

COUPLAGE NEUTRONIQUE - THERMOHYDRAULIQUE APPLICATION AU RÉACTEUR À NEUTRONS RAPIDES REFROIDI À L'HÉLIUM

Florian VAÏANA

Thèse dirigée par Fabien PERDU
Laboratoire CEA Grenoble DEN/DER/SSTH/LMDL
Directeur de thèse Roger Brissot (LPSC/IN2P3)



Plan de l'exposé

- 1 Généralités**
 - Neutronique
 - Thermohydraulique
 - Physique du couplage
- 2 Cinétique neutronique en code Monte-Carlo**
 - Théorie
 - Validation
 - Couplage avec la thermohydraulique
- 3 Propagation des incertitudes statistiques**
 - Propagation de l'incertitude sur la réactivité vers la puissance
 - Propagation de l'incertitude sur la puissance vers la température
- 4 Application au RNR-He**
 - Présentation du RNR-He
 - Modélisation en thermohydraulique
 - Modélisation en neutronique
 - Simulation de la remontée intempestive d'une barre de contrôle
- 5 Conclusion et perspectives**

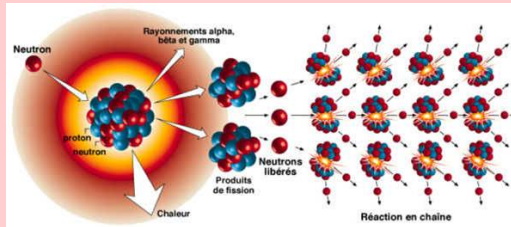


Plan de l'exposé

- 1 Généralités
 - Neutronique
 - Thermohydraulique
 - Physique du couplage
- 2 Cinétique neutronique en code Monte-Carlo
 - Théorie
 - Validation
 - Couplage avec la thermohydraulique
- 3 Propagation des incertitudes statistiques
 - Propagation de l'incertitude sur la réactivité vers la puissance
 - Propagation de l'incertitude sur la puissance vers la température
- 4 Application au RNR-He
 - Présentation du RNR-He
 - Modélisation en thermohydraulique
 - Modélisation en neutronique
 - Simulation de la remontée intempestive d'une barre de contrôle
- 5 Conclusion et perspectives

Neutronique

- Description de l'interaction des neutrons avec les noyaux des atomes de la matière
- Diverses interactions (capture, fission, diffusion,...)
- Réaction en chaîne de fissions :

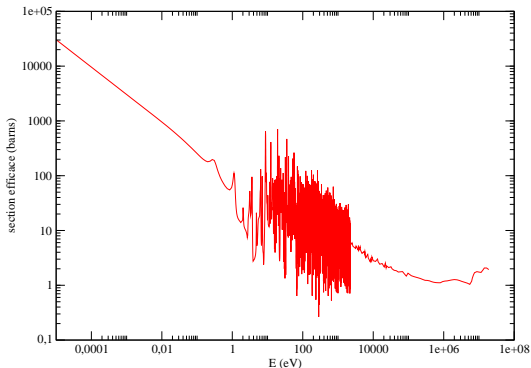


- Coefficient de multiplication neutronique k : nombre moyen de fissions engendrées par une seule fission, réactivité : $\rho = \frac{k - 1}{k}$
- $\rho > 0$ (resp. $\rho < 0$) \Rightarrow système surcritique (resp. sous-critique)
- Flux $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$: nombre de neutrons d'énergie E traversant une unité de surface par unité de temps selon la direction $\vec{\Omega}$

Section efficace

- Probabilité d'interaction en fonction de l'énergie du neutron
- Présence de résonances liées aux niveaux énergétiques des noyaux
- Prise en compte de la densité de noyaux dans les sections efficaces macroscopiques Σ
- Taux de réaction volumiques : $\Sigma\phi$

section efficace microscopique de fission de l'uranium 235

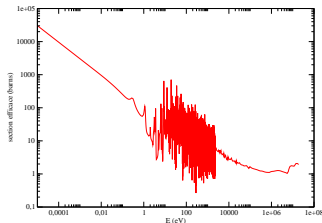




Section efficace

- Probabilité d'interaction en fonction de l'énergie du neutron
- Présence de résonances liées aux niveaux énergétiques des noyaux
- Prise en compte de la densité de noyaux dans les sections efficaces macroscopiques Σ
- Taux de réaction volumiques : $\Sigma\phi$

section efficace microscopique de fission de l'uranium 235



Bilan neutronique : équation du transport des neutrons

$$\frac{1}{v(E)} \frac{\partial \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)}{\partial t} + (\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} + \Sigma_t) \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) = (\mathbb{S}\phi)(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + (\mathbb{C}^p [\beta_i] \mathbb{F}\phi)(\vec{r}, E, t) + \sum_i \lambda_i C_i^d(E) c_i(\vec{r}, t)$$

$$\frac{\partial c_i(\vec{r}, t)}{\partial t} + \lambda_i c_i(\vec{r}, t) = \beta_i(\vec{r}, t) (\mathbb{F}\phi)(\vec{r}, t)$$

Cinétique point

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\bar{\rho}(t) - \bar{\beta}(t)}{\bar{\Lambda}(t)} N(t) + \sum_I \lambda_I \bar{c}_I(t)$$

$$\frac{d\bar{c}_I}{dt} = -\lambda_I \bar{c}_I(t) + \frac{\bar{\beta}(t)}{\bar{\Lambda}(t)} N(t)$$



Cinétique point

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\bar{\rho}(t) - \bar{\beta}(t)}{\bar{\Lambda}(t)} N(t) + \sum_l \lambda_l \bar{c}_l(t)$$
$$\frac{d\bar{c}_l}{dt} = -\lambda_l \bar{c}_l(t) + \frac{\bar{\beta}(t)}{\bar{\Lambda}(t)} N(t)$$

Code de calculs

- Codes **déterministes**

- discrétisation de l'équation de transport
- théorie multigroupe (en énergie)
- traitement des opérateurs selon les méthodes numériques classiques

- Codes **Monte-Carlo**

- résolution probabiliste de l'équation de transport
- traitement par générations de neutrons
- évaluation statistique de la réactivité et des taux de réaction

Thermohydraulique

Équations de conservation

- masse :

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

- quantité de mouvement :

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

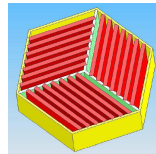
- énergie :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \vec{\nabla} \cdot (\rho c_p T \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + [\tau] : \vec{\nabla} \vec{u} + \mathbb{P}$$



Prise de moyenne

$$\langle X \rangle^\varphi = \frac{1}{V_\varphi} \int_{V_\varphi} X dV \quad [f]_\varphi = \frac{\langle \rho_\varphi f_\varphi \rangle}{\langle \rho_\varphi \rangle} \text{ (Favre)}$$



