

# 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  $T^{\circ}$**

- + Bonne efficacité (Cycle Carnot)
- **Sel corrosif à haute  $T^{\circ}$**

# 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



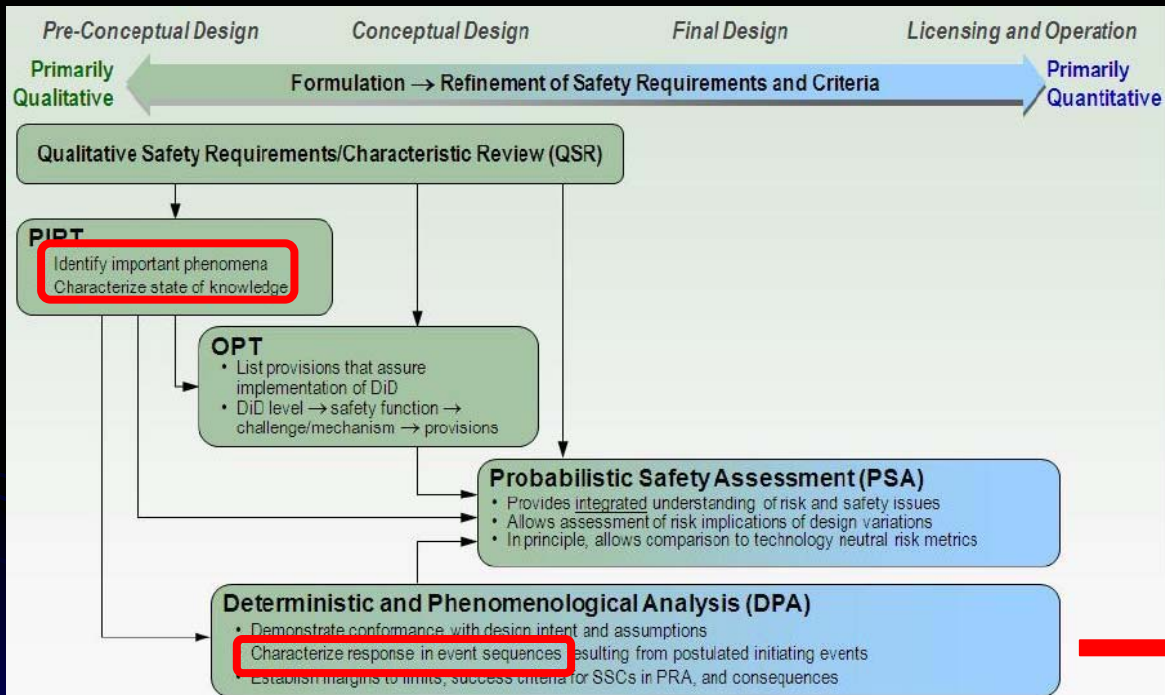
RSWG – groupe de travail de GIF GEN IV

ISAM : Integrated Safety Assessment Methodology

Développement de méthode qu'on peut utiliser pour évaluer et documenter la sûreté des systèmes de 4<sup>ème</sup> 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:

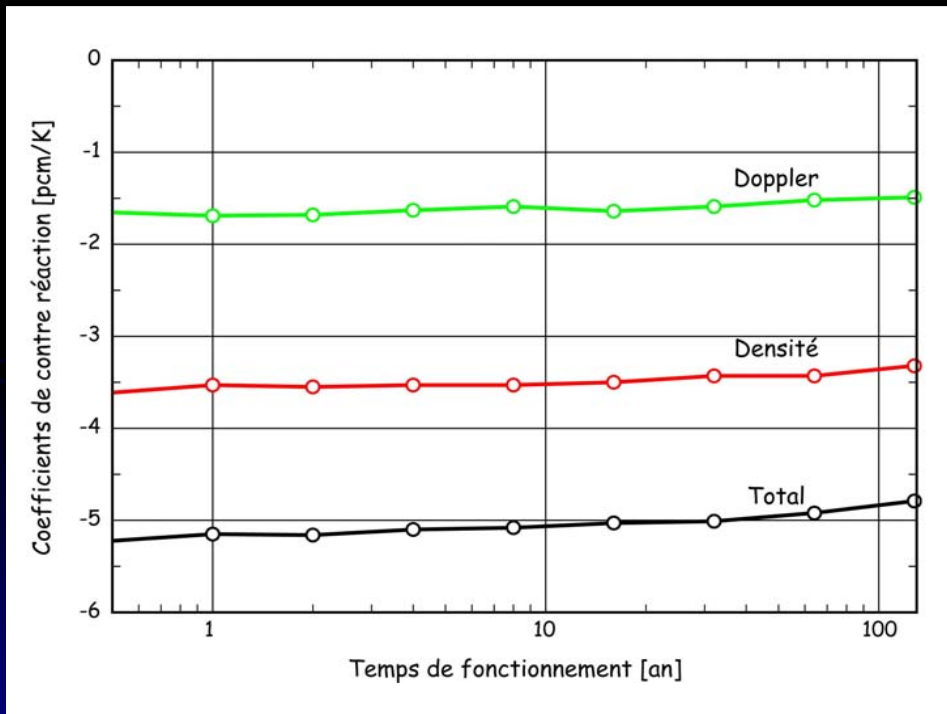
- Etude de fonctionnement normal à long terme
  - Etude d'événements à risque: - insertion de réactivité
    - vidange
    - arrêt des pompes, des échangeurs de chaleur
    - rupture d'une des barrières de confinement  
(étude des limites du fonctionnement des matériaux)
    - ...
- étude de défaillances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

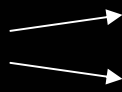
Coefficient fortement négatif et constant au cours de fonctionnement

# III Etude de la cinétique

## III.1 Etude des paramètres neutroniques (2)

### Fraction des neutrons retardés $\beta$ :

La fission produit des neutrons



Neutrons prompts: émis instantanément après la fission

Neutrons retardés: émis qq's secondes après la fission

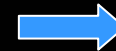
Pour un pilotage du réacteur contrôlé :

