

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

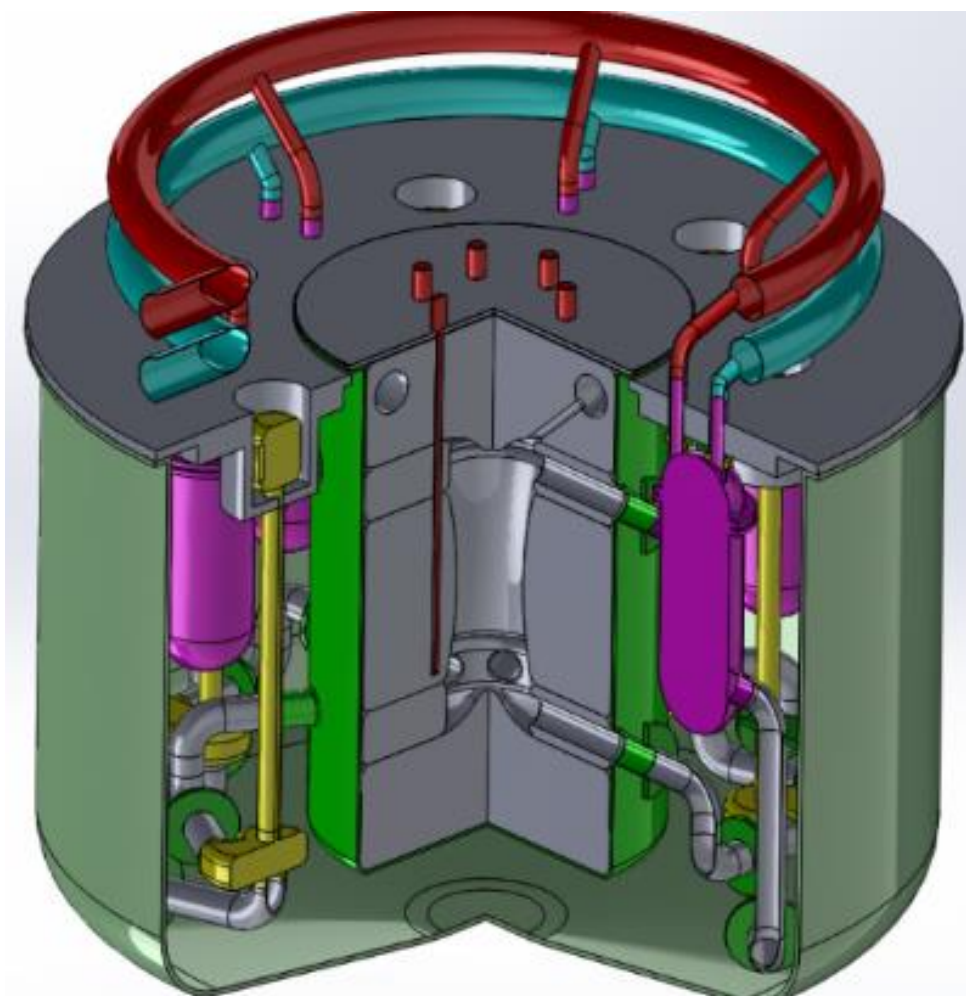
Anna Maître (2^{ème} année)

