



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](http://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**

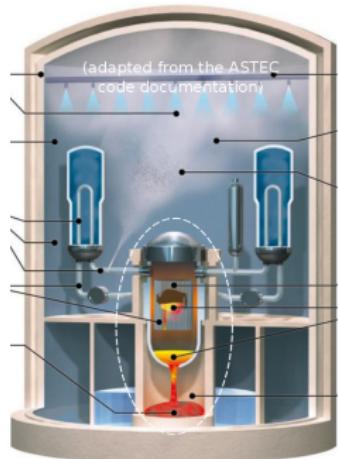
- Thermohydraulique de la couche métallique supérieure
  - Conditions thermiques en limites axiales : instabilité de Rayleigh-Bénard
  - Conditions thermiques en limite latérale : refroidissement
- Thermohydraulique du bain oxyde
  - Solidification à l'interface
  - Convection naturelle par chauffage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

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

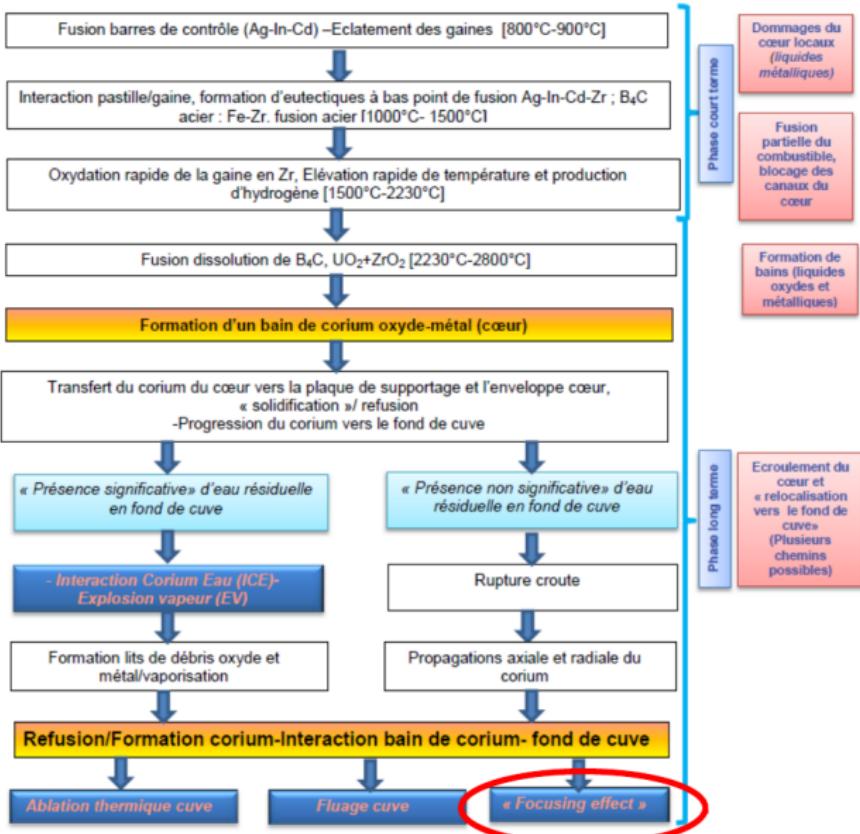
- Thermohydraulique d'une couche métallique supérieure mince
  - Conditions thermiques en limite haute : transfert radiatif et température inhomogène
  - Conditions mécaniques en limite haute : Instabilité de Bénard-Marangoni
- Corium en cuve et thermochimie
- Stratification des couches liquides
  - 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*



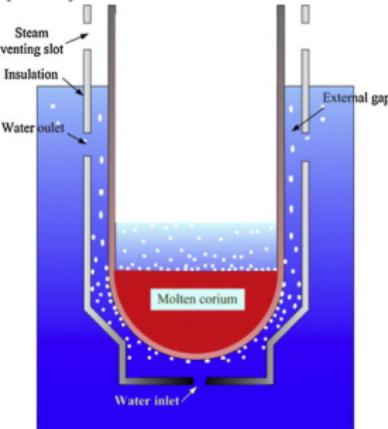
# Dégradation en cœur et progression de l'accident vers le fond de cuve (cf. cours de P. Piluso)



# Ce cours : stratégie de rétention en cuve

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

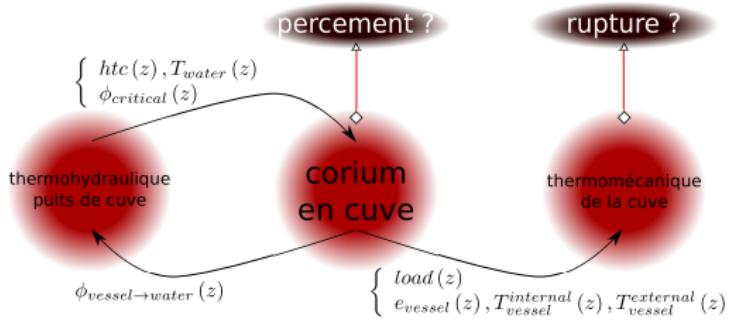
- ▶ Quoi? Une *stratégie de gestion de l'accident de fusion du cœur* introduite dans les années 1990  
[Henry and Fauske, 1993, Tuomisto and Theofanous, 1994]
- ▶ Pourquoi? *Garder l'intégrité de la cuve* pour y contenir les matériaux fondues du cœur
- ▶ Comment? *Dépressurisation précoce* de la cuve 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*

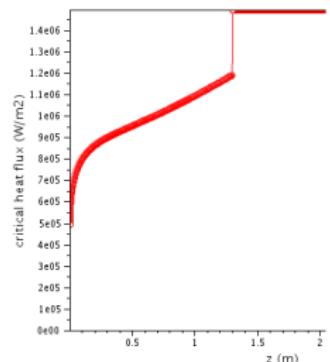
- ▶ thermohydraulique multiphasique → chargement thermique sur la cuve
- ▶ système ouvert ← apport d'acier fondu par ablation de structures internes et de la paroi de la cuve

