



Accidents graves des réacteurs nucléaires

**Comportement et rétention du
corium en cuve d'un réacteur à
eau légère**

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

Cycles nucléaires - filière ENSE3/IEN

Janvier 2021

Romain Le Tellier, Jules Delacroix, Pascal Piluso, CEA Cadarache
(romain.le-tellier@cea.fr) **IRESNE/DTN/SMTA/LMAG**

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

- ▶ Connaître les *phénomènes physiques* déterminant vis-à-vis du comportement du *corium dans le fond de cuve* et l'évaluation du risque de percement de la cuve d'un réacteur à eau légère
- ▶ Faire le lien entre une partie de ces phénomènes (thermohydrauliques) et l'enseignement général en *mécanique des fluides, thermohydraulique* dispensé à l'ENSE3
- ▶ Être sensibilisé à la *complexité supplémentaire* apportée par le caractère *"multicomposant"* du fluide "corium" (couplage thermohydraulique-thermochimie)
- ▶ Avoir une idée concrète des *activités de R&D menées au CEA* sur ce sujet et des opportunités (stages, thèses) associées!

► Contexte

- Rappel du contexte général
- Ce cours : Stratégie de rétention en cuve

► Le corium en fond de cuve : version simple

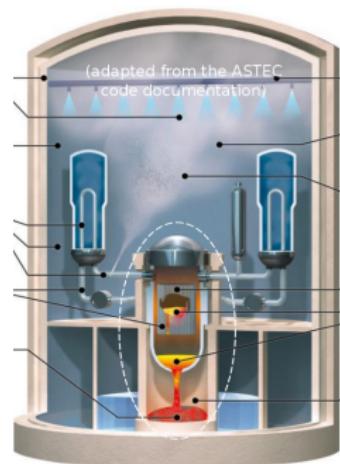
- Thermohydraulique de la couche métallique supérieure
 - Conditions thermiques en limites axiales : instabilité de Rayleigh-Bénard
 - Conditions thermiques en limite latérale : refroidissement
- Thermohydraulique du bain oxyde
 - Solidification à l'interface
 - Convection naturelle par chauffage volumique
- TD : évaluation du bilan thermique intégral

► Le corium en fond de cuve : est-ce si simple ?

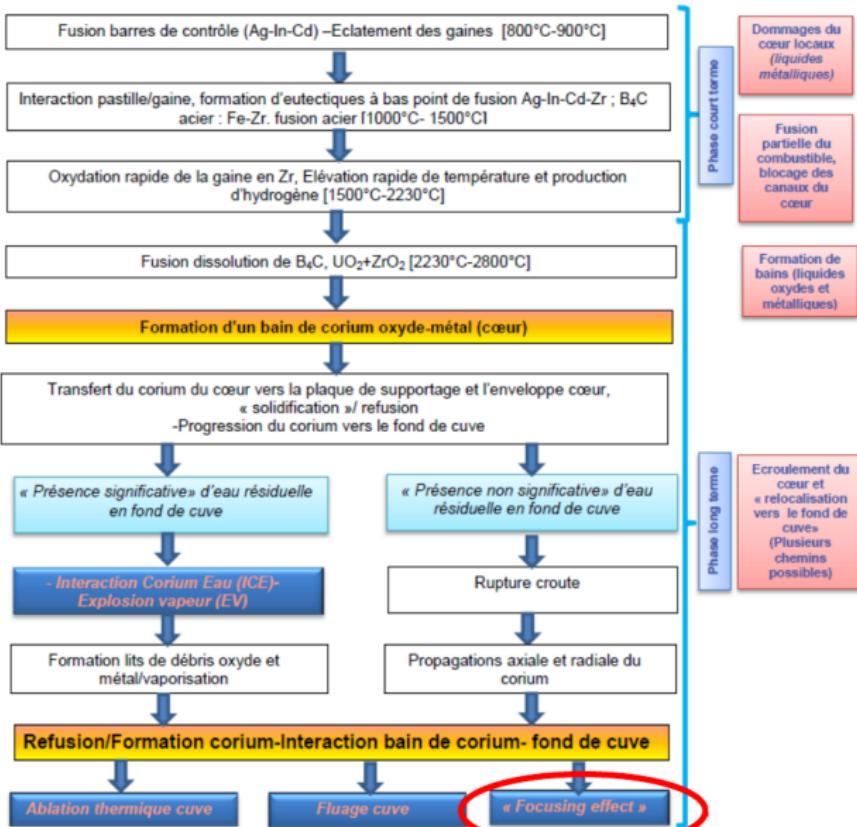
- Thermohydraulique d'une couche métallique supérieure mince
 - Conditions thermiques en limite haute : transfert radiatif et température inhomogène
 - Conditions mécaniques en limite haute : Instabilité de Bénard-Marangoni
- Corium en cuve et thermochimie
- Stratification des couches liquides
 - Equilibre thermodynamique de $(U_y, Zr_{1-y}) O_{2-x} + (Fe, \dots)$
 - Cinétique de stratification : échange interfacial et instabilité de Rayleigh-Taylor

► Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire

- ▶ Dans le cadre de l'étude des "*accidents graves*" des réacteurs à eau légère
→ améliorer les moyens de prévention et mitigation associés
- ▶ Accidents de *fusion du cœur* ← perte de refroidissement, puissance résiduelle
 - *dégradation du cœur* : oxydation exothermique (gaines en ZY), fusion (acier, Zr), dissolution puis fusion (ZrO_{2-x} , UO_2)
→ *formation d'un bain de "corium"*
 - *relocalisation dans le fond de la cuve*
→ interaction corium-eau et risque d'explosion vapeur;
comportement du corium en fond de cuve et risque de perte d'intégrité de la cuve
 - relocalisation dans le puits de cuve
→ interaction corium-eau et risque d'explosion vapeur;
également, interaction corium-béton et risque de percement du radier
- ▶ "*Physique*" du corium : "mal connue"
 - *phénomènes* nombreux, pas forcément clairement identifiés ou "*mal connus*"
 - des *échelles temporelles et spatiales* pouvant très *différentes*



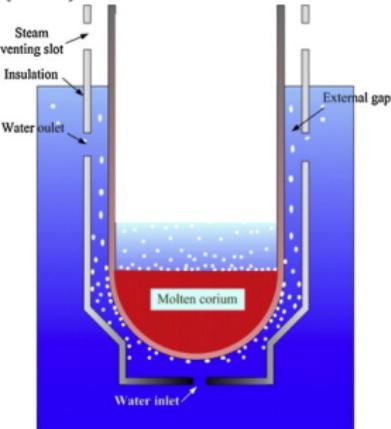
Dégradation en cœur et progression de l'accident vers le fond de cuve (cf. cours de P. Piluso)



Ce cours : stratégie de rétention en cuve

Rétention du corium en cuve ou "In-Vessel Retention" (IVR)

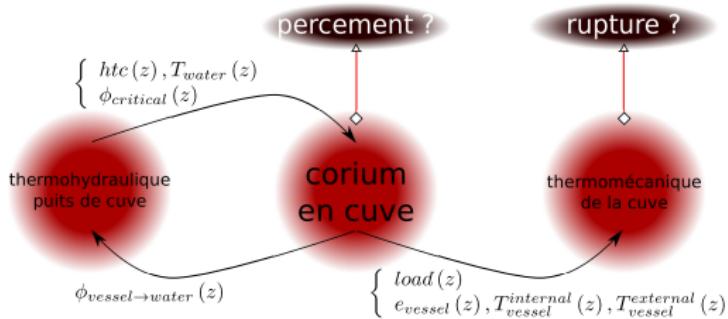
- ▶ Quoi? Une *stratégie de gestion de l'accident de fusion du cœur* introduite dans les années 1990
[Henry and Fauske, 1993, Tuomisto and Theofanous, 1994]
- ▶ Pourquoi? *Garder l'intégrité de la cuve* pour y contenir les matériaux fondues du cœur
- ▶ Comment? *Dépressurisation précoce* de la cuve et *renoyage précoce du puits de cuve*
- ▶ Une mitigation réussie si :
 - le *refroidissement de la cuve* par circulation d'eau est "efficace" de manière à éviter une ablation (locale) de la cuve sur toute son épaisseur i.e.
rester en *régime d'ébullition nucléée* ↔ éviter la crise d'ébullition (assèchement)
↔ garantir que le *flux de chaleur* en paroi externe de la cuve reste *inférieur au flux critique*
 - la cuve, partiellement ablatée, *résiste mécaniquement* à la charge imposée (poids du bain et éventuels pics de pression) en transitoire et sur le long terme



Ce cours : stratégie de rétention en cuve

Trois sujets (interdépendants) pour une démonstration d'IVR :

- ▶ *comportement du corium en cuve*
- ▶ *thermohydraulique diphasique* de l'eau dans le *puits de cuve*
- ▶ *thermomécanique de la cuve*



Vue schématique des thématiques associées à une démonstration d'IVR

On se concentrera ici sur la question du *comportement du corium en cuve*

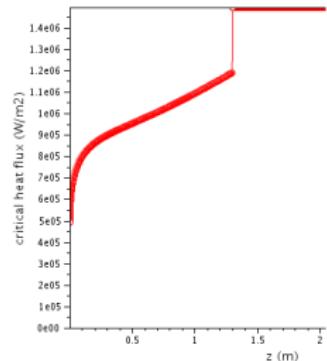
- ▶ thermohydraulique multiphasique → chargement thermique sur la cuve
- ▶ système ouvert ← apport d'acier fondu par ablation de structures internes et de la paroi de la cuve