Équations de conservation en milieu poreux

- bilan quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\langle \rho_f \rangle_f [\vec{u}]_f) + \vec{\nabla} \cdot (\langle \rho_f \rangle_f [\vec{u}]_f \otimes [\vec{u}]_f) = - \vec{\nabla} \langle p \rangle_f + \mu \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} [\vec{u}]_f + (\vec{\nabla} [\vec{u}]_f)^t) + \langle \rho_f \rangle_f [\vec{F}]_f + \sum_{i=1}^3 Q_{f,i}$$

- bilan d'énergie :

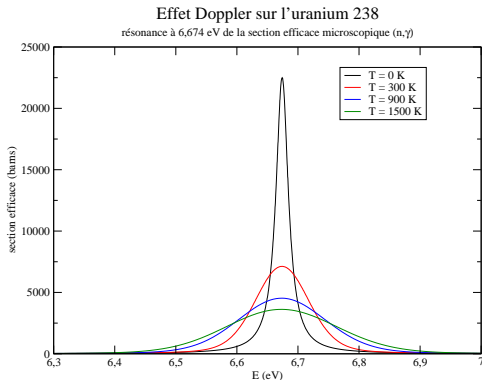
$$\frac{\partial}{\partial t} (\langle \rho_f \rangle_f c_{pf} \langle T_f \rangle_f) + \vec{\nabla} \cdot (c_{pf} \langle T_f \rangle_f \langle \rho_f \rangle_f [\vec{u}]_f) = \lambda_f \Delta \langle T_f \rangle_f + \frac{1}{V_f} \int_A \lambda_f \vec{\nabla} T_f \cdot \vec{n}_{fs} dA + \sum_{i=1}^3 E_{f,i}$$

- bilan d'énergie dans le solide :

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial \langle T_s \rangle_s}{\partial t} = \lambda_s \Delta \langle T_s \rangle_s + \langle \mathbb{P}_s \rangle_s + \frac{1}{V_s} \int_A \lambda_s \vec{\nabla} T_s \cdot \vec{n}_{sf} dA$$

Effets de température en neutronique

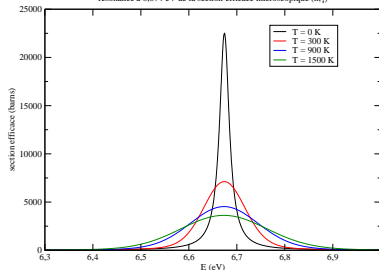
- Effet **Doppler** : modification des sections efficaces avec l'agitation thermique
- Effet de **dilatation** des matériaux : modification de la densité et donc des taux de réaction
- Effets de **spectre**



Effets de température en neutronique

- Effet **Doppler** : modification des sections efficaces avec l'agitation thermique
- Effet de **dilatation** des matériaux : modification de la densité et donc des taux de réaction
- Effets de **spectre**

Effet Doppler sur l'uranium 238
 résonance à 6,674 eV de la section efficace microscopique (n,γ)



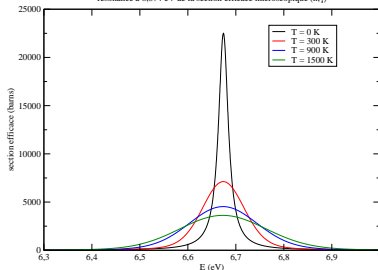
Puissance en thermohydraulique

- Les températures augmentent avec la puissance

Effets de température en neutronique

- Effet **Doppler** : modification des sections efficaces avec l'agitation thermique
- Effet de **dilatation** des matériaux : modification de la densité et donc des taux de réaction
- Effets de **spectre**

Effet Doppler sur l'uranium 238
 résonance à 6,674 eV de la section efficace microscopique (n,γ)



Puissance en thermohydraulique

- Les températures augmentent avec la puissance

Transitoires où le couplage neutronique - thermohydraulique intervient

- Perte de débit du caloporteur
- Mouvement de barre de contrôle
- Ébullition du caloporteur

Objectifs de la thèse

- Mise en place d'une méthode de résolution de la cinétique neutronique avec un code Monte-Carlo
- Étude théorique des différents problèmes de propagation des erreurs statistiques introduites par ces codes
- Application à l'étude d'un transitoire sur un réacteur

Plan de l'exposé

- 1 Généralités
 - Neutronique
 - Thermohydraulique
 - Physique du couplage
- 2 Cinétique neutronique en code Monte-Carlo
 - Théorie
 - Validation
 - Couplage avec la thermohydraulique
- 3 Propagation des incertitudes statistiques
 - Propagation de l'incertitude sur la réactivité vers la puissance
 - Propagation de l'incertitude sur la puissance vers la température
- 4 Application au RNR-He
 - Présentation du RNR-He
 - Modélisation en thermohydraulique
 - Modélisation en neutronique
 - Simulation de la remontée intempestive d'une barre de contrôle
- 5 Conclusion et perspectives

Décomposition du flux

$$\phi(\vec{x}, t) = N(t) \psi(\vec{x}, t) \text{ avec } \vec{x} = (\vec{r}, E, \vec{\Omega})$$

N : amplitude du flux
 ψ : distribution du flux

Décomposition du flux

$$\phi(\vec{x}, t) = N(t) \psi(\vec{x}, t) \text{ avec } \vec{x} = (\vec{r}, E, \vec{\Omega})$$

N : amplitude du flux
 ψ : distribution du flux

Approximations

Terme $\frac{1}{v(E)} \frac{d\phi}{dt}(\vec{x}, t)$ négligeable si $\frac{\partial \psi}{\partial t} \ll \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \psi$ et $\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \ll \frac{\bar{\rho} - \bar{\beta}}{\bar{\Lambda}}$

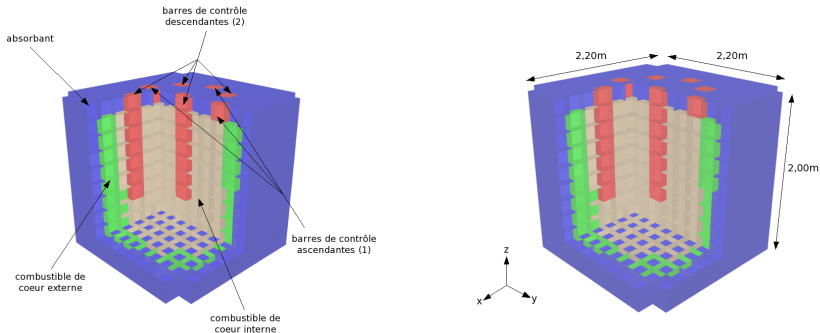
Équations résolues après discrétisation en temps

$$\left(\vec{\Omega} \cdot \vec{\nabla} + \Sigma_t \right) \phi(\vec{x}, t_n) = (\$ + \mathbb{C}^p [\beta_l] \mathbb{F}) \phi(\vec{x}, t_n) + \left(\sum_l \lambda_l (\mathbb{C}_l^d c_l) (\vec{r}, E, t_{n-1}) \right)$$

$$\frac{\partial c_l(\vec{r}, t_n)}{\partial t} + \lambda_l c_l(\vec{r}, t_n) = \beta_l \mathbb{F} \phi(\vec{x}, t_n)$$