# 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 <sup>2</sup> /s Theta : 30 to 90° P : 1 to 4 bar $\Delta T_{sub}$ : 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 <sup>2</sup> /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 <sup>2</sup> /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])



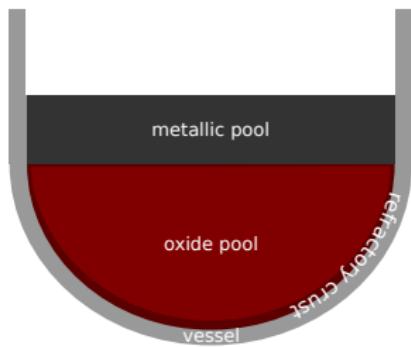
Corrélation ULPU appliquée à un fond de cuve en calotte sphérique

- ▶ 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"* :

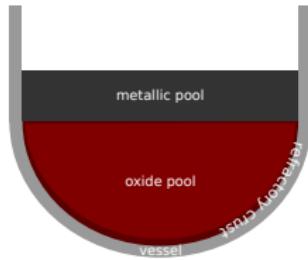


- en bas : une *phase oxyde* entourée d'une croûte réfractaire
- en haut : une *phase métallique* en contact direct avec la paroi de la cuve en fusion
- masses et compositions de ces deux couches obtenus à partir de simulations de la dégradation en cœur et d'hypothèses simplistes sur la fusion des structures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



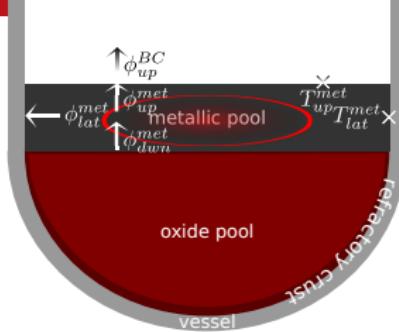
- ▶ couche métallique supérieure chauffée par le dessous, refroidie latéralement, par le dessus
- ▶ bain oxyde chauffé "en volume" et refroidie à sa frontière

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

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

# Thermohydraulique de la couche métallique supérieure



- ▶ en bas (croûte) : sans glissement,  $\phi_{dwn}^{met}$  imposé
- ▶ latéralement (cuve) :
  - sans glissement
  - $T_{lat}^{met}$  imposée (fusion) /  $\phi_{lat}^{met} = \phi_{lat}^{vessel}$
- ▶ en haut :
  - sans glissement / surface libre
  - température imposée  $T_{up}^{met}$  /  $\phi_{up}^{met} = \phi_{BC}^{met}$

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

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

Bilan thermique intégral :

$$\begin{aligned}\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu_0 \Delta \vec{v} - \vec{g} \beta_0 (T - T_0) \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T &= \alpha_0 \Delta T\end{aligned}$$

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

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

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

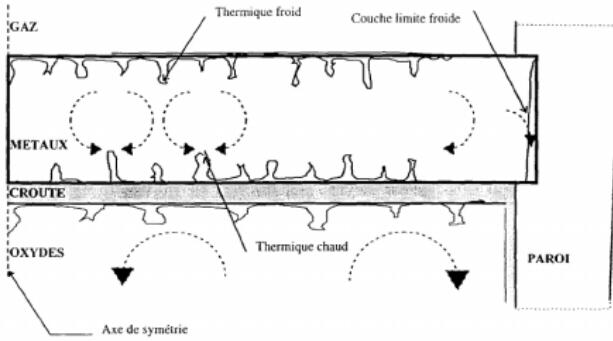
- le rapport d'aspect  $\frac{H}{R}$  (cylindre de rayon  $R$ , hauteur  $H$ )

- éventuellement d'autres selon les conditions en limite supérieure

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

# Thermohydraulique de la couche métallique supérieure

- ▶ 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 ( $\triangle Pr$ ), 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 haut  
 $\rightarrow$  panaches ("thermiques") chauds intermittents
- couche de fluide plus froid en bas  
 $\rightarrow$  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])

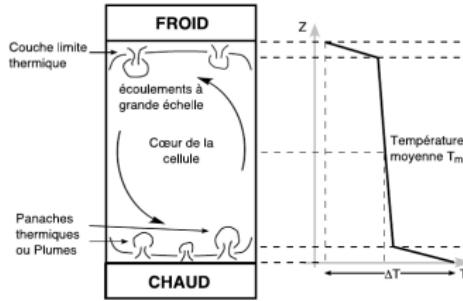


FIGURE 1.1 – Schématisation de l'écoulement à l'intérieur d'une cellule de Rayleigh-Bénard (à gauche). Profil moyen de température suivant la hauteur de la cellule (à droite).

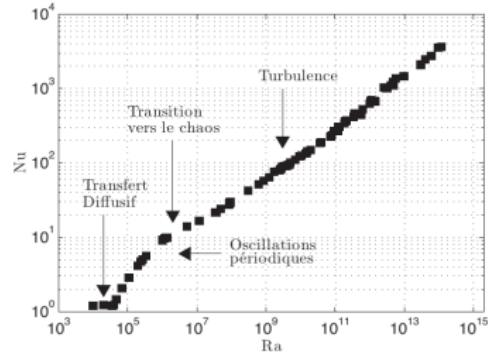


FIGURE 1.3 – Nombre de Nusselt  $Nu$  en fonction du nombre de Rayleigh  $Ra$  [Chavanne 2001].

