

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

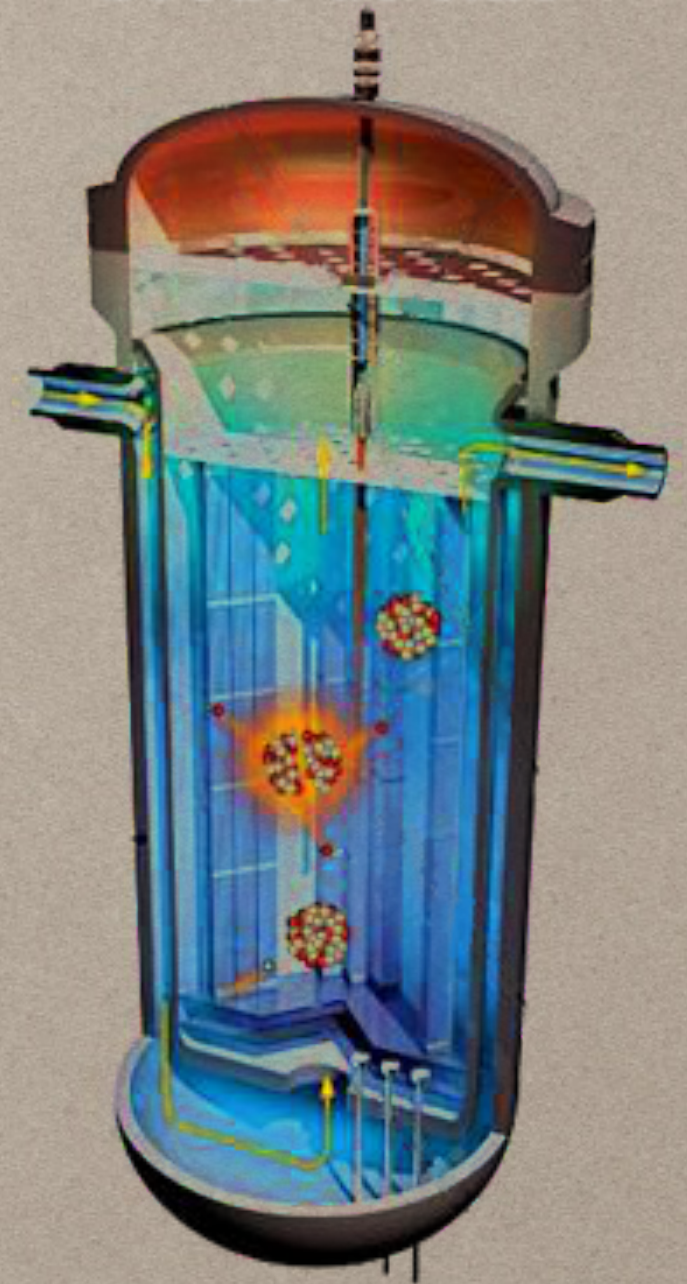
État actuel en France :

- 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

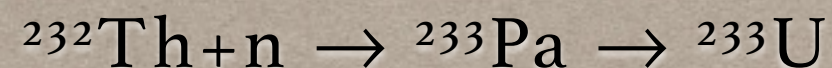
chimiquement inerte (huile : 1000 x eau)

basse pression

haute température 750°C

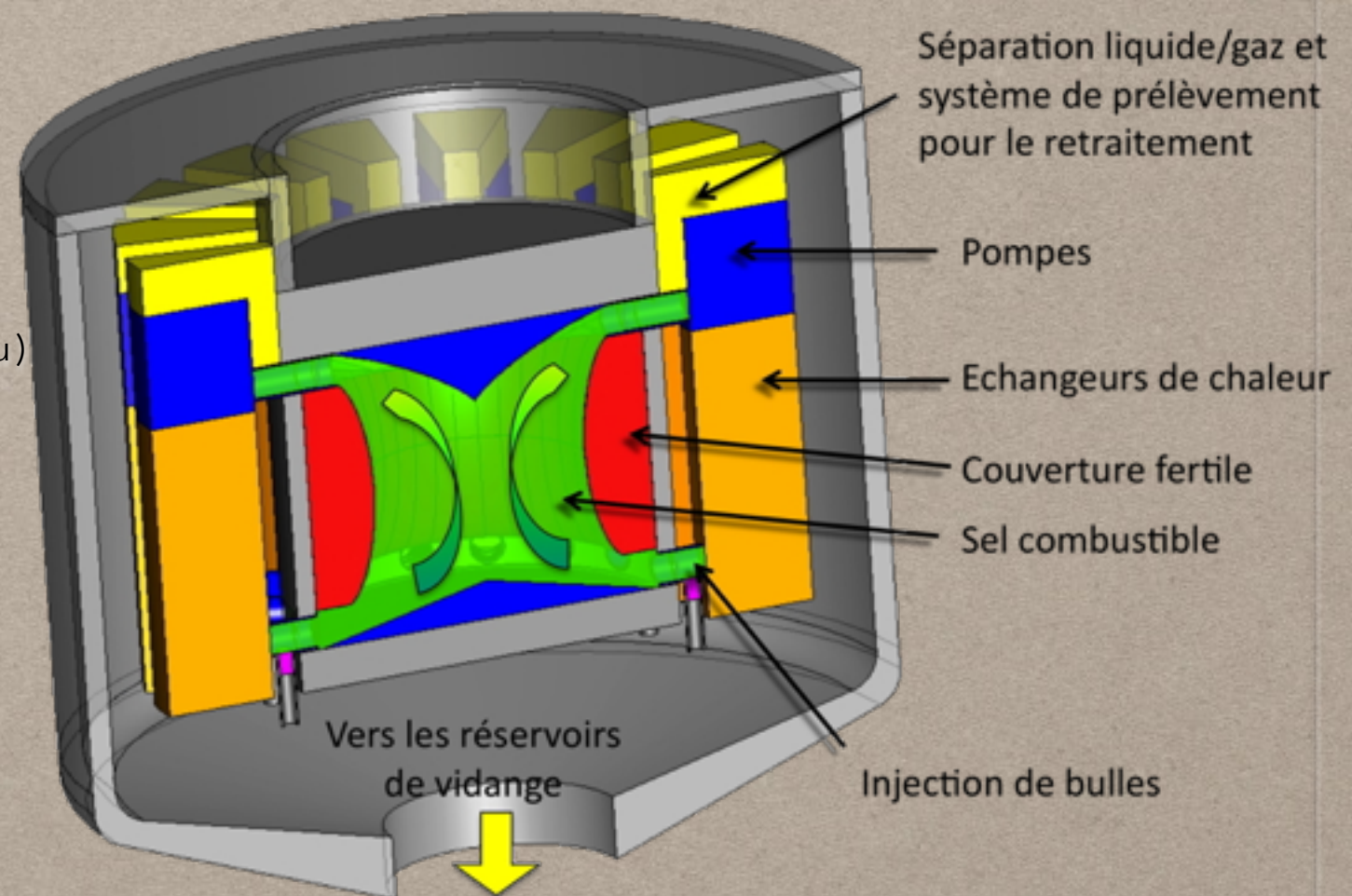
Spectre neutronique rapide

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

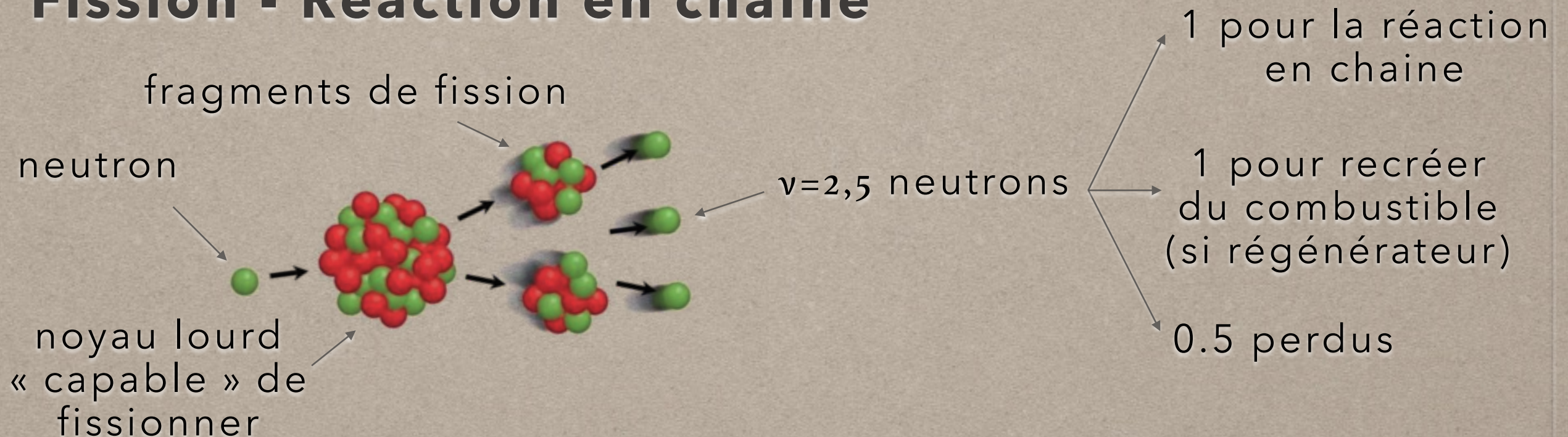
II. DISCIPLINES PHYSIQUES MISES EN JEU
NEUTRONIQUE
MÉCANIQUE DES FLUIDES
COUPLAGE

III. COUPLAGE STATIONNAIRE

IV. COUPLAGE TRANSITOIRE

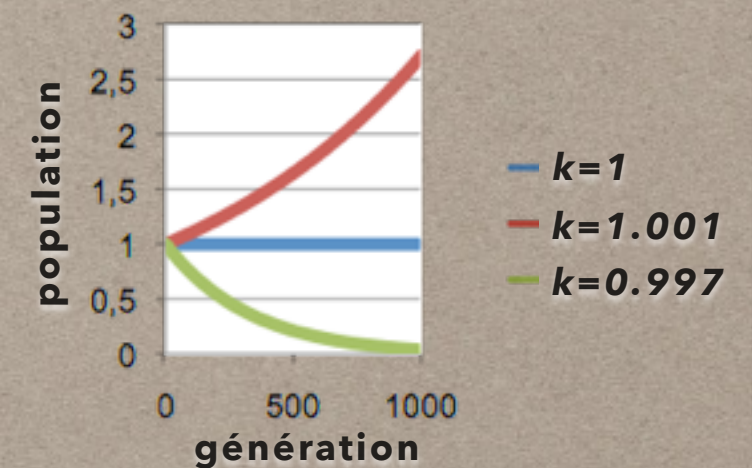
NEUTRONIQUE

Fission - Réaction en chaîne



coefficient de multiplication :

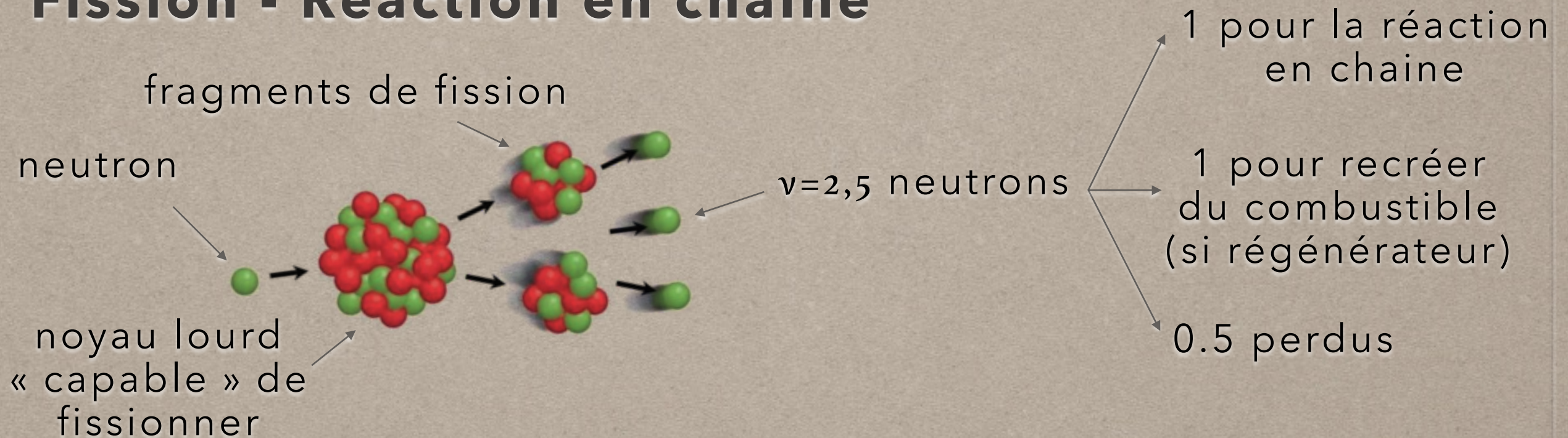
$$k = \frac{\text{quantite de neutron a la generation } n + 1}{\text{quantite de neutron a la generation } n}$$



Critique : $k=1$

NEUTRONIQUE

Fission - Réaction en chaîne

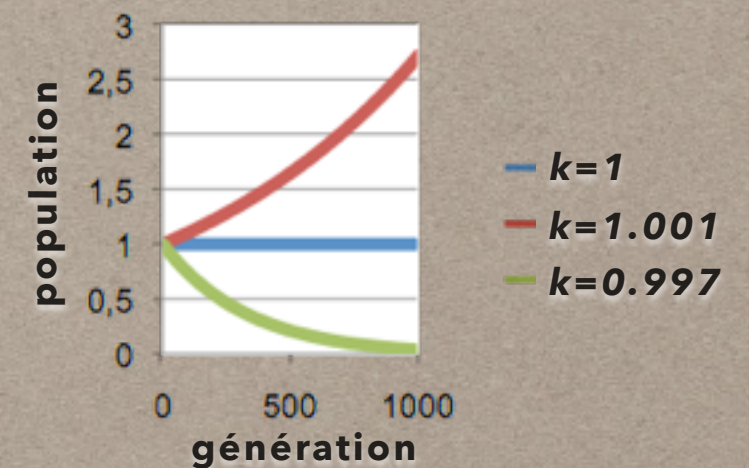


coefficient de multiplication :

$$k = \frac{\text{quantite de neutron a la generation } n + 1}{\text{quantite de neutron a la generation } n}$$

réactivité

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

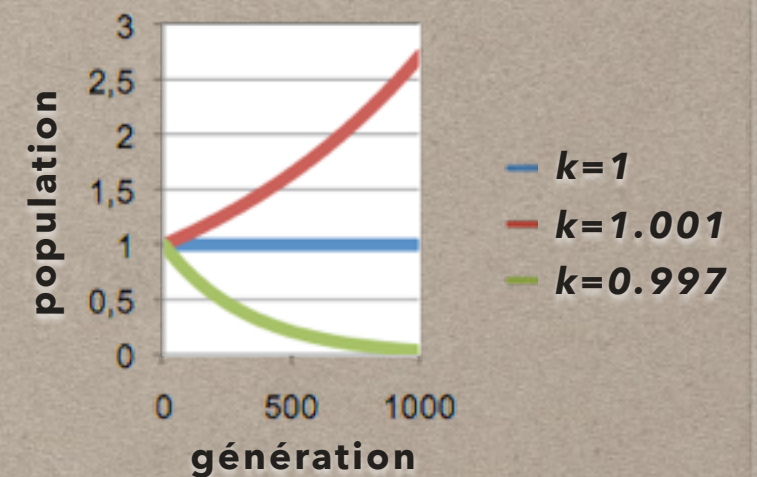


Critique : $k=1$

NEUTRONIQUE

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

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

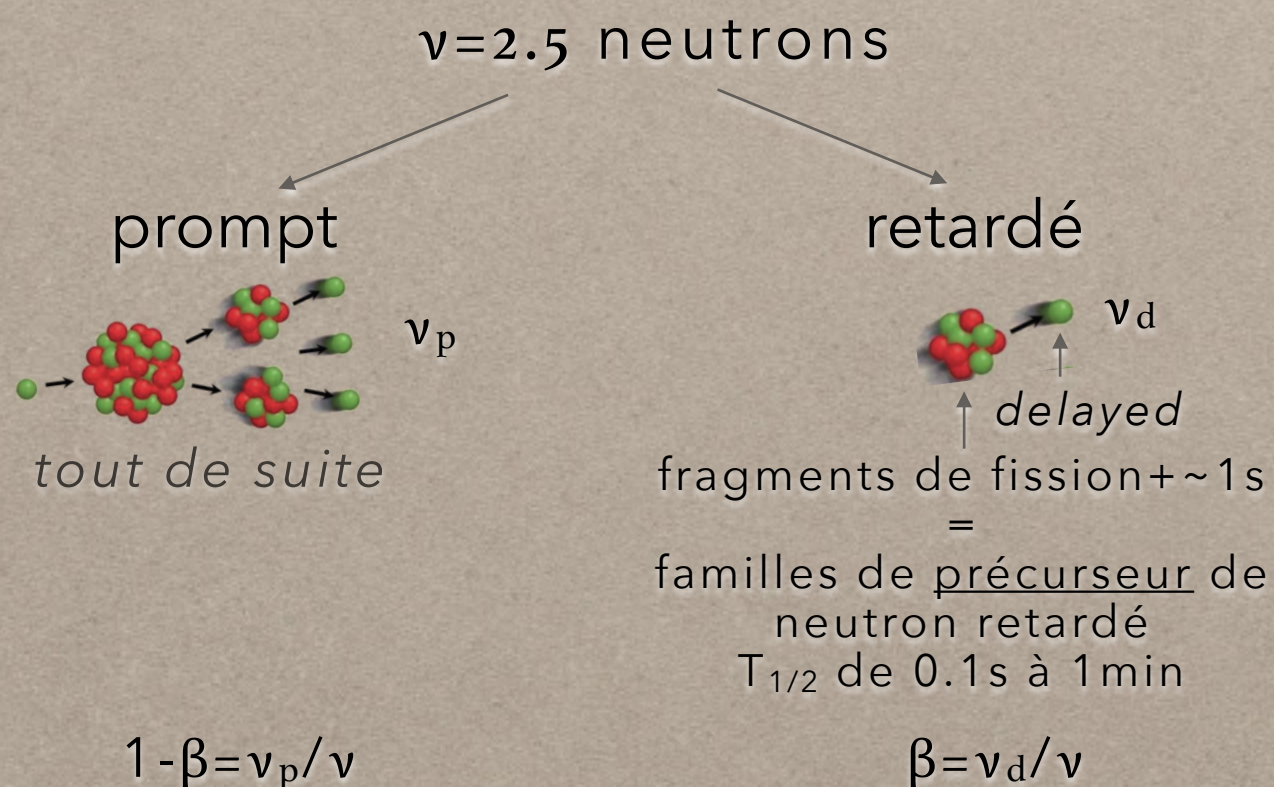
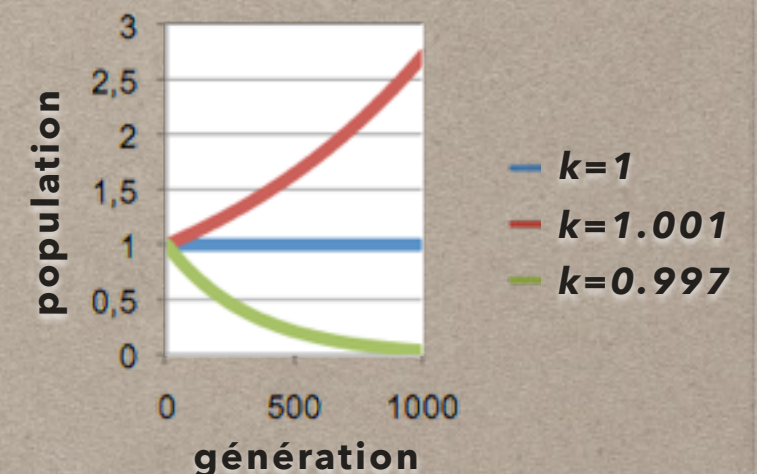


