



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

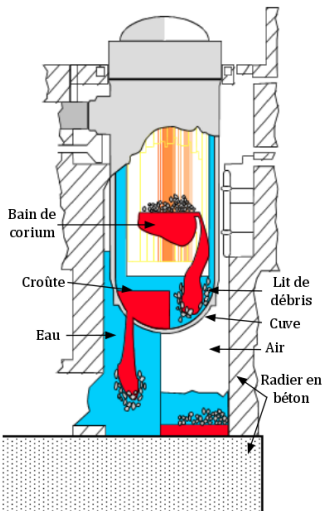
## Soutenance de thèse

17 décembre 2021

Adrien Drouillet, CEA, IMB

# Modélisation et simulation numérique des fronts de fusion/solidification à l'interface d'un bain de corium





## Un accident grave de réacteur nucléaire

- ▶ Mauvaise évacuation de l'**énergie thermique** produite par le cœur.
- ▶ Formation de **corium** (liquide composé des éléments du cœur fondu) par dégradation du combustible.
- ▶ **Propagation du corium** en cuve, puis potentiellement dans le puits de cuve. [Jacquemain et al.]

## Stratégies de rétention en cuve (IVR)

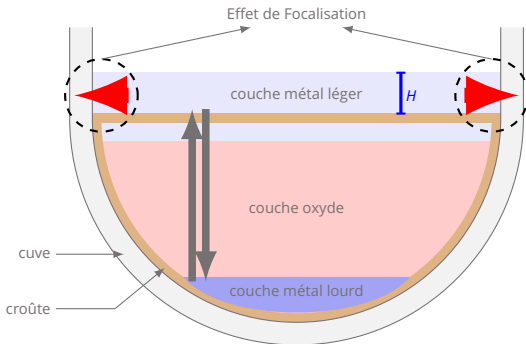
Objectif : contenir le corium en cuve.

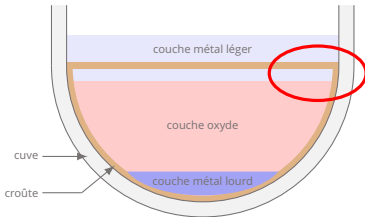
- ▶ **Tenue thermique** de la cuve.
- ▶ Tenue mécanique de la cuve.

⇒ Étude de la thermohydraulique du bain de corium et de la fonte de la cuve.

## Principaux phénomènes

- **Stratification du bain** en plusieurs phases immiscibles et de propriétés différentes. [Tsurikov et al.]
- Phénomène de **convection** dus aux forts gradients de température dans la partie oxyde.
- Phénomène de **focalisation des flux thermiques** au niveau de la couche mince.





- Condition de Stefan [Gupta; Stefan] :

$$\mathbf{u}^\Gamma = u^\Gamma \mathbf{n}^\Gamma = \frac{1}{\rho^\Gamma \Delta \mathcal{H}^\Gamma} (\varphi_l - \varphi_s) \mathbf{n}^\Gamma. \quad (1)$$

- Avec les flux thermiques :

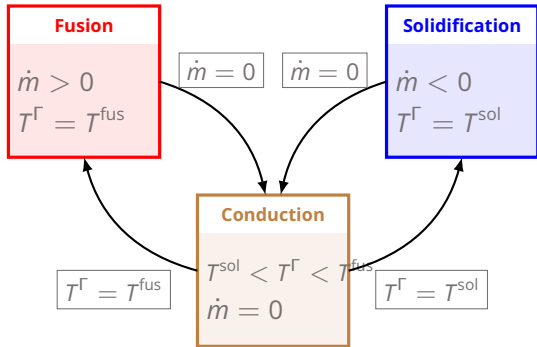
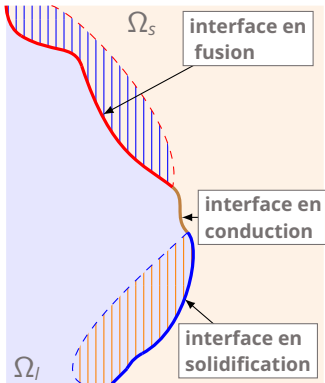
$$\varphi_k = \boldsymbol{\varphi}_k \cdot \mathbf{n}^\Gamma, \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_k = -\lambda_k \nabla T_k, \quad (3)$$

- Interface entre deux **matériaux pures homogènes**,
- Front de fusion/solidification considéré à l'**équilibre thermodynamique** → solide formé à température de solidification,
- **Interface raide** → On ne considère pas de zone de mélange diffuse.

Problème de **fusion/solidification** entre **un liquide chaud et un solide froid**.  
Caractère **hétérogène** des conditions à l'interface.

# Identification des interfaces de fusion / solidification : états d'interface



## Échelle de modélisation intégrale :

- ▶ Modélisation d'une séquence accident grave.
- ▶ Modèle rapide donc grossier.
- ▶ Hypothèses de fermetures, corrélations
- ▶ Utilise des données provenant des expériences et des modélisations plus fines.

## Échelle de modélisation fine :

- ▶ Modélise des phénomènes précis.
- ▶ Utilise des codes maillés, plus coûteux.
- ▶ Sujet de modélisation déterminé par les expériences ou codes intégraux.
- ▶ Tend à modéliser des phénomènes plus complexes, couplés avec l'évolution des moyens de calculs.



## Objectifs de la thèse :

Proposer des outils numériques à différents niveaux de modélisation pour suivre ces interfaces de front de fusion/solidification.

- ▶ Développer des modèles et méthodes numériques adaptées au suivi de ce type d'interface.
- ▶ Capacité des méthode et modèles à évoluer vers des fermetures thermodynamiques plus complexes.
- ▶ Implémenter ces méthodes dans des codes de simulations utilisés dans le contexte accidents graves.
- ▶ Valider ces méthodes sur des cas tests.
- ▶ Utiliser ces méthodes dans un cadre plus complexe se rapprochant des problématiques accidents graves.