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

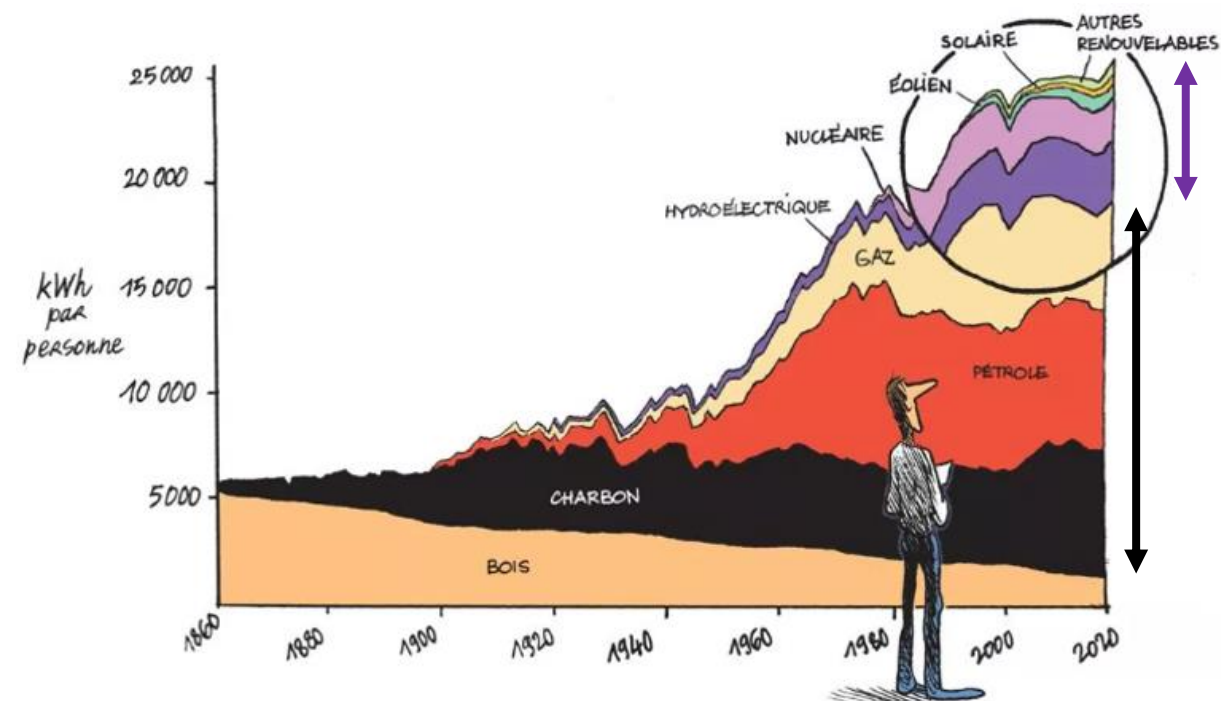
3. Modèles et simulations

Modèle neutronique

Modèle thermohydraulique

Premiers résultats

Contexte



Le monde sans fin (2021) @Blain, Jancovici

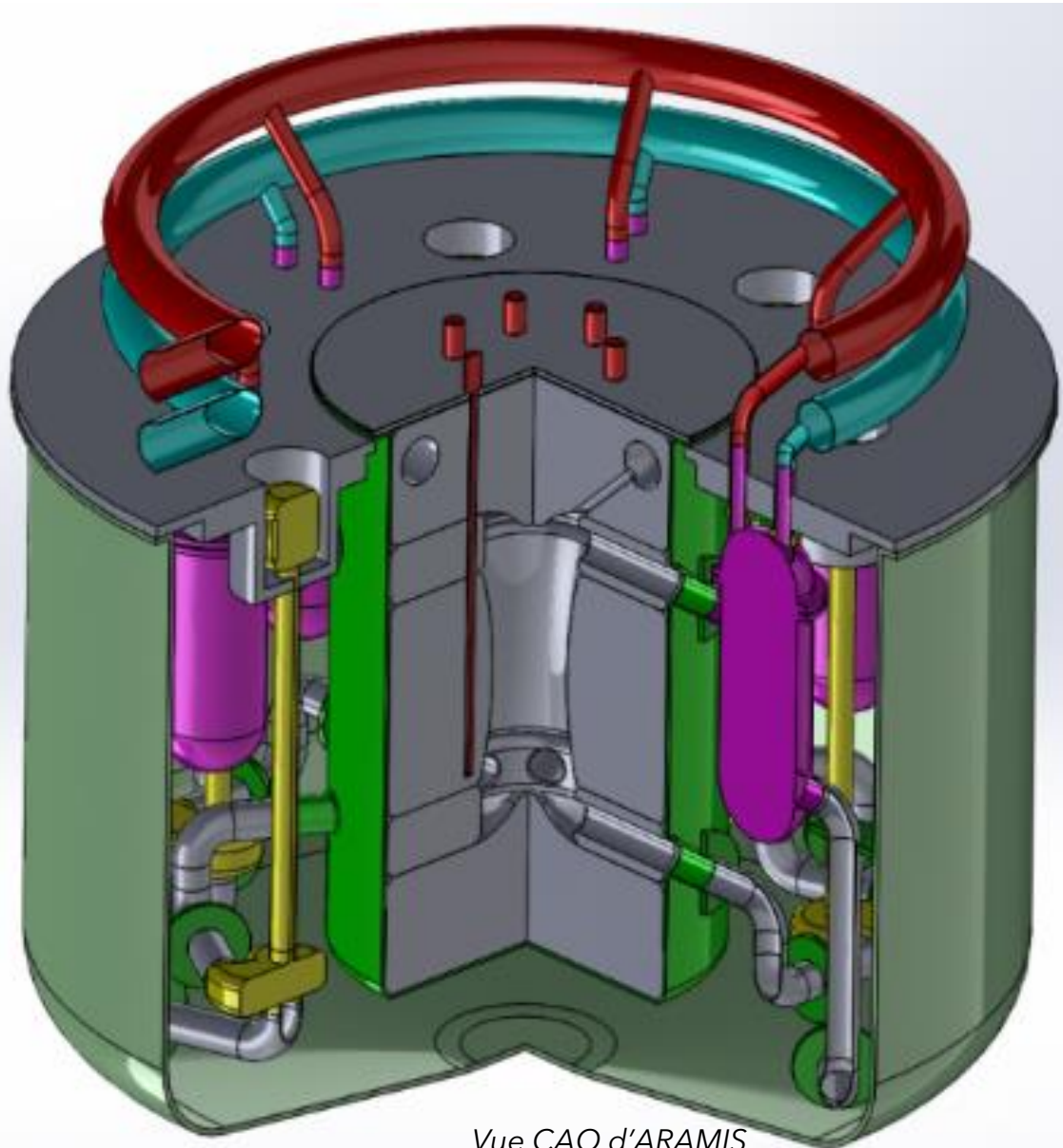
Le nucléaire est une source d'énergie décarbonée avec des avantages intéressants :

- 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



Vue CAO d'ARAMIS
@CEA

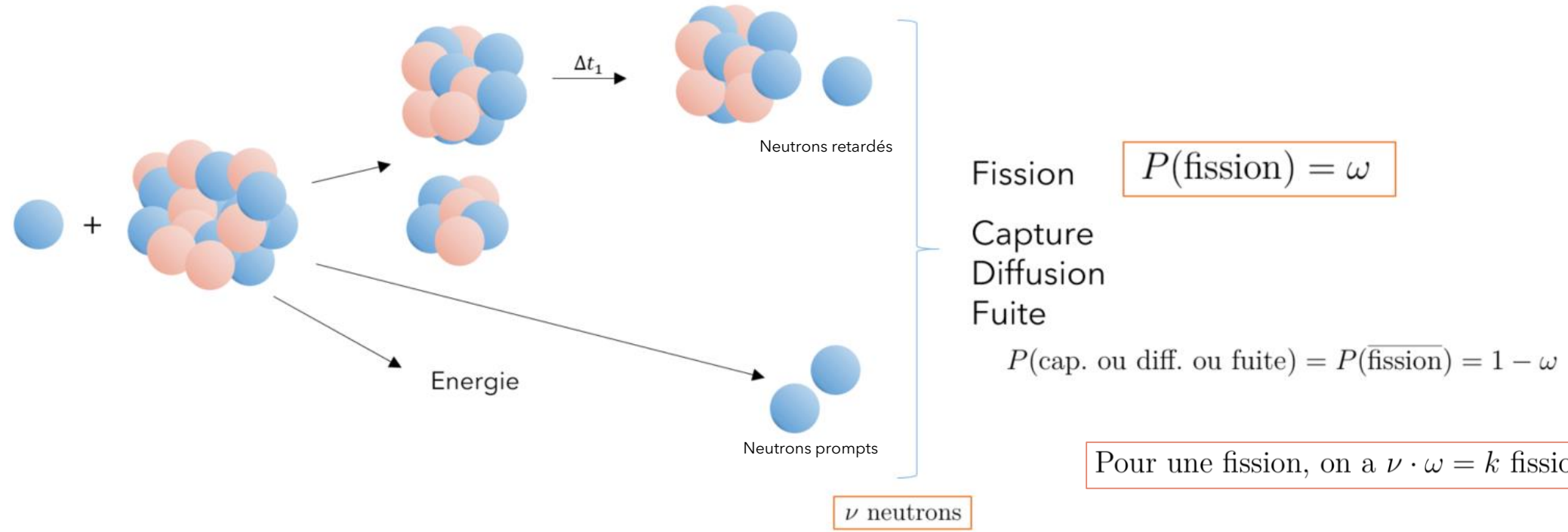
Les réacteurs à sels fondus :