NEUTRONIQUE

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

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

Fraction de neutron retardés : β



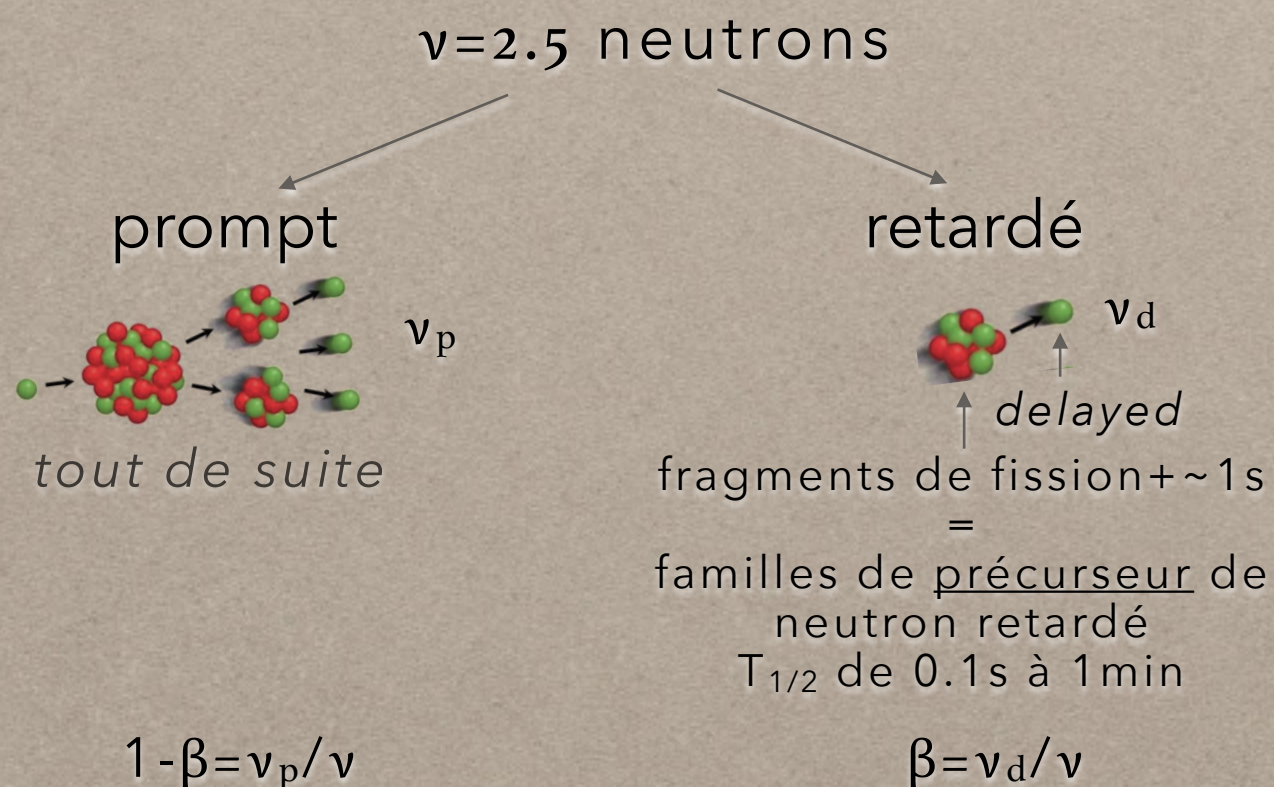
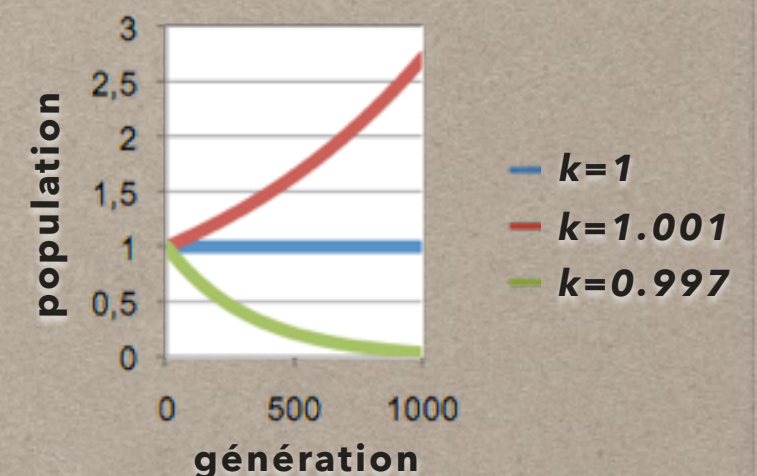
$\beta \sim 300 \text{ pcm}$ (0.3%)

NEUTRONIQUE

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

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

Fraction de neutron retardés : β



$\beta \sim 300 \text{ pcm}$ (0.3%)

À l'équilibre : $k=1=k_p+\beta$

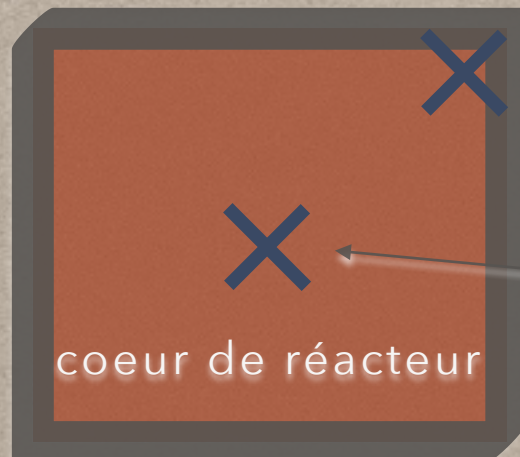
μs s

NEUTRONIQUE

Mais ...

NEUTRONIQUE

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



coeur de réacteur

× position décroissance
précurseur de neutron

faible probabilité
de déclencher une nouvelle fission

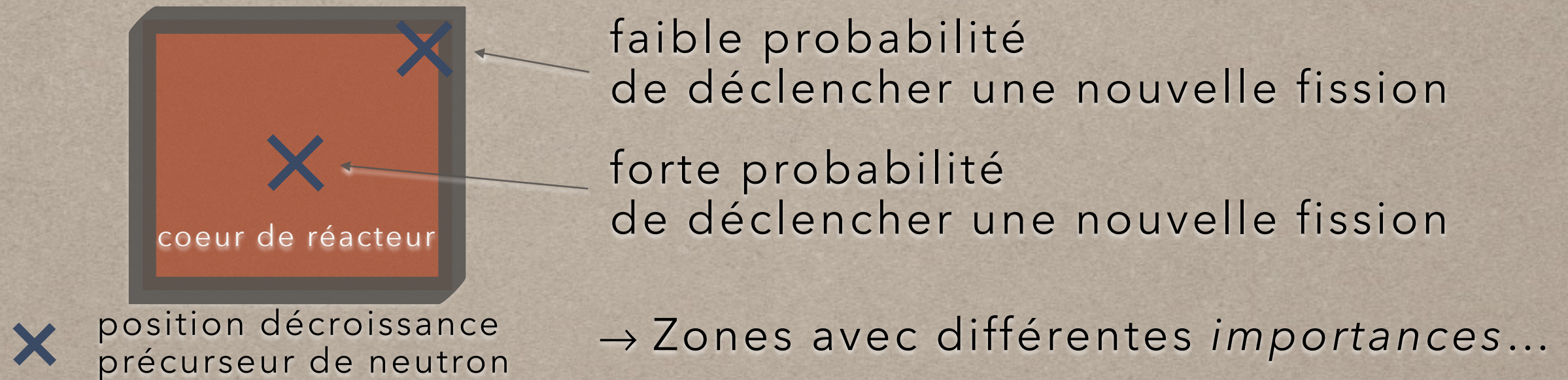
forte probabilité
de déclencher une nouvelle fission

→ Zones avec différentes *importances*...

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

NEUTRONIQUE

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



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

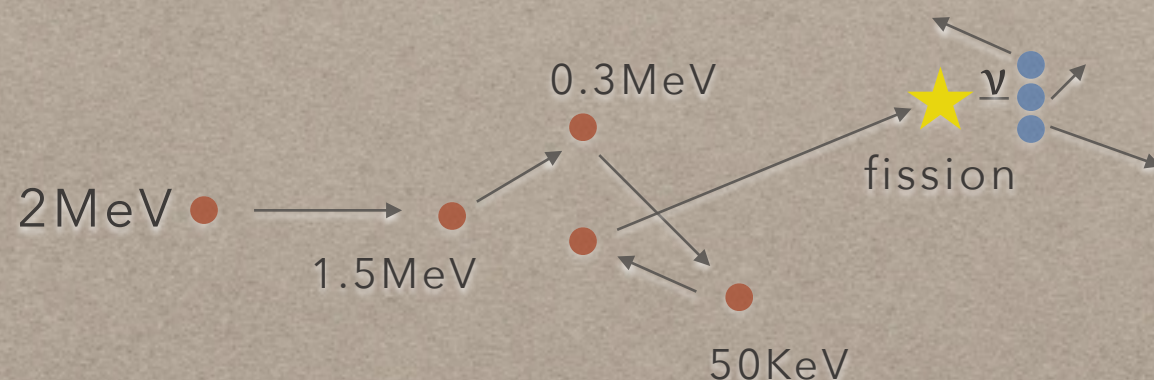
On définit un β_{eff} prenant en compte les effets de zone et de spectre

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

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

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

*« 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

densité vitesse

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

quantité mouvement

pression tenseur des contraintes

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

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

densité vitesse

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

quantité mouvement

pression tenseur des contraintes

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

énergie interne et cinétique

forces extérieures

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

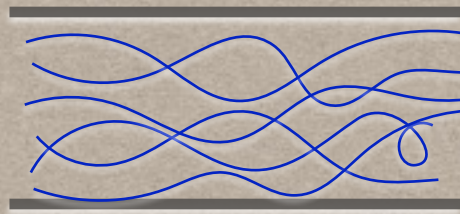
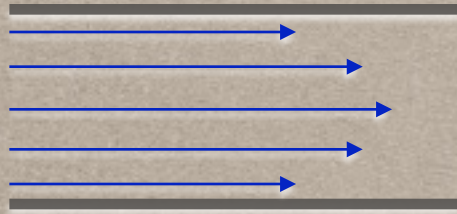
transfert de chaleur

« 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... »

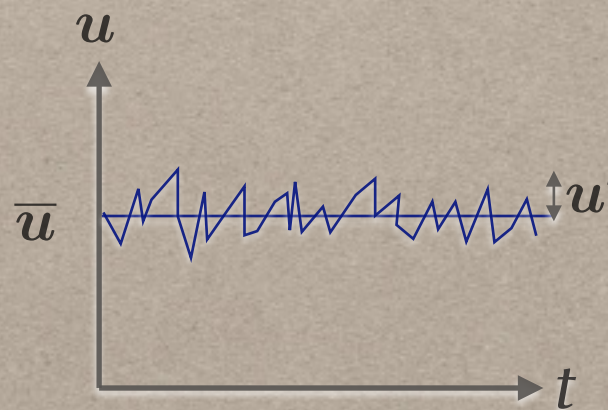
Werner Heisenberg

MÉCANIQUE DES FLUIDES

Régime laminaire, régime turbulent ...



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



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

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

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

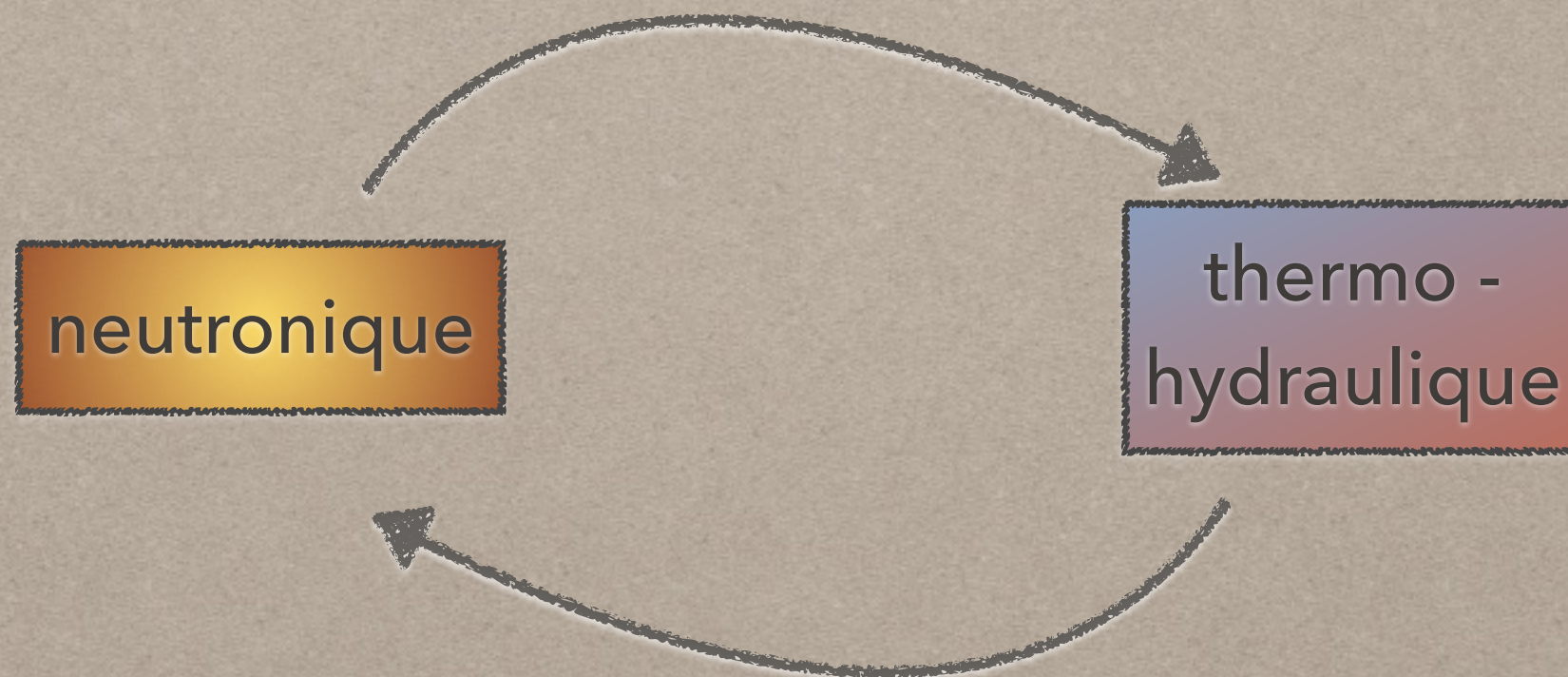
$$T = \bar{T} + T' \quad \text{température}$$

