

SÉMINAIRE DOCTORANT

AXEL LAUREAU

—

COUPLAGE NEUTRONIQUE &
THERMOHYDRAULIQUE DU MSFR

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

CONTEXTE - RÉACTEUR DE GÉNÉRATION IV

LE MSFR - MOLTEN SALT FAST REACTOR

SUJET DE THÈSE

II. DISCIPLINES PHYSIQUES MISES EN JEU

III. COUPLAGE STATIONNAIRE

IV. COUPLAGE TRANSITOIRE

CONTEXTE

État actuel en France :

- Production électrique à 80% nucléaire
- Utilisation de réacteurs à eau pressurisée (REP - EPR)

Génération IV ?

- Régénérateur / sûreté / non proliférant
- Choix français : réacteurs au sodium (ASTRID - CEA)
- CNRS : nouveau concept (10 ans)

Coeur de REP



MSFR - MOLTEN SALT FAST REACTOR

Combustible liquide

Combustible = Caloporteur

Sel fondu : $LiF - (Th/^{233}U)F_4$

densité : 4 x eau

viscosité : 2 x eau

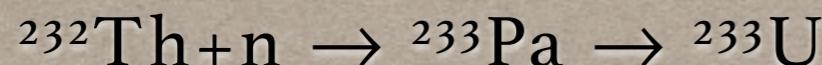
chimiquement inerte (huile : 1000 x eau)

basse pression

haute température 750°C

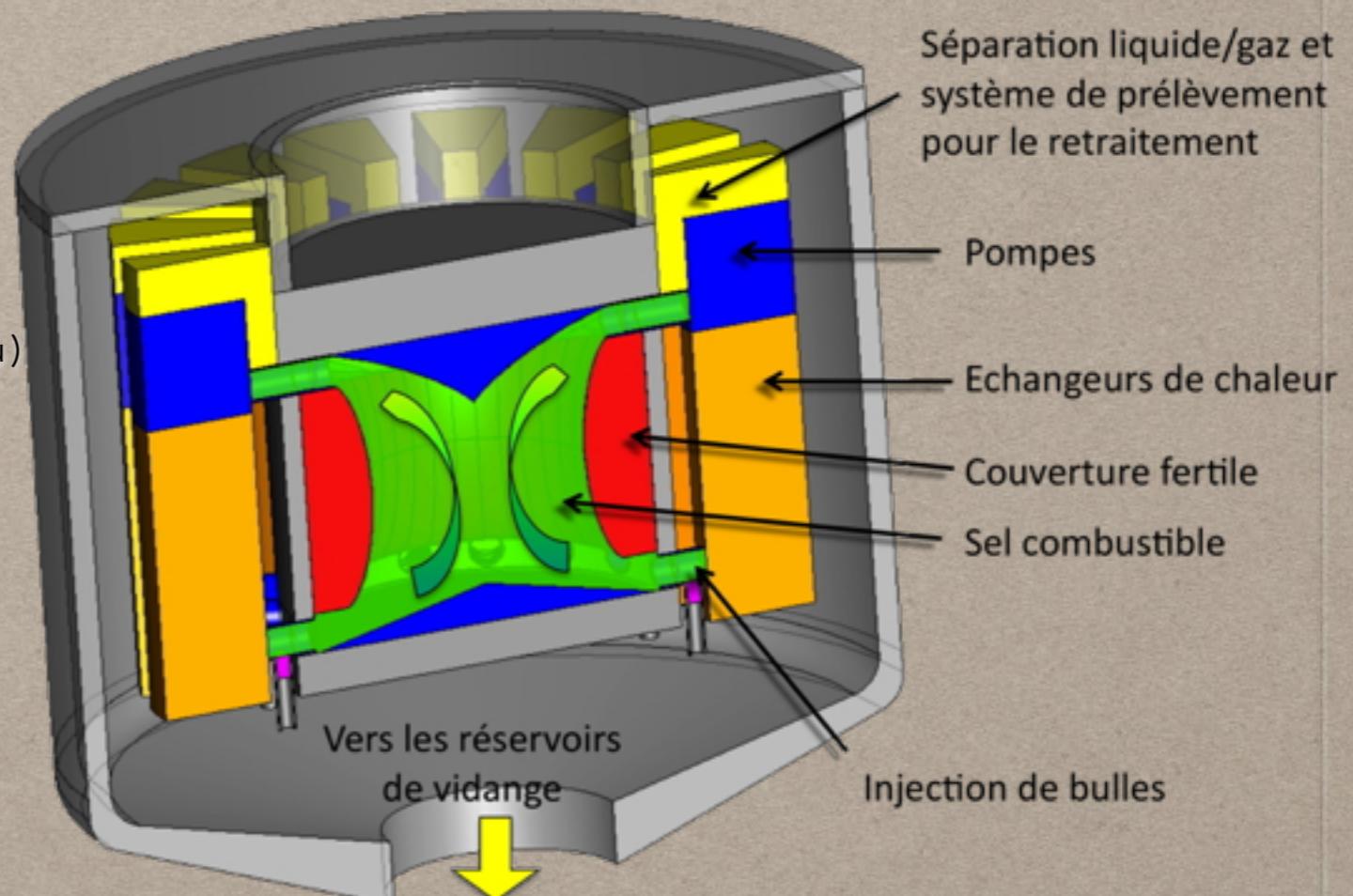
Spectre neutronique rapide

Cycle Thorium / Uranium



^{233}U fissile

3GW thermique



temps de circulation ~ 4s

SUJET DE THÈSE

**« Modélisation multi-physique d'un réacteur
à sels fondus en cycle Thorium et à spectre
neutronique rapide »**

ENCADRANTS : PABLO RUBIOLO / DANIEL HEUER

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

II. DISCIPLINES PHYSIQUES MISES EN JEU

NEUTRONIQUE

MÉCANIQUE DES FLUIDES

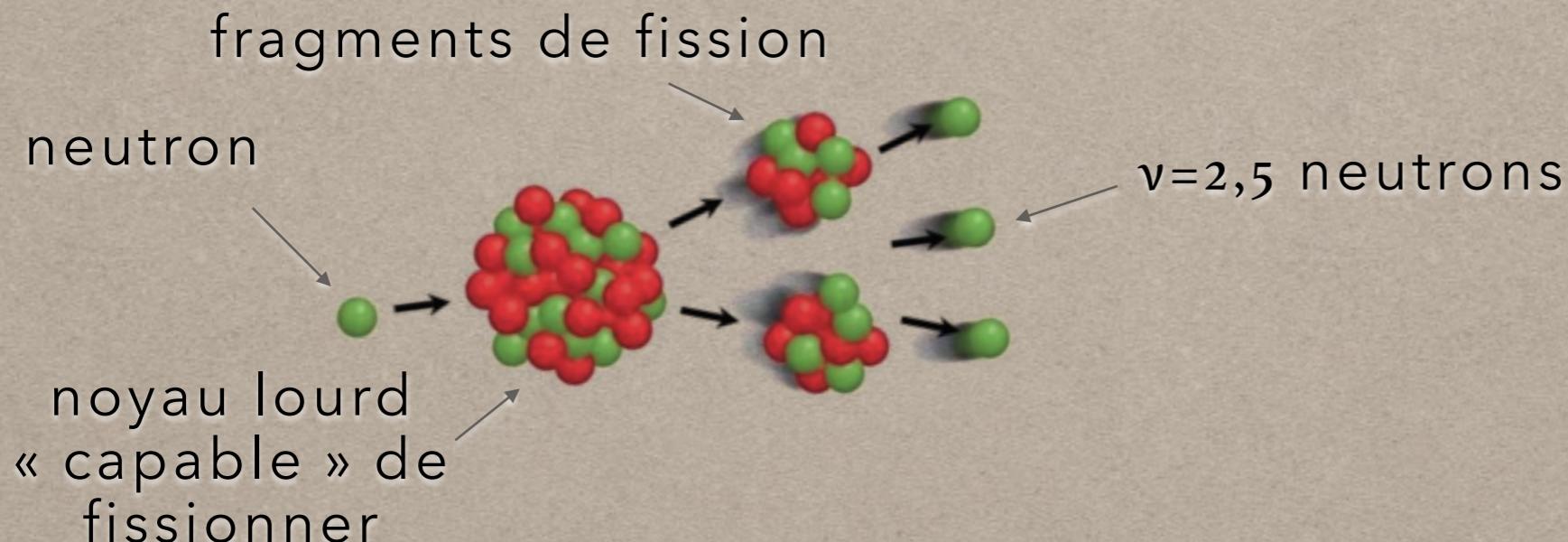
COUPLAGE

III. COUPLAGE STATIONNAIRE

IV. COUPLAGE TRANSITOIRE

NEUTRONIQUE

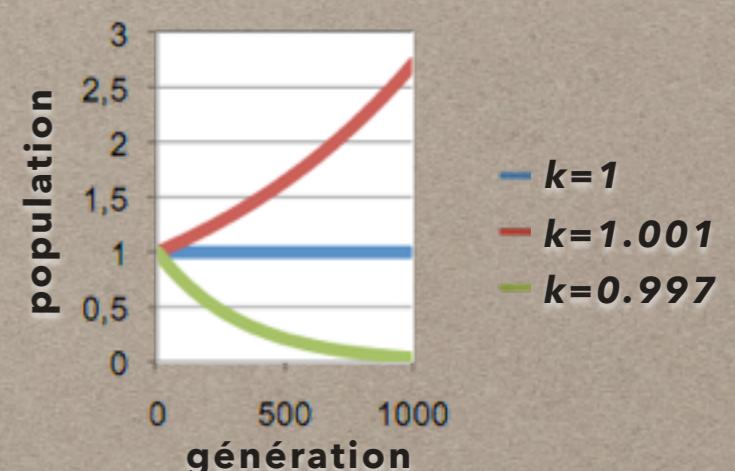
Fission - Réaction en chaîne



- 1 pour la réaction en chaîne
- 1 pour recréer du combustible (si régénérateur)
- 0.5 perdus

coefficient de multiplication :

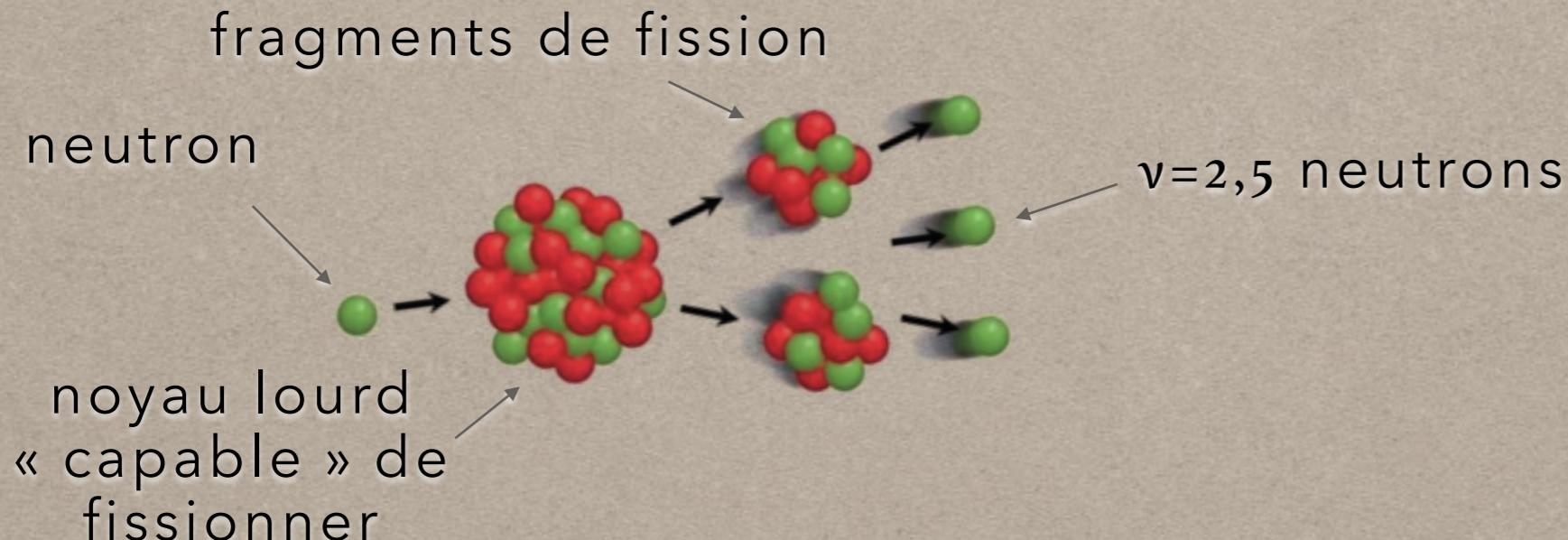
$$k = \frac{\text{quantité de neutron à la génération } n+1}{\text{quantité de neutron à la génération } n}$$



Critique : $k=1$

NEUTRONIQUE

Fission - Réaction en chaîne

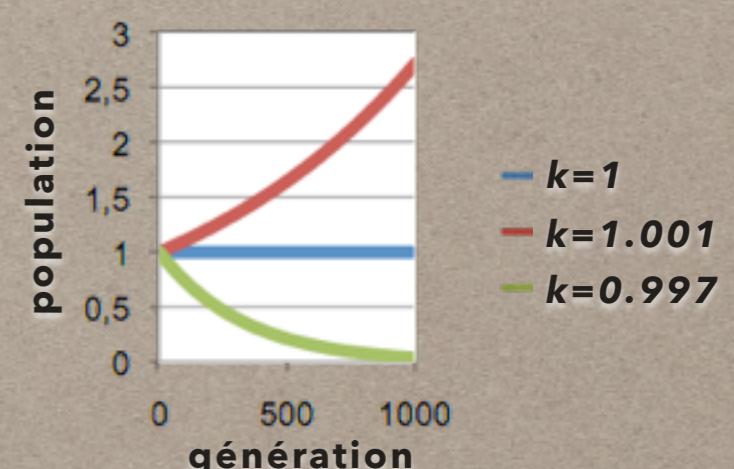


coefficient de multiplication :

$$k = \frac{\text{quantité de neutron à la génération } n+1}{\text{quantité de neutron à la génération } n}$$

réactivité

$$\rho = \frac{k-1}{k} \quad \text{en pcm (1e-5)}$$

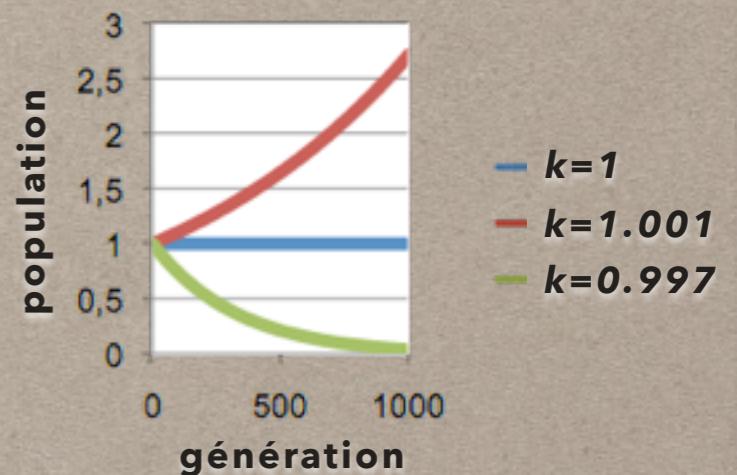


Critique : $k=1$

NEUTRONIQUE

Durée de vie d'un neutron dans le réacteur $\sim 3\mu\text{s}$

Si $\rho = \frac{k - 1}{k} = 10 \text{ pcm}$ (0.01%) , en 0.1 seconde le nombre de neutrons est multiplié par 30 !

