

Etude de sûreté du réacteur

MSFR, Molten Salt Fast Reactor

- Cinétique du réacteur



Mariya Brovchenko

Plan

I Introduction

II Etude de Sûreté

II.1 Les deux approches

II.2 La démarche de l'étude de sûreté

II.3 ISAM

III Etude de cinétique

III.1 Etude des paramètres neutroniques

III.2 Modèle Cinétique point

III.3 Suivi des précurseurs

III.4 Calcul de la puissance résiduelle

IV Conclusion

I Introduction

MSFR: - réacteur de 4ème génération, dont les buts sont:

régénération

meilleure sûreté

minimisation des déchets

résistance à la prolifération

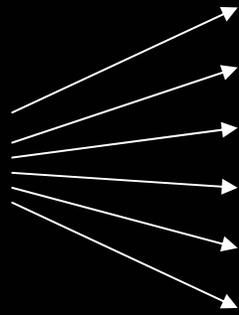
- en développement depuis les années 60 (MSRE)

Etude sûreté nécessaire pour la conception du réacteur de façon à minimiser tous les risques

I Introduction

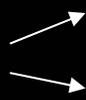
Les caractéristiques du réacteur à sels fondus

- **Combustible liquide**



- + Retraitement pendant le fonctionnement
- Solubilité ↳ Pas de réserve de réactivité
- + Fusion du cœur impossible
- Dissociation/Ebullition du sel ($T \sim 1300^{\circ}\text{C}$)
- + Pas sous pression
- + Possibilité d'une vidange rapide

- **Combustible est le caloporteur**



- + Perte du caloporteur impossible
- Pompes et échangeurs de chaleur sous forte irradiation

- **Haute T°**



- + Bonne efficacité (Cycle Carnot)
- Sel corrosif à haute T°

II Etude de Sûreté

II.1 Les deux approches

Approche probabiliste:

Calcul des risques: - réalisation de la séquence accidentelle —→ *Arbre d'événements*
- conséquences en terme de rejet de radioactivité
- conséquences pathologiques et dommage du réacteur

Approche déterministe:

Défense en profondeur: - prévention de défaillances
- maîtrise de l'accident
- gestion de l'accident

Grâce à une étude probabiliste on peut déterminer les scénarios au plus grand risque, ou on imposera une défense en profondeur.

II Etude de Sûreté

II.2 La sûreté nucléaire

Définition générale:

« *Etude de possibilités de dispersions des produits radioactifs hors l'endroit prévu pour ce but (hors du cœur par exemple).* »

- Jusqu'à présent → Bonne définition d'étude de sûreté pour les réacteurs REP
- Non adaptable aux réacteurs basés sur des concepts profondément différents
- Redéfinition plus générale des aspects de sûreté