moyenne
résolue

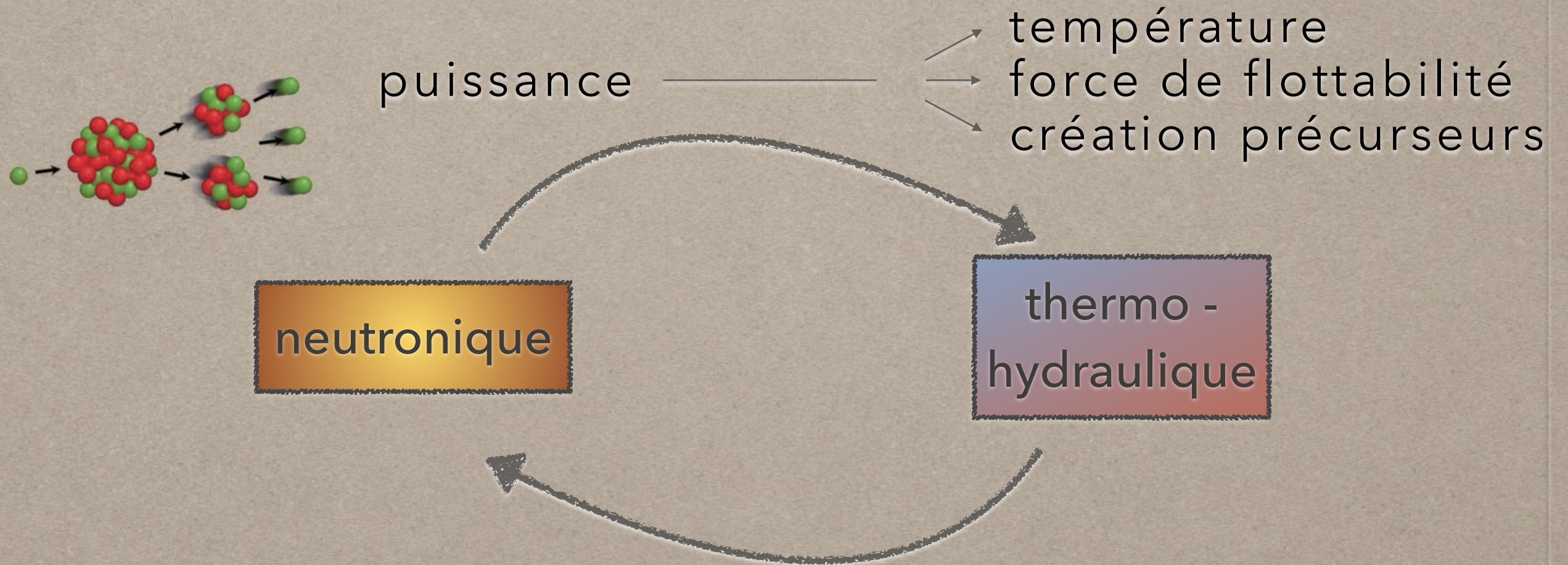
fluctuation
modélisée

Famille de codes : CFD Computational Fluids Dynamics

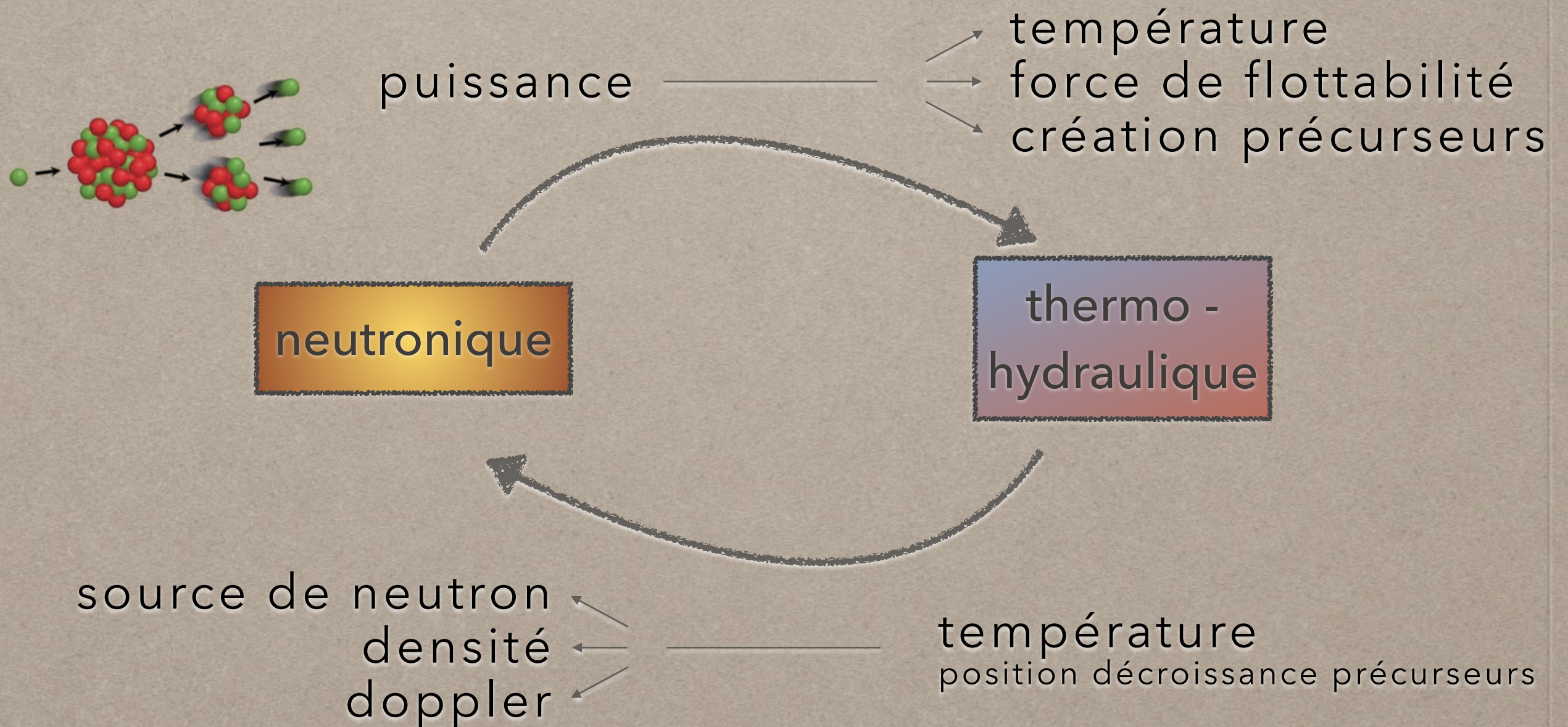
COUPLAGE



COUPLAGE



COUPLAGE

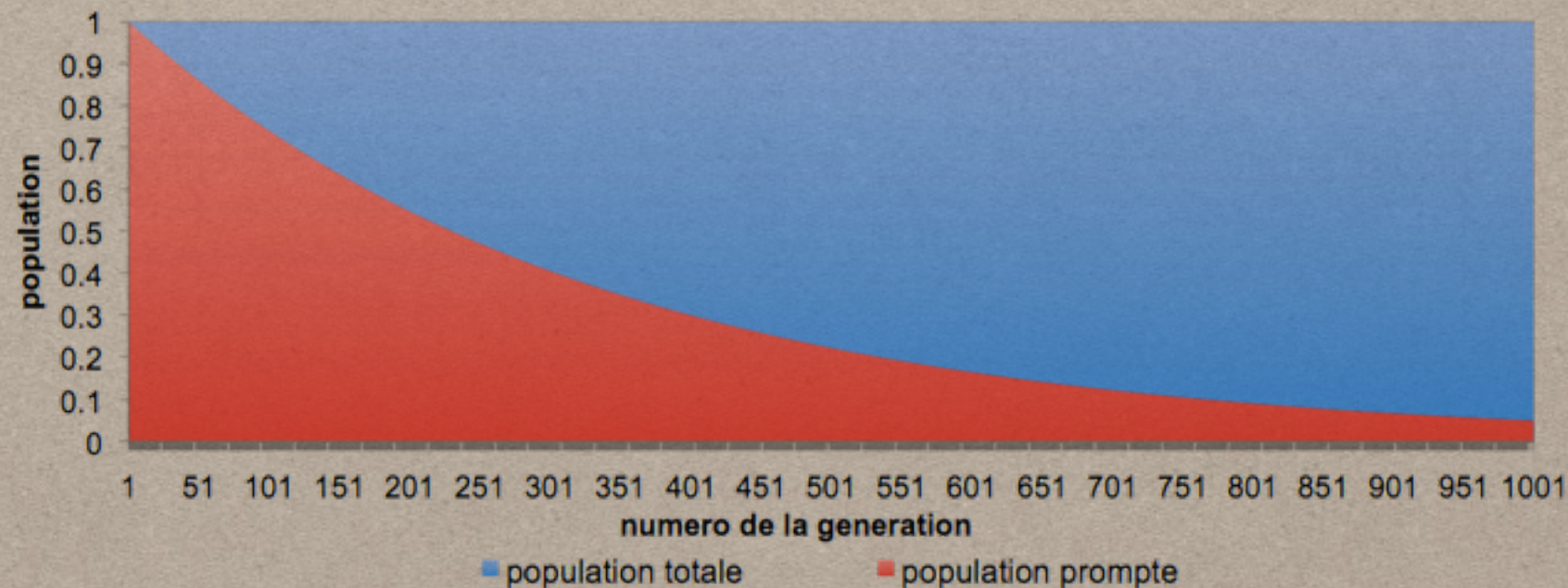


COUPLAGE

Problème:

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

Idée:

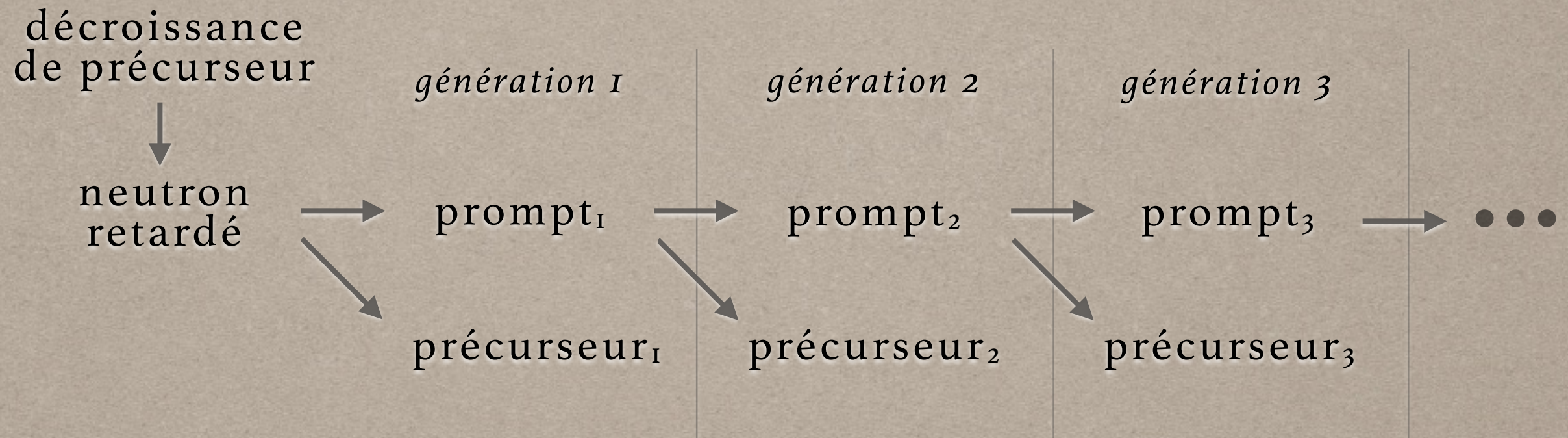


$$k_p + \beta_{\text{eff}} = 1$$

$$k_p < 1$$

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

$$\sum_{g=1}^{\infty} precursor_g = 1$$

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

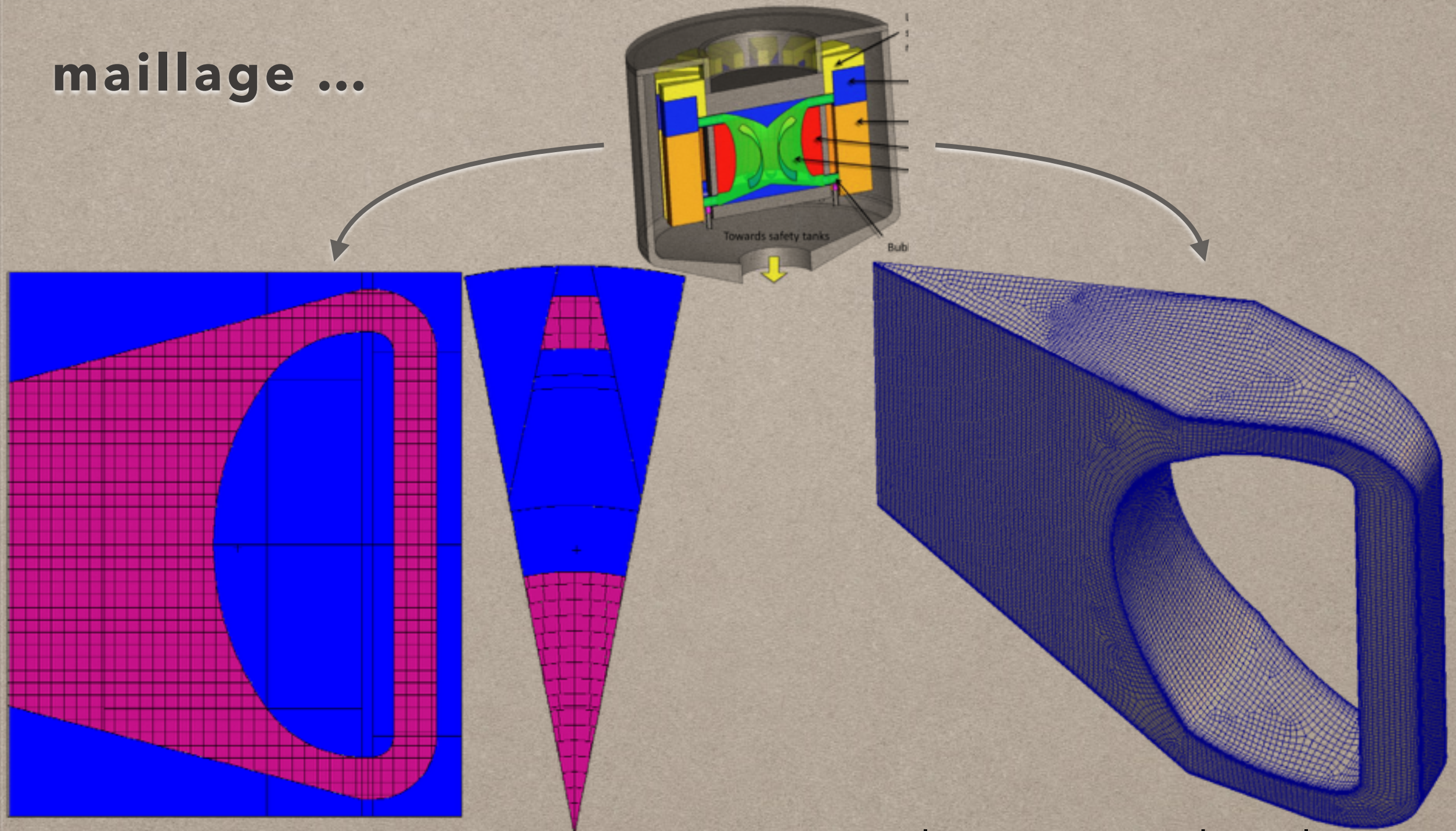
II. DISCIPLINES PHYSIQUES MISES EN JEU

III. COUPLAGE STATIONNAIRE

IV. COUPLAGE TRANSITOIRE

COUPLAGE STATIONNAIRE

maillage ...



Neutronique
code : *MCNP*

Thermo Hydraulique
code : *OpenFOAM*

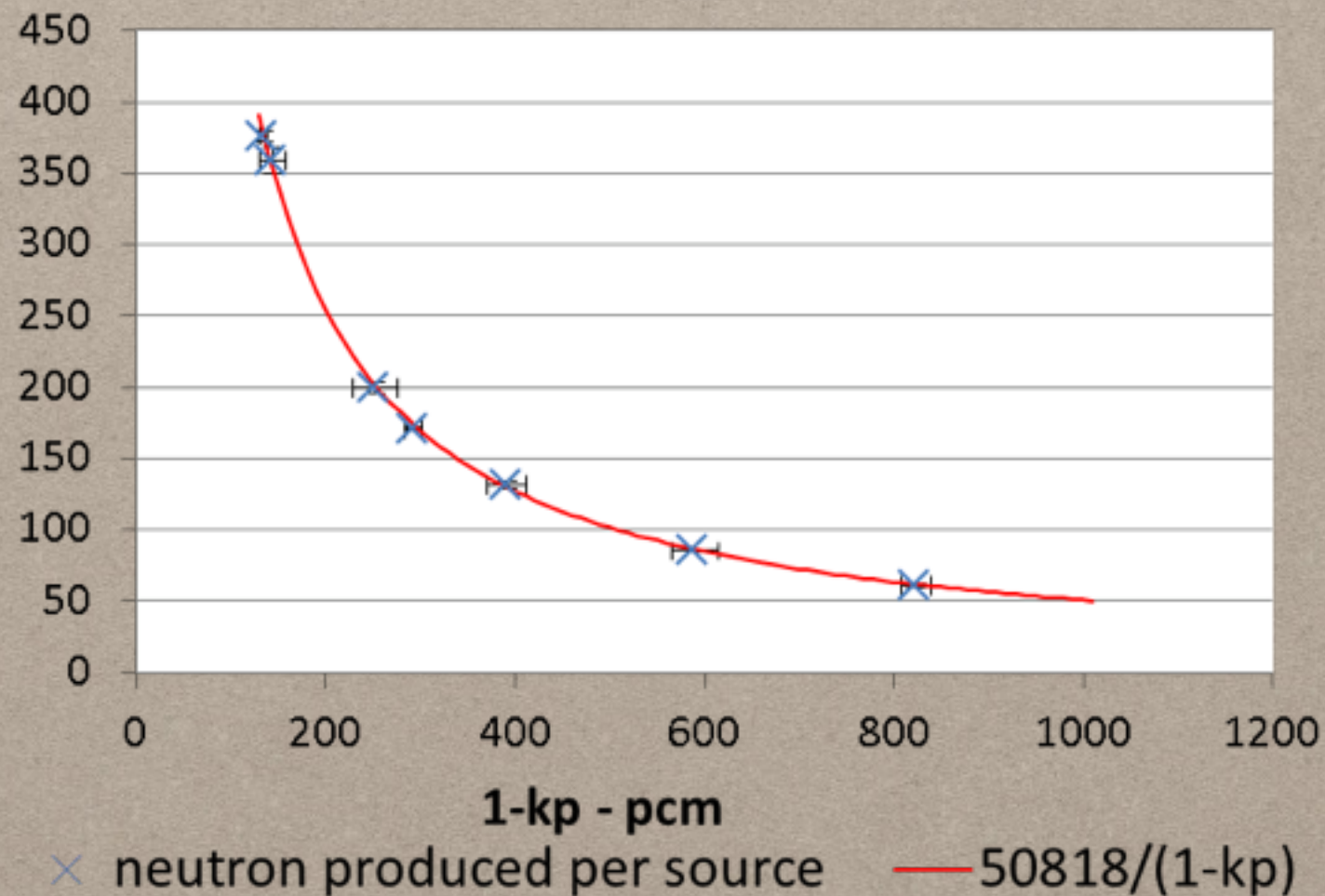
COUPLAGE STATIONNAIRE

Résultats :