## ► Contexte

## ► Modélisation idéalisée du problème

## ► Simulation d'une interface en deux dimension par couplage de modèle 0D et 2D dans un code intégral

- Environnement de travail
- Présentation du nouveau modèle
- Résultats

## ► Prise en compte plus fine du bain de corium par une approche CFD et un modèle VOF/FT

- Environnement de travail
- Présentation de la méthode VOF/FT et des adaptations apportées
- Résultats de validation et cas test de la couche mince

## ► Conclusions et perspectives



Pour le solide (équation de la chaleur) :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + f,$$

Pour le liquide (chaleur + Navier-Stokes) :

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \frac{-1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \mathbf{u} - \mathcal{B}(T - T^{\text{ref}}) \mathbf{g},$$

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + f,$$

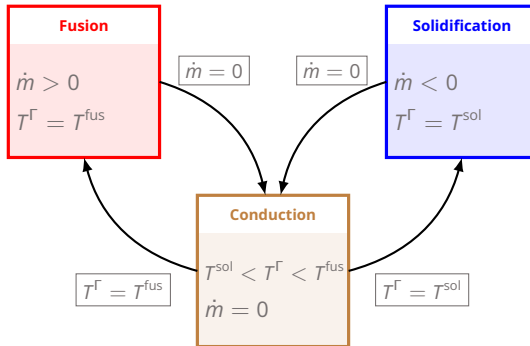
Pour l'interface liquide-solide (condition de Stefan) :

$$\mathbf{u}^\Gamma = u \mathbf{n}^\Gamma = \frac{1}{\rho^\Gamma \Delta \mathcal{H}^\Gamma} (\varphi_l - \varphi_s) \mathbf{n}^\Gamma$$

Où  $\Gamma$  sert à **différencier les paramètres** de fusion et de solidification.

Paramètres de fusion/solidification **déduit de la composition** du liquide et du solide.

# Fermetures thermiques à l'interface



## Fermetures thermiques à l'interface :

$$(\mathcal{F}) : \begin{cases} T = T^{\text{sol}}, & \text{si } \dot{m} \leq 0, \\ \varphi_s \cdot \mathbf{n}^\Gamma = \varphi_l \cdot \mathbf{n}^\Gamma, & \text{si } T^{\text{sol}} < T^\Gamma < T^{\text{fus}}, \\ T = T^{\text{fus}}, & \text{si } \dot{m} > 0. \end{cases} \quad (4)$$

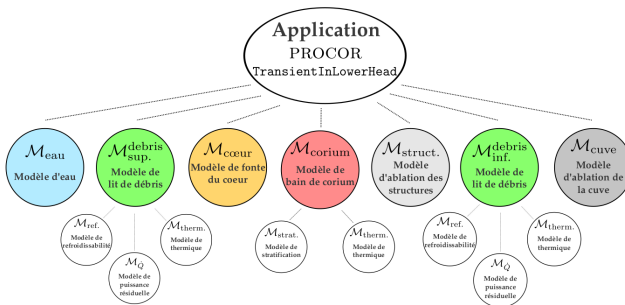
# Simulation d'une interface en deux dimensions par couplage de modèle 0D et 2D dans un code intégral

## Contraintes imposées par le contexte AG

- **Multi-physique et multi-échelle** : neutronique, thermique, thermohydraulique, mécanique, chimique ...
- Peu de données.

## Conséquences sur PROCOR :

- Études statistiques de sensibilité : implémentation de **modèles rapides** (0D model)
- Architecture spécifique, pensée pour le couplage de modèles [Viot et al. 2018]. Paradigme de **partitionnement de modèle**.



Première hypothèse : **Géométrie rectangulaire "multi-1D"**.

Condition d'interface 0D :

$$\dot{m} = \frac{\text{mes}(\Gamma)}{\Delta H_{fus}} (\overline{\varphi}_l^{ls}(t) - \overline{\varphi}_s^{ls}(t))$$

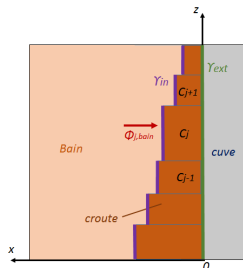
Équation 0D du solide :

$$\frac{\partial m_s}{\partial t} = -\dot{m} \text{ et } C_s(m_s \frac{d\overline{T}_s}{dt} + \dot{m}(T_\Gamma - \overline{T}_s)) = -\overline{\varphi}_s^i \times \text{mes}(\delta\Omega_s \setminus \Gamma) + \overline{\varphi}_s^{ls,i} \times \text{mes}(\Gamma)$$

Ce sont principalement des équations bilans. Deux variables suivies : la température moyenne du solide et la masse du solide.

Deuxième hypothèse : **Profil de température quadratique** [Le Tellier et al.].

On cherche à lever ces deux hypothèses.



