

---

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

---

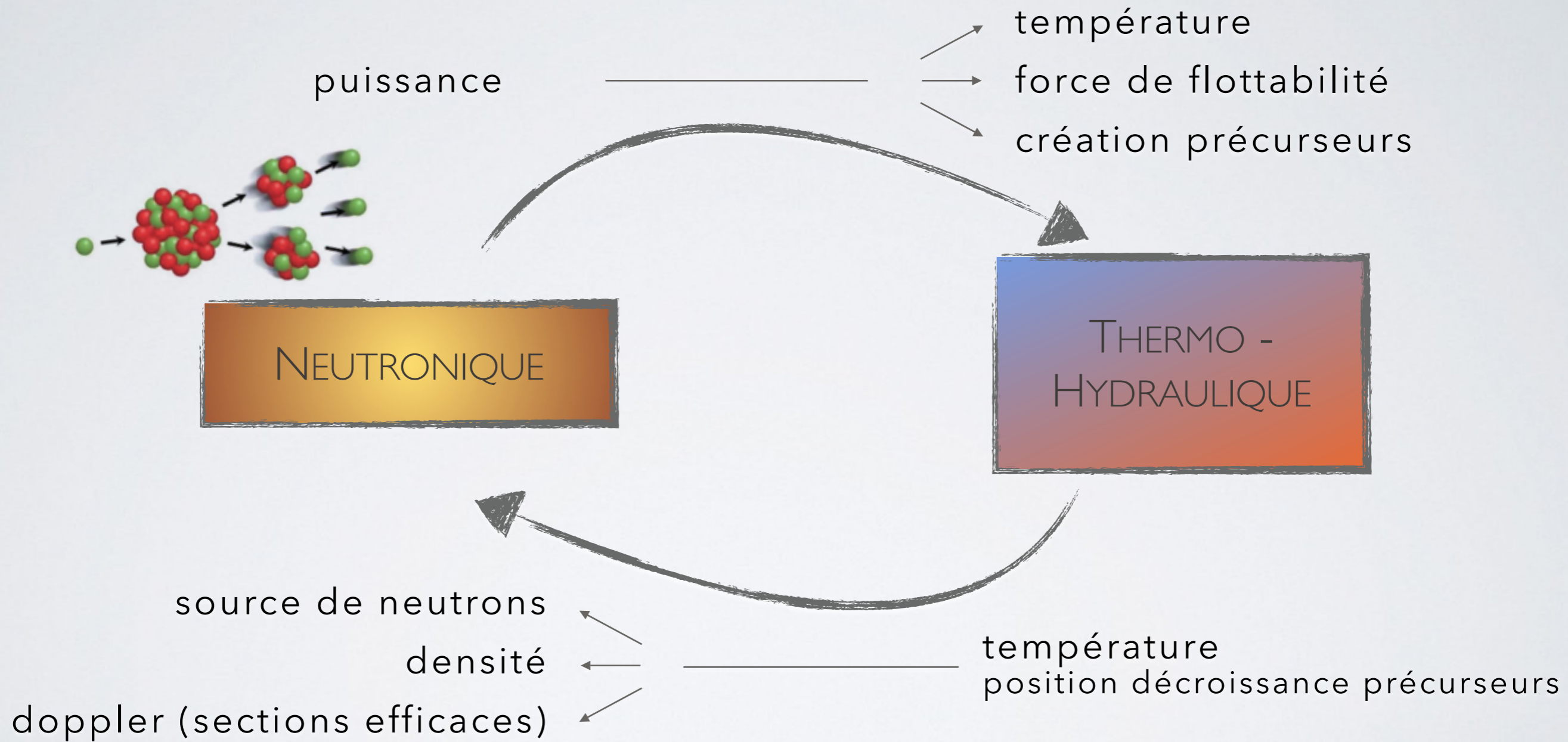
AXEL LAUREAU

# PLAN DE LA PRÉSENTATION

---

- 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

# I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE

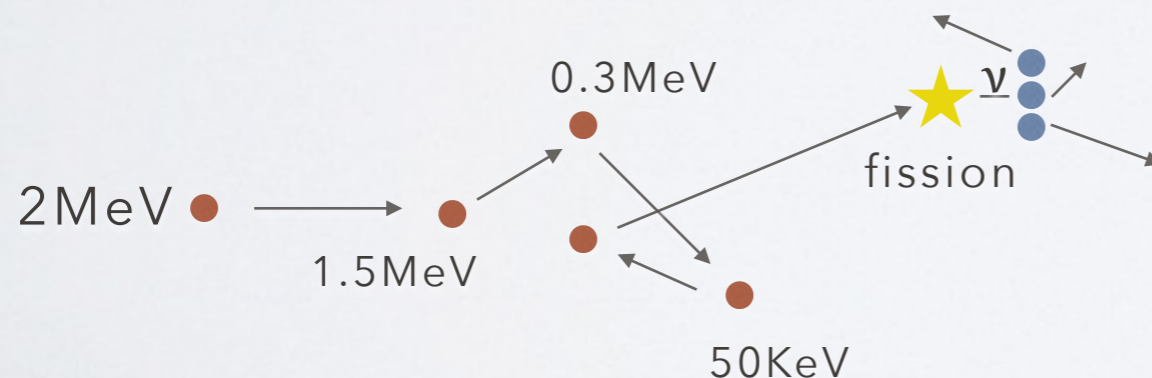


# I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE

## NEUTRONIQUE MCNP / SERPENT

Deux méthodes de résolution :

- ▶ Déterministe : comportement des neutrons modélisable avec une équation de transport en posant la densité angulaire de neutron :  $\Phi(x,y,z,E,\Omega)$  en neutron/cm<sup>2</sup>/s/eV/sr
- ▶ Stochastique : Approche Monte Carlo : on suit des particules ponctuelles (position, énergie, angle), on réalise un calcul « balistique » avec les lois associées (sections efficaces)



on recommence un nombre *suffisant* de fois pour en tirer un comportement global et *estimer* le flux de neutrons

