

# **Modélisation d'écoulements compressibles et diphasiques induits lors d'accidents de réacteurs à sels fondus**

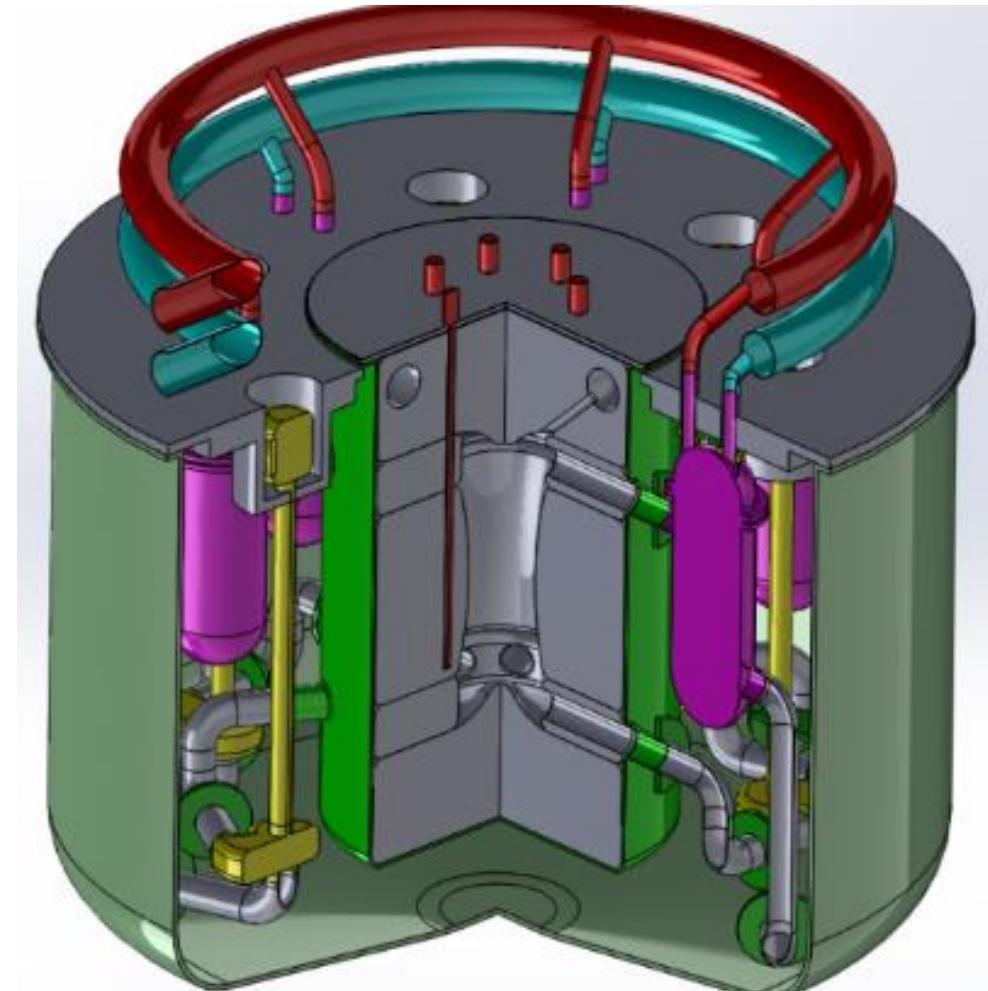
Anna Maître (2<sup>ème</sup> année)

Séminaire des doctorant.es - 14 avril 2025

Encadrant.es :

Frédéric Bertrand et Nathalie Seiler (CEA Cadarache)

Axel Laureau et Elsa Merle (CNRS/LPSC)