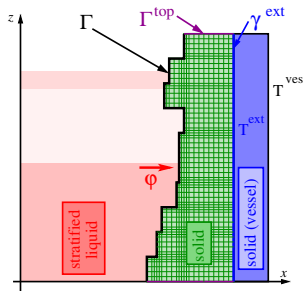
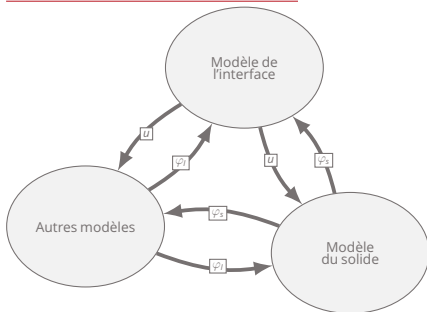
## Équations considérées :

$$\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \Delta T_s \quad (\text{Modèle du solide})$$

$$\vec{u} = \frac{1}{\rho_\Gamma \Delta \mathcal{H}^\Gamma} (\vec{\varphi}_l - \vec{\varphi}_s) \vec{n} \quad (\text{Modèle d'interface})$$

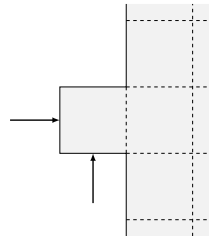
+ couplage avec les modèles 0D

## Couplage des sous-modèles :



## Discrétisation et déplacement de l'interface

- ▶ Interface maillée par des **segments verticaux et horizontaux**.
- ▶ Association à chaque segments des paramètres ( $T_{fus}$ ,  $\Delta\mathcal{H}^{fus}$ , ...)
- ▶ Déplacements verticaux et horizontaux.
- ▶ Déplacements 2D, par **splitting directionnel**.
- ▶ **Reconstruction du maillage** de l'interface à chaque pas de temps.
- ▶ Donc projection de certains paramètres (température et état du segment) d'une interface à l'autre.

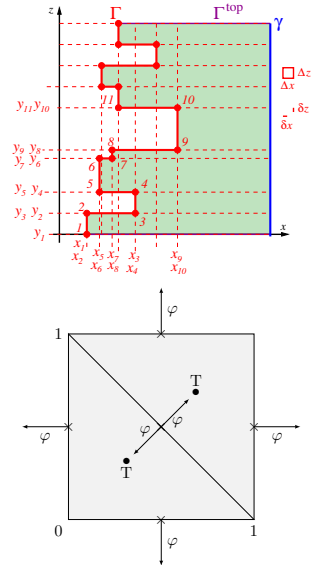


$\varphi_l$  est donné par le modèle liquide et  $\varphi_s$  est obtenu par le modèle solide.

## Résolution du solide par éléments finis mixtes

1. **Remaillage** : adaptation du maillage à la nouvelle interface.
2. **Projection** : de la température température sur le nouveau maillage (utilisation des fonctions éléments finis).
3. **Résolution** : de l'équation de la chaleur avec l'élément mixte de Raviart-Thomas.

⇒ **Identification** directe des flux thermiques à l'interface.





## Problème de Stefan 1D :

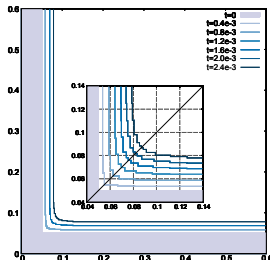
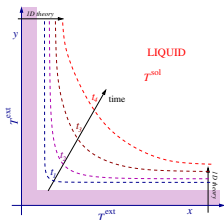


$\Delta t$	$L_1$ error	$L_2$ error	$L_\infty$ error
1.0	$2.87 \times 10^{-1}$	$3.11 \times 10^{-1}$	$8.33 \times 10^{-1}$
0.5	$9.70 \times 10^{-2}$	$1.04 \times 10^{-1}$	$2.92 \times 10^{-1}$
0.3	$4.75 \times 10^{-2}$	$4.90 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-1}$
0.1	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.28 \times 10^{-2}$	$8.48 \times 10^{-2}$

$\Delta x$	$L_1$ error	$L_2$ error	$L_\infty$ error
0.6	$1.30 \times 10^{-1}$	$1.31 \times 10^{-1}$	$2.00 \times 10^{-1}$
0.3	$7.85 \times 10^{-2}$	$7.93 \times 10^{-2}$	$1.24 \times 10^{-1}$
0.2	$8.89 \times 10^{-2}$	$5.81 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-1}$
0.1	$4.75 \times 10^{-2}$	$4.90 \times 10^{-2}$	$1.03 \times 10^{-1}$
0.05	$3.97 \times 10^{-2}$	$4.13 \times 10^{-2}$	$9.26 \times 10^{-2}$

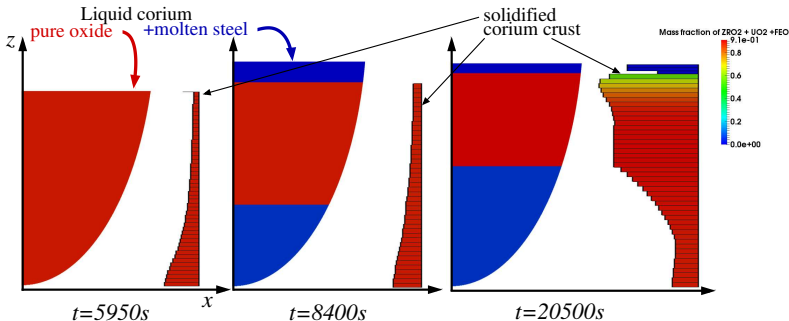
## Cas test de l'angle 2D (Schéma à gauche, résultat à droite) :



# Présentation du cas test de croûte

Objectif : utilisation du modèle 2D dans une simulation plus complexe (avec un couplage d'autres modèles). Simulation de la formation de la croûte pendant une stratégie IVR. Trois étapes [Viot et al. 2020] :

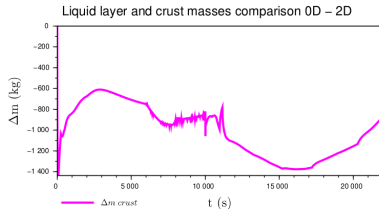
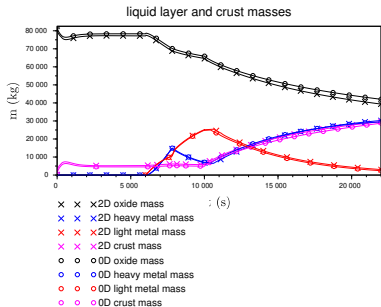
- Bain de corium tout oxyde → Formation d'une croûte tout oxyde.
- Ajout d'élément métallique dans le corium liquide → Stratification du bain de corium et discontinuités des flux thermiques provenant du liquide.
- Décroissance artificielle de la chaleur résiduelle dans le corium liquide → Solidification massive du corium.