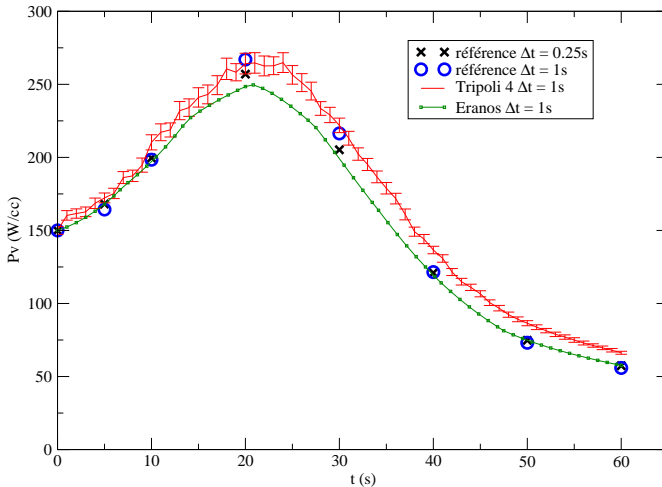
Benchmark numérique (K.S. Smith)

- Schéma simplifié d'un réacteur à eau sous pression
- Simulation d'un transitoire de mouvement de barres de contrôle
- Comparaison avec la solution d'un code déterministe



Evolution de la puissance moyenne

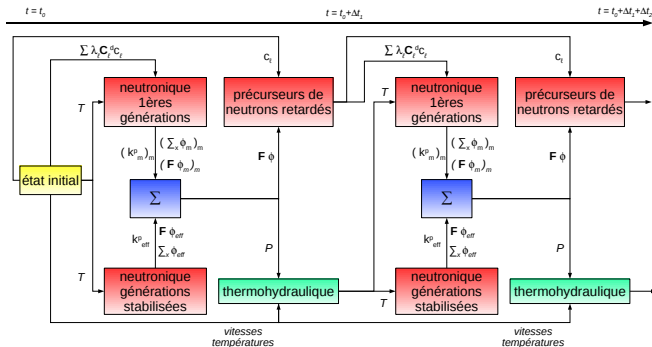
Benchmark cinétique neutronique





Couplage pratique : schéma semi-implicite

- Calcul de la cinétique neutronique sur un pas de temps n avec les résultats de thermohydraulique (températures, densités, ...) du pas de temps $n - 1$
- Extraction de la puissance
- Calcul de l'évolution des températures sur le pas de temps n selon un maillage temporel plus fin





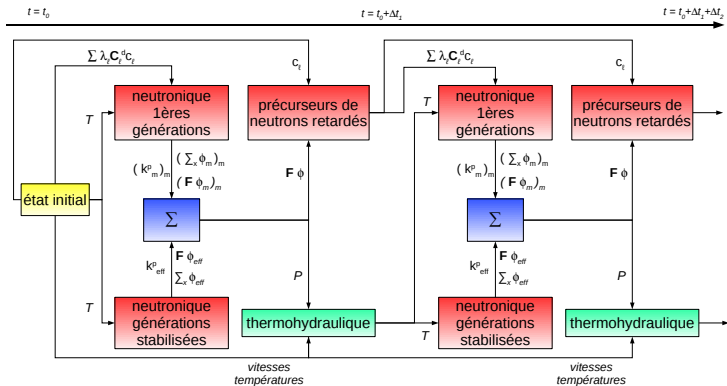
Plan de l'exposé

- 1 Généralités
 - Neutronique
 - Thermohydraulique
 - Physique du couplage
- 2 Cinétique neutronique en code Monte-Carlo
 - Théorie
 - Validation
 - Couplage avec la thermohydraulique
- 3 **Propagation des incertitudes statistiques**
 - Propagation de l'incertitude sur la réactivité vers la puissance
 - Propagation de l'incertitude sur la puissance vers la température
- 4 Application au RNR-He
 - Présentation du RNR-He
 - Modélisation en thermohydraulique
 - Modélisation en neutronique
 - Simulation de la remontée intempestive d'une barre de contrôle
- 5 Conclusion et perspectives



Deux types de transmission

- Propagation de la réactivité vers la puissance (**cinétique neutronique**)
- Propagation de la puissance vers les températures (**thermohydraulique**)





Mise en équation

- Modèle simple de cinétique ponctuelle avec contre-réaction thermique

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\ell} n + \lambda c \qquad \frac{dc}{dt} = -\lambda c + \frac{\beta}{\ell} n$$

$$\frac{dT}{dt} = -h(T - T_{ext}) + \sigma n \qquad \rho = -\alpha(T - T_{eq})$$

- Introduction d'une erreur statistique sur la réactivité ρ
- Décomposition des variables, étude en régime permanent

$$\rho = \bar{\rho} + \delta\rho \qquad T = \bar{T} + \delta T$$

$$n = \bar{n} + \delta n \qquad c = \bar{c} + \delta c$$

- Discrétisation en temps de la perturbation sur la réactivité :

$$\delta\rho(t) = \sum_{i=0}^{+\infty} \delta\rho_i \chi_i(t) \text{ avec } \chi_i(t) = 1 \text{ si } t \in [t_i, t_{i+1}[\text{ (0 sinon)}$$

$$\forall i \in \mathbb{N}, \Delta t = t_{i+1} - t_i \text{ et } \text{var}(\delta\rho_i) = C^{te} = \text{var}(\rho) \propto \frac{1}{t_{cpu} \Delta t}$$



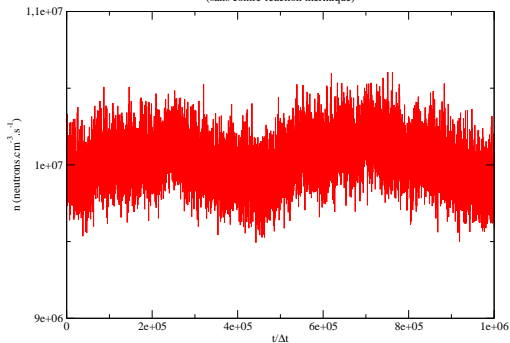
Résultats

- Cas sans contre-réaction thermique ($\alpha = 0$)