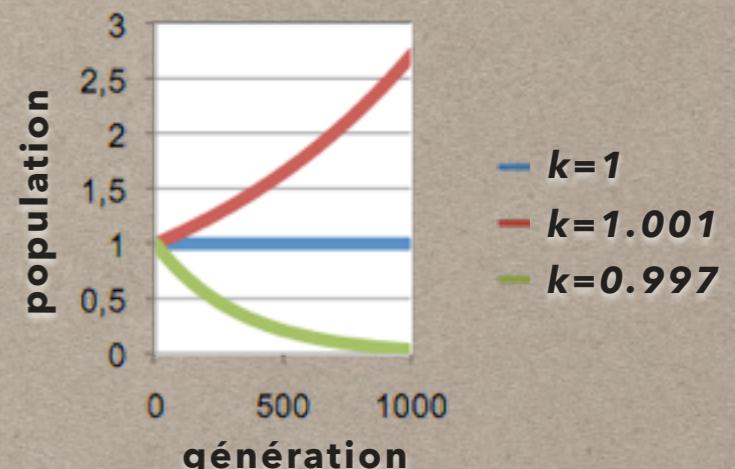
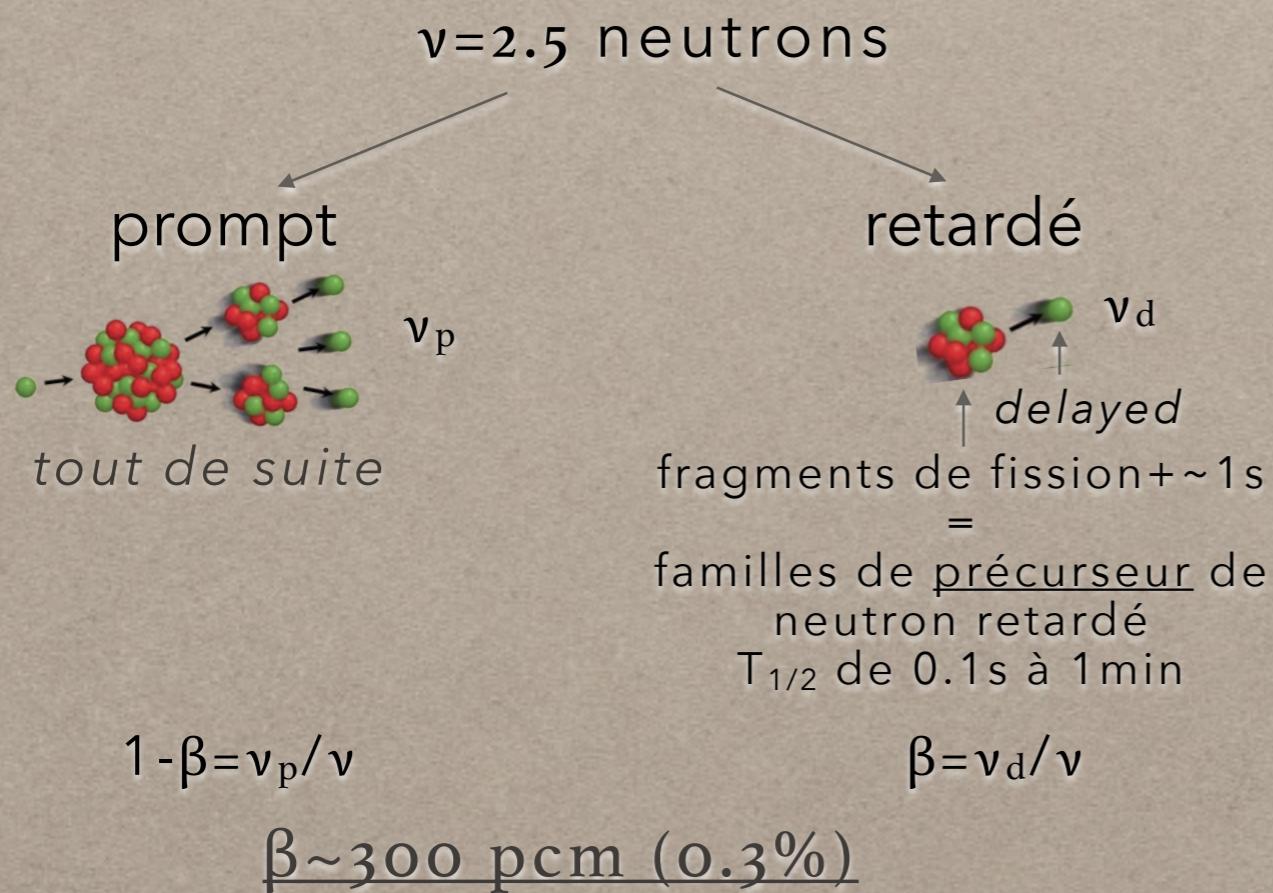


NEUTRONIQUE

Durée de vie d'un neutron dans le réacteur $\sim 3\mu\text{s}$

Si $\rho = \frac{k-1}{k} = 10 \text{ pcm (0.01\%)} , \text{ en 0.1 seconde le nombre de neutrons est multiplié par 30 !}$

Fraction de neutron retardés : β

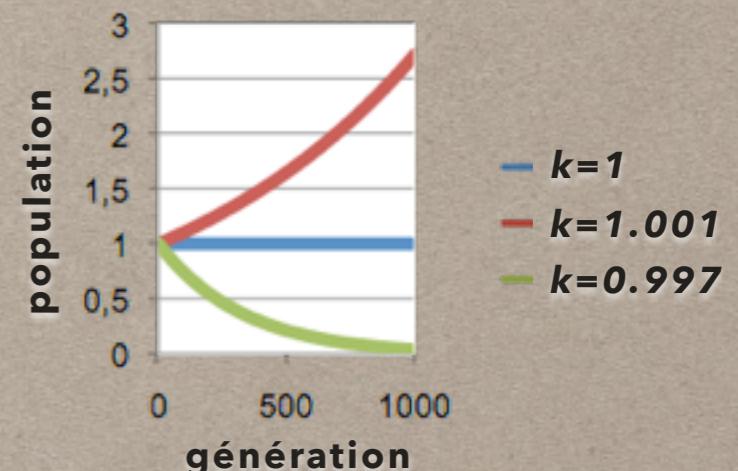
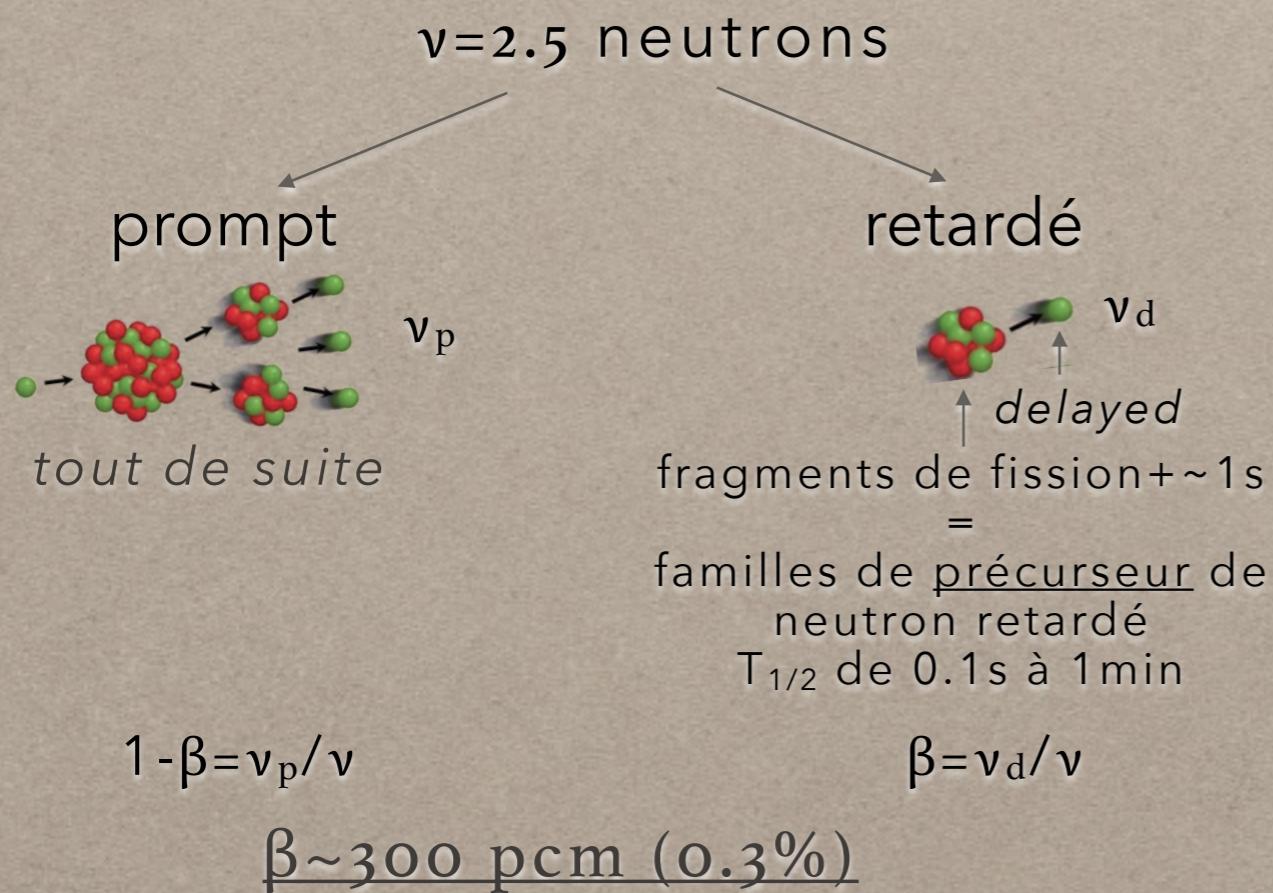


NEUTRONIQUE

Durée de vie d'un neutron dans le réacteur $\sim 3\mu\text{s}$

Si $\rho = \frac{k-1}{k} = 10 \text{ pcm (0.01\%)} , \text{ en 0.1 seconde le nombre de neutrons est multiplié par 30 !}$

Fraction de neutron retardés : β



À l'équilibre : $k=1=k_p+\beta$

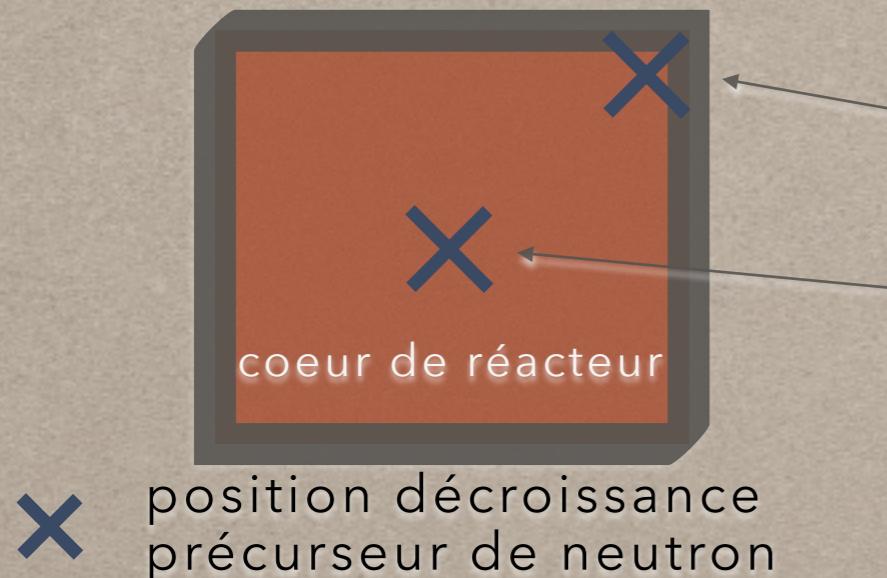
μs s

NEUTRONIQUE

Mais ...

NEUTRONIQUE

Mais ... Tous les précurseurs ne se valent pas!



faible probabilité
de déclencher une nouvelle fission

forte probabilité
de déclencher une nouvelle fission

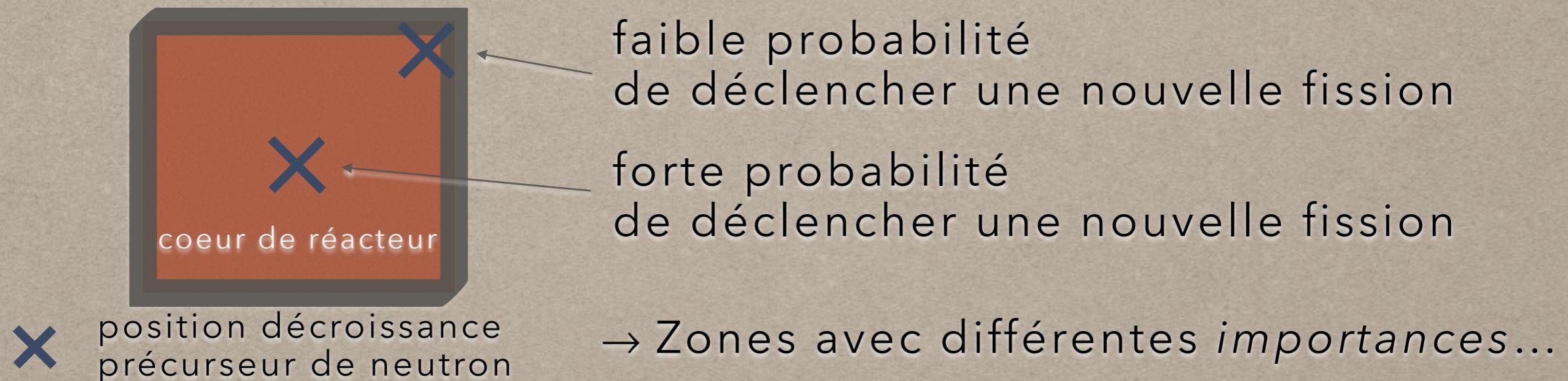
✗ position décroissance
précurseur de neutron

→ Zones avec différentes *importances*...

De plus : n_{prompt} → spectre $\chi_p \rightarrow 2\text{MeV}$
 n_{retarde} → spectre $\chi_d \rightarrow 0.4\text{MeV}$

NEUTRONIQUE

Mais ... Tous les précurseurs ne se valent pas!



De plus : $n_{\text{prompt}} \rightarrow \text{spectre } \chi_p \rightarrow 2\text{MeV}$
 $n_{\text{retarde}} \rightarrow \text{spectre } \chi_d \rightarrow 0.4\text{MeV}$

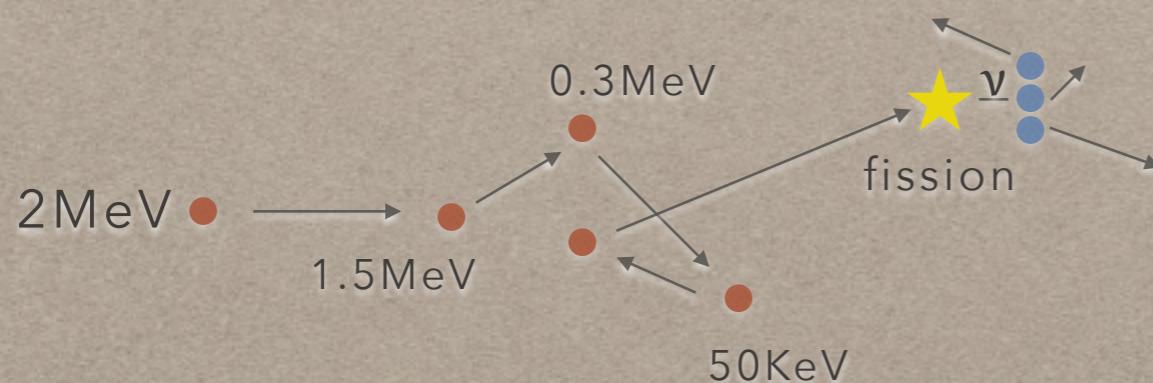
On définit un β_{eff} prenant en compte les effets de zone et de spectre

$$\boxed{1 = k_p + \beta} \longrightarrow \boxed{1 = k_p + \beta_{\text{eff}}}$$

NEUTRONIQUE

Méthode de résolution :

- Méthode déterministe :
Comportement des neutrons modélisable avec une équation de transport en posant la densité angulaire de neutrons : $\phi(x,y,z,E,\Omega)$ en neutron/cm²/s/eV/sr
- Méthode 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

MÉCANIQUE DES FLUIDES

MÉCANIQUE DES FLUIDES

3 équations de conservation : masse, quantité de mouvement, énergie

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

« 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

MÉCANIQUE DES FLUIDES

3 équations de conservation : masse, quantité de mouvement, énergie

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

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

« 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

MÉCANIQUE DES FLUIDES

3 équations de conservation : masse, quantité de mouvement, énergie

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

densité
vitesse

quantité mouvement

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

pression tenseur des contraintes
forces extérieures

énergie interne et cinétique

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

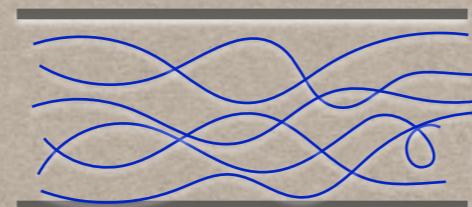
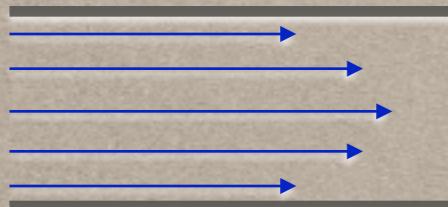
transfert de chaleur

« 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...»

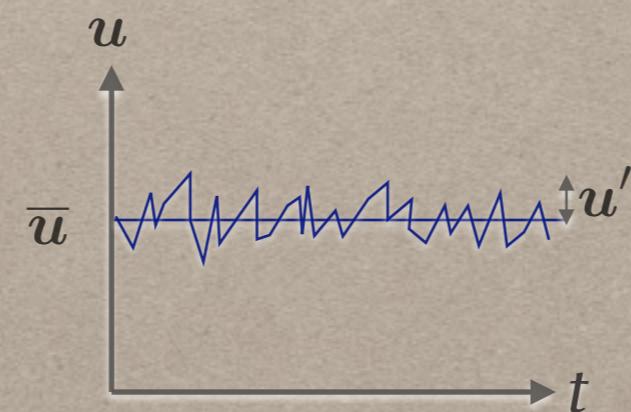
Werner Heisenberg

MÉCANIQUE DES FLUIDES

Régime laminaire, régime turbulent ...