## Restriction sur le modèle 2D

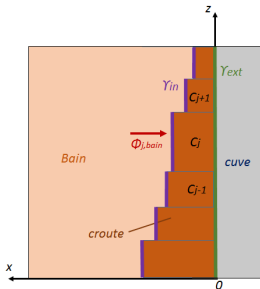
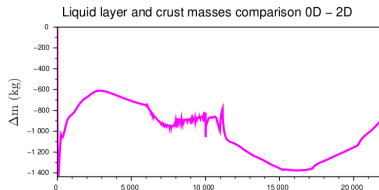
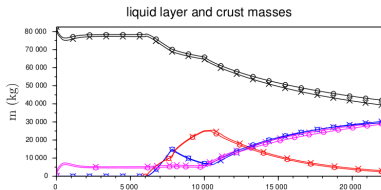
En raison du couplage avec les autres modèles 0D, **les déplacements verticaux de l'interface sont supprimés.**

Plusieurs comparaisons ont été réalisés entre le modèle d'interface 0D et le nouveau modèle d'interface 2D.



# Cas test de formation de la croûte

Plusieurs comparaisons ont été réalisées entre le modèle d'interface 0D et le nouveau modèle d'interface 2D.



# **Prise en compte plus fine du bain de corium par une approche CFD et un modèle VOF/FT**

$$(\mathcal{P}) : \begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mathcal{D}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = -\dot{m} \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s} \right) \delta^\Gamma, \\ \frac{\partial \rho C_p \delta T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} C_p \delta T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{m} \Delta \mathcal{H}^\Gamma \delta^\Gamma, \\ \frac{\partial \chi}{\partial t} + \mathbf{u}^\Gamma \cdot \nabla \chi = 0, \end{cases} \quad (5)$$

avec pour tout  $(\mathbf{x}, t)$  dans  $\Gamma \times \mathcal{T}$  :

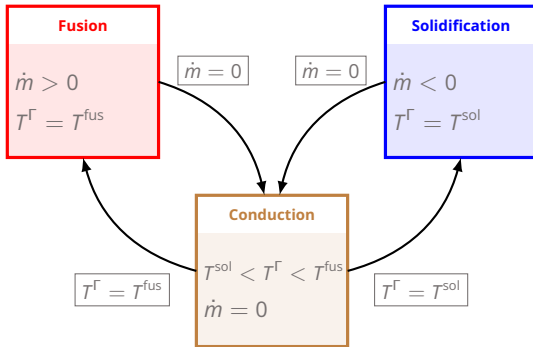
$$\mathbf{u}^\Gamma = -\frac{\dot{m}}{\rho_s} \mathbf{n}^\Gamma, \quad (6)$$

et pour tout  $(\mathbf{x}, t)$  dans  $\Gamma \times \mathcal{T}$  :

$$\dot{m} = \frac{\varphi_l - \varphi_s}{\Delta \mathcal{H}^\Gamma}. \quad (7)$$

Dans ce système les inconnues sont la vitesse  $\mathbf{u}$ , la pression  $P$ , la température  $T$  et la fonction  $\chi$ .

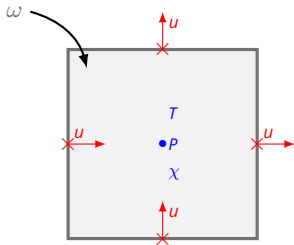
# Équations considérées : fermeture à l'interface



Définition de trois lois de fermetures thermiques à l'interface, fonction de l'état d'interface :

$$(\mathcal{F}) : \begin{cases} T = T^{\text{sol}}, & \text{si } \dot{m} \leq 0, \\ \varphi_s \cdot \mathbf{n}^\Gamma = \varphi_l \cdot \mathbf{n}^\Gamma, & \text{si } T^{\text{sol}} < T^\Gamma < T^{\text{fus}}, \\ T = T^{\text{fus}}, & \text{si } \dot{m} > 0. \end{cases} \quad (8)$$

- **Résolution de Navier-Stokes incompressible** par méthode de prédiction-projection
- **Discretisations spatiales :**
  - Volumes Différences finies (VDF) : rectangle en 2D, hexaèdre en 3D.
  - Volumes Éléments Finis (VEF) : triangle en 2D, tétraèdre/hexahèdre en en 3D .



Plusieurs méthodes disponibles, notamment :

- Une **méthode VOF/FT** : pour des interfaces de changement de phase entre liquide-vapeur.
- Une **méthode de pénalisation** sans changement de phase (modélisation d'un agitateur en fond de béccher).
- Une résolution de la température par **méthode Ghost-Fluid**.

⇒ Utiliser la méthode VOF-FT pour suivre l'interface.

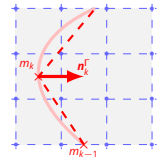
⇒ Vérifier la compatibilité de la méthode de pénalisation avec le changement de phase.

⇒ Adapter la méthode ghost-fluid.