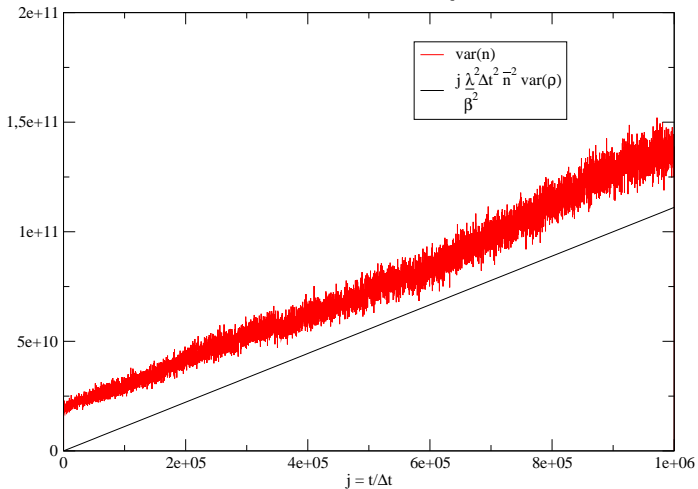
$$\sigma_n(j\Delta t) \sim_{j \rightarrow +\infty} \sqrt{j} \bar{n} \left(\frac{\lambda \Delta t}{\beta} \right) \sigma_\rho \propto \sqrt{\frac{t}{t_{cpu}}}$$

Exemple de marche aléatoire

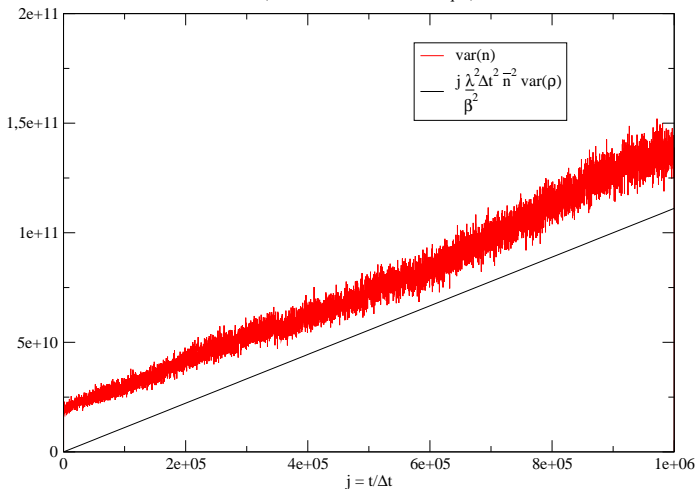
(sans contre-réaction thermique)



Evolution de la variance de n (sans contre-réaction thermique)



Evolution de la variance de n (sans contre-réaction thermique)



⇒ Sans contre-réaction thermique, l'incertitude sur la puissance diverge

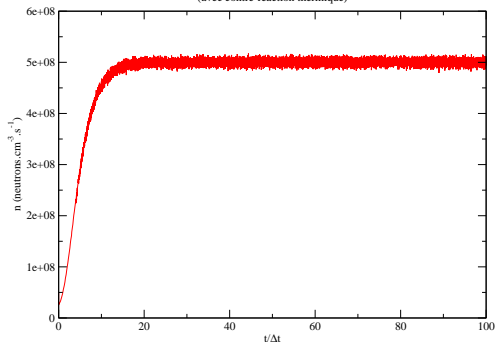


Résultats

- Cas avec contre-réaction thermique ($\alpha > 0$)

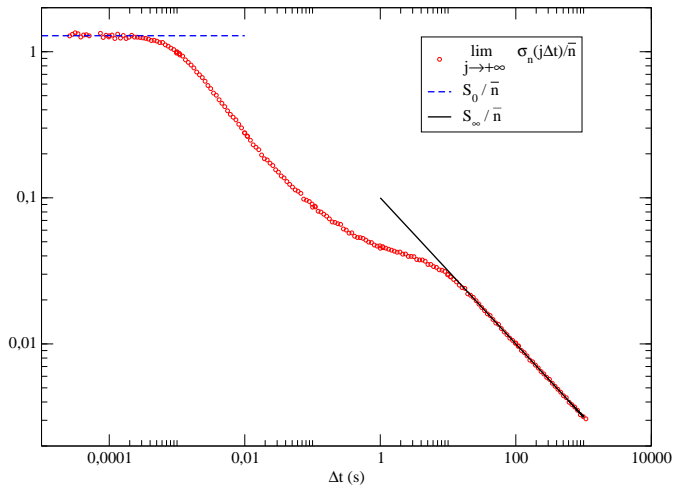
$$\lim_{j \rightarrow +\infty} \sigma_n(j\Delta t) = S_0 = O_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{1}{\sqrt{t_{cpu}}} \right)$$
$$\lim_{j \rightarrow +\infty} \sigma_n(j\Delta t) \sim_{\Delta t \rightarrow +\infty} S_\infty = \frac{h}{\sigma \alpha} \sigma_p \propto \frac{1}{\sqrt{t_{cpu} \Delta t}}$$

Comportement de la densité neutronique
(avec contre-réaction thermique)



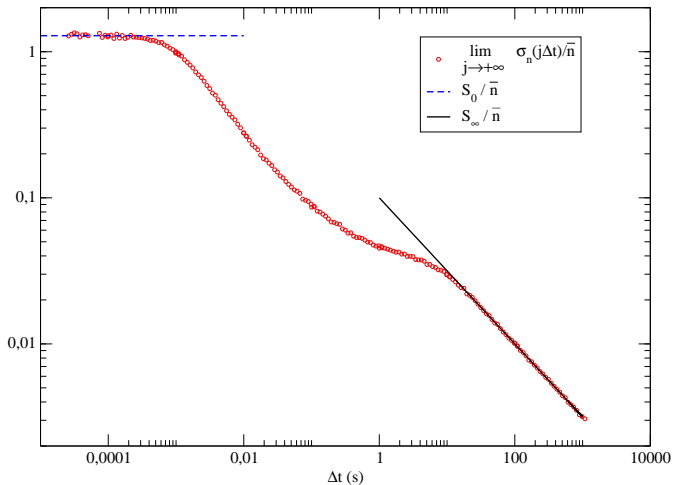
Evolution de l'erreur relative de n avec le pas de temps

(avec contre-réaction thermique)



Evolution de l'erreur relative de n avec le pas de temps

(avec contre-réaction thermique)



⇒ La contre-réaction thermique stabilise l'erreur sur la puissance



Propagation de l'incertitude sur la puissance vers la température

- Étude théorique sur un milieu périodique à 2^p mailles de longueur Δx sur chaque direction
- Longueur L fixe sur chaque côté
- Équation de conduction discrétisée en temps selon un schéma Euler explicite et en espace selon un schéma centré à 3 points

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \lambda \Delta T + \mathbb{P} \Rightarrow \rho c_p \frac{T_{n+1}^i - T_n^i}{\Delta t} = \lambda \frac{T_n^{i+1} - 2T_n^i + T_n^{i-1}}{(\Delta x)^2} + \mathbb{P}_n^i$$

- Solide de propriétés physiques λ, ρ, c_p
- Hypothèse : les variances de la puissance $\text{var}(\mathbb{P}_n^i)$ sont les mêmes dans chaque maille et toutes ces variables aléatoires sont supposées indépendantes
- Calcul d'équivalents à $t = +\infty$ et pour $p \sim +\infty$