MSFR : $Re=400\ 000$
Régime turbulent
Très (trop) complexe à
résoudre directement



$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' && \text{vitesse} \\ p &= \bar{p} + p' && \text{pression} \\ e &= \bar{e} + e' && \text{énergie} \\ T &= \bar{T} + T' && \text{température} \end{aligned}$$

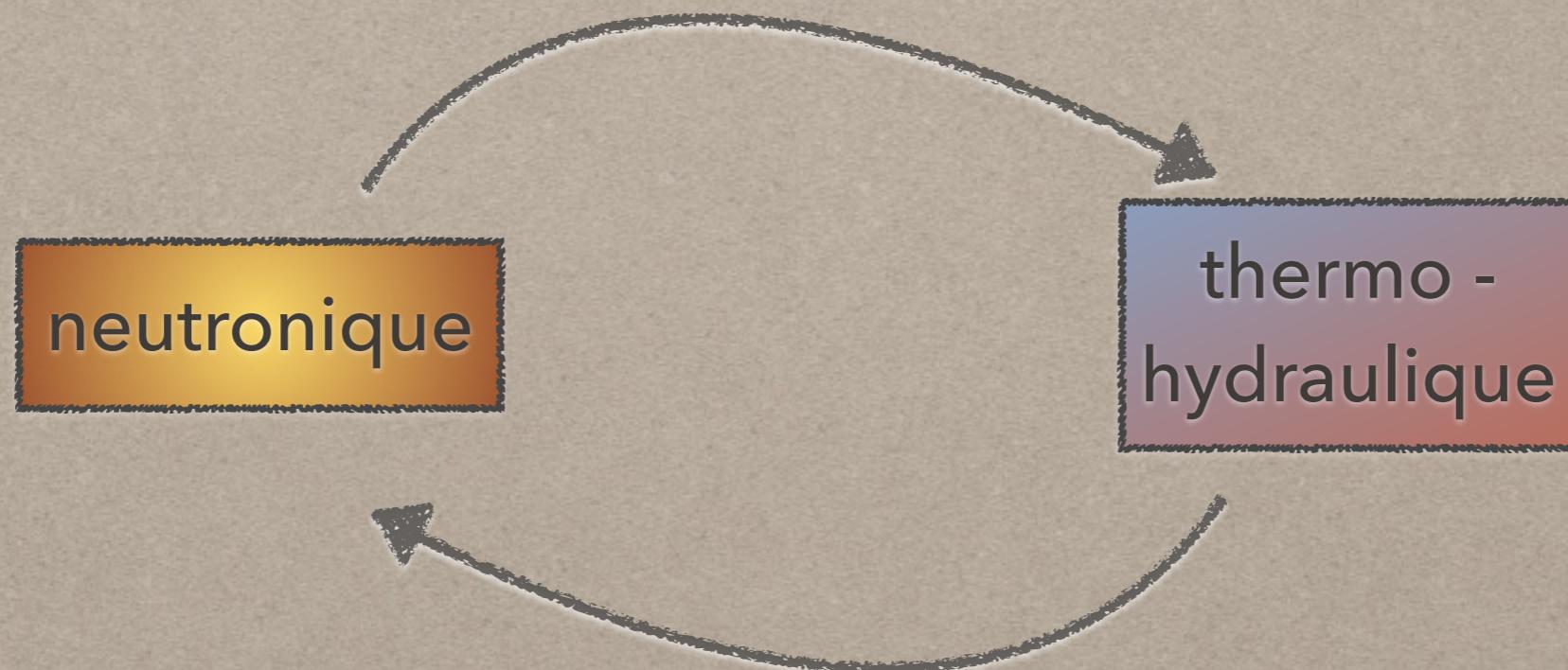
↑ ↑

moyenne fluctuation

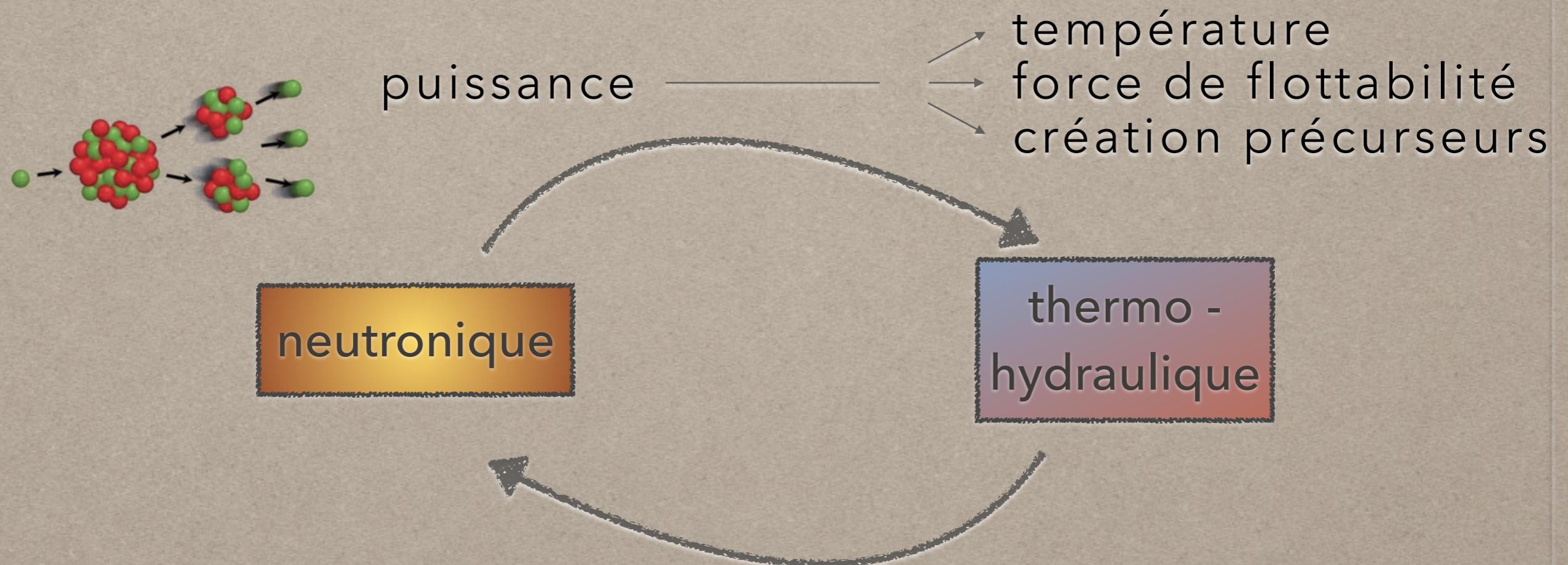
résolue modélisée

Famille de codes : CFD Computational Fluids Dynamics

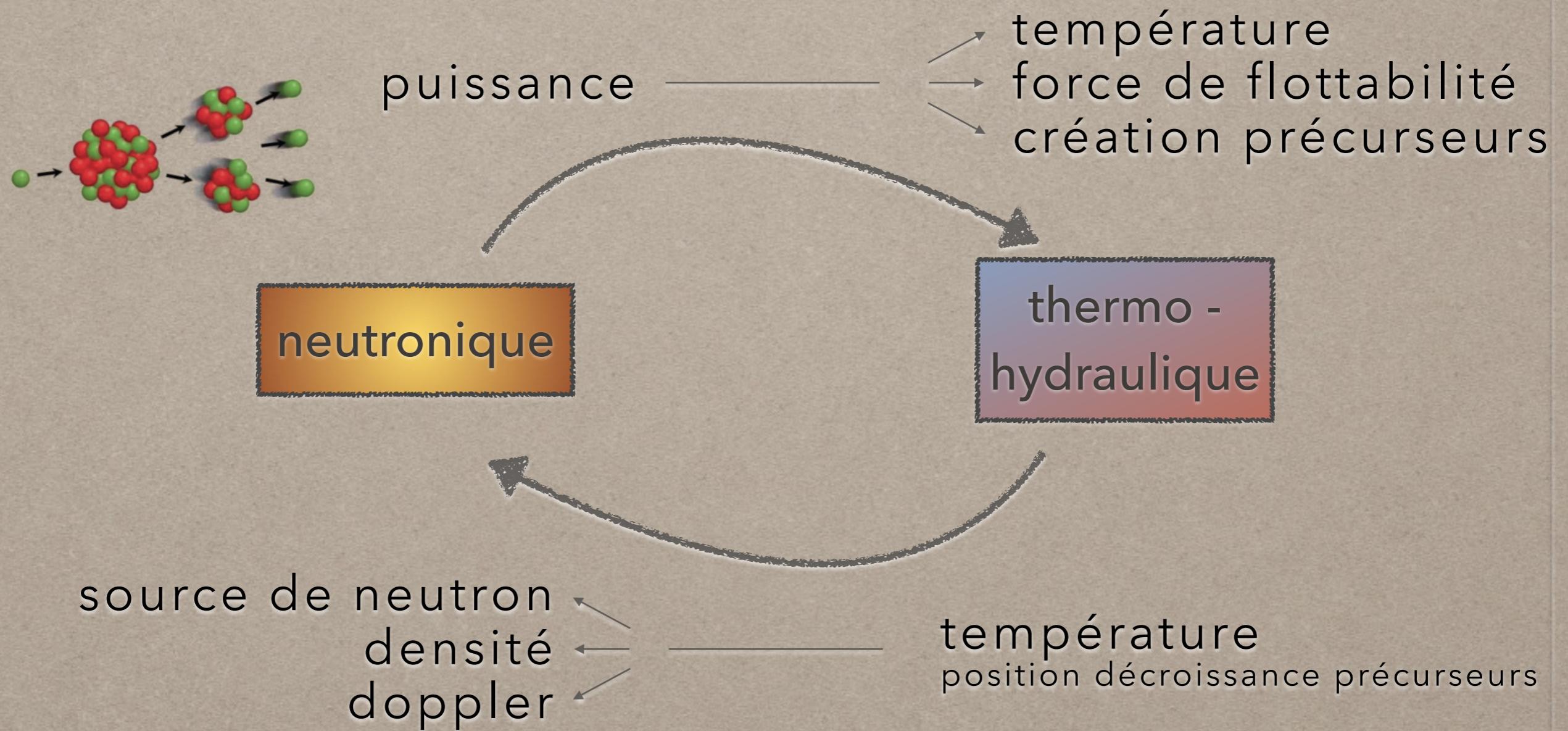
COUPLAGE



COUPLAGE



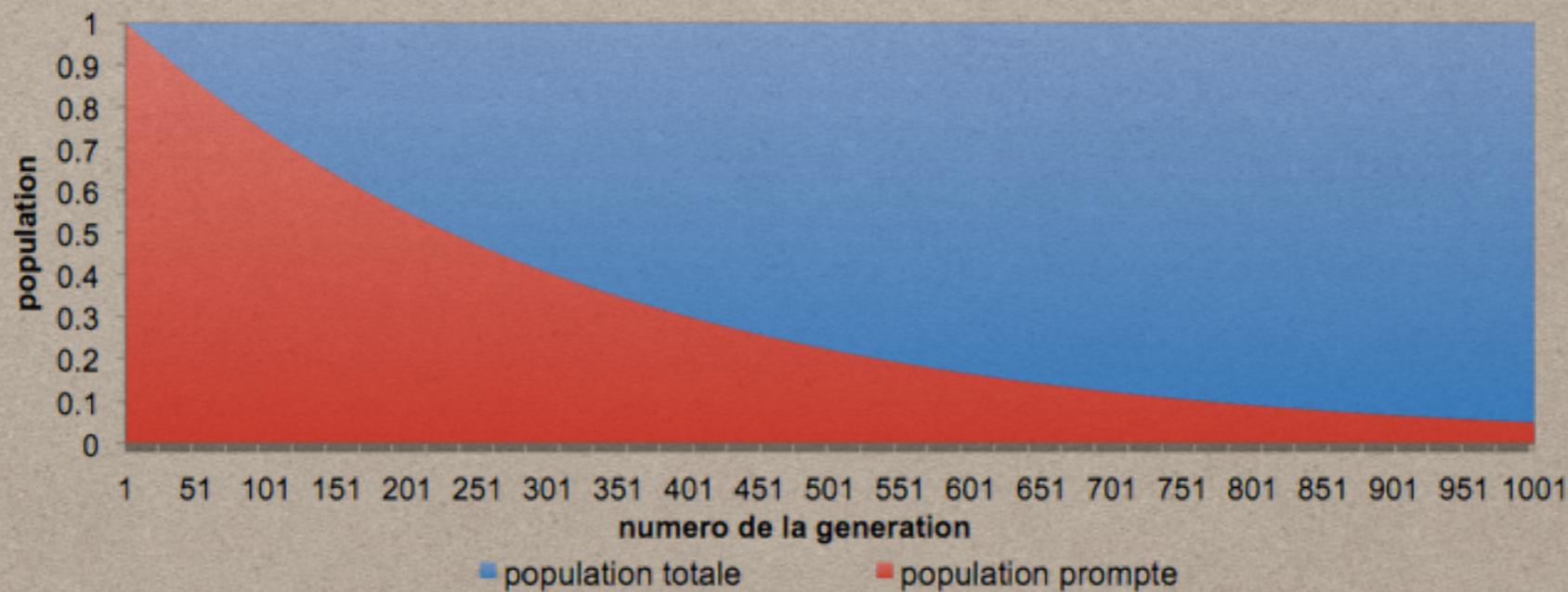
COUPLAGE



COUPLAGE

Problème:
les précurseurs bougent (T&H) → impacte la forme du flux

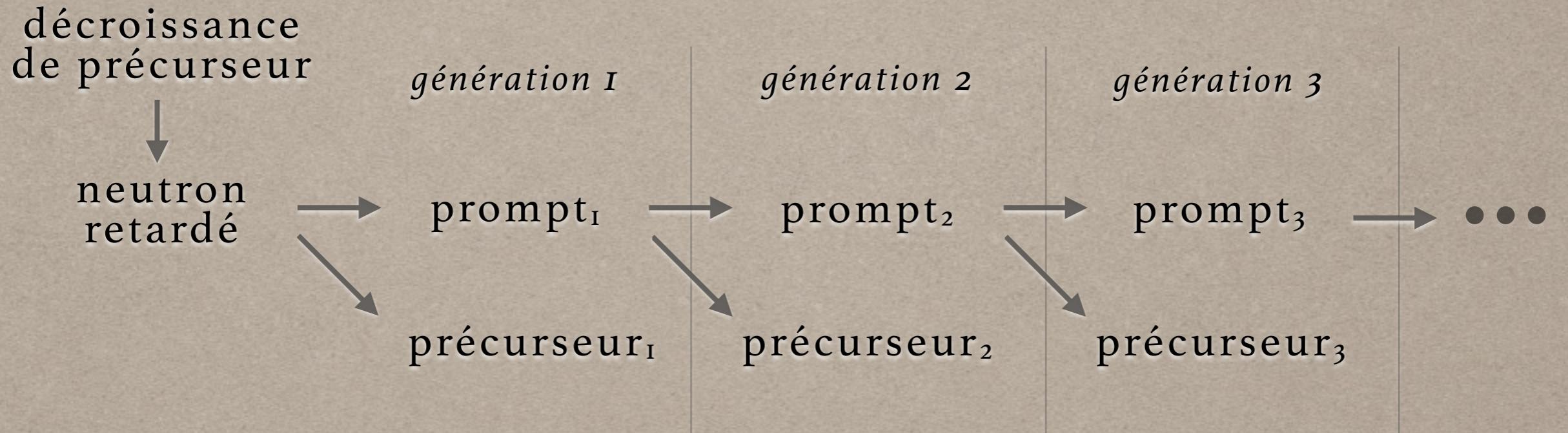
Idée:



$$k_p + \beta_{\text{eff}} = I \quad k_p < I$$

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

COUPLAGE



Condition d'équilibre :

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

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

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

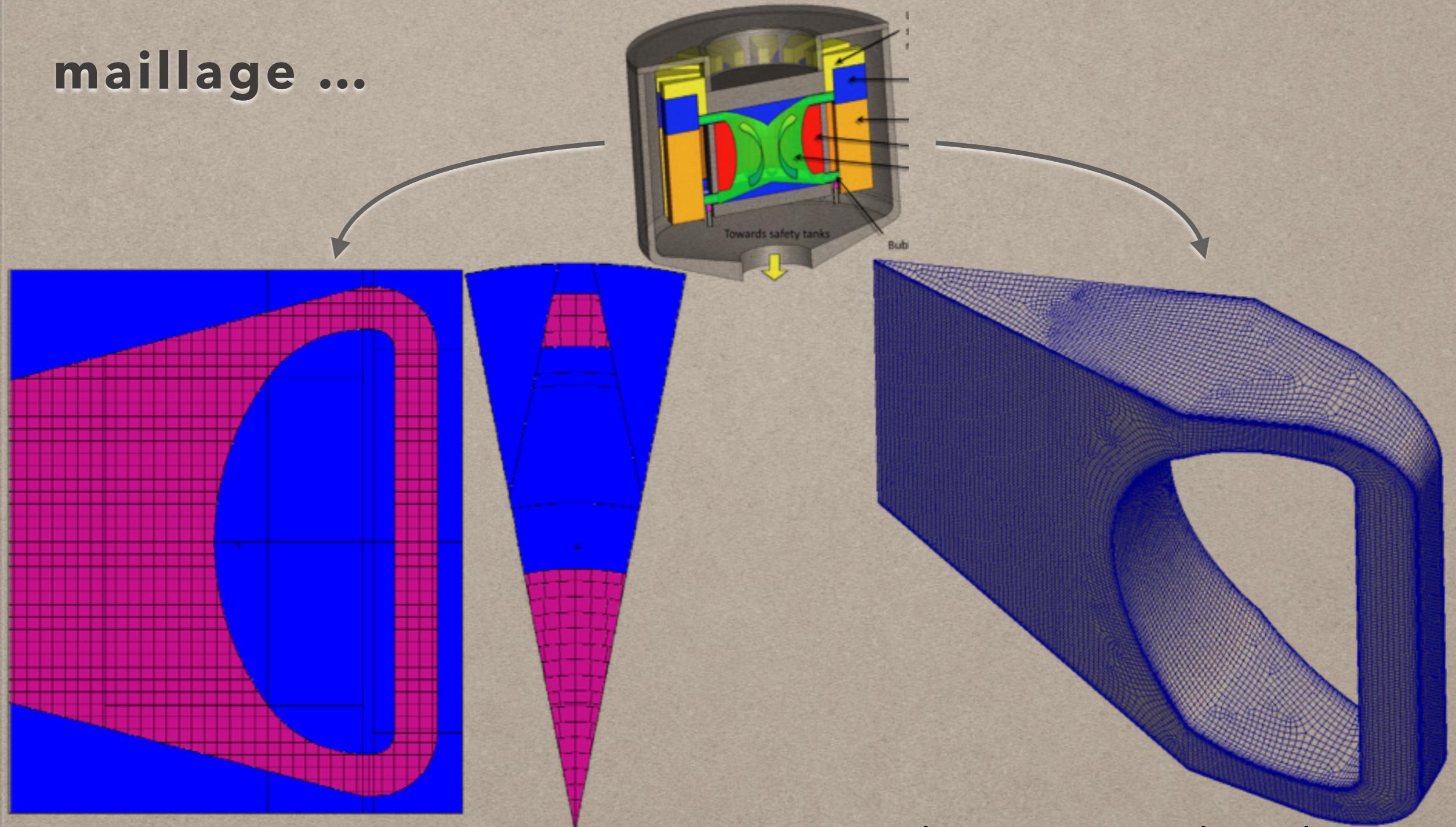
II. DISCIPLINES PHYSIQUES MISES EN JEU

III. COUPLAGE STATIONNAIRE

IV. COUPLAGE TRANSITOIRE

COUPLAGE STATIONNAIRE

maillage ...