- ▶ turbulence "douce" ( $Rat < Ra < 10^7$ ) : 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)

# Couche métallique supérieure - refroidissement latéral

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

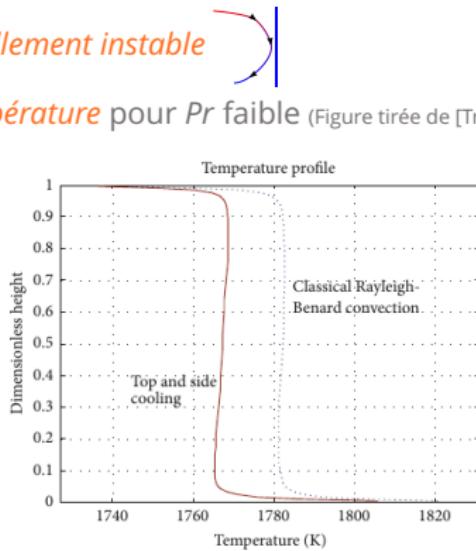
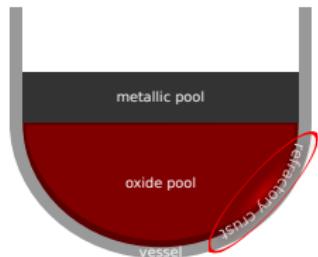


FIGURE 3: Temperature profiles across the fluid layer in two configurations of cooling (with/without side cooling).

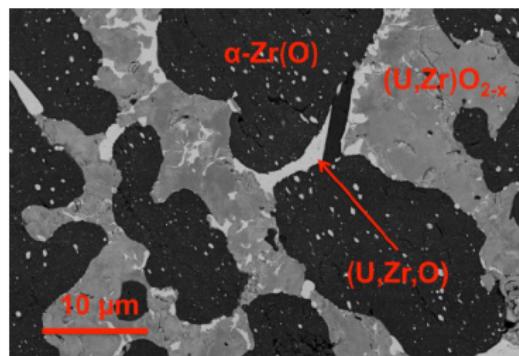
- ▶ Malgré (à cause ?) de la complexité pour cette couche métallique, les *modèles intégraux* ou "grossièrement maillés" ont recours à des *corrélations* établies séparément pour des *configurations "unidimensionnelles"* → cf. TD
- ▶ Avec des limites (et des perspectives) que nous aborderons en 2<sup>ème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

# Bain oxyde - solidification à l'interface

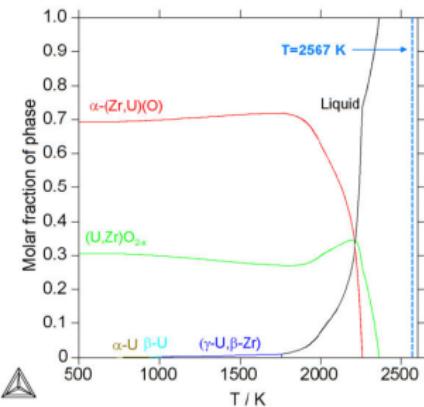


- ▶ Corium oxyde : *système ternaire*  $(U_y, Zr_{1-y}) O_{2-x}$  "en manque d'oxygène" ( $x \geq 0$ )
- ▶ Température de liquidus  $T_{liq}^{oxyde} \in [2300, 2950]K$  suivant  $y$  et  $x$ , toujours supérieur à  $T_{liq}^{acier} \sim 1600K \rightarrow$  *solidification à l'interface bain oxyde/cuve*

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)

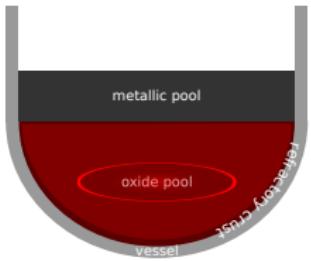
$$\frac{dm^{ls}(t)}{dt} = \frac{1}{\Delta h_{ls}} (\phi_l^{ls}(t) - \phi_s^{ls}(t)) S^{ls}$$

(débit massique intégral)

- $\vec{n}^{ls}$  : normal orientée du liquide vers le solide
- $\Delta h_{ls}$  : chaleur latente spécifique de solidification

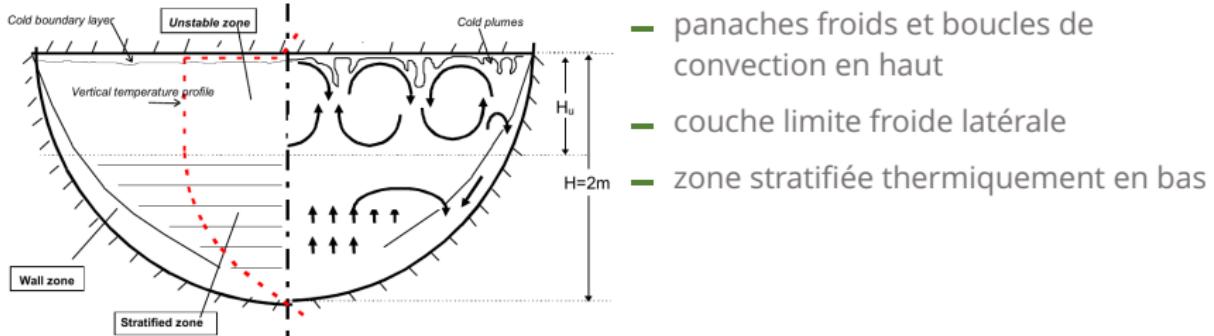
- ▶ En géométrie *1D plan*, en *régime stationnaire*, épaisseur du solide (sans dissipation interne de puissance) donnée par  $e_s = \lambda_s \times \frac{\text{différence de température d'un bord à l'autre}}{\text{flux de chaleur}}$