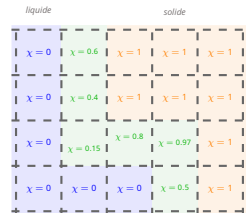
## La méthode Front-Tracking

- Utilisation d'un maillage eulérien pour résoudre les équations de Navier-Stokes
- Construction d'un deuxième maillage, lagrangien, pour modéliser l'interface.
- Nécessite des méthodes d'interpolation pour communiquer des informations d'un maillage à l'autre.
- Besoin de méthodes spécifiques sur le maillage eulérien pour utiliser l'information du maillage lagrangien.
- Pas naturellement conservatif.
- Certains phénomènes difficiles à prendre en compte (coalescence, séparation de phase ...)
- Suivi précis de l'interface, accepte de grandes déformations



## La méthode VOF

- Méthode eulérienne, utilisant une fonction de fraction de présence.
- Conservative par construction.
- Pas de suivi de l'interface, besoin d'algorithme de reconstruction d'interface.



## Schéma en temps explicite :

- ▶ Résolution de la vitesse du fluide.
  - Dans un premier temps résolution par méthode de prédiction-projection avec divergence nulle.
  - Ajout de la méthode de pénalisation, toujours avec divergence nulle.
  - Puis ajout d'une divergence non nulle.
- ▶ Déplacement des marqueurs et mise à jour de la fonction  $\chi_v$ .
- ▶ Résolution de la température.
  - Présentation de la méthode ghost-fluid.
  - Présentation des modifications apportées.

## Résolution de la vitesse sur tout le domaine par une méthode de prédiction-projection.

### Prédiction :

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^n - \Delta t \nabla_h \cdot (\boldsymbol{\mu}^n \mathbf{u}^n) + \frac{\Delta t}{\rho_f^n} \nabla_h \cdot (\mu^n (\nabla_h \mathbf{u}^n + \nabla_h^T \mathbf{u}^n)), \quad (9)$$

où  $\mathbf{u}^*$  est la prédiction de la vitesse,  $\mu^n$  la viscosité discrète,  $\rho_f^n$  la masse volumique discrète aux faces et où  $\mathbf{g}$  est le vecteur gravité.

**Projection :** Rajout de la contribution de la pression  $P^{n+1}$ , de manière à obtenir une vitesse à divergence nulle.

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* + \frac{\Delta t}{\rho_f^n} \nabla_h P^{n+1}, \quad (10)$$

où,  $P^{n+1}$  est obtenue en résolvant :

$$\nabla_h \cdot \left( \frac{1}{\rho_f^n} \nabla_h P^{n+1} \right) = -\frac{1}{\Delta t} \nabla_h \cdot \mathbf{u}^*. \quad (11)$$

## Modification de l'algorithme initial pour imposer une vitesse nulle sur le solide

Utilisation de la méthode de pénalisation, déjà présente dans TrioCFD (voir M. Belliard et al.)

$$l^n = \nabla_h \cdot (\mathbf{u}^n \mathbf{u}^n) + \frac{1}{\rho^n} \nabla_h \cdot (\mu^n (\nabla_h \mathbf{u}^n + \nabla_h^T \mathbf{u}^n)). \quad (12)$$

**Prédiction :**

$$(1 + \frac{\chi}{\eta}) \mathbf{u}^* = \mathbf{u}^n + \Delta t l^n, \quad (13)$$

$$\mathbf{u}^* = \frac{\mathbf{u}^n + \Delta t l^n}{(1 + \frac{\chi}{\eta})}. \quad (14)$$

où  $\eta$  est le facteur de pénalisation très proche de 0.

**Projection :**

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* + \frac{\Delta t}{\rho_f^n} \nabla_h p^{n+1} + \frac{\chi}{\eta} (\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^{n+1}), \quad (15)$$

$$-\nabla_h \cdot \mathbf{u}^* = \Delta t \frac{\eta}{\eta + \chi} \nabla_h \cdot \left( \frac{1}{\rho_f^n} \nabla_h p^{n+1} \right) \xrightarrow{\eta \rightarrow 0} \mathbf{0}. \quad (16)$$

Il faut prendre en compte la divergence non-nulle due au changement de volume.

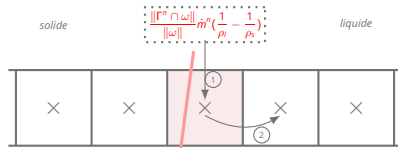
$$\int_{\omega} \zeta(t) dx = \int_{\Gamma(t) \cap \omega} \dot{m}(t) \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s} \right) d\sigma dt. \quad (17)$$

## Discrétisation

$$\zeta^n = \frac{\|\Gamma^n \cap \omega\|}{\|\omega\|} \dot{m}^n \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s} \right). \quad (18)$$

## Modification de l'espace de projection

$$\frac{\eta}{\eta + \chi} \nabla_h \cdot \left( \frac{1}{\rho_f^n} \nabla_h p^{n+1} \right) = -\frac{1}{\Delta t} \nabla_h \cdot \mathbf{u}^* + \frac{1}{\Delta t} \zeta^n. \quad (19)$$



Calcul de  $\mathbf{u}^\Gamma$  :

$$\mathbf{u}^{\Gamma,n} = -\nabla \cdot \left( \frac{\dot{m}^n}{\rho_s} d^n \right), \quad (20)$$

1. Déplacement théorique de la fonction couleur  $\chi$ ,
2. déplacements des marqueurs  $m_k$ ,
3. algorithme de remaillage, lissage, barycentrage,
4. correction du déplacement des marqueurs à l'aide de la fonction  $\chi$ ,
5. mise à jour de la fonction  $\chi$  en fonction des marqueurs,
6. mise à jour de la fonction level-set  $d$ , représentant la distance signée à l'interface.