Ce cours : stratégie de rétention en cuve

- ▶ *Changement thermique sur la cuve* à comparer, en premier lieu, au *flux critique*
- ▶ Nombreuses expériences (à diverses échelles) pour caractériser ce flux critique
→ une "diversité" de valeurs associée, en particulier, à des effets locaux (chimie de l'eau et état de surface de la cuve) et un profil selon la position le long de la cuve

| | | Material / Water | Parameter range | Limitation |
|---------|--|---|--|--|
| MIT/EDF | $CHF = Y_1 \left(\frac{P}{P_c} \right)^{Y_2} \left(\frac{G}{10^3} \right)^{Y_3} \left[1 - Y_4 \left(\frac{G}{10^3} \right)^{0.5} X_e \right] \left[\frac{3}{2} - \frac{1}{4} \cos(2\theta) \right]$ | French - US RPV steel with oxides in service / BA+STB chemistry | G : 250-2000 kg/m ² /s Theta : 30 to 90° P : 1 to 4 bar ΔT_{sub} : 3 to 17 K | Can not be used for other RPV material / water chemistry / parameters range |
| KAIST | Several correlation in the form $q''_{CHF} = \rho_l h_f g u_l \frac{\delta_m}{l}$ | SS (SUS304), SA508, DI, BA, TSP | G : < 300 kg/m ² /s theta : 30 to 90° | Can not be used for other RPV material / water chemistry / parameters range |
| ULPU | Several correlation in the form $CHF = K_0 + \sum K_i * \Theta^i$ | Copper, DI water | AP ranges | One correlation for one AP geometry. Not corrected for water chemistry / material effect |
| SULTAN | $F = A_0(E, P, G) + A_1(E, G)*X + A_2(E)*X^2 + A_3(E, P, G, X)*\Theta + A_4(E, P, G, X)*\Theta^2$ | Stainless steel, DI water | G : 10-5000 kg/m ² /s Theta : 30 to 90° P : 1.6 to 4 bar | Not corrected for water chemistry / material effect |

Différentes corrélations de flux critiques (Tableau tiré de [Atkhen, 2020])



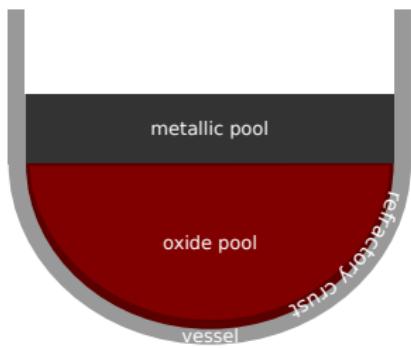
Corrélation ULPU appliquée à un fond de cuve en calotte sphérique

- ▶ Le *flux critique dans la partie haute de la cuve* $\sim 1.5\text{-}2.5 \text{ MW.m}^{-2}$

Le corium en fond de cuve : version simple

Evaluation *stationnaire "enveloppe"* des flux de chaleur transmis à la cuve

- ▶ approche "historique" utilisée en particulier dans la *démonstration de sûreté* des réacteurs AP600 puis *AP1000* [Esmaili and Khatib-Rahbar, 2004]
- ▶ dans sa version initiale, *configuration "à deux couches"* :

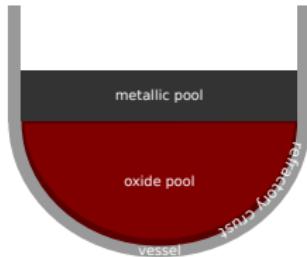


- en bas : une *phase oxyde* entourée d'une croûte réfractaire
- en haut : une *phase métallique* en contact direct avec la paroi de la cuve en fusion
- masses et compositions de ces deux couches obtenues à partir de simulations de la dégradation en cœur et d'hypothèses simplistes sur la fusion des structures et de la paroi de la cuve

Configuration à deux couches

- ▶ utilisée pour des *études statistiques avec une modélisation intégrale* (cf. TD à venir) : paramètres du modèle et définissant la configuration en fond de cuve "probabilisés"

Deux configurations d'*écoulements en convection naturelle* :

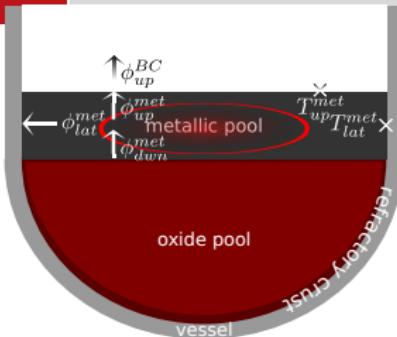


- ▶ couche métallique supérieure chauffée par le dessous, refroidie latéralement, par le dessus
- ▶ bain oxyde chauffé "en volume" et refroidie à sa frontière

Propriétés des liquides mis en jeu et comparaison à l'eau liquide

| Propriété | Unité | Valeur (<i>ordre de grandeur</i>) Oxyde | Valeur eau Métal | Valeur eau à 25°C, 1bar |
|---|----------------------------------|--|---------------------|----------------------------|
| masse volumique ρ | kg.m^{-3} | 8000 | 7000 | 997 |
| conductivité thermique λ | $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ | 5 | 25 | 0.61 |
| <i>viscosité cinématique</i> ν | m^2s^{-1} | 5×10^{-7} | 5×10^{-7} | 8.9×10^{-7} |
| capacité calorifique massique C_p | $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ | 500 | 800 | 4182 |
| coefficient de dilatation thermique isobare β | K^{-1} | 10^{-4} | 10^{-4} | 2.6×10^{-4} |
| diffusivité thermique $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ | m^2s^{-1} | 10^{-6} | 4×10^{-6} | 1.5×10^{-7} |
| $Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{diffusivité de la quantité de mouvement}}{\text{diffusivité de la chaleur}}$ | - | 0.5 | 0.1 | 5.9 |

■ **Nota Bene** On considérera que le corium en cuve peut être traité comme un fluide Newtonien (dans la gamme de température/composition d'intérêt); cf. prochain cours (J. Delacroix) pour le corium "hors-cuve" et les limites de cette hypothèse ■



- ▶ en bas (croûte) : *sans glissement*, ϕ_{dwn}^{met} imposé
- ▶ latéralement (cuve) : $\left\{ \begin{array}{l} \text{sans glissement} \\ T_{lat}^{met} \text{ imposée (fusion)} / \phi_{lat}^{met} = \phi_{vessel}^{lat} \end{array} \right.$
- ▶ en haut : $\left\{ \begin{array}{l} \text{sans glissement / surface libre} \\ \text{température imposée} T_{up}^{met} / \phi_{up}^{met} = \phi_{BC}^{met} \end{array} \right.$

- ▶ Sous l'*hypothèse de Boussinesq*, équations de conservation locales :

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Bilan thermique intégral :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu_0 \Delta \vec{v} - \vec{g} \beta_0 (T - T_0)$$

$$mCp \frac{d\bar{T}}{dt} = \phi_{dwn}^{met} S_{dwn}^{met} - \phi_{lat}^{met} S_{lat}^{met} - \phi_{up}^{met} S_{up}^{met}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T = \alpha_0 \Delta T$$

- ▶ Les "*paramètres de contrôle*" sont :

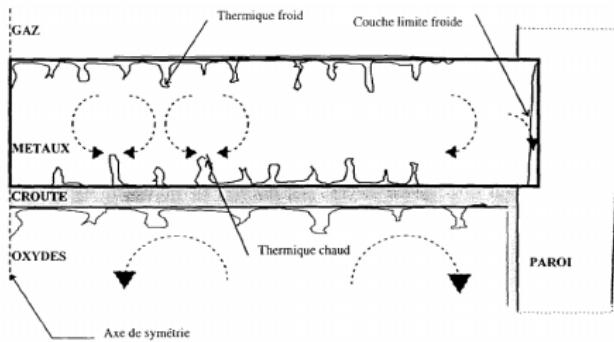
- $Pr, Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2} = \frac{\text{forces de gravité}}{\text{forces visqueuses}}$ (ou $Ra = Gr \cdot Pr$)

- le rapport d'aspect $\frac{H}{R}$ (cylindre de rayon R , hauteur H)

- éventuellement d'autres selon les conditions en limite supérieure

- ▶ Les "*quantités d'intérêt*" sont Nu_{lat} et Nu_{up} ($Nu = \frac{\text{flux de chaleur convectif}}{\text{flux de chaleur conductif}} = \frac{htc \times L}{\lambda}$)

- ▶ De première importance car possibilité de *concentration de flux ("focusing effect")*
i.e. $\frac{\phi_{lat}^{met}}{\phi_{dwn}^{met}} > 1 \rightarrow$ *risque principal de percement "thermique" de la cuve*
- ▶ Configuration étudiée expérimentalement e.g. dans la *campagne BALI-Metal* (CEA Grenoble) : avec de l'eau (ΔPr), en géométrie parallélépipédique $\rightarrow \frac{\phi_{lat}^{met}}{\phi_{dwn}^{met}} (H)$
- ▶ Schéma grossier de l'écoulement (Figure tirée de [Villermaux, 1999])



- couche de fluide plus chaud en bas
 \rightarrow panaches ("thermiques") chauds intermittents
- couche de fluide plus froid en haut
 \rightarrow panaches froids intermittents
- couche limite froide latérale
 \rightarrow accélération locale

- ▶ Transition d'un écoulement laminaire à turbulent "à partir" de $H \sim 10\text{cm}$
- ▶ *En première approche*, écoulement appréhendé comme la "*juxtaposition*" de cellules de *convection Rayleigh-Bénard* et d'une *recirculation à la frontière latérale*

Couche métallique supérieure - instabilité de Rayleigh-Bénard

- Ecoulement *conditionnellement instable* $Ra > Ra_c$ et transition *laminaire - turbulent* ("douce" puis "dure" puis "asymptotique")

(Figures tirées de [Gauthier, 2008])

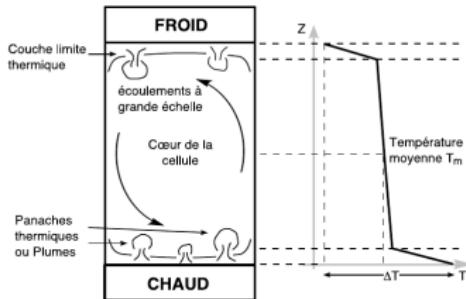


FIGURE 1.1 – Schématisation de l'écoulement à l'intérieur d'une cellule de Rayleigh-Bénard (à gauche). Profil moyen de température suivant la hauteur de la cellule (à droite).