# Bain oxyde - convection naturelle par chauffage volumique



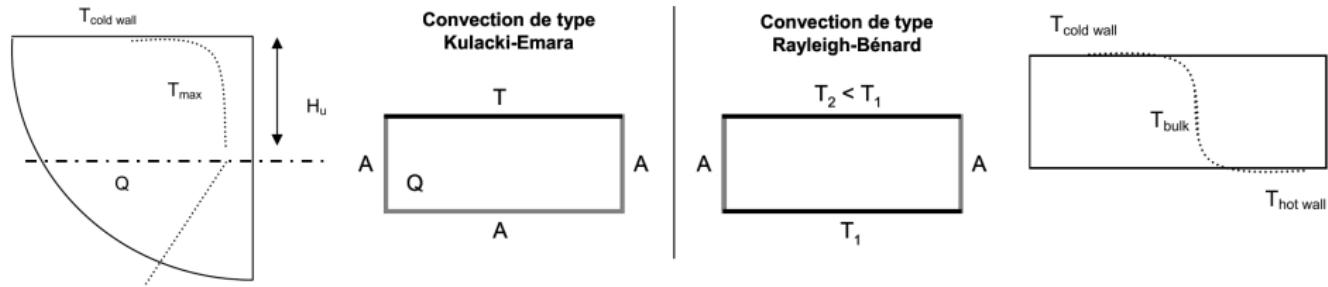
- ▶ **chauffage "en volume"** (puissance résiduelle associée à la décroissance des produits de fission) : puissance volumique  $q^{ox}$  (W/m<sup>3</sup>)
- ▶ refroidissement en surfaces latérale et haute
- ▶ en **régime turbulent** :  $Ra_i^{ox} = \frac{g(H^{ox})^5 q^{ox} \beta^{ox}}{\lambda^{ox} \nu^{ox}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

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



# Bain oxyde - convection naturelle par chauffage volumique

- 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 ...*"

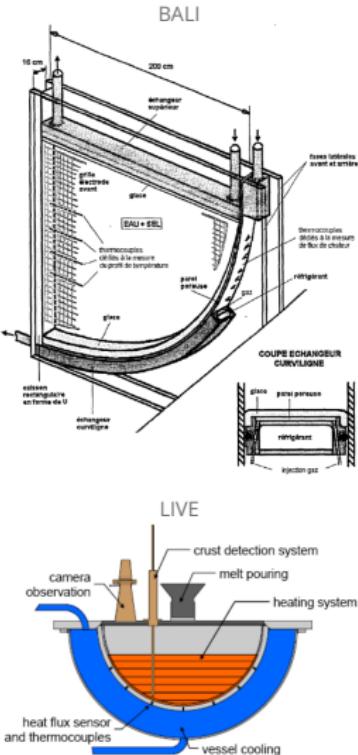
# Bain oxyde - convection naturelle par chauffage volumique

- ... de nombreuses *expériences* ont été menées sur des "géométries 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	1:2 (VVER-440)	Joule heating	ZnSO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O solution	Water	$10^{14}$ - $10^{16}$	≈ 3	Isothermal top and bottom walls	Natural convection heat transfer in homogeneously heated pools
COPO-II	Thickness: 0.1 m - Semi-elliptical slice - Semicircular slice Radius: 1 m Thickness: 9.4 cm	1:2 (VVER-440 and AP600)	Joule heating	- Corium: ZnSO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O solution - Metal layer: Distilled water	Liquid nitrogen	$10^{14}$ - $10^{16}$	≈ 3	Isothermal top and bottom walls	- Natural convection heat transfer in homogeneously 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	$2 \times 10^{10}$ - $1.1 \times 10^{14}$	8.2-9.5	Isothermal or insulated top wall and isothermal	- Natural convection heat transfer in homogeneously heated pools - Effect of different boundary conditions
ACOPO	Hemisphere Radius: 1 m	1:2 (AP 600)	No heating	Water	Water	$10^{12}$ - $2 \times 10^{16}$	≈ 7	Isothermal top and bottom walls	- Natural convection heat transfer in homogeneously 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 homogeneously heated pools - Effect of viscosity and porosity - Focusing effect of the top metal layer
RASPLAV	Semicircular slice Radius: 0.2 m Thickness: 16.7 cm	1:10	SDH DEH	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -Zr; NaF-NaBF <sub>4</sub>	NaNO <sub>2</sub> - $-NaNO_3$ ; KNO <sub>3</sub>	$4.7 \times 10^{11}$ - $-1.61 \times 10^{13}$	4.56-7.74	Insulated top wall and cooled bottom wall	- Natural convection heat transfer in homogeneously 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 <sub>3</sub> -KNO <sub>3</sub> ; Paraffin-water-chlorobenzene <sup>a</sup>	Water	$9.6 \times 10^{12}$ - $9.5 \times 10^{13}$	-	Isothermal top and bottom walls	- Natural convection heat transfer in homogeneously 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 <sub>3</sub> -KNO <sub>3</sub>	Water	$2 \times 10^{13}$ - $8 \times 10^{13}$	8.1-10.4	Insulated top wall and isothermal bottom wall	- Natural convection heat transfer in homogeneously heated pools - Crust growth characteristics - Effect of initial relocation conditions

<sup>a</sup> 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]



# Bain oxyde - convection naturelle par chauffage volumique

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

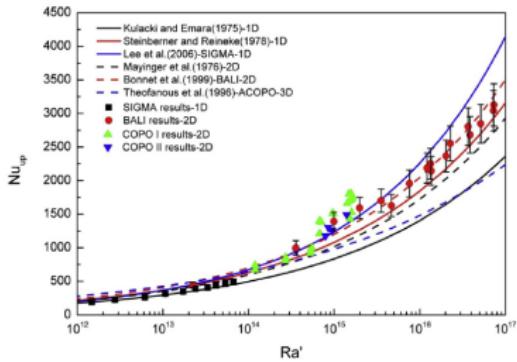


Fig. 3. Comparison of upward heat transfer in the high Rayleigh region.