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

Contre-réactions neutroniques

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

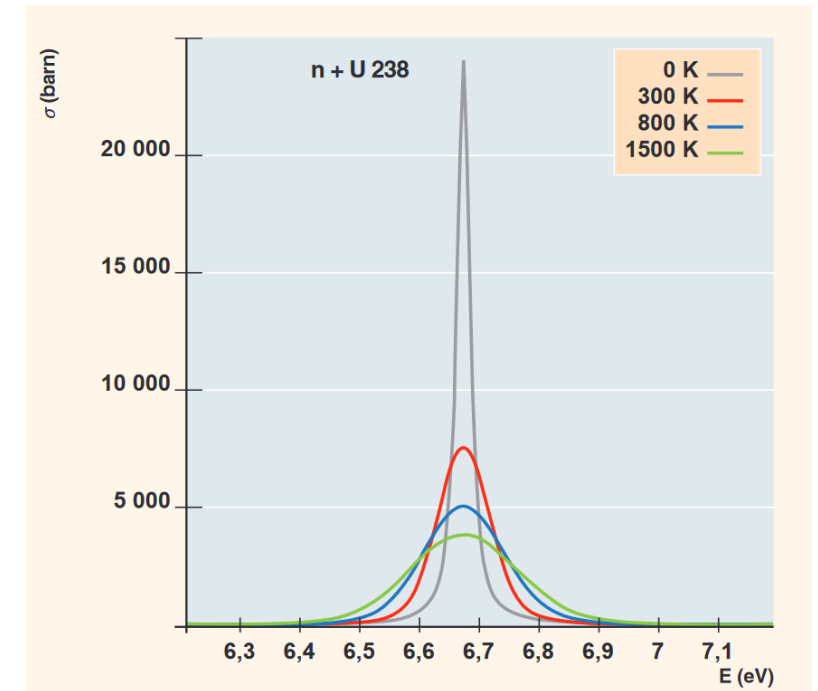
Moyens stabilisateurs de la réaction en chaîne = neutrons retardés + contre-réactions **négatives** (i.e vont avoir tendance à étouffer la réaction en chaîne si celle-ci s'emballe)

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

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

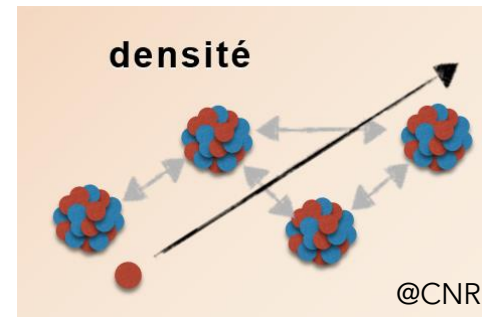
Augmentation de la température → augmentation des probabilités d'interaction neutrons-noyau → augmentation du ratio capture/fission.