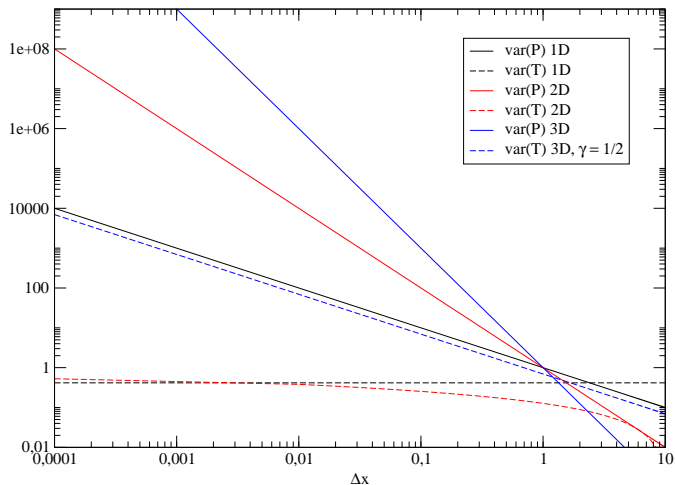


Résultats

Dimension	$\text{var}(\mathbb{P})$	$\lambda \rho_c \text{var}(T)$
1D	$\propto \frac{1}{t_{cpu} \Delta t \Delta x}$	$\propto \frac{L}{t_{cpu}}$
2D	$\propto \frac{1}{t_{cpu} \Delta t (\Delta x)^2}$	$\propto \frac{1}{t_{cpu}} \ln\left(\frac{L}{\Delta x}\right)$
3D	$\propto \frac{1}{t_{cpu} \Delta t (\Delta x)^3}$	$\propto \frac{1}{t_{cpu} \Delta x}$

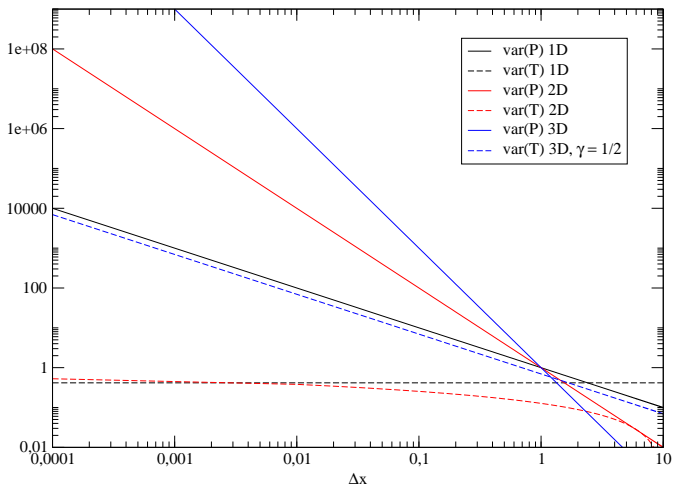


Evolution des variances avec Δx





Evolution des variances avec Δx



⇒ Les incertitudes de la température divergent moins vite que celles de la puissance

Conclusion

- Méthode de calcul de la cinétique neutronique en code Monte-Carlo validée
- Couplage avec la thermohydraulique mis en place
- Phénomènes de propagation des erreurs statistiques caractérisés

⇒ Mise en application : étude d'un transitoire sur le réacteur à neutrons rapides refroidi à l'hélium

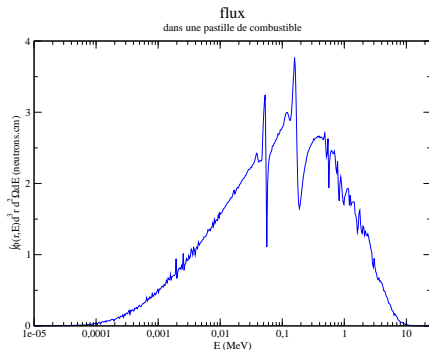


Plan de l'exposé

- 1 Généralités
 - Neutronique
 - Thermohydraulique
 - Physique du couplage
- 2 Cinétique neutronique en code Monte-Carlo
 - Théorie
 - Validation
 - Couplage avec la thermohydraulique
- 3 Propagation des incertitudes statistiques
 - Propagation de l'incertitude sur la réactivité vers la puissance
 - Propagation de l'incertitude sur la puissance vers la température
- 4 **Application au RNR-He**
 - Présentation du RNR-He
 - Modélisation en thermohydraulique
 - Modélisation en neutronique
 - Simulation de la remontée intempestive d'une barre de contrôle
- 5 Conclusion et perspectives

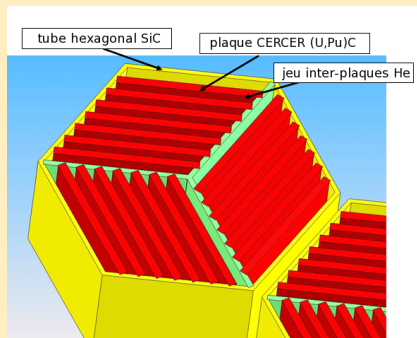
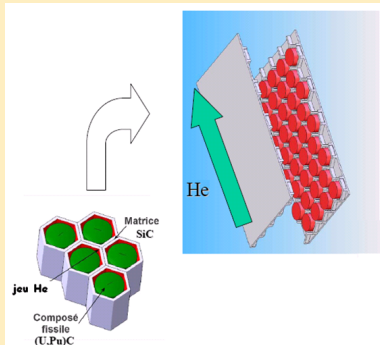
Caractéristiques du RNR-He

- Caloporteur **hélium** (quasi-transparent aux neutrons)
- Structures en **carbure de silicium** (propriétés thermiques et mécaniques attrayantes)
- Combustible **(U,Pu)C** (régénération de ^{239}Pu)
- Spectre rapide
- Puissance : 2400 MW_{th}
- Concepts de cœur à plaques et à aiguilles



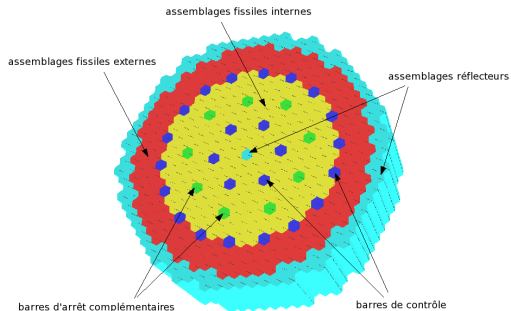
Assemblages combustibles

Cœur étudié : assemblages à faisceaux de plaques combustibles



Plan de chargement

- 387 assemblages fissiles
- 82 assemblages absorbants/inertes/réflecteurs
- Hauteur fissile : 1,55 m
- Réflecteur Zr_3Si_2 (60%) et He (40%)
- Absorbant B_4C (60%) et He (40%)



