



Accidents graves des réacteurs nucléaires
**Comportement et rétention du
corium en cuve d'un réacteur à
eau légère**

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

INSTN - GA - μ -projet

Mars 2020

Romain Le Tellier, Louis Viot, Benoît Habert, CEA Cadarache
romain.le-tellier@cea.fr, louis.louis@cea.fr, benoit.habert@cea.fr

- ▶ Connaître les *phénomènes physiques* déterminant vis-à-vis du comportement du *corium dans le fond de cuve* et le niveau de connaissance associé
- ▶ Faire le lien entre ces phénomènes et un savoir de base en *thermohydraulique, thermodynamique*
- ▶ Comprendre les *modélisations* mises en œuvre dans les codes intégraux pour l'*évaluation du risque de percement de la cuve* d'un réacteur à eau légère dans une *stratégie de rétention du corium en cuve*
- ▶ Réaliser une telle *évaluation, en stationnaire*, puis *en transitoire* avec, finalement, une évaluation des *sensibilités à certains paramètres de modèles*
- ▶ Avoir une idée concrète des *activités de R&D menées au CEA* sur ce sujet

- ▶ *1^{ère} séance "encadrée"* : introduction à la stratégie de rétention du corium en cuve, phénoménologie d'un bain de corium "à deux couches" en configuration stationnaire, démarrage du TD associé
- ▶ *1^{ère} séance "libre"* : réalisation du TD, rédaction
- ▶ *2^{ème} séance "encadrée"* : discussion sur le TD, phénoménologie d'un bain de corium en transitoire, introduction au code PROCOR, premier calcul avec PROCOR
- ▶ *3^{ème} séance "encadrée"* : suite des calculs avec PROCOR, introduction au calcul statistique avec PROCOR/URANIE
- ▶ *2^{ème} séance "libre"* : analyse d'un calcul statistique avec PROCOR/URANIE, rédaction
- ▶ *Rédaction*
- ▶ *Soutenance*

► Contexte : accidents graves des RELs - rétention du corium en cuve

- Contexte général des accidents graves des RELs
- Ce μ -projet : 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

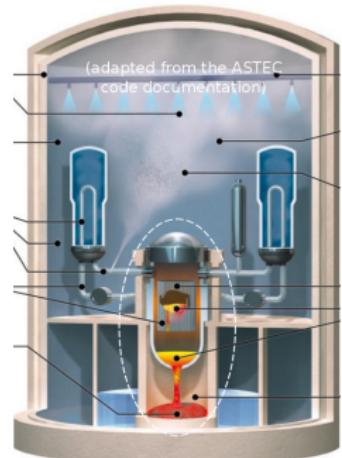
► Le corium en fond de cuve : est-ce si simple ?

- Thermohydraulique d'une couche métallique supérieure mince
 - Conditions thermiques en limite haute : transfert radiatif et température inhomogène
- 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

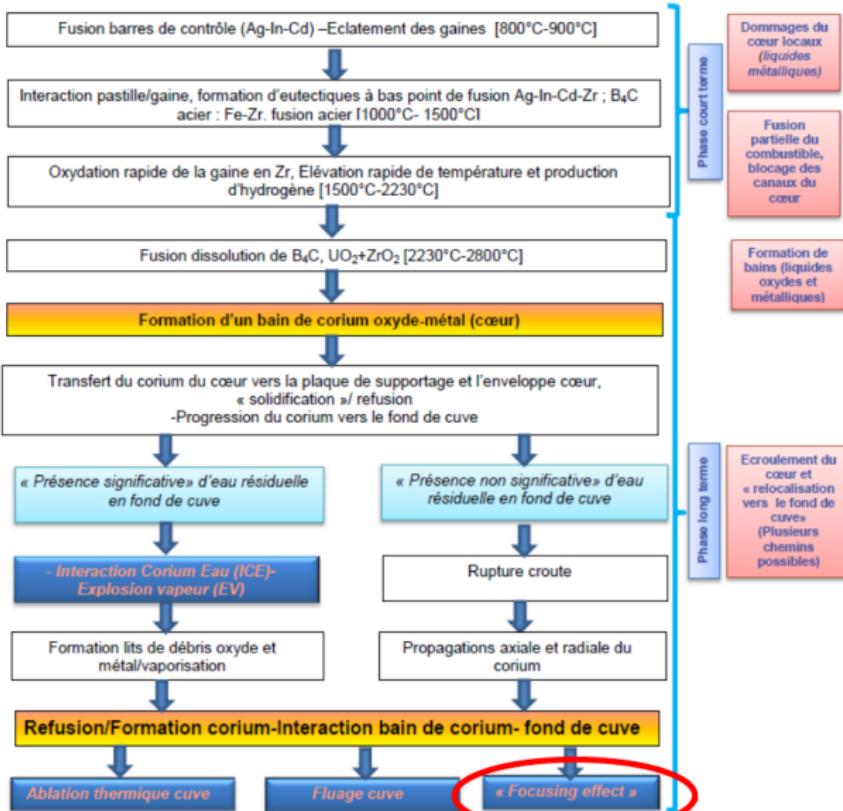
► Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire**► Introduction au code PROCOR****► Introduction au calcul statistique avec PROCOR/URANIE**