- 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

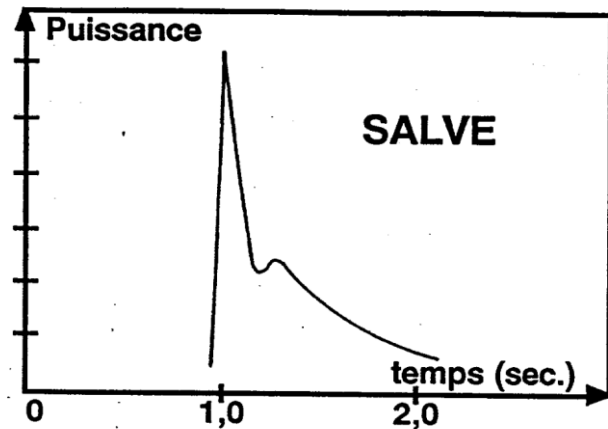
@Monographies du CEA - La neutronique



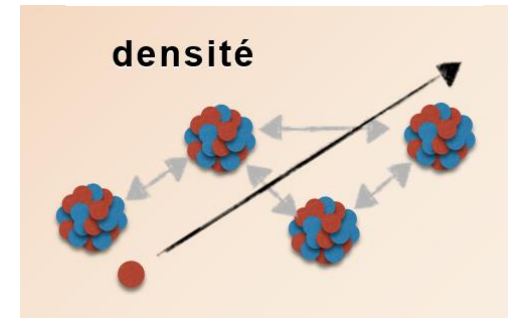
Quelques notions de thermohydraulique

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**



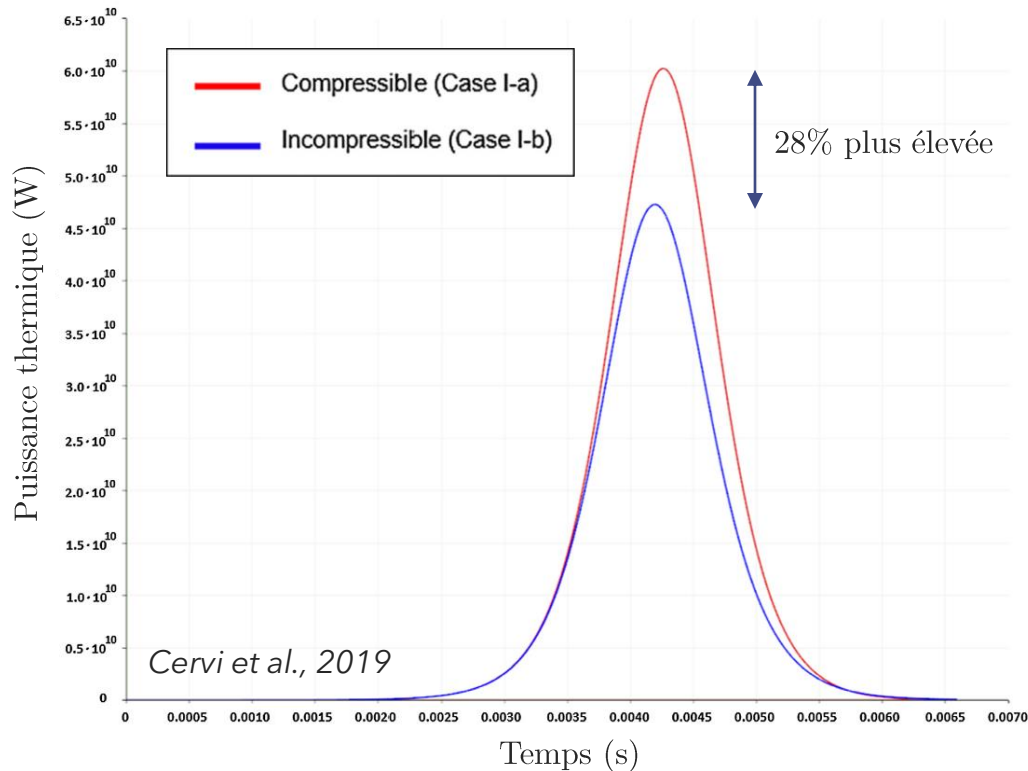
$$P(\text{fission}) = \omega$$



→ **Incompressible** (mais dilatable)

- **Incompressible** (mais dilatable) → volume constant \forall **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



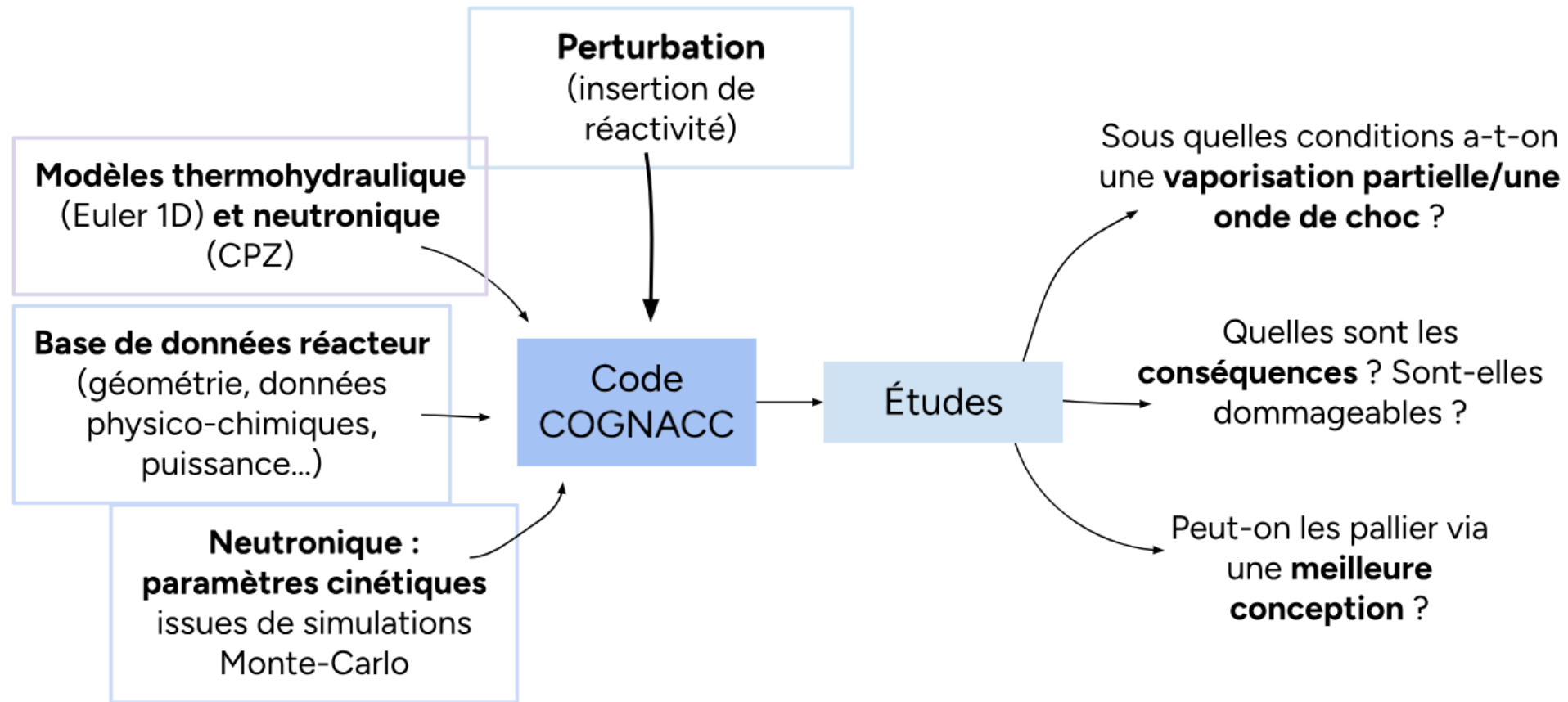
- Pas de **capture des ondes de pression** avec l'hypothèse d'incompressibilité
- Contre-réaction densité **retardée** → **pic de puissance** plus élevé dans la littérature avec la prise en compte de la compressibilité du fluide
- **Évacuation des produits de fission par système de bullage, vaporisation 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