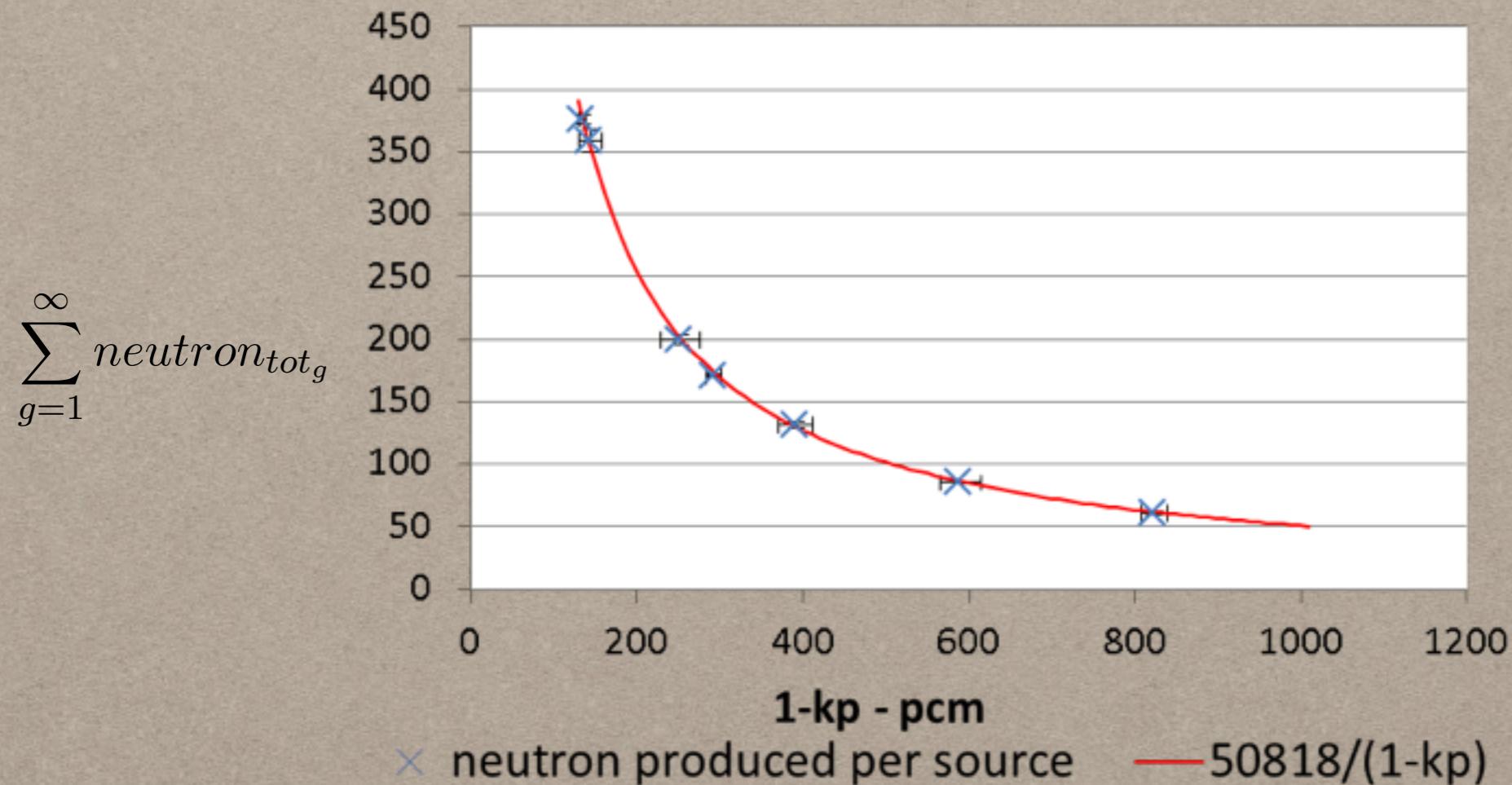
Neutronique
code : MCNP

Thermo Hydraulique
code : OpenFOAM

COUPLAGE STATIONNAIRE

Résultats :

$$\sum_{g=1}^{\infty} precursor_g = 1 \implies \sum_{g=1}^{\infty} neutron_{tot_g} \cdot \beta = 1$$

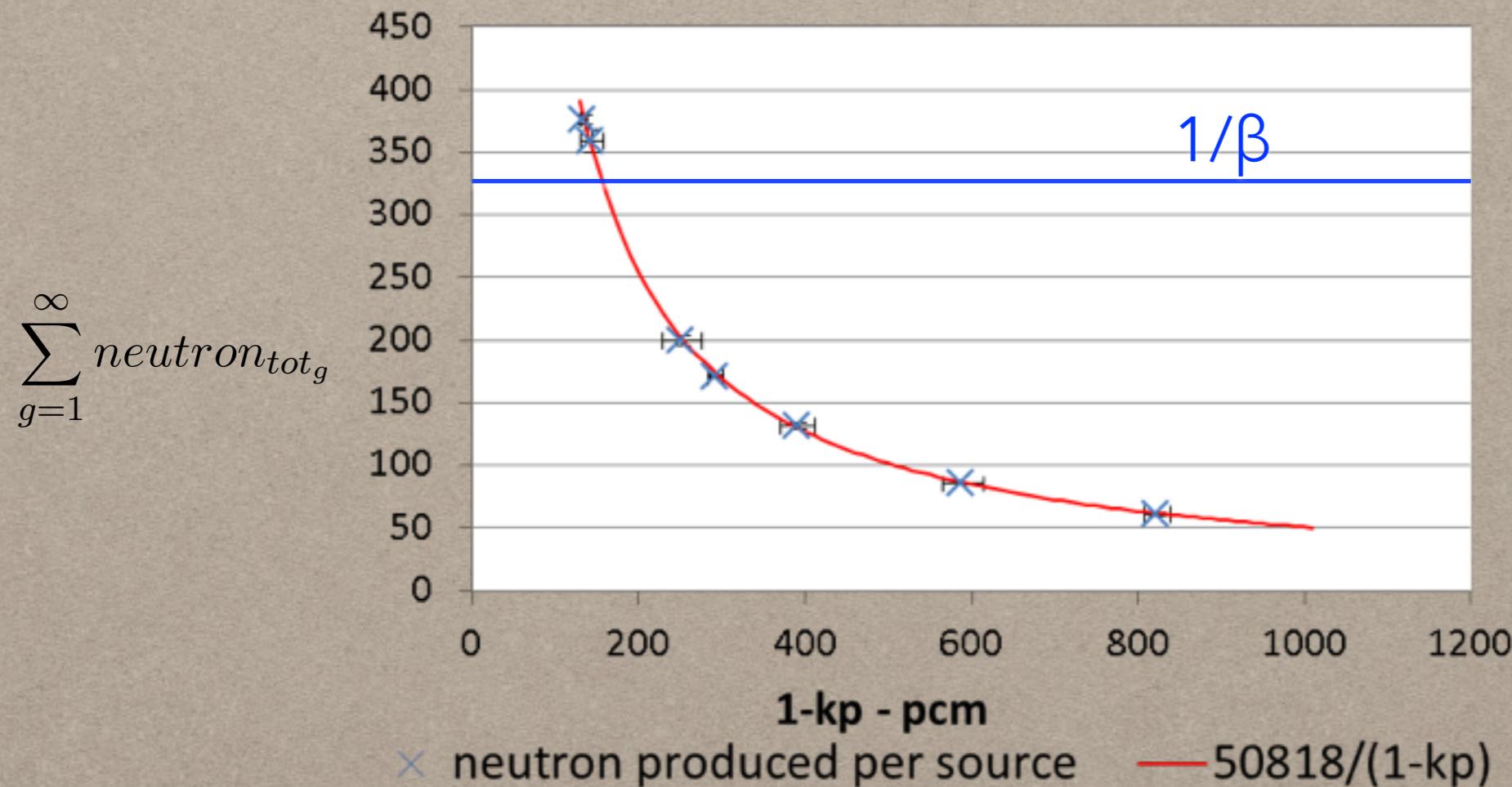


$$(1-k_p)_{\text{équilibre}} = \beta_{\text{eff}} = 154 \pm 4 \text{ pcm}$$

COUPLAGE STATIONNAIRE

Résultats :

$$\sum_{g=1}^{\infty} precursor_g = 1 \implies \sum_{g=1}^{\infty} neutron_{tot_g} \cdot \beta = 1$$

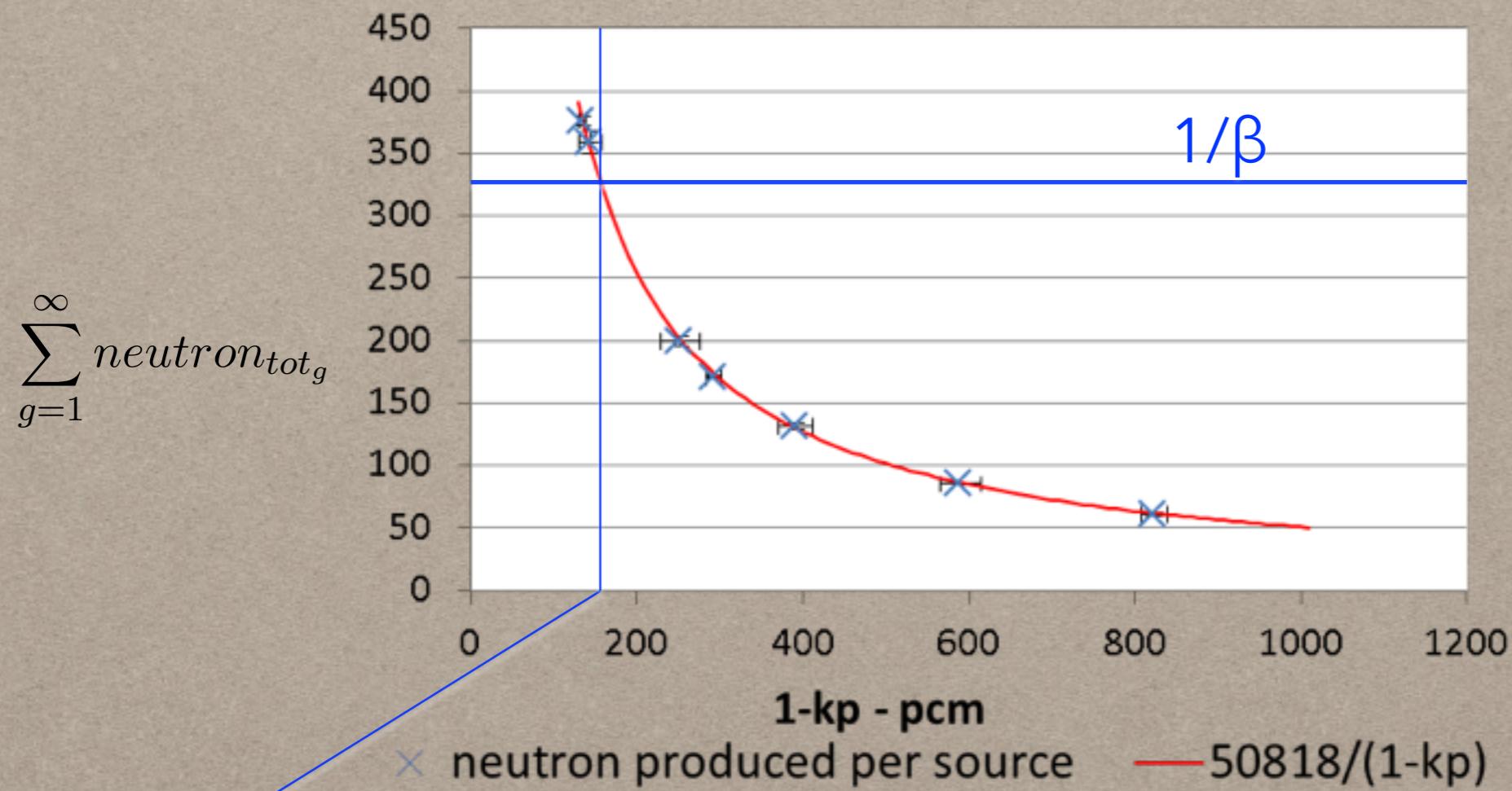


$$(1-k_p)_{\text{équilibre}} = \beta_{\text{eff}} = 154 \pm 4 \text{ pcm}$$

COUPLAGE STATIONNAIRE

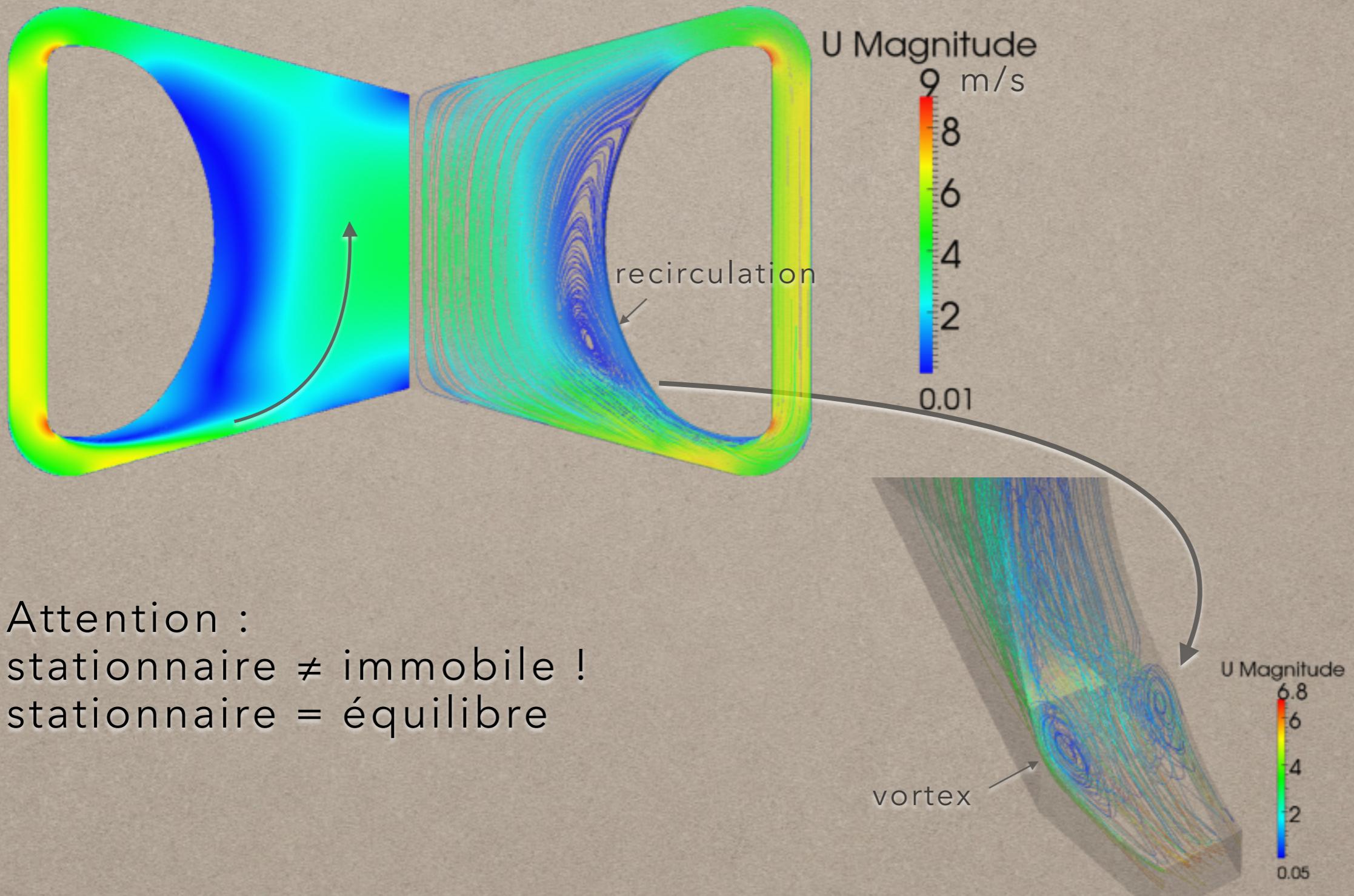
Résultats :

$$\sum_{g=1}^{\infty} precursor_g = 1 \implies \sum_{g=1}^{\infty} neutron_{tot_g} \cdot \beta = 1$$