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

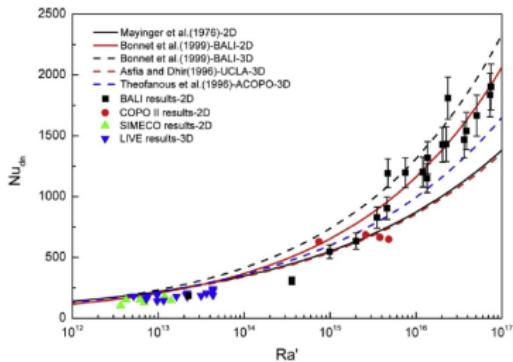


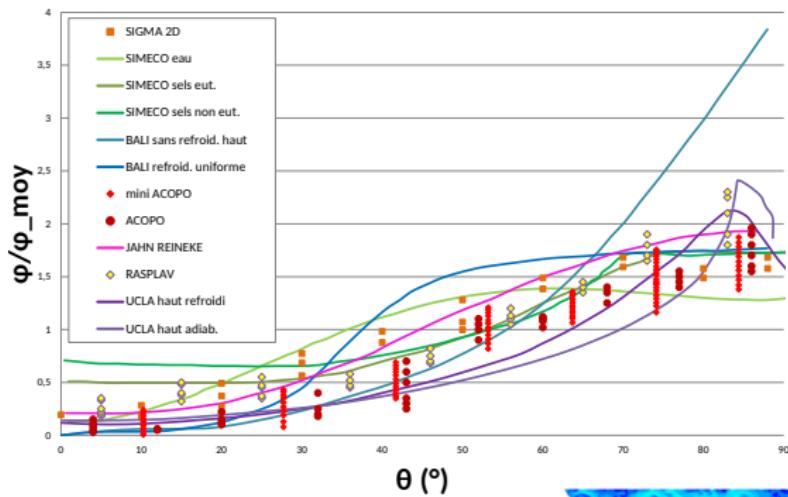
Fig. 4. Comparison of downward heat transfer in the high Rayleigh region.

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

# Bain oxyde - convection naturelle par chauffage volumique

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

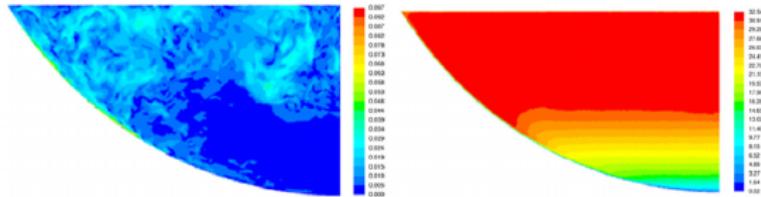
## Résultats expérimentaux pour le flux local $\varphi(\theta)$ ( $H/R = 1$ )



- 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

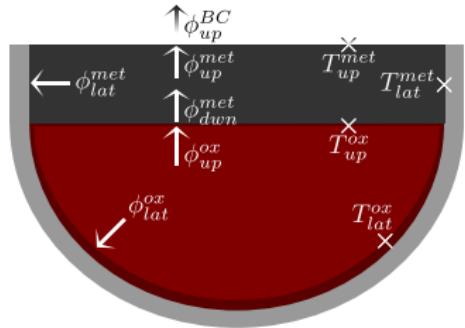
- Intérêt grandissant pour des simulations "Computational Fluid Dynamics" CFD

(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)

cf. description TD et notebooks Jupyter

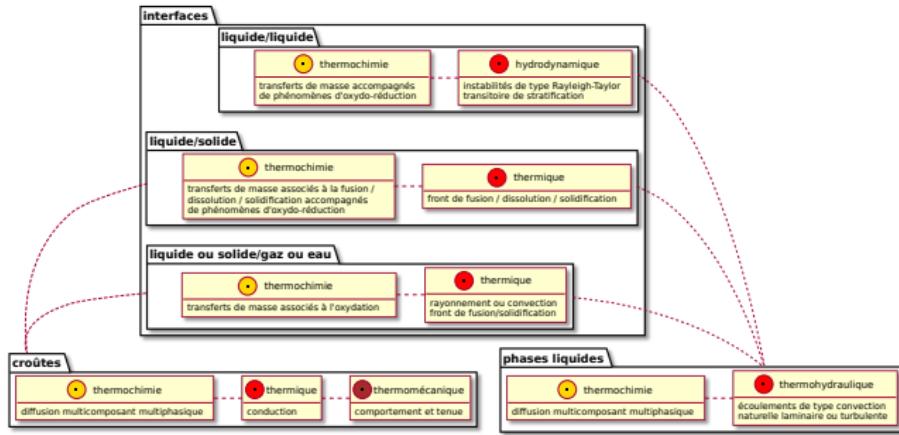
(<https://mybinder.org/v2/gh/niamorelreillet/ENSE3-Cours/main?urlpath=lab>)

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

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

Pas tout à fait...

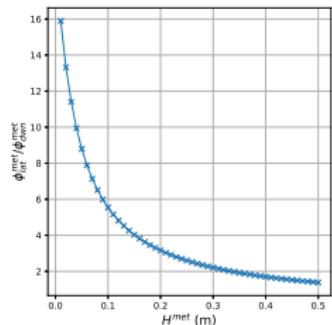
- ▶ En premier lieu car  $(U_y, Zr_{1-y})O_{2-x} + (Fe, \dots) \neq$  système "inerte"  
→ transfert de masse inter-couche et *changeement de stratification* en particulier
- ▶ Ainsi, une *évaluation stationnaire* du comportement du corium en cuve *ne suffit pas ... ça se complique* !