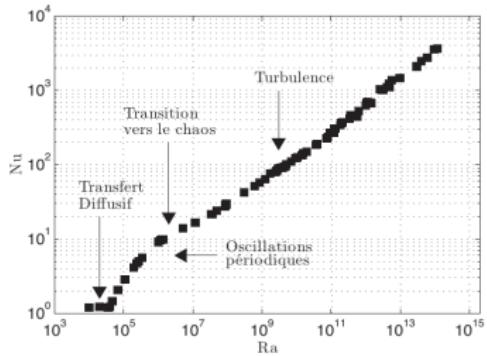


FIGURE 1.3 – Nombre de Nusselt Nu en fonction du nombre de Rayleigh Ra (Chavanne [2001]).

- turbulence "douce" ($Ra_t < Ra < 10^7$) : hypothèse de Markus (couches limites haute et basse indépendantes) → épaisseur $\delta = \frac{H}{2Nu}$ indépendante de $H \rightarrow Nu \propto Ra^{\frac{1}{3}}$
- au-delà, turbulence "dure" → $Nu \propto Ra^{\frac{2}{7}}$; asymptotique → $Nu \propto Ra^{\frac{1}{2}}$

■ **H. Bénard (1900)** "Je n'ai pas la prétention d'avoir épuisé un sujet aussi nouveau : bien des points restent à éclaircir, même sans sortir du point de vue expérimental; mais je serais heureux si mon travail, tout incomplet qu'il est, contribuait à attirer l'attention des expérimentateurs sur les domaines inexplorés de la Physique moléculaire et de la Mécanique des fluides" ■

→ Un vœu exaucé ! Toujours *un sujet "intense" de recherche* (simulation numérique et expérience)

- ▶ Ecoulement *inconditionnellement instable*
- ▶ *Impact sur le profil de température* pour Pr faible (Figure tirée de [Tran and Kudinov, 2013])

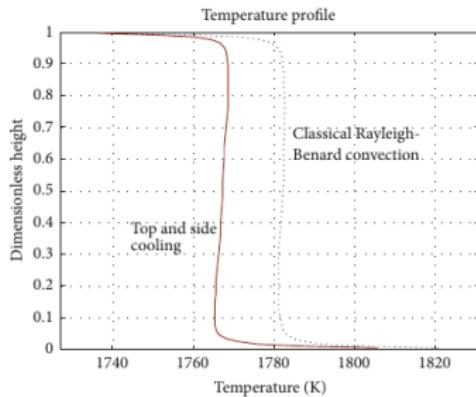
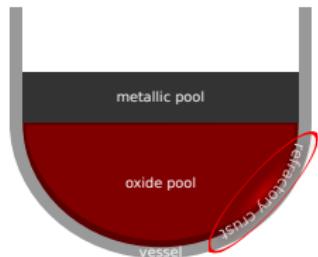


FIGURE 3: Temperature profiles across the fluid layer in two configurations of cooling (with/without side cooling).

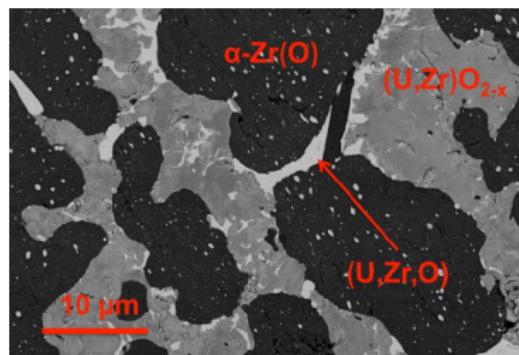
- ▶ Malgré (à cause?) de la complexité pour cette couche métallique, les *modèles intégraux* ou "grossièrement maillés" ont recours à des *corrélations* établies séparément pour des *configurations "unidimensionnelles"* → cf. TD
- ▶ Avec des limites (et des perspectives) que nous aborderons en 2^{ème} partie de cours

Bain oxyde - solidification à l'interface

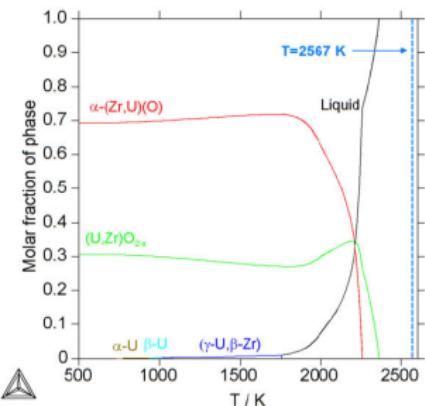


- ▶ Corium oxyde : *système ternaire* $(U_y, Zr_{1-y}) O_{2-x}$ "en manque d'oxygène" ($x \geq 0$)
- ▶ Température de liquidus $T_{liq}^{oxyde} \in [2300, 2950]K$ suivant y et x , toujours supérieur à $T_{liq}^{acier} \sim 1600K \rightarrow$ *solidification à l'interface bain oxyde/cuve*

Figures tirées de [Quaini, 2015] (échantillon $O_{0.39} U_{0.103} Zr_{0.507}$)



microstructure observé



chemin de solidification ("lever-rule") calculé

- ▶ Solidification d'un *matériau multicomposant* potentiellement *compliquée* ...

- ▶ ... corium $(U_y, Zr_{1-y}) O_{2-x}$: le plus souvent, les *hypothèses simplificatrices* suivantes :
 - un *front de solidification à l'équilibre thermodynamique* → phase solide formée associée $(U_{y'}, Zr_{1-y'}) O_{2-x'}$ à la température de liquidus du liquide à l'interface
 - *variations de composition négligées* (liquide homogène et $x' = x, y' = y$)
- ▶ Ainsi, *comme pour un "corps pur"*, solidification à l'interface régit par le déplacement d'un *front plan* (*condition de Stefan*, cas particulier du théorème de Kotchine)
 - température imposée à l'interface $T^{ls} = T_{liq}^{oxyde}$
 - condition de saut sur les flux à l'interface liquide/solide ls :

$$\vec{v}^{ls}(\vec{r}, t) = \frac{\vec{n}^{ls}}{\rho_l \Delta h_{ls}} (-\lambda_l \nabla T_l(\vec{r}, t) + \lambda_s \nabla T_l(\vec{r}, t)) \cdot \vec{n}^{ls}$$

(vitesse locale)

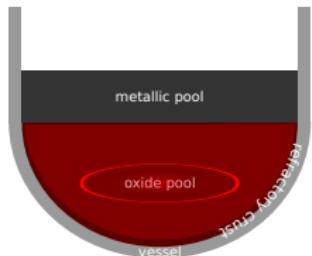
- \vec{n}^{ls} : normal orientée du liquide vers le solide

$$\frac{dm^{ls}(t)}{dt} = \frac{1}{\Delta h_{ls}} (\phi_l^{ls}(t) - \phi_s^{ls}(t)) S^{ls}$$

(débit massique intégral)

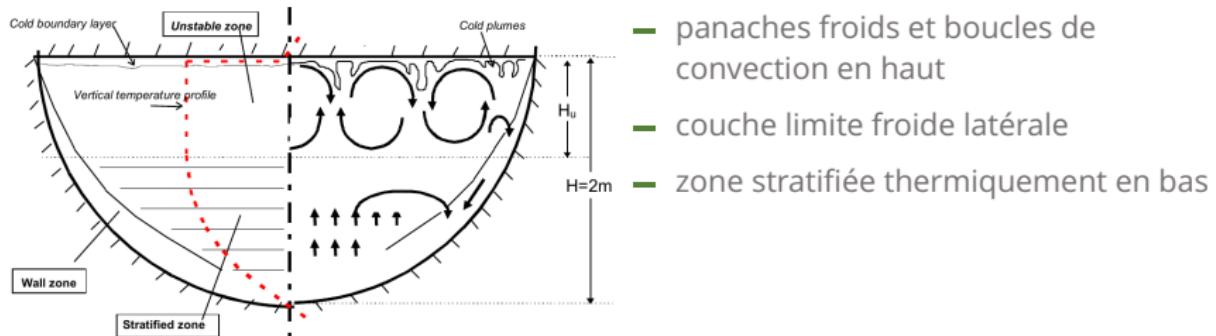
- Δh_{ls} : chaleur latente spécifique de solidification

- ▶ En géométrie *1D plan*, en *régime stationnaire*, épaisseur du solide (sans dissipation interne de puissance) donnée par $e_s = \lambda_s \times \frac{\text{différence de température d'un bord à l'autre}}{\text{flux de chaleur}}$

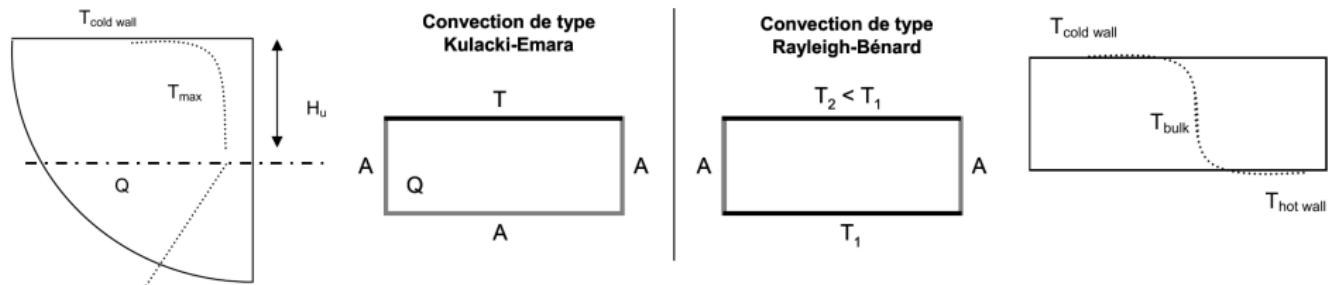


- ▶ **chauffage "en volume"** (puissance résiduelle associée à la décroissance des produits de fission) : puissance volumique q^{ox} (W/m^3)
- ▶ refroidissement en surfaces latérale et haute
- ▶ en **régime turbulent** : $Ra_i^{ox} = \frac{g(H^{ox})^5 q^{ox} \beta^{ox}}{\lambda^{ox} \nu^{ox} \alpha^{ox}} \in [10^{14}, 10^{18}]$