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

304 pcm

$$\sum_{g=1}^{\infty} neutron_{tot_g}$$



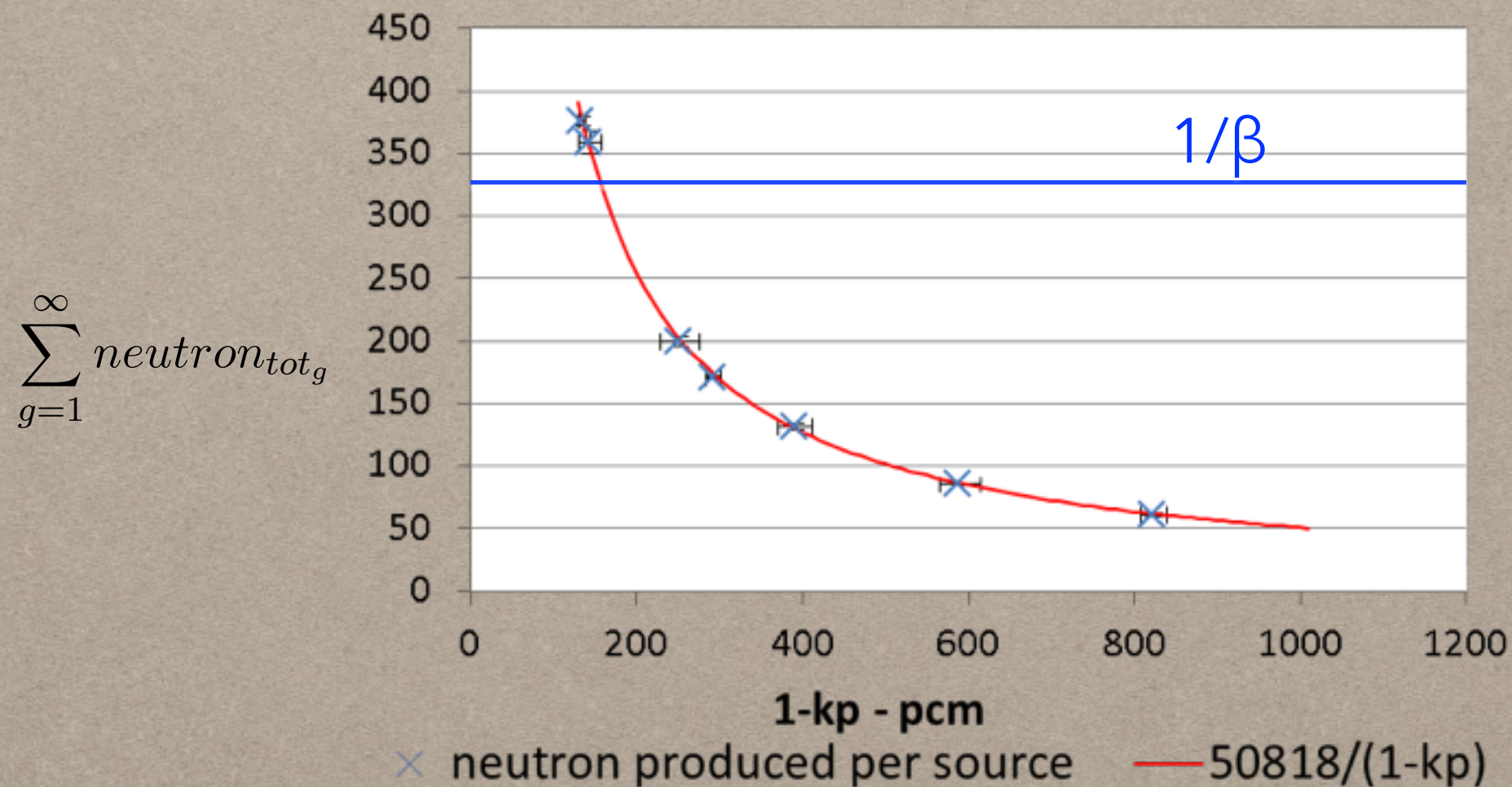
$$(1-k_p)_{\text{equilibre}} = \beta_{\text{eff}} = 154 \pm 4 \text{ pcm}$$

COUPLAGE STATIONNAIRE

Résultats :

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

304 pcm



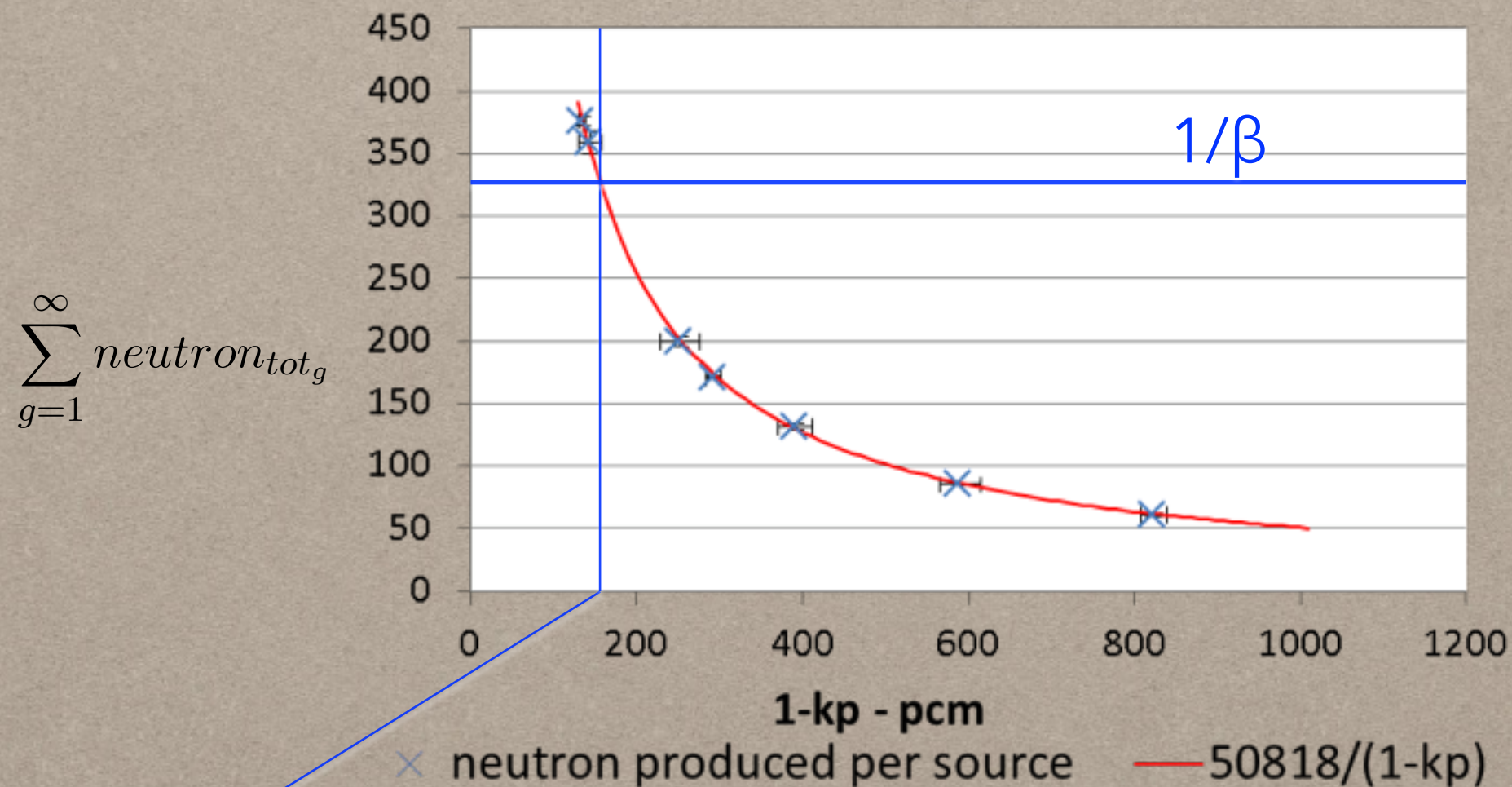
$$(1-k_p)_{equilibre} = \beta_{eff} = 154 \pm 4 \text{ pcm}$$

COUPLAGE STATIONNAIRE

Résultats :

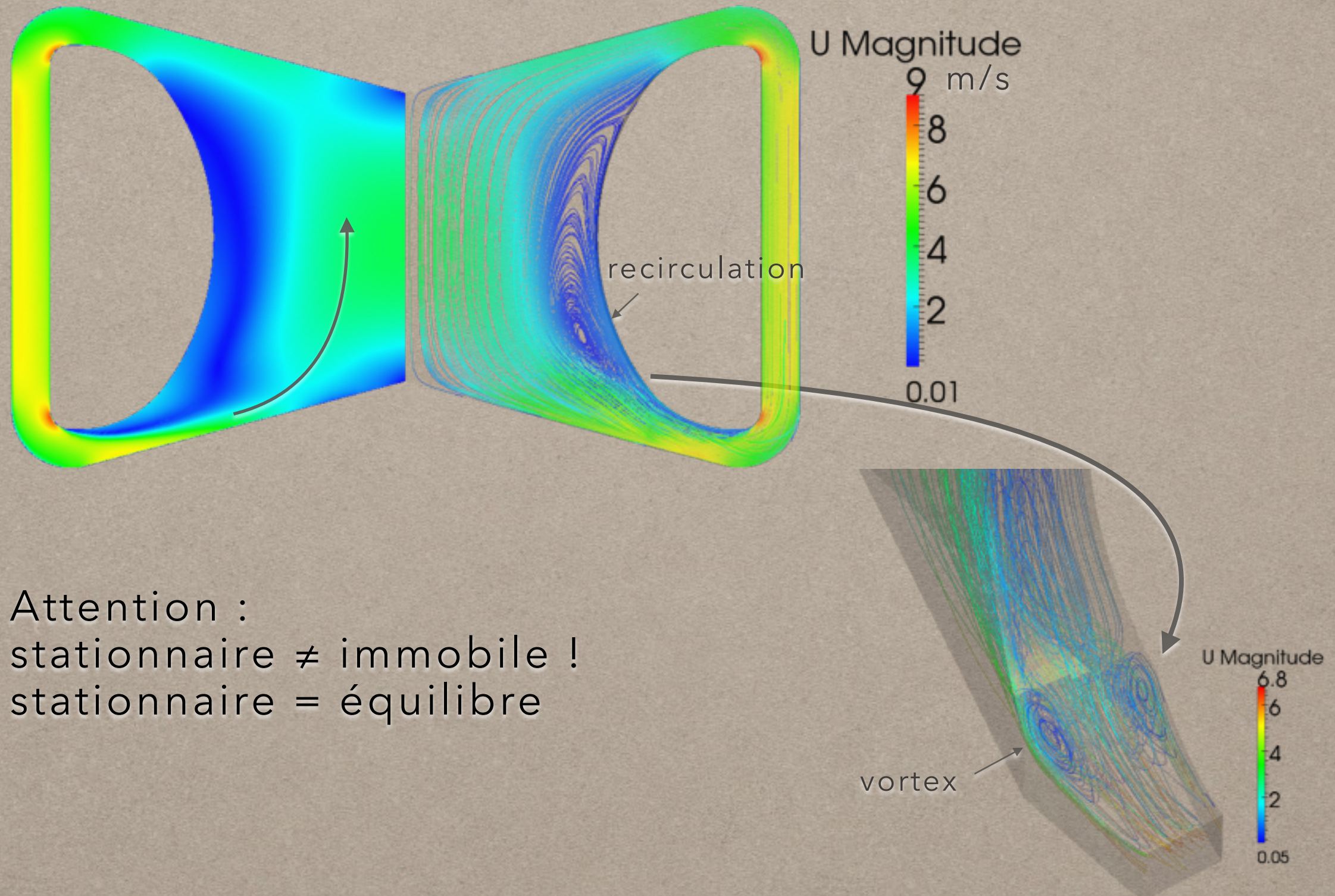
$$\sum_{g=1}^{\infty} precursor_g = 1 \implies \sum_{g=1}^{\infty} neutron_{tot_g} \cdot \beta = 1$$