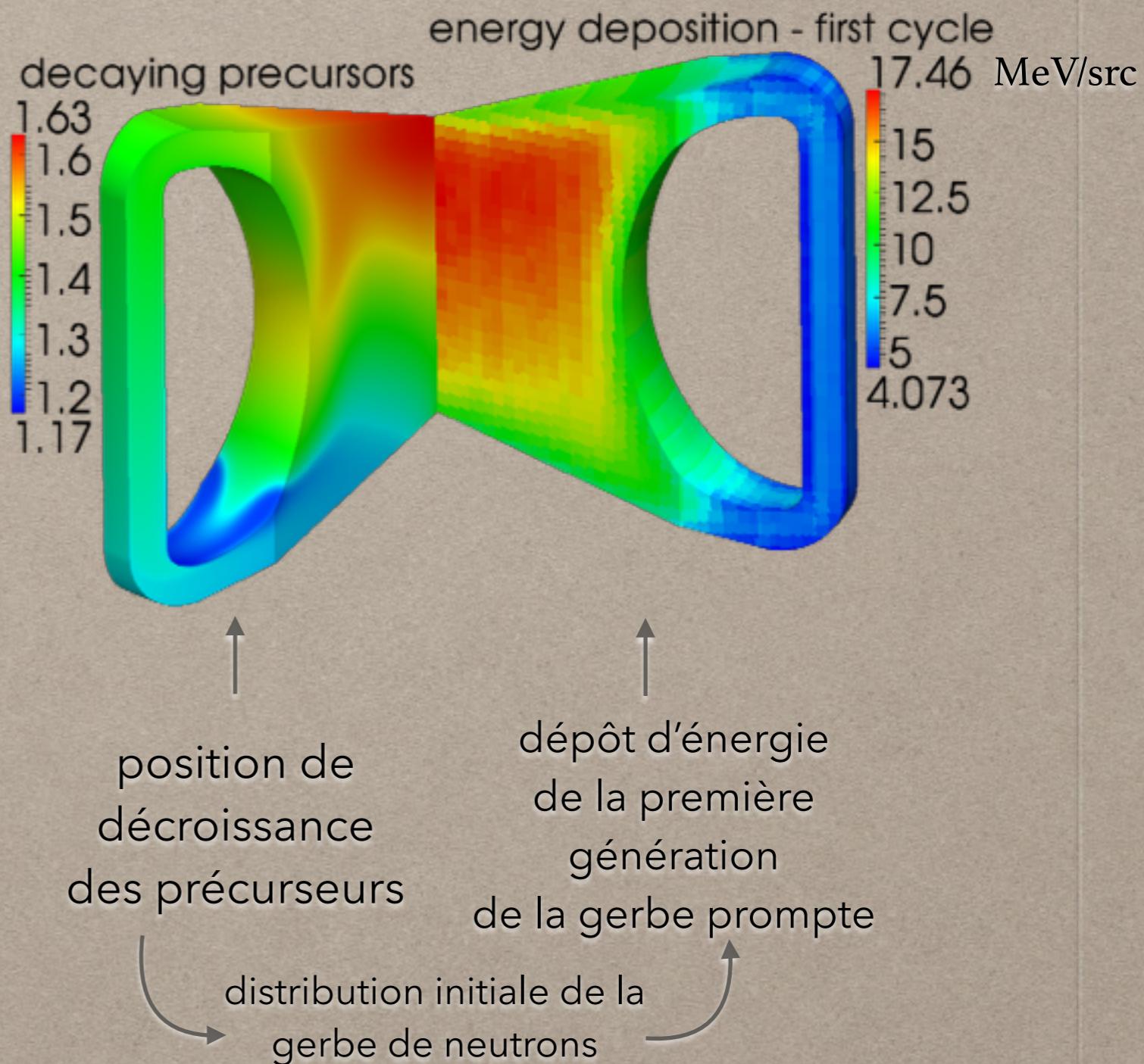


$$(1-k_p)_{\text{équilibre}} = \beta_{\text{eff}} = 154 \pm 4 \text{ pcm}$$

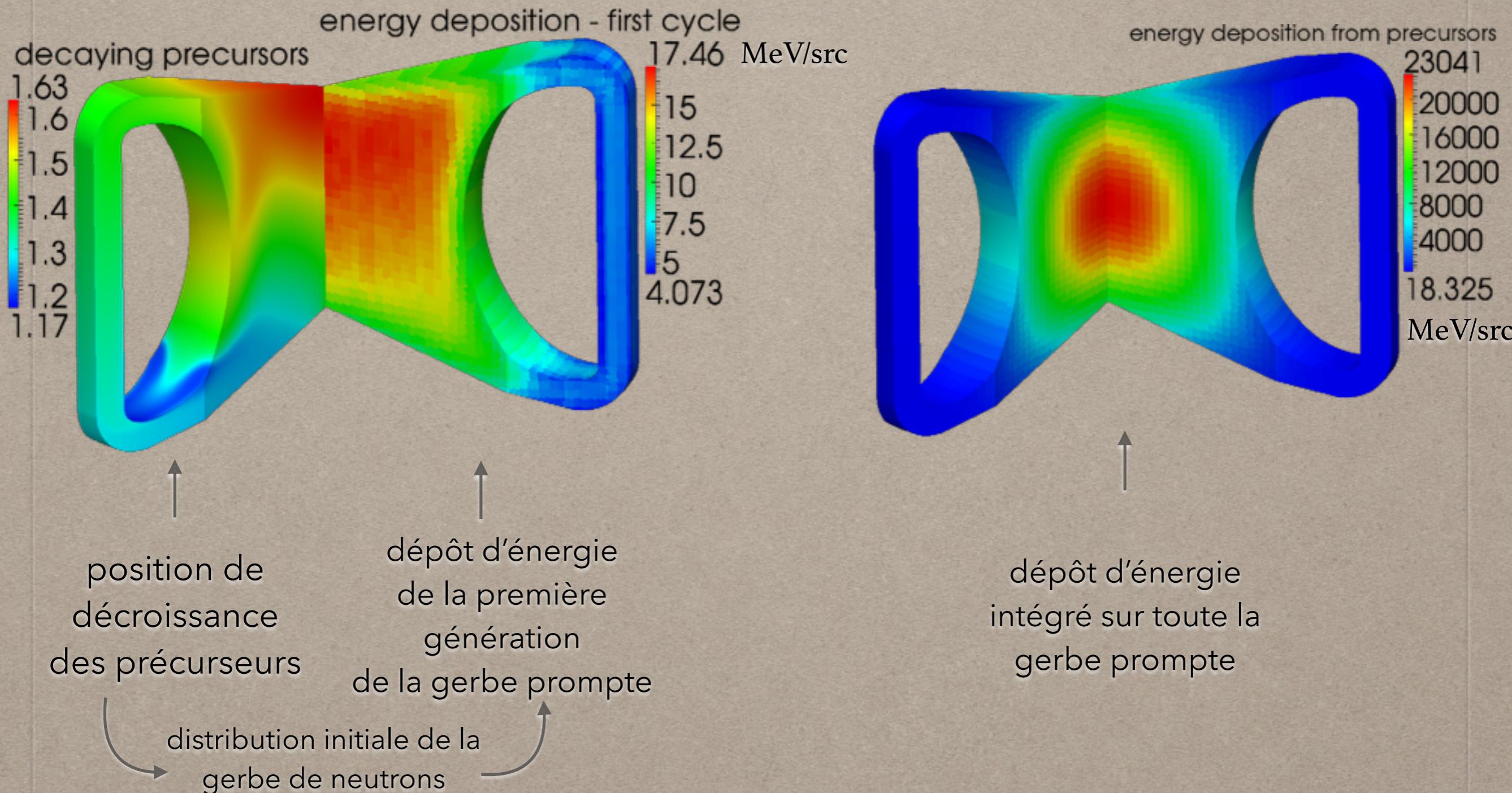
COUPLAGE STATIONNAIRE



COUPLAGE STATIONNAIRE

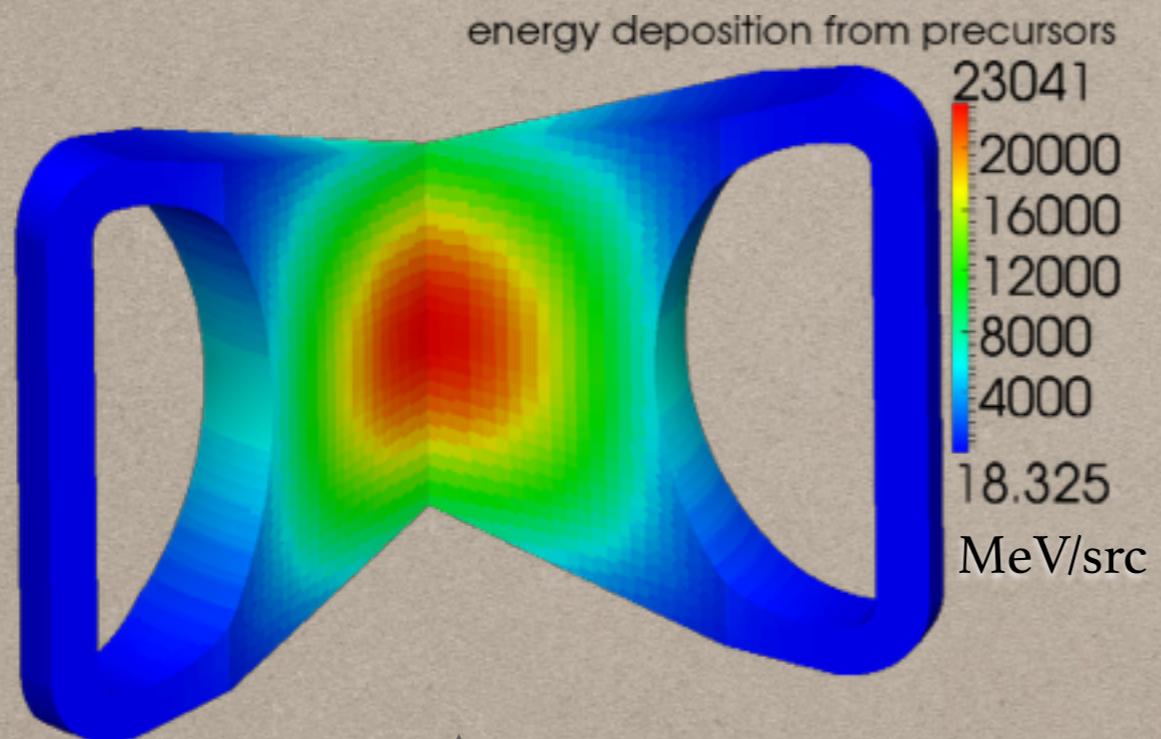


COUPLAGE STATIONNAIRE

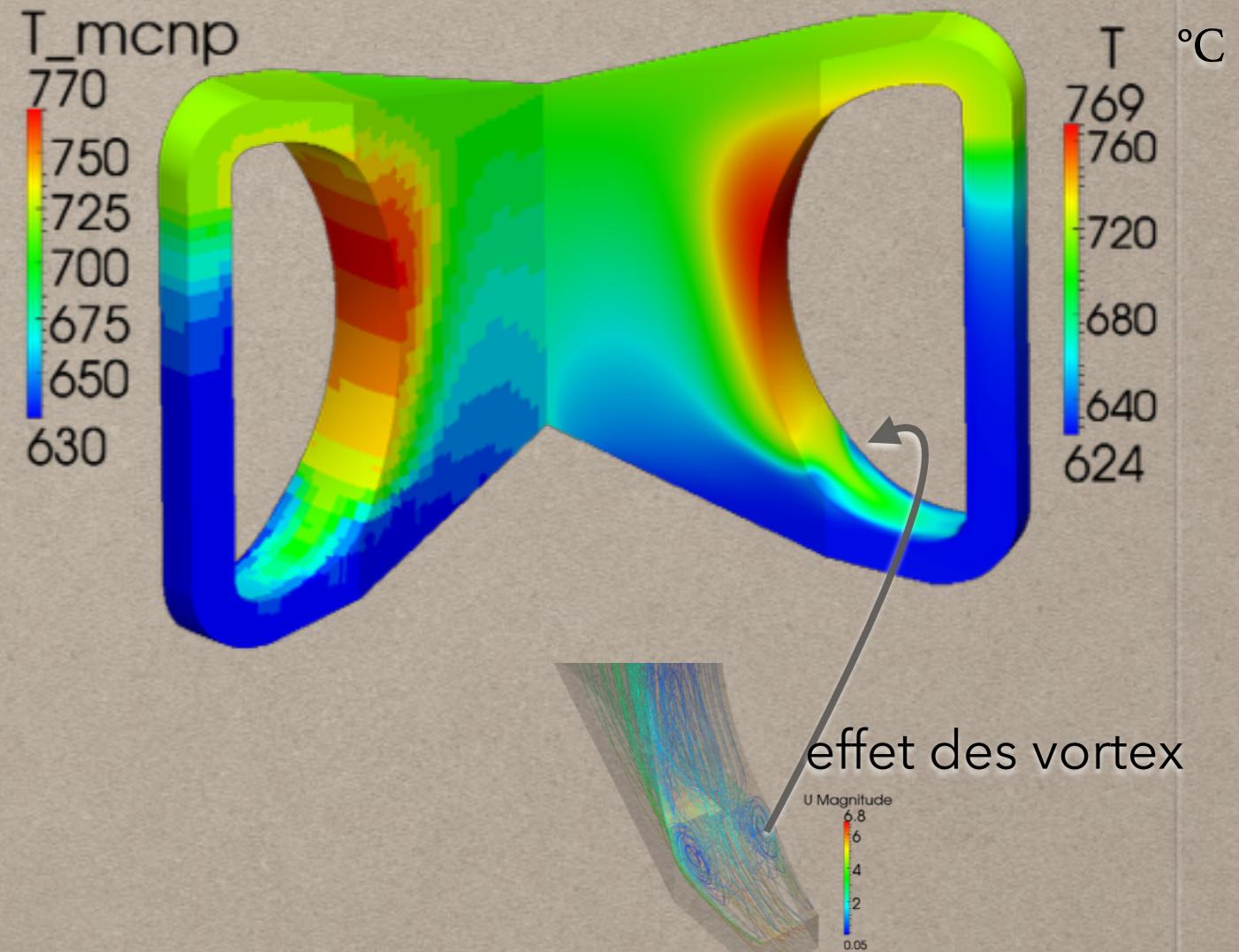


COUPLAGE STATIONNAIRE

/src



↑
dépôt d'énergie
intégré sur toute la
gerbe prompte



SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

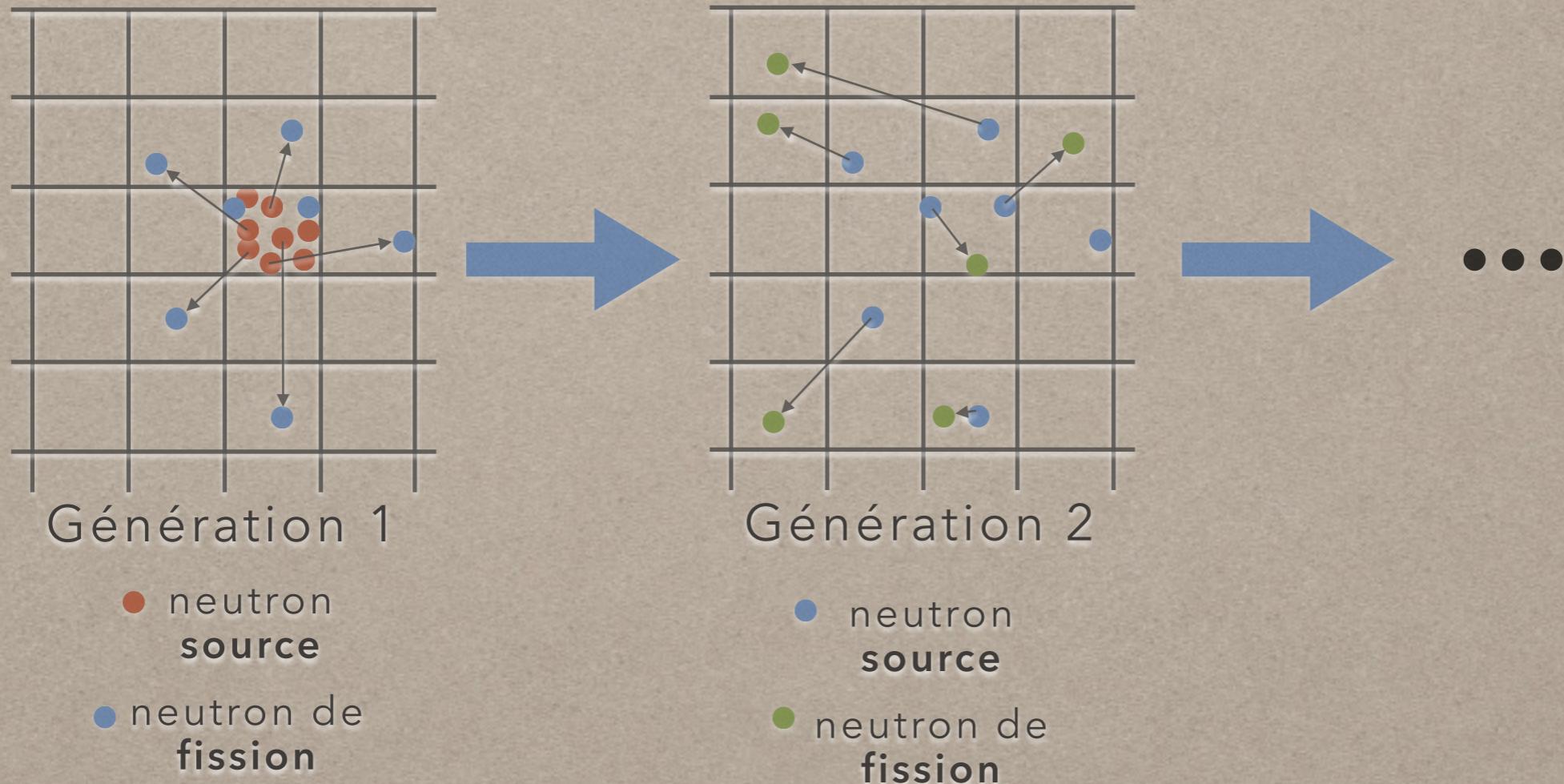
II. DISCIPLINES PHYSIQUES MISES EN JEU

III. COUPLAGE STATIONNAIRE

IV. COUPLAGE TRANSITOIRE
MATRICE DE FISSION

COUPLAGE TRANSITOIRE

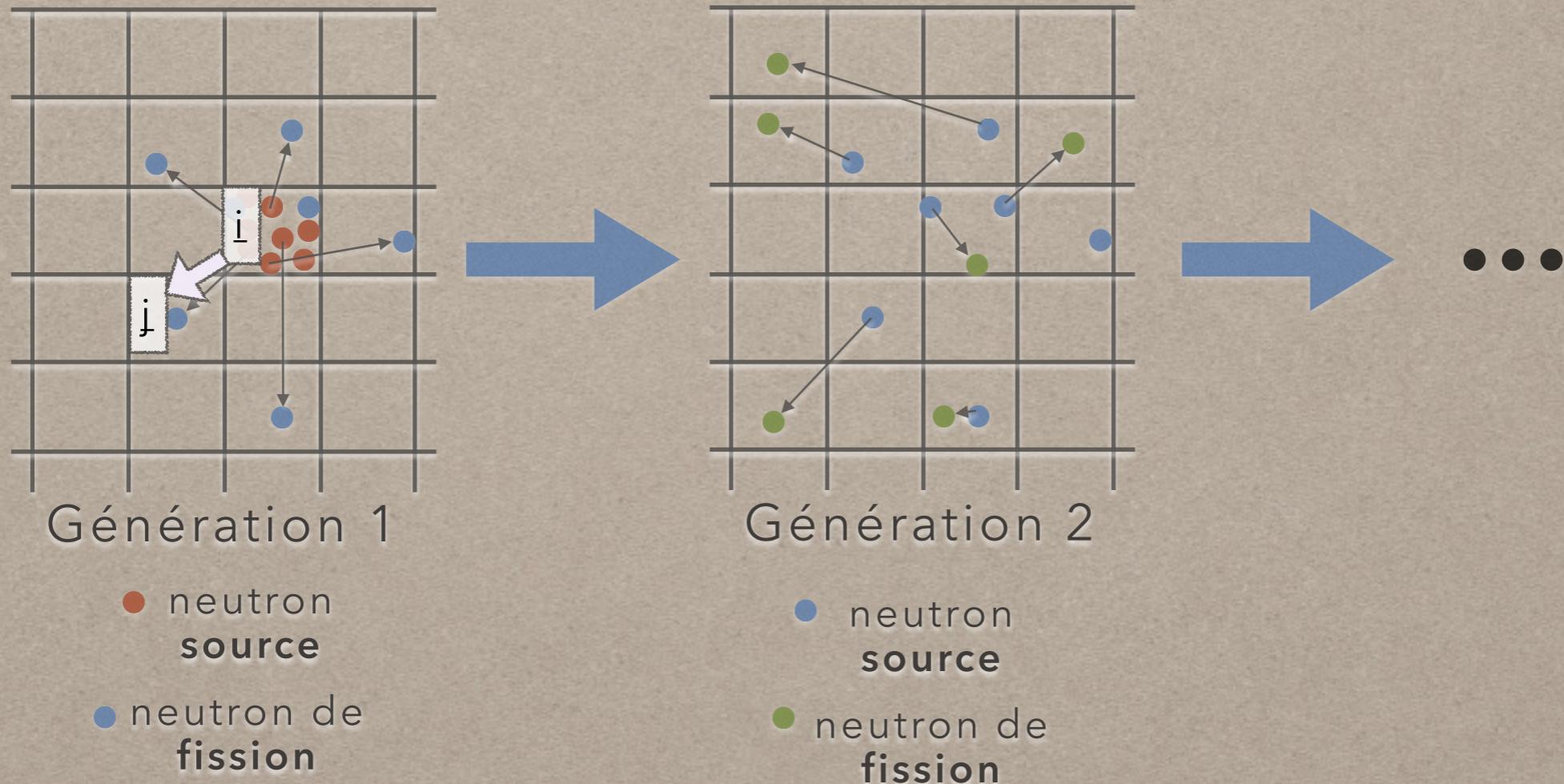
Matrice de fission



- Élément ij de la matrice : probabilité qu'un neutron source créé en i fasse un neutron de fission en j
- Construction de la matrice pour plusieurs états du réacteur différents + interpolation