- ▶ Schéma de l'écoulement (Figure tirée de [Bonnet and Seiler, 1999])



- En première approche, pour l'*échange vers le haut*, parallèle entre cette *configuration de "Kulacki-Emara"* et une *cavité de Rayleigh-Bénard* de hauteur H_u



- avec un nombre de Rayleigh exprimé en fonction de $\Delta T = (T_{max} - T_{cold\ wall})$ et H_u
 - à l'état stationnaire : $S_{up} \times \left(\frac{\lambda Nu_{up}}{H_u} \right) \Delta T = V \times q$
 - ainsi, on peut travailler en nombre de *Rayleigh interne* $Ra_i = \frac{g(H_u)^5 q \beta}{\lambda \nu \alpha}$:
- $$Nu_{up}^{RB} = a \times Ra^b Pr^c \iff Nu_{up}^{KE} = 2a^{\frac{1}{b+1}} \times Ra_i^{\frac{b}{b+1}} Pr^{\frac{c}{b+1}}$$

- Pour l'*échange latéral* (surface sphéroïde), la *transposition est moins évidente ...*"

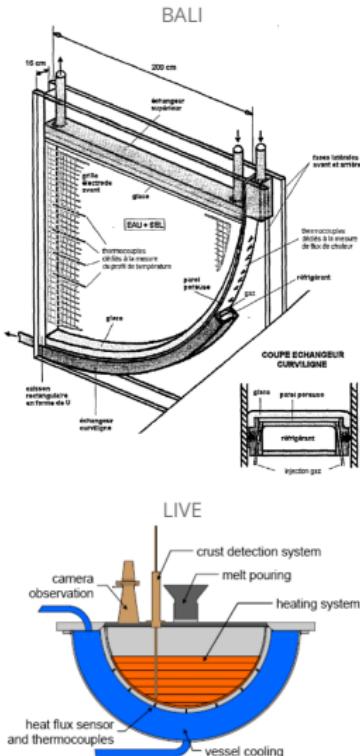
Bain oxyde - convection naturelle par chauffage volumique

- ... de nombreuses *expériences* ont été menées sur des "géometries fond de cuve" à échelle réduite avec différents matériaux simulants

| Experiments | Geometry | Scale | Heating | Simulant | Coolant | Ro^* | Pr | Boundary | Investigation emphasis |
|-------------|---|-----------------------------|-------------------------|---|-----------------|--|-----------|---|--|
| COPO-I | Semi-elliptical slice Length: 1.77 m Depth: 0.8 m Thickness: 0.1 m | 1:2 (VVER-440) | Joule heating | ZnSO ₄ -H ₂ O solution | Water | 10^{14} - 10^{16} | ≈ 3 | Isothermal top and bottom walls | Natural convection heat transfer in homogenously heated pools |
| COPO-II | -Semi-elliptical slice -Semicircular slice Radius: 1 m Thickness: 9.4 cm | 1:2 (VVER-440 and AP600) | Joule heating | - Corium: ZnSO ₄ -H ₂ O solution - Metal layer: Distilled water | Liquid nitrogen | 10^{14} - 10^{16} | ≈ 3 | Isothermal top and bottom walls | - Natural convection heat transfer in homogenously heated pools - Effect of crust formation - Effect of layer stratification |
| UCLA | Hemisphere Radius: 0.2183 m and 0.3005 m | 1:10 | Magnetron | Freon-113 | Water | 2×10^{10} - 1.1×10^{14} | 8.2-9.5 | Isothermal or insulated top wall and isothermal | - Natural convection heat transfer in homogenously heated pools - Effect of different boundary conditions |
| ACOPO | Hemisphere Radius: 1 m | 1:2 (AP 600) | No heating | Water | Water | 10^{12} - 2×10^{16} | ≈ 7 | Isothermal top and bottom walls | - Natural convection heat transfer in homogenously heated pools - Confirmation and extension of mini-ACOPO results |
| BALI | 1/4 circular slice Radius: 2 m Thickness: 15 cm | 1:1 (French PWR) | Joule heating | Salt water | Organic liquid | 10^{13} - 10^{17} | ≈ 7 | Isothermal top and bottom walls | - Natural convection heat transfer in homogenously heated pools - Effect of viscosity and porosity layer - Focusing effect of the top metal layer |
| RASPLAV | Semicircular slice Radius: 0.2 m Thickness: 16.7 cm | 1:10 | SDH DEH | UO ₂ -ZrO ₂ -Zr; NaNO ₃ -NaF-NaBF ₄ -KNO ₃ | Water | 4.7×10^{11} - 1.61×10^{13} | 4.56-7.74 | Insulated top wall and cooled bottom wall | - Natural convection heat transfer in homogenously heated pools - Prototypical material study - Effect of layer stratification - Effect of existence of non-eutectic mushy zone |
| SIMECO | Semicircular slice Radius: 0.25 m Thickness: 9 cm | 1:8 (AP 600) | Cable-type heaters | NaNO ₃ -KNO ₃ ; Paraffin-water-chlorobenzene ^a | Water | 9.6×10^{12} - 9.5×10^{13} | - | Isothermal top and bottom walls | - Natural convection heat transfer in homogenously heated pools - Effect of two-layer and three-layer stratification |
| LIVE | Hemisphere Radius: 0.5 m | 1:5 (German PWR) | Cable-type coil heaters | NaNO ₃ -KNO ₃ | Water | 2×10^{13} - 8×10^{13} | 8.1-10.4 | Insulated top wall and isothermal bottom wall | - Natural convection heat transfer in homogenously heated pools - Crust growth characteristics - Effect of initial relocation conditions |

^a Three-layer experiments in SIMECO program employed paraffin, water and chlorobenzene to simulate upper light metal layer, central oxide pool and lower heavy metal layer respectively.

extrait d'un tableau de [Zhang et al., 2015]



- ▶ Qui fournissent des *corrélations* pour fermer les bilans des *modèles intégraux*
- ▶ Une *dispersion des résultats qui augmente avec Ra*; !

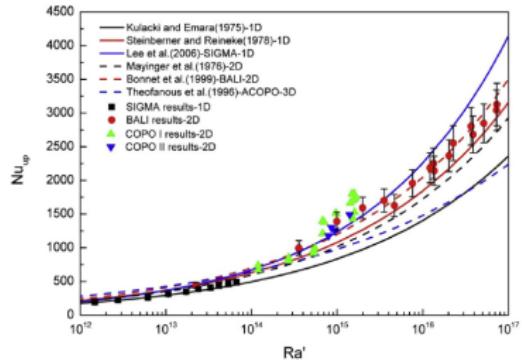


Fig. 3. Comparison of upward heat transfer in the high Rayleigh region.

(Figures tirées de [Zhang et al., 2015])

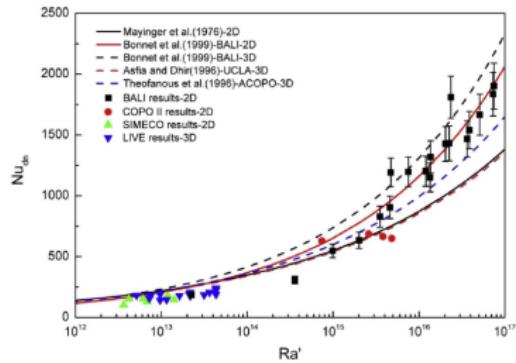
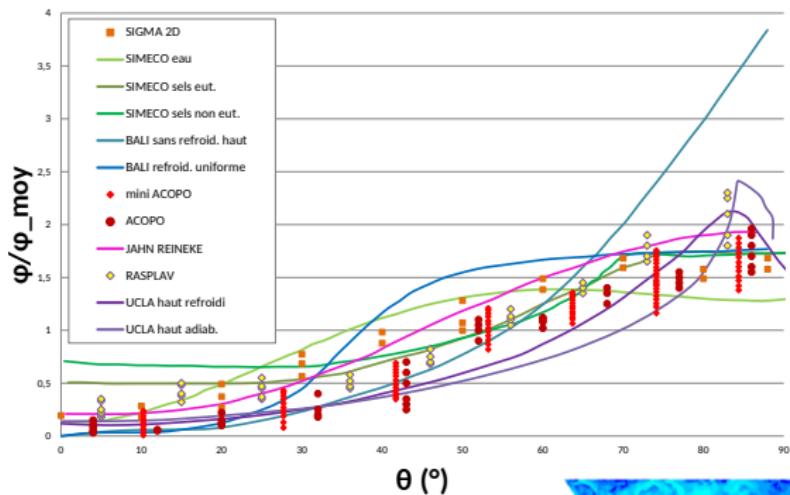


Fig. 4. Comparison of downward heat transfer in the high Rayleigh region.

- ▶ ... mais pas une source majeure d'incertitude pour l'évaluation de l'IVR ...