Contexte : stratégie de rétention du corium en cuve pour la mitigation des accidents graves des réacteurs à eau légère

- ▶ 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*

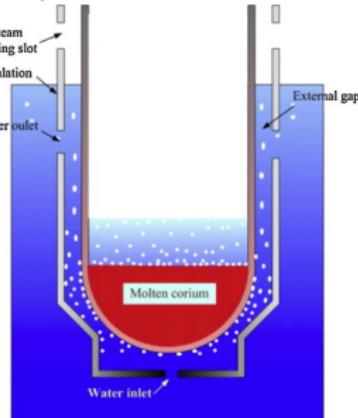


Dégradation en cœur et progression de l'accident vers le fond de cuve



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

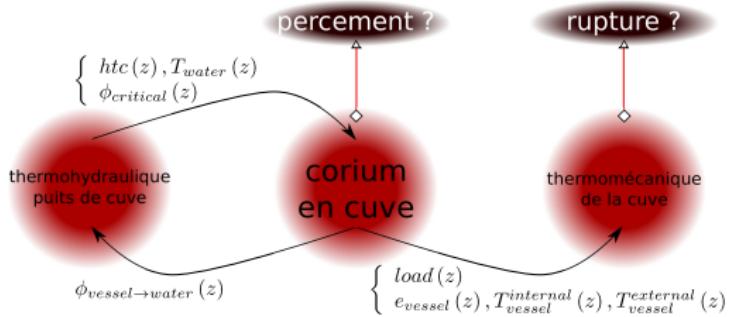
- ▶ Quoi? Une *stratégie de gestion de l'accident de fusion du cœur* introduite dans les années 1990 [Henry and Fauske, 1993, Tuomisto and Theofanous, 1994]
- ▶ Pourquoi? *Garder l'intégrité de la cuve* pour y contenir les matériaux fondu们 du cœur
- ▶ Comment? *Dépressurisation précoce* de la cuve et *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* \leftrightarrow éviter la crise d'ébullition (assèchement) \leftrightarrow 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 μ -projet : 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

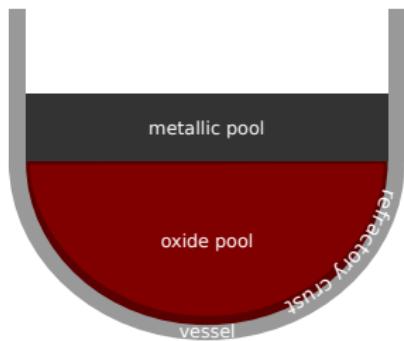
On se concentrera ici sur la question du *comportement du corium en cuve*

- ▶ 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

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"* :

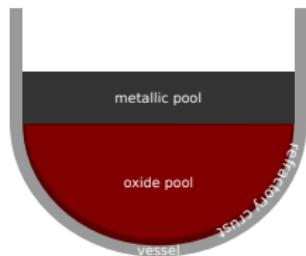


- en bas : une *phase oxyde* entourée d'une croûte réfractaire
- en haut : une *phase métallique* en contact direct avec la paroi de la cuve en fusion
- masses et compositions de ces deux couches obtenus à partir de simulations de la dégradation en cœur et d'hypothèses simplistes sur la fusion des structures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

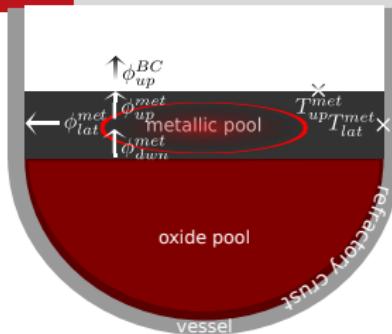


- ▶ couche métallique supérieure chauffée par le dessous, refroidie latéralement, par le dessus
- ▶ bain oxyde chauffé "en volume" et refroidie à sa frontière

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

Propriété	Unité	Valeur (<i>ordre de grandeur</i>) Oxyde	Valeur eau à 25°C, 1bar 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); $\triangle \neq$ pour le corium "hors-cuve" ■



- ▶ en bas (croûte) : sans glissement, ϕ_{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 :

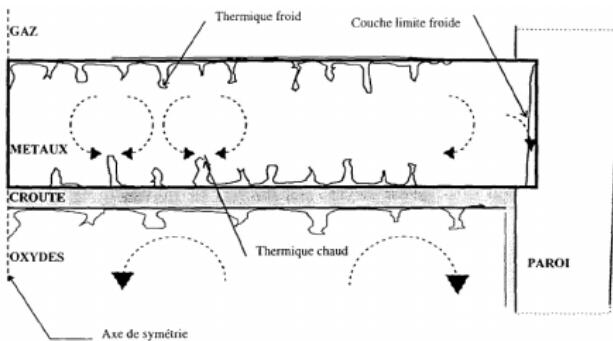
- $Pr, Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2} = \frac{\text{forces de gravité}}{\text{forces visqueuses}}$ (ou $Ra = Gr \cdot Pr$)