→ 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

$\beta$  : Fraction moyenne utile des neutrons retardés

$l$  : Durée de vie moyenne des neutrons

$A$  : Facteur de normalisation

$\beta_i$  : Fraction utile des neutrons retardés du groupe  $i$

$C_p$  : Chaleur spécifique

$d$  : Densité

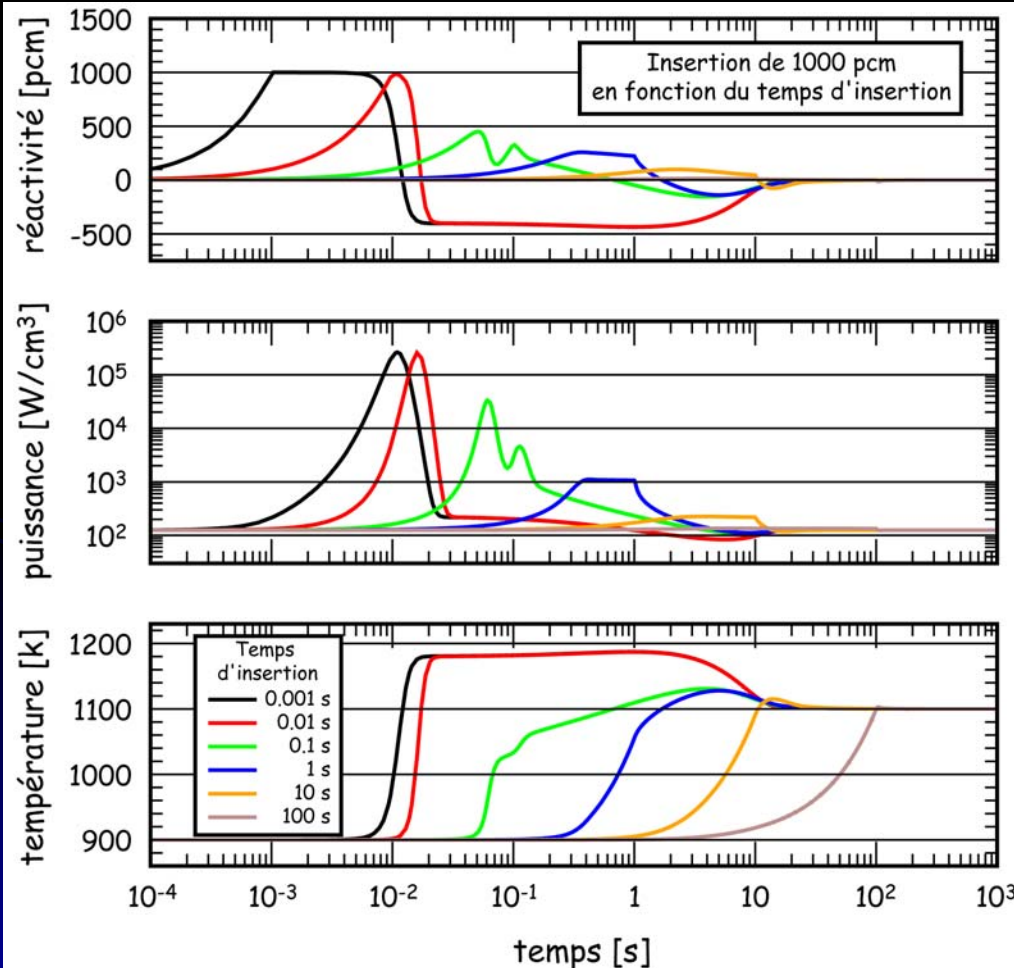
$P_0$  : Puissance extraite

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  $\beta_i^{\text{eff}}$ :

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

$\delta_{\text{coeur}}$  : 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 $\sim 1$

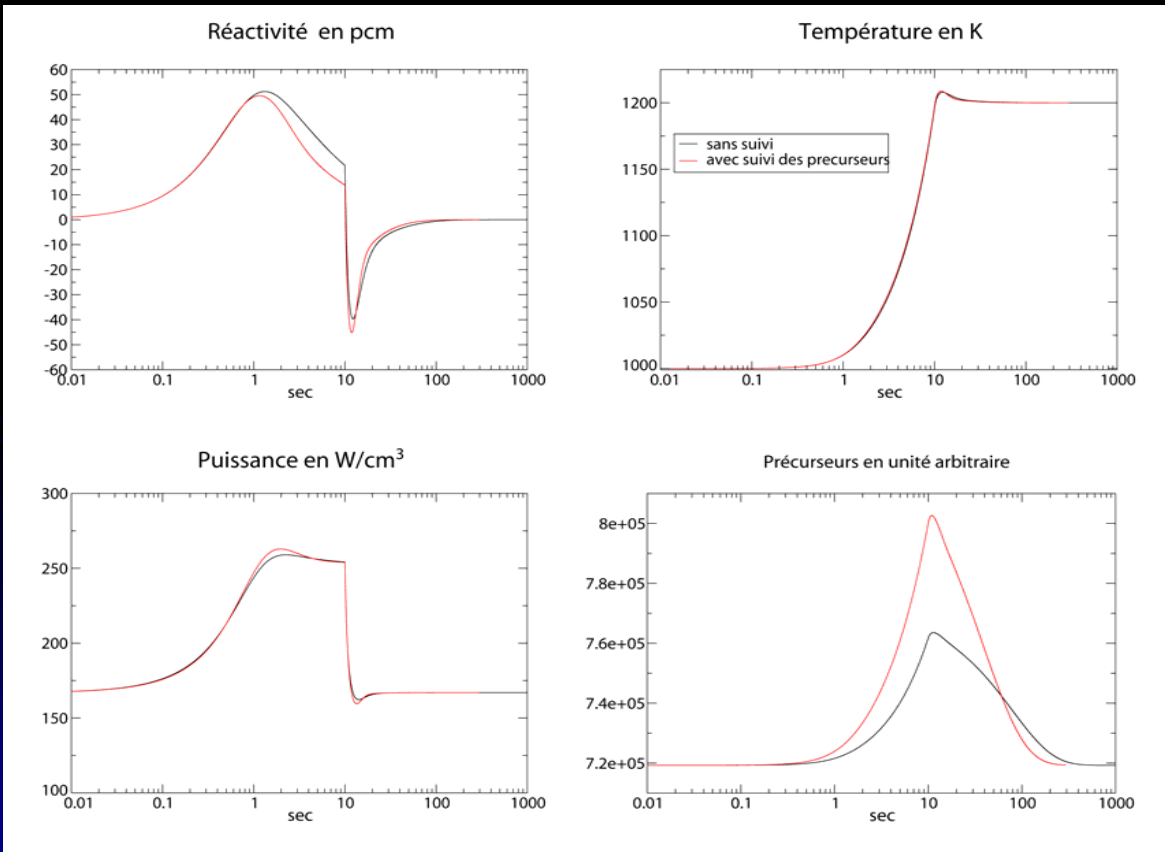
Pour  $\delta_{\text{coeur}} = 0.5$  :