- En plus du flux moyen sur la surface latérale, on s'intéresse aussi au *profil de flux*

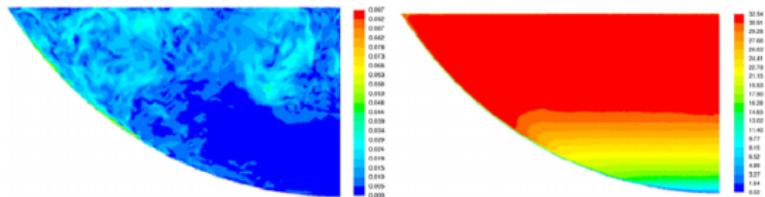
Résultats expérimentaux pour le flux local $\varphi(\theta)$ ($H/R = 1$)



- un *facteur de l'ordre 2* entre maximum de flux en partie haute et flux moyen
- une disparité des résultats expérimentaux suivants les fluides simulants et les conditions aux limites

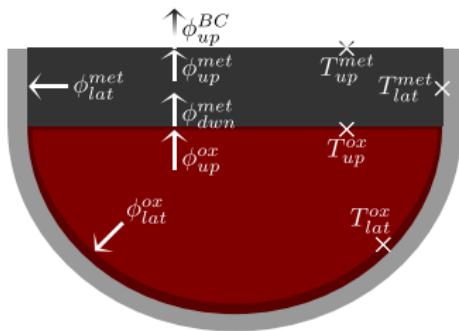
- Intérêt grandissant pour des simulations "Computational Fluid Dynamics" CFD

(Figure extraite de [Shams et al., 2020])



vitesse et température - calcul CFD-LES - essai BALI 1-15

TD : évaluation du bilan thermique intégral



Configuration à deux couches et notations des flux et températures

- ▶ Objectif : évaluation de la *répartition de la puissance et du flux de chaleur* aux interfaces d'un bain de corium
- ▶ *Configuration stationnaire à deux couches :*
 - en bas : une phase oxyde qui porte toute la puissance résiduelle entourée d'une croûte réfractaire
 - en haut : de l'acier liquide en contact direct avec la paroi de la cuve en fusion
- ▶ Hypothèses et fermetures classiquement utilisées dans les codes de calculs (et que l'on vient de présenter pour la plupart)

- ▶ description : [./TD/TD_description.pdf](#)
- ▶ notebooks Jupyter ("cahiers électroniques" en python 3 manipulables dans un navigateur web) :

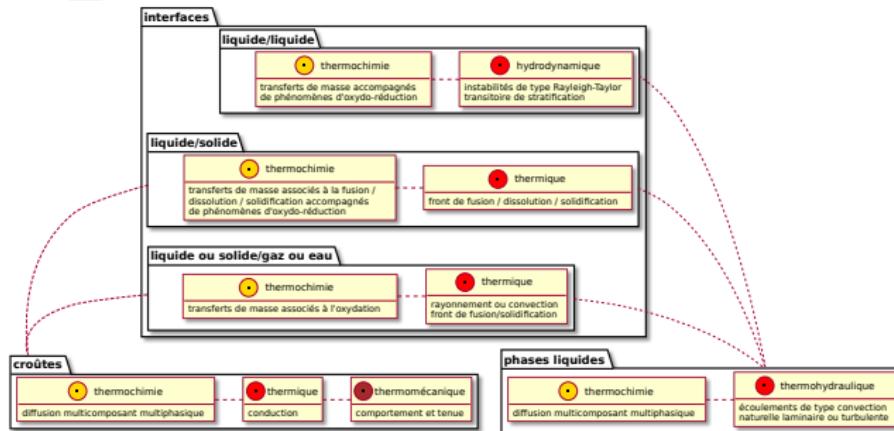
<https://mybinder.org/v2/gh/niamorelreillet/ENSE3-Cours/main?urlpath=lab>

Le corium en fond de cuve : est-ce si simple ?

Le corium en fond de cuve : est-ce si simple ?

Pas tout à fait...

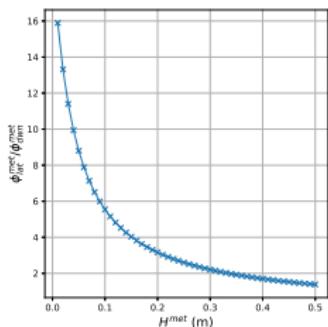
- ▶ En premier lieu car $(U_y, Zr_{1-y})O_{2-x} + (Fe, \dots) \neq$ système "inerte"
→ transfert de masse inter-couche et *changeement de stratification* en particulier
- ▶ Ainsi, une *évaluation stationnaire* du comportement du corium en cuve *ne suffit pas ... ça se complique* !



Représentation schématique et partielle de la modélisation du bain de corium en cuve

Mais avant de parler de "thermochimie", revenons d'abord au *comportement thermohydraulique de la couche mince* et intéressons nous au cas d'une *épaisseur faible* (transitoirement)

► *Bilan thermique intégral* tel qu'évalué au cours du TD



Concentration de flux vs. hauteur

de la couche métal (*cf. TD*)

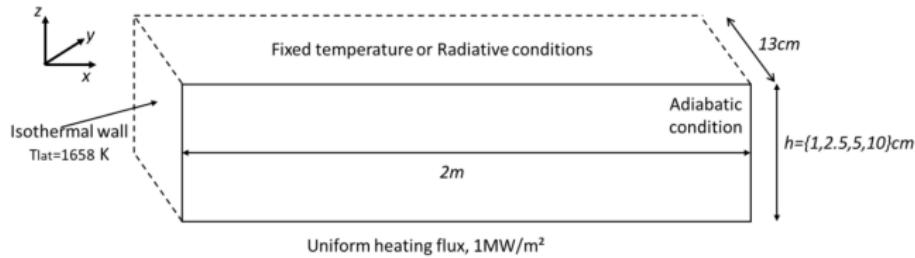
- Mais au fait, la surface haute est libre (en l'absence d'oxydation) → *quel impact de la déformation de la frontière haute ?*
- Des questions abordées très récemment dans le cadre du projet de recherche européen IVMR (2015-2019) → *illustration de la R&D menée au CEA*

Couche métallique supérieure - transfert radiatif en surface haute

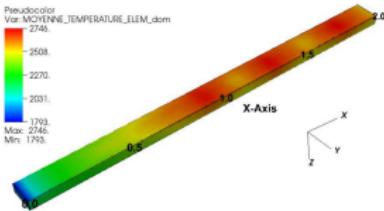
- ▶ Sans le dire, en assimilant le transfert de chaleur vers le haut à celui d'une cavité de Rayleigh-Bénard, on a considéré :

condition inhomogène de transfert radiatif \Leftrightarrow condition uniforme T_{up}^{met} imposée telle que

$$\phi_{up}^{BC} [T_{up}^{met}] = \phi_{up}^{met} [T^{met} - T_{up}^{met}]$$
 avec $\phi_{up}^{BC} [T_{up}^{met}] = \varepsilon_{up} \sigma \left((T_{up}^{met})^4 - (T^{BC})^4 \right)$
- ▶ *Impact de l'inhomogénéité de la condition en limite haute ?*
- ▶ *Etude* paramétrique par *simulations CFD* (code libre  développé au CEA) sur la géométrie parallélépipédique des essais BALI-Metal (voir [Peybernes et al., 2020])
 - En limite haute, T_{up}^{met} uniforme imposée ou bien condition radiative (locale)
 - $H^{met} \in [1, 10] \text{ cm}$



Domaine de calcul et conditions aux limites des calculs CFD



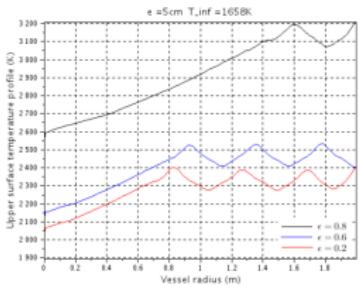
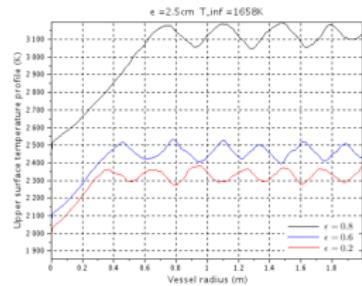
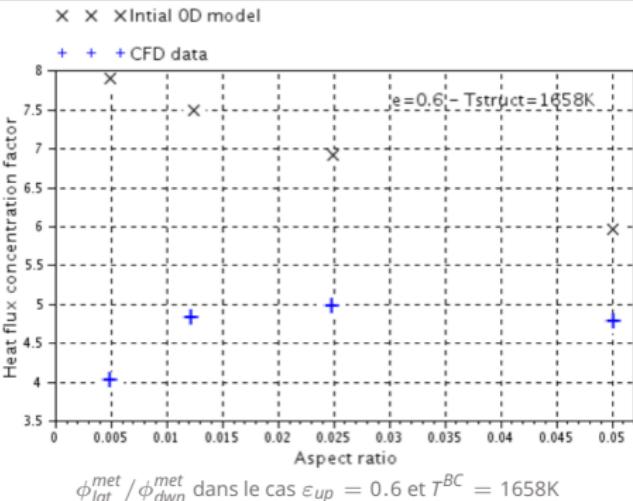
(moyennée en temps en régime pseudo-stationnaire)

Couche métallique supérieure - transfert radiatif en surface haute

► Rôle prédominant de la CL pour H^{met} faible

| Boundary condition | Fixed T_{up} 1960K | Fixed T_{up} 2200K | Fixed T_{up} 2460K | Radiative $T_\infty = 1658K$ and $\varepsilon = 0,2$ | Radiative $T_\infty = 1658K$ and $\varepsilon = 0,8$ | Radiative $T_\infty = 400K$ and $\varepsilon = 0,2$ | Radiative $T_\infty = 400K$ and $\varepsilon = 0,8$ |
|--------------------|--|-------------------------|-------------------------|--|--|---|---|
| Thickness in cm | | | | | | | |
| | Heat flux concentration factor ϕ_{lat} / ϕ_{dwn} (mean temperature T in K) (for radiative boundary condition T_{up} in K) | | | | | | |
| 1cm | 3,4 ($T = 2056K$) | 6,4 ($T = 2293K$) | 10,1 ($T = 2550K$) | 7,9 ($T = 3150K$, $T_{up} = 3060K$) | 3,3 ($T = 2391K$, $T_{up} = 2317K$) | 7,9 ($T = 3089K$, $T_{up} = 2988K$) | 1,9 ($T = 2228K$, $T_{up} = 2135K$) |
| 2.5cm | 3,0 ($T = 2073K$) | 5,5 ($T = 2308K$) | 8,4 ($T = 2559K$) | 9,6 ($T = 3098K$, $T_{up} = 3013K$) | 3,9 ($T = 2394K$, $T_{up} = 2301K$) | 8,8 ($T = 3030K$, $T_{up} = 2953K$) | 2,4 ($T = 2236K$, $T_{up} = 2141K$) |
| 5cm | 2,8 ($T = 2078K$) | 5,1 ($T = 2308K$) | 8,0 ($T = 2554K$) | 10,0 ($T = 2960K$, $T_{up} = 2909K$) | 4,1 ($T = 2361K$, $T_{up} = 2278K$) | 9,2 ($T = 2904K$, $T_{up} = 2849K$) | 2,6 ($T = 2210K$, $T_{up} = 2123K$) |
| 10cm | 2,5 ($T = 2082K$) | 4,6 ($T = 2302K$) | 7,1 ($T = 2550K$) | 9,3 ($T = 2752K$, $T_{up} = 2711K$) | 3,8 ($T = 2318K$, $T_{up} = 2233K$) | 8,3 ($T = 2698K$, $T_{up} = 2651K$) | 2,5 ($T = 2178K$, $T_{up} = 2086K$) |