# I. PROBLÉMATIQUE DU COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE

**THERMO -HYDRAULIQUE**  
Computational Fluid Dynamics (CFD)

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

densité      vitesse

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

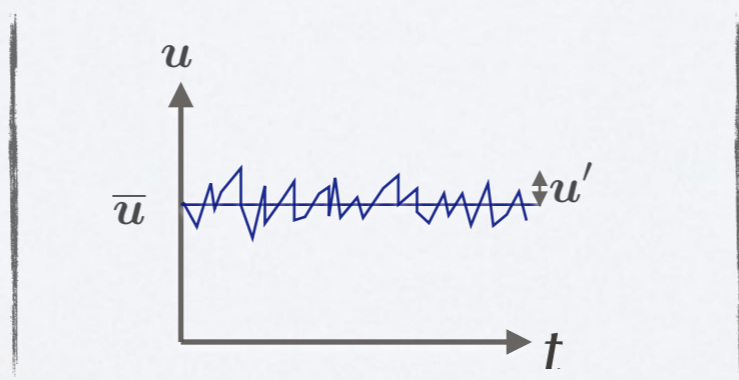
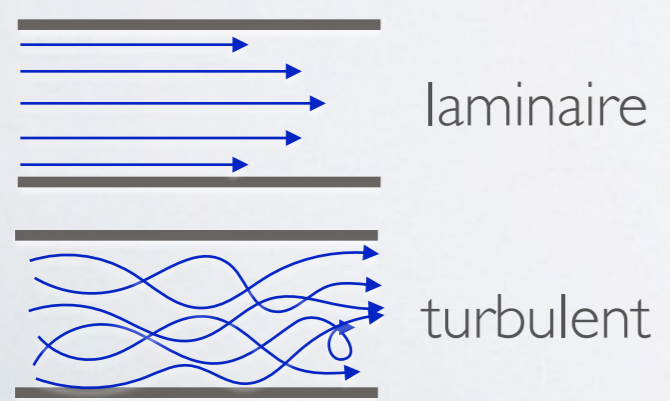
quantité mouvement      pression      tenseur des contraintes      forces extérieures

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



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

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

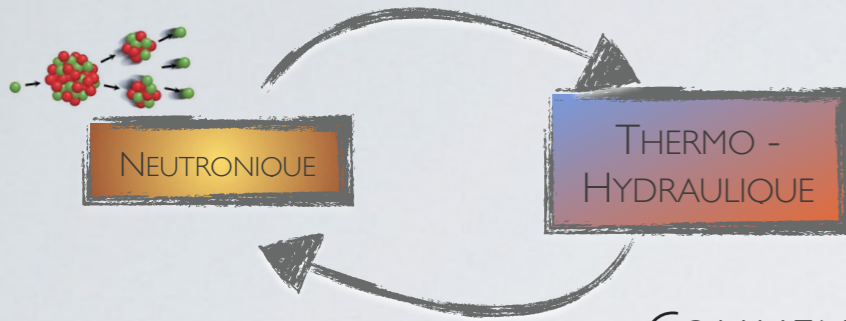
$$e = \bar{e} + e' \quad \text{énergie}$$

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

moyenne résolue      fluctuation modélisée

# PLAN DE LA PRÉSENTATION

---



*COMMENT PRENDRE EN COMPTE LA DÉFORMATION DU FLUX  
NEUTRONIQUE PAR LE MOUVEMENT DES PRÉCURSEURS DE  
NEUTRONS RETARDÉS ?*