- 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} ($Nu = \frac{\text{flux de chaleur convectif}}{\text{flux de chaleur conductif}} = \frac{htc \times L}{\lambda}$)

- 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 parallépipédique $\rightarrow \frac{\phi_{lat}^{met}}{\phi_{dwn}^{met}} (H)$
- 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 haut
 \rightarrow panaches froids intermittents
- couche limite froide latérale
 \rightarrow accélération locale

- Transition d'un écoulement laminaire à turbulent "a 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])

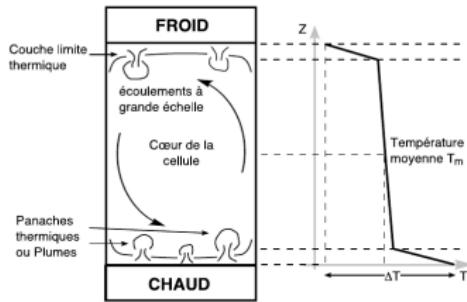


FIGURE 1.1 – Schématisation de l'écoulement à l'intérieur d'une cellule de Rayleigh-Bénard (à gauche). Profil moyen de température suivant la hauteur de la cellule (à droite).

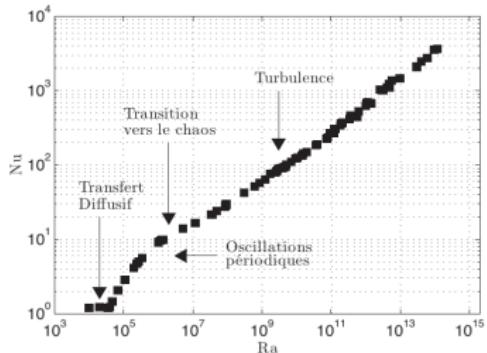


FIGURE 1.3 – Nombre de Nusselt Nu en fonction du nombre de Rayleigh Ra [Chavanne 2001].

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

■ H. Bénard (1900) "Je n'ai pas la prétention d'avoir épousé 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])

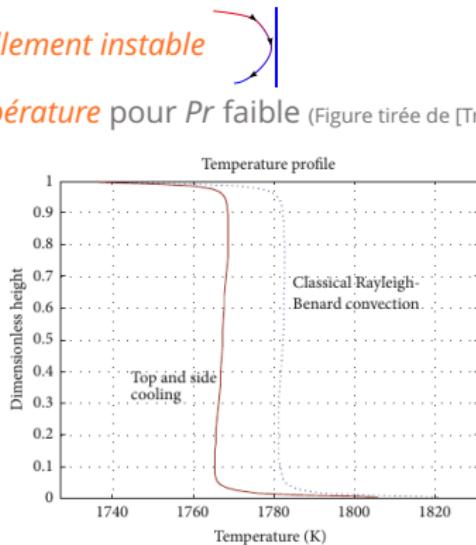
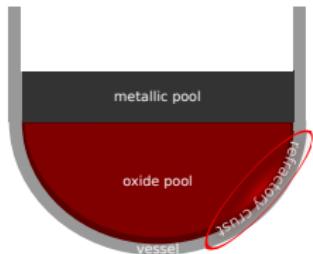


FIGURE 3: Temperature profiles across the fluid layer in two configurations of cooling (with/without side cooling).

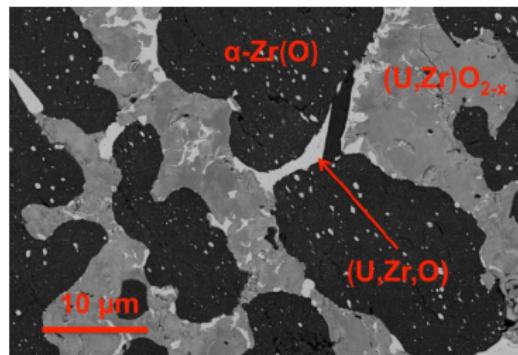
- ▶ Malgré (à cause?) de la complexité pour cette couche métallique, les *modèles intégraux* ou "grossièrement maillés" ont recours à des *corrélations* établies séparément pour des *configurations "unidimensionnelles"* → cf. TD
- ▶ Avec des limites (et des perspectives) que nous aborderons en 2^{ème}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

