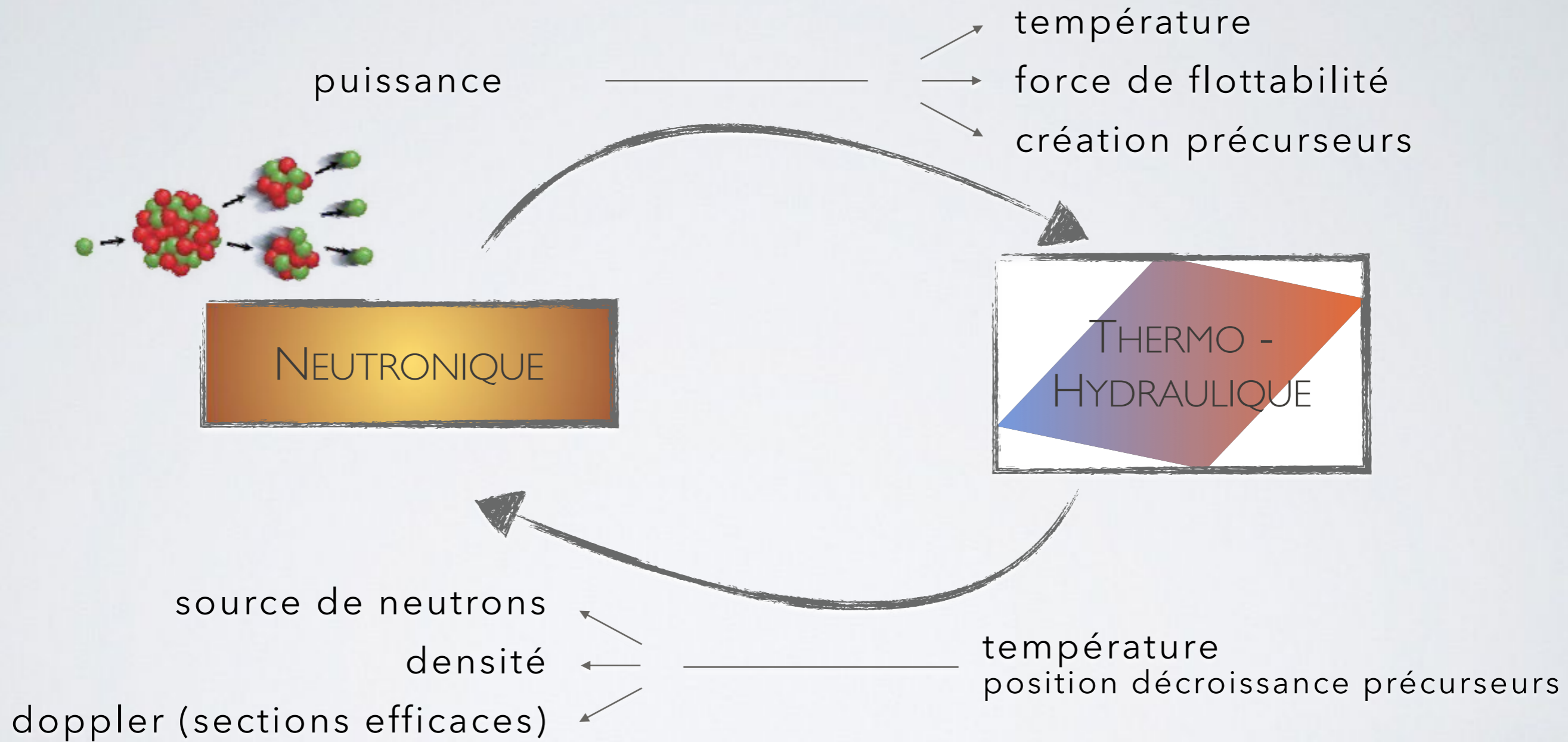
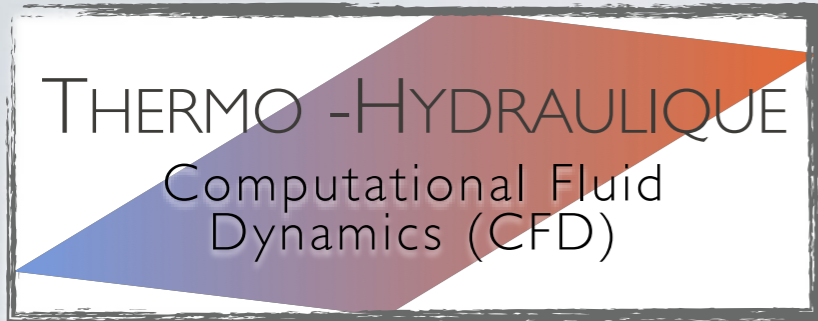