304 pcm

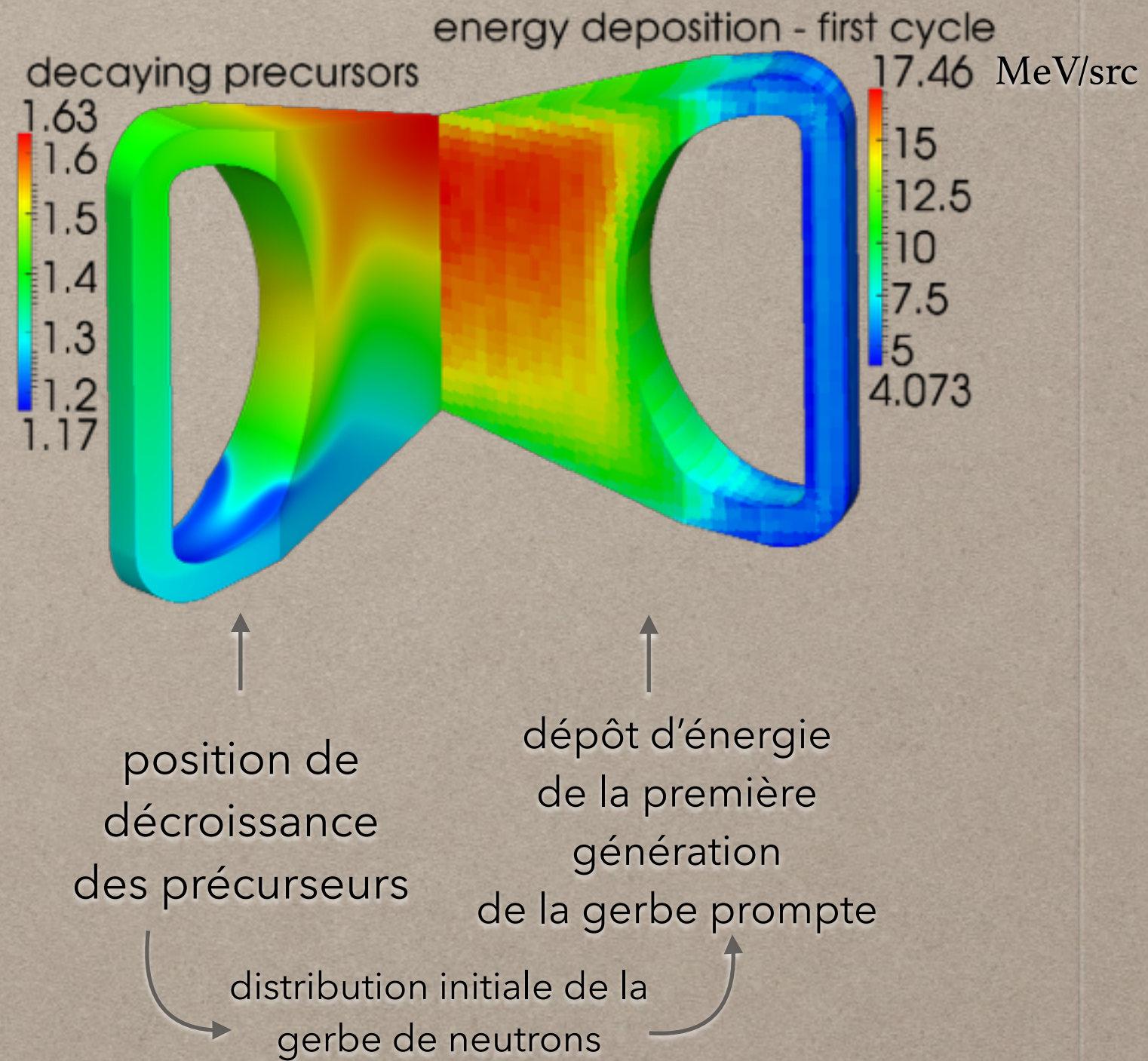


$$(1-k_p)_{equilibre} = \beta_{eff} = 154 \pm 4 pcm$$

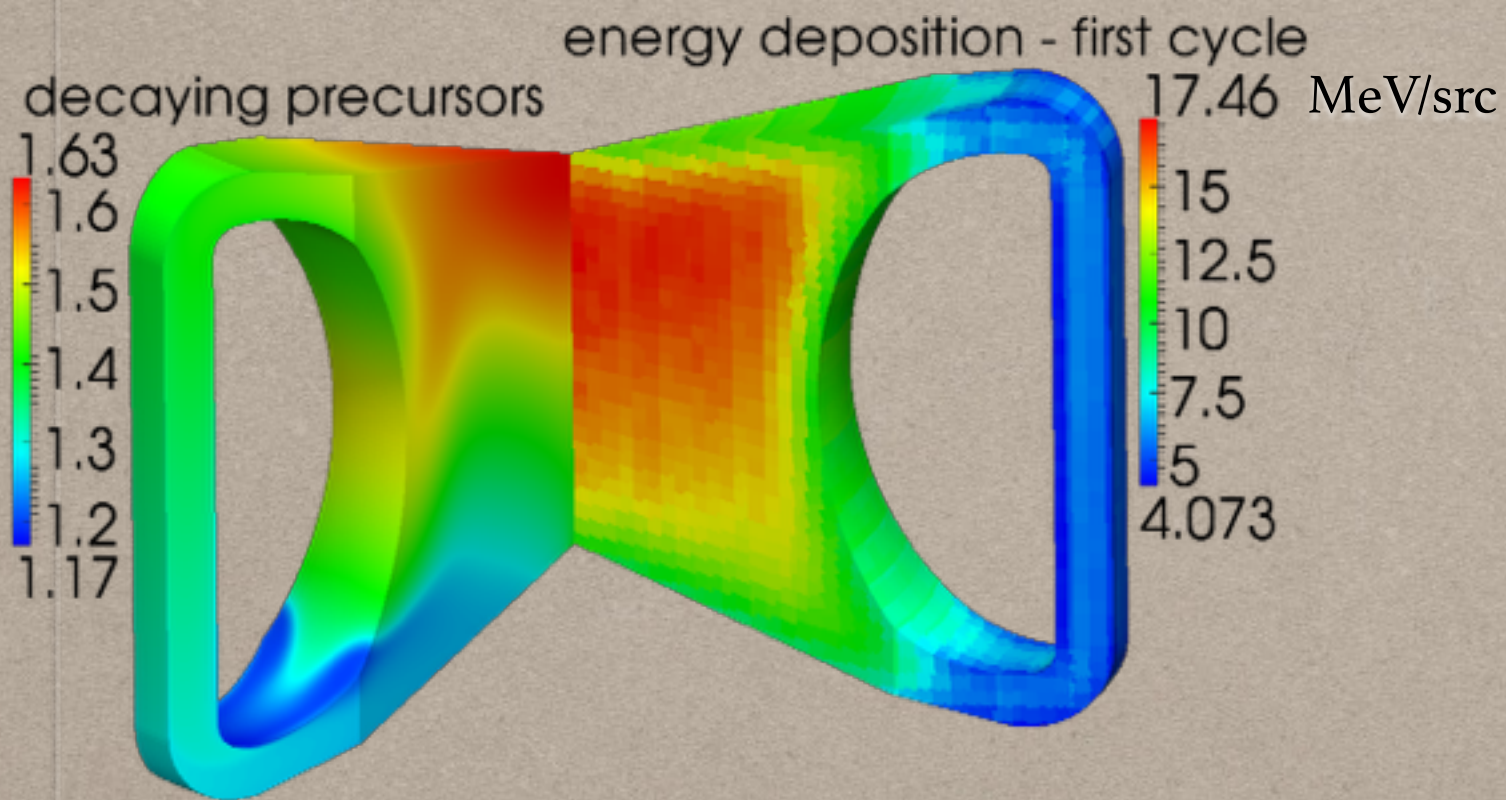
COUPLAGE STATIONNAIRE



COUPLAGE STATIONNAIRE



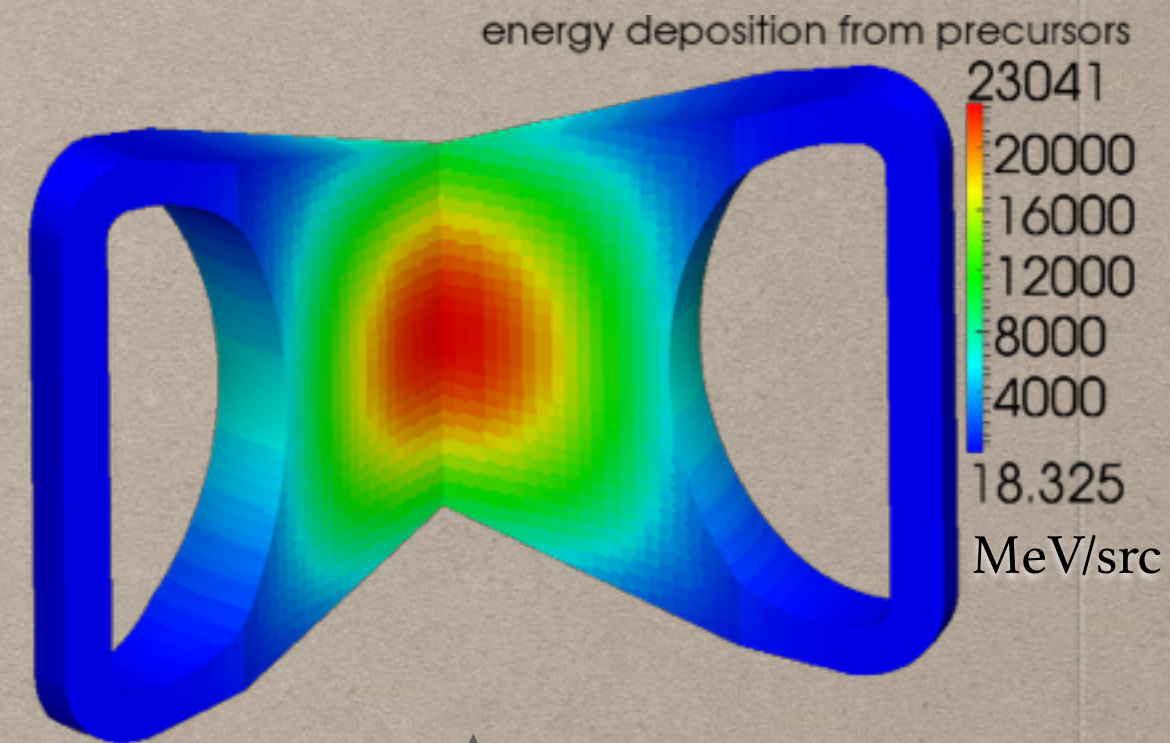
COUPLAGE STATIONNAIRE



position de décroissance des précurseurs

dépôt d'énergie de la première génération de la gerbe prompt

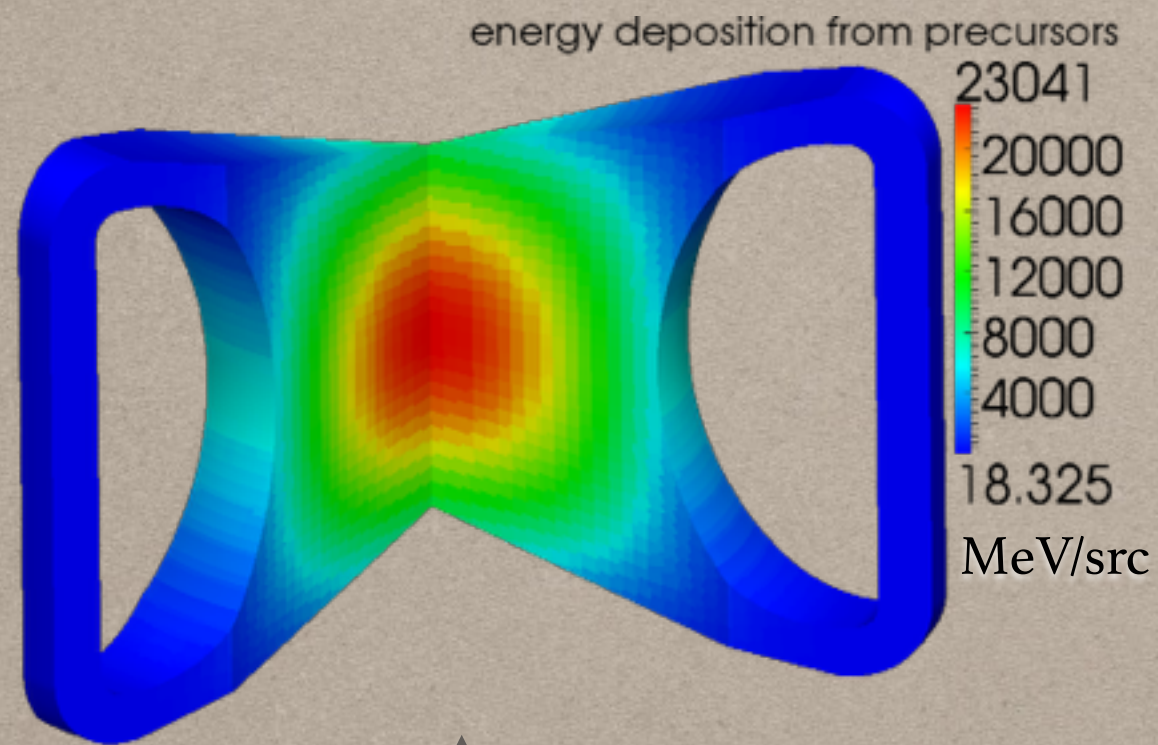
distribution initiale de la gerbe de neutrons