Bain oxyde - solidification à l'interface

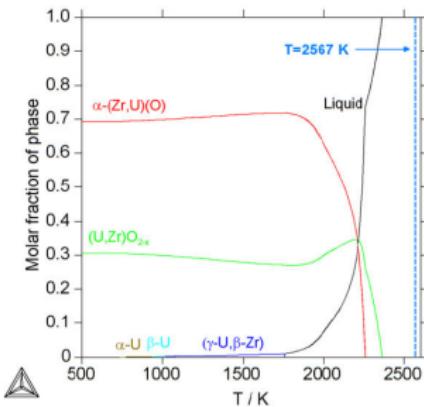


- ▶ Corium oxyde : *système ternaire* $(U_y, Zr_{1-y}) O_{2-x}$ "en manque d'oxygène" ($x \geq 0$)
- ▶ Température de liquidus $T_{liq}^{oxyde} \in [2300, 2950]K$ suivant y et x , toujours supérieur à $T_{liq}^{acier} \sim 1600K \rightarrow$ *solidification à l'interface bain oxyde/cuve*

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)

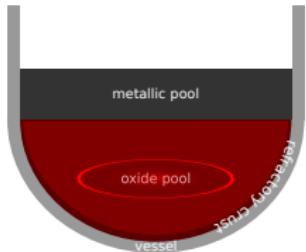
- \vec{n}^{ls} : normal orientée du liquide vers le solide

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

(débit massique intégral)

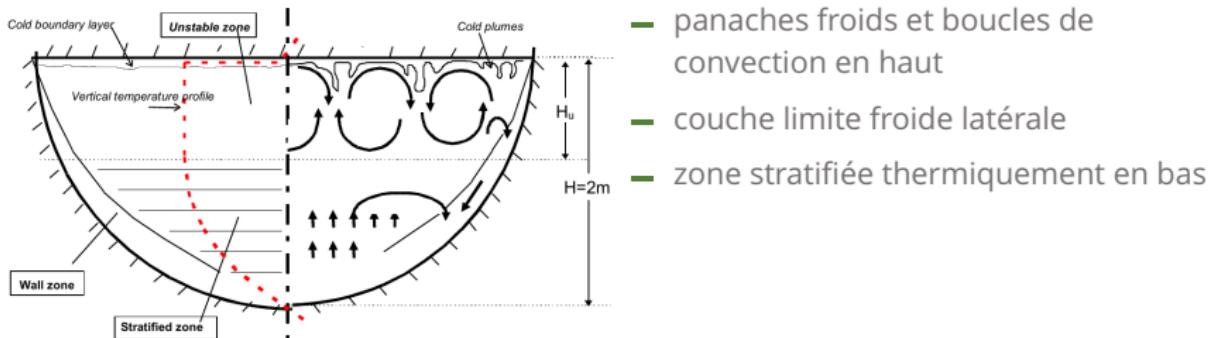
- Δh_{ls} : chaleur latente spécifique de solidification

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

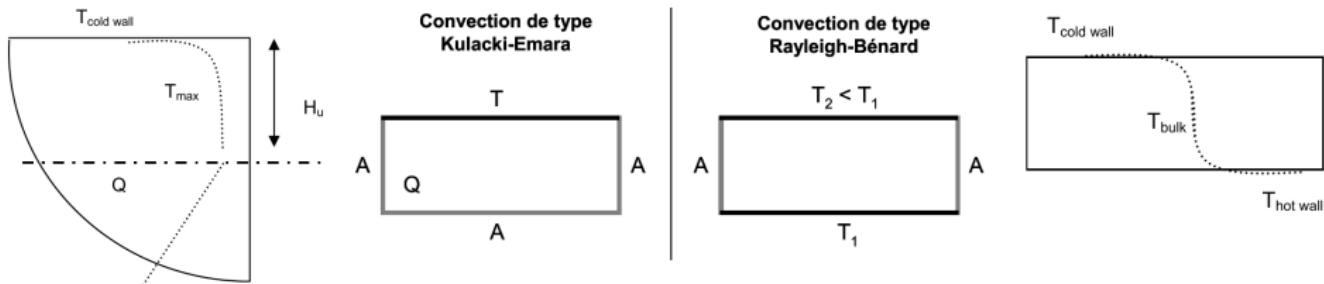


- ▶ **chauffage "en volume"** (puissance résiduelle associée à la décroissance des produits de fission) : puissance volumique q^{ox} (W/m^3)
- ▶ refroidissement en surfaces latérale et haute
- ▶ en **régime turbulent** : $Ra_i^{\text{ox}} = \frac{g(H^{\text{ox}})^5 q^{\text{ox}} \beta^{\text{ox}}}{\lambda^{\text{ox}}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

- ▶ 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* $Ra_i = \frac{g(H_u)^5 q \beta}{\lambda \nu \alpha}$:
- $$Nu_{up}^{RB} = a \times Ra^b Pr^c \iff Nu_{up}^{KE} = 2a^{\frac{1}{b+1}} \times Ra_i^{\frac{b}{b+1}} Pr^{\frac{c}{b+1}}$$

