



DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Soutenance de thèse

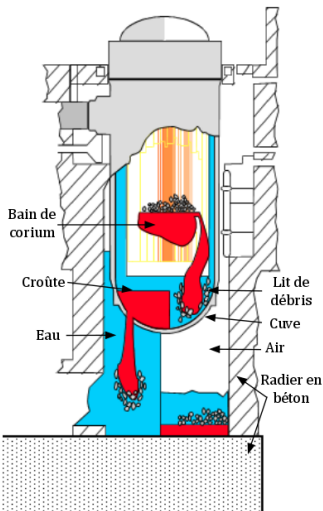
17 décembre 2021

Adrien Drouillet, CEA, IMB

Modélisation et simulation des fronts de fusion / solidification avec TrioCFD par une méthode VOF/Front-Tracking/IBC



Contexte accident grave (AG)



Définition AG

- 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.

Stratégies de rétention en cuve (IVR)

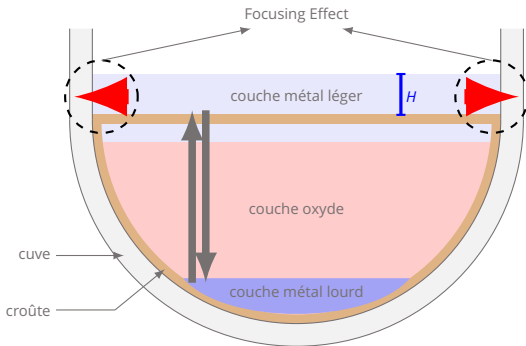
Objectif : Contenir le corium en cuve.

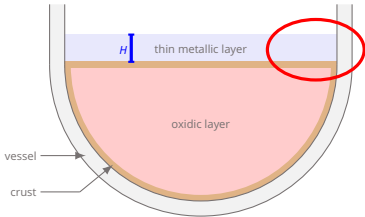
- Tenue mécanique de la cuve.
- Tenue thermique de la cuve.

⇒ 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.
- Des phénomènes de convection dus aux forts gradients de température dans la partie oxyde.
- Des réactions chimiques, en particulier des réactions d'oxydation, qui jouent un rôle dans la stratification et le dégagement de chaleur.





- Condition de 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 :

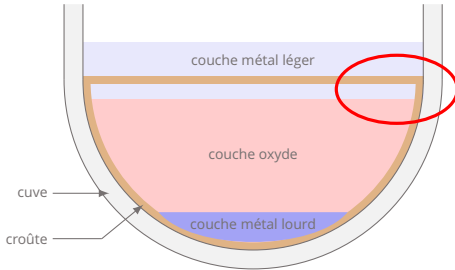
$$\varphi_k = \varphi_k \cdot \mathbf{n}^\Gamma, \quad (2)$$

$$\varphi_k = -\lambda_k \vec{\nabla} T_k, \quad (3)$$

- Interface entre acier liquide et acier solide → interface entre matériaux homogène,
- Front de fusion/solidification considéré à l'équilibre thermodynamique → solide formé à température de solidification,
- On ne considère pas de zone de mélange diffuse → interface raide.

Problème de **fusion/solidification** entre **un liquide chaud (acier liquide)** et **un solide froid (cuve)**.

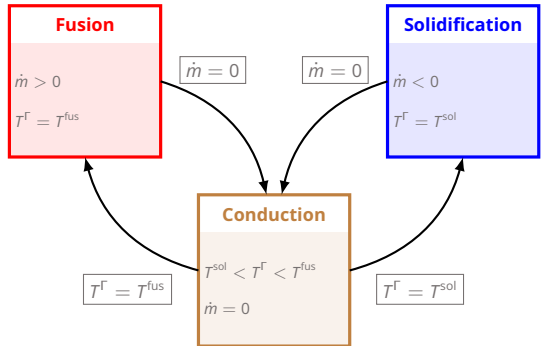
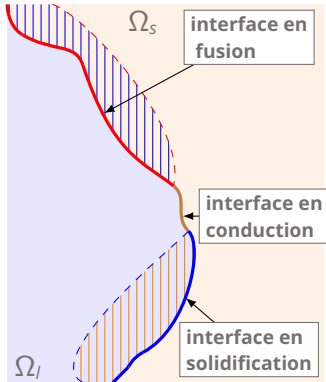
Identification des interfaces de fusion / solidification : états d'interface



1. Front de fusion/solidification considéré à l'équilibre thermodynamique → solide formé à température de solidification,
2. On ne considère pas de zone de mélange diffuse → interface raide,
3. Les variations de composition dues à la solidification sont négligées → le solide qui se forme a la même composition que le liquide considéré comme homogène.