$T_{\text{circulation}}$ (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

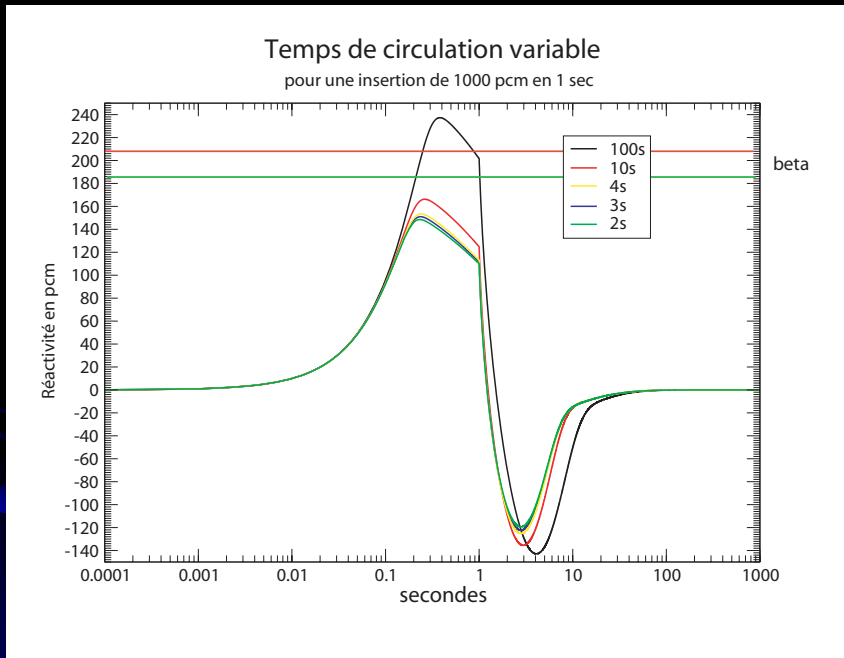
### Hypothèses:

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

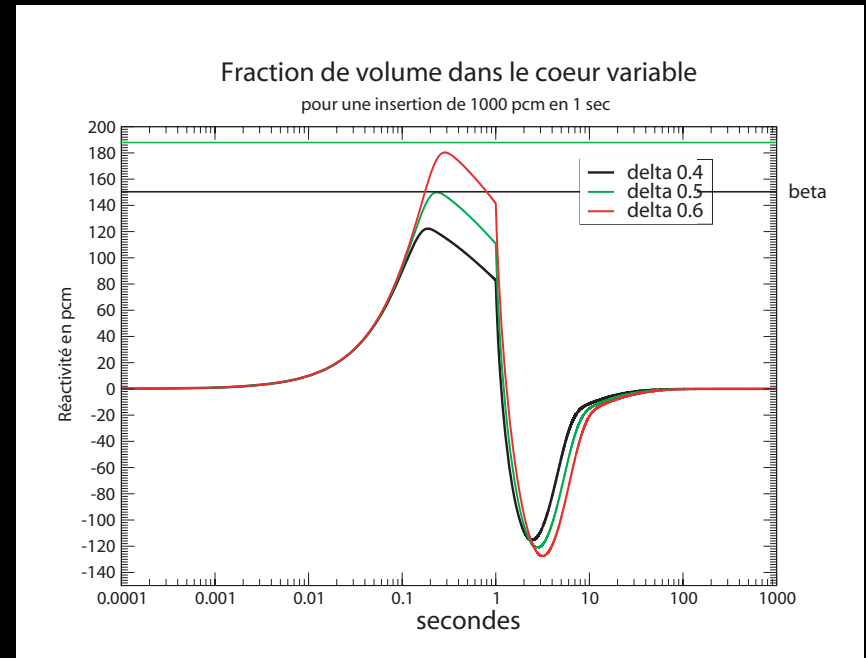
# III Etude de la cinétique

## 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
$\beta$ (en pcm)	185	187	191	207	297

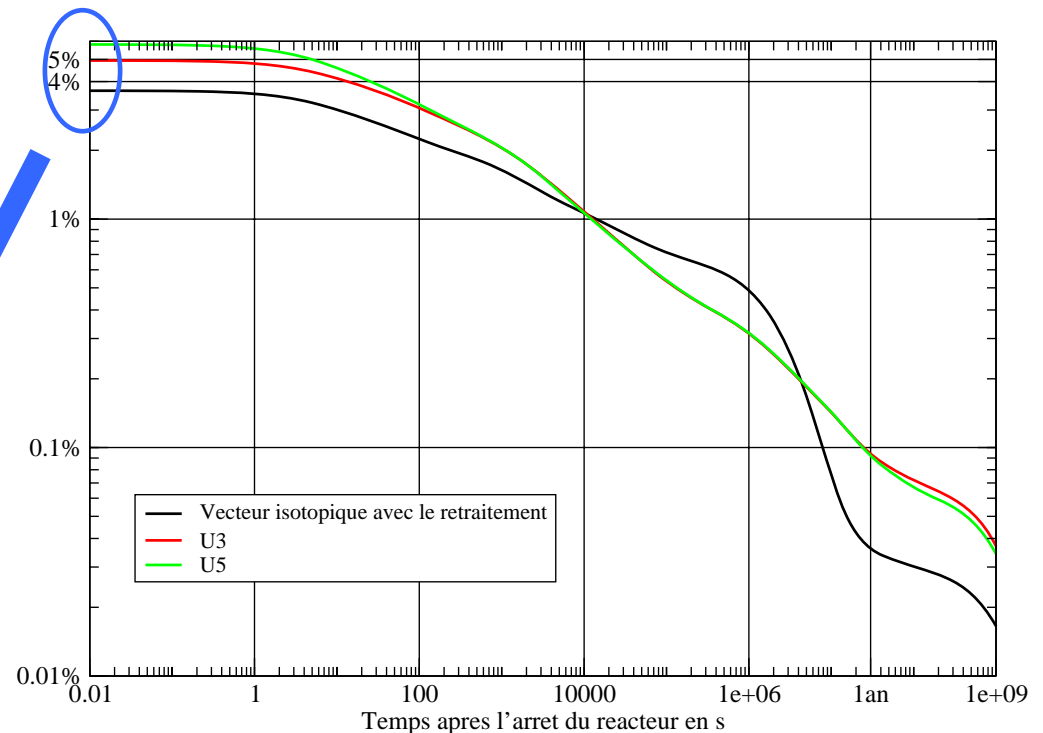
$\delta$	0,4	0,5	0,6
$\beta$ (en pcm)	151	188	225