dépôt d'énergie intégré sur toute la gerbe prompt

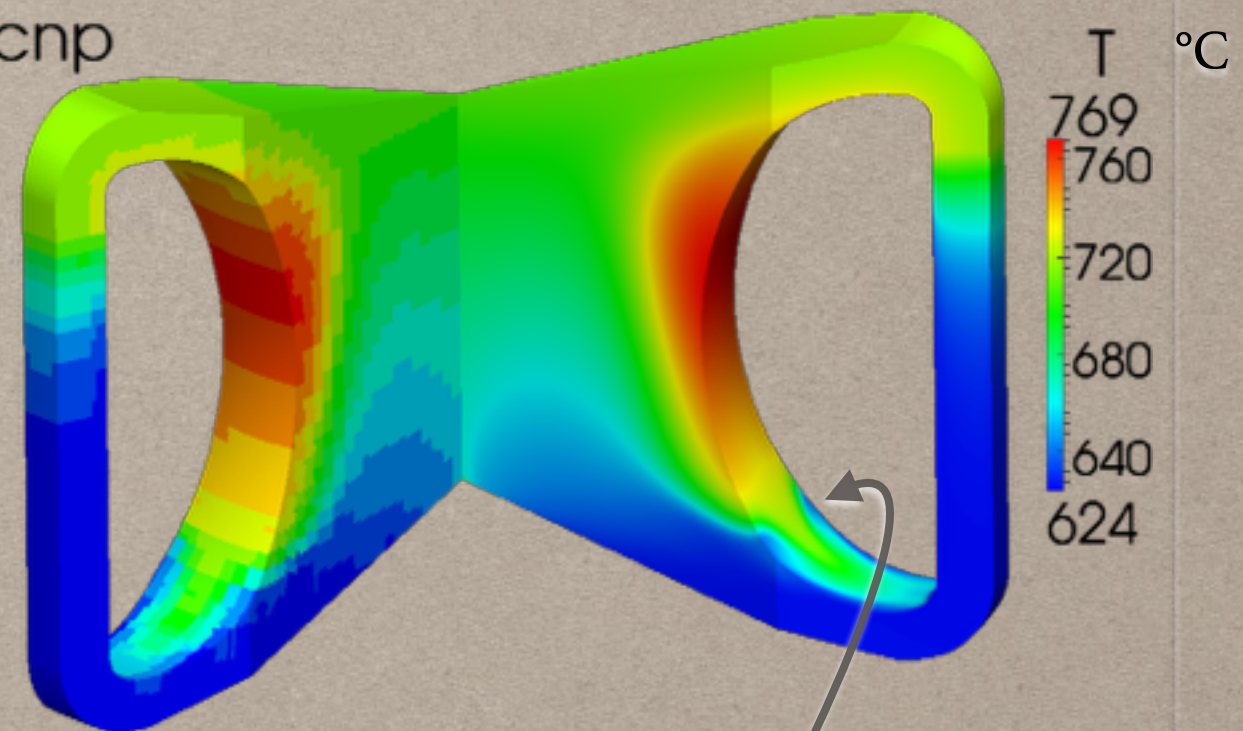
COUPLAGE STATIONNAIRE

/src

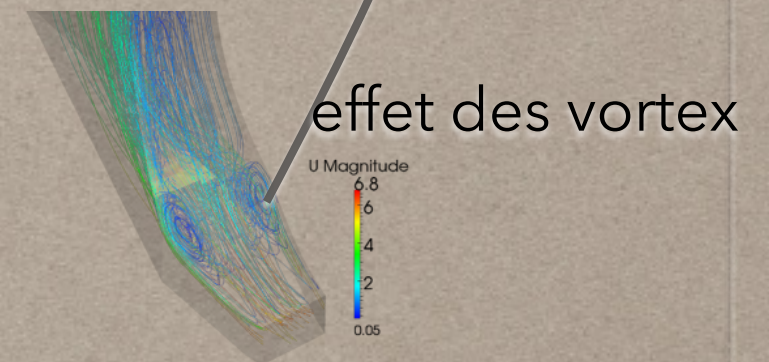


T_mcnp

770
750
725
700
675
650
630



↑
dépôt d'énergie
intégré sur toute la
gerbe prompte



SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

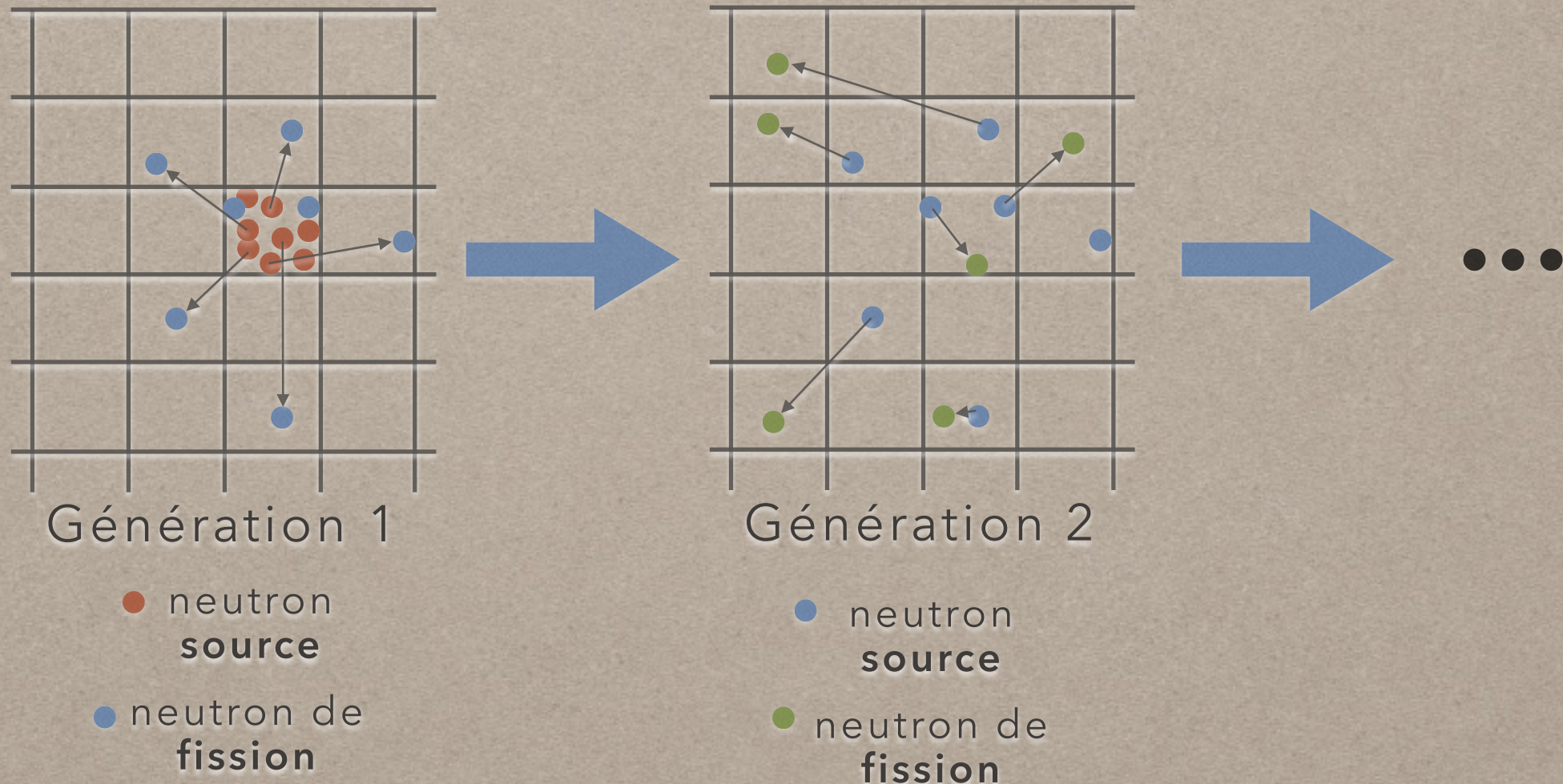
II. DISCIPLINES PHYSIQUES MISES EN JEU

III. COUPLAGE STATIONNAIRE

IV. COUPLAGE TRANSITOIRE
MATRICE DE FISSION

COUPLAGE TRANSITOIRE

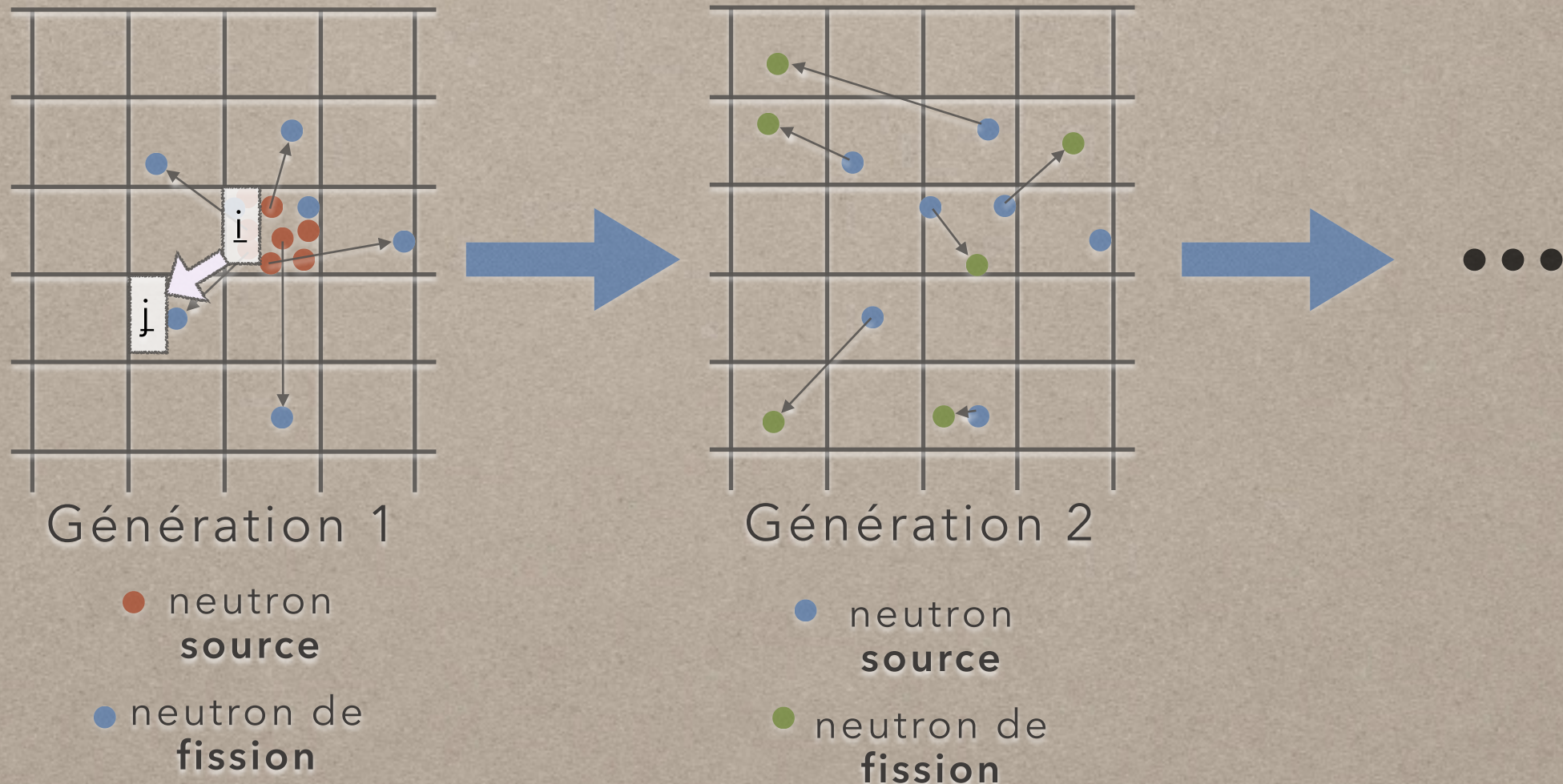
Matrice de fission



- 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



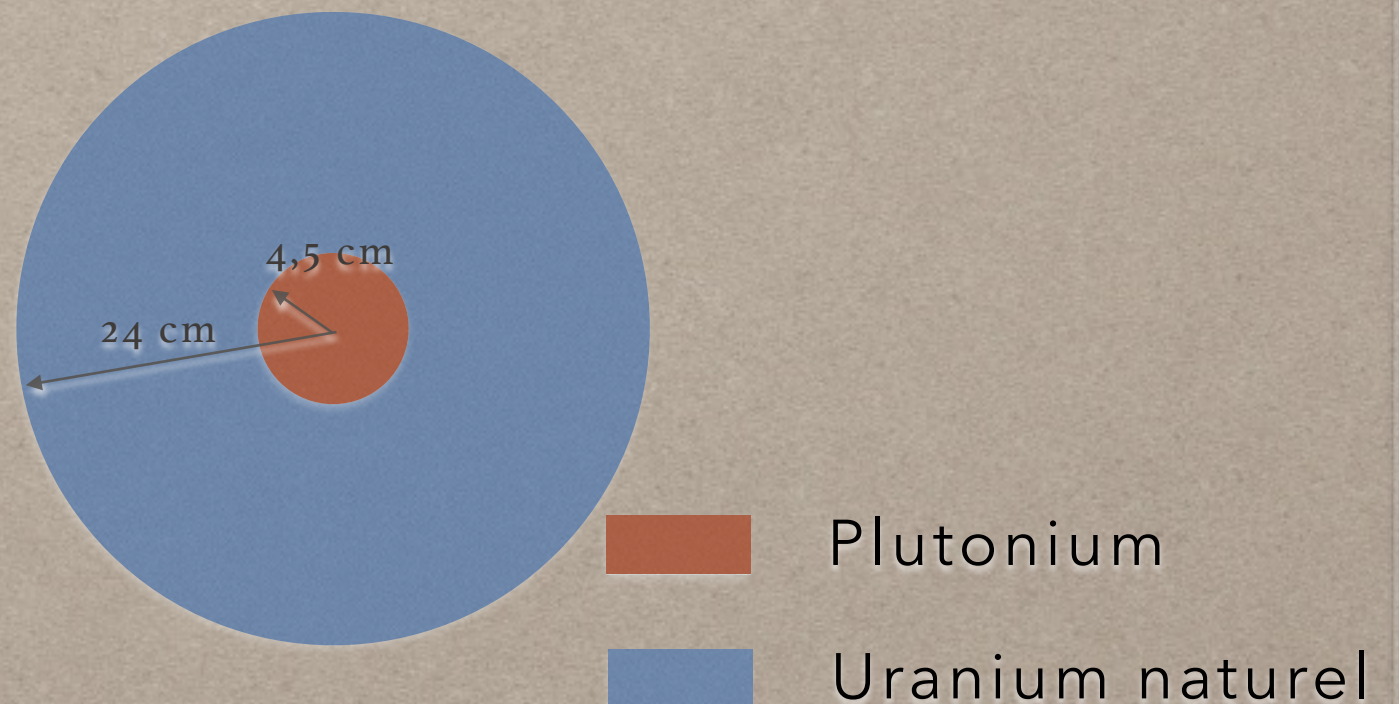
- Élément ij de la matrice :
probabilité qu'un neutron source créé en i fasse un neutron de fission en j
- Construction de la matrice pour plusieurs états du réacteur différents + interpolation

COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



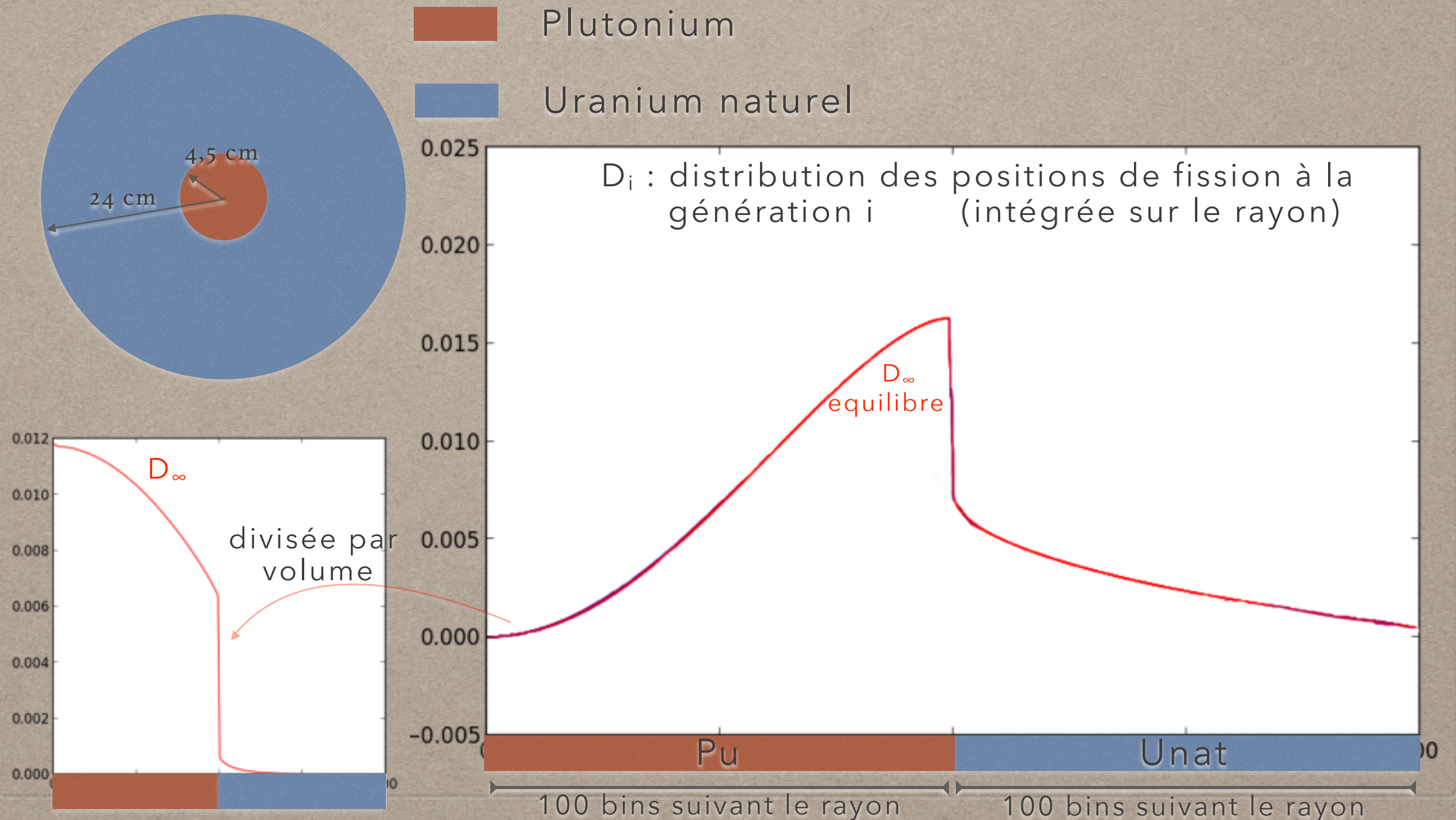
Benchmark :
Flatop - mesure expérimentale du β_{eff}



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

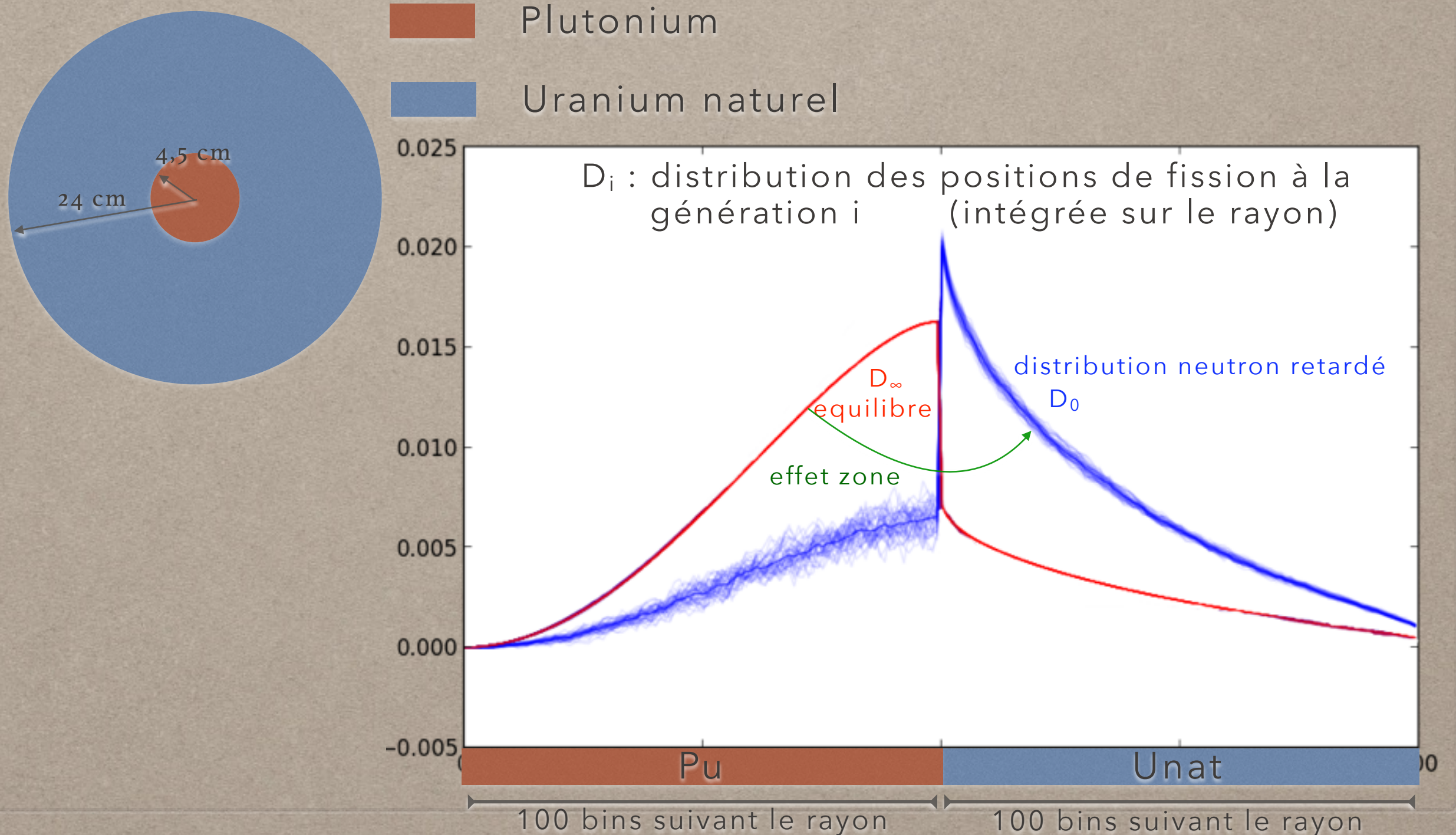
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



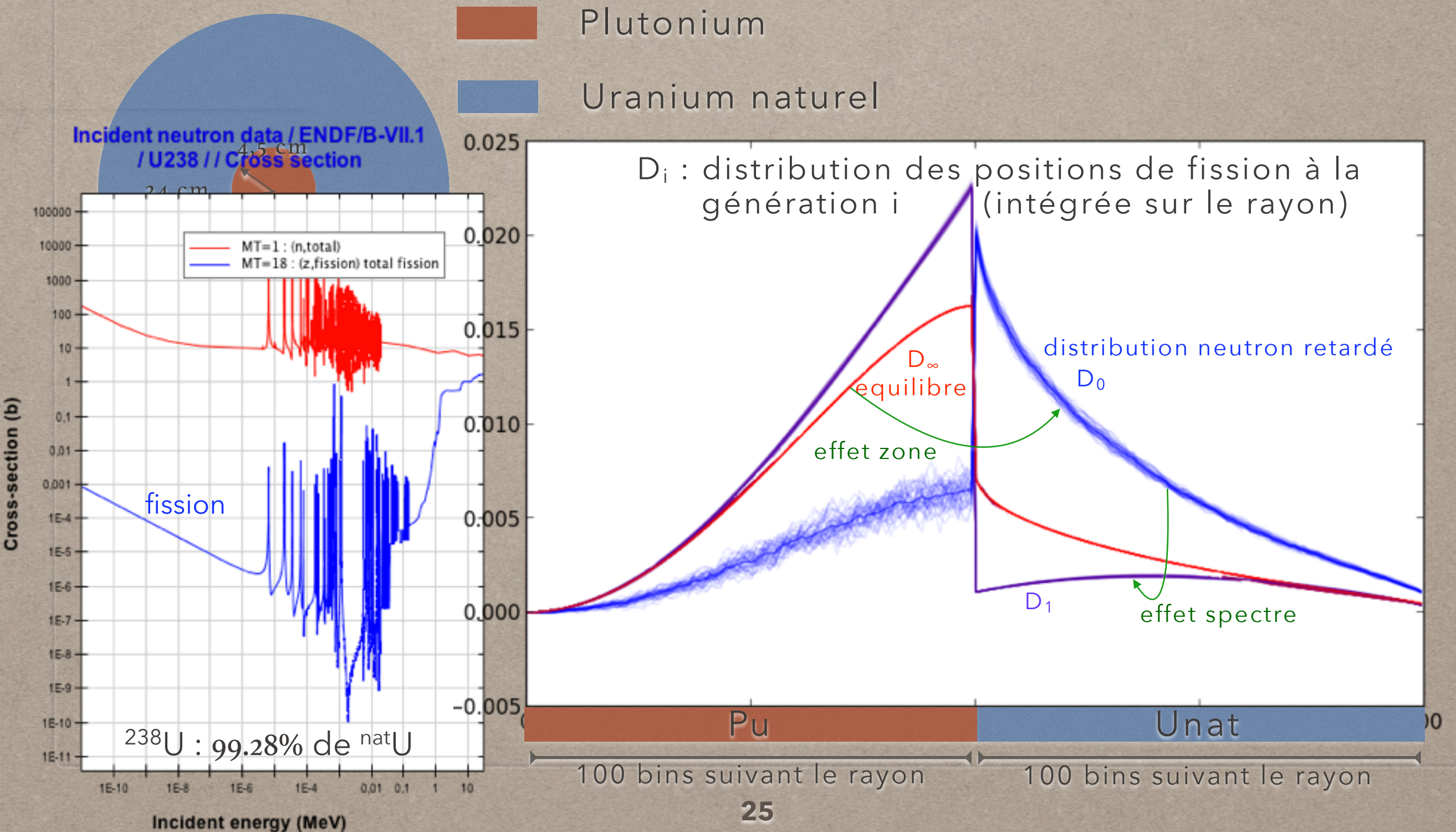
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