Ici, les propriétés physiques du liquide (acier fondu) et du solide (croûte oxyde) sont différentes. En particulier, **la température de solidification du liquide peut être différente de la température de fusion du solide.**

⇒ Notion d'états d'interface.



Objectif de la thèse :

Proposer des outils numériques pour suivre ces interfaces de front de fusion/solidification.

- **Contexte**
- **Modèle d'interface 2D lagrangien, couplage avec des modèles 0D**
- **Modèle d'interface VOF/FT dans un code de CFD**
- **Conclusions et perspectives**
- **Bibliographie**

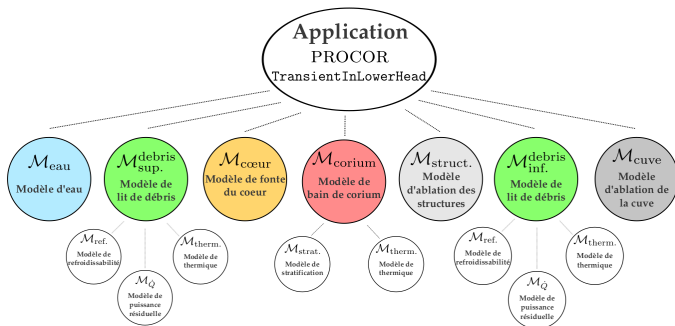
Modèle d'interface 2D lagrangien, couplage avec des modèles 0D

Contraintes imposées par le contexte AG

- ▶ Multi-physique et multi-échelle : neutronique, thermique, thermohydraulique, mécanique, chimique ...
- ▶ Très peu de données (Three Miles Island, Chernobyl, Fukushima Daiichi) et extraction de ces données compliquée.
- ▶ Expérimentation difficile : problème d'échelle, utilisation de produits radioactifs, très hautes températures ...

Conséquences sur PROCOR

- ▶ Programmation orientée objet, en Java : modularité, probabilité, évolution.
- ▶ Études statistiques de sensibilité : implémentation de modèles rapides (0D model)
- ▶ Architecture spécifique, pensée pour le couplage de modèles.



Objectif : proposer un modèle de fusion/solidification selon la logique de partitionnement de la plateforme PROCOR.

Pour le solide (équation de la chaleur) :

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

Pour le liquide (Navier-Stokes + Boussinesq) :

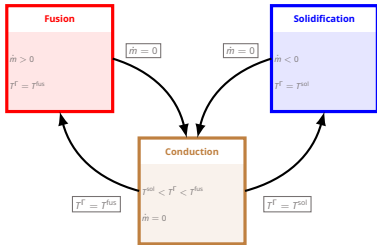
$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{v} &= 0, \\ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} &= \frac{-1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta \vec{v} - \beta (T - T^{\text{ref}}) \vec{g}, \\ \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) &= \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + f, \end{aligned}$$

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

$$\vec{u} = u \vec{n}^\Gamma = \frac{1}{\rho_\Gamma \Delta \mathcal{H}_\Gamma} (\varphi_l - \varphi_s) \vec{n}^\Gamma$$

Où Γ sert à différencier les paramètres de fusion et de solidification.

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



► Condition d'interface 0D :

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

► Équation 0D du solide :

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

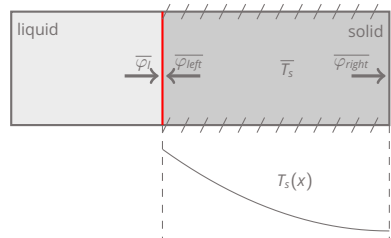
Ce sont principalement des équations bilans. Deux variables suivies : la température moyenne du solide et la masse du solide. Deux hypothèses nécessaires pour fermer le modèle : une sur la géométrie du solide et l'autre sur le profil de température.