COUPLAGE TRANSITOIRE

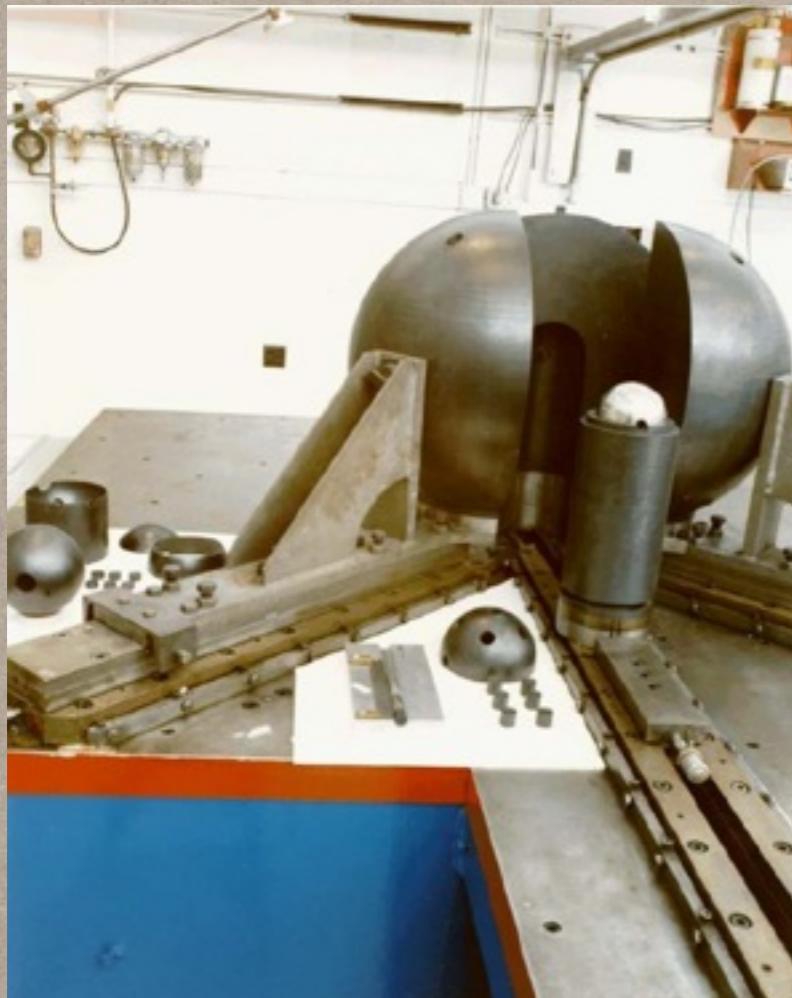
Matrice de fission



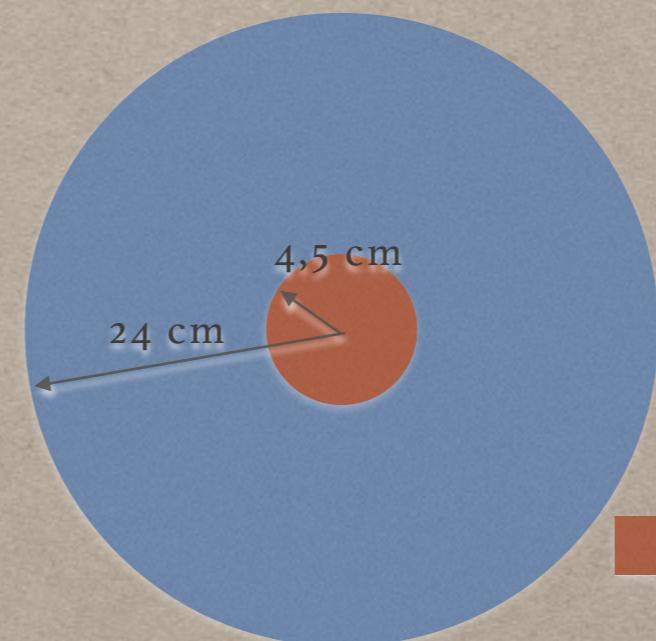
- Élément ij de la matrice : probabilité qu'un neutron source créé en i fasse un neutron de fission en j
- Construction de la matrice pour plusieurs états du réacteur différents + interpolation

COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



Benchmark :
Flattop - mesure expérimentale du β_{eff}



Plutonium

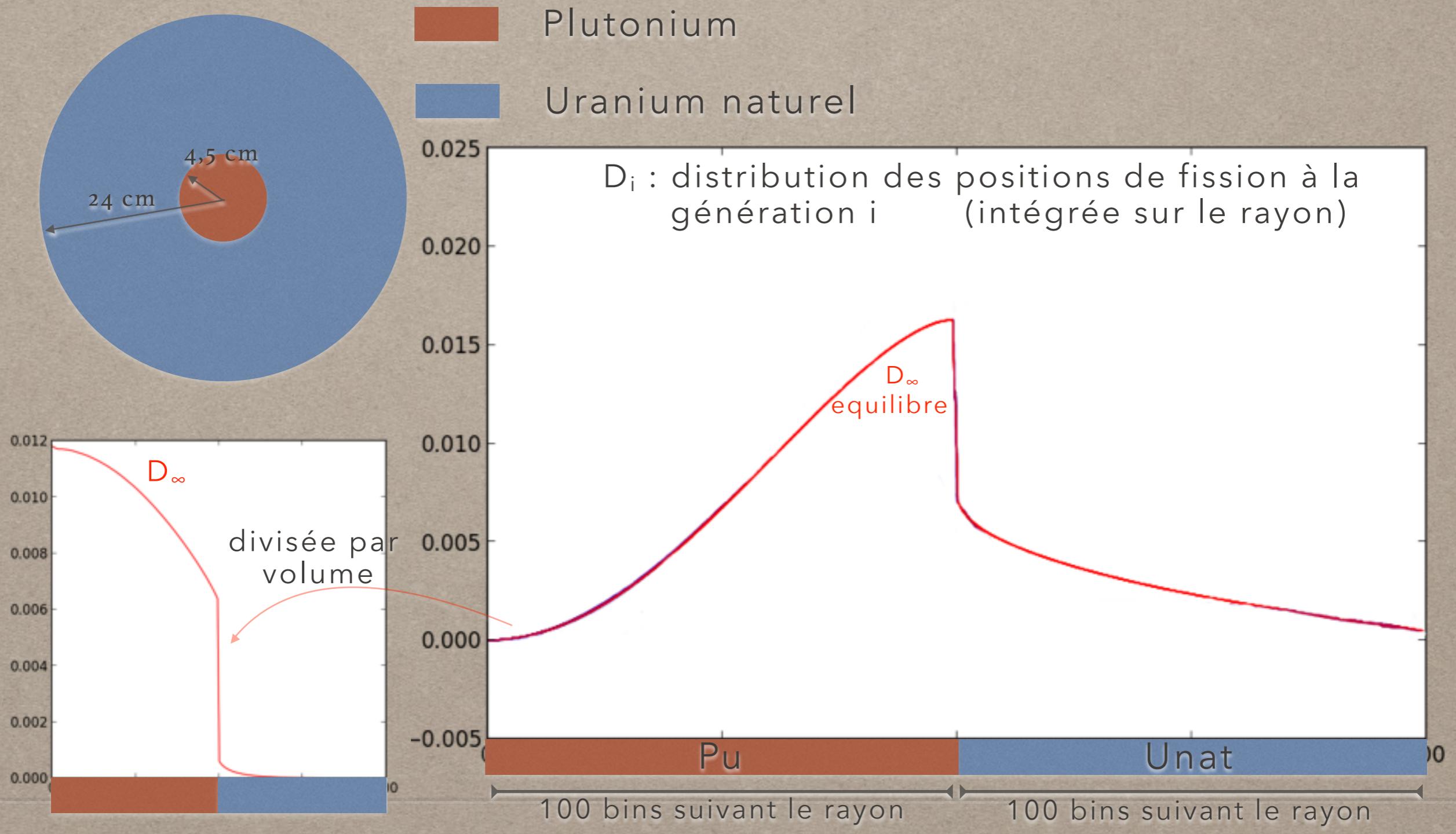


Uranium naturel

Sphère de Pu : bcp de fissions, peu de neutrons retardés $\beta_{\text{local}} \sim 250 \text{ pcm}$
Sphère de U_{nat} : peu de fissions, bcp de neutrons retardés $\beta_{\text{local}} \sim 1500 \text{ pcm}$

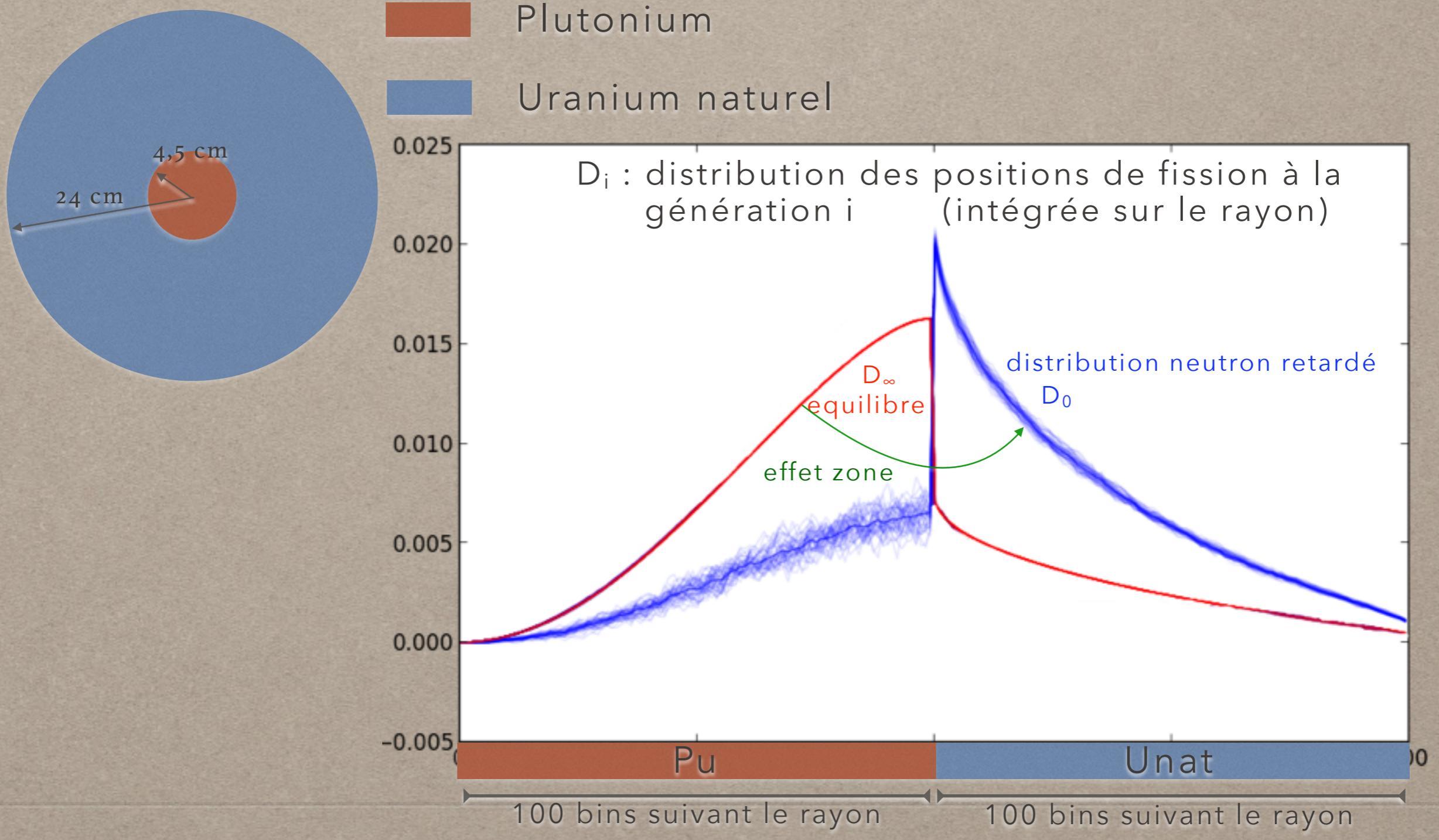
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



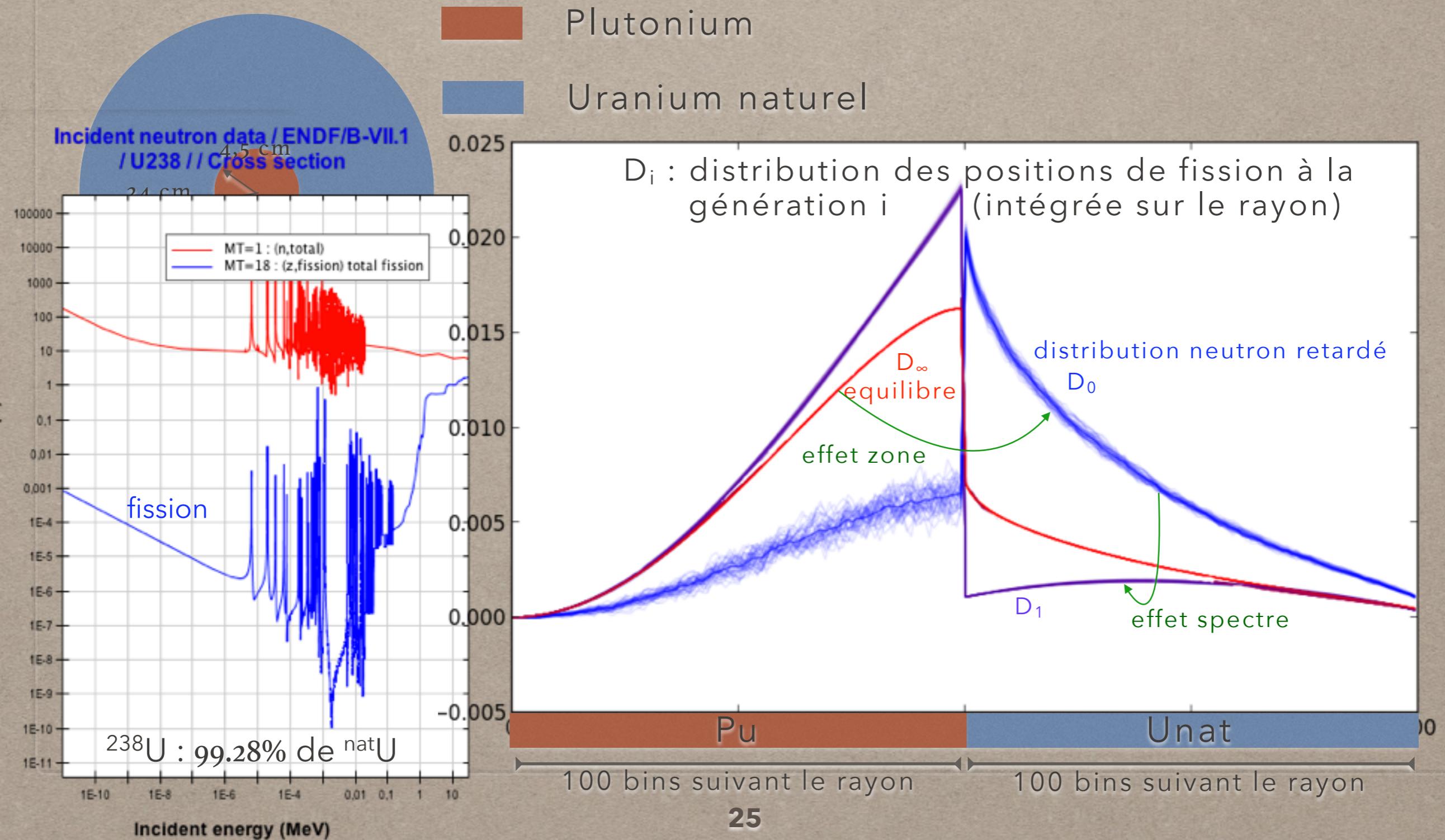
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