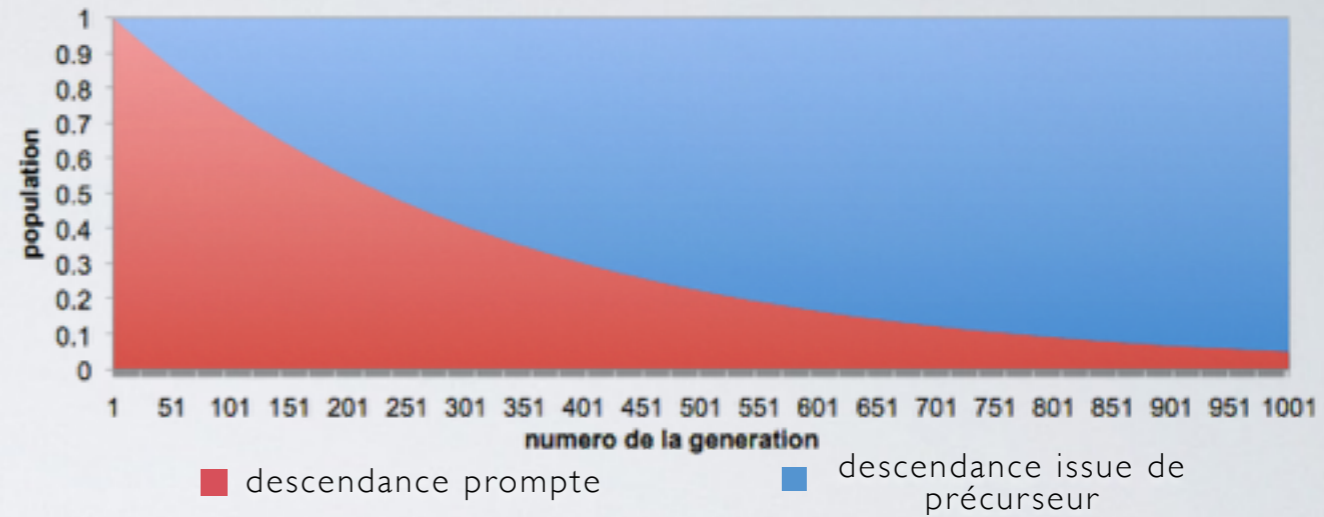
---

- 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

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

Réacteur critique  
=

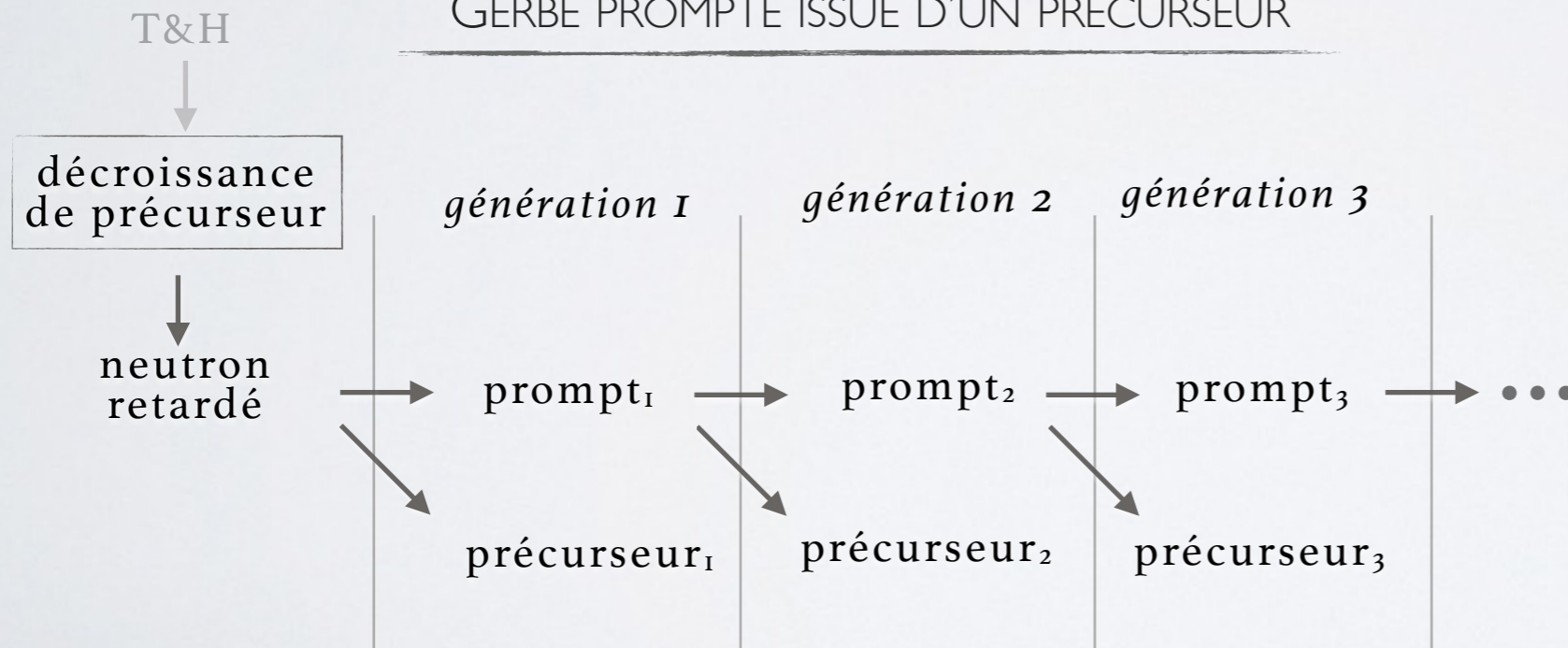
Système sous-critique prompt + Source extérieure de neutrons : les neutrons retardés



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

$$k_p < 1$$

### GERBE PROMPTE ISSUE D'UN PRÉCURSEUR



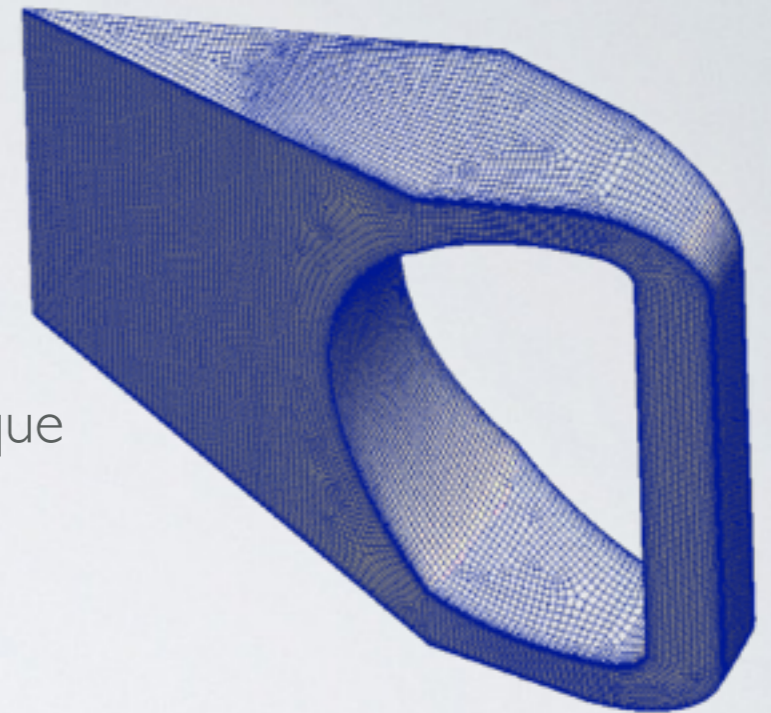
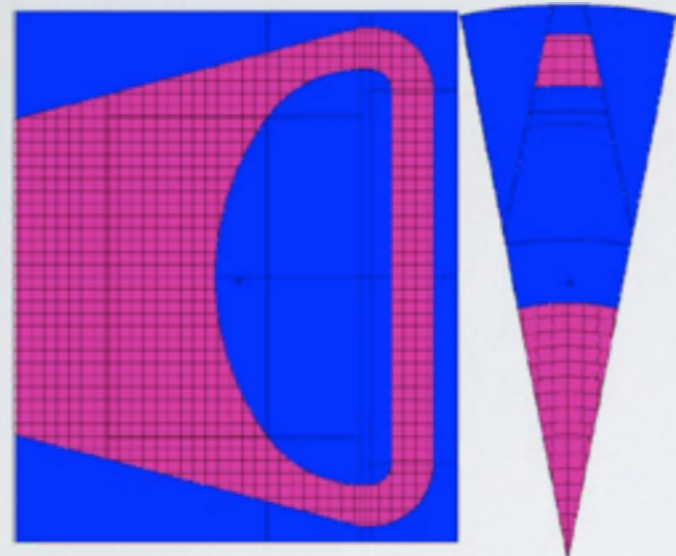
**Condition d'équilibre :**  
la gerbe issue de la décroissance d'un précurseur crée, en moyenne, un nouveau précurseur