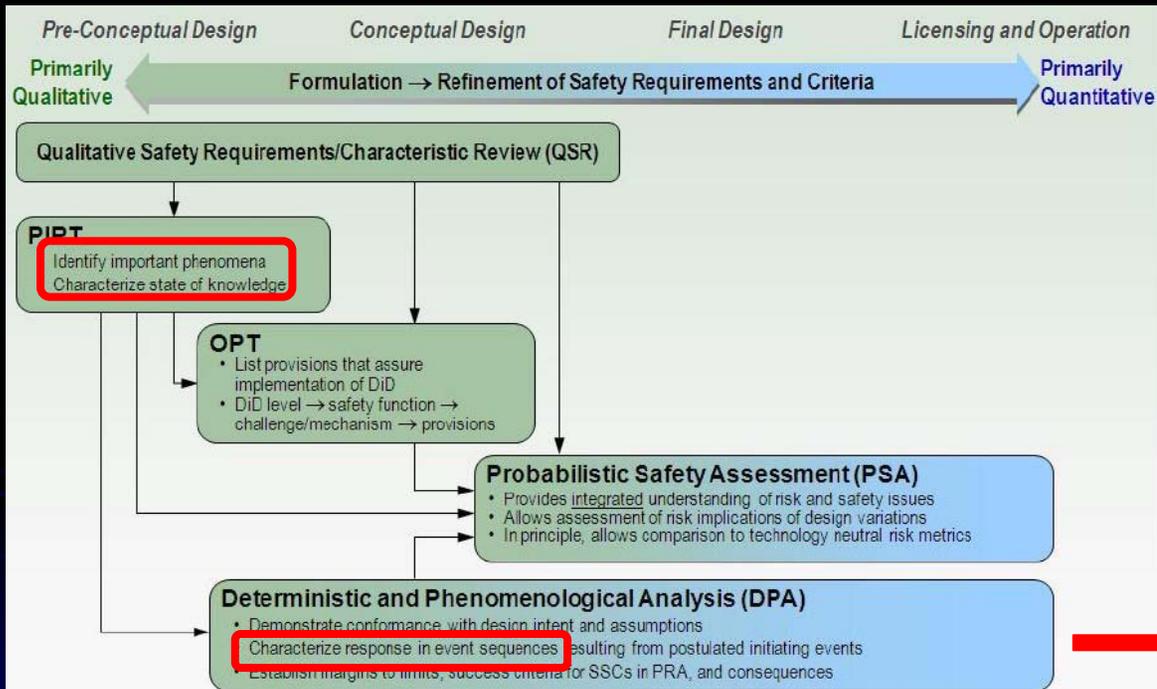
RSWG – groupe de travail de GIF GEN IV

ISAM : Integrated Safety Assessment Methodology

Développement de méthode qu'on peut utiliser pour évaluer et documenter la sûreté des systèmes de 4^{ème} génération

II Etude de Sûreté

II.3 ISAM - Integrated Safety Assessment Methodology



Itération entre les étapes afin d'intégrer la sûreté dans le système/réacteur

Figure 1 Proposed GIF Integrated Safety assessment Methodology (ISAM) Task Flow

*DiD : defense in depth

II Etude de Sûreté

II.4 La démarche générale de l'étude de sûreté

Etude de sûreté :

- détermination des paramètres importants (*ex: Pot. Redox E*)
- étude de sensibilité (*ex: E(T,...)*)
- étude des conséquences (*accumulation possible d'un élément*)

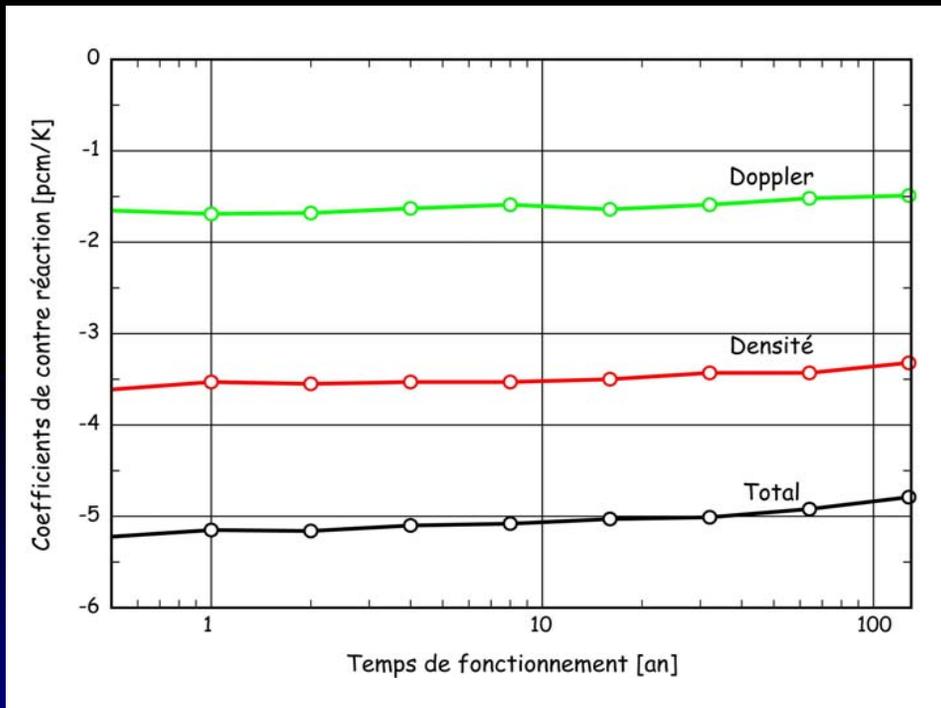
Deux cas à différencier:

- Etude de fonctionnement normal à long terme
 - Etude d'événements à risque:
 - insertion de réactivité
 - vidange
 - arrêt des pompes, des échangeurs de chaleur
 - rupture d'une des barrières de confinement
(étude des limites du fonctionnement des matériaux)
 - ...
- étude de défaillances multiples (arbre d'événements)

III Etude de la cinétique

III.1 Etude des paramètres neutroniques (1)

Coefficient de contre-réaction dk/dT:



$dk/dT < 0$: quand la température augmente - la réaction en chaîne s'arrête

➡ Stabilité intrinsèque du réacteur

$$\frac{dk}{dT} = -3,5_{\text{Densité}} - 1,5_{\text{Doppler}} + \text{Négligeable}_{\text{Correlations}} = -5,1 \text{ pcm/K}$$

Incertitude < 20%, dû à l'incertitude de la densité

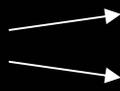
Coefficient fortement négatif et constant au cours de fonctionnement

III Etude de la cinétique

III.1 Etude des paramètres neutroniques (2)

Fraction des neutrons retardés β :

La fission produit des neutrons



Neutrons prompts: émis instantanément après la fission

Neutrons retardés: émis qq's secondes après la fission

Pour un pilotage du réacteur contrôlé :

→ Eviter la criticité des neutrons prompts:

→ il faut que la réactivité $\rho < \beta$

D'après une simulation (MCNP) $\beta_{\text{totale}}^{\text{eff}} = 360 \text{ pcm}$

Avec la moitié du volume en cœur



$\beta \sim 180 \text{ pcm}$

III Etude de la cinétique

III.2 Modèle cinétique point (1)

Hypothèses: - distribution uniforme des fissions
- pas de propagation de chaleur
- pas de suivi des précurseurs

Evolution de la réactivité:

$$\rho\left(T, \frac{dk}{dT}, t\right)$$

$$\rho(t) = [1 - \rho(t)]^2 \frac{dk}{dT} [T(t) - T_0] + I(t)$$

Variation de la puissance :

$$P(\rho, \beta, C_i, t)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\rho - \beta}{l(1 - \rho)} P + A \sum_i \lambda_i C_i$$

Abondance du groupe i :

$$C_i(\beta_i, P, \rho, t)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = \frac{\beta_i P}{l(1 - \rho) A} - \lambda_i C_i$$

Variation de température :

$$T(P, P_0, d, C_p, t)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{(P - P_0)}{C_p d}$$