## Séparation de l'équation de température en deux équations, une pour chaque phase :

$$(\delta T_k^{n+1}) = (\delta T^n) + \frac{\lambda_s \Delta t}{\rho_s C_{p,s}} \Delta_h T_s^n - \Delta t \nabla_h \cdot (\mathbf{u}^{T,n} \delta T_s^n). \quad (21)$$

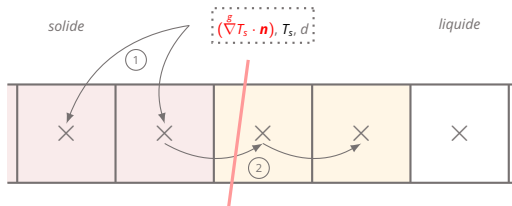
définie sur tout le domaine. On se concentre, dans la suite, sur l'équation thermique du solide.

## Température d'interface définie par méthode Ghost-Fluid

1/ Calcul d'un gradient thermique normal à l'interface sur le centre des mailles solides.

$$(\overset{g}{\nabla} T_s \cdot \mathbf{n}) = \frac{T^\Gamma - T_s}{d}. \quad (22)$$

2/ Extrapolation du gradient aux mailles mixtes et liquides proches de l'interface.



1. Suivi de l'état d'interface par un nouveau champ sur les mailles eulériennes :

$$E_{i,j}^{n+1} = \begin{cases} \text{conduction si } T^{\text{sol}} < T_{i,j}^{\Gamma,n} < T^{\text{fus}}, \\ \text{conduction si } E_{i,j}^n = \text{fusion et } \dot{m}_{i,j} < 0, \\ \text{conduction si } E_{i,j}^n = \text{solidification et } \dot{m}_{i,j} > 0, \\ \text{fusion si } T_{i,j}^{\Gamma,n} \geq T^{\text{fus}} \text{ et } \dot{m}_{i,j} \geq 0, \\ \text{solidification si } T_{i,j}^{\Gamma,n} \leq T^{\text{sol}} \text{ et } \dot{m}_{i,j} \leq 0. \end{cases} \quad (23)$$

Puis extrapolation de ce nouveau champ d'état aux mailles pures proches.

2. Calcul d'une nouvelle température d'interface, dépendante de l'état de la maille :

$$T^{\Gamma} = \begin{cases} T^{\text{fus}} & \text{si la maille mixte est en fusion,} \\ T^{\text{cond}} & \text{si la maille mixte est en conduction,} \\ T^{\text{sol}} & \text{Si la maille mixte est en solidification.} \end{cases} \quad (24)$$

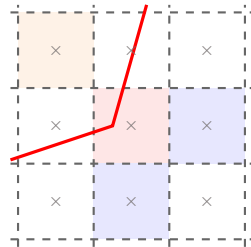
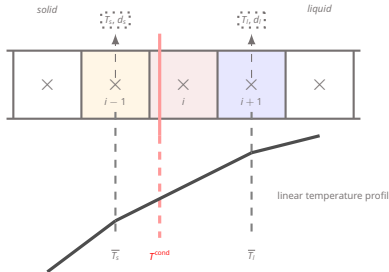
où  $T^{\text{cond}}$  est calculée le cas échéant.



Pour approcher  $T^{\text{cond}}$ , on utilise une **interpolation linéaire**.

$$T^{\text{cond}} = \frac{\lambda_s \bar{T}_s \bar{d}_l - \lambda_l \bar{T}_l \bar{d}_s}{\lambda_s \bar{d}_l - \lambda_l \bar{d}_s}. \quad (25)$$

Où  $\bar{T}_k$  est une température moyenne du côté de la phase  $k$  et  $\bar{d}_k$  une distance moyenne du côté de la phase  $k$ .



On définit  $\dot{m}^n$  par :

$$\dot{m}^{n+1} = \frac{\dot{m}_l^{n+1} - \dot{m}_s^{n+1}}{\Delta \mathcal{H}^\Gamma}, \quad (26)$$

où :

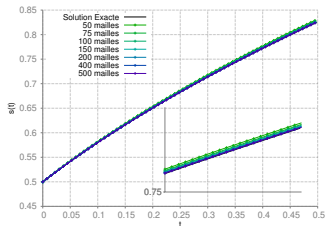
$$\dot{m}_k = \lambda_k (\overset{g}{\nabla} T_k \cdot \mathbf{n}), \quad (27)$$

Pour assurer le respect de l'état de l'interface, si l'état est en conduction, alors, le taux  $\dot{m}^n$  est imposé à 0.

$$\dot{m}_{i,j}^n = \begin{cases} 0 & \text{si } E_{i,j}^{n+1} = \text{conduction} \\ \frac{\dot{m}_l^{n+1} - \dot{m}_s^{n+1}}{\Delta \mathcal{H}^\Gamma} & \text{sinon} \end{cases} \quad (28)$$



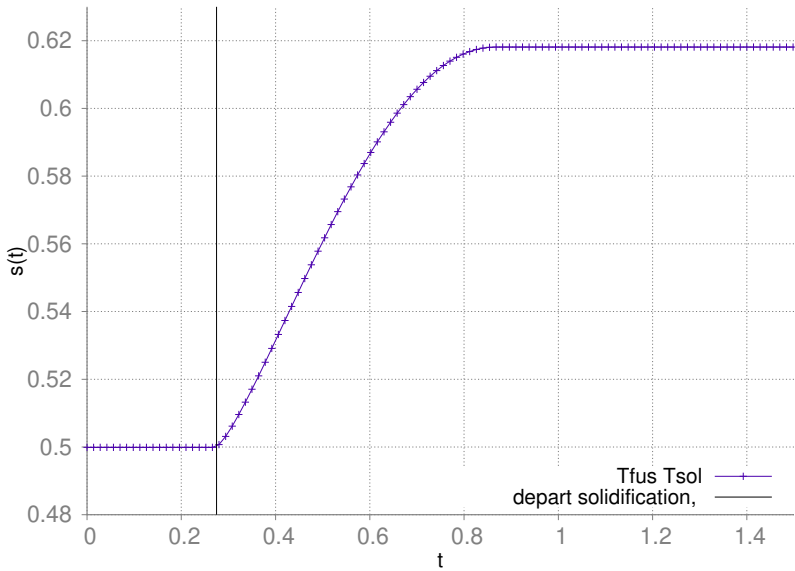
## Solide et liquide de même nature, densité différente