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

représentative du flux en réacteur !

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

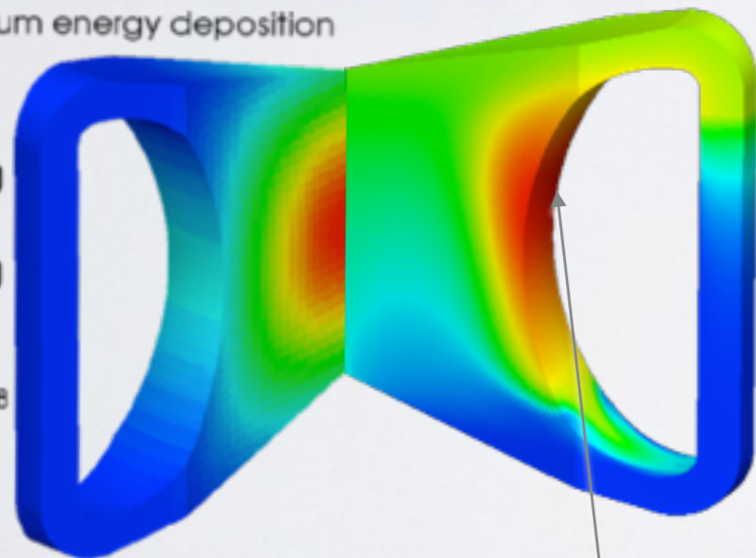
ÉTUDE STATIONNAIRE :



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

equilibrium energy deposition

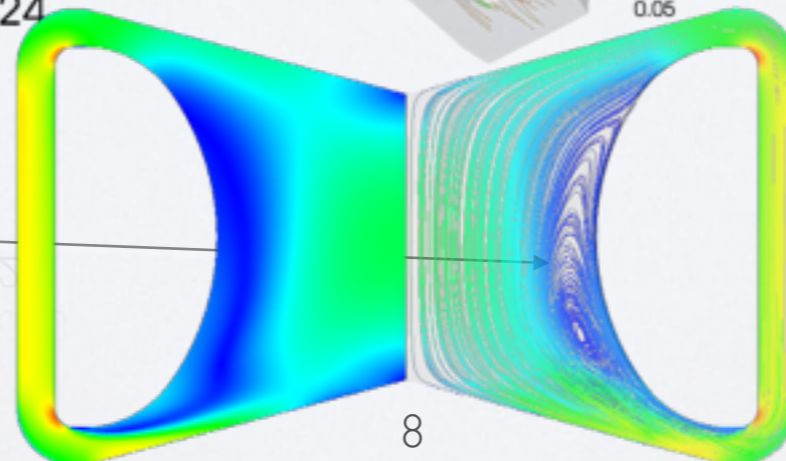
59  
40  
20  
0.0008



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

effet de la recirculation  
sur la température

U Magnitude  
6.8  
6  
4  
2  
0.05  
m/s



8

$\Sigma\lambda_i C_i$

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  
m/s

energy deposition - first cycle

17.46  
15  
12.5  
10  
7.5  
5  
4.073

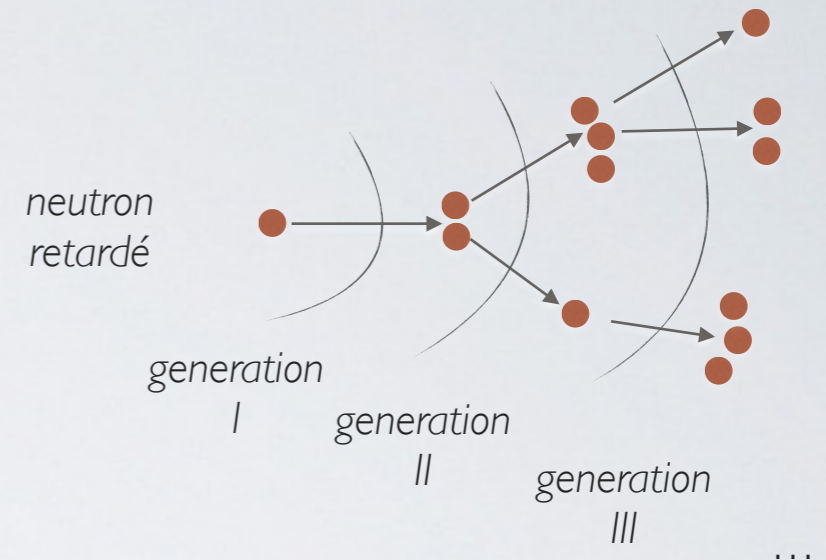
décroissance des  
précurseurs  
dans une zone de faible  
importance