OUTILS DE CALCULS DE TRANSITOIRE DU MSFR : APPROCHE DES MATRICES DE FISSION

AXEL LAUREAU

I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE



I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE



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

densité
vitesse

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

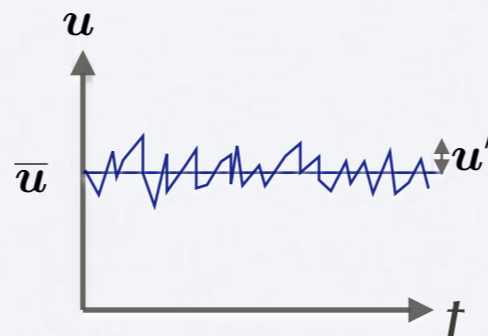
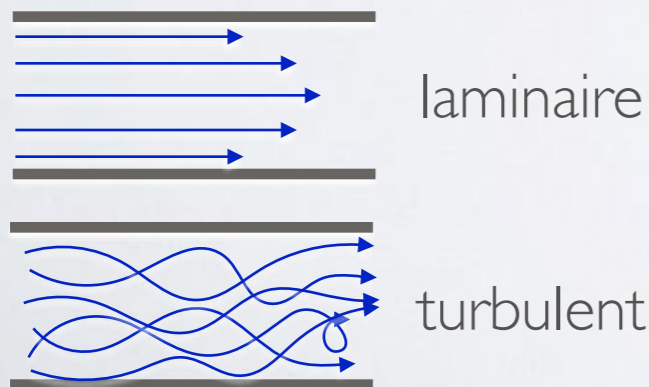
quantité mouvement
pression
tenseur des contraintes
forces extérieures

énergie interne et cinétique

$$\frac{\partial \rho \left(e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \left(e + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right) \mathbf{u} \right) = -\nabla \cdot (p \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}} \cdot \mathbf{u}) + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot (\mathbf{q})$$

transfert de chaleur

« Quand je rencontrerai Dieu, je lui demanderai deux choses : pourquoi la relativité, et pourquoi la turbulence ? Je suis sûr qu'il aura une réponse à la première question... »
Werner Heisenberg



$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad \text{vitesse}$$

$$p = \bar{p} + p' \quad \text{pression}$$

$$e = \bar{e} + e' \quad \text{énergie}$$

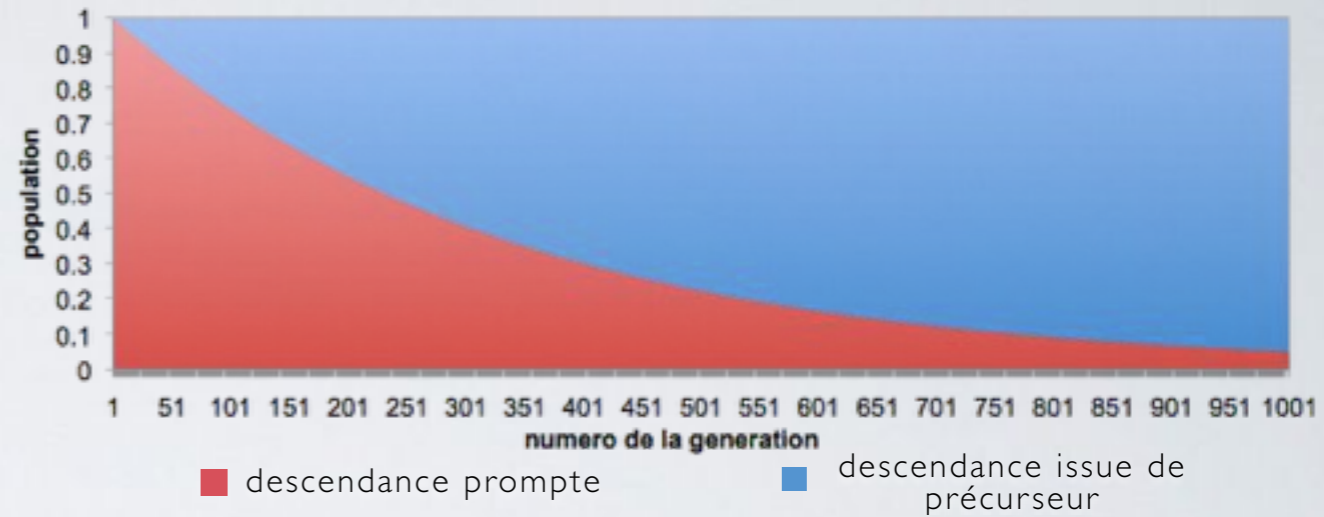
$$T = \bar{T} + T' \quad \text{température}$$