Première hypothèse : **1D slab solid**

simplification. Le solide est considéré rectangulaire et les échanges thermiques et de masses ne se font qu'au travers des bords droite et gauche.

Deuxième hypothèse : **Un profil de température quadratique** est considéré. Ce profil est choisi d'après une étude sur plusieurs possibilités. Ce profil correspond à la solution stationnaire.

Pour assurer la stabilité, ces modèles doivent être couplés avec des **schémas implicites**.



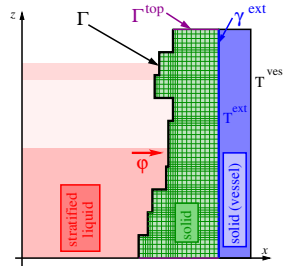
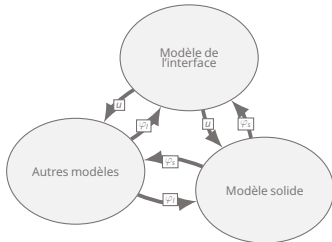
Équations considérés :

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \Delta T_s + Q_s \quad \forall x \in \Omega_s \subset \mathbb{R}^2 \quad (\text{équation de la chaleur 2D})$$

$$\vec{u} = \frac{1}{\rho^r \Delta \mathcal{H}^r} (\vec{\varphi}_l - \vec{\varphi}_s) \vec{n} \quad \forall x \in \Gamma \quad (\text{condition de Stefan 2D})$$

+ Modèle 0D pour le liquide et la composition du solide

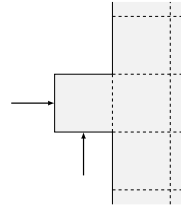
Couplage des sous-modèles :



Ces sous-modèles sont couplés entre eux par un **schéma explicite**.

Discretisation et déplacement de l'interface

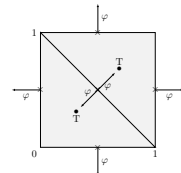
- ▶ Interface maillée par des segments verticaux et horizontaux.
- ▶ On associe à chaque segments des paramètres (T_{fus} , ΔH_{fus} , ...)
- ▶ Déplacements verticaux et horizontaux.
- ▶ Déplacements 2D, par splitting directionnel.
- ▶ Reconstruction du maillage de l'interface à chaque pas de temps.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



φ_l est donné par le modèle liquide et φ_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.
4. Flux thermique déjà calculé sur le bord de l'élément fini de Raviart-Thomas → **identification** directe des flux thermiques à l'interface.



Algorithme final, en utilisant un schéma semi-explicite :

1. Résolution de l'équation de la chaleur par méthode élément finis

$$\left((\Omega_s)_h^n, (T_j^n)_{j=1,\dots,N_j^n}, \text{BCs}, \right) \longrightarrow (T_j^{n+1}, (\vec{\varphi}_j^{n+1})_{j=1,\dots,N_j^n})$$

2. Déplacement de l'interface

$$\left(\Gamma^n, (\vec{\varphi}_j)_{j=1,\dots,N_j^n}, \text{BCs}, \right) \longrightarrow \Gamma^{n+1}$$

3. Remaillage du solide avec la nouvelle interface

$$(\Omega_s^n, (\Omega_s)_h^n, \Gamma^{n+1}) \longrightarrow (\Omega_s^{n+1}, (\Omega_s)_h^{n+1})$$

4. Projection de l'ancienne température sur le nouveau domaine

$$\left((\Omega_s)_h^{n+1}, (\Omega_s)_h^n, (T_j^{n+1})_{j=1,\dots,N_j^n} \right) \longrightarrow (T_k^{n+1})_{k=1,\dots,N_k^{n+1}}$$

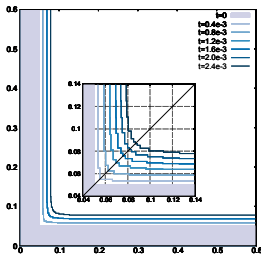
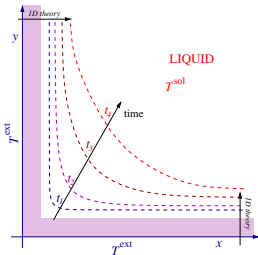
Problème de Stefan 1D :