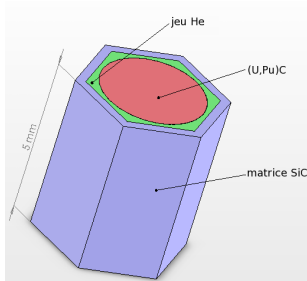


Modèles mis en place pour la thermohydraulique

- Objectif : connaître l'évolution des températures et des densités pour les fournir à la thermohydraulique (combustible, SiC et hélium)
- Problème : impossible de résoudre finement tous les éléments

⇒ Définition de 2 modèles :

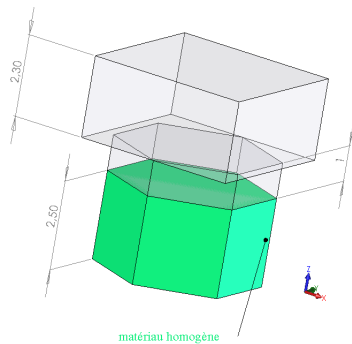
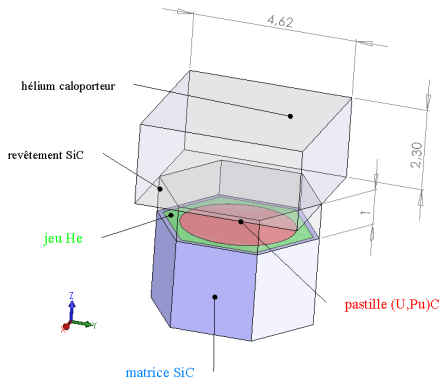
- Un modèle à l'échelle des **plaques combustibles**
 - Données d'entrée : puissance dans le combustible, vitesse et température du caloporteur
 - Calcul de la température dans le combustible et le SiC et du flux thermique s'échappant des plaques
- Un modèle à l'échelle du **cœur**
 - Données d'entrée : flux thermique extrait des plaques combustibles
 - Calcul des caractéristiques de l'écoulement du caloporteur



Modèle des plaques combustibles

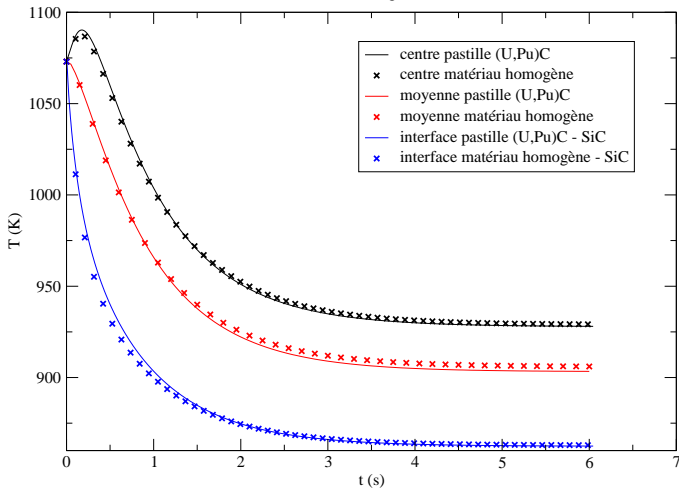
- Homogénéisation de l'ensemble {pastille (U,Pu)C, matrice SiC, jeu He}
- Calcul de la conductivité thermique, de la masse volumique et de la capacité calorifique équivalentes

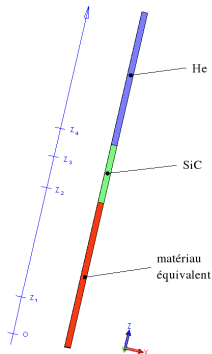
- Objectif : retrouver l'évolution des températures moyenne et maximale du combustible
- Validation par étude de la thermique 3D avec refroidissement par l'hélium
- Conditions de fonctionnement réacteur
- Comparaison des profils de température et des évolutions temporelles



Evolutions de la température

modèle homogène 3D





Étude monodimensionnelle

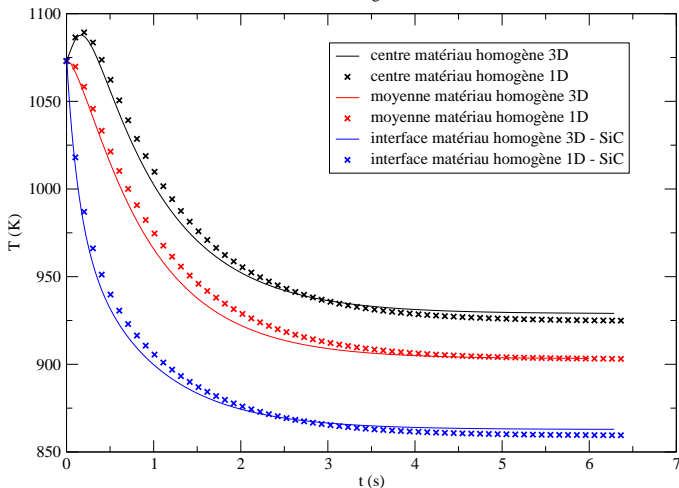
- Discrétisation 1D de la géométrie homogène
- Résolution des équations de conservation de l'énergie dans le matériau équivalent et le revêtement SiC
- Conservation du flux thermique aux interfaces

$$\begin{cases} T_{eq} = a_{eq}z^4 + b_{eq}z^2 + c_{eq} \\ T_{SiC} = a_{SiC}z^2 + b_{SiC}z + c_{SiC} \end{cases}$$

- $\langle T_{He} \rangle$ et coefficient d'échange à l'interface fluide - solide extraits du calcul homogène 3D

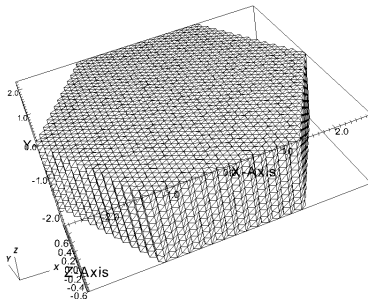
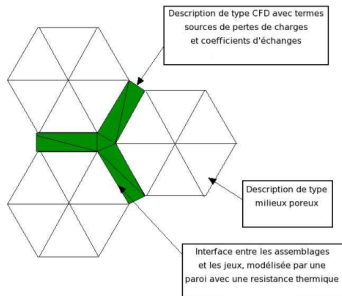
Evolutions de la température

modèles homogènes 3D - 1D



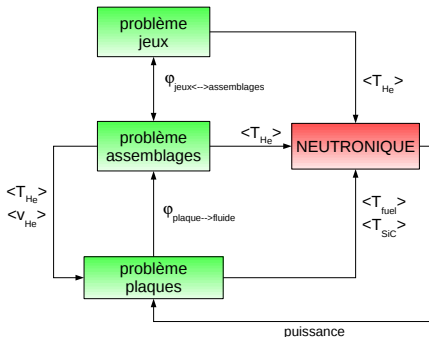
Modèle à l'échelle du cœur

- Objectif : déterminer la vitesse et la température du caloporteur dans les assemblages
- Résolution des équations de conservation en milieu poreux
- Hélium assimilé à un gaz parfait
- Prise en compte des jeux inter-assemblages
- Couplage avec le modèle des plaques dans le code Trio_U