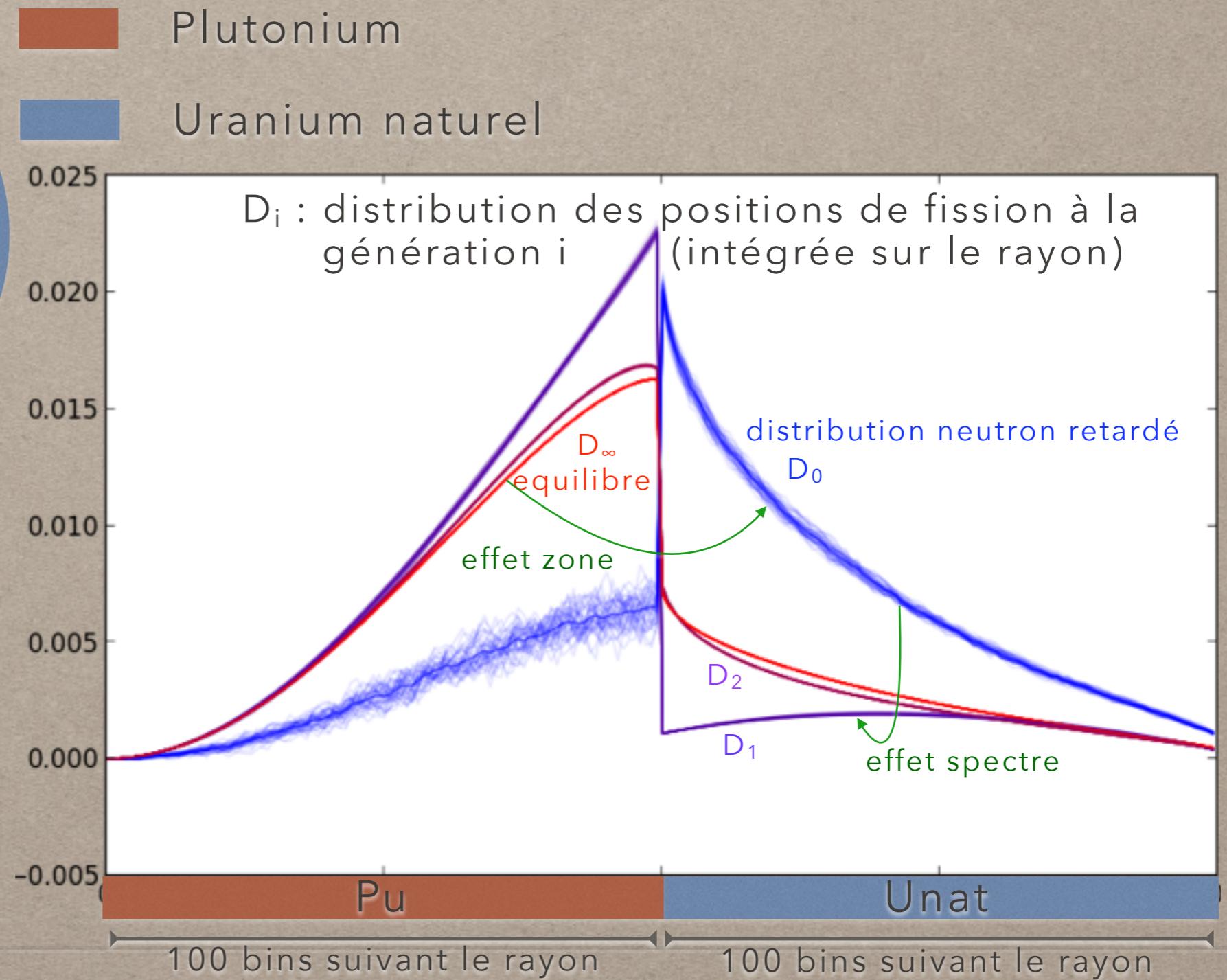
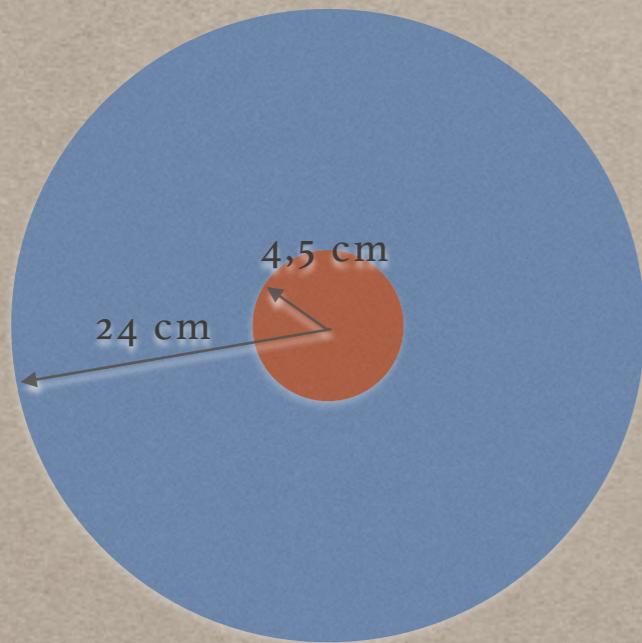
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



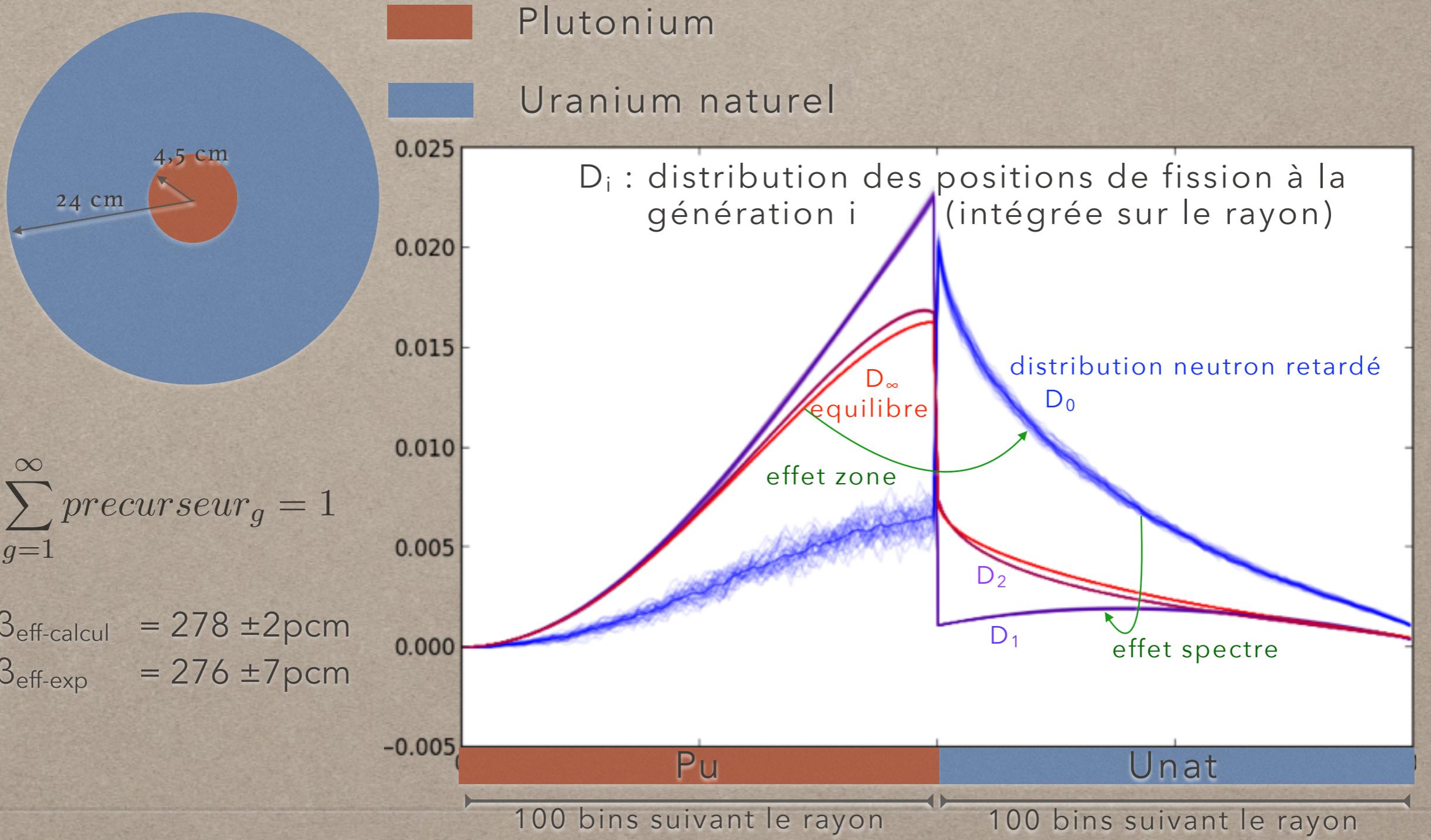
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



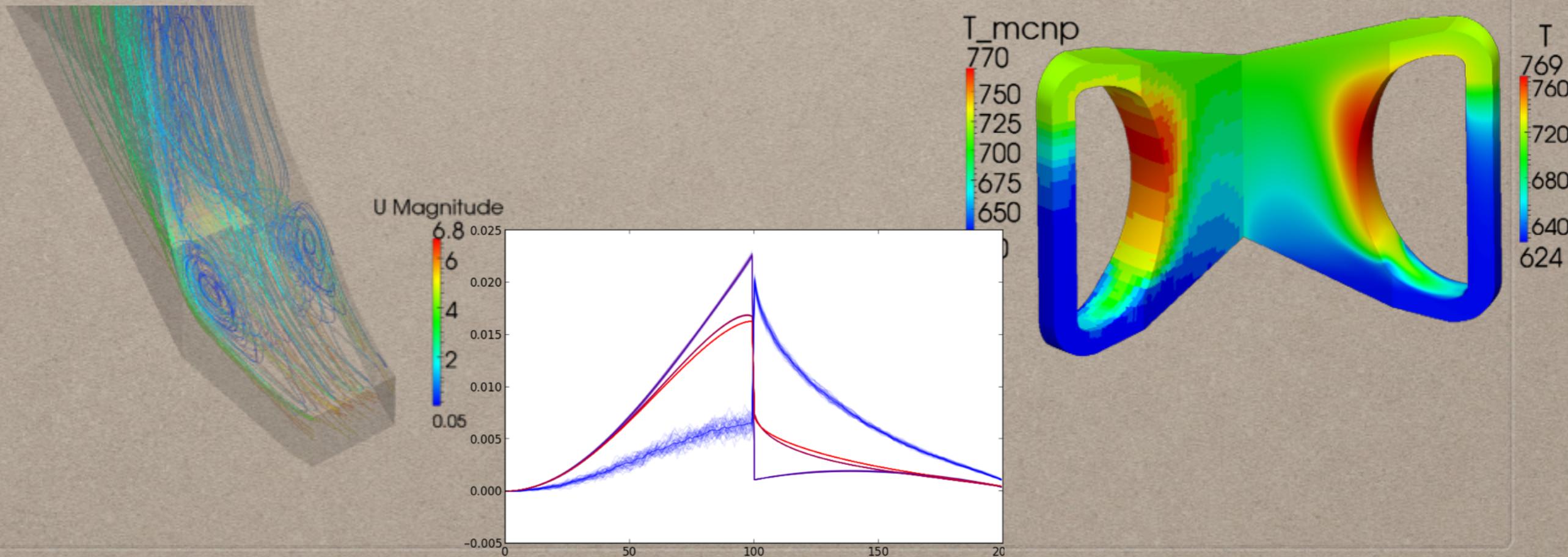
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Fait :

- Modèle de prise en compte du mouvement des précurseurs
- Calcul du β_{eff}
- Couplage stationnaire en place et fonctionnel

À Faire :

- Modèle transitoire : premiers tests positifs et prometteurs



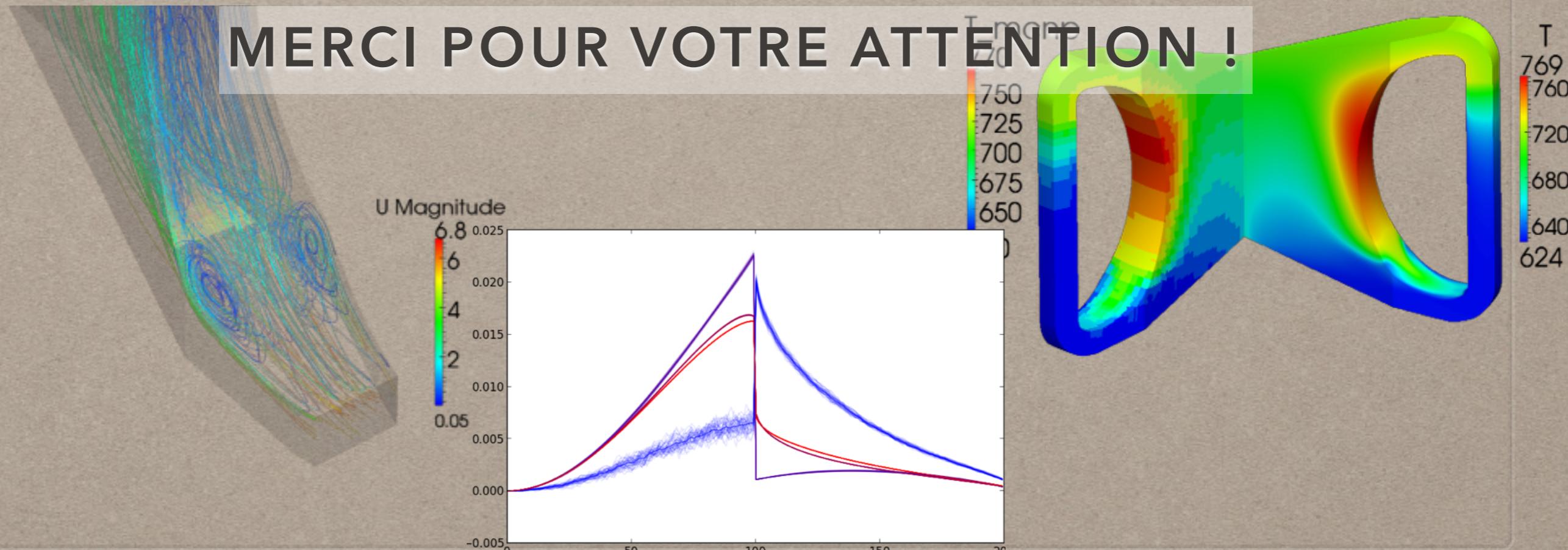
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Fait :

- Modèle de prise en compte du mouvement des précurseurs
- Calcul du β_{eff}
- Couplage stationnaire en place et fonctionnel

À Faire :

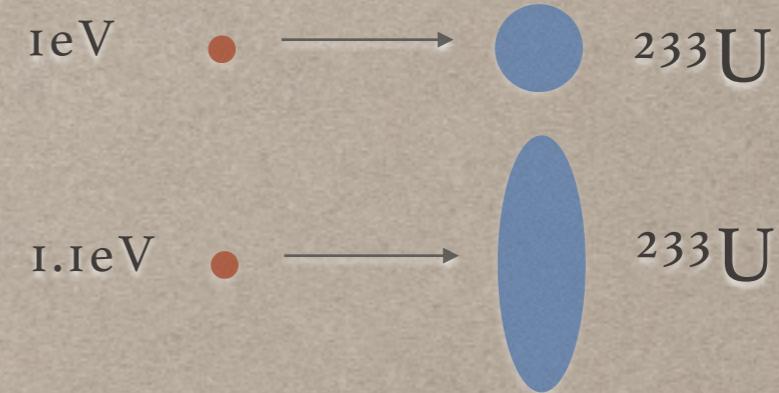
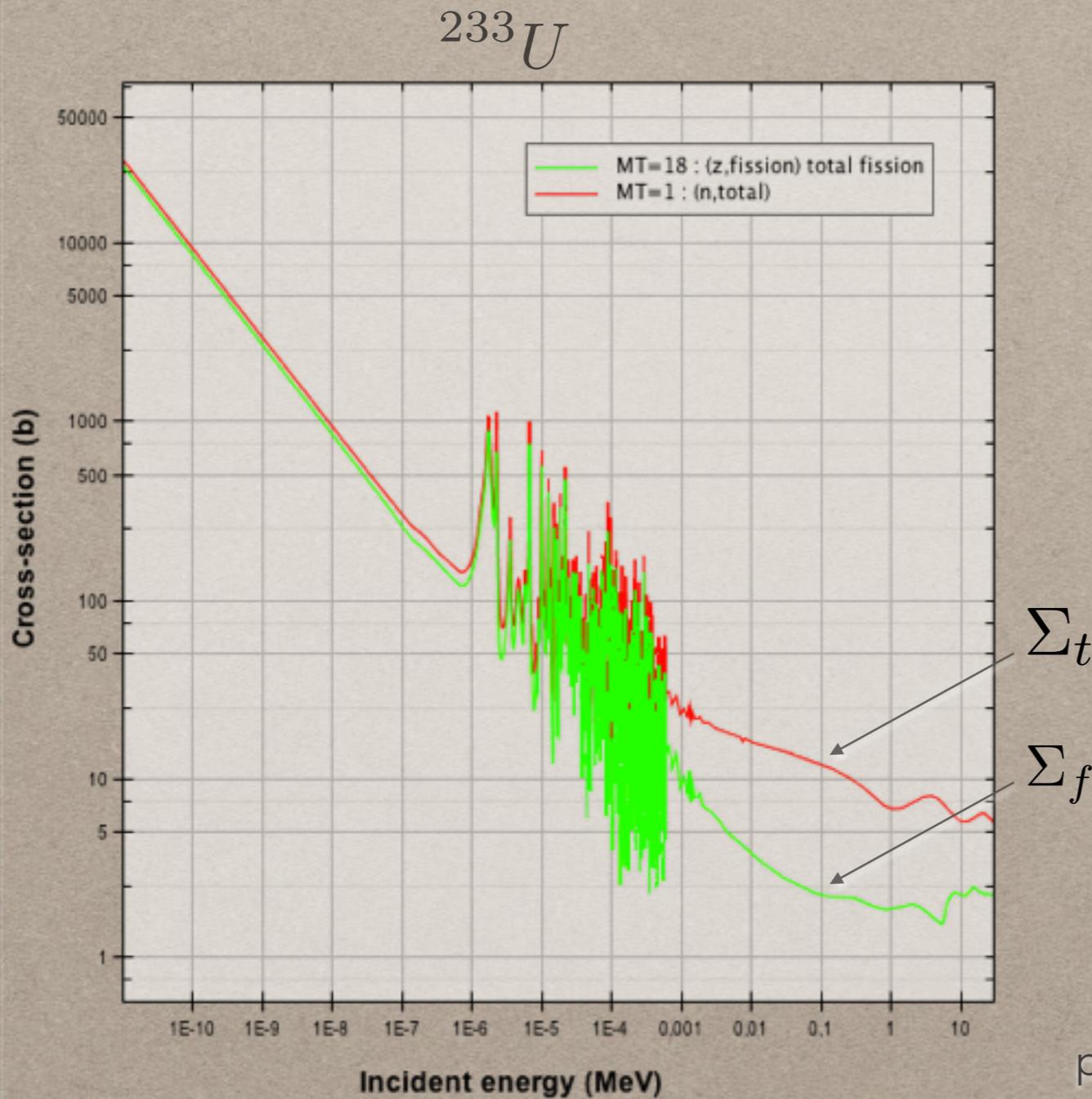
- Modèle transitoire : premiers tests positifs et prometteurs



BACKUP

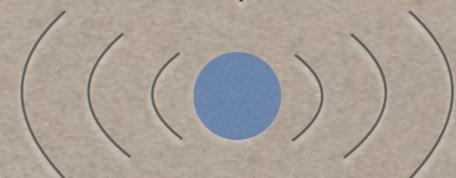
BACKUP

Sections efficaces



Effet doppler :

vibration du noyau lié à la température



élargissement des résonances
(énergie dans le centre de masse)

peut favoriser le rapport capture/fission

MÉCANIQUE DES FLUIDES

Diverses approches...