Δt	L_1 error	L_2 error	L_∞ error
1.0	2.87×10^{-1}	3.11×10^{-1}	8.33×10^{-1}
0.5	9.70×10^{-2}	1.04×10^{-1}	2.92×10^{-1}
0.3	4.75×10^{-2}	4.90×10^{-2}	1.03×10^{-1}
0.1	1.18×10^{-2}	1.28×10^{-2}	8.48×10^{-2}

Δx	L_1 error	L_2 error	L_∞ error
0.6	1.30×10^{-1}	1.31×10^{-1}	2.00×10^{-1}
0.3	7.85×10^{-2}	7.93×10^{-2}	1.24×10^{-1}
0.2	8.89×10^{-2}	5.81×10^{-2}	1.03×10^{-1}
0.1	4.75×10^{-2}	4.90×10^{-2}	1.03×10^{-1}
0.05	3.97×10^{-2}	4.13×10^{-2}	9.26×10^{-2}

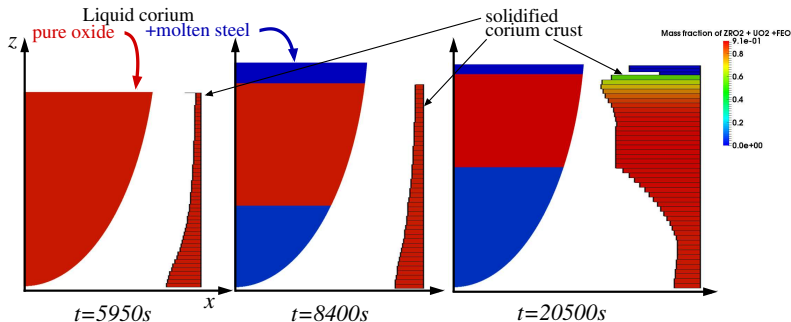
Cas test de l'angle 2D (Schéma à gauche, résultat à droite) :



Présentation du cas test de croûte

Objectif : utilisation du modèle 0D/2D dans une simulation plus complexe (avec un couplage d'autre modèle). Simulation de la formation de la croûte pendant une stratégie IVR. Trois étapes :

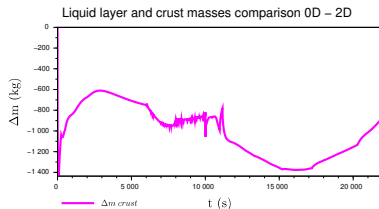
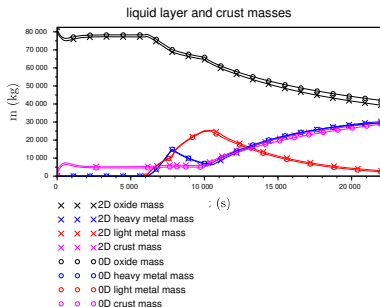
- Bain de corium tout oxyde → Formation d'une croûte tout oxyde.
- Ajout d'élément métallique dans le corium liquide → Stratification du bain de corium et discontinuités des flux thermiques provenant du liquide.
- Décroissance artificielle de la chaleur résiduelle dans le corium liquide → Solidification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



Restriction sur le modèle 2D/0D

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.

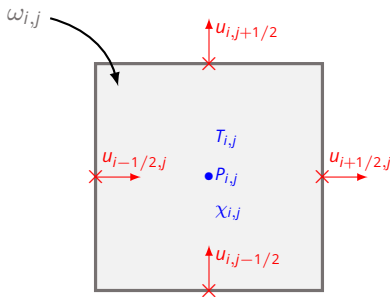


Première figure : évolution de la masses pour les différentes couches de liquide et pour la croûte.

Seconde figure : Différence de la masse de croûte totale entre les deux modèles.