# Sommaire

## 1. Contexte et introduction

Contexte des réacteurs à sels fondus  
Neutronique  
Thermohydraulique

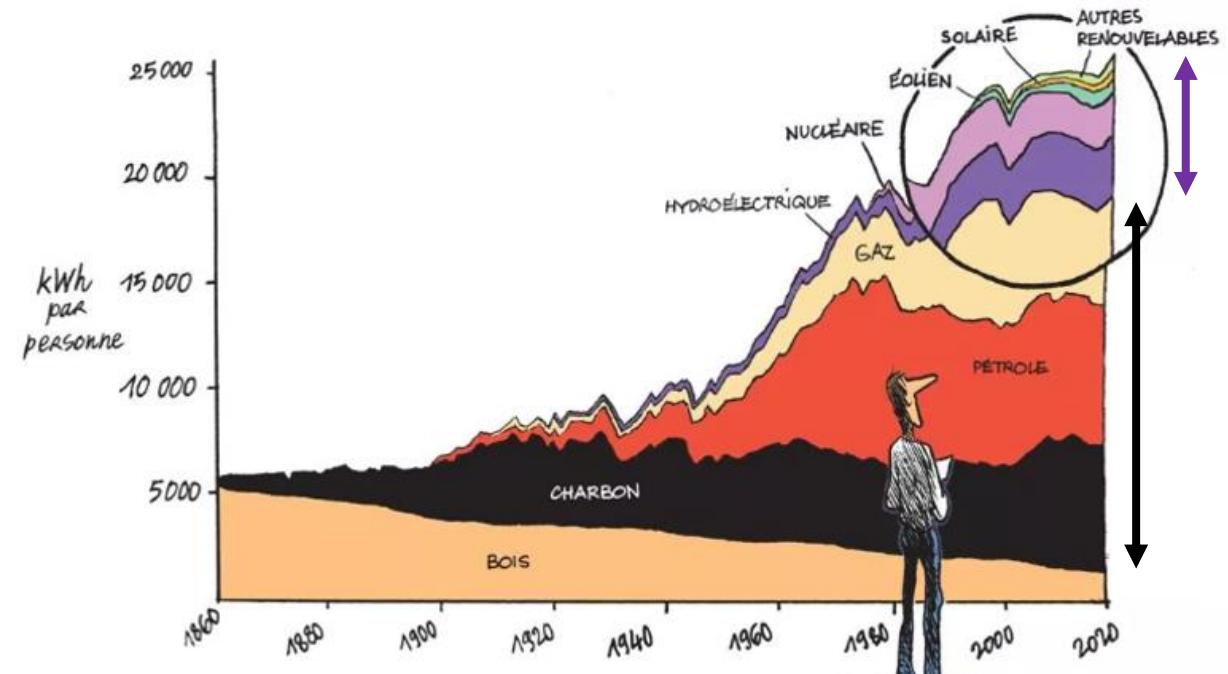
## 2. Phénoménologie et objectifs

Phénoménologie de l'accident redouté  
Objectifs de simulation du code

## 3. Modèles et simulations

Modèle neutronique  
Modèle thermohydraulique  
Premiers résultats

# Contexte



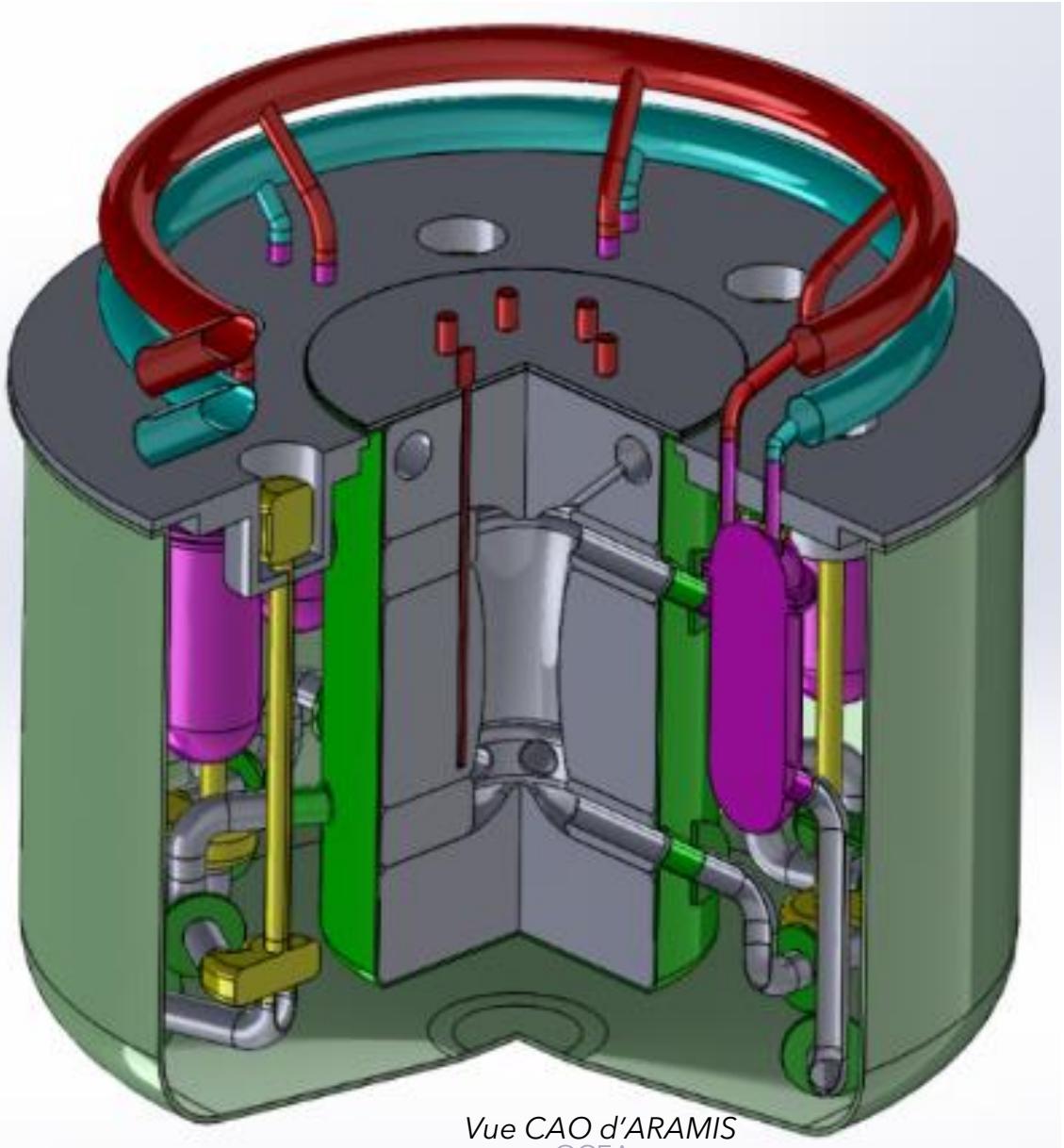
Le monde sans fin (2021) @Blain, Jancovici

Le nucléaire est une source d'énergie décarbonée avec des avantages intéressants :

- Massive,
  - Utilisation de matières premières réduite,
  - Stabilisatrice pour le réseau,
- mais :
- Problématique des **déchets nucléaires à vie longue**
  - **Haut niveau de sûreté** requis

- Réacteurs à sels fondus brûleurs d'actinides, considérés comme des déchets
- Contexte de la thèse : étude de sûreté d'un tel réacteur en phase de conception

# Réacteur étudié : ARAMIS-A



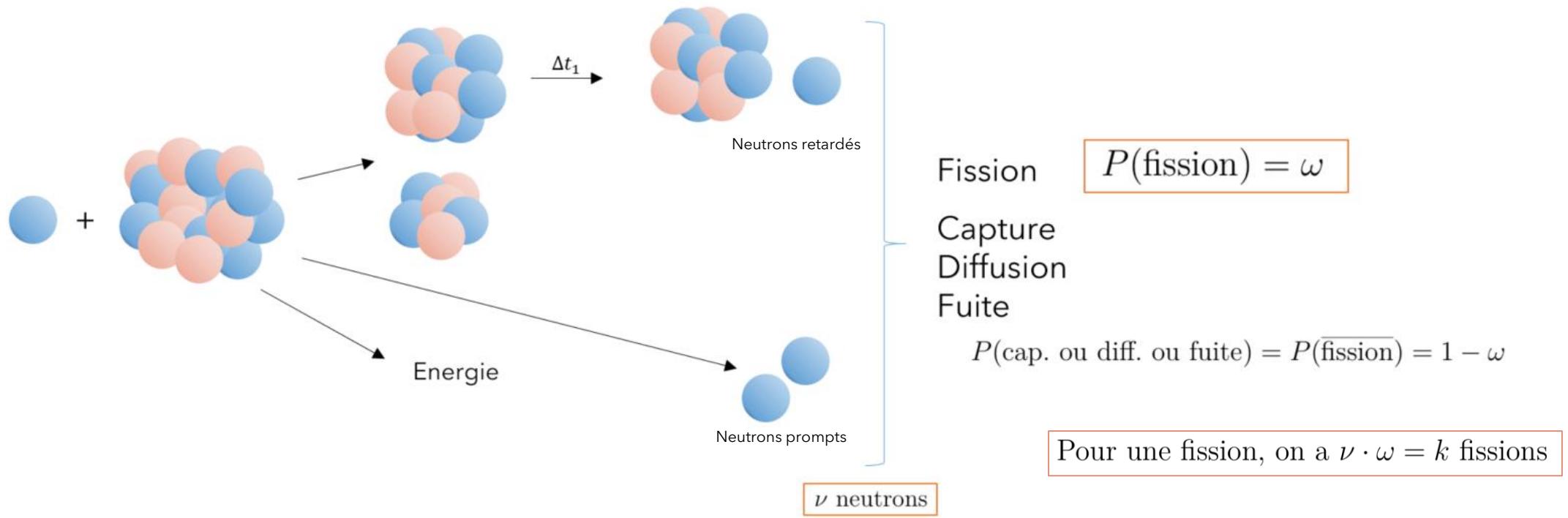
## Les réacteurs à sels fondus :