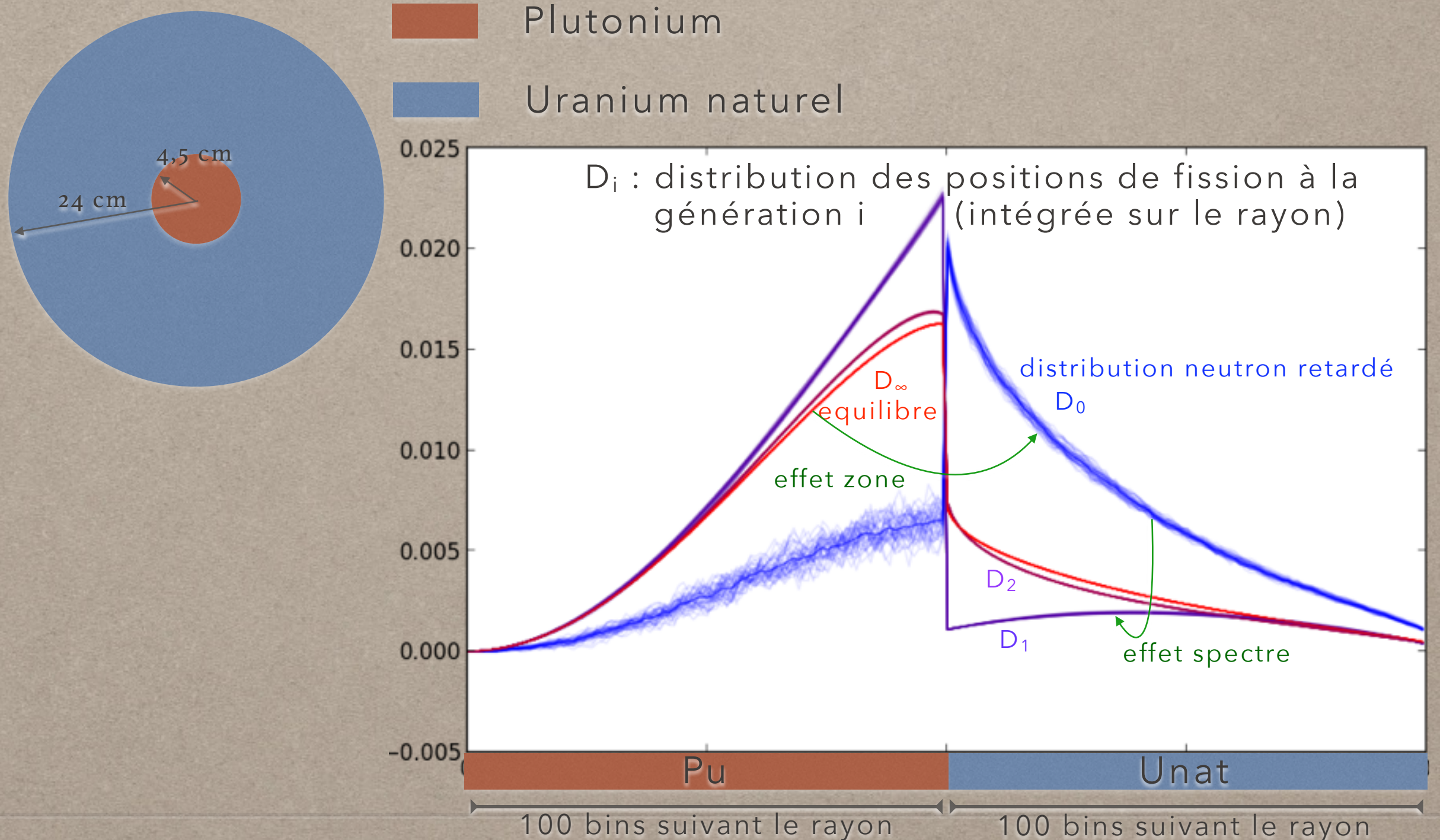
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



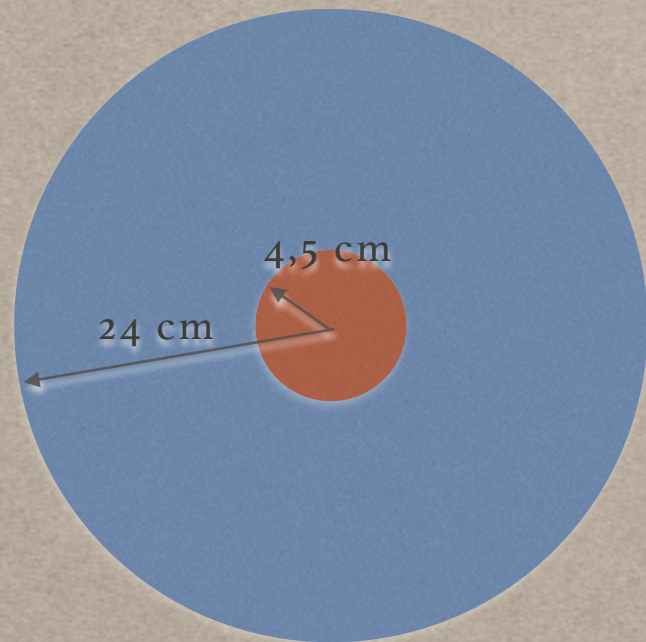
COUPLAGE TRANSITOIRE

Validation de la méthode



COUPLAGE TRANSITOIRE

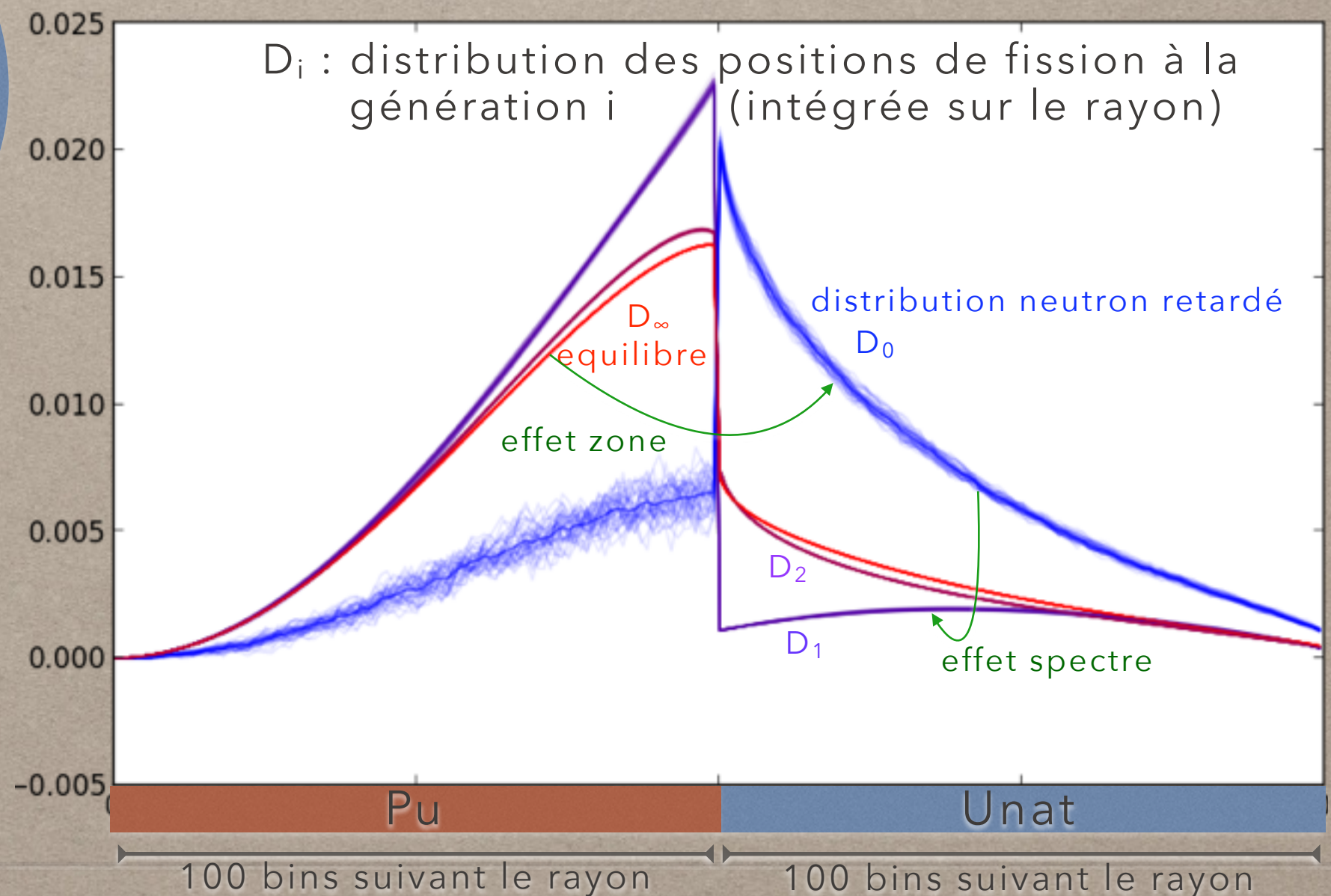
Validation de la méthode



Plutonium
Uranium naturel

$$\sum_{g=1}^{\infty} precursor_g = 1$$

$$\beta_{\text{eff-calcul}} = 278 \pm 2 \text{ pcm}$$
$$\beta_{\text{eff-exp}} = 276 \pm 7 \text{ pcm}$$



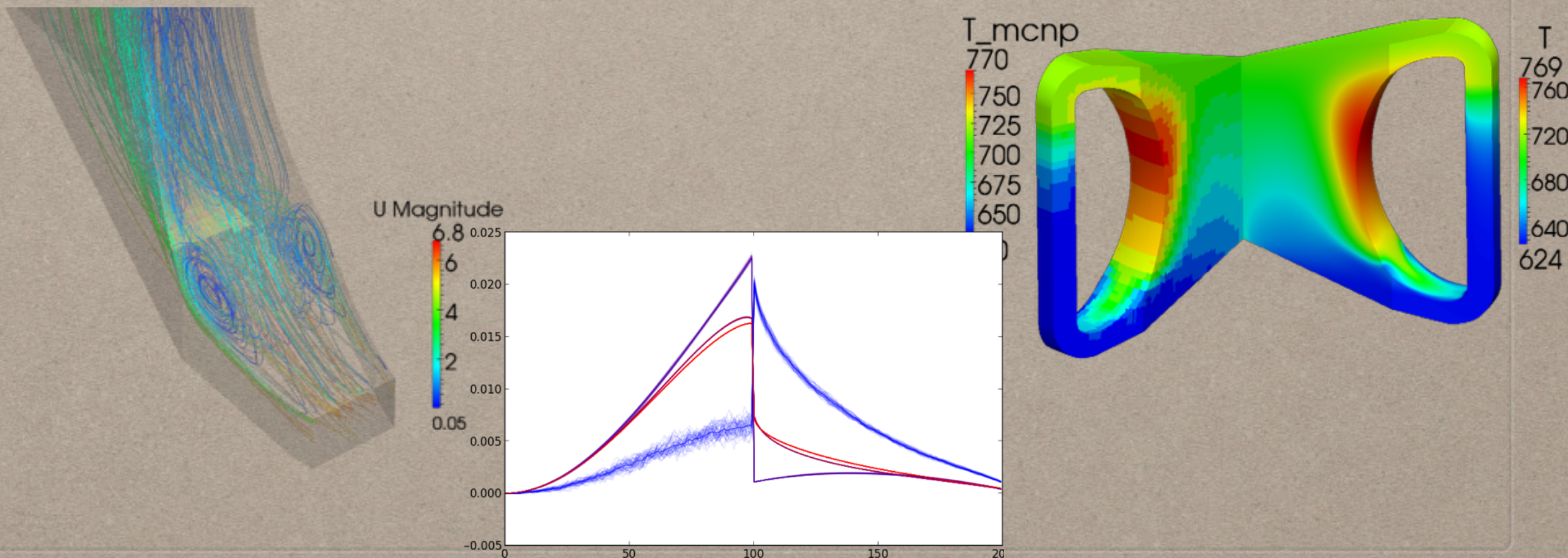
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

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

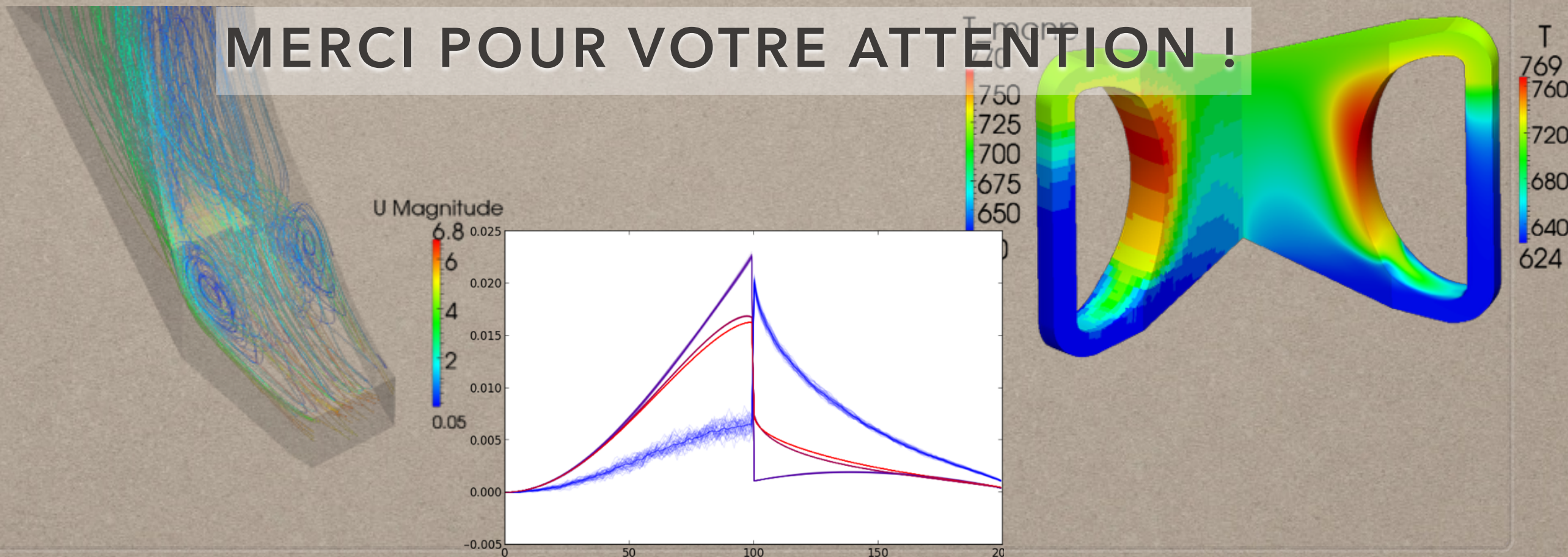
Fait :

- 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

MERCI POUR VOTRE ATTENTION !

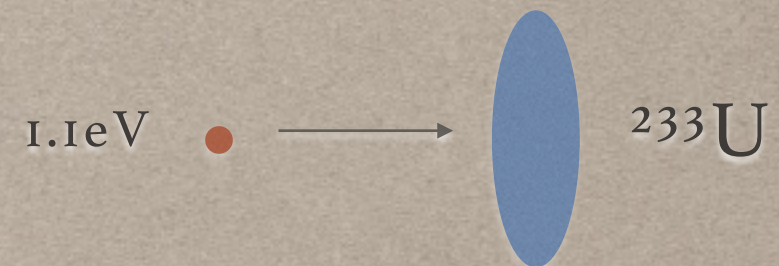
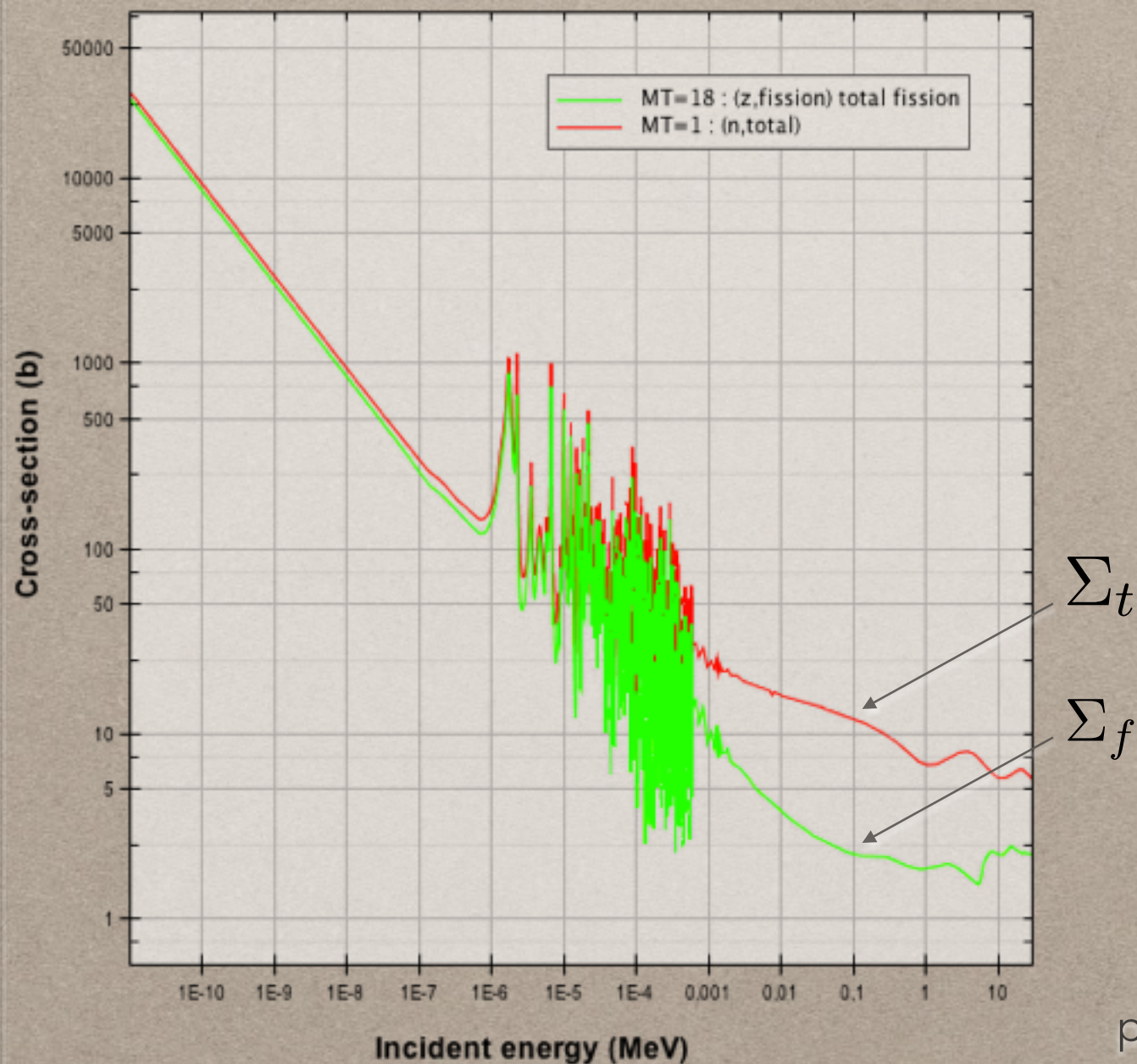