Modèle d'interface VOF/FT dans un code de CFD

- **Résolution de Navier-Stokes** par méthode de projection
- **Discretisations spatiales :**
 - Volumes Différences finies (VDF) : rectangle en 2D, hexaèdre en 3D.
 - Volumes Éléments Finis (VEF) : triangle en 2D, tétraèdre/hexaèdre en 3D .
- **Schémas en espace d'ordre 2**
- **Schémas en temps explicite ou (semi-)implicite**



Équations considérées

$$(\mathcal{P}) : \begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \nabla \mathbf{u} = -\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mathcal{D}, \\ \nabla \cdot \mathbf{u} = -\dot{m} \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s} \right) \delta^\Gamma, \\ \frac{\partial \rho C_p \delta T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} C_p \delta T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{m} \mathcal{H}^\Gamma \delta^\Gamma, \\ \frac{\partial \chi}{\partial t} + \mathbf{u}^\Gamma \cdot \nabla \chi = 0, \end{cases} \quad (4)$$

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

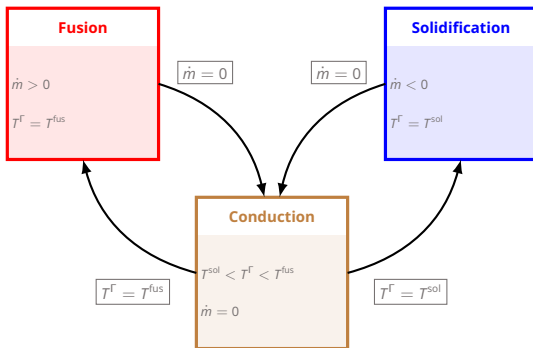
$$\mathbf{u}^\Gamma = -\frac{\dot{m}}{\rho_s} \mathbf{n}^\Gamma, \quad (5)$$

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

$$\dot{m} = \frac{\varphi_l - \varphi_s}{\mathcal{H}^\Gamma}. \quad (6)$$

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

Équations considérées : fermeture à l'interface

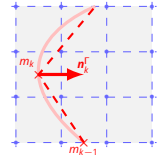


Définition de trois lois de fermetures thermiques à l'interface, fonction de l'état d'interface :

$$(\mathcal{F}) : \begin{cases} T = T^{\text{sol}}, & \text{si } \dot{m} \leq 0, \\ \varphi_s \cdot \mathbf{n}^\Gamma = \varphi_l \cdot \mathbf{n}^\Gamma, & \text{si } T^{\text{sol}} < T^\Gamma < T^{\text{fus}}, \\ T = T^{\text{fus}}, & \text{si } \dot{m} > 0. \end{cases} \quad (7)$$

La méthode Front-Tracking

- Utilisation d'un maillage eulerien 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 eulerien 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



liquide			solide		
$\chi = 0$	$\chi = 0.6$	$\chi = 1$	$\chi = 1$	$\chi = 1$	
$\chi = 0$	$\chi = 0.4$	$\chi = 1$	$\chi = 1$	$\chi = 1$	
$\chi = 0$	$\chi = 0.15$	$\chi = 0.8$	$\chi = 0.97$	$\chi = 1$	
$\chi = 0$	$\chi = 0$	$\chi = 0$	$\chi = 0.5$	$\chi = 1$	

La méthode VOF

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

Schéma en temps explicite :

- ▶ résolution de la vitesse du fluide,
- ▶ déplacement des marqueurs et mise à jour de la fonction χ_v ,
- ▶ résolution de la température.

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

Prédiction :

$$\mathbf{u}^* = \mathbf{u}^n - \Delta t \nabla_h \cdot (\mu^n \mathbf{u}^n) + \frac{\Delta t}{\rho_f^n} \nabla_h \cdot (\mu^n (\nabla_h \mathbf{u}^n + \nabla_h^T \mathbf{u}^n)), \quad (8)$$

où \mathbf{u}^* est la prédiction de la vitesse, μ^n la viscosité discrète, ρ_f^n la densité discrète aux faces et où \mathbf{g} est le vecteur gravité.