- Combustible dissous dans un sel **liquide et circulant**
  - Sel combustible joue le rôle de caloporteur
  - Physiques très couplées (thermohydraulique, neutronique, thermochimie)
- + Circuit combustible **non pressurisé, géométrie compacte, reconfiguration** du combustible possible
- Qualification des **matériaux**, manque de **données expérimentales** et **chimie des sels** chlorure mal connue, **démarche de sûreté** à adapter

## ARAMIS-A :

- Fait partie du **projet ISAC** (CNRS, CEA, Orano, Framatome, EDF)
- Finalité du réacteur : produire de l'énergie et **brûler l'américium et le plutonium**, qui font partie des **déchets radiotoxiques à vie longue**
- Quelques caractéristiques d'ARAMIS-A:
  - Spectre neutronique **rapide** ;
  - Moyenne puissance : *300 MW<sub>th</sub>*
  - Brûleur/convertisseur d'actinides : **combustible = Pu + Am**  
→ **très faible contre-réaction Doppler** (cf diapo suivante)

# Fission nucléaire et réactivité



$$1 \text{ fission} \Rightarrow \nu\omega = k \text{ fissions} \Rightarrow k^2 \text{ fissions} \Rightarrow k^3 \text{ fissions} \Rightarrow \dots$$

Si  $k = 1 \rightarrow$  réacteur **critique** : la réaction en chaîne est strictement entretenue (1 fission  $\rightarrow$  1 fission)

**Réactivité**  $\rho$  = écart à la criticité :  $\rho = \frac{k-1}{k}$  ( $= 0$  quand le réacteur est critique)

# Contre-réactions neutroniques

$$P(\text{fission}) = \omega$$

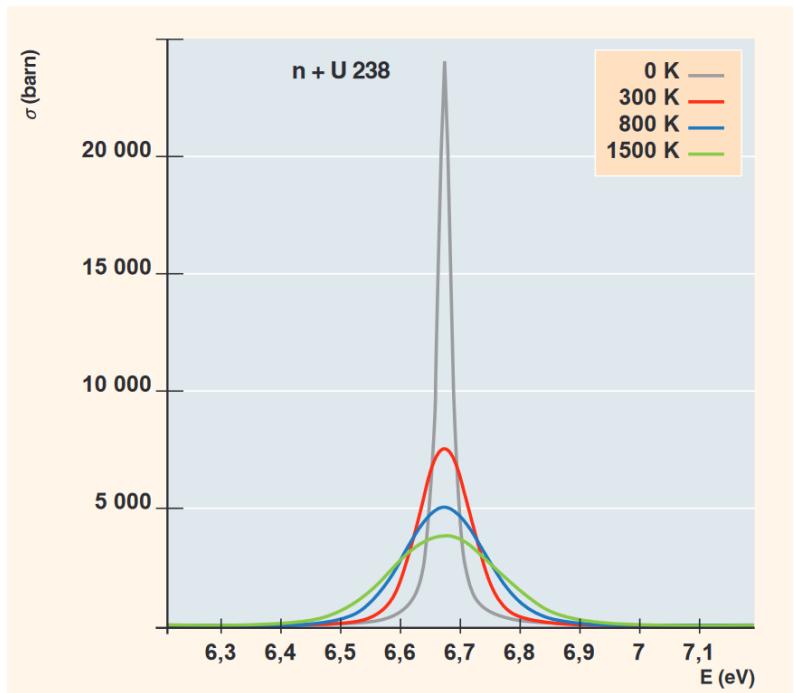
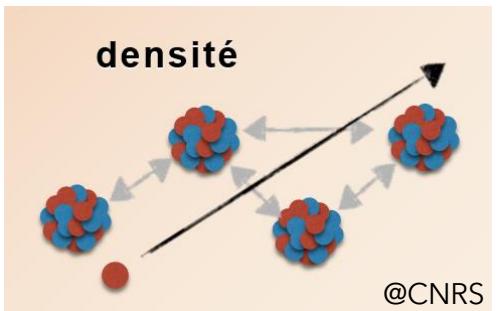
Moyens stabilisateurs de la réaction en chaîne = neutrons retardés + contre-réactions **négatives** (i.e vont avoir tendance à étouffer la réaction en chaîne si celle-ci s'emballe)

Pour un RSF (!= pour les autres réacteurs) :

- Effet **Doppler** : quasi instantané, dépend de la température du combustible

Augmentation de la température → augmentation des probabilités d'interaction neutrons-noyau → augmentation du ratio capture/fission.

- Effet **densité** : si le sel combustible se dilate, la probabilité de fuite augmente

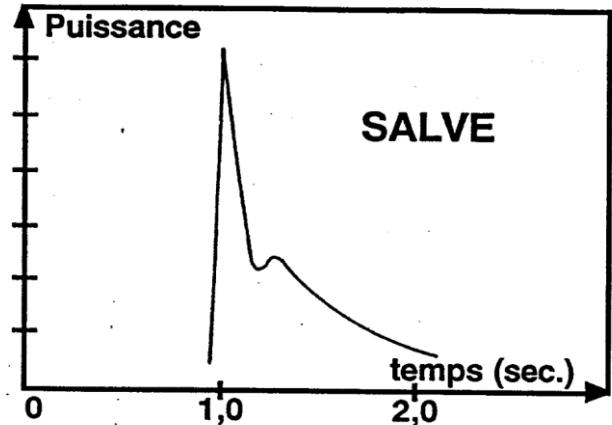


Section efficace totale de l'uranium 238 à différentes températures en fonction de l'E incidente du neutron  
@Monographies du CEA - La neutronique

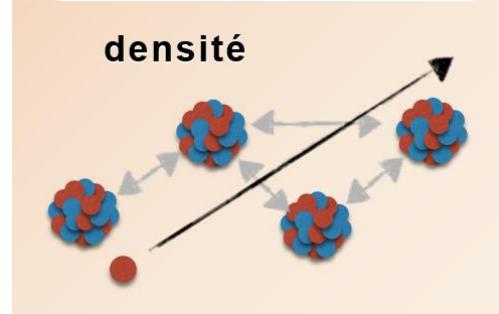
# Quelques notions de thermohydraulique

Forte insertion de réactivité → augmentation très rapide de la puissance

- Contre-réaction Doppler quasi instantanée
- Dilatation du sel agit avec un certain retard après le dépôt d'énergie dans le combustible, car elle nécessite la **propagation de l'onde de pression à travers le cœur du réacteur.**
- La vitesse de propagation de l'onde de pression est liée à la **vitesse du son.**
  - De l'ordre de 1000m/s → suffisamment élevée la plupart du temps pour considérer que c'est « instantané »
  - mais cas rapide : microseconde pour le pic de puissance (temps neutronique) tandis que pour la propagation de l'onde de pression c'est ordre de la milliseconde → **retard de la contre-réaction densité**