$\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met}$ fonction de H^{met} et de la condition en limite haute



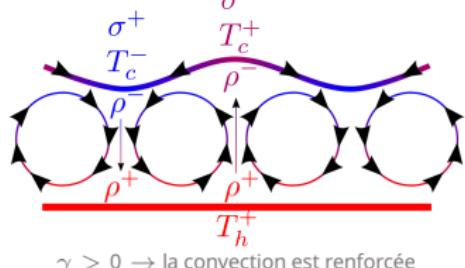
Profil radiaux de température pour $H^{met} = 2.5cm$ et $H^{met} = 5cm$

► Deux nombres adimensionnels en plus avec condition radiative
e.g. **nombres de Stefan** (= Pe/Th)
 $St \equiv \frac{\varepsilon \sigma Th}{\lambda}$

► Nouvelle corrélation
 $Nu_{up} = a \times Ra^b Pr^c St_1^d \left(1 + eSt_2^f \right)$

Couche métallique supérieure - instabilité de Bénard-Marangoni

- ▶ Frontière supérieure (en l'absence d'oxydation) : une *surface libre déformable*
- ▶ Si la *tension de surface* $\sigma = f(T)$, un impact direct sur la thermohydraulique de la couche → *effet Marangoni*
- ▶ Considérons à nouveau uniquement l'*échange axial* (Rayleigh-Bénard) :



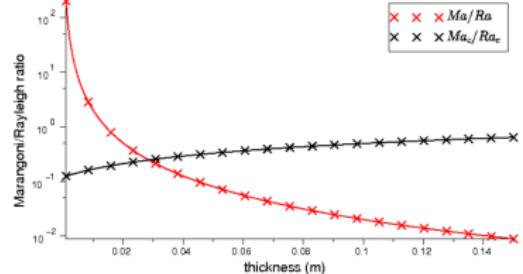
- linéarisation $\sigma(T) = \sigma_0 - \gamma(T - T_0)$ avec $\gamma = -\frac{d\sigma}{dT}(T_0)$
- $\gamma > 0 \rightarrow$ écoulement de surface dans le *même sens* que cellules de Rayleigh-Bénard
- $\gamma < 0 \rightarrow$ écoulement de surface dans le *sens opposé* des cellules de Rayleigh-Bénard

▶ Instabilité de Bénard-Marangoni thermique

- $Ma = \frac{\gamma H \Delta T}{\rho_0 \nu \alpha} = \frac{\text{effets thermocapillaires}}{\text{effets dissipatifs (viscosité et diffusion thermique)}}$
 - *instabilité conditionnelle* (combinée à Rayleigh-Bénard) : [Nield, 1964]
- $$\frac{Ra}{Ra_c} + \frac{Ma}{Ma_c} = 1 + \epsilon(Cr, Ga) \text{ avec } \begin{cases} Cr &= \frac{\rho \nu \alpha}{\sigma_0 H} = \text{déformation de la surface} \\ Ga &= \frac{g H^3}{\nu^2} = \frac{\text{effets de flottabilité}}{\text{effets visqueux}} \end{cases}$$

a priori, effet pouvant être important pour H faible

► *Evaluation a priori pour la couche métallique* (cf. [Saas et al., 2017])



- pour $H = 0.1\text{m}$, en considérant $\Delta T = 100\text{K}$ et $\gamma > 0$ (fer pur : $4 \times 10^{-4}\text{N.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), $Ga \approx 2 \times 10^{10}$, $Ra \approx 2 \times 10^7$, $Ma \approx 5 \times 10^5$, $Cr \approx 10^{-7}$
- $\frac{Ma}{Ma_c} \geq \frac{Ra}{Ra_c}$ pour $H \leq 3\text{cm}$
- $Cr \ll 1$ et $Ga \gg 1$: *déformation faible*
- un effet à prendre en compte *a priori* pour $H \leq \sim 5\text{cm}$
- simulation simplifiée avec une surface plane et une condition limite modifiée : $v_x = 0 \rightarrow \frac{\partial v_x}{\partial z} = Ma \frac{\partial T}{\partial x}$
- Mesures de $\sigma(T)$ sur l'installation VITI (CEA Cadarache) [Chikhi et al., 2019] : $\gamma < 0$ pour les aciers 304L (internes cuve) et 16MND5 (paroi cuve)
- *Etude* paramétrique par *simulations CFD* () sur la géometrie parallélépipédique des essais BALI-Metal (voir [Peybernes et al., 2019])

Couche métallique supérieure - instabilité de Bénard-Marangoni

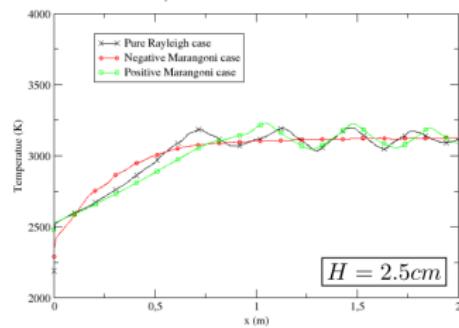
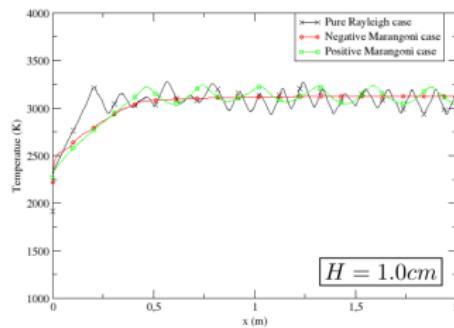
Quelques résultats extraits de cette étude [Peybernes et al., 2019]

$$\varepsilon_{up} = 0.8 \text{ et } T^{BC} = 400\text{K}$$

| | Cases | 1 cm | 2.5 cm | 4 cm |
|----------------------|-------------|--------|--------|--------|
| Mean Temperature | Pure Ra | 2228 K | 2237 K | 2230 K |
| | Positive Ma | 2176 K | 2172 K | 2156 K |
| | Negative Ma | 2289 K | 2307 K | 2312 K |
| Concentration factor | Pure Ra | 1.90 | 2.43 | 2.65 |
| | Positive Ma | 4.1 | 2.72 | 2.88 |
| | Negative Ma | 6.46 | 3.59 | 2.95 |

- ▶ $T_{(Ra+Ma<0)} > T_{(Ra)} > T_{(Ra+Ma>0)}$
- ▶ "Couplage" fort et non-intuitif avec le refroidissement latéral

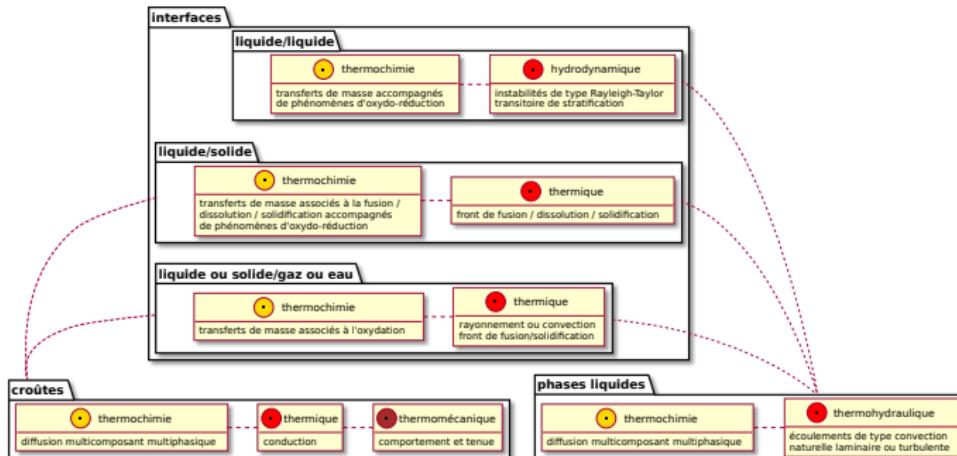
Profil radial de la température de la surface haute ($\varepsilon_{up} = 0.2$ et $T^{BC} = 1658\text{K}$)



- ▶ Loin de la surface latérale, convection "arrêtée" pour $Ma < 0$
- ▶ Près de la surface latérale, pour H faible, $Ma \leqslant 0 \rightarrow$ élargissement de la zone latérale de gradient thermique → refroidissement par transfert radiatif réduit dans cette zone
Aggravement du focusing effect mais large incertitude (e.g. Ma solutal, oxydation)

Le corium en fond de cuve : est-ce si simple ?