# 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

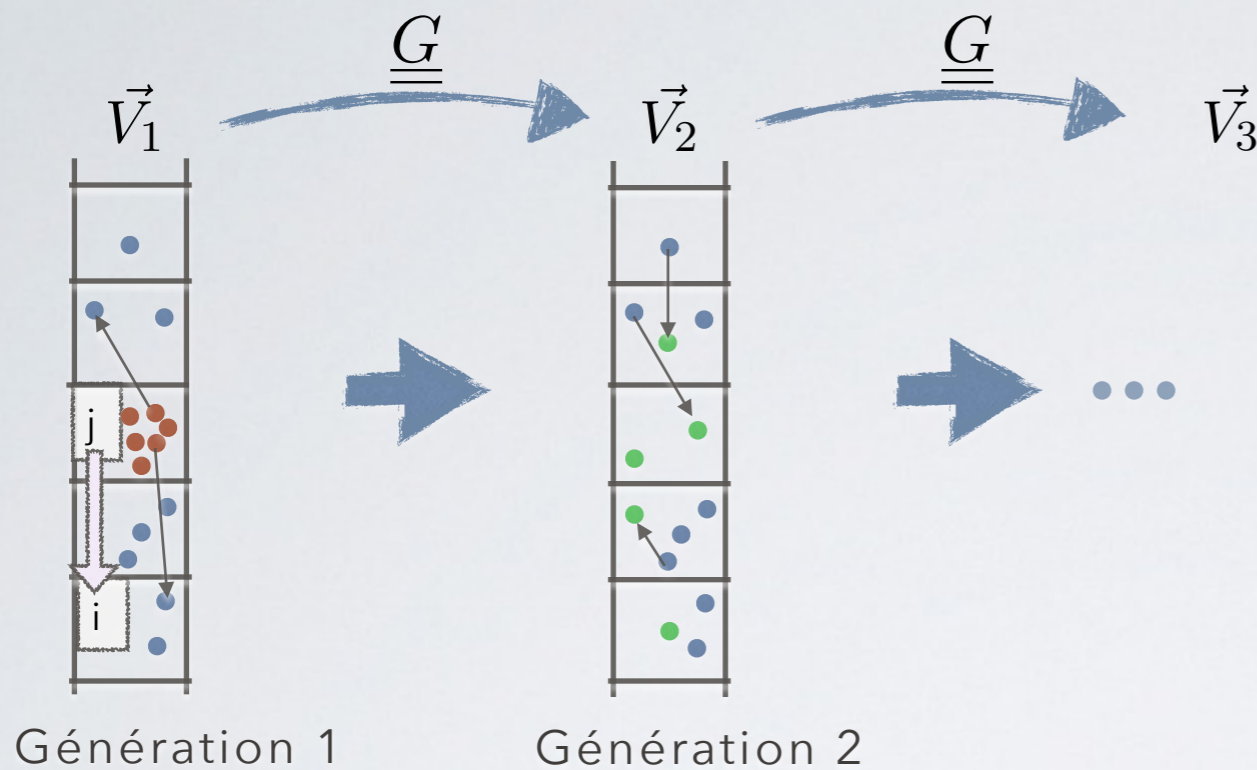
## II. APPROCHE DE LA RÉACTION EN CHAÎNE PAR SUCCESSION DE GERBES

- 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

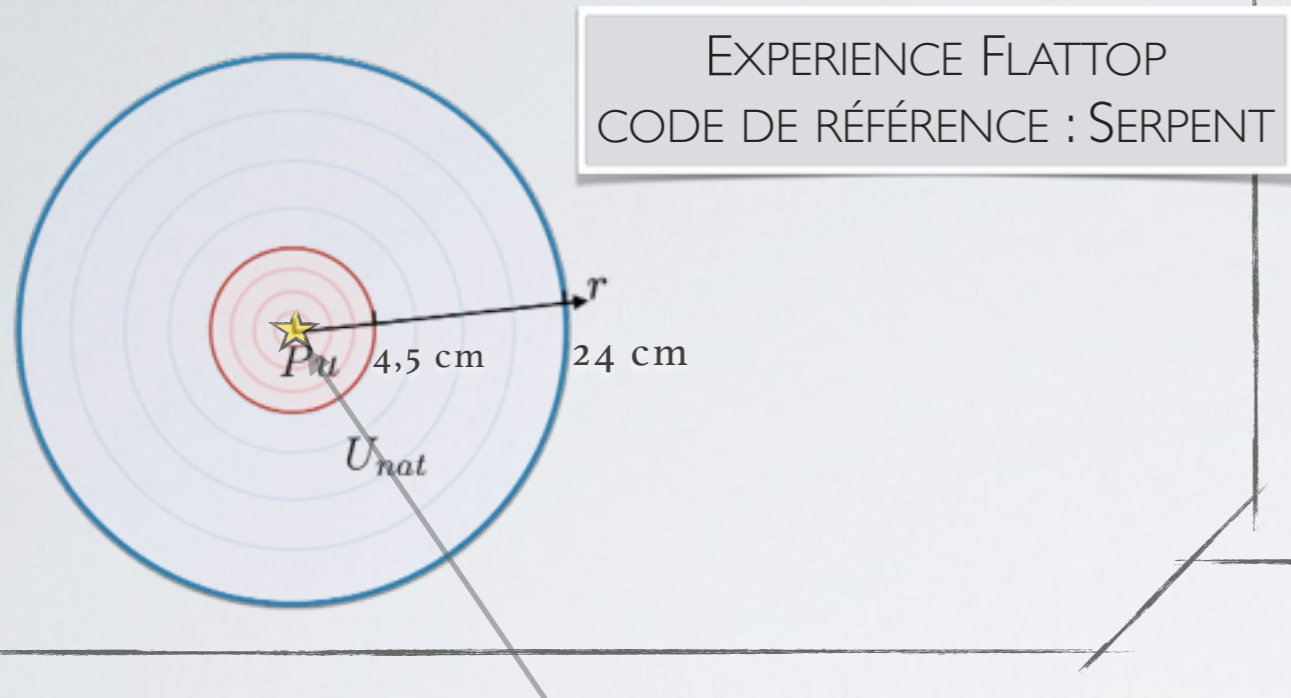
quantité de neutron  
prompt par fission