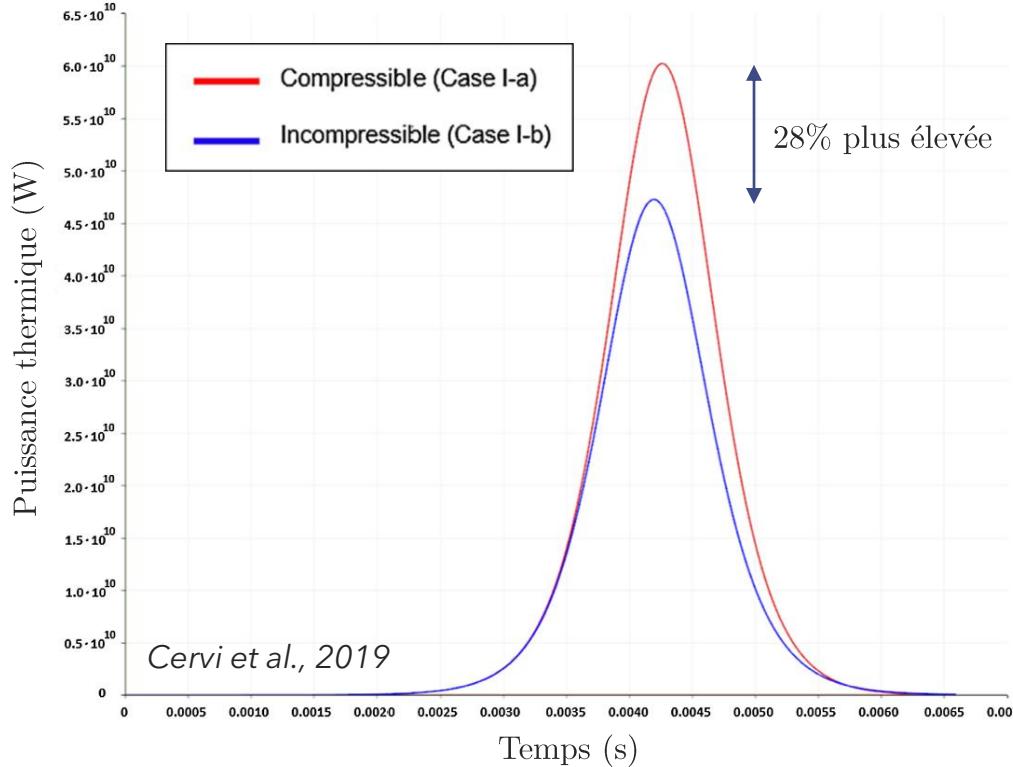
$$P(\text{fission}) = \omega$$



→ **Incompressible** (mais dilatable)

- **Incompressible** (mais dilatable) → volume constant ∀ **pression** exercée sur le système → l'onde de pression se propage à vitesse **infinie**
- **Compressible** → l'onde de pression se propage à vitesse **finie**

# Phénoménologie d'un accident de rapide et forte insertion de réactivité



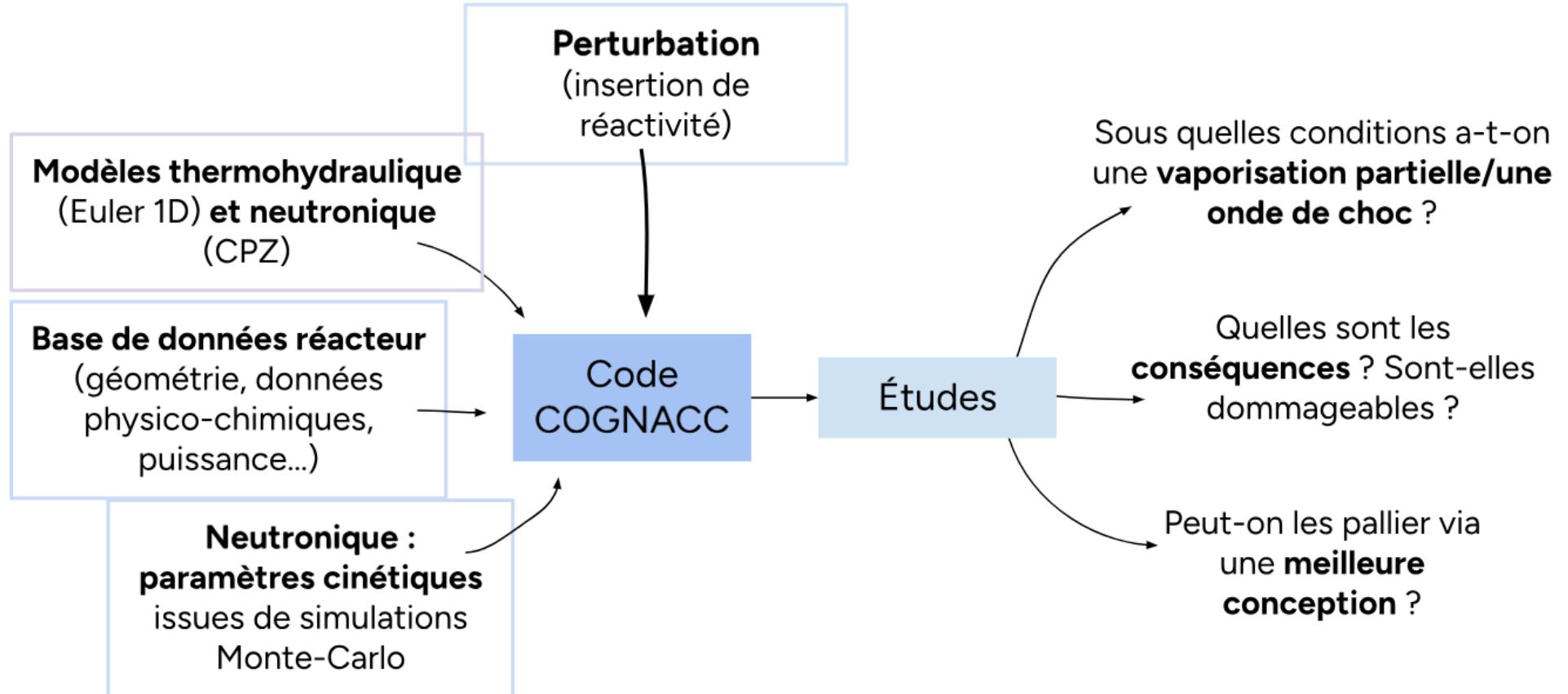
- Pas de **capture des ondes de pression** avec l'hypothèse d'incompressibilité
- Contre-réaction densité **retardée → pic de puissance** plus élevé dans la littérature avec la prise en compte de la compressibilité du fluide
- **Évacuation des produits de fission par système de bullage, vaporisation possible** de certains composés lors d'un fort dépôt d'énergie ou d'une dépressurisation
  - **Cinétique pilotée par la vitesse du son**, qui décroît fortement avec la présence d'une phase vapeur → **facteur aggravant**