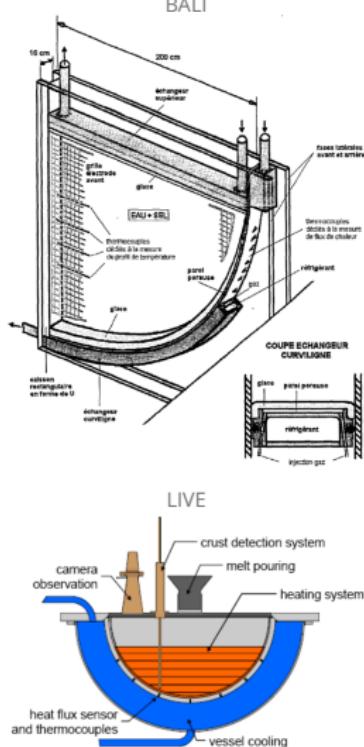
- Pour l'*échange latéral* (surface sphéroïde), la *transposition est moins évidente* ...

► ... 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 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 homogeneously 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 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	2×10^{10} - 1.1×10^{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} - 2×10^{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 ₂ -ZrO ₂ -Zr; NaF-NaBF ₄	NaNO ₂ - --NaNO_3 ; KNO ₃	4.7×10^{11} - 1.61×10^{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 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 homogeneously heated pools - Effect of two-layer and three-layer stratification - Natural convection heat transfer in homogeneously heated pools - Crust growth characteristics - Effect of initial relocation conditions
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	

^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_i* !

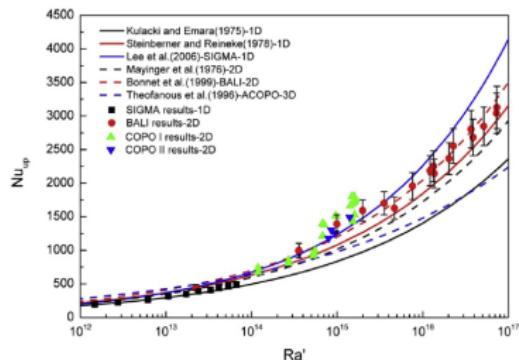


Fig. 3. Comparison of upward heat transfer in the high Rayleigh region.

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

- Intérêt grandissant pour des simulations “Computational Fluid Dynamics” CFD

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

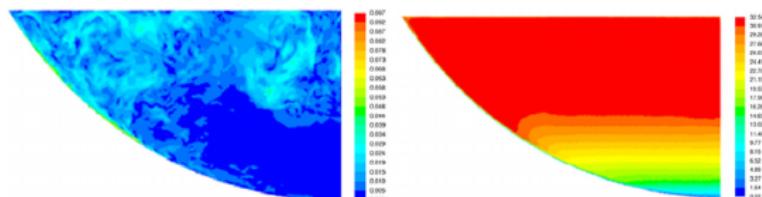
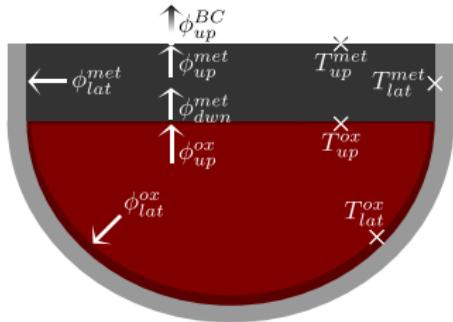


Fig. 4. Comparison of downward heat transfer in the high Rayleigh region.

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)

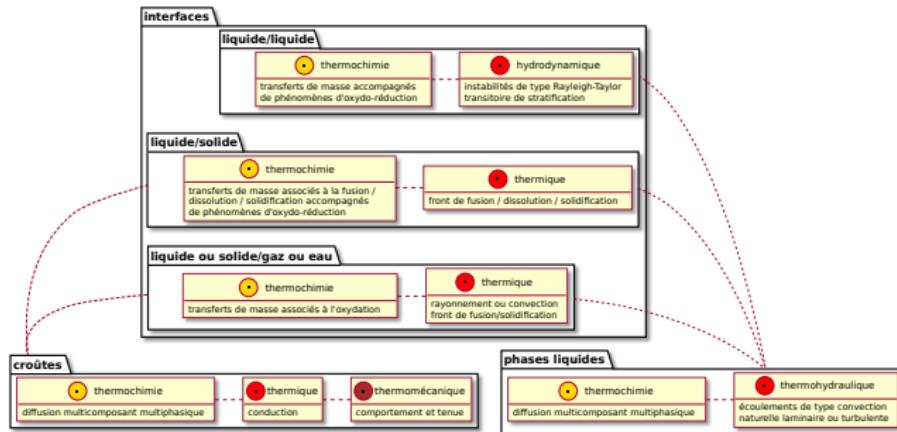
cf. description TD et notebooks Jupyter

(<https://mybinder.org/v2/gh/niamorelreillet/INSTN-GA-micro-projet.git/master?urlpath=lab>)

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

Pas tout à fait...