TESTONS L'ASPECT TEMPOREL AJOUTÉ À L'APPROCHE

### III.

# DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

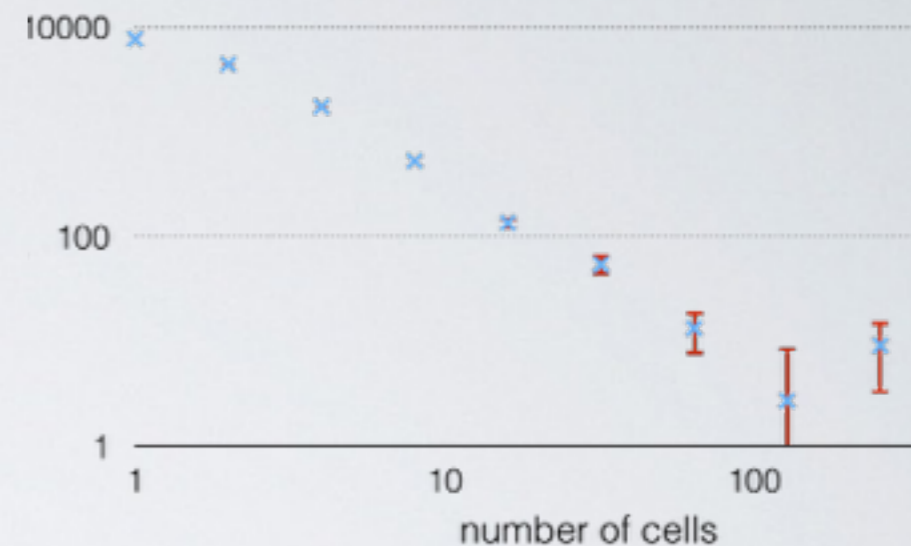
## BENCH CASE



libération d'un burst de neutrons au centre

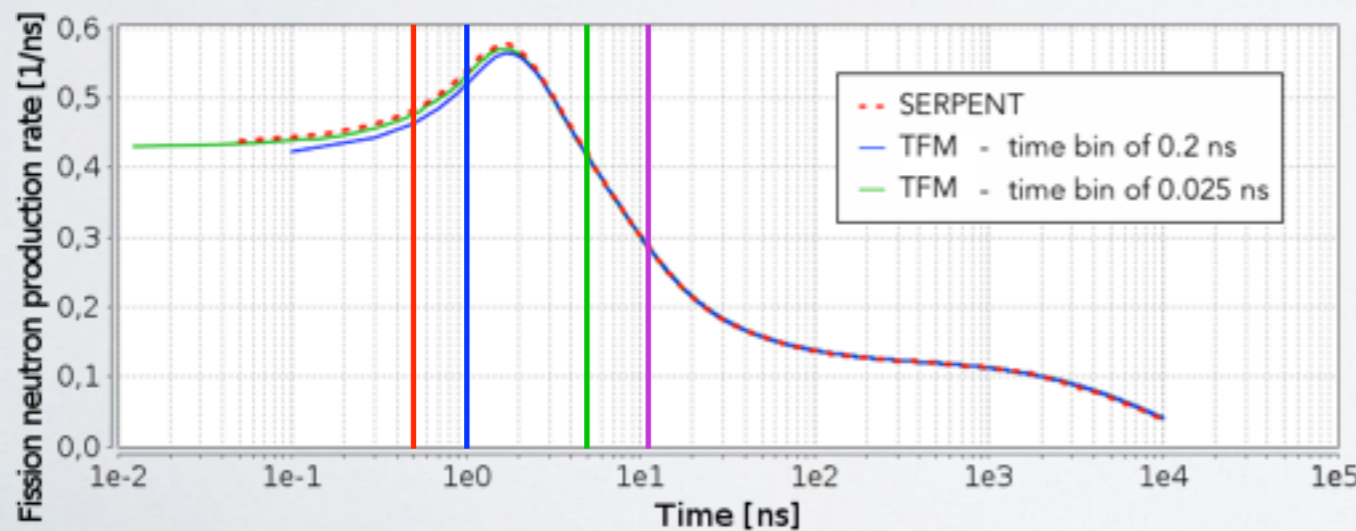
## ACCORD STATIQUE (MODE FONDAMENTAL)