**Modélisation d'un fluide compressible diphasique**

# Le code COGNACC : objectifs

(Code Optimisé pour la gestioN des Accidents Compressibles et diphasiC)



Objectif : développer un **code système couplé neutronique-thermohydraulique** permettant de réaliser de nombreux calculs **rapides** et de mieux **comprendre la physique** du réacteur lors de transitoires violents

# Résumé des modèles thermohydraulique-neutronique

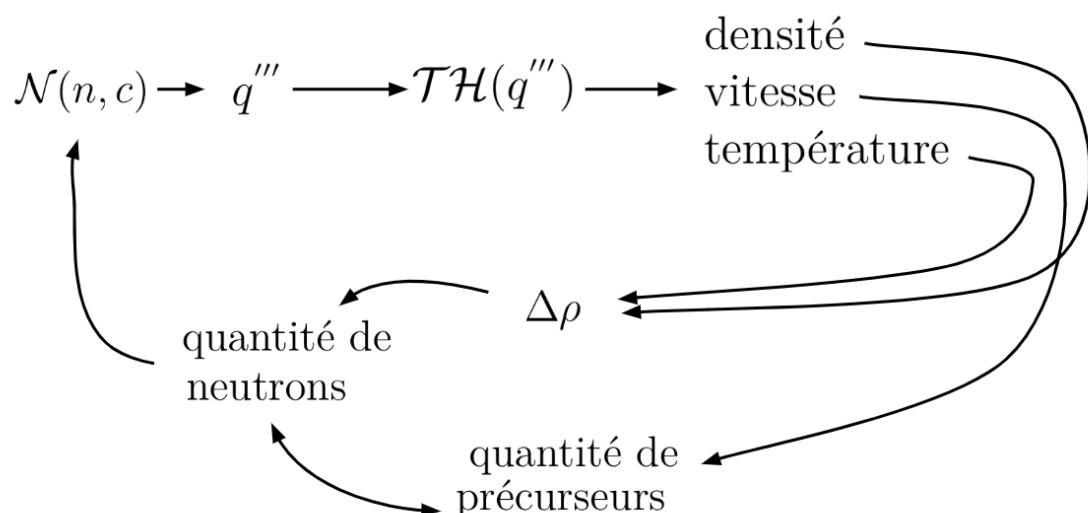
Code  
COGNACC

## Thermohydraulique :

- Equations d'Euler compressible 1D
  - Modélisation multi-1D
- Monophasique, puis diphasique [en cours]

## Neutronique :

- Cinétique point par zone (CPZ) :
  - Suivi des précurseurs de neutrons retardés
  - Modélisation de la forme spatiale des contre-réactions et prise en compte du déplacement des précurseurs





# Modèle neutronique : cinétique point par zone

pop. neutronique

$$\frac{dn(t)}{dt} = \underbrace{\frac{\rho(t) - \beta_{eff}^{stat}}{\Lambda_{eff}} n(t)}_{\text{terme fission}} + \underbrace{\sum_k \int \omega(\mathbf{r}) \lambda_k c_k(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}}_{\text{terme retardé}}$$

précurseurs

$$\frac{\partial c_k(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot (c_k(\mathbf{r}, t) \mathbf{v})}_{\text{convection}} = \underbrace{\frac{\beta_{k,eff}^{stat}}{\Lambda_{eff}} n(t) \hat{\phi}(\mathbf{r})}_{\text{terme source}} - \underbrace{\lambda_k c_k(\mathbf{r}, t)}_{\text{terme puit}}$$

réactivité

$$\Delta\rho = \underbrace{\alpha_{Doppler}(\mathbf{r}) \Delta T}_{\text{CR Doppler}} + \underbrace{\alpha_{densite}(\mathbf{r}) \Delta d}_{\text{CR densité}} + \underbrace{\rho_{inseree}(t)}_{\text{réactivité insérée}}$$

$q'''$

Trois effets impactant la neutronique sont à prendre en compte :

- Les effets de **spectre énergétique** :

- Un neutron n'aura pas la même probabilité de causer une fission en fonction de son énergie

- Les effets de **déplacement** du combustible :

- Le cœur perd en réactivité à cause de la perte de précurseurs de neutrons retardés du à leur décroissance hors du cœur

- Les effets **spatiaux** : forme du flux et composante spatiale des contre-réactions

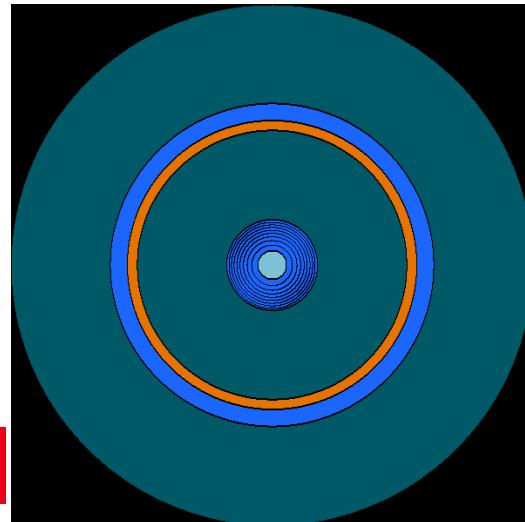
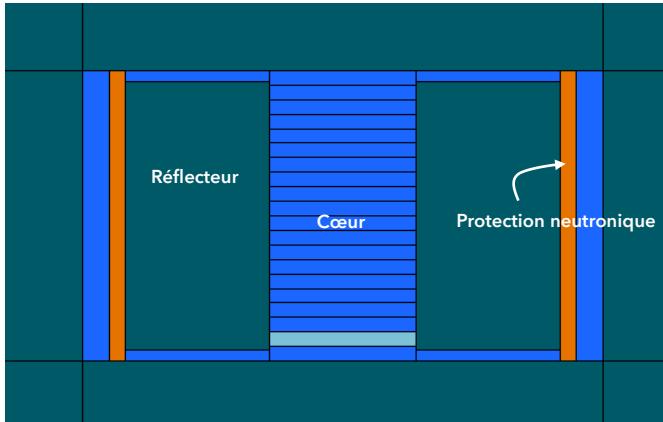
- Données calculées avec le code de transport Monte Carlo SERPENT2