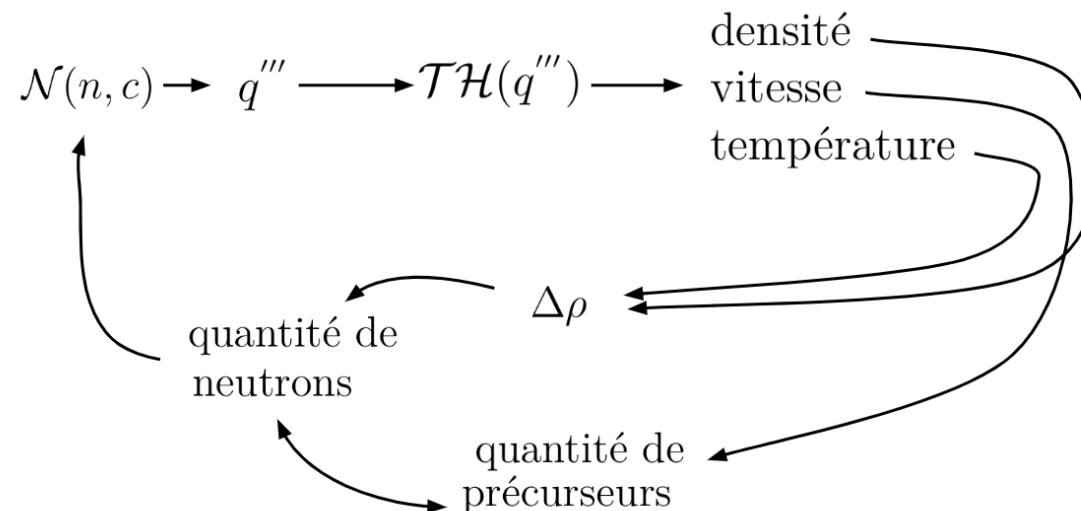
Code
COGNACC

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

$$\begin{array}{lcl}
 \text{pop. neutronique} & \frac{dn(t)}{dt} = \underbrace{\frac{\rho(t) - \beta_{eff}^{stat}}{\Lambda_{eff}} n(t)}_{\text{terme fission}} + \underbrace{\sum_k \int \omega(\mathbf{r}) \lambda_k c_k(\mathbf{r}, t) d\mathbf{r}}_{\text{terme retardé}} & \\
 \text{précurseurs} & \frac{\partial c_k(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \underbrace{\nabla \cdot (c_k(\mathbf{r}, t) \mathbf{v})}_{\text{convection}} = \underbrace{\frac{\beta_{k,eff}^{stat}}{\Lambda_{eff}} n(t) \hat{\phi}(\mathbf{r})}_{\text{terme source}} - \underbrace{\lambda_k c_k(\mathbf{r}, t)}_{\text{terme puit}} & \\
 \text{réactivité} & \Delta \rho = \underbrace{\alpha_{Doppler}(\mathbf{r}) \Delta T}_{\text{CR Doppler}} + \underbrace{\alpha_{densite}(\mathbf{r}) \Delta d}_{\text{CR densité}} + \underbrace{\rho_{inseree}(t)}_{\text{réactivité insérée}} &
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \\ \\ \end{array}} \right\} q'''$$

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)

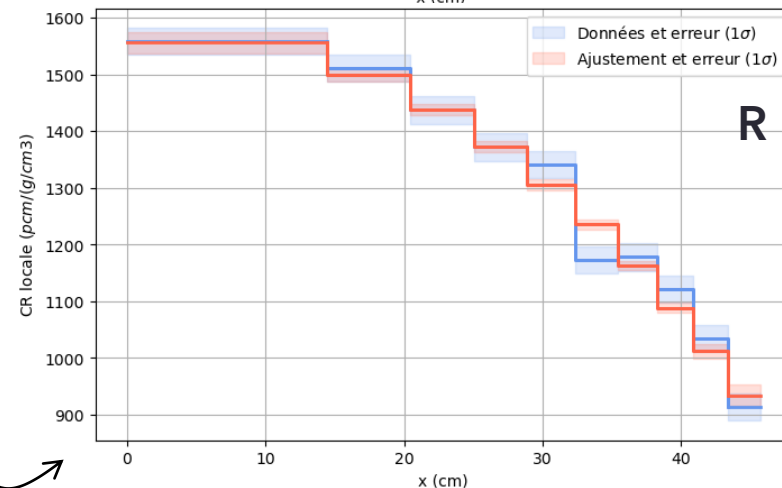
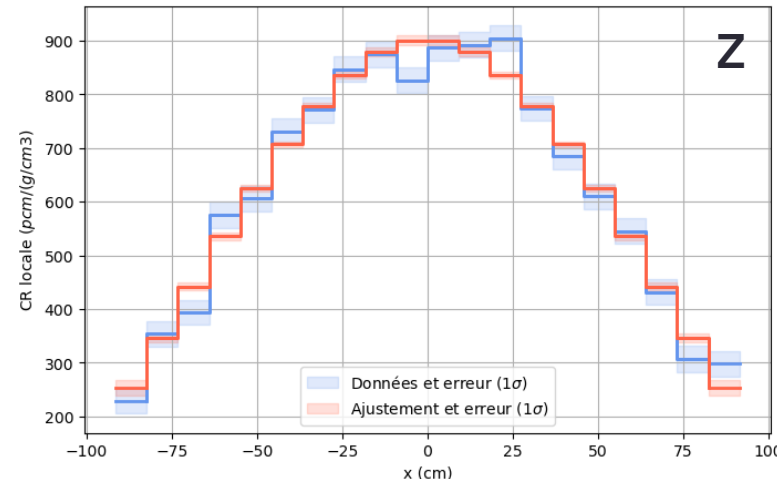
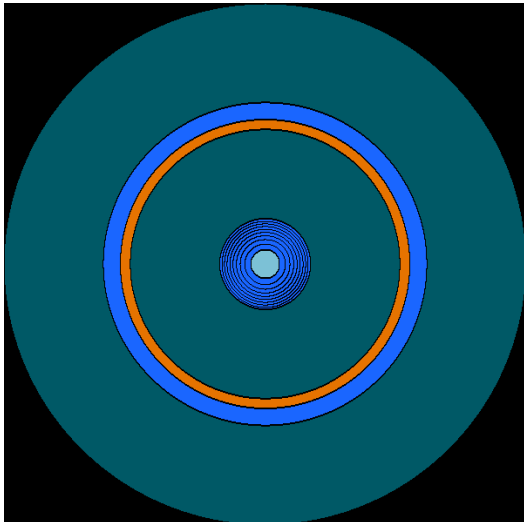
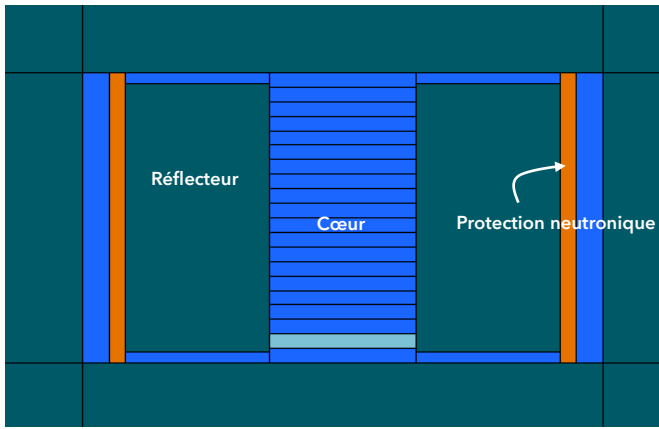
Calcul de la contre-réaction locale