$\Delta k_p$  - pcm  
ref vs TFM

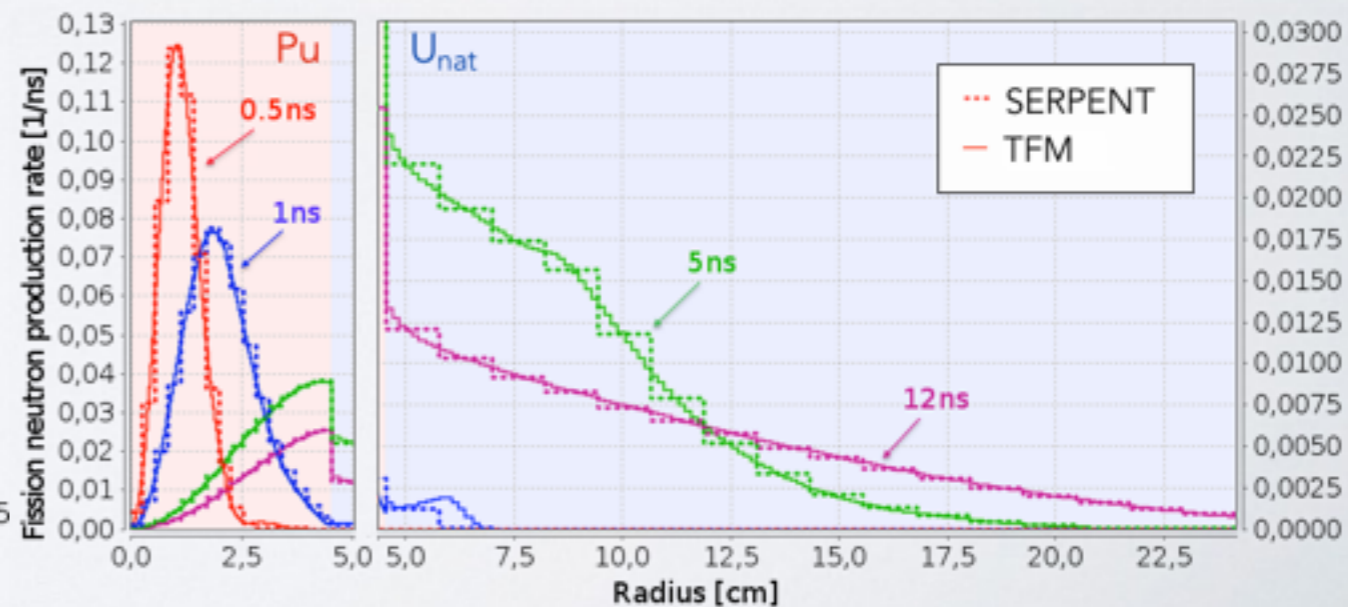


## ACCORD ÉVOLUTION

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



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	$\beta_{eff}$	$\Lambda_{eff}$	$\alpha_{Rossi}$
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

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

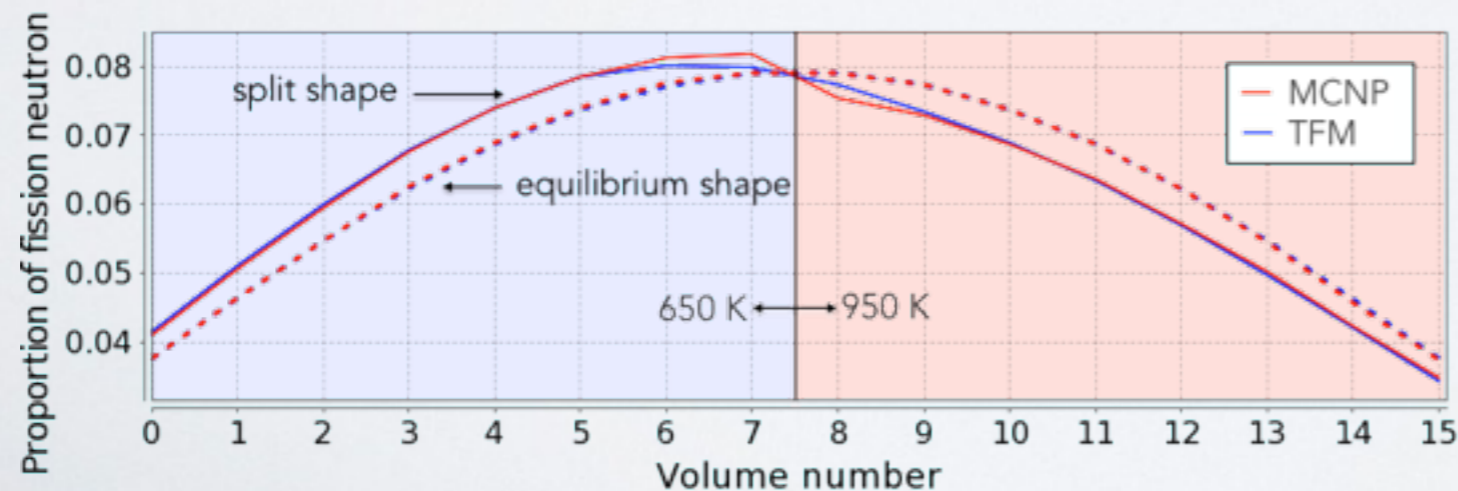
$$\frac{dP_i}{dt}(t, \mathbf{r}) = \beta_i \left[ \overset{\text{précurseur} \leftarrow}{\frac{1}{l_{eff}} \langle \tilde{G}_{\chi p \nu_d}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | N(t, \mathbf{r}') \rangle} + \overset{\text{précurseur} \leftarrow}{\langle \tilde{G}_{\chi d \nu_d}(\mathbf{r}', \mathbf{r}) | \sum_i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

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

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 :