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

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* + \frac{\Delta t}{\rho_f^n} \nabla_h P^{n+1}, \quad (9)$$

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

$$\nabla_h \cdot \left(\frac{1}{\rho_f^n} \nabla_h P^{n+1} \right) = -\frac{1}{\Delta t} \nabla_h \cdot \mathbf{u}^*. \quad (10)$$

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.)

$$l^n = \nabla_h \cdot (\mathbf{u}^n \mathbf{u}^n) + \frac{1}{\rho^n} \nabla_h \cdot (\mu^n (\nabla_h \mathbf{u}^n + \nabla_h^T \mathbf{u}^n)). \quad (11)$$

Prédiction :

$$(1 + \frac{\chi}{\eta}) \mathbf{u}^* = \mathbf{u}^n + \Delta t l^n, \quad (12)$$

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

où η est le facteur de pénalisation très proche de 0.

Projection :

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^* + \frac{\Delta t}{\rho_f^n} \nabla_h p^{n+1} + \frac{\chi}{\eta} (\mathbf{u}^* - \mathbf{u}^{n+1}), \quad (14)$$

$$-\nabla_h \cdot \mathbf{u}^* = \Delta t \frac{\eta}{\eta + \chi} \nabla_h \cdot \left(\frac{1}{\rho_f^n} \nabla_h p^{n+1} \right) \xrightarrow{\eta \rightarrow 0} \mathbf{0}. \quad (15)$$

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

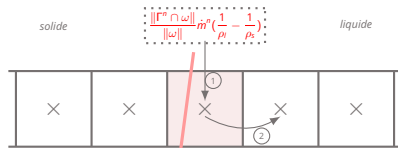
$$\int_{\omega} \zeta(t) dx = \int_{\Gamma(t) \cap \omega} \dot{m}(t) \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s} \right) d\sigma dt. \quad (16)$$

Discrétisation

$$\zeta^n = \frac{\|\Gamma^n \cap \omega\|}{\|\omega\|} \dot{m}^n \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s} \right). \quad (17)$$

Modification de l'espace de projection

$$\frac{\eta}{\eta + \chi} \nabla_h \cdot \left(\frac{1}{\rho_f^n} \nabla_h p^{n+1} \right) = -\frac{1}{\Delta t} \nabla_h \cdot \mathbf{u}^* + \frac{1}{\Delta t} \zeta^n. \quad (18)$$



Calcul de \mathbf{u}^Γ :

$$\mathbf{u}^{\Gamma,n} = -\nabla \cdot \left(\frac{\dot{m}^n}{\rho_s} d^n \right), \quad (19)$$

1. Déplacement théorique de la fonction couleur χ ,
2. déplacements des marqueurs m_k ,
3. algorithme de remaillage, lissage, barycentrage,
4. correction du déplacement des marqueurs à l'aide de la fonction χ ,
5. mise à jour de la fonction χ 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 :

$$(\delta T_k^{n+1}) = (\delta T^n) + \frac{\lambda_s \Delta t}{\rho_s c_{p,s}} \Delta_h T_s^n - \Delta t \nabla_h \cdot (\mathbf{u}^{T,n} \delta T_s^n). \quad (20)$$

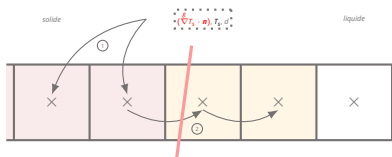
définie sur tout le domaine. On se concentre, dans la suite, sur l'équation thermique du solide.

Température d'interface définie par méthode Ghost-Fluid

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

$$(\nabla T_s \cdot \mathbf{n}) = \frac{T^\Gamma - T_s}{d}. \quad (21)$$

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



3/ Calcul d'une température fantôme T_s^g sur les mailles liquides.

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

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 :

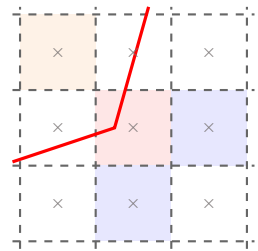
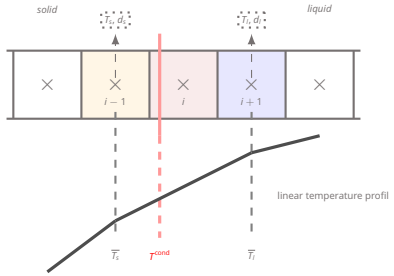
$$T^{\Gamma} = \begin{cases} T^{\text{fus}} & \text{si la maille mixte est en fusion,} \\ T^{\text{cond}} & \text{si la maille mixte est en conduction,} \\ T^{\text{sol}} & \text{Si la maille mixte est en solidification.} \end{cases} \quad (24)$$

où $T_{i,j}^{\text{cond},n+1}$ est calculée le cas échéant.