BACKUP

BACKUP

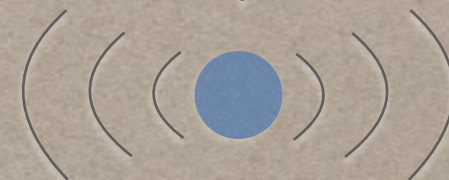
Sections efficaces

^{233}U



Effet doppler :

vibration du noyau lié à la température



élargissement des résonances
(énergie dans le centre de masse)

peut favoriser le rapport capture/fission

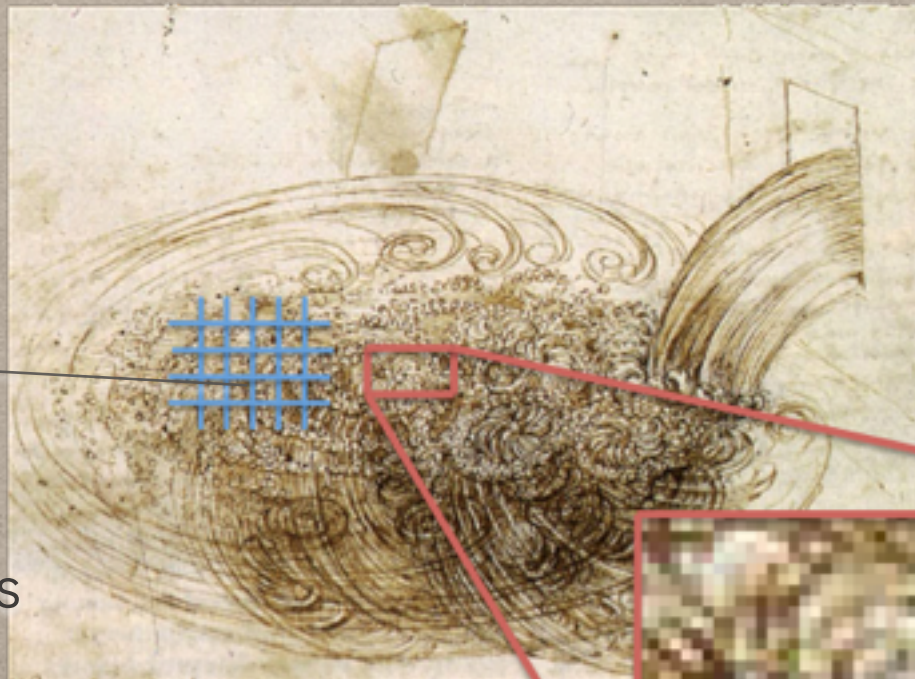
MÉCANIQUE DES FLUIDES

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

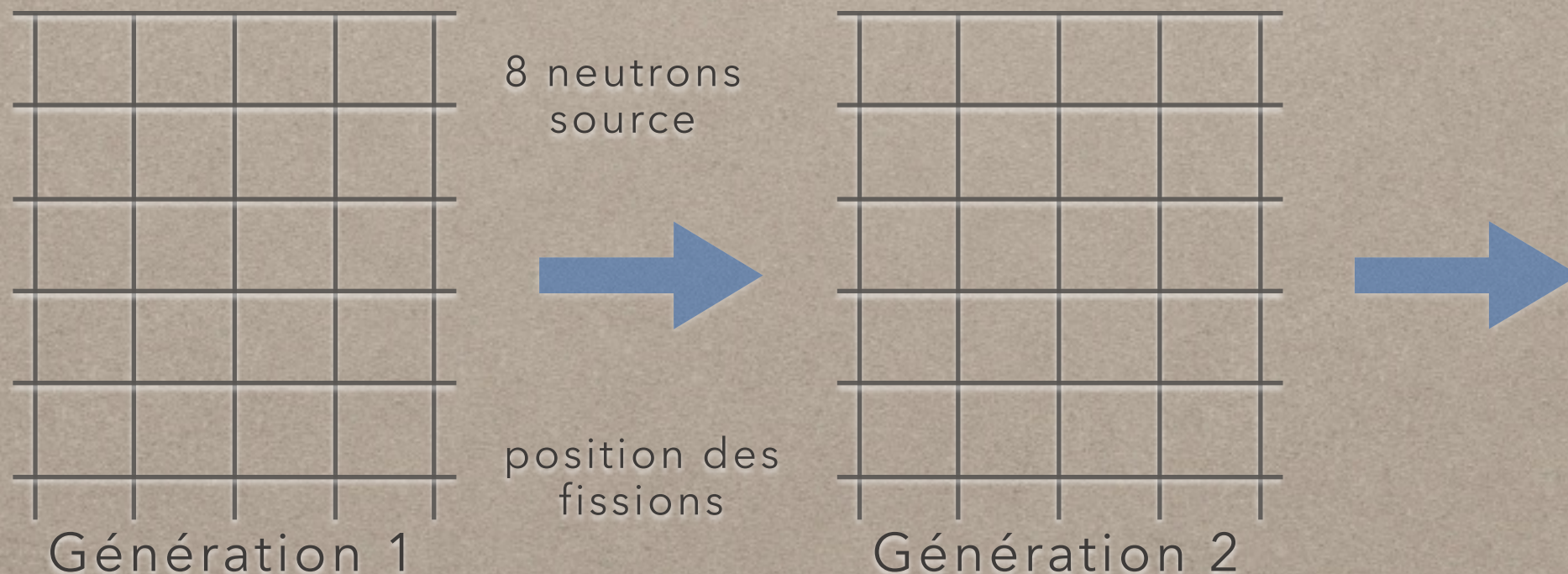
fonction de Green

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

Idée : sommer la réponse du coeur 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

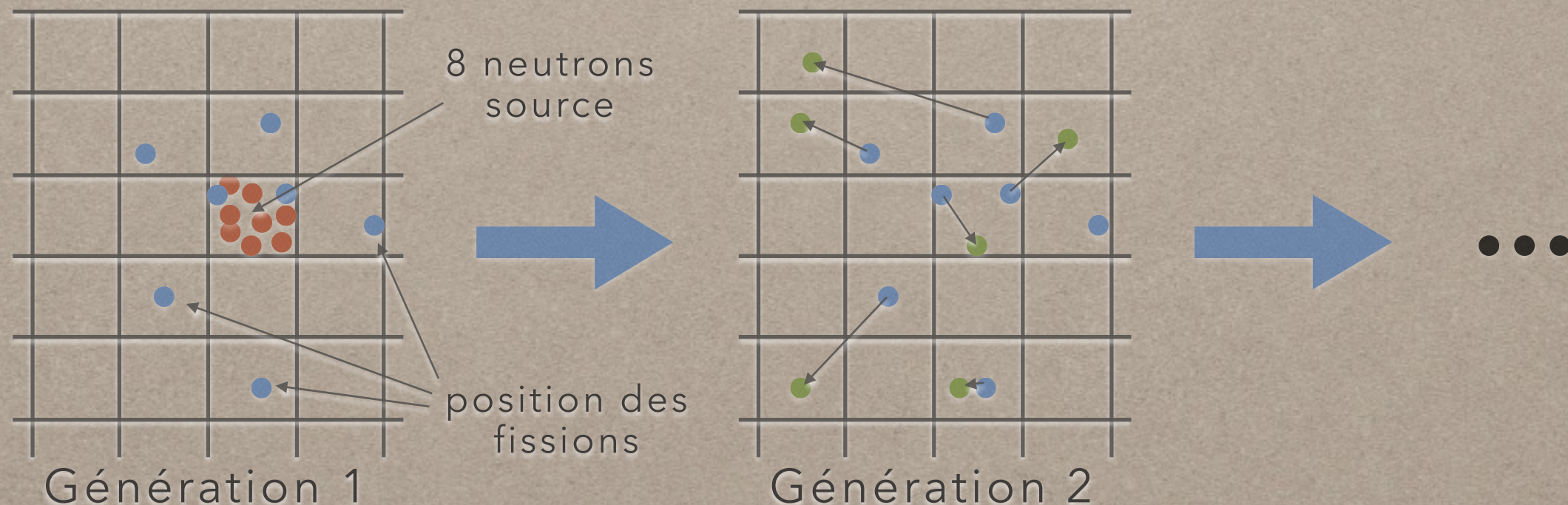
fonction de Green

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

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

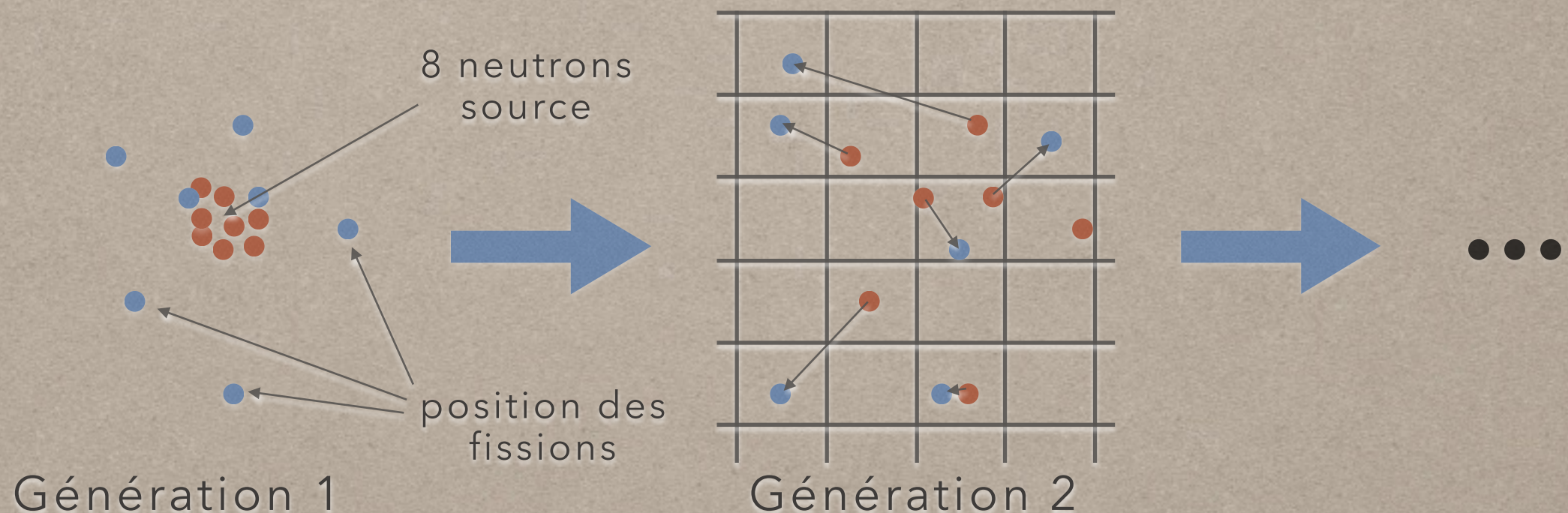
Problème : si k_p tend vers 1, la taille de la gerbe tend vers l'infini...

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 :

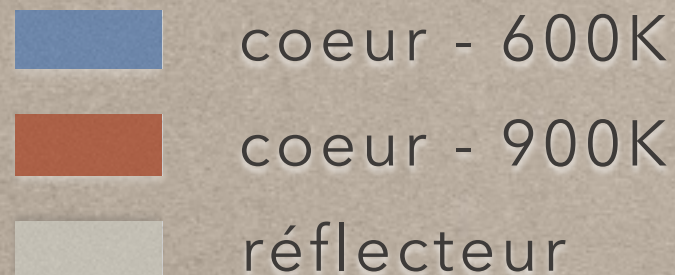
neutrons par fission	ν_p, χ_p	→ gerbe prompt	spectre prompt
	ν_p, χ_d	→ //	spectre retardé
spectre emission	ν_t, χ_p	→ gerbe totale	spectre prompt
	ν_t, χ_d	→ //	spectre retardé

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?



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

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

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

densité \swarrow \searrow doppler

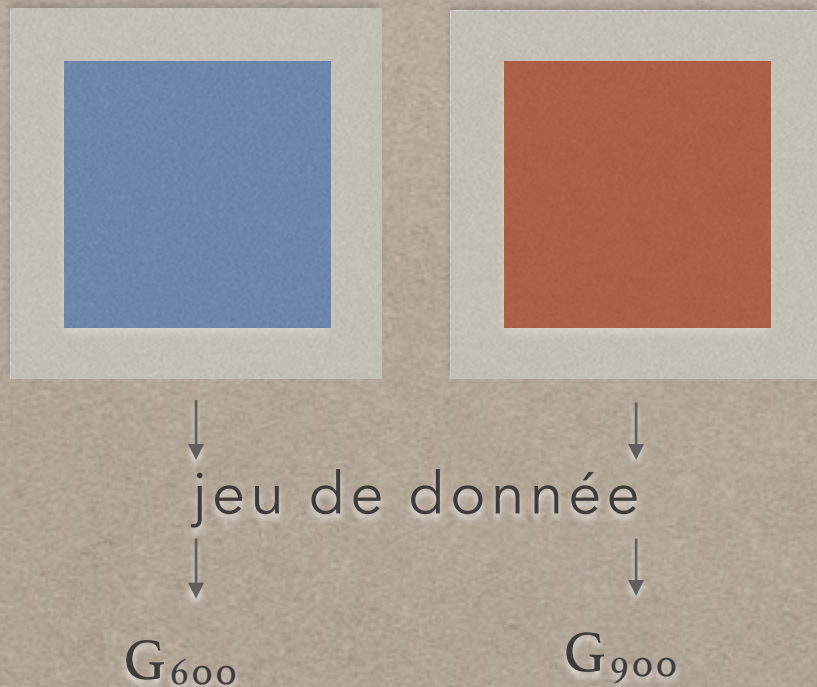
$$G_{700} = \frac{f(900).G_{600} + f(600).G_{900}}{f(900) + f(600)} \rightarrow -1 \pm 2 \text{ pcm}$$

(variation de 900 pcm)

COUPLAGE TRANSITOIRE

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

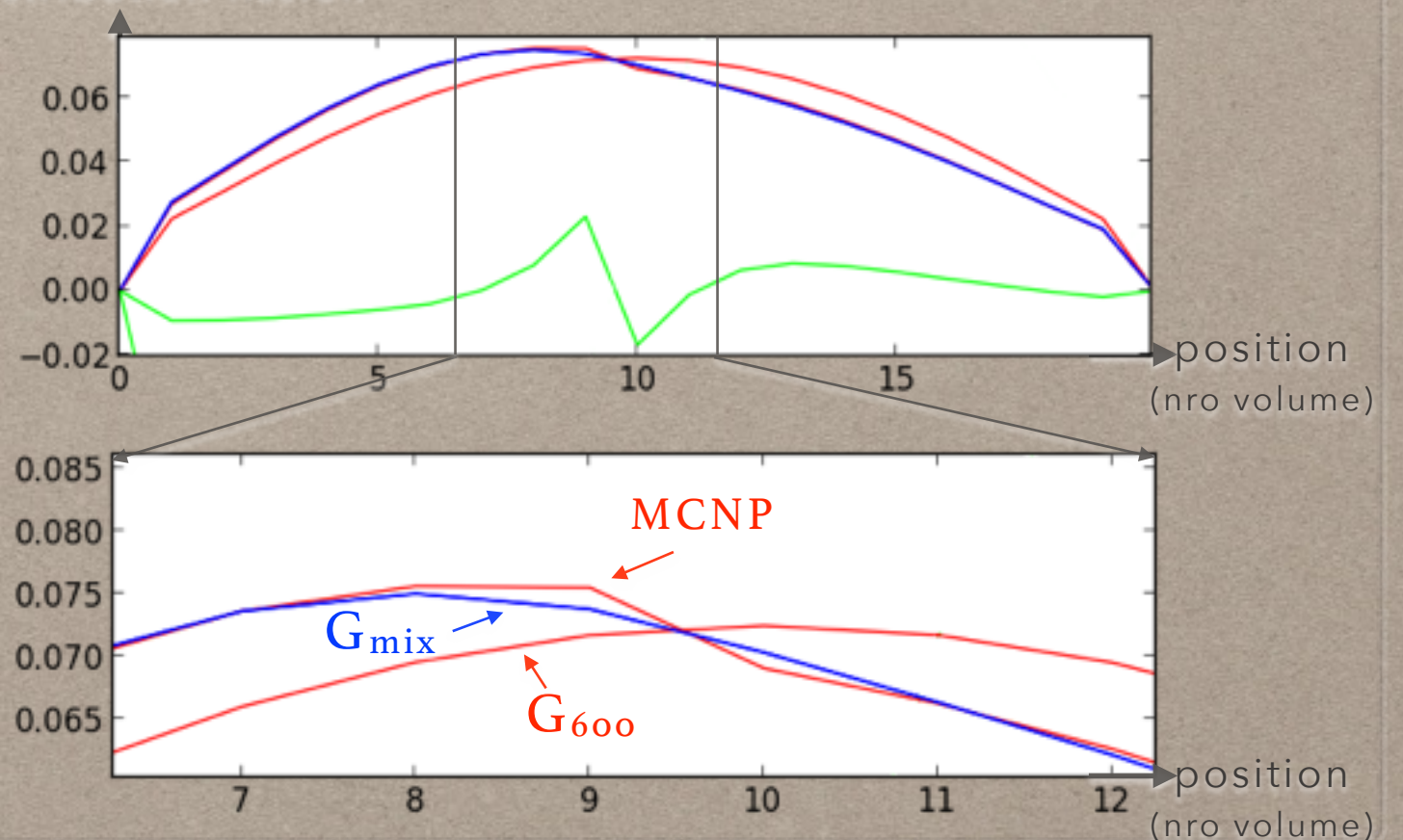
■ coeur - 600K
■ coeur - 900K
■ réflecteur



$G_{\text{mix}} =$



Distribution fission



MÉCANIQUE DES FLUIDES

laminaire ou turbulent ?

équation bilan de la quantité de mouvement :

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

$$\frac{\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u})}{\nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}})} \approx \frac{U^2/L}{\nu U/L^2} = \frac{UL}{\nu} = Re \longrightarrow \text{Permet de caractériser l'écoulement !}$$



vitesse
pression
énergie
température

MÉCANIQUE DES FLUIDES

laminaire ou turbulent ?

équation bilan de la quantité de mouvement :

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

$$\frac{\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u})}{\nabla \cdot (\underline{\underline{\tau}})} \approx \frac{U^2/L}{\nu U/L^2} = \frac{UL}{\nu} = Re \longrightarrow \text{Permet de caractériser l'écoulement !}$$



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

variables
moyennes
→

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