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 I<sup>NU</sup>R (2015-2019) → *illustration de la R&D menée au CEA*

# Couche métallique supérieure - transfert radiatif en surface haute

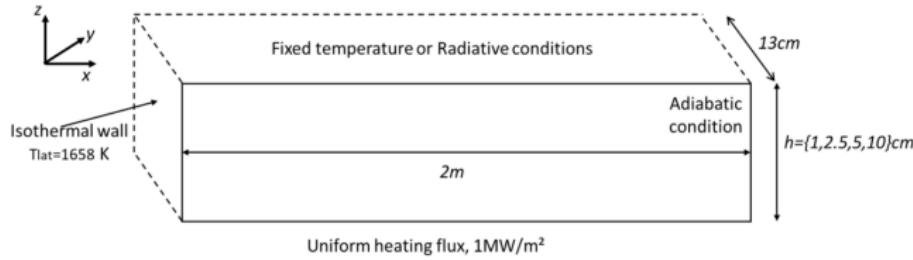
- Sans le dire, en assimilant le transfert de chaleur vers le haut à celui d'une cavité de Rayleigh-Bénard, on a considéré :

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

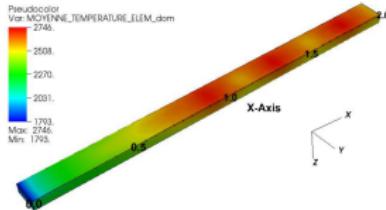
$$\phi_{up}^{BC} [T_{up}^{met}] = \phi_{up}^{met} [T^{met} - T_{up}^{met}] \text{ avec } \phi_{up}^{BC} [T_{up}^{met}] = \varepsilon_{up} \sigma \left( (T_{up}^{met})^4 - (T^{BC})^4 \right)$$

- Impact de l'inhomogénéité de la condition en limite haute ?*

- Etude* paramétrique par *simulations CFD* (code libre  développé au CEA) sur la géometrie parallélépipédique des essais BALI-Metal (voir [Peybernes et al., 2020])
  - En limite haute,  $T_{up}^{met}$  uniforme imposée ou bien condition radiative (locale)
  - $H^{met} \in [1, 10]cm$



Domaine de calcul et conditions aux limites des calculs CFD



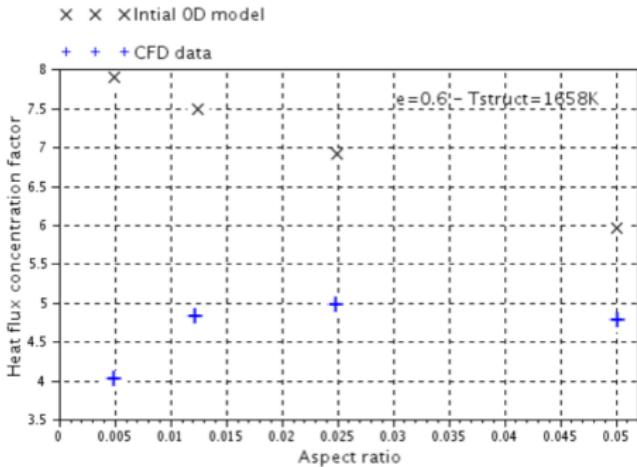
Température pour  $H^{met} = 5\text{cm}$   
(moyennée en temps en régime  
pseudo-stationnaire)

# Couche métallique supérieure - transfert radiatif en surface haute

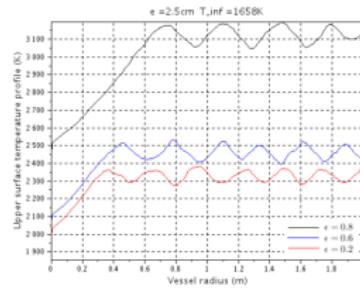
► Rôle prédominant de la CL pour  $H^{met}$  faible

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 $\phi_{lat}/\phi_{dwn}$ (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 ( $T = 2178K$ , $T_{up} = 2086K$ )

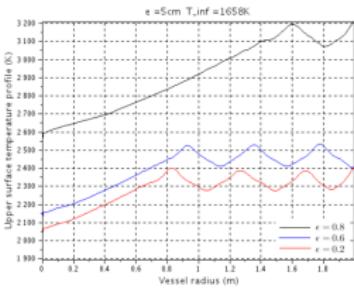
$\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met}$  fonction de  $H^{met}$  et de la condition en limite haute



$\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met}$  dans le cas  $\varepsilon_{up} = 0,6$  et  $T^{BC} = 1658K$



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** (=  $Pe/Th$ )

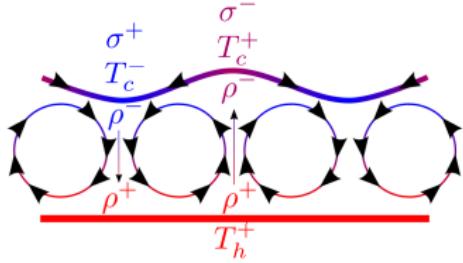
$$St \equiv \frac{\varepsilon \sigma Th}{\lambda}$$

► 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) :



$\gamma > 0 \rightarrow$  la convection est renforcée

- 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

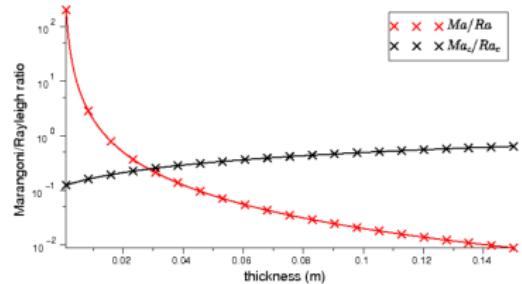
## ▶ Instabilité de Bénard-Marangoni thermique

- $Ma = \frac{\gamma H \Delta T}{\rho_0 \nu \alpha} = \frac{\text{effets thermocapillaires}}{\text{effets dissipatifs (viscosité et diffusion thermique)}}$
  - *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*

# Couche métallique supérieure - instabilité de Bénard-Marangoni

## ► 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 :  
 $y_x = 0 \longrightarrow \frac{\partial v_x}{\partial z} = Ma \frac{\partial T}{\partial x}$