Pour approcher T^{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 :

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

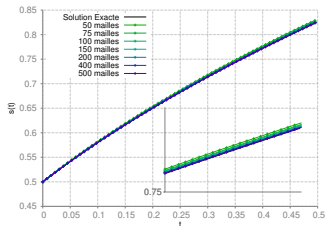
où :

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

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.

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

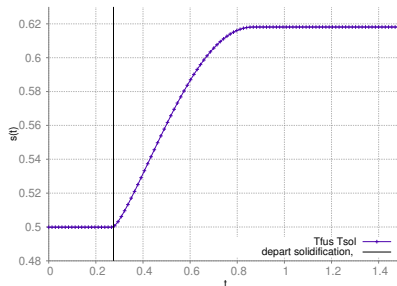
Solide et liquide de même nature, densité différente



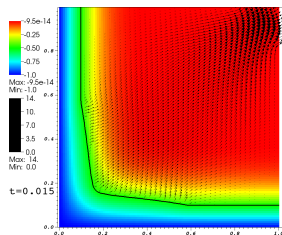
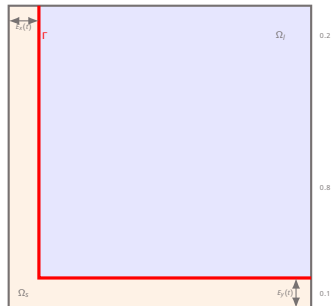
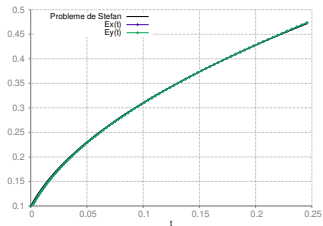
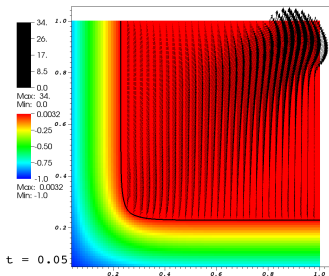
N_x	Δx	L^2 error	L^2 order
50	0.08	$4.072E-3$	-
75	0.053	$2.752E-3$	0.95
100	0.04	$2.068E-3$	1.02
150	0.027	$1.368E-3$	1.05
200	0.02	$1.011E-3$	1.01
400	0.01	$5.137E-4$	0.98
500	0.008	$4.172E-4$	0.93
-	-	L^2 average \rightarrow	0.99