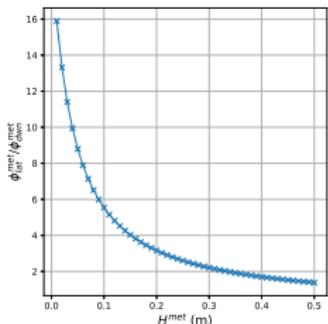
- ▶ En premier lieu car $(U_y, Zr_{1-y})O_{2-x} + (Fe, \dots) \neq$ système "inerte"
→ transfert de masse inter-couche et *changement de stratification* en particulier
- ▶ Ainsi, une *évaluation stationnaire* du comportement du corium en cuve *ne suffit pas* ...
ça se complique !



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)

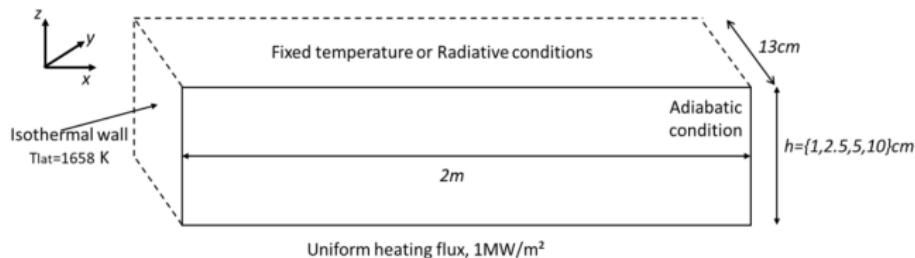
► Une question abordée très récemment dans le cadre du projet de recherche européen INTEGR (2015-2019) → *illustration de la R&D menée au CEA*

- Corrélations "standards" → $\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met} \nearrow$ lorsque $H^{met} \searrow$ jusqu'à des valeurs très faibles ($< 1\text{cm}$).
- Les essais de la campagne BALI-Metal suggèrent que ces *corrélations surestiment* $\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met}$ pour $H^{met} \leq 10\text{cm}$
- Hormis dans le cas singulier d'une condition adiabatique en surface haute, on s'attend à ce que $\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met} \rightarrow 0$ quand $H^{met} \rightarrow 0$
- Validité de ces corrélations pour cette configuration ?*

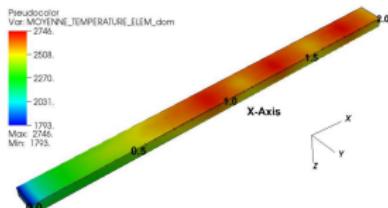
- ▶ Sans le dire, en assimilant le transfert de chaleur vers le haut à celui d'une cavité de Rayleigh-Bénard, on a considéré :

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 $\phi_{up}^{BC}(T_{up}^{met}) = \varepsilon_{up}\sigma((T_{up}^{met})^4 - (T^{BC})^4)$

- ▶ *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



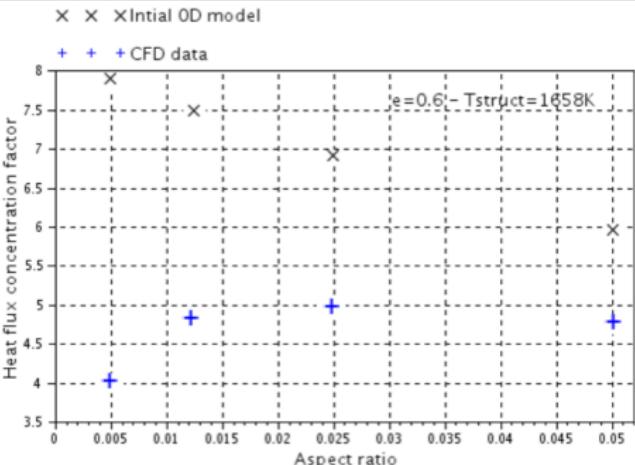
Température pour $H^{met} = 5cm$
(moyennée en temps en régime
pseudo-stationnaire)

Couche métallique supérieure - transfert radiatif en surface haute

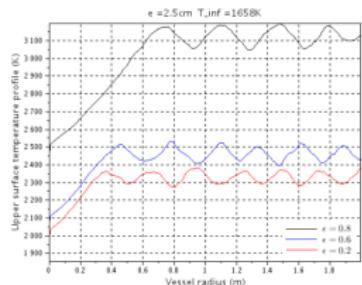
► Rôle prédominant de la CL pour H^{met} faible

Boundary condition	Fixed T_{up} 1960K	Fixed T_{up} 2200K	Fixed T_{up} 2460K	Radiative $T_{in} = 1658K$ and $\varepsilon = 0,2$	Radiative $T_{in} = 1658K$ and $\varepsilon = 0,8$	Radiative $T_{in} = 400K$ and $\varepsilon = 0,2$	Radiative $T_{in} = 400K$ and $\varepsilon = 0,8$
Thickness in cm	Heat flux concentration factor $\phi_{lat}^{met}/\phi_{dwn}^{met}$ (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 ($T = 3098K$, $T_{up} = 3012K$)	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 ($T = 2960K$, $T_{up} = 2905K$)	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 ($T = 2178K$, $T_{up} = 2086K$)