- 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

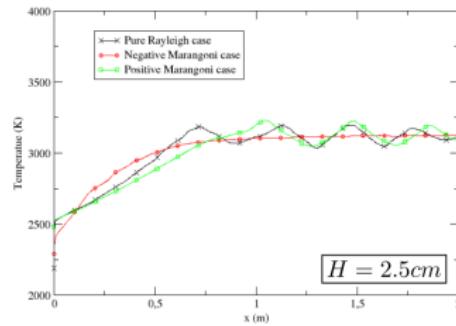
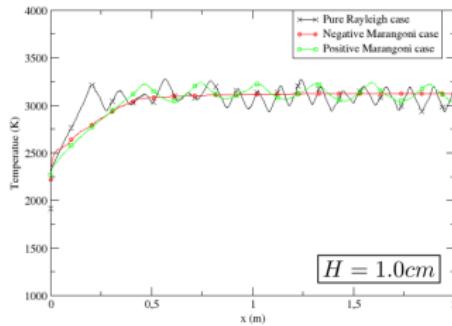
Quelques résultats extraits de cette étude [Peybernes et al., 2019]

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

	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

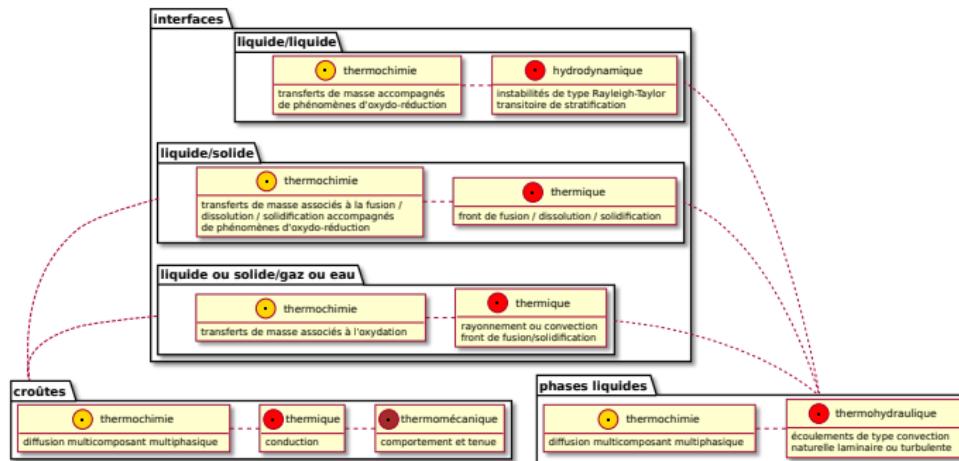
Profil radial de la température de la surface haute ( $\varepsilon_{up} = 0.2$  et  $T^{BC} = 1658\text{K}$ )



- ▶ 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

# Equilibre thermodynamique de $(U_y, Zr_{1-y})O_{2-x} + (Fe, \dots)$

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



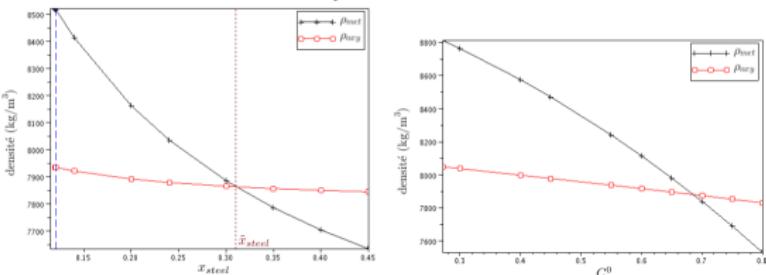
- Expériences à "petite échelle"
- $\varnothing \leq 7\text{cm}$  et  $m_{oxy} \sim 100\text{g à } 2\text{kg}$
- e.g. programme MASCA (OCDE) [Tsurikov et al., 2007]



From Tech. Report NEA/CSNI/R(2007)15

- 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 ( $x_{steel}$ )

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

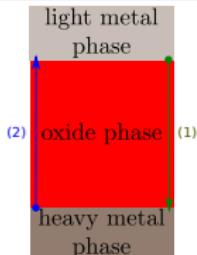
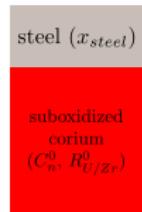


En fonction de  $x_{steel}$  pour  
 $(\bar{T} = 2840\text{K}, C_n^0 = 36.5\% \text{ et}$   
 $R_{U/Zr}^0 = 1.14) \rightarrow \text{MASCA-MA-3}$

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  $\phi$
- Lois de densité  $\rho_\phi$  (composition)

# Cinétique de stratification



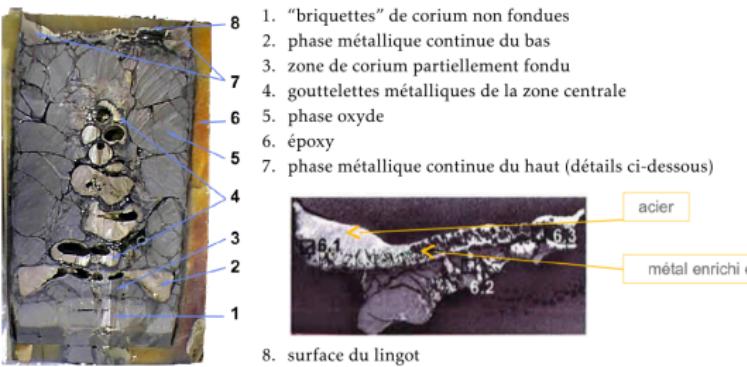
- ▶ Transitoire AG en fond de cuve  
→ *apport progressif d'acier fondu*
- ▶ *Deux transitoires de stratification* associés à ces équilibres à deux couches potentiels :
  - (1) formation de la couche métallique lourde  
→ *Aggravement du risque de focusing effect*
  - (2) retour à une stratification "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  $\rho_{\text{oxy}} \leq \rho_{\text{met}}$  → *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  $D = 5 \times 10^{-9}\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ,  $Sh/Nu \approx 80$  →  $\tau_m \approx 10\text{min}$
  - vitesse terminale de goutte pour l'instabilité de Rayleigh-Taylor →  $\sim 10\text{s.m}^{-1}$