Conclusion sur les modèles de thermohydraulique

Calcul des grandeurs nécessaires pour la neutronique décomposé en 3 problèmes couplés

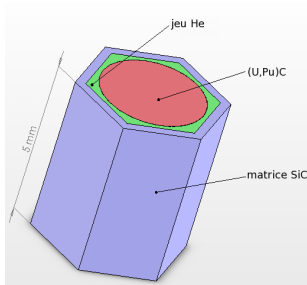


Modèle neutronique d'homogénéisation des plaques combustibles

- Objectif : économiser du temps de calcul pour les calculs Monte-Carlo
- Définition d'un nouveau matériau en conservant la quantité totale de chaque noyau
- Validation par comparaison sur k_{eff} , $\frac{dk_{eff}}{dT_{fuel}}$ et le flux

Modèle neutronique d'homogénéisation des plaques combustibles

- Objectif : économiser du temps de calcul pour les calculs Monte-Carlo
- Définition d'un nouveau matériau en conservant la quantité totale de chaque noyau
- Validation par comparaison sur k_{eff} , $\frac{dk_{eff}}{dT_{fuel}}$ et le flux



Résultats à 930 K

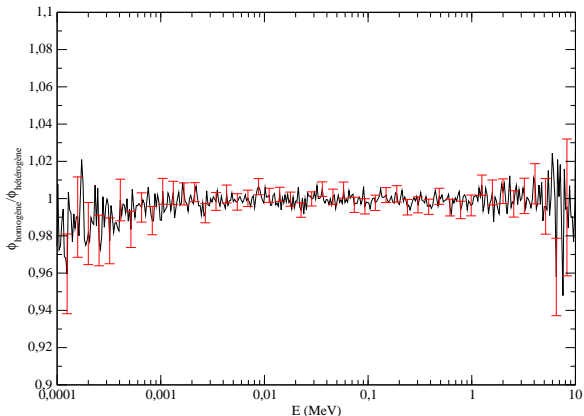
$$\begin{cases} k_{\text{hétérogène}} = 1,00198 \pm 22 pcm \\ k_{\text{homogène}} = 1,00134 \pm 15 pcm \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left(\frac{dk_{eff}}{dT_{fuel}} \right)_{\text{hétérogène}} = -3,13 pcm/K \pm 0,09 pcm/K \\ \left(\frac{dk_{eff}}{dT_{fuel}} \right)_{\text{homogène}} = -3,20 pcm/K \pm 0,06 pcm/K \end{cases}$$

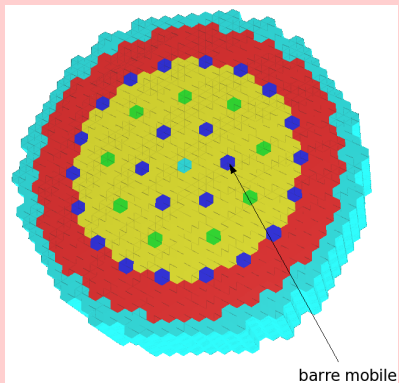
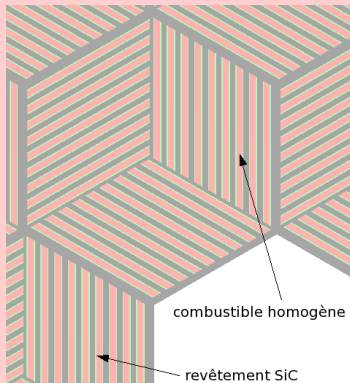
Résultats à 930 K

Comparaison des flux

Influence de l'homogénéisation des plaques CERCER



Simulation sous Tripoli





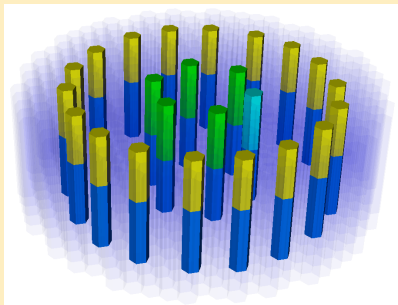
Données du transitoire

- Remontée d'une barre de contrôle près du centre du cœur
- Vitesse de remontée : 3 cm.s^{-1}
- Efficacité de la barre : insertion de réactivité de l'ordre de $\beta \Rightarrow$ sans contre-réaction thermique, le réacteur peut devenir critique prompt
- Comportement attendu : augmentation de la puissance et des températures jusqu'à la stabilisation

Position initiale des barres de contrôle

- Barres d'arrêt complémentaire relevées
- Couronne de barres de contrôle internes à mi-hauteur
- Couronne de barres de contrôle externes à $\sim 57\%$ de la hauteur fissile

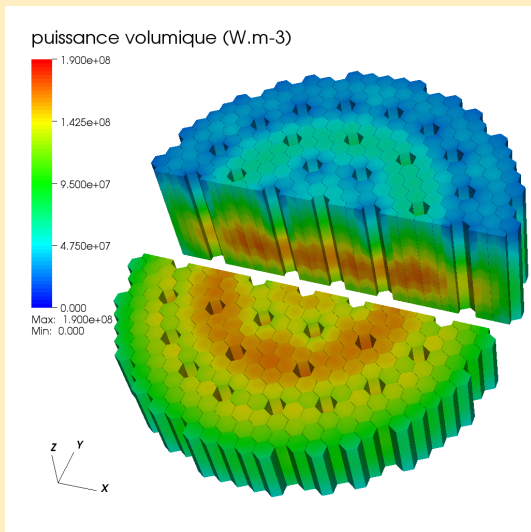
Position initiale des barres de contrôle



Calcul

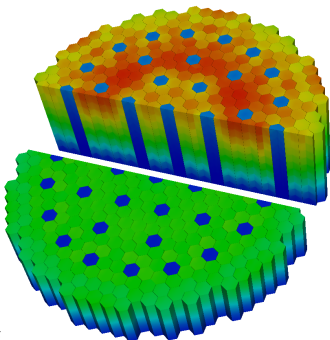
- Neutronique sur 68 processeurs maximum : incertitude de 10 pcm sur k_{eff}
- Thermohydraulique : ~200 000 mailles sur 36 processeurs (3 problèmes couplés)
- Pas de temps de 1 s (\neq sous pas de temps en thermohydraulique)
- ~12 h par pas de temps minimum