# Exemple de calculs avec SERPENT2 (code de transport stochastique)

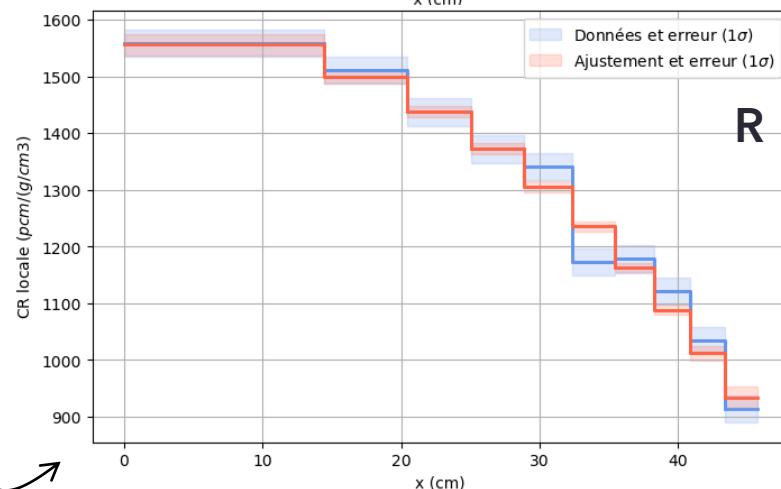
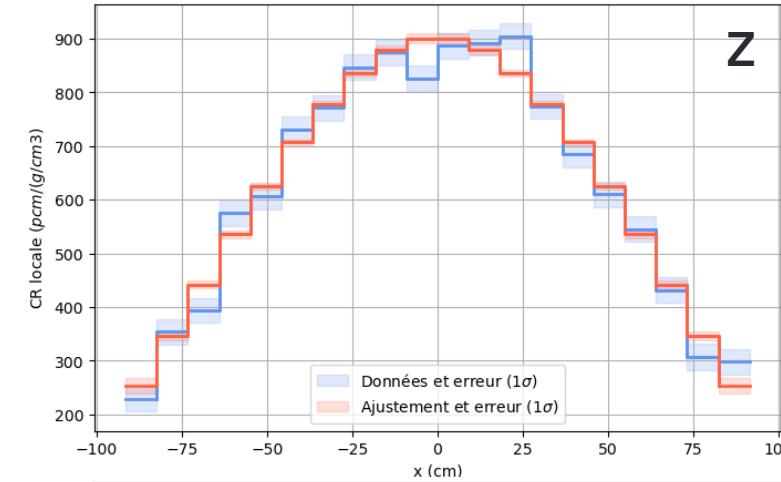
## Calcul de la contre-réaction locale

But : déterminer les valeurs de contre-réaction  $\alpha_{densité}(r)$  quelque soit le maillage dans le code COGNACC

1. Calcul de la réponse d'une perturbation en densité maille par maille



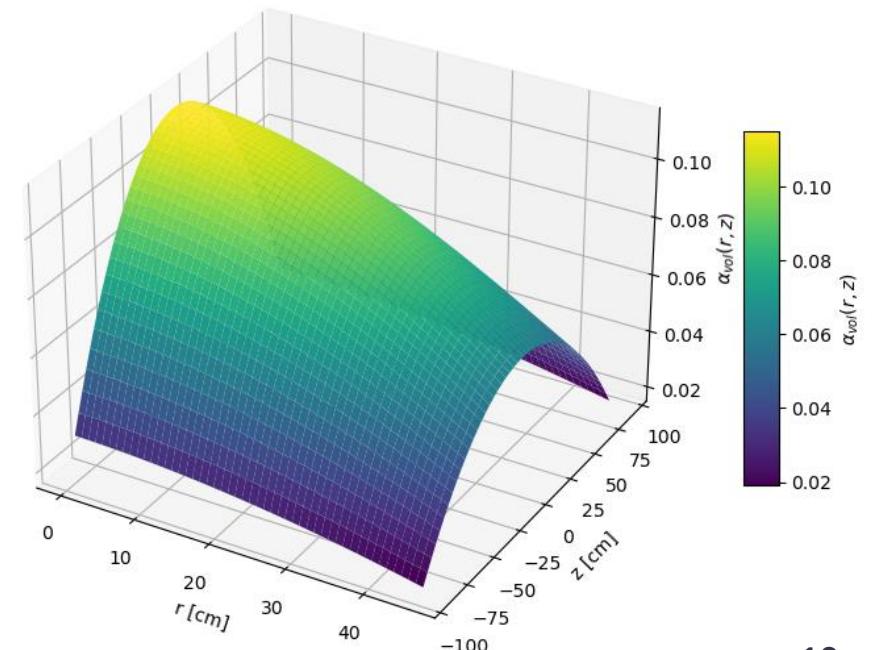
2. Calculs des valeurs de contre-réactions locales (en bleu)



3. Ajustement (en rouge)

$$\alpha_{bin}(r, \theta, z) = \int j(r) k(z) dV_{bin}$$

$$\alpha_{bin} = (J(r_2) - J(r_1)) (K(z_2) - K(z_1)) (\theta_2 - \theta_1)$$





# Modèle thermohydraulique

Équations résolues : **Euler 1D** : bilan de **masse**, de **quantité de mouvement**, et **d'énergie**

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \rho \\ \rho v \\ \rho E \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} \rho v \\ \rho v^2 + P \\ (\rho E + P)v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ q''' \end{pmatrix}$$

Terme de puissance  
issu du modèle  
neutronique

- Equations hyperboliques adaptées à la propagation d'onde (propriétés ondulatoires des solutions)
- Solveur hyperbolique permet la capture des ondes de choc à la différence d'un solveur Navier-Stokes compressible
- Hypothèse fluide parfait (pas de viscosité ni de conduction)
- Transitoires étudiés suffisamment courts (ordre de la ms) : diffusion et viscosité négligeables



# Modèle thermohydraulique

Physiquement :  
on veut capter des **ondes de chocs et de pression**  
→ Équations d'Euler



Mathématiquement :  
Problème de Riemann =  
problème avec conditions  
initiales **discontinues et constantes par morceaux**



Numériquement :  
Solveur de Riemann type HLL

$$U_i^{n+1} = U_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (\hat{F}_{i+1/2}^n - \hat{F}_{i-1/2}^n)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U)$$

Variables conservées

Vecteur flux

Vecteur des termes sources

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U) \\ U(x, 0) = U_0(x) = \begin{cases} U_L & \text{si } x < 0 \\ U_R & \text{si } x > 0 \end{cases} \end{array} \right.$$

- Méthode pour calculer le terme de flux après discréétisation
- Dépend notamment de la vitesse du son et donc de l'équation d'état
- Développement modulaire de sorte à pouvoir facilement implémenter de nouveaux modèles