RANS
Reynold
Average
Navier-Stokes
Simulation



Modèle physique
évitant de devoir modéliser les
tourbillons :
utilisation de deux champ
scalaires, l'intensité cinétique
turbulente et sa dissipation

DNS
Direct
Numerical
Simulation
Modéliser
jusqu'à la
dissipation
total des
tourbillons

LES
Large
Eddy
Simulation
Modèle
mathématique
pour les plus
bas niveaux

COUPLAGE TRANSITOIRE

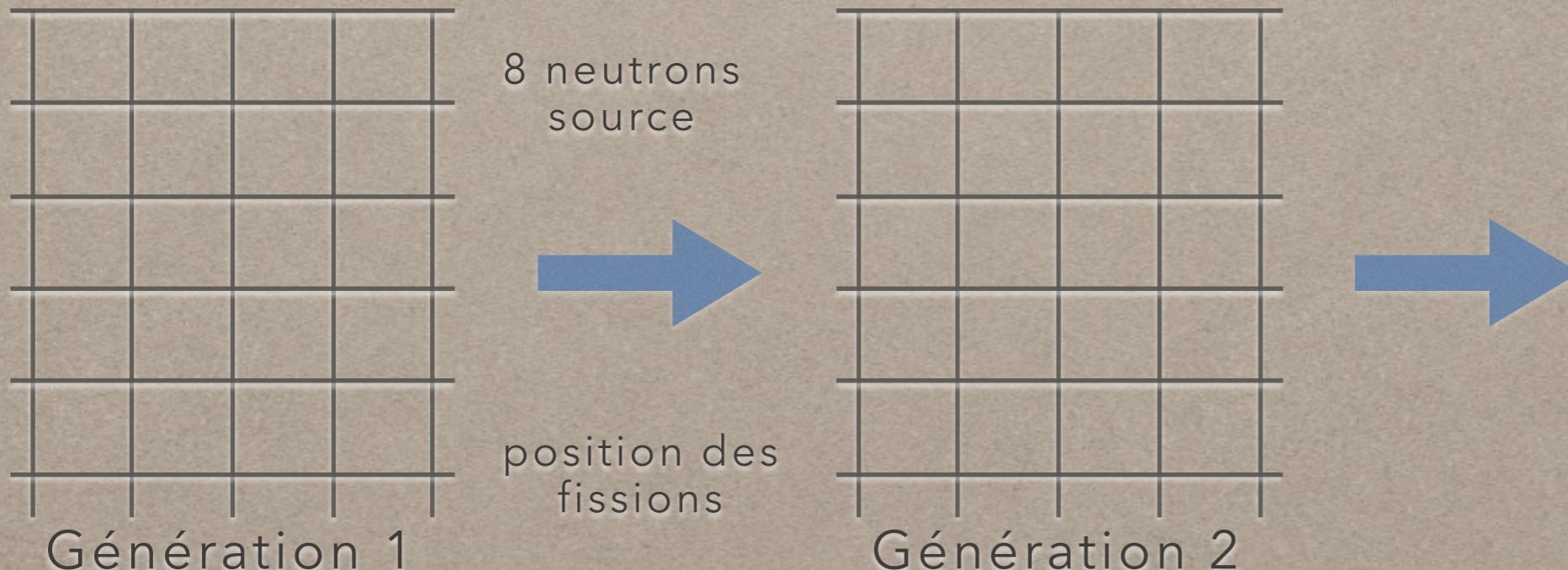
fonction de Green

Principe : gerbe = réponse du système (réacteur) à un Dirac (décroissance de précurseurs)

Idée : sommer la réponse du cœur à la décroissance des précurseurs dans toutes les cellules

Problème : si k_p tend vers 1, la taille de la gerbe tend vers l'infini...

Solution : ne s'intéresser qu'à la réponse sur une génération dans chaque cellule et la propager par génération



COUPLAGE TRANSITOIRE

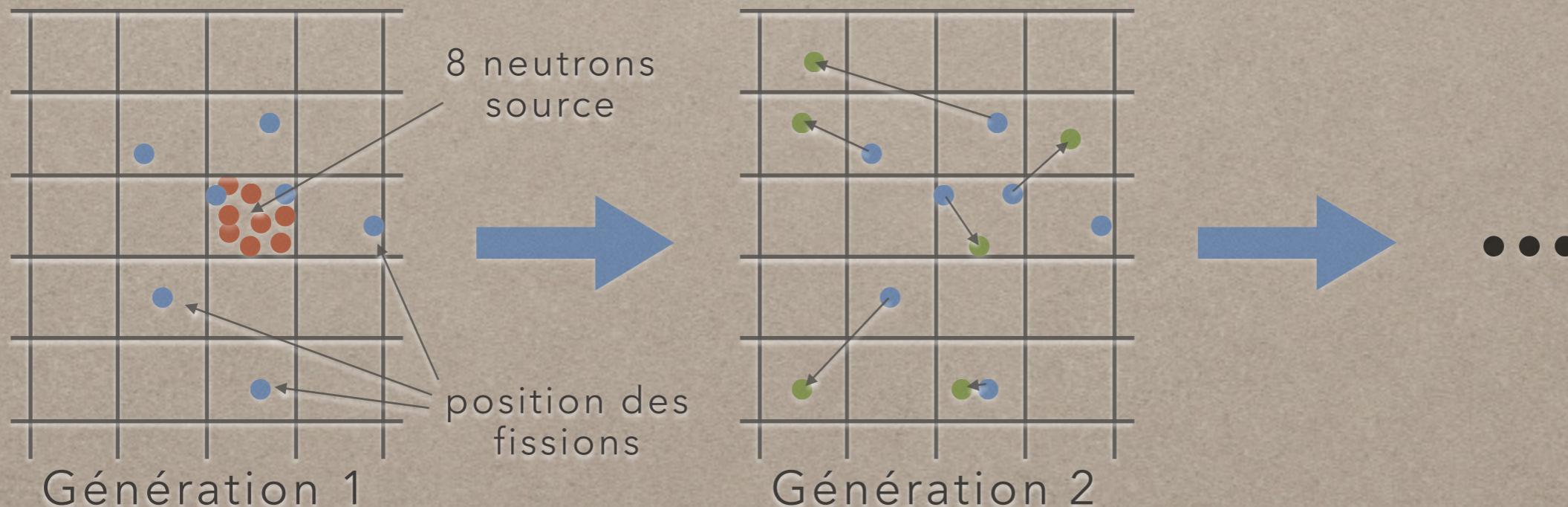
fonction de Green

Principe : gerbe = réponse du système (réacteur) à un Dirac (décroissance de précurseurs)

Idée : sommer la réponse du cœur à la décroissance des précurseurs dans toutes les cellules

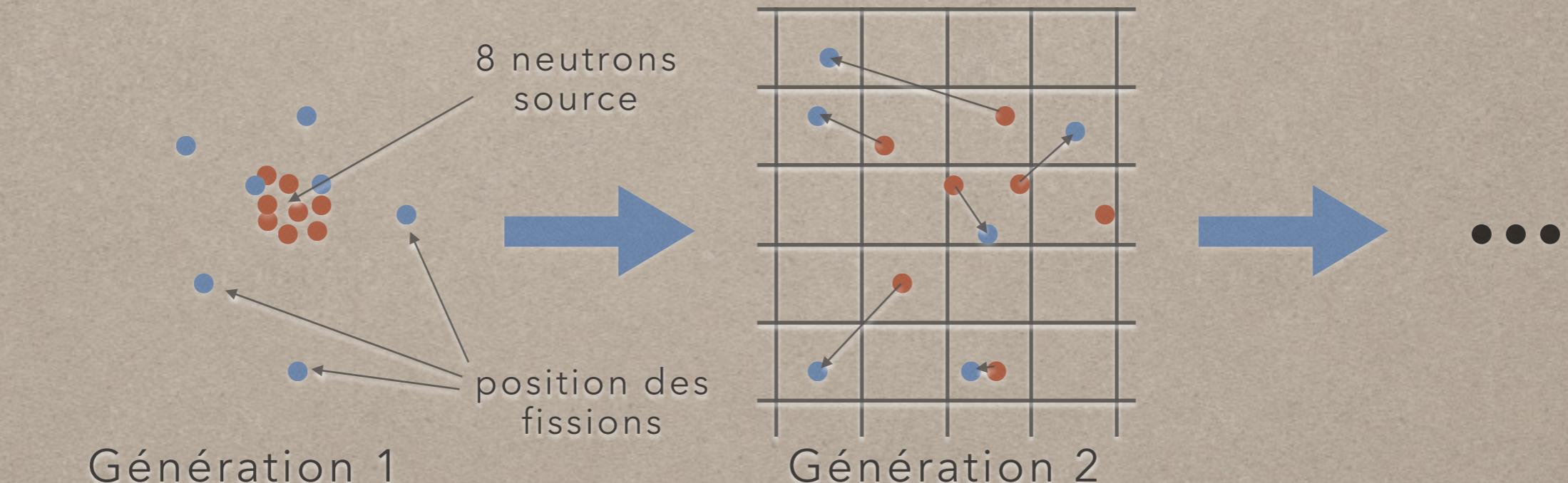
Problème : si k_p tend vers 1, la taille de la gerbe tend vers l'infini...

Solution : ne s'intéresser qu'à la réponse sur une génération dans chaque cellule et la propager par génération



COUPLAGE TRANSITOIRE

fonction de Green



Attention plusieurs jeux à calculer :

neutrons par fission	v_p, χ_p	→ gerbe prompte	spectre prompt
	v_p, χ_d	→ //	spectre retardé
spectre émission	v_t, χ_p	→ gerbe totale	spectre prompt
	v_t, χ_d	→ //	spectre retardé

la gerbe totale moins la prompte donne la retardée !

COUPLAGE TRANSITOIRE

fonction de Green :
peut-on prédire le k_p & la distribution des fissions hors équilibre?

- cœur - 600K
- cœur - 900K
- réflecteur

prédiction du k_p ?
(vs MCNP) $G_{600} \rightarrow -197 \pm 2 \text{pcm}$
 $G_{900} \rightarrow -185 \pm 2 \text{pcm}$

correction des
jeux de donnée



↓
jeu de donnée
↓
 G_{600} G_{900}

prédiction du k_p quel que soit T ?
(vs MCNP)

modèle : $k_p = f(T) = a + b \cdot T + c \cdot \log(T)$

densité

doppler

$$G_{700} = \frac{f(900) \cdot G_{600} + f(600) \cdot G_{900}}{f(900) + f(600)} \rightarrow -I \pm 2 \text{pcm}$$

(variation de 900 pcm)

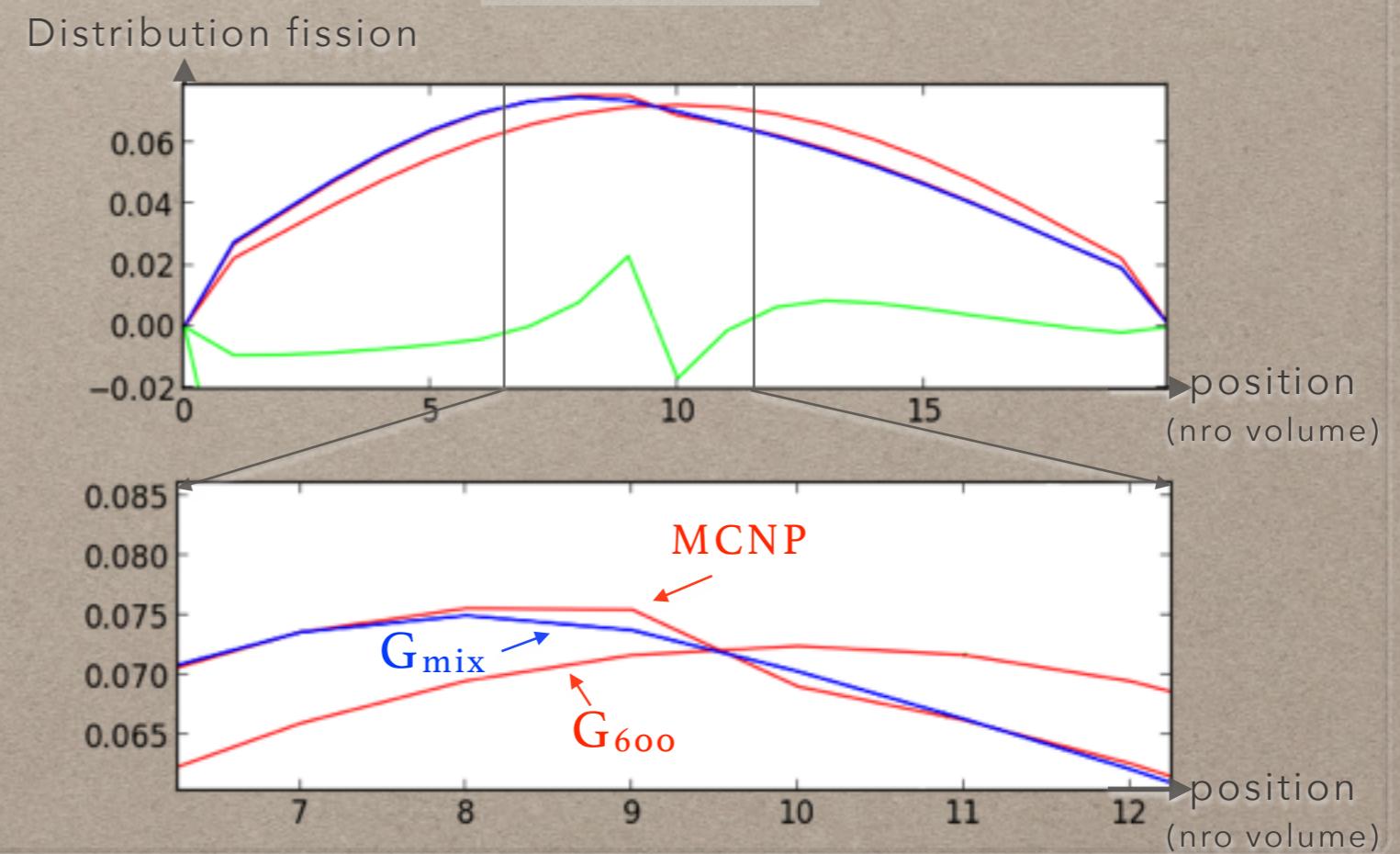
COUPLAGE TRANSITOIRE

fonction de Green :
peut-on prédire le k_p & la distribution des fissions hors équilibre?

- coeur - 600K
- coeur - 900K
- réflecteur



jeu de donnée
 G_{600} G_{900}



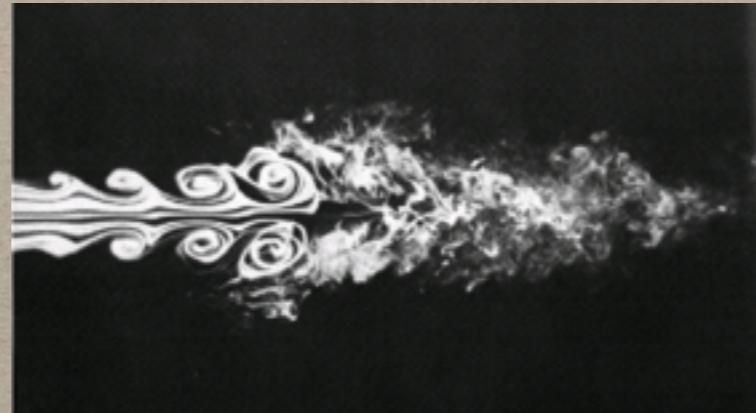
MÉCANIQUE DES FLUIDES

lamininaire ou turbulent ?
équation bilan de la quantité de mouvement :

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

$$\frac{\nabla \cdot (\rho\mathbf{u} \otimes \mathbf{u})}{\nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}})} \approx \frac{U^2/L}{\nu U/L^2} = \frac{UL}{\nu} = Re$$

Permet de caractériser
l'écoulement !



vitesse
pression
énergie
température

MÉCANIQUE DES FLUIDES

lamininaire ou turbulent ?
équation bilan de la quantité de mouvement :

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

$$\frac{\nabla \cdot (\rho\mathbf{u} \otimes \mathbf{u})}{\nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}})} \approx \frac{U^2/L}{\nu U/L^2} = \frac{UL}{\nu} = Re$$

Permet de caractériser
l'écoulement !



MSFR : $Re=400\ 000$
Régime turbulent
Très complexe à
résoudre directement

variables
moyennes

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' && \text{vitesse} \\ p &= \bar{p} + p' && \text{pression} \\ e &= \bar{e} + e' && \text{énergie} \\ T &= \bar{T} + T' && \text{température} \end{aligned}$$