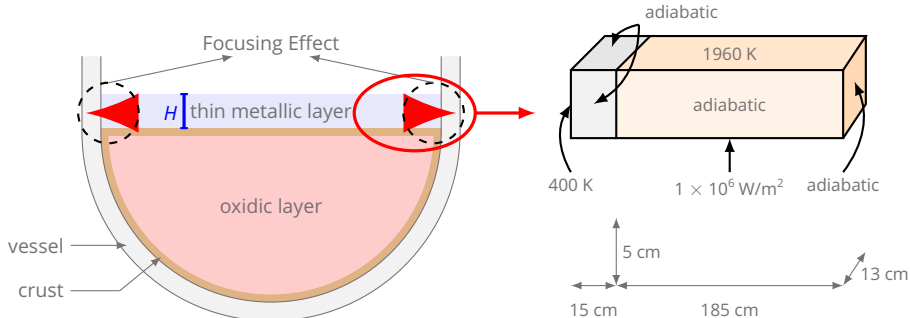
Solide et liquide de nature différente



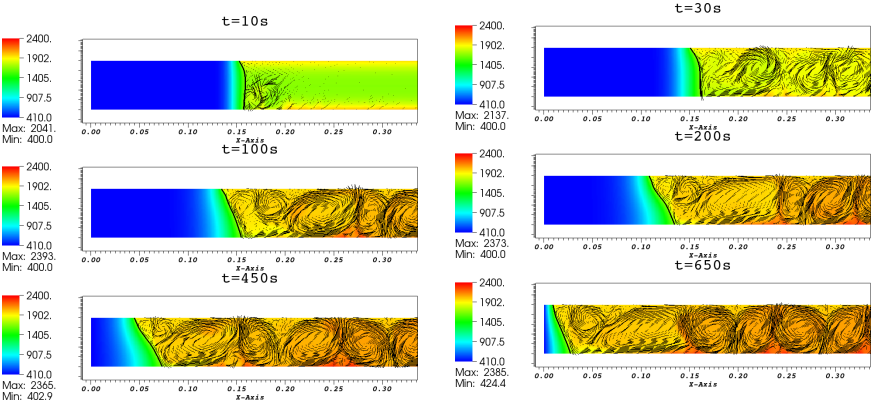
Solide et liquide de même nature, densité différente



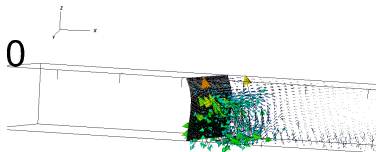
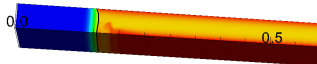
Cas test de la couche mince : présentation du cas test



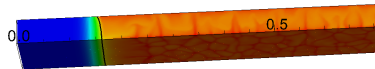
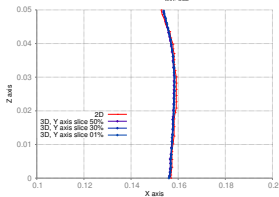
Parameter	Value
Density ρ	6720 kg/m^3
Coefficient of thermal expansion, β	3×10^{-5}
Thermal conductivity, λ	20 W/mK
Fusion temperature, T^{fus}	1658 K
Enthalpy of fusion, $\Delta f f / H^{\text{fus}}$	$2.76 \times 10^5 \text{ J/kg}$
Heat capacity, C_p	674 J/kg K
Kinematic viscosity, μ	$4.5696 \times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



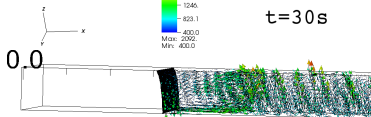
t=10s



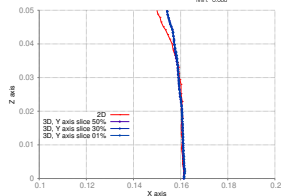
t=10s



t=30s



t=30s



Conclusion et perspectives

Modèle 2D 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 validation on 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'état d'interface et écriture d'un modèle CFD les prenants en compte.
- Adaptation d'une méthode VOF-FT à notre problématique liquide solide.
- Méthode de pénalisation utilisée 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.
- Un cas test plus industriel (simulation de la couche métallique légère) a été réalisé, une illustration 3D est proposée.

- ▶ Poursuivre la validation du modèle 2D développé dans PROCOR, notamment avec une comparaison entre code.
- ▶ Complexifier 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'autre modélisation, par exemple dans un cadre d'interaction corium-béton.
- ▶ Introduire le suivi des espèces dans le modèle de CFD.
- ▶ 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.
- ▶ Amélioration de la méthode d'interpolation utilisée dans la méthode Ghost-Fluid. Éventuellement remplacement de la méthode Ghost-Fluid pour une méthode plus adaptée.
- ▶ Benchmark avec d'autre code liée à une campagne d'essais LIVE à venir.
- ▶ Poursuite de l'étude de la couche mince avec ajout de méthodes LES (Large Eddy Simulation) pour la modélisation de la turbulence.
- ▶ Possible collaboration avec des équipes canadiennes sur un benchmark portant sur une configuration 3D.

Bibliographie

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives - www.cea.fr

- ▶ Viot, L., 2018. **Couplage et synchronisation de modèles dans un code scénario d'accidents graves dans les réacteurs nucléaires.** ENS Paris-Saclay.
- ▶ 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.
- ▶ 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.

- ▶ 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., 2011. **Transferts de masse et d'énergie aux interfaces liquide / vapeur avec changement de phase : proposition de modélisation aux grandes échelles des interfaces.** Université de Grenoble.
- ▶ 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.

Merci pour votre attention