# Cas test : créneau de température, sortie « libre »

But : explorer la physique et voir l'impact des ondes de pression sur la densité

Simulation d'un dépôt **rapide** de puissance locale menant à  $\Delta T = 1K$

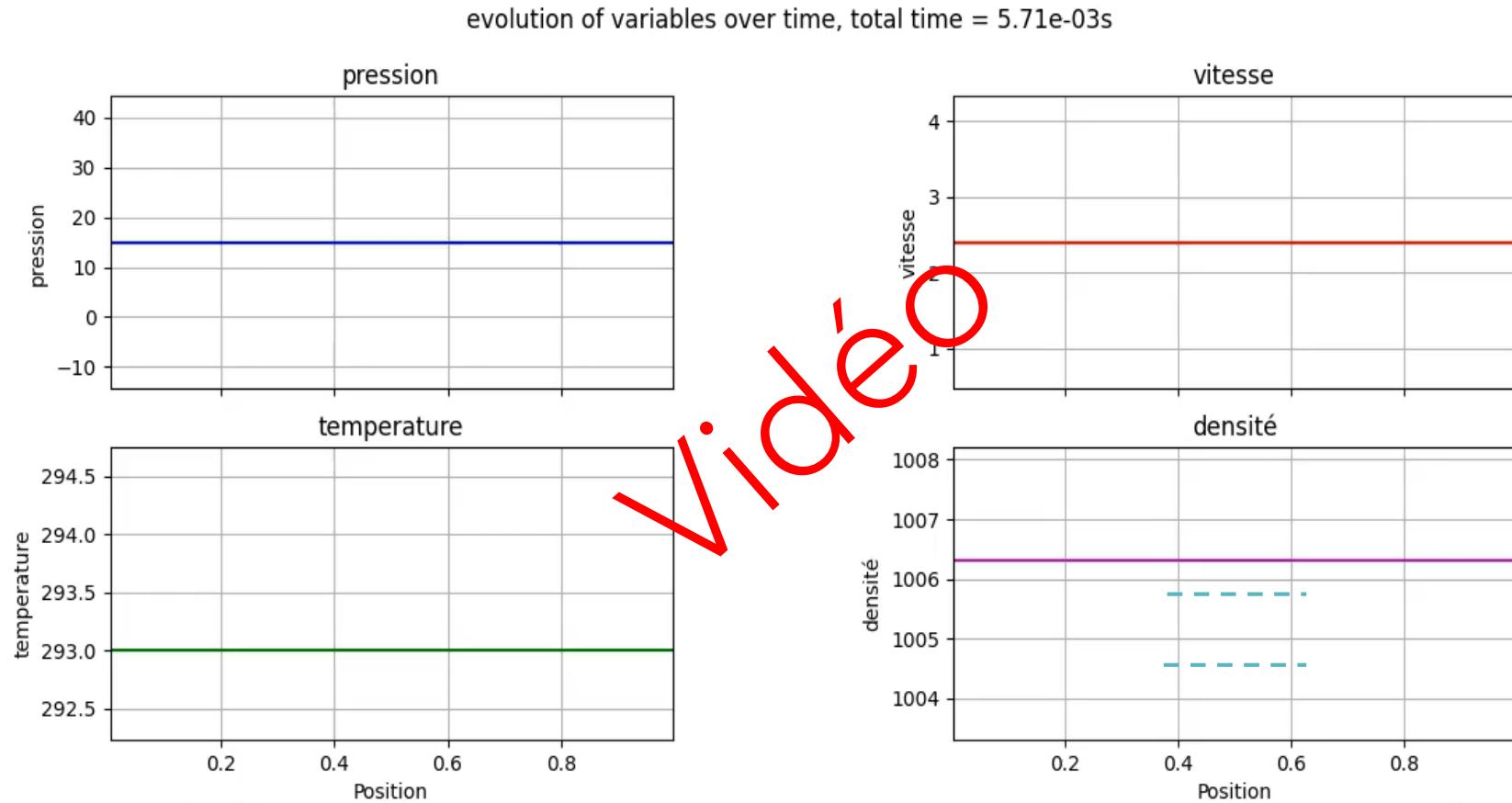
- Méthode numérique validée par des cas tests
- **Pas** de couplage avec la neutronique ici
- Equation d'état de l'eau liquide → au premier ordre le comportement général ne devrait pas différer
- Vitesse et température fixées en entrée



- Création d'une onde de pression à cause du créneau de température
- Propagation des ondes bien captées par le solveur
- Ondes sortent du domaine → état stabilisé rapidement atteint

# Cas test : créneau de température, sortie « fixée »

- Même cas test que précédemment mais vitesse et température fixées en entrée, pression fixée en sortie



- Conditions aux limites a priori bien gérées
- Réflexions d'onde de pression et de raréfaction aux bords du domaines → oscillations de la densité → conséquences sur la neutronique (compaction et dilatation successives)

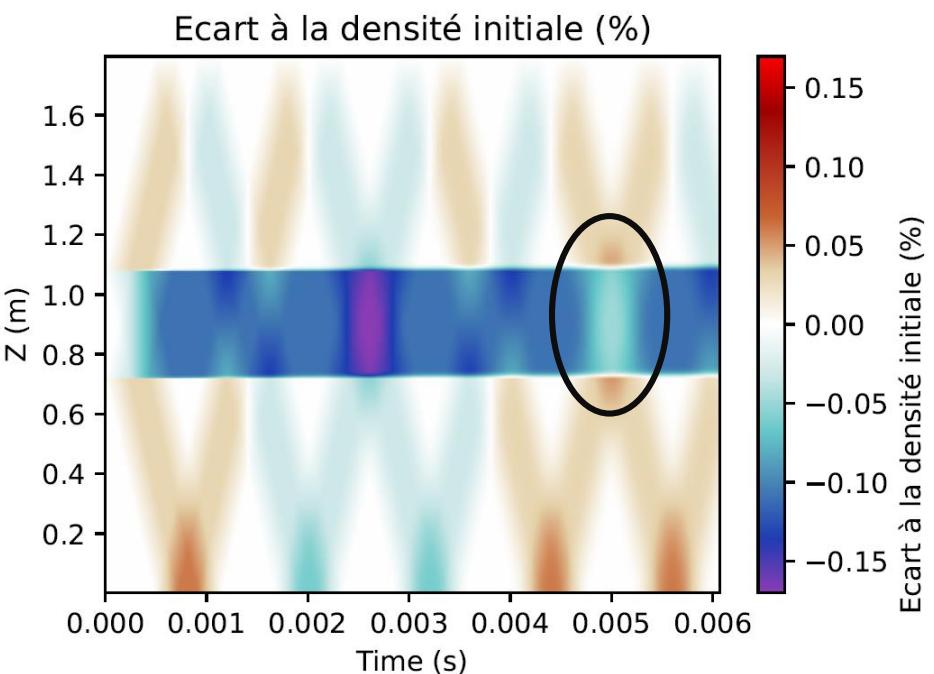
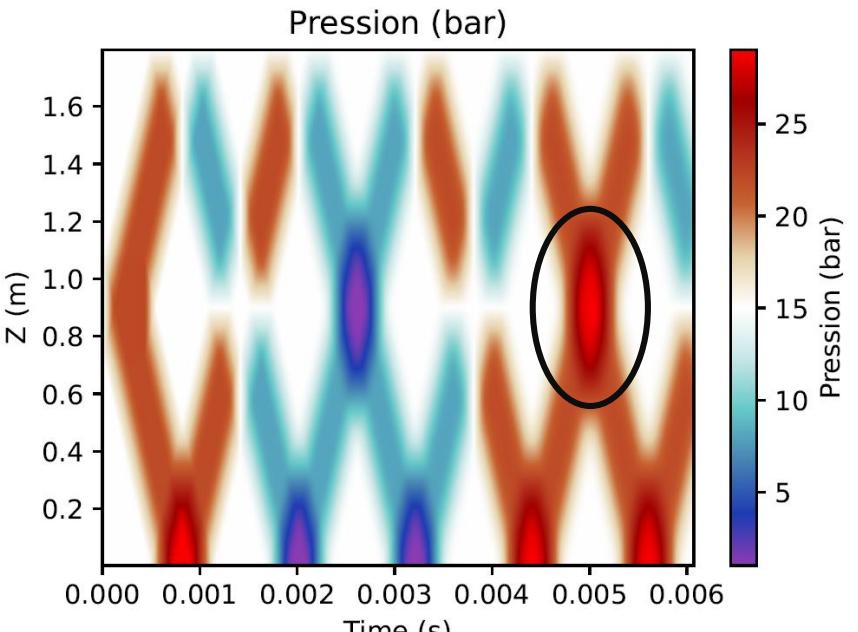
→ Comparaison avec cas incompressible et avec un calcul couplé