Passons maintenant à la "*thermochimie*" $(U_y, Zr_{1-y})O_{2-x} + (Fe, \dots) \neq$ système "inerte"



Représentation schématique et partielle de la modélisation du bain de corium en cuve

- ▶ Nombreux *phénomènes mal connus ou quantifiés*
- ▶ Un phénomène de *premier ordre*, le *transfert de masse inter-couche* qui, couplé avec l'hydrodynamique, conduit à des *changements de stratification*
- ▶ Présentation de la *phénoménologie* et ouverture sur la *R&D au CEA* sur ce sujet

- Lacune de miscibilité → deux liquides à l'équilibre (T donnée) avec $\rho_{met} \leq \rho_{oxy}$ suivant :



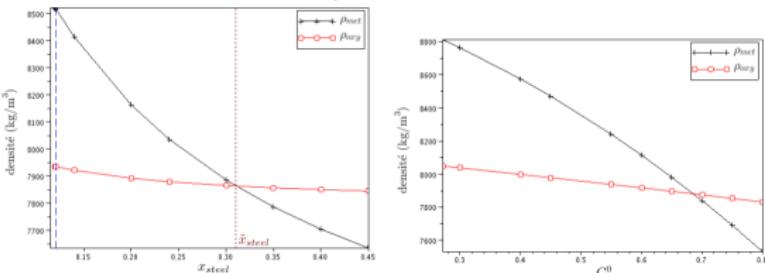
- le degré d'oxydation du Zr (C_n^0) et du rapport molaire U/Zr ($R_{U/Zr}^0$) du corium oxyde initial
- le rapport entre les masses d'acier et de corium oxyde initialement mises en présence (x_{steel})

- Expériences à "petite échelle"
- $\emptyset \leq 7\text{cm}$ et $m_{oxy} \sim 100\text{g à } 2\text{kg}$
- e.g. programme MASCA (OCDE) [Tsurikov et al., 2007]



From Tech. Report
[NEA/CSNI/R\(2007\)15](#)

Densités des phases oxyde (ρ_{oxy}) et métal (ρ_{met}) calculées à l'équilibre

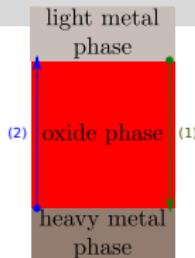
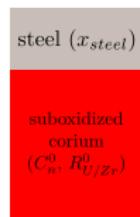


En fonction de x_{steel} pour
 $(\bar{T} = 2840\text{K}, C_n^0 = 36.5\% \text{ et}$
 $R_{U/Zr}^0 = 1.14) \rightarrow \text{MASCA-MA-3}$

En fonction de C_n^0 pour ($\bar{T} = 2855\text{K}$,
 $x_{steel} = 0.1$ et $R_{U/Zr}^0 = 1.17 \rightarrow$
 MASCA-MA-9)

- Représentation thermodynamique : méthode CALPHAD → Energie de Gibbs des phases φ
- Lois de densité ρ_φ (composition)

Cinétique de stratification



Etat "initial" (deux couches)

Etat transitoire (trois couches)

- ▶ Transitoire AG en fond de cuve
→ *apport progressif d'acier fondu*
- ▶ *Deux transitoires de stratification* associés à ces équilibres à deux couches potentiels :
 - (1) formation de la couche métallique lourde
→ *Aggravement du risque de focusing effect*
 - (2) retour à une stratification "normale"
→ *Remontée de métal "surchauffé"*

- ▶ Ce que l'on peut dire *a priori* des *phénomènes mis en jeu* :

- *transfert de masse interfacial* → transitoire (1) : U et Zr vers l'acier
(décalage à droite de $\text{UO}_2 + \text{Zr} \rightleftharpoons \text{ZrO}_2 + \text{U}$ dans l'oxyde à l'interface)
- transport de masse intra-phase
- "inversion" de $\rho_{oxy} \leq \rho_{met}$ → *instabilité de Rayleigh-Taylor*
- mouvement hydrodynamique d'inversion de la position des phases

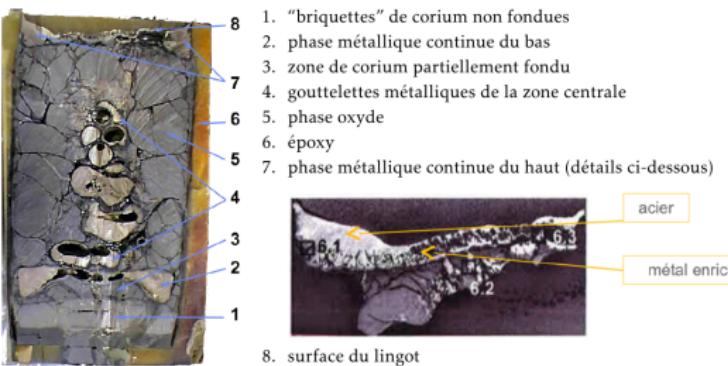
- ▶ Deux *cinétiques combinées* : ordres de grandeur pour (1) :

- transport de masse intra-phase : $\tau_m = \frac{H^2}{D} \frac{1}{Sh}$ (masse $\Leftrightarrow \tau_h = \frac{H^2}{\alpha} \frac{1}{Nu}$ chaleur)
dans le métal, pour $H = 5\text{cm}$, $Gr \approx 4 \times 10^7$, $Nu \approx 10$ (cf. TD)
en considérant $D = 5 \times 10^{-9}\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, $Sh/Nu \approx 80 \rightarrow \tau_m \approx 10\text{min}$
- vitesse terminale de goutte pour l'instabilité de Rayleigh-Taylor → $\sim 10\text{s.m}^{-1}$

→ *Transport intra-phase bien plus lent que mouvement hydrodynamique*

Observations expérimentales indirectes :

- Essais à "petite échelle" : équilibre atteint en *moins de 20'*, mouvement "en bloc" et très rapide à l'inversion des phases
- *Une seule expérience de plus grande échelle* (MASCA-RCW) stoppée au bout de 22' ($\varnothing \leq 18\text{cm}$ et $m_{oxy} \approx 45\text{kg}$ et $x_{steel} \approx 0.1$) - transitoire (1)



- état final ~ un instant du transitoire de formation de la phase métallique lourde
- Rayleigh-Taylor en gouttelettes
- gradient de concentration en U, Zr dans la couche métallique supérieure

- *Cinétique limitante : celle du transfert de masse* (transport multicomposant, multiphasique)
- Pour les cas réacteurs, évaluation du temps caractéristique :
~ 1h pour (1) et plus élevé pour (2) ...

- ▶ ... Une *incertitude forte* / des modèles (intégraux) en manque de calage/validation
 - MASCA-RCW ne donne qu'un information indirecte sur le transitoire
 - Aucune expérience caractérisant le transitoire (2) de retour à une stratification "normale"
 - Impact d'une croûte à l'interface oxyde/acier
- ▶ *Important! → meilleure quantification du comportement transitoire du corium en cuve*
- ▶ En particulier, *R&D au CEA* :
 - Modélisation et *simulation "mésoscopique"* (CFD) [Zanella et al., 2020]
 - Caractérisation expérimentale de la *dissolution d'une croûte de corium oxyde par de l'acier fondu* [Pivano et al., 2019]
 - Conception d'un *dispositif experimental* ~ MASCA-RCW mais avec *suivi en ligne des interfaces* par mesure acoustique [Cavaro et al., 2019]

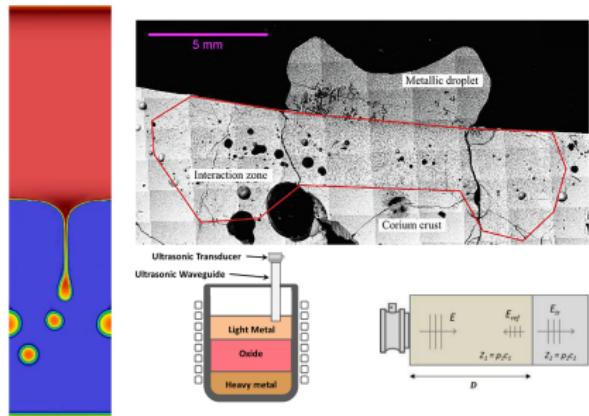


Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire

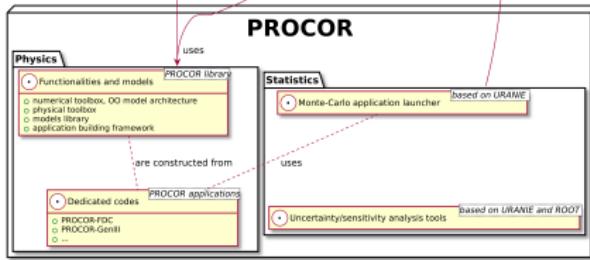
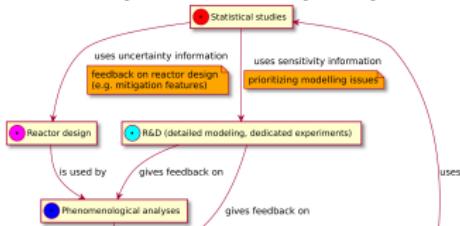
Résultats de simulation avec le code PROCOR (développé au CEA Cadarache)

Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire : résultats PROCOR

SOFTWARE PLATFORM PROCOR FOR CORIUM PROPAGATION

PROCOR methodology for corium propagation analyses in LWRs:

- Sensitivity/uncertainty-driven work cycle:
 - phenomenological analysis: (semi-)analytical analysis associated to different possible corium propagation scenarios → order of magnitudes/characteristic times
→ guidelines for the models assembly and parameterization in the transient code
 - model development/simplification/reduction
 - sensitivity and uncertainty analyses with a dedicated transient lumped parameter code



- Main motivations:
 - supplement integral source-term codes for detailed statistical studies
 - statistical studies carried out with stationary model of corium pool configurations (“bounding cases”) may be insufficient (e.g. transient focusing effect)

- Input data: core degradation calculations from an integral code

Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire : résultats PROCOR

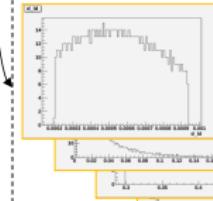
SOFTWARE PLATFORM PROCOR FOR CORIUM PROPAGATION

PROCOR Platform: (CEA, 2013-)

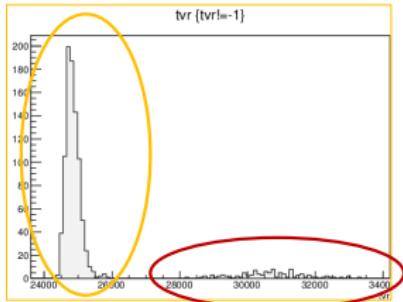
- an object-oriented library of numerical tools and models and a framework to build dedicated corium propagation analysis applications
- a Monte-Carlo code launcher and some uncertainty/sensitivity analysis tools using the URANIE library (CEA) based on the ROOT (CERN) framework
- maximize code reusability and facilitate model development → enhance the work cycle