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

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

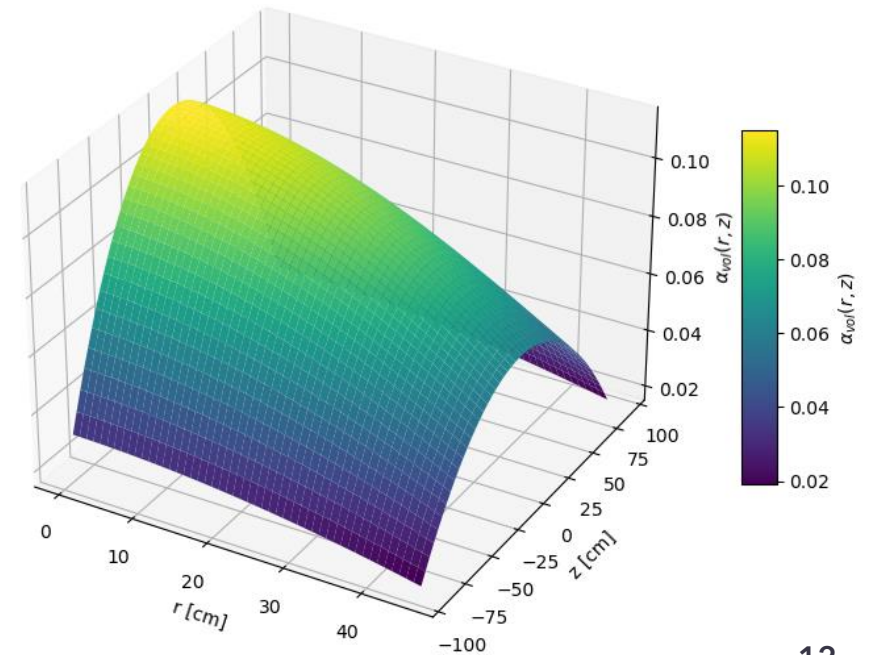
2. Calculs des valeurs de contre-réactions locales (en bleu)

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 discrétisation
- 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

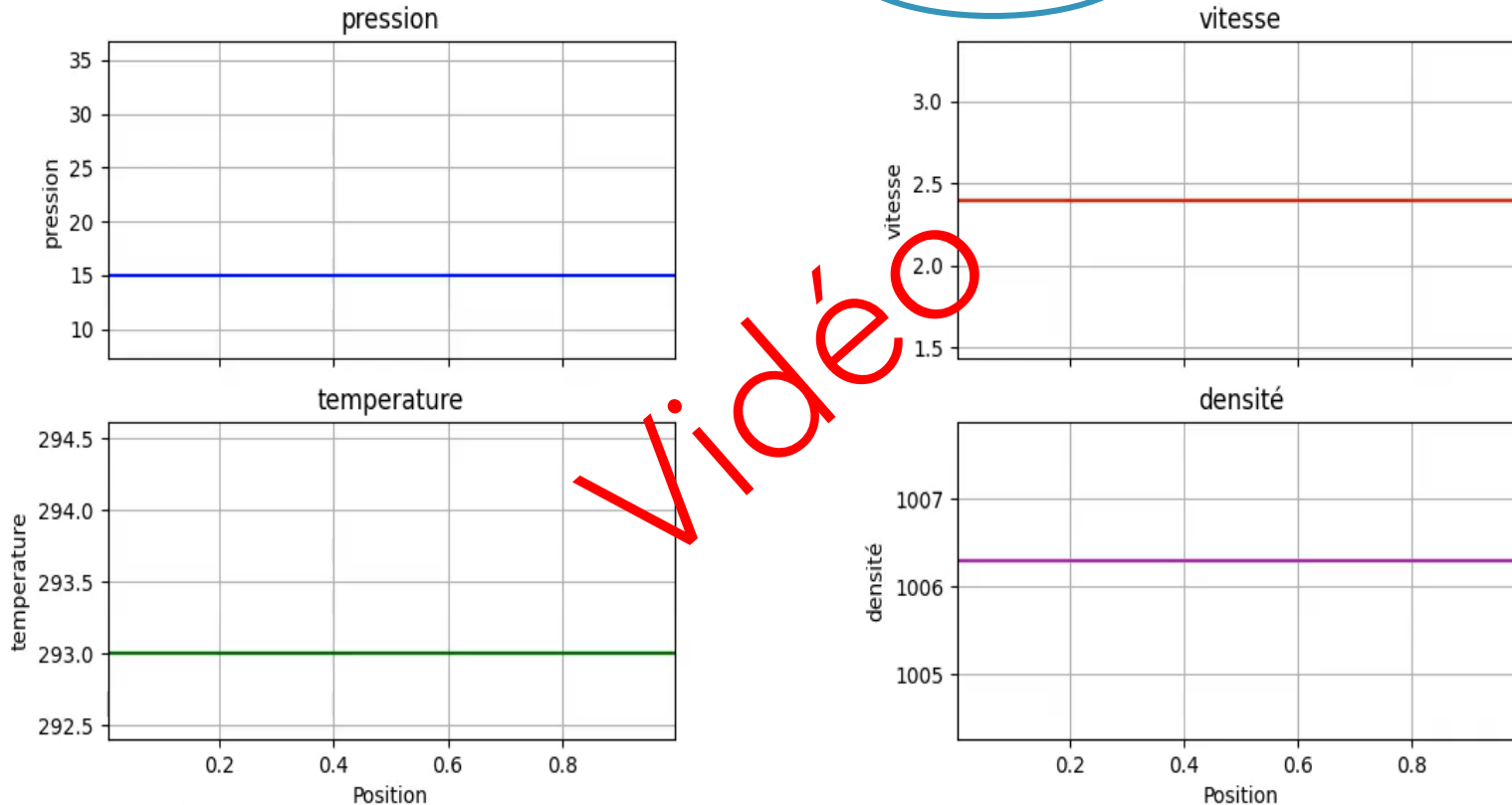
Cas test : créneau de température, sortie « libre »