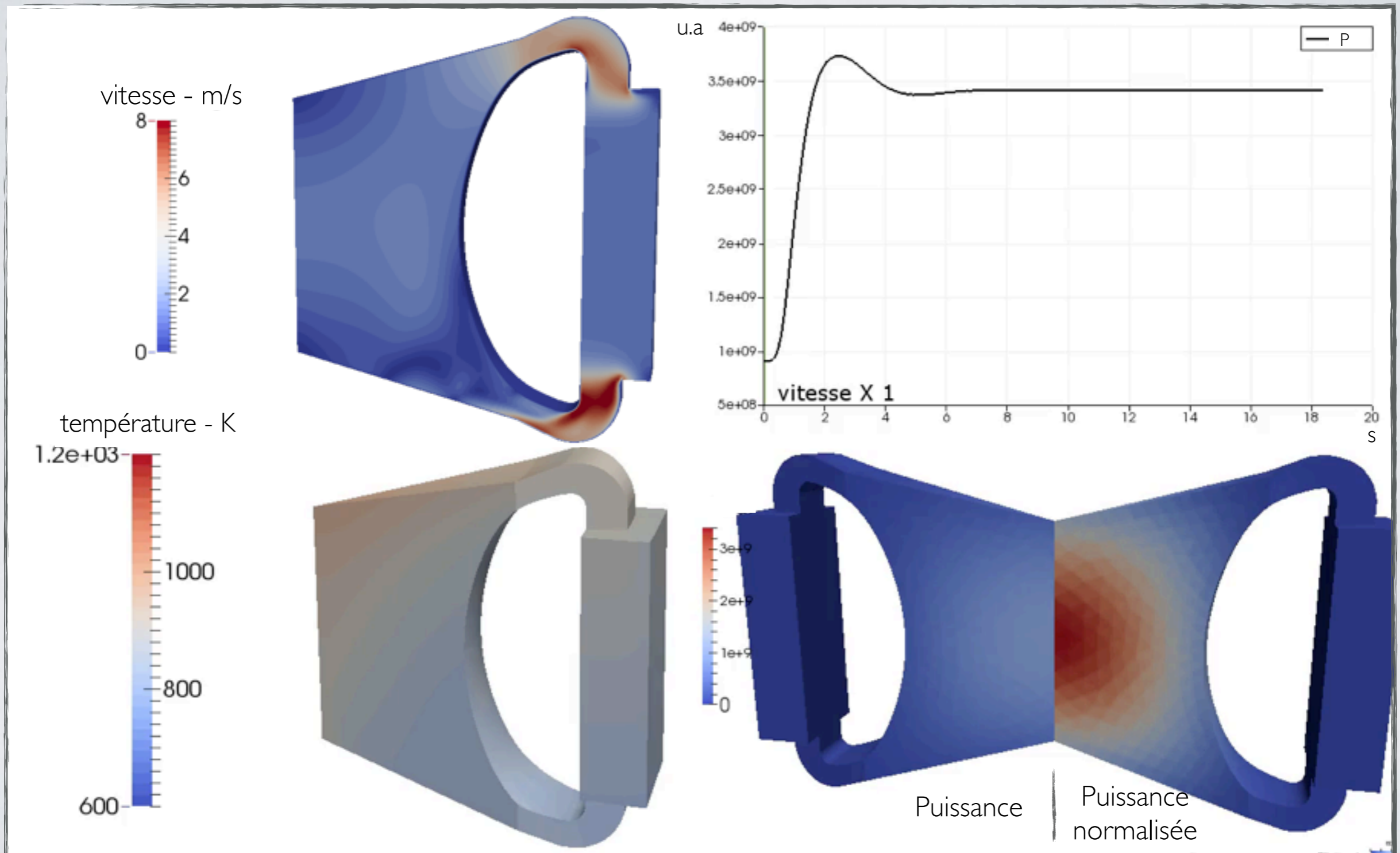


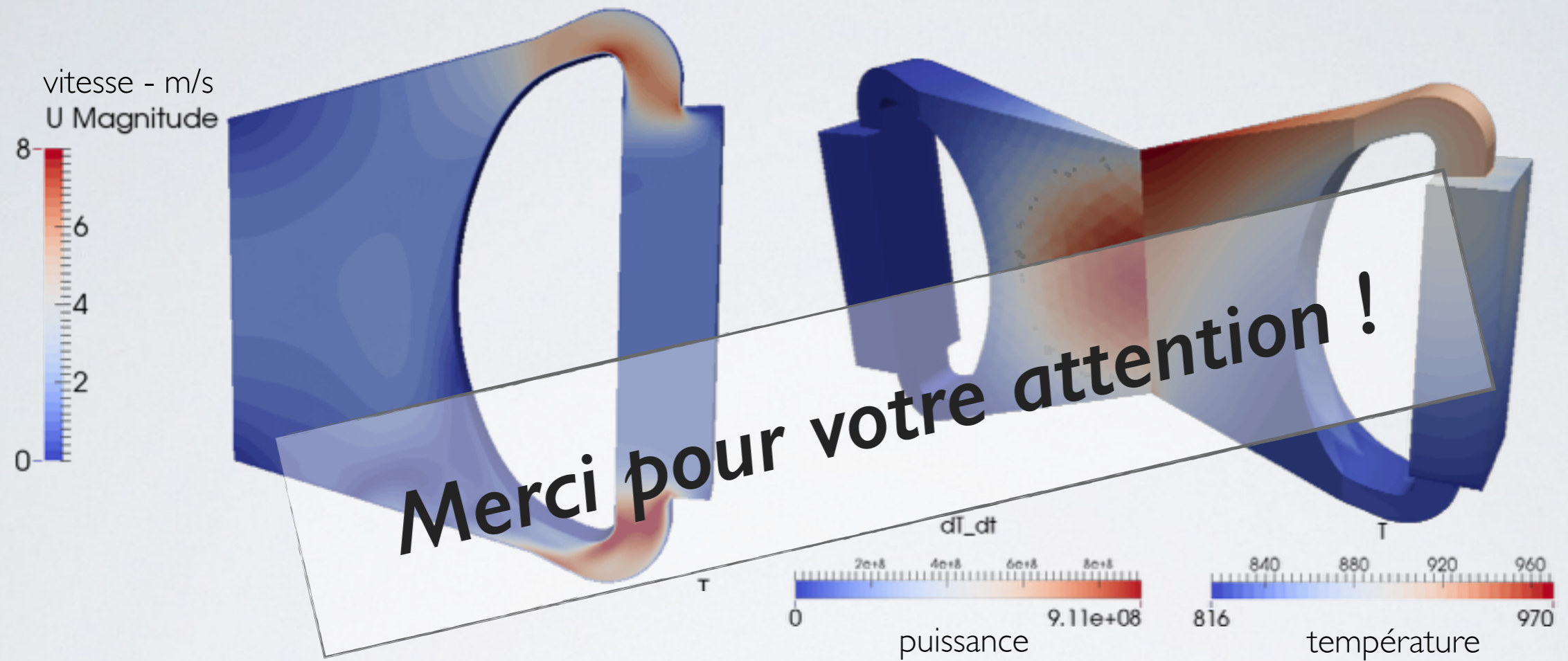
$k_p$  variation :  $-1121 \pm 4 \text{ pcm}$   
 erreur de la prédiction :  $-8 \pm 7 \text{ pcm}$

### III.

## DÉCOMPOSITION DE LA GERBE PAR GÉNÉRATION

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





Premiers résultats prometteurs ...

... prochaine étape : benchmark du couplage complet !