Random variable laws
for inputs (+ possible correlations)

Sampling
(e.g. Latin Hypercube Sampling)



Vessel rupture time
Statistical Analysis: ROOT-macros (CINT)
(e.g. correlation ratios, graphical tools)



Code Launching
(multithreading/message-passing)

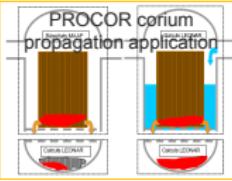
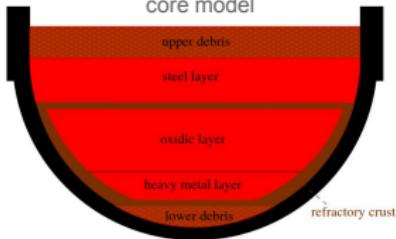


Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire : résultats PROCOR

SENSITIVITY ANALYSES REGARDING THE VESSEL FAILURE

Evaluation of the transient focusing effect for a PWR

corium mass flow rates either
from MAAP or PROCOR in-
core model



- PROCOR-Lower-Head and PROCOR-GenIII calculations
- In order to evaluate an In-Vessel-Retention related SA management strategy (reactor pit is reflooded)
- Main accident scenario: Loss Of Off-site Power (LOOP) accident with loss of all diesels
- A limited set of uncertain parameters represented as random variables in a Monte-Carlo approach

- Two different “modes” of vessel failure by focusing effect have been observed:
 - an early mode that occurs during the formation of the steel layer
 - ▲ ablated steel only from the vessel ablation (no internal structure)
 - a second mode that appears later during the thinning of the steel layer because of the thermochemical effects
 - ▲ if the first mode has been avoided by the ablation of internal structures

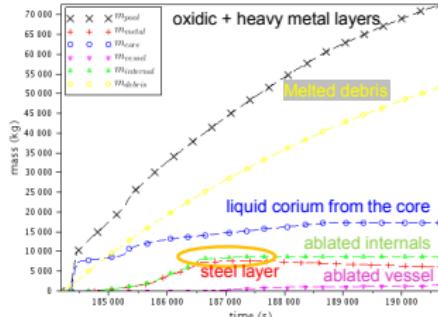
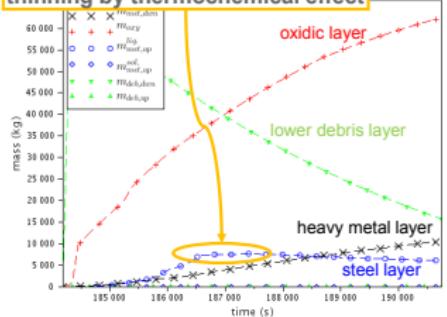
→ one step further than the stationary “bounding situations” approach in the comprehension and evaluation of the vessel failure risk

Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire : résultats PROCOR

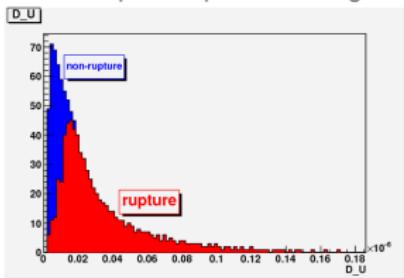
SENSITIVITY ANALYSES REGARDING THE VESSEL FAILURE

Transient focusing effect : thermochemically-driven “mode”

thinning by thermochemical effect



Important parameter regarding this mode of vessel rupture : D_m parameter



- U diffusivity in the oxidic layer
- log-triangular law [1.8E-9, 1.8E-8, 1.8E-7] (Stokes-Einstein formula : $1.81E-8 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)
- lower value → slower thinning of the steel layer

Associated perspectives for experiments/modeling

- Effect of oxide/metal crust on mass transfer kinetics
- Diffusivities of the species in oxidic/metalllic phases

- ▶ L'IVR est une *stratégie " séduisante " de gestion d'un accident grave*
- ▶ Mais, en l'état des connaissances sur le comportement du corium en fond de cuve, une démonstration "forte" requiert :
 - puissance résiduelle "limitée" → réacteurs de "faible puissance" (e.g. VVER-440)
 - et/ou "élimination" par conception des transitoires "rapides" ("Large Break Loss Of Coolant Accident")
 - et/ou éléments de conception spécifiques (e.g. abaissement de la plaque support cœur)
- ▶ Ainsi, *pour réacteurs de "forte puissance" avec IVR* (e.g. AP-1000, APR-1400, HPR-1000) : *R&D (intéressante !) à poursuivre / échec de l'IVR à étudier* → corium hors de la cuve

Au prochain cours (avec J. Delacroix)

Comportement du corium hors cuve
(échec de l'IVR ou stratégie "*Ex-Vessel Retention*" - EVR)

- ▶ Interaction Corium-Eau et *risque d'explosion vapeur*
- ▶ *Etalement du corium* (avec ou sans eau)
- ▶ *Interaction Corium-Béton* (avec ou sans eau)



Merci pour votre attention
Intéressés?
Stages, thèses proposés ...
Ecrivez-moi!



Atkhen, K. (2020).

Critical heat flux experiments for external reactor vessel cooling : possible use of chf correlations for reactor applications.
In *Proc. of International Seminar "In-vessel retention : outcomes of IVMR project"*, Juan-les-Pins, France.



Bonnet, J. M. and Seiler, J. M. (1999).

Thermohydraulic phenomena in corium pool : the bali experiment.
In *Proc. of ICONE 7*, Tokyo, Japan.



Cavarro, M., Paumel, K., Chikhi, N., Fouquart, P., Delacroix, J., Le Tellier, R., and Bouyer, V. (2019).

Probing corium in severe nuclear accident experiments : Development of acoustic techniques resisting very high temperatures.
Proceedings of Meetings on Acoustics, 38(1) :030006.



Chikhi, N., Fouquart, P., Delacroix, J., and Piluso, P. (2019).

Measurement of type 304l stainless steel and 16mnd5 ferritic steel density and surface tension : Possible impact for stratified molten pool.

Nuclear Technology, 205(1-2) :200–212.



Esmaili, H. and Khatib-Rahbar, M. (2004).

Analysis of in-vessel retention and ex-vessel fuel coolant interaction for AP1000.

Technical Report NUREG/CR-6849 ERI/NRC 04-201, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.



Gauthier, F. (2008).

Convection turbulente dans une cellule de Rayleigh-Bénard cryogénique : de nouveaux éléments en faveur du Régime Ultime de Kraichnan.
PhD thesis, Université Joseph Fourier Grenoble I.



Henry, R. E. and Fauske, H. K. (1993).

External cooling of a reactor vessel under severe accident conditions.
Nuclear Engineering and Design, 139(1) :31 – 43.



Nield, D. A. (1964).

Surface tension and buoyancy effects in cellular convection.
Journal of Fluid Mechanics, 19(3) :341–352.



Peybernes, M., Bigot, B., and Le Tellier, R. (2020).

Use of CFD results to model heat transfer in a thin metal layer.
In *Proc of International Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics ATH'2020*, Palaiseau, France.



Peybernes, M., Saas, L., Le Tellier, R., and Dang, C. (2019).

Thermalhydraulic DNS of a thin metallic layer : application to the evaluation of nuclear reactor severe accident mitigation strategy.
In *Proc. of the 9th European Review Meeting on Severe Accident Research ERMSAR2019*, Prague, Czech Republic.



Pivano, A., Piluso, P., Chikhi, N., Fouquart, P., Delacroix, J., and Le Tellier, R. (2019).

Experimental studies of molten steel - suboxidized corium crust interaction for IVR application.
In *Proc. of the 9th European Review Meeting on Severe Accident Research ERMSAR2019*, Prague, Czech Republic.



Quaini, A. (2015).

Etude thermodynamique du corium en cuve - Application à l'interaction corium/béton.
PhD thesis, Université Grenoble-Alpes.



Saas, L., Le Tellier, R., and Skrzypek, E. (2017).

Rayleigh-Bénard and Bénard-Marangoni convection in a thin metallic layer on top of corium pool.
In *Proc. of the 8th European Review Meeting on Severe Accident Research ERMSAR-2017*, Warsaw, Poland.



Shams, A., Dovizio, D., Zwijsen, K., Guennic, C. L., Saas, L., Le Tellier, R., Peybernes, M., Bigot, B., Skrzypek, E., Skrzypek, M., Vyskocil, L., Carenini, L., and Fichot, F. (2020).

Status of computational fluid dynamics for in-vessel retention : Challenges and achievements.
Annals of Nuclear Energy, 135 :107004.



Tran, C. T. and Kudinov, P. (2013).

The effective convectivity model for simulation of molten metal layer heat transfer in a boiling water reactor lower head.
Science and Technology of Nuclear Installations.



Tsurikov, D. F., Strizhov, V. F., Bechta, S. V., Zagriazkin, V. N., and Kiselev, N. P. (2007).

Main results of MASCA1 and 2 projects.
Technical report, RRC Kurchatov Institute.



Tuomisto, H. and Theofanous, T. (1994).

A consistent approach to severe accident management.
Nuclear Engineering and Design, 148(2) :171 – 183.



Villermaux, C. (1999).

Modélisation Physique et Numérique de la Convection Naturelle dans une Couche de Fluide de Faible Rapport d'Aspect dans le Cadre des Etudes d'Accidents Graves de Réacteurs à Eau Sous Pression.
PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble.



Zanella, R., Tegze, G., Plapp, M., Le Tellier, R., and Henry, H. (2020).

Numerical simulation of droplet formation by rayleigh-taylor instability in multiphase corium.
In Proc. of International Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics ATH'2020, Palaiseau, France.



Zhang, L., Zhou, Y., Zhang, Y., Tian, W., Qiu, S., and Su, G. (2015).

Natural convection heat transfer in corium pools : A review work of experimental studies.
Progress in Nuclear Energy, 79 :167 – 181.