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

evolution of variables over time, total time = 2.86e-03s

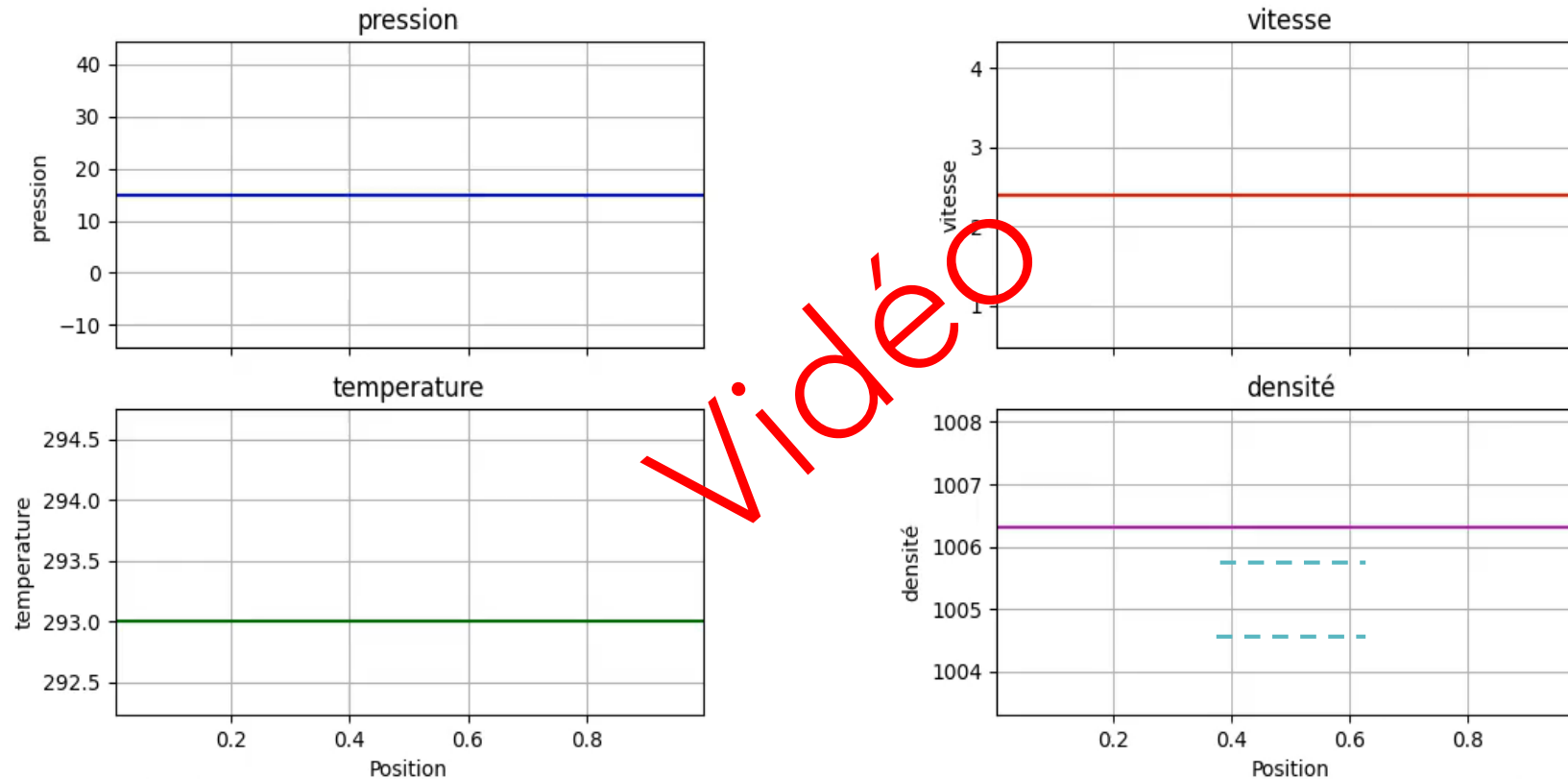


- Création d'une onde de pression à cause du créneau de température
- Propagation des ondes bien captées par le solveur
- Ondes sortent du domaine → état stabilisé rapidement atteint

Cas test : créneau de température, sortie « fixée »