$\frac{dk}{dT}$: Coefficient de contre réaction

$I(t)$: Insertion de réactivité

T_0 : Température de fonctionnement

β : Fraction moyenne utile des neutrons retardés

l : Durée de vie moyenne des neutrons

A : Facteur de normalisation

β_i : Fraction utile des neutrons retardés du groupe i

C_p : Chaleur spécifique

d : Densité

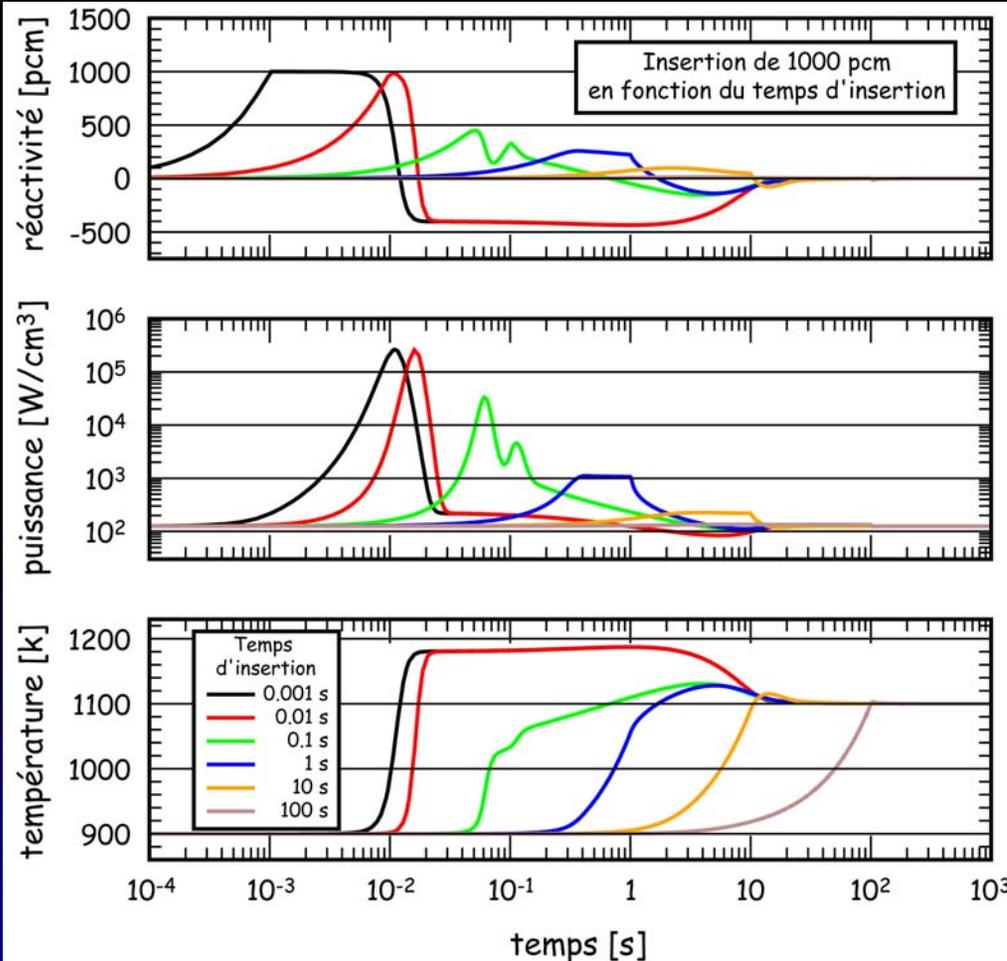
P_0 : Puissance extraite

En réalité les équations ne sont valables que localement et non globalement!!!

$$P(\vec{x}, t), T(\vec{x}, t), \rho(\vec{x}, t) \dots$$

III Etude de la cinétique

III.2 Modèle cinétique point (2)



Simulation d'insertion de réactivité de 1000 pcm dans les temps de 0,001 à 100 s

$\rho \rightarrow P \rightarrow T \rightarrow \rho \rightarrow \dots$

Jusqu'à présent on peut s'imaginer des insertions de seulement 200 pcm de réactivité pendant des temps long.

d'autres possibilités à imaginer?

III Etude de la cinétique

III.3 Suivi des précurseurs (1)

Amélioration/Validation du modèle cinétique point:

- Prise en compte le déplacement des précurseurs des neutrons retardés selon la durée de vie des groupes

- A travers le coefficient de fuite $a_i(\tau_{\text{circulation}}, \delta_{\text{coeur}})$

- Correction de β_i^{eff} :

$T_{\text{circulation}}$: période de circulation du sel

δ_{coeur} : fraction du volume du sel dans le cœur

Groupe:	Demi-vie:	Facteurs de correction:
1	55.9s	f= 0.5000312
2	24.5s	f= 0.5001
3	16.4s	f= 0.5003 $V_{\text{coeur}} = 0.5 V_{\text{totale}}$
4	5.85s	f= 0.5028288
5	2.3s	f= 0.5177512
6	0.54s	f= 0.7001976
7	0.199s	f= 0.915 ~ 1