moyenne résolue
fluctuation modélisée

II. APPROCHE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE PAR SUCCESSION DE GERBES

Réacteur critique
=

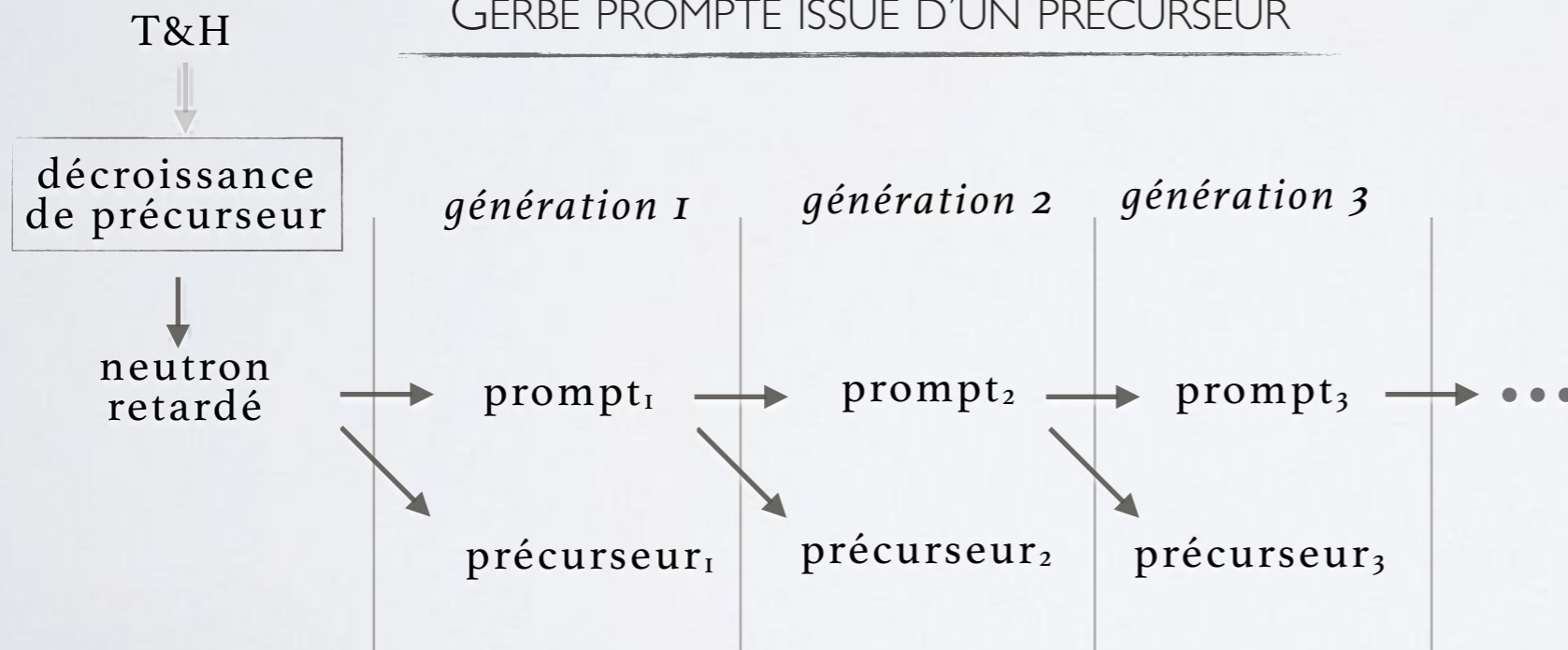
Système sous-critique prompt + Source extérieure de neutrons : les neutrons retardés



$$k_p + \beta_{\text{eff}} = 1$$

$$k_p < 1$$

GERBE PROMPTE ISSUE D'UN PRÉCURSEUR



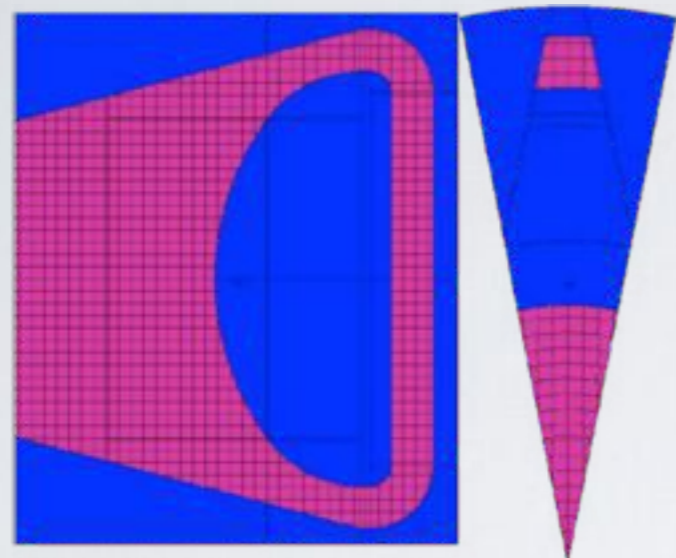
Condition d'équilibre :
la gerbe issue de la décroissance d'un précurseur crée, en moyenne, un nouveau précurseur

$$\sum_{g=1}^{\infty} \text{precurseur}_g = 1$$

représentative du flux en réacteur !

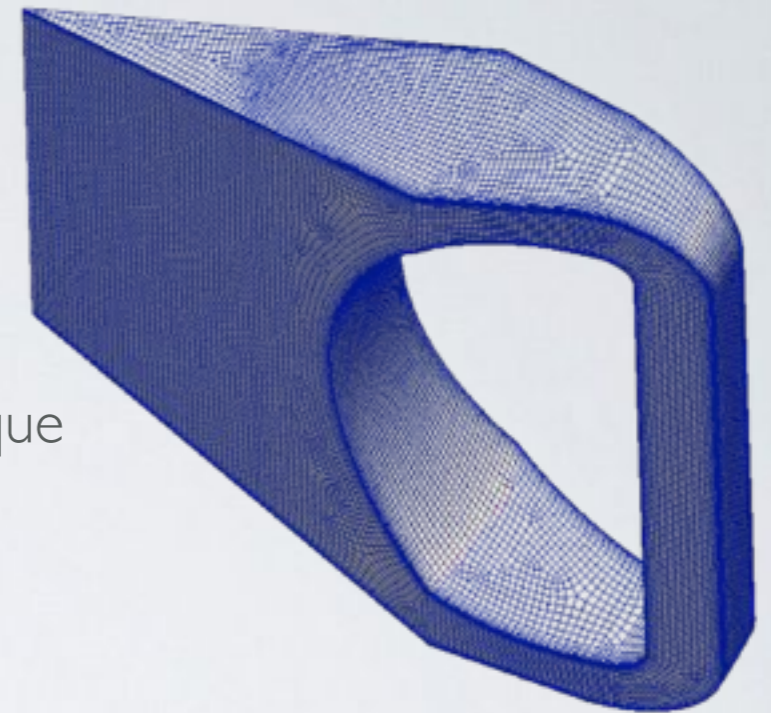
II. APPROCHE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE PAR SUCCESSION DE GERBES