# 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 %

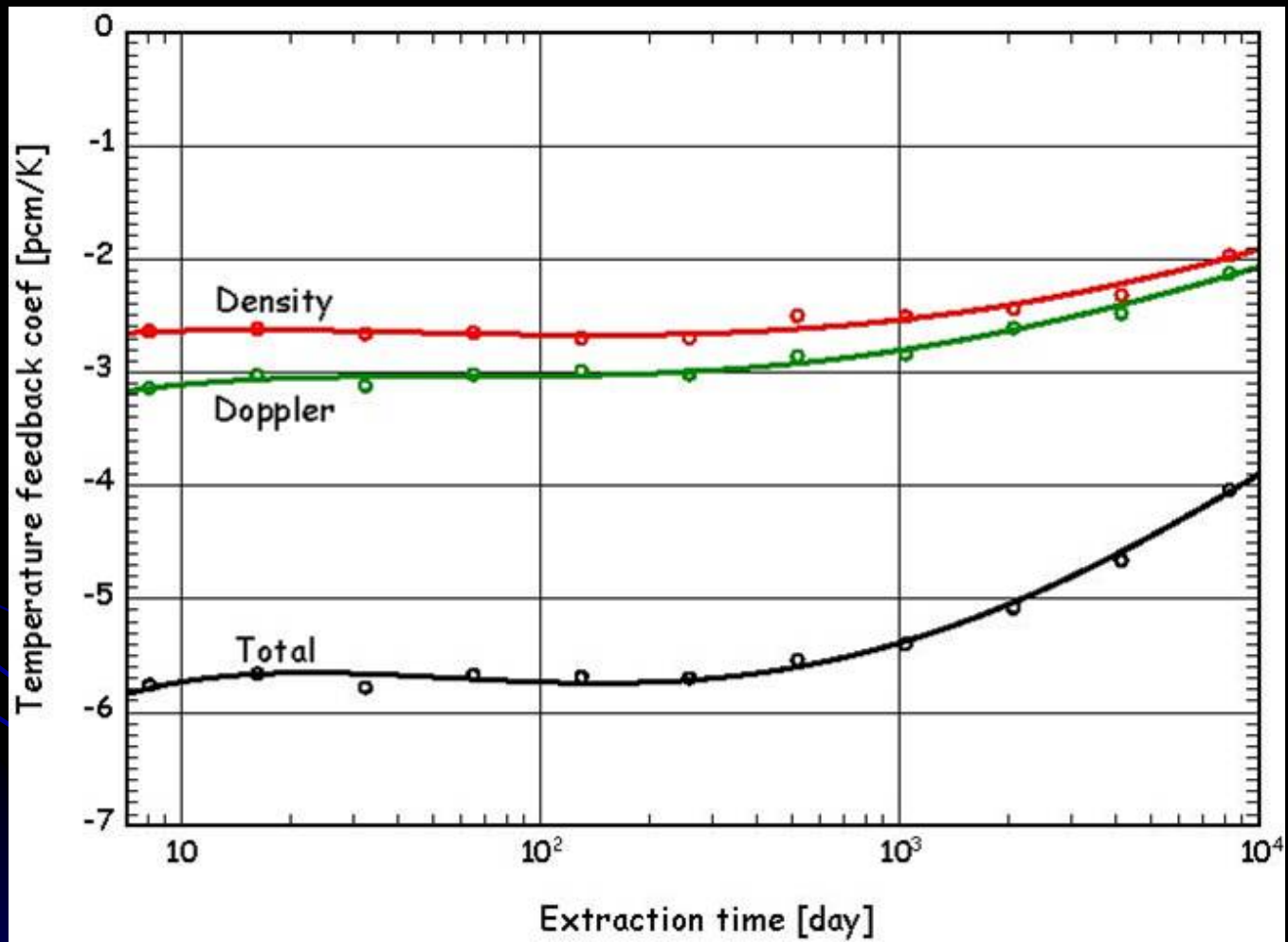


# IV Conclusion

- ➔ 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)