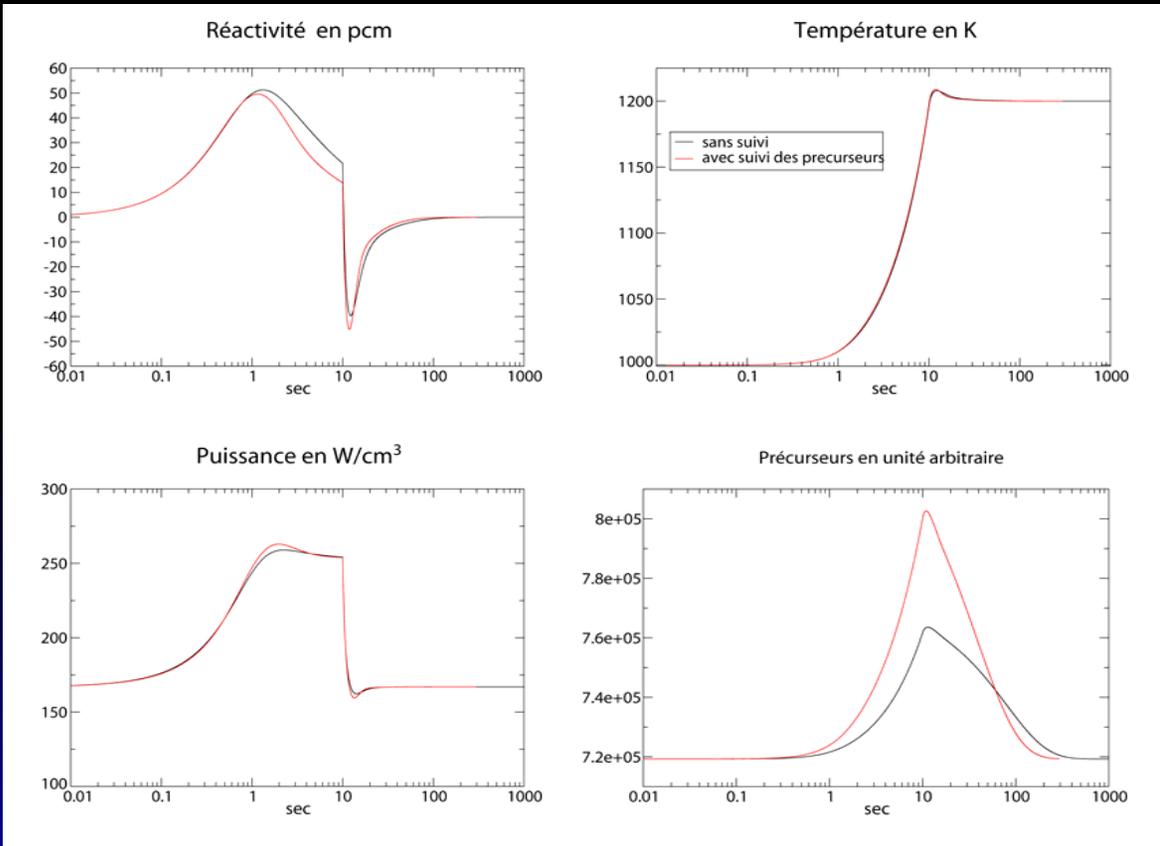
Pour $\delta_{\text{coeur}} = 0.5$:

$T_{\text{circulation}}$ (s)	$\beta(\text{pcm})$
4	191
3	187
2	185

III Etude de la cinétique

III.3 Suivi des précurseurs (2)

Amélioration/Validation du modèle cinétique point:



Insertion de 1000 pcm en 10 s

Légère influence du transport des neutrons retardés de l'ordre de $t \sim 1-10$ s

La circulation du sel de l'ordre de $t \sim 1-10$ s

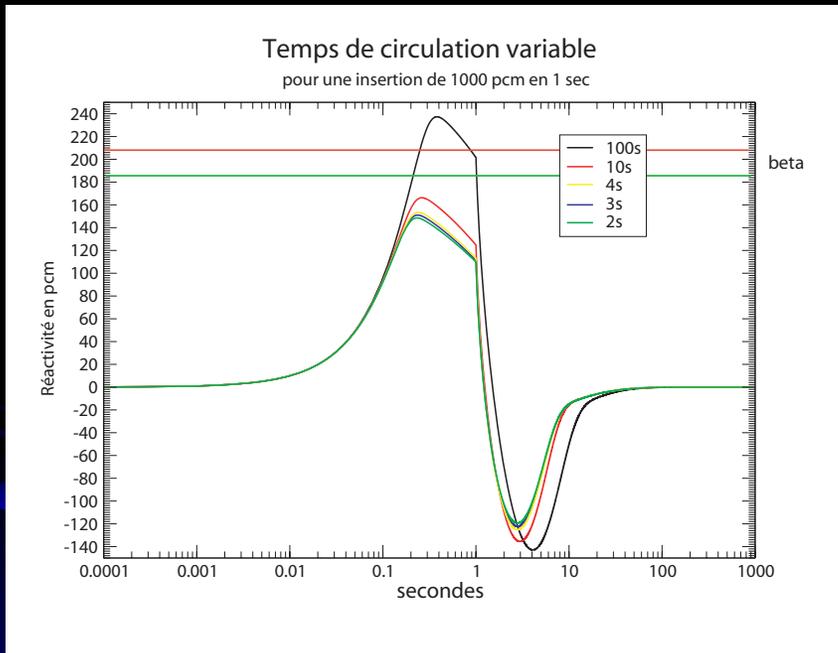
Hypothèses:

- distribution uniforme des fissions
- pas de propagation de chaleur
- ~~- pas de suivi des précurseurs~~

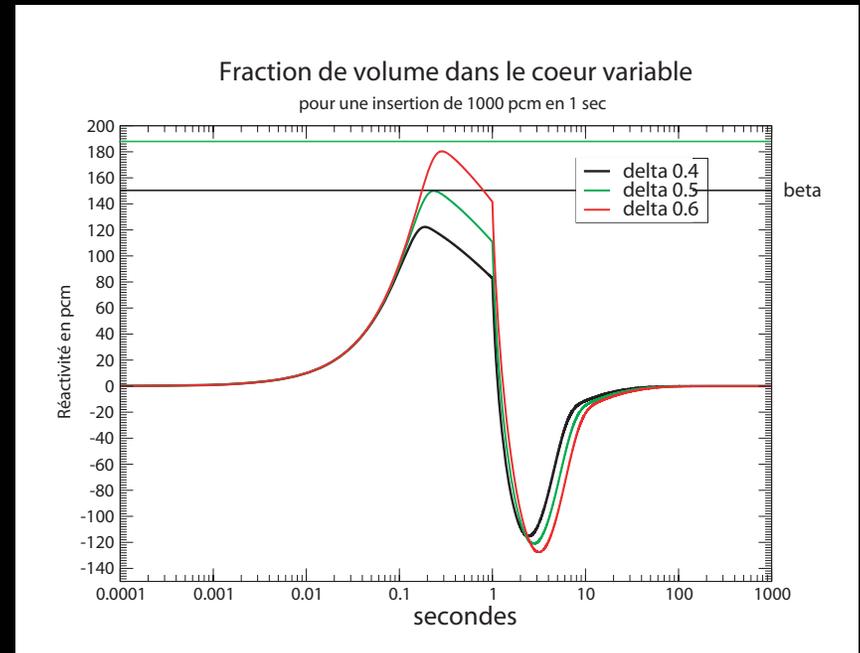
III Etude de la cinétique

III.3 Etude de sensibilité (1)

Etude de sensibilité en fonction de temps de circulation du sel:



Etude de sensibilité en fonction de fraction du volume dans le cœur:



$T_{\text{circulation}}$ (en s)	2	3	4	10	100
β (en pcm)	185	187	191	207	297

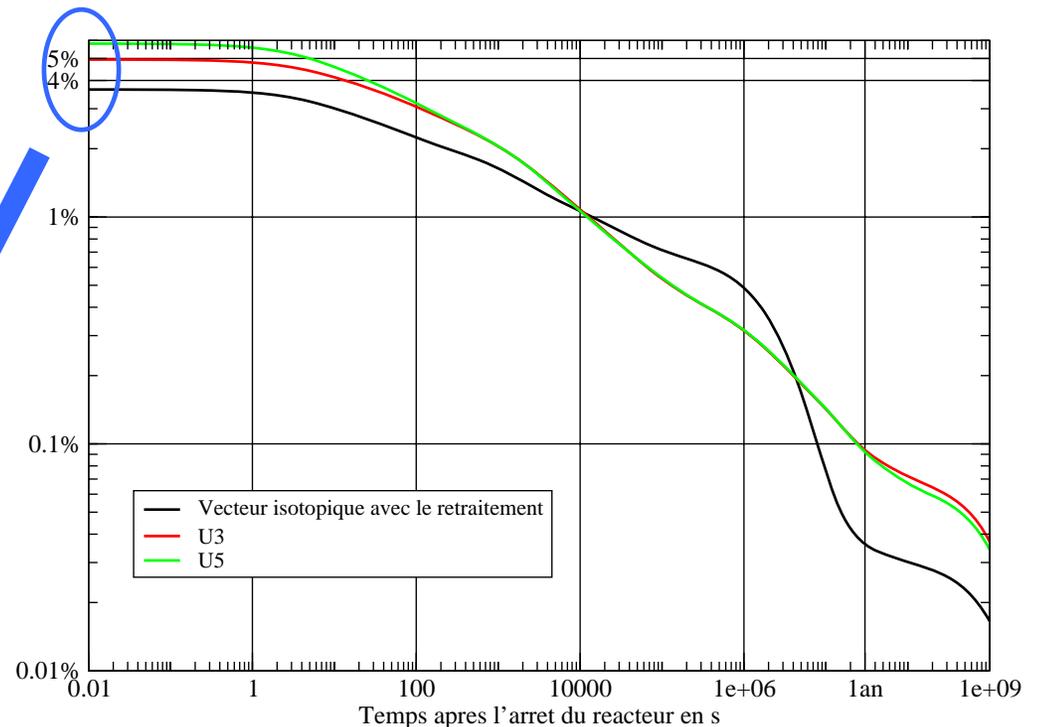
δ	0,4	0,5	0,6
β (en pcm)	151	188	225

III Etude de la cinétique

III.4 Calcul de la puissance résiduelle

Puissance résiduelle suite à un arrêt de réacteur :

Puissance résiduelle suite a l'arrêt d'un reacteur a l'équilibre



Puissance résiduelle maximale:

U5 : 5.81 %

U3 : 4.94 %

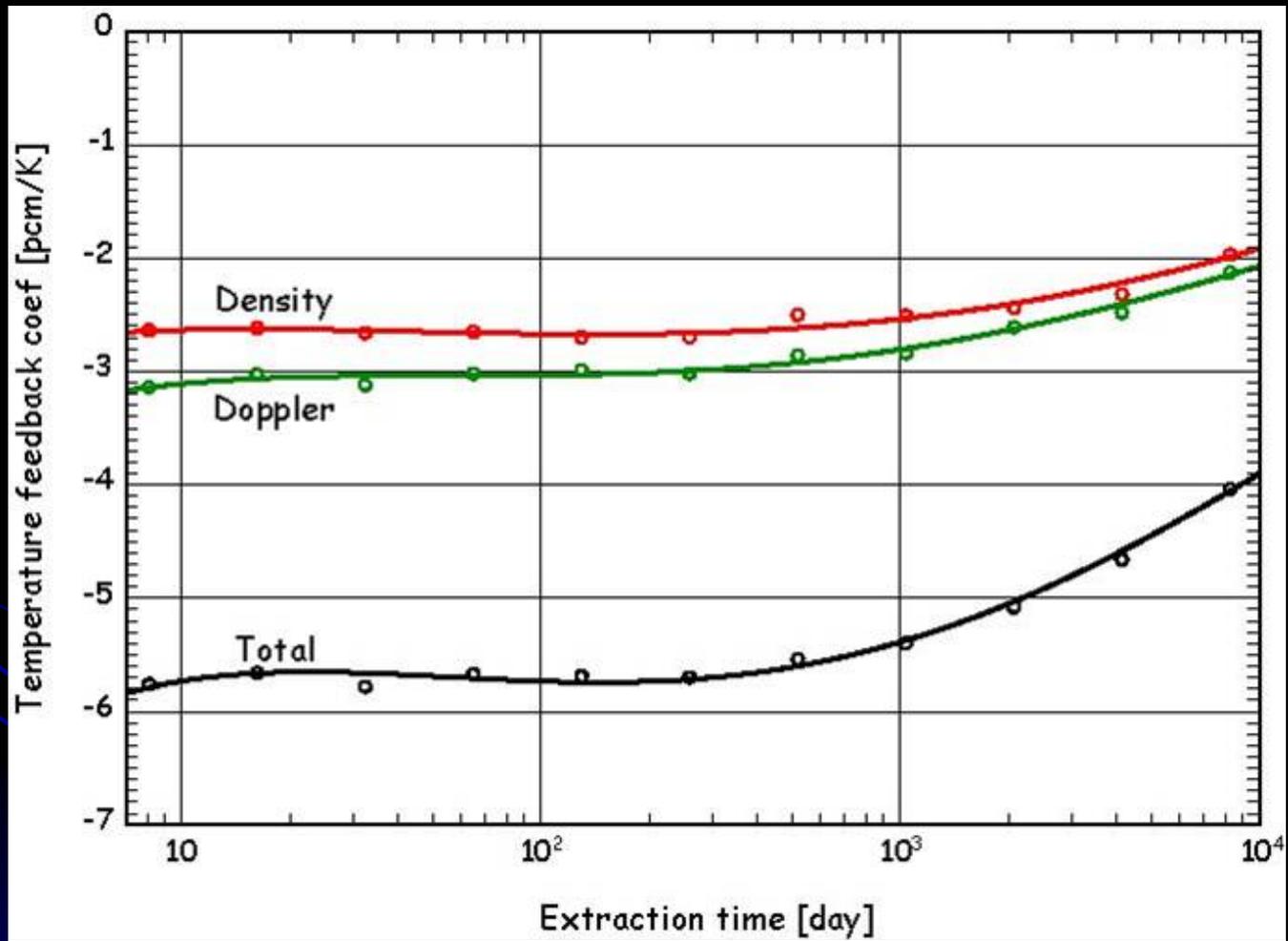
Avec retraitement : 3.64 %

IV Conclusion

- ➔ Etude de sûreté nécessite des études **qualitative** et **quantitative** de la cinétique du réacteur MSFR
- ➔ Cinétique point ne prend pas en compte les effets thermo-hydrauliques qui peuvent jouer un rôle important pour des temps $\sim 1-10$ s
- ➔ Prise en compte de la distribution spatiale des grandeurs physiques
- ➔ Développement du couplage neutronique – thermo-hydraulique

Merci pour votre attention!!!





Références

- [1] **F.Perdu**, "Contribution aux études de sûreté pour des filières innovantes de réacteurs nucléaires", Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier de Grenoble (2003)
- [2] **D.Lecarpentier**, "Contribution aux travaux sur la transmutation des déchets nucléaires, voies des réacteurs à sel fondu : le concept AMSTER, aspects physiques et sûreté", Thèse de doctorat, Conservatoire National des Arts et Métiers (2001)
- [3] **L.Mathieu**, "Cycle Thorium et Réacteurs à Sel Fondu, exploration du champ des paramètres et des contraintes définissant le Thorium Molten Salt Reactor ", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble (2005)
- [4] **E.Merle-Lucotte** "Le cycle Thorium en Réacteurs à sels fondus peut-il être une solution au problème énergétique du XXI siècle ? Le concept de TMSR-NM", Habilitation à Diriger les Recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble (2008)
- [5] **E.Merle-Lucotte, D.Heuer, M.Allibert et al.**, "Optimization and simplification of the concept of non-moderated Thorium Molten Salt Reactor ", Proceedings of International Conference on the Physics of Reactors PHYSOR 2008, Interlaken, Switzerland (2008)
- [6] **X. Doligez, D.Heuer, E. Merle-Lucotte, V.Ghetta, M.Allibert**, "Numerical Tools for Molten Salt Reactors Simulation", Proceedings of Global 2009, Paper 9207, Paris (2009)
- [7] **E. Merle-Lucotte, D.Heuer, M.Allibert, X.Doligez, V.Ghetta**, "Minimizing the Fissile Inventory of the Molten Salt Fast Reactor ", Proceedings of the Advances in Nuclear Fuel Management IV, ANFM 2009, Hilton Head Island, USA (2009)
- [8] **Daniel Heuer**, "Réacteurs à Sels Fondus - du MSBR au MSFR", cours communiqué en novembre (2009)
- [9] **"Electronucléaire - une présentation pas des physiciens"**, Publication du Cercle d'Etudes Sur l'Energie Nucléaire (1999)
- [10] **"Eléments de Sûreté Nucléaire"** Jacques Libmann, Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire, EDP Sciences (2000)
- [11] **"Matériaux du Nucléaire"**, Rapports sur la science et la technologie n°5, Académie des Sciences, Editions TEC & DOC (2000)