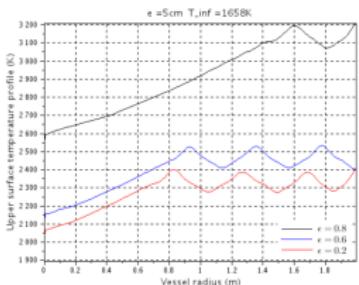
$\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met}$ fonction de H^{met} et de la condition en limite haute



$\phi_{lat}^{met} / \phi_{dwn}^{met}$ dans le cas $\epsilon_{up} = 0.6$ et $T^{BC} = 1658K$



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



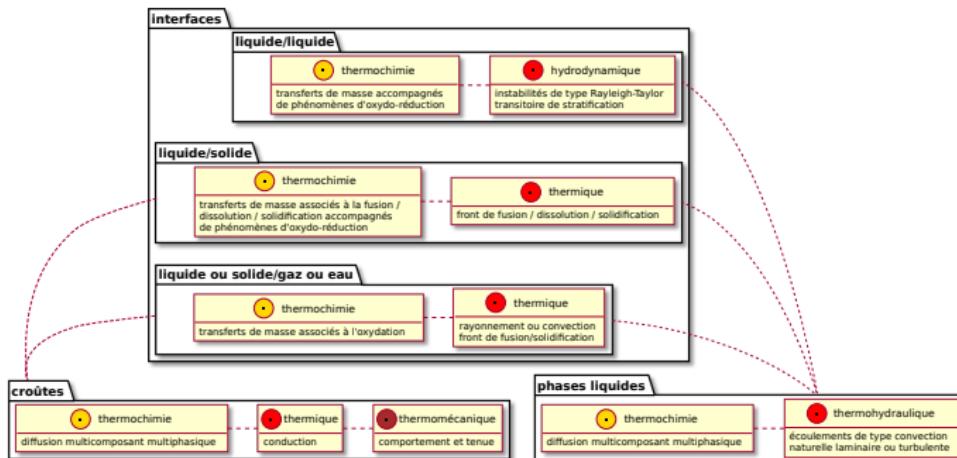
► Deux nombres adimensionnels en plus avec condition radiative
e.g. **nombres de Stefan** (= Pe/Th)

$$St \equiv \frac{\varepsilon \sigma T H}{\lambda}$$

► Nouvelle corrélation

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

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

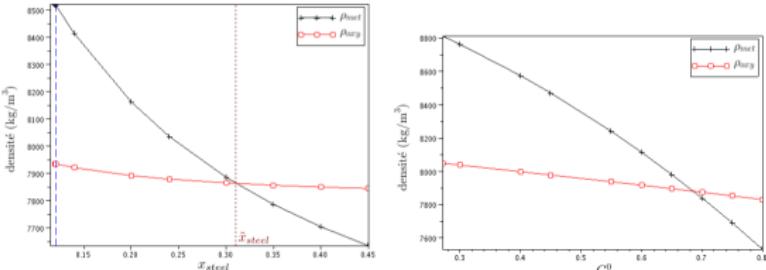
- ▶ Nombreux *phénomènes mal connus ou quantifiés*
- ▶ Un phénomène de *premier ordre*, le *transfert de masse inter-couche* qui, couplé avec l'hydrodynamique, conduit à des *changements de stratification*
- ▶ Présentation de la *phénoménologie* et ouverture sur la *R&D au CEA* sur ce sujet

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

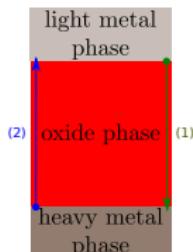
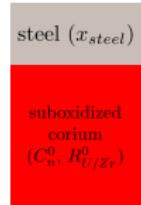
Densités des phases oxyde (ρ_{oxy}) et métal (ρ_{met}) calculées à l'équilibre