ÉTUDE STATIONNAIRE :



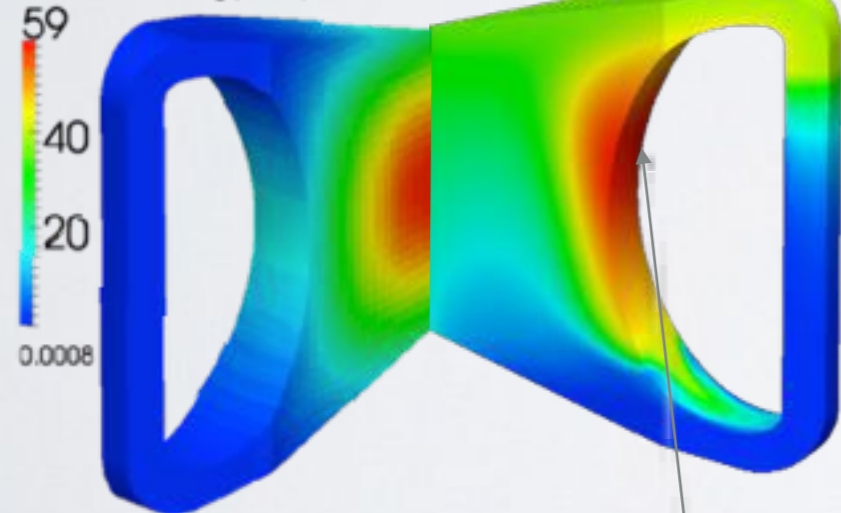
thermo-hydraulique
OPENFOAM

A 3D visualization of the reactor core geometry, showing the complex internal structure and flow paths. The model is used for thermo-hydraulic calculations with OpenFOAM.



$\text{MeV/m}^3/\text{src}$

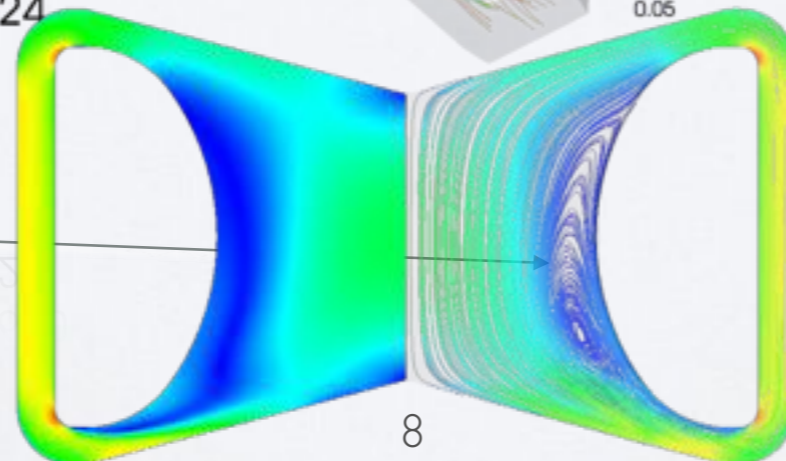
equilibrium energy deposition



$T^\circ\text{C}$
770
760
720
680
640
624

effet de la recirculation
sur la temperature

A 3D plot showing the temperature distribution in the reactor core. The color scale ranges from 624 (blue) to 770 (red) $^\circ\text{C}$. The plot shows a high temperature region in the center of the core, with a note indicating the effect of recirculation on the temperature.



$\Sigma\lambda_i C_i$

decaying precursors

1.63
1.6
1.5
1.4
1.3
1.2
1.17

U Magnitude
9
8
6
4
2
0.01

energy deposition - first cycle

17.46
15
12.5
10
7.5
5
4.073

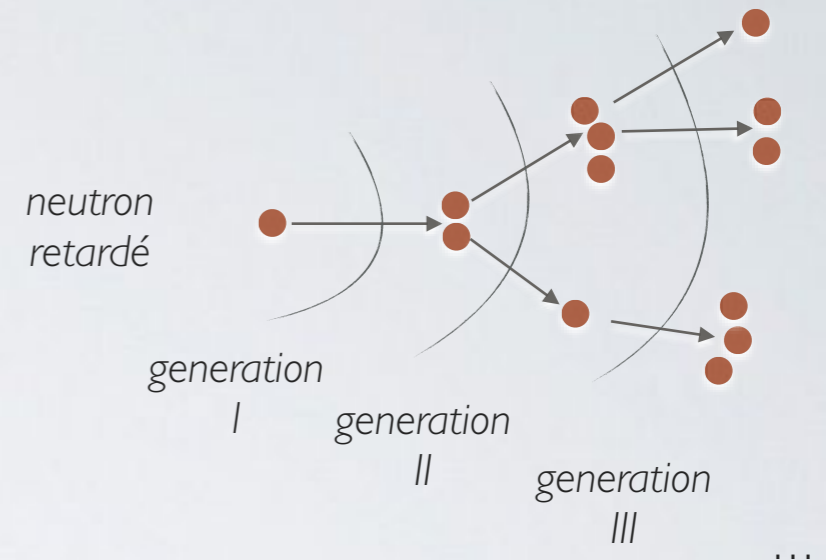
décroissance des
précurseurs
dans une zone de faible
importance

A 3D plot showing the energy deposition in the reactor core during the first cycle. The color scale ranges from 4.073 (blue) to 17.46 (red) $\text{MeV/m}^3/\text{src}$. The plot shows a high energy deposition region in the center of the core, with a note indicating the decay of precursors in a region of low importance.