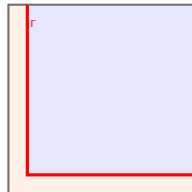
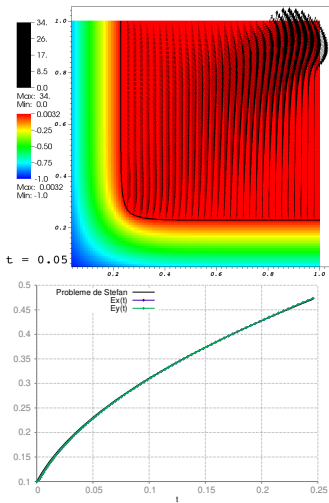
$N_x$	$\Delta x$	$L^2$ error	$L^2$ order
50	0.08	$4.072E-3$	-
75	0.053	$2.752E-3$	0.95
100	0.04	$2.068E-3$	1.02
150	0.027	$1.368E-3$	1.05
200	0.02	$1.011E-3$	1.01
400	0.01	$5.137E-4$	0.98
500	0.008	$4.172E-4$	0.93
-	-	$L^2$ average $\rightarrow$	0.99

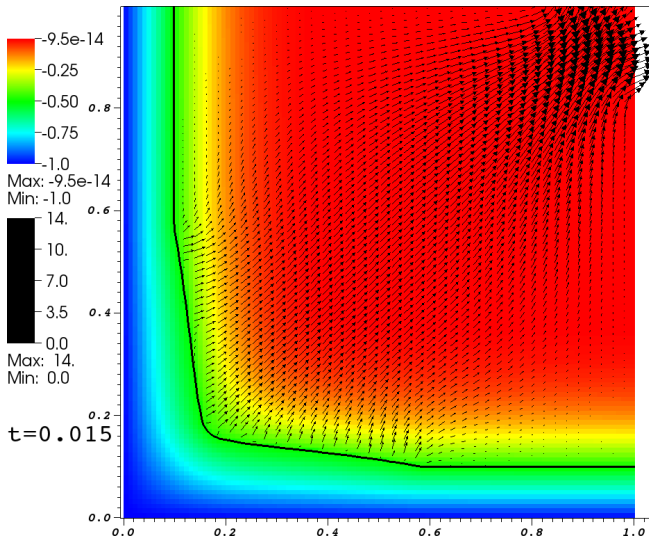


# Cas test de validation : cas test de Stefan

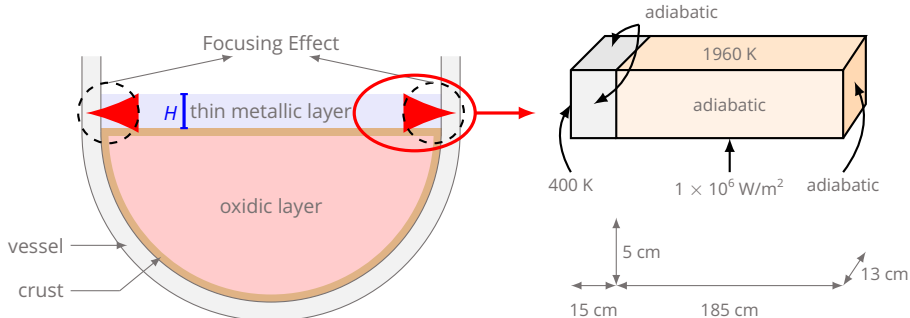


Solide et liquide de même nature, densité différente



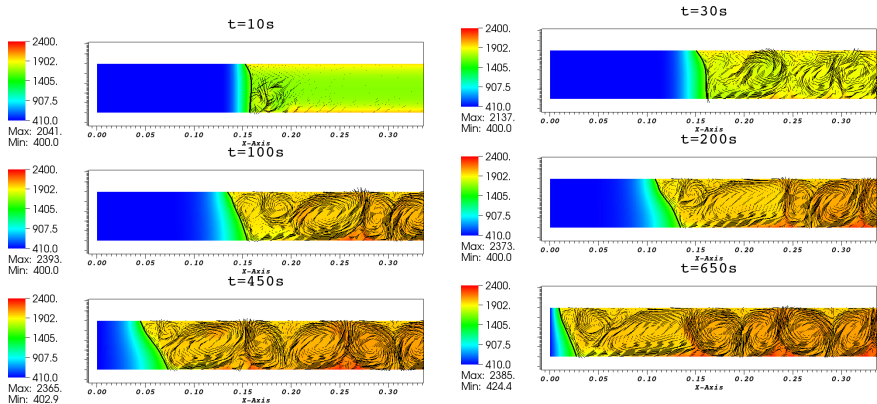


# Cas test de la couche mince : présentation du cas test



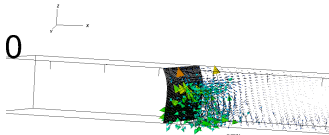
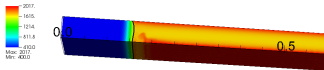
Parameter	Value
Density $\rho$	$6720 \text{ kg/m}^3$
Coefficient of thermal expansion, $\beta$	$3 \times 10^{-5}$
Thermal conductivity, $\lambda$	$20 \text{ W/mK}$
Fusion temperature, $T^{\text{fus}}$	$1658 \text{ K}$
Enthalpy of fusion, $\Delta \mathcal{H}^{\text{fus}}$	$2.76 \times 10^5 \text{ J/kg}$
Heat capacity, $C_p$	$674 \text{ J/kg K}$
Kinematic viscosity, $\mu$	$4.5696 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$