Toute cette analyse est basée sur les hypothèses simplificantes suivantes :

## 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)

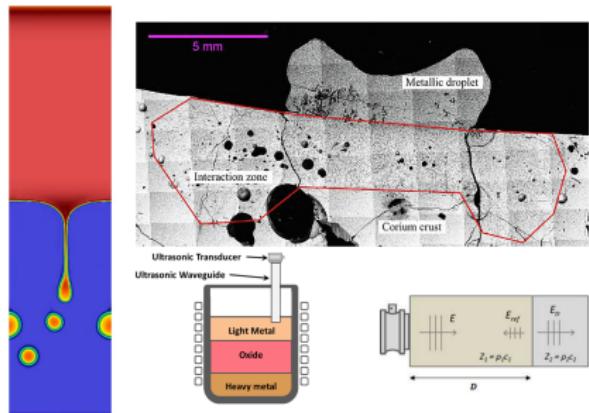


- état final ~ un instant du transitoire de formation de la phase métallique lourde
- Rayleigh-Taylor en gouttelettes
- gradient de concentration en U, Zr dans la couche métallique supérieure

- 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) ...

# Cinétique de stratification

- ▶ ... 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**

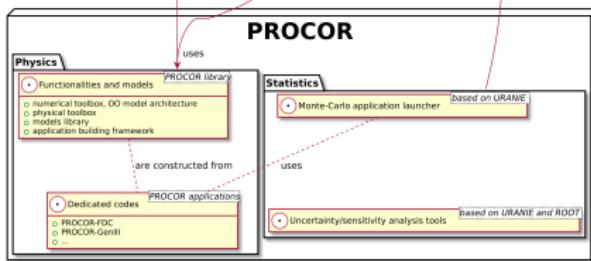
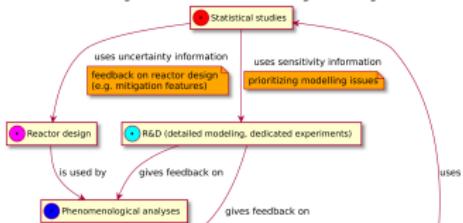
## **Résultats de simulation avec le code PROCOR (développé au CEA Cadarache)**

# 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

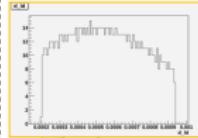
## SOFTWARE PLATFORM PROCOR FOR CORIUM PROPAGATION

### PROCOR Platform: (CEA, 2013-)

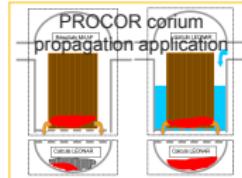
- an object-oriented library of numerical tools and models and a framework to build dedicated corium propagation analysis applications
- a Monte-Carlo code launcher and some uncertainty/sensitivity analysis tools using the URANIE library (CEA) based on the ROOT (CERN) framework
- maximize code reusability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

Random variable laws  
for inputs (+ possible correlations)

Sampling  
(e.g. Latin Hypercube Sampling)

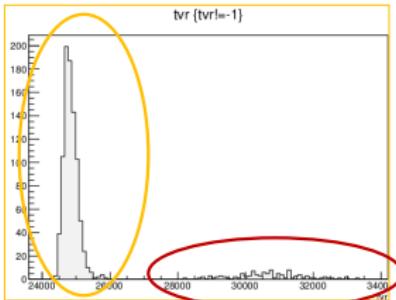


Code Launching  
(multithreading/message-passing)



### Vessel rupture time

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

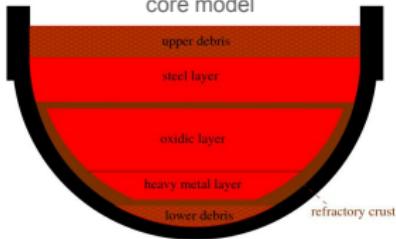


# Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire : résultats PROCOR

## 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

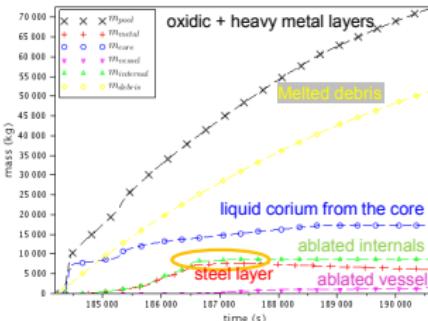
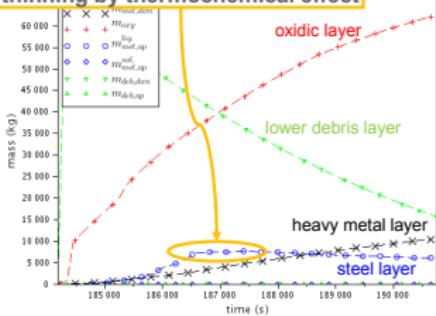
→ one step further than the stationary “bounding situations” approach in the comprehension and evaluation of the vessel failure risk

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

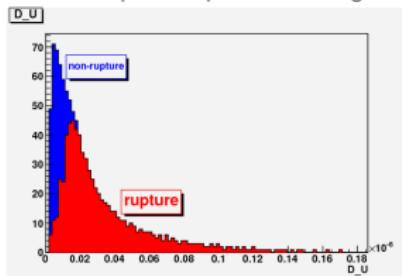
## SENSITIVITY ANALYSES REGARDING THE VESSEL FAILURE

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 8<sup>th</sup> 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.