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

evolution of variables over time, total time = 5.71e-03s



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

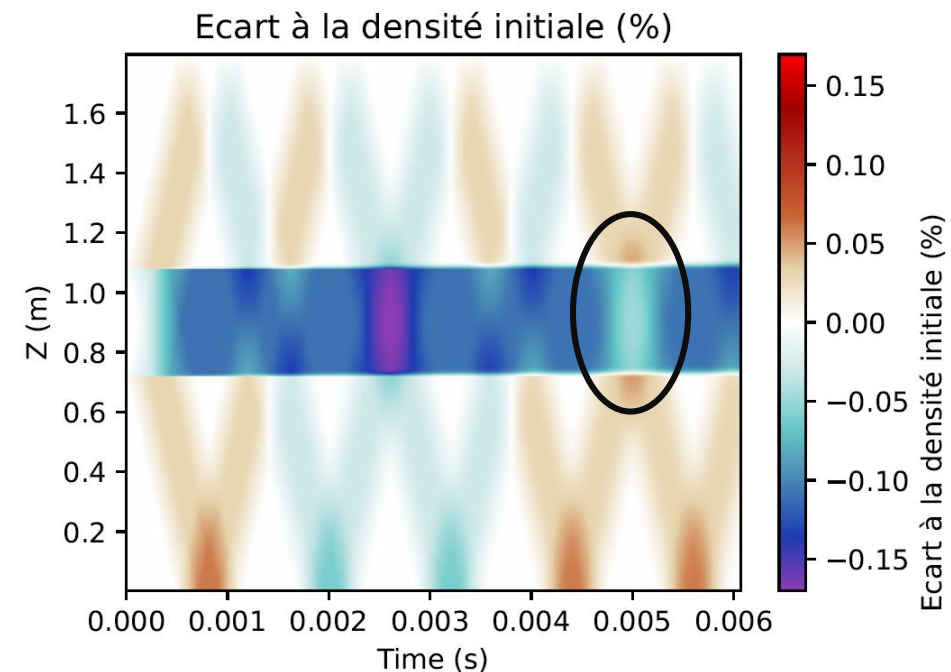
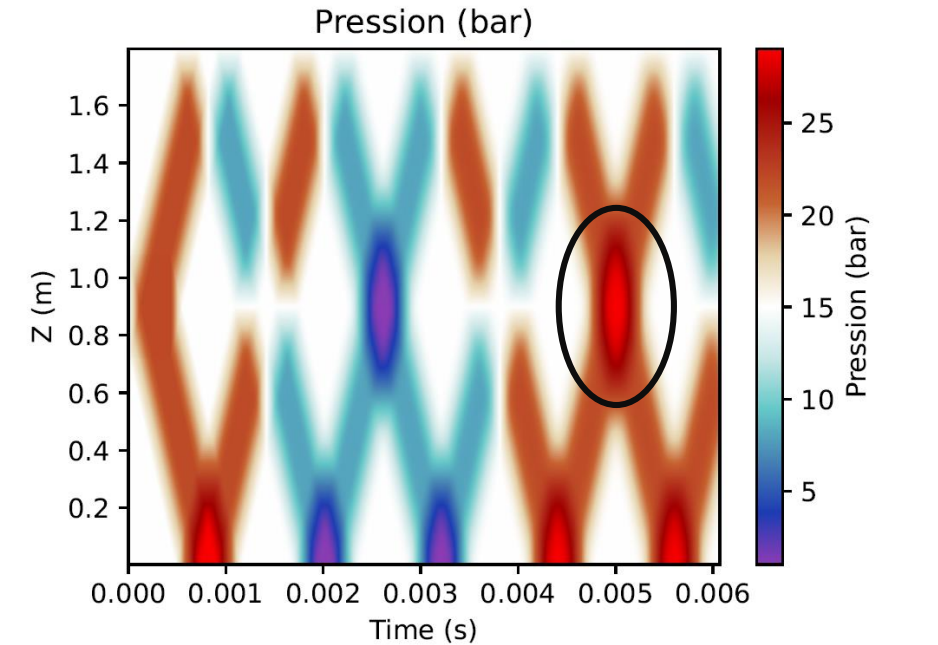
→ Comparaison avec cas incompressible et avec un calcul couplé

Cas test - perspectives

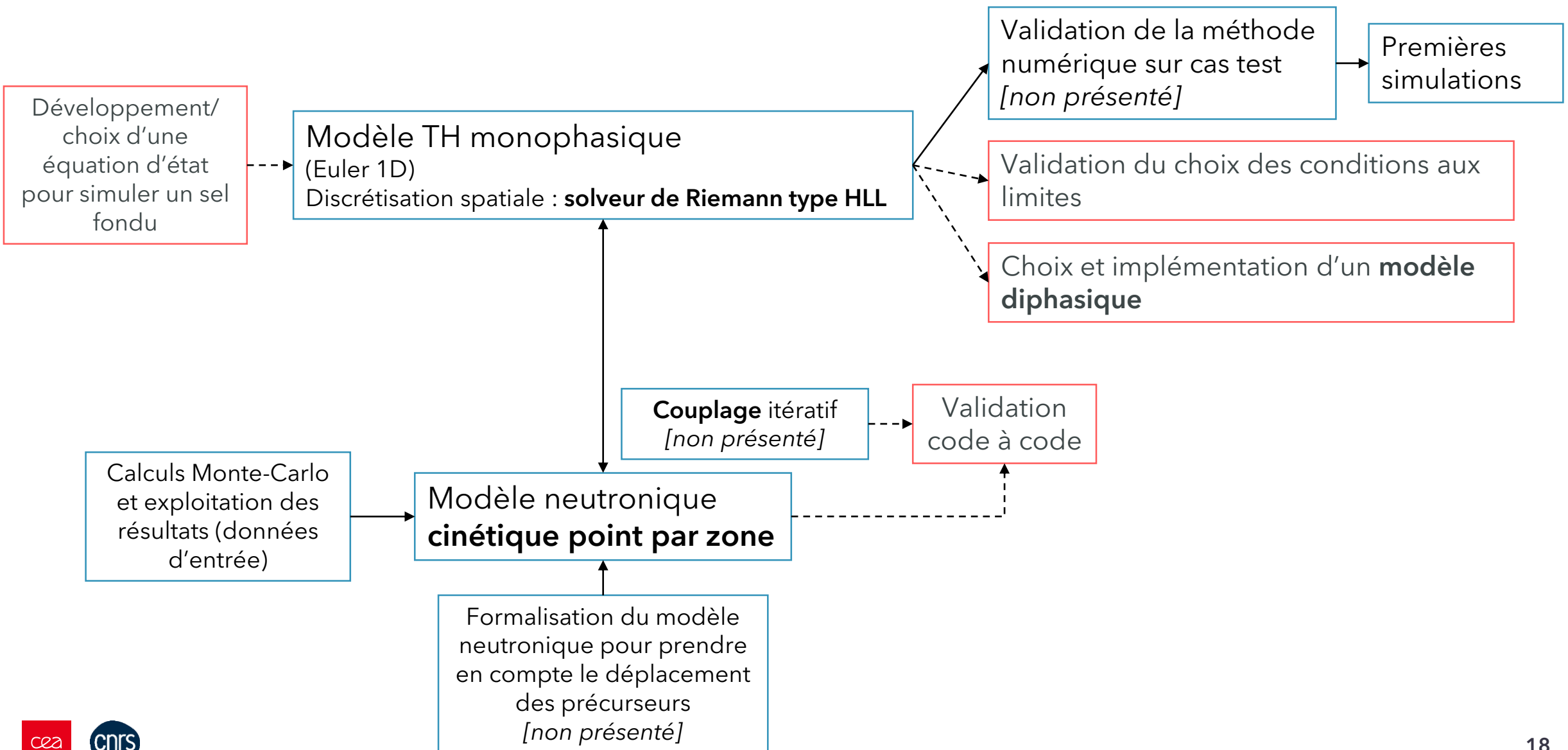
Quel impact de la compressibilité sur la densité, à l'origine de la contre-réaction ?

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 ? **Soupape sur le vase d'expansion** pour atténuer la montée en pression ? **Déformation de la cuve** ?



Bilan et perspectives





Merci !