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

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

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



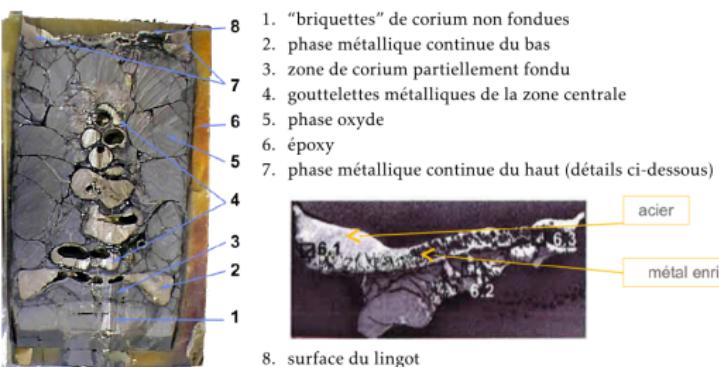
- ▶ Transitoire AG en fond de cuve
→ *apport progressif d'acier fondu*
- ▶ *Deux transitoires de stratification* associés à ces équilibres à deux couches potentiels :
 - (1) formation de la couche métallique lourde
→ *Aggravement du risque de focusing effect*
 - (2) retour à une stratification "normale"
→ *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 $\rho_{\text{oxy}} \leq \rho_{\text{met}}$ → *mouvement hydrodynamique, instabilité de Rayleigh-Taylor*
- ▶ 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 : $H = 5\text{cm}$, $Gr \approx 4.10^7$, $Nu \approx 10$ (cf. TD), $D = 5.10^{-9}\text{m}^2.\text{s}^{-1}$, $Sh/Nu \approx 80 \rightarrow \tau_m \approx 10\text{min}$
 - 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 $m_{\text{oxy}} \approx 45\text{kg}$ et $x_{\text{steel}} \approx 0.1$) - 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]

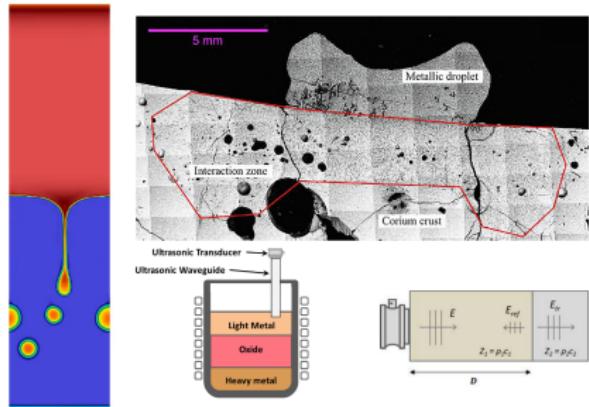


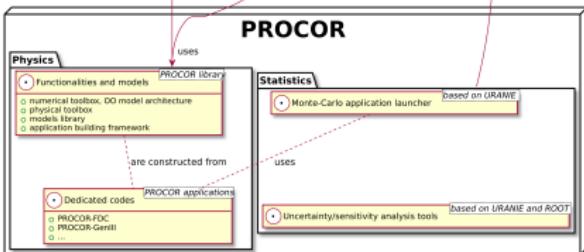
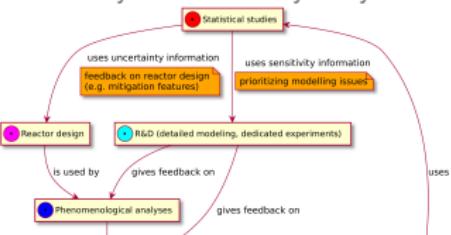
Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire

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

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

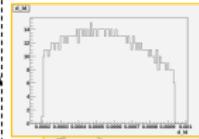
SOFTWARE PLATFORM PROCOR FOR CORIUM PROPAGATION

PROCOR Platform: (CEA, 2013-)

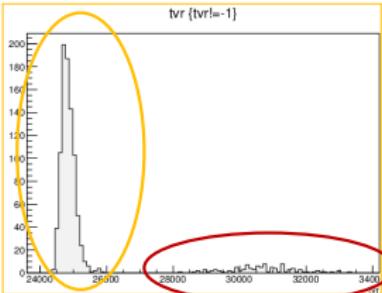
- an **object-oriented library** of numerical tools and models and a framework to build dedicated corium propagation analysis applications
- a **Monte-Carlo code launcher** and some uncertainty/sensitivity analysis tools using the URANIE library (CEA) based on the ROOT (CERN) framework
- maximize code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

Random variable laws
for inputs (+ possible
correlations)

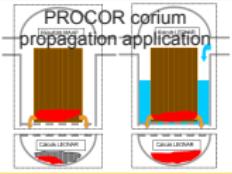
Sampling
(e.g. Latin Hypercube Sampling)



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



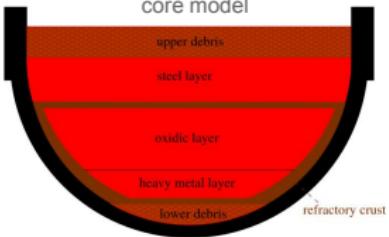
Code Launching
(multithreading/message-passing)



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

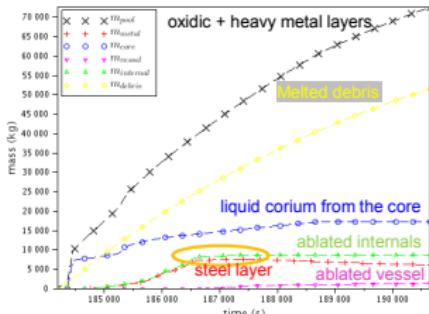