# Cas test - perspectives

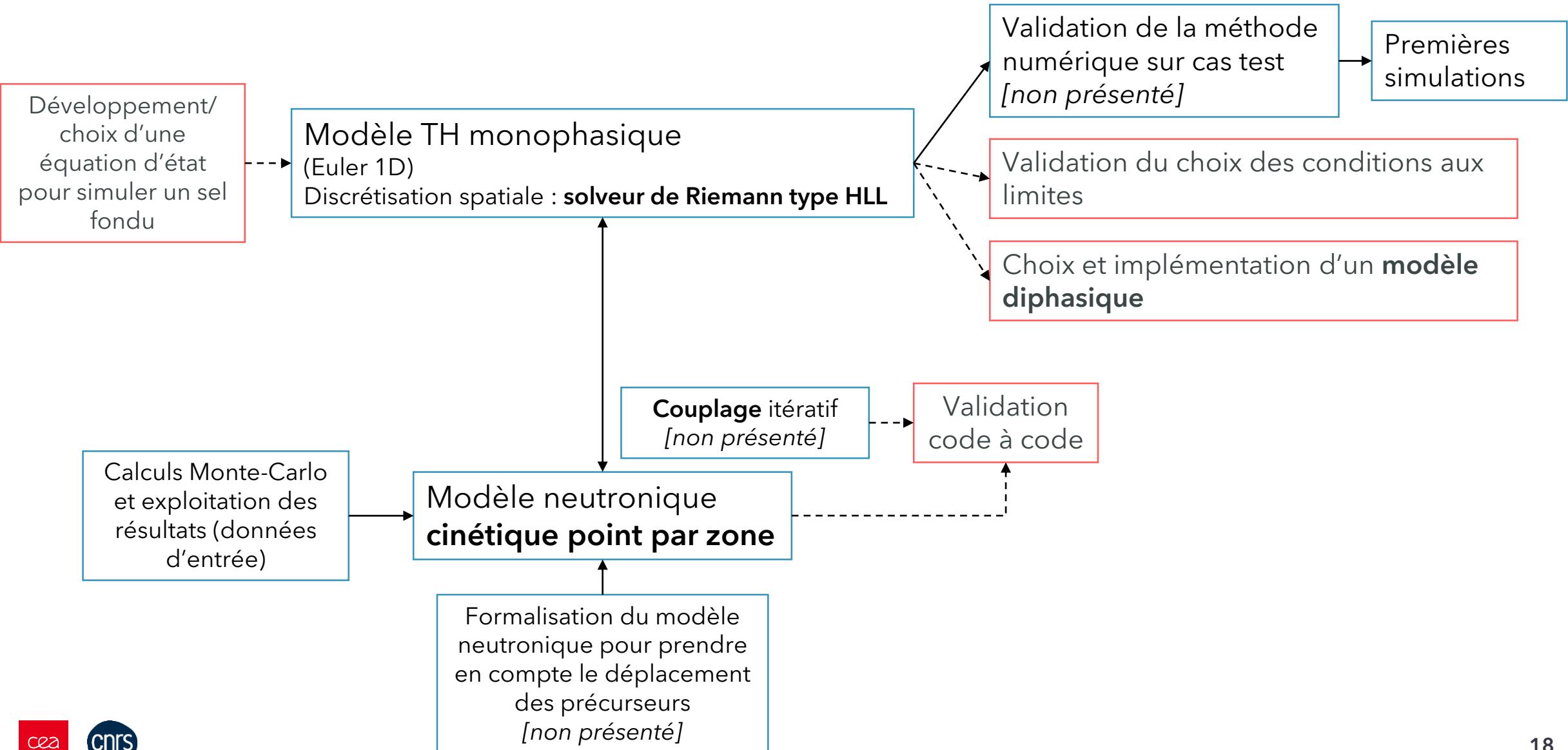
Quel impact de la compressibilité sur la densité, à l'origine de la contre-réaction ?

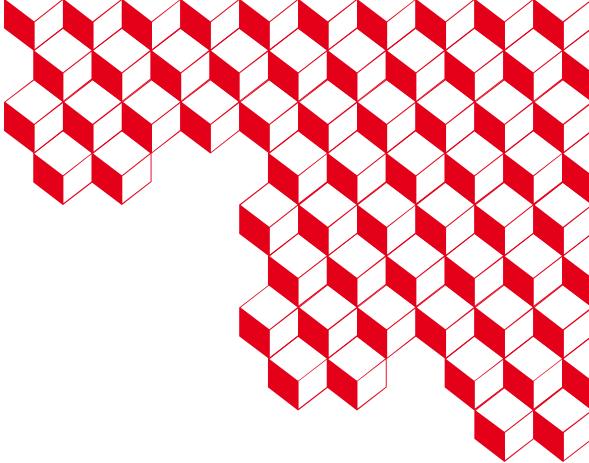
Perspectives :

- Importance de la **vitesse du son** [en cours] : impact d'une phase vapeur sur le transitoire ? → modèle diphasique à implémenter dans le code
- Impact des **frottements** ? [à faire]  
Dissipation plus rapide de l'onde de pression → retour à l'équilibre plus rapide
- Impact de la **température et la pression max** atteinte sur la tenue de la cuve ? **Souape sur le vase d'expansion** pour atténuer la montée en pression ? **Déformation de la cuve** ?



# Bilan et perspectives





**Merci !**