PLAN DE LA PRÉSENTATION

Pour faire des transitoires ... (suivi de charge, perte de pompe, ...)

- *La distribution des précurseurs va varier dans le temps ...*
- *Et si $k_p > 1$... gerbe prompte infinie ?*
- *Calcul Monte Carlo = temps de calcul élevé*



I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE

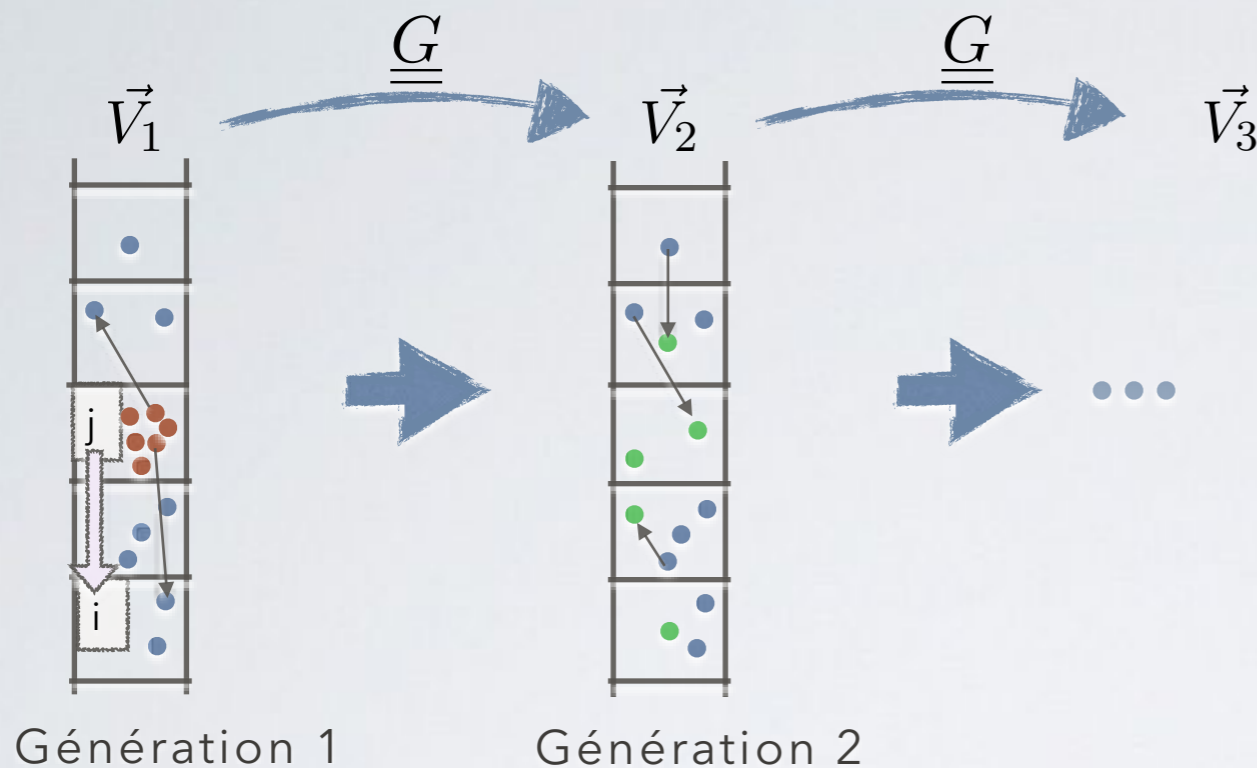
II. APPROCHE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE PAR SUCCESSION DE GERBES

- GERBE PROMPTE
- ÉTUDE STATIONNAIRE

III. DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

- MATRICE DE FISSION / APPROCHE TFM
- BENCHMARK TFM
- ÉTUDE DE TRANSITOIRES

III. DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION - MATRICE DE FISSION



PRINCIPE GLOBAL :
CARACTÉRISER LA RÉPONSE DU SYSTÈME

Élément ij de la matrice : probabilité qu'un neutron source créé en j fasse un neutron de fission en i

matrice discrétisée suivant le temps pour capter la réponse temporelle (objectif : calcul de transitoires) : Transient Fission Matrix (TFM)

avec $S(t, \mathbf{r})$ la distribution de source de neutrons en neutron par seconde en \mathbf{r} à l'instant t

avec $G(t' - t, \mathbf{r}', \mathbf{r})$ l'opérateur continu associé à la matrice de fission :

la probabilité qu'un neutron créé en t', \mathbf{r}' crée un nouveau neutron en t, \mathbf{r}

l'équation donnant l'évolution de la population prompte est donnée par le produit de convolution :

$$S(\mathbf{r}, t) = \int_{\mathbf{r}'} \int_{t' < t} G_{\chi_p \nu_p}(t' - t, \mathbf{r}', \mathbf{r}) \cdot S(\mathbf{r}', t') d\mathbf{r}' dt' = \langle G_{\chi_p \nu_p}(t' - t, \mathbf{r}', \mathbf{r}) | S(\mathbf{r}', t') \rangle$$