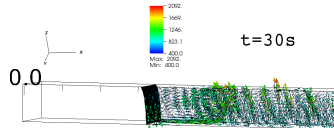
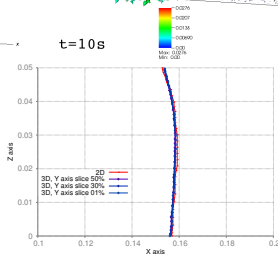


Cas test de la couche mince 2D – résultats pour plusieurs temps – température en couleur et vitesse en vecteur noir.

t=10s

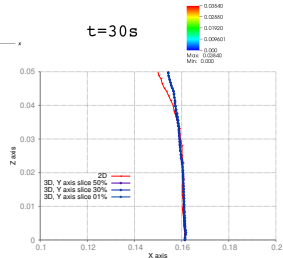


t=10s



t=30s

t=30s



Cas test de la couche mince 3D – résultats pour plusieurs temps (10s à droite et 30s à gauche) – en haut : température en couleur – au milieu : vecteur vitesse – en bas : comparaison de la position de l'interface pour plusieurs coupe et avec le résultat 2D.

## Conclusions et perspectives

## Modèle 2D lagrangien du code PROCOR

- ▶ Un nouveau modèle 2D/0D a été développé. L'équation de la chaleur est résolue en 2D et l'interface liquide-solide évolue en 2D.
- ▶ Pas besoin de schéma implicite.
- ▶ Méthode éléments finis mixtes, remaillage, projection, couplage de modèle.
- ▶ Plusieurs validations ont été réalisées ainsi que des comparaisons avec un modèle 0D préexistant.
- ▶ Un cas test plus industriel (formation de la croûte) a été proposé, avec comparaison au modèle 0D.

## Modèle VOF/FT du code TrioCFD

- ▶ Définition de la notion d'états d'interface et écriture d'un modèle CFD les incluant.
- ▶ Adaptation d'une méthode VOF-FT à notre problématique liquide solide.
- ▶ Utilisation de la méthode de pénalisation pour supprimer la vitesse sur le solide.
- ▶ Adaptation de la méthode Ghost-Fluid pour prendre en compte les différentes fermetures thermique de l'interface.
- ▶ Validation des développements réalisés sur des cas tests de validation 1D et 2D.
- ▶ Réalisation d'un cas test plus industriel (simulation de la couche métallique légère), proposition d'une illustration 3D.

- ▶ Poursuite de la validation du modèle 2D développé dans PROCOR, notamment avec une comparaison entre code maillé.
  - ▶ Complexification de la physique à l'interface, par exemple en prenant en compte un changement de phase non congruent et en introduisant des modèles de thermochimie.
  - ▶ Utilisation du modèle dans d'autres applications, par exemple pour la modélisation d'un récupérateur dans le cadre d'un réacteur neutron rapide.
- 
- ▶ Validation 3D de la méthode Ghost-Fluid adaptée. Plus largement, des benchmarks entre codes et méthodes numériques pour valider les développements réalisés sur la méthode VOF-FT.
  - ▶ Benchmark avec d'autres codes liée à une campagne d'essais LIVE.
  - ▶ Prochaine collaboration avec des équipes canadiennes sur un benchmark portant sur une configuration 3D.
  - ▶ Amélioration de la méthode d'interpolation utilisée dans la méthode Ghost-Fluid. Éventuellement remplacement de la méthode Ghost-Fluid pour une méthode plus adaptée.
  - ▶ Introduction du suivi des espèces dans le modèle de CFD.
  - ▶ Poursuite de l'étude de la couche mince avec ajout de méthodes LES (Large Eddy Simulation) pour la modélisation de la turbulence.
- 
- ▶ Proposer des remontées d'échelles entre les simulations CFD et les modélisations intégrales.

# Bibliographie

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - [www.cea.fr](http://www.cea.fr)

- ▶ Viot, L., Saas, L., De Vuyst, F., 2018. **Solving coupled problems of lumped parameter models in a platform for severe accidents in nuclear reactors.** International Journal for Multiscale Computational Engineering.
- ▶ Le Tellier, R., Skrzypek, E., Saas, L., 2017. **On the treatment of plane fusion front in lumped parameter thermal models with convection.** Applied Thermal Engineering 120, 314–326.
- ▶ <https://fenicsproject.org/>
- ▶ Viot, L., Le Tellier, R., Peybernes, M., 2020. **Modeling of the corium crust of a stratified corium pool during severe accidents in light water reactors.** Nuclear Engineering and Design.
- ▶ Drouillet, A., Le Tellier, R., Loubère, R., Peybernes, M., Viot, L., **Multi-dimensional simulation of phase change by a 0D-2D model coupling via Stefan condition.** Communications on Applied Mathematics and Computation.

- ▶ <https://trio CFD.cea.fr/>
- ▶ Mathieu, B., n.d. **Études physique, expérimentale et numérique des mécanismes de base intervenant dans les écoulements diphasiques en micro-fluidique.** Polytech Marseille.
- ▶ Bois, G., 2021. **A comprehensive description of the mixed Front-Tracking/Volume-of-Fluid/Level-set algorithm of TrioCFD.** (preprint)
- ▶ Belliard, M., Fournier, C., 2010. **Penalized direct forcing and projection schemes for Navier-Stokes.** Comptes Rendus Mathématique 348, 1133–1136.
- ▶ Drouillet, A., Bois, G., Le Tellier, R., Loubère, R., Peybernes, M., **Mathematical modeling and associated numerical simulation of fusion/solidification front evolution in the context of severe accident of nuclear power engineering.** Soumis nov. 2020



**Merci pour votre attention**