Champs initiaux

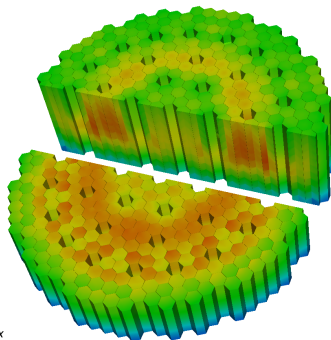


Champs initiaux

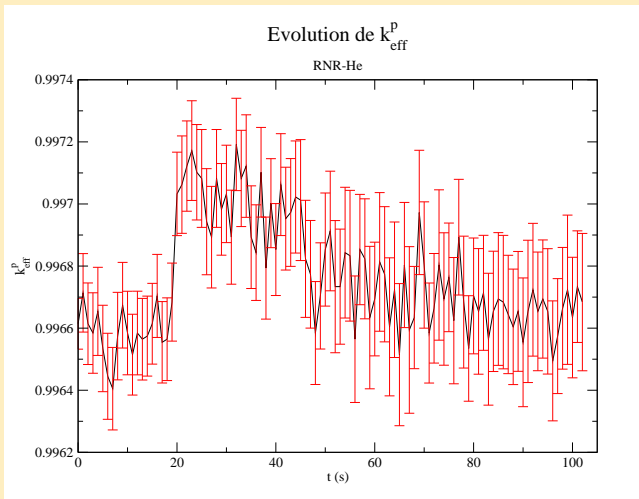
température hélium (K)



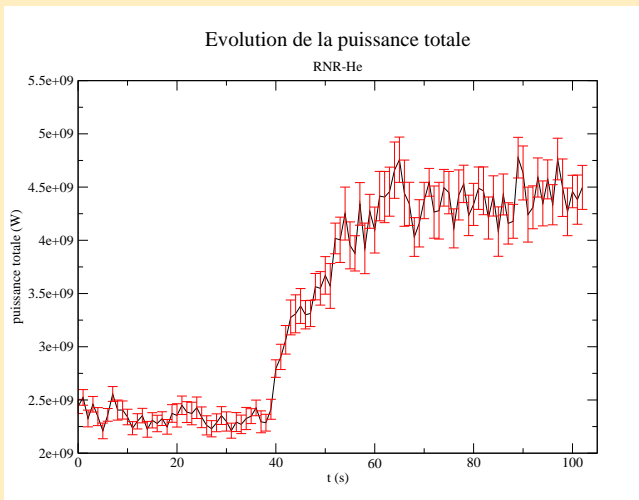
température combustible (K)



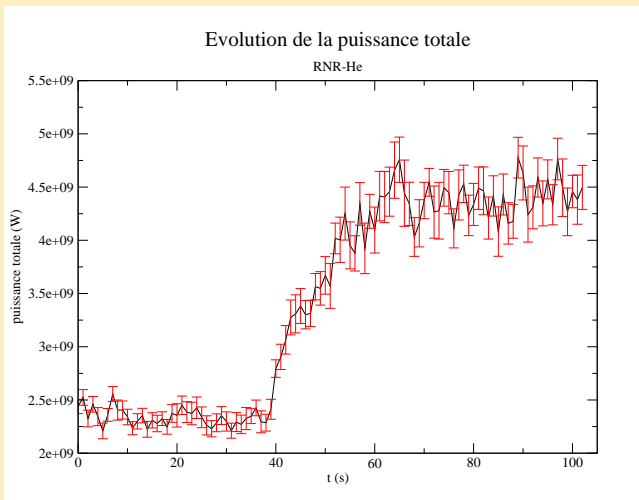
Résultats



Résultats

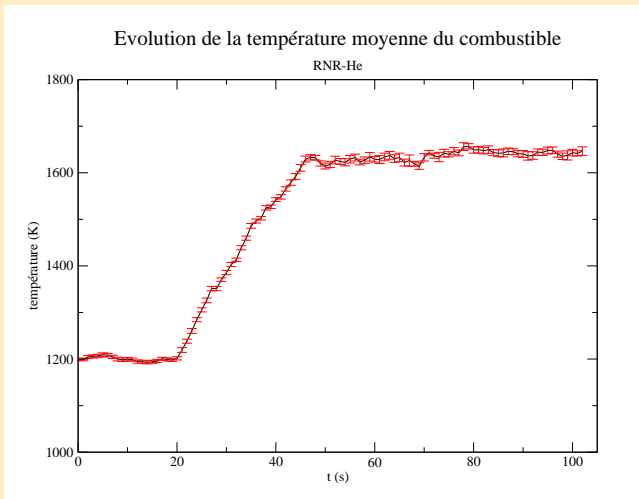


Résultats

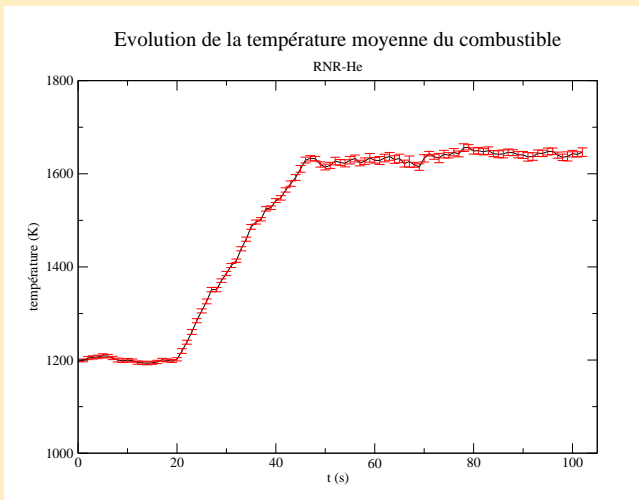


→ animation

Résultats



Résultats



→ animation

Plan de l'exposé

- 1 Généralités
 - Neutronique
 - Thermohydraulique
 - Physique du couplage
- 2 Cinétique neutronique en code Monte-Carlo
 - Théorie
 - Validation
 - Couplage avec la thermohydraulique
- 3 Propagation des incertitudes statistiques
 - Propagation de l'incertitude sur la réactivité vers la puissance
 - Propagation de l'incertitude sur la puissance vers la température
- 4 Application au RNR-He
 - Présentation du RNR-He
 - Modélisation en thermohydraulique
 - Modélisation en neutronique
 - Simulation de la remontée intempestive d'une barre de contrôle
- 5 Conclusion et perspectives

Bilan

- Démonstration de faisabilité de calculer la cinétique neutronique en code Monte-Carlo
- Mise en place d'un couplage externe entre un code Monte-Carlo et un code CFD
- Mise en évidence du rôle essentiel des contre-réactions thermiques pour la maîtrise des incertitudes
- Application à un réacteur de quatrième génération : définition de modèles pluri-disciplinaires validés
- Temps de calcul encore long devant les méthodes déterministes
- Vérification avec un calcul déterministe à réaliser



Perspectives

- Algorithme pouvant être utilisé pour le calcul de transitoires violents (REB)
- Possibilité d'implémentation dans les codes de calcul
- Atténuation de l'effet des incertitudes statistiques sur les résultats à étudier
- Étude sur les milieux poreux avec un fluide compressible à approfondir (termes de fermeture)
- Ouverture à la simulation de transitoires nécessitant une description fine des structures