↑

spectre énergétique
des neutrons prompts

↑

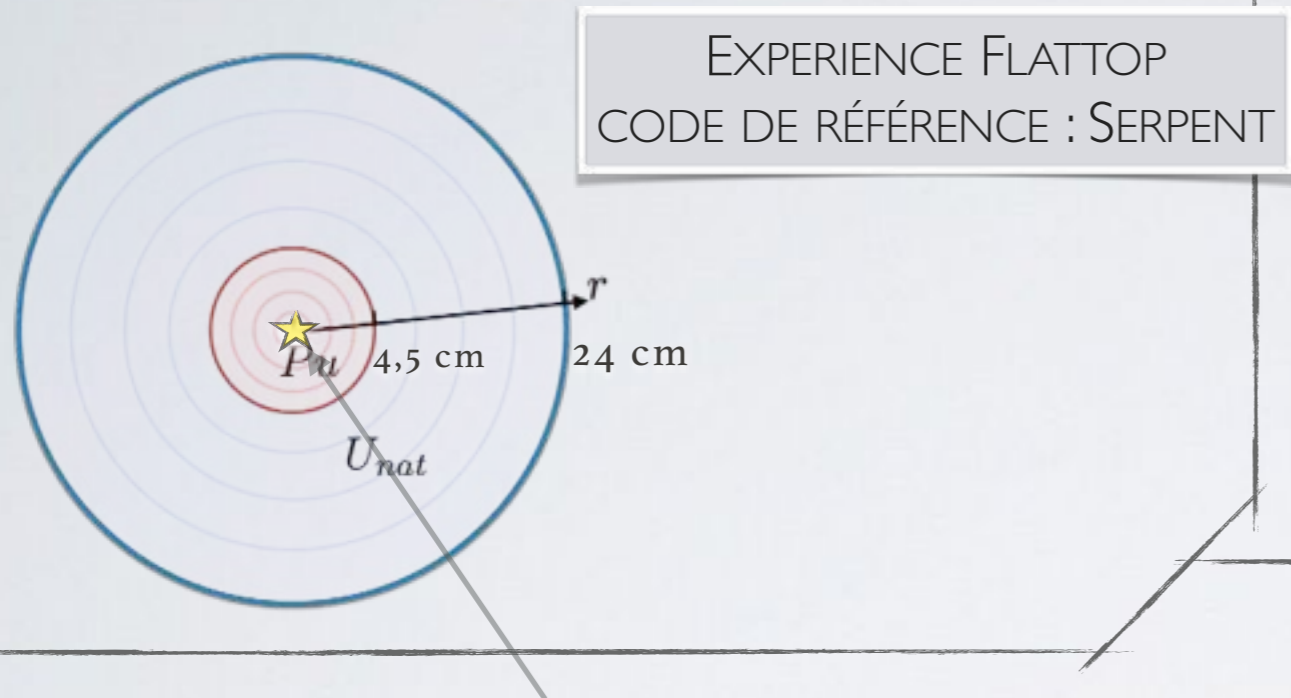
quantité de neutron
prompt par fission

TESTONS L'ASPECT TEMPOREL AJOUTÉ À L'APPROCHE

III.

DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

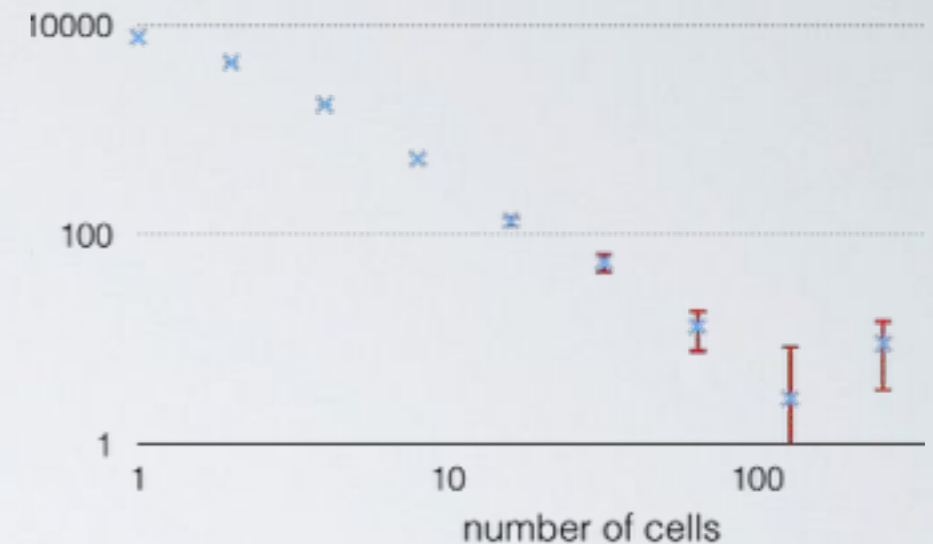
BENCH CASE



libération d'un burst de neutrons au centre

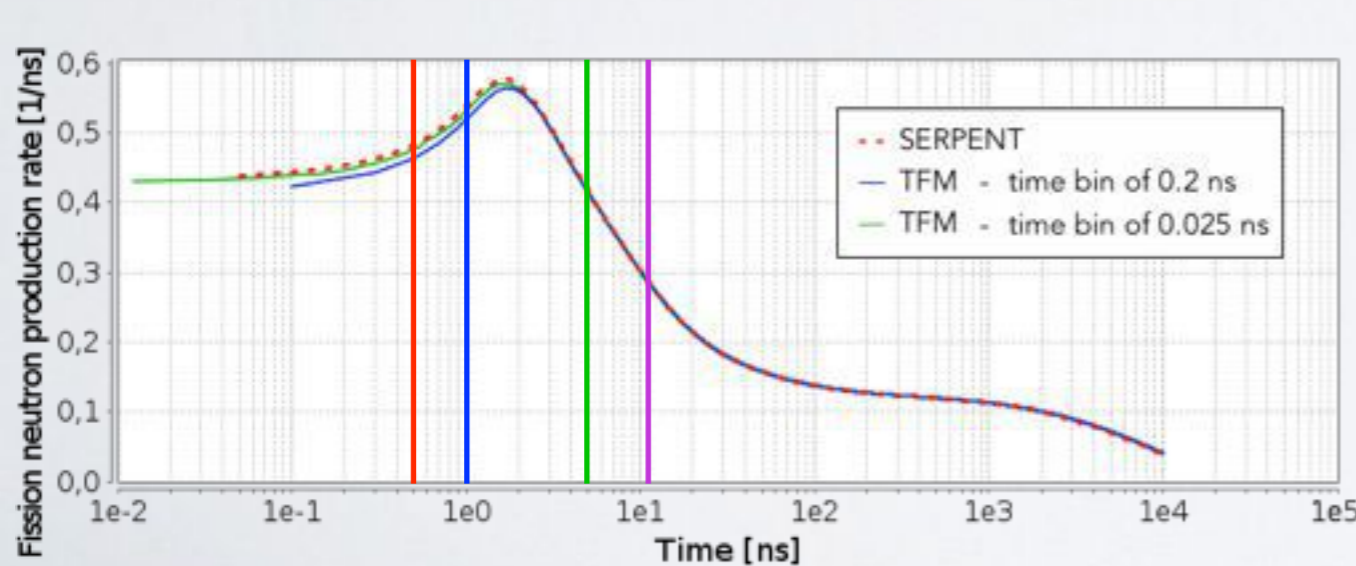
ACCORD STATIQUE (MODE FONDAMENTAL)

Δk_p - pcm
ref vs TFM

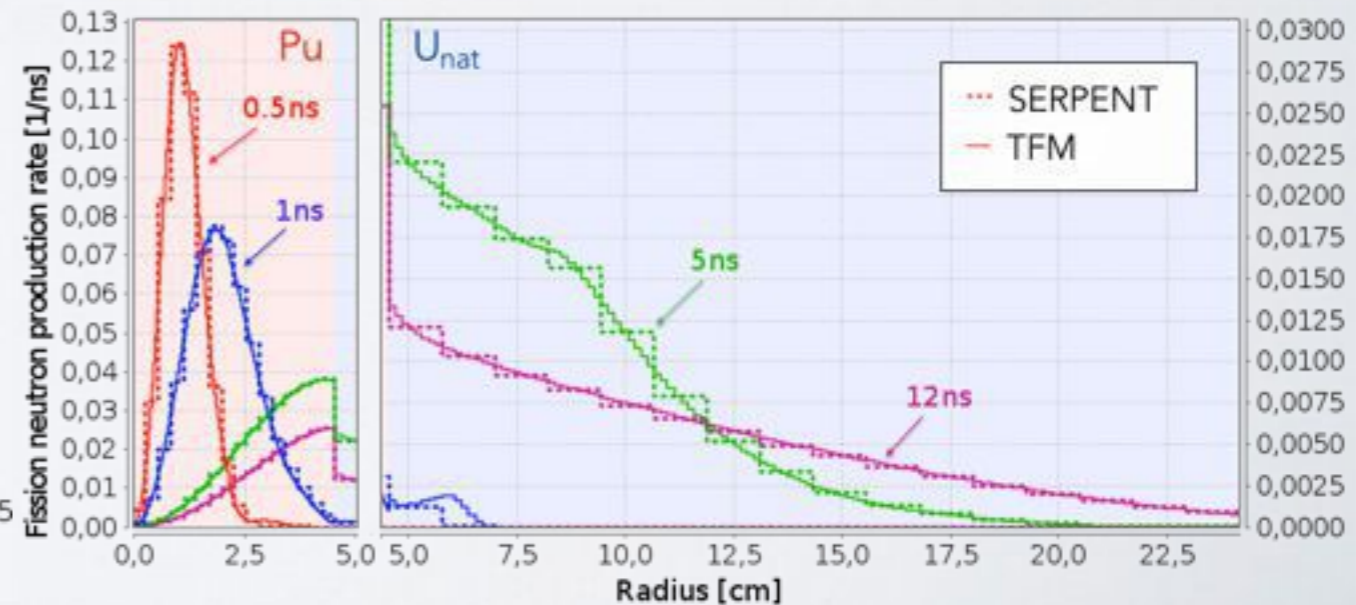


ACCORD ÉVOLUTION

$$S(t, \mathbf{r}) = \langle G_{\chi_p \nu_p}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) | S(t', \mathbf{r}') \rangle$$



Évolution temporelle (intégrée en espace)



Évolution spatiale (à quelques instants)

AJOUTONS DES PRÉCURSEURS ...

$$\frac{dP_i}{dt}(t, \mathbf{r}) = \beta_i \langle G_{\chi_p \nu_d}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) | S(t', \mathbf{r}') \rangle + \beta_i \langle G_{\chi_d \nu_d}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) | \sum_i \lambda_i P_i(t', \mathbf{r}') \rangle - \lambda_i P_i$$

$\sum_i \beta_i = 1$

Famille i de précurseur précurseur précurseur constante de décroissance

$$S(t, \mathbf{r}) = \langle G_{\chi_p \nu_p}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) | S(t', \mathbf{r}') \rangle + \langle G_{\chi_d \nu_p}(t - t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) | \sum_i \lambda_i P_i(t', \mathbf{r}') \rangle$$

prompt prompt précurseur

... ET VÉRIFIONS

method	β_{eff}	Λ_{eff}	α_{Rossi}
TFM	$182.5 \pm 0.8 \text{ pcm}$	$2.9147 \pm 0.0002 \text{ ns}$	$0.626 \pm 0.003 \mu\text{s}^{-1}$
SERPENT adjoint	$182 \pm 3 \text{ pcm}$	$2.876 \pm 0.003 \text{ ns}$	$0.63 \pm 0.0110 \mu\text{s}^{-1}$
experimental	-	-	$0.64 \pm 0.1 \mu\text{s}^{-1}$

EXPERIENCE FLATTOP

III.

DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

ET POUR DES ÉTUDES DE TRANSITOIRES ?

problème I : équation lourde à résoudre, on simplifie : $\tilde{G}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = \int_{t-t'} G(t-t', \mathbf{r}', \mathbf{r}) d(t-t')$

Équations simplifiées : on utilise $N(t, \mathbf{r})$ la population de neutrons et l_{eff} le temps de fission à fission

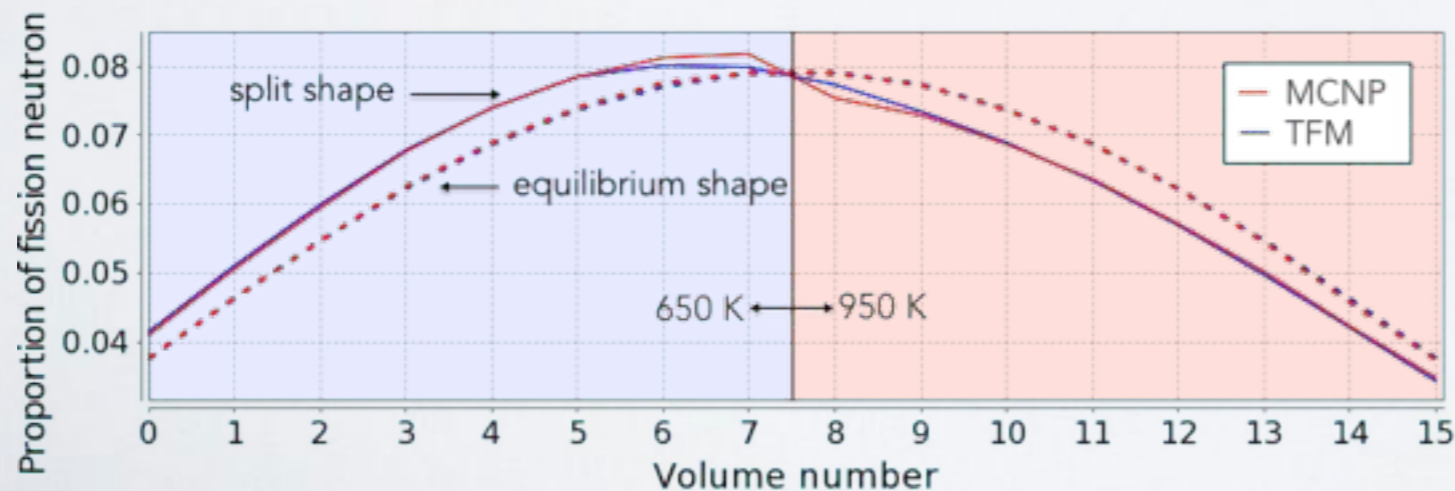
$$\frac{dP_i}{dt}(t, \mathbf{r}) = \beta_i \left[\overset{\text{précurseur} \leftarrow}{\frac{1}{l_{eff}} \langle \tilde{G}_{\chi p \nu_d}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | N(t, \mathbf{r}') \rangle} + \overset{\text{précurseur} \leftarrow}{\langle \tilde{G}_{\chi d \nu_d}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | \sum_i \lambda_i P_i(t, \mathbf{r}') \rangle} \right] - \lambda_i P_i(t, \mathbf{r})$$

$$\frac{dN}{dt}(t, \mathbf{r}) = \underset{\text{prompt} \leftarrow}{\frac{1}{l_{eff}} \langle \tilde{G}_{\chi p \nu_p}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | N(t, \mathbf{r}') \rangle} + \underset{\text{prompt} \leftarrow}{\langle \tilde{G}_{\chi d \nu_p}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | \sum_i \lambda_i P_i(t, \mathbf{r}') \rangle} - \underset{\text{précurseur}}{\frac{1}{l_{eff}} N(t, \mathbf{r})}$$

problème II : la température varie dans le temps ... on utilise une interpolation

$$\tilde{G}_{interpolee}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) = \tilde{G}_{ref}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) + (T(\mathbf{r}') - T_{ref}(\mathbf{r}')) \cdot \Delta_{\rho} \tilde{G}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) + \log \frac{T(\mathbf{r}')}{T_{ref}(\mathbf{r}')} \cdot \Delta_{Doppler} \tilde{G}(\mathbf{r}', \mathbf{r})$$

Vérification sur un réacteur 1D avec la composition du MSFR :



k_p variation : $-1121 \pm 4 \text{ pcm}$
 erreur de la prédiction : $-8 \pm 7 \text{ pcm}$

III.

DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

PREMIERS RÉSULTATS (PRÉLIMINAIRES) : SUR-REFROIDISSEMENT (1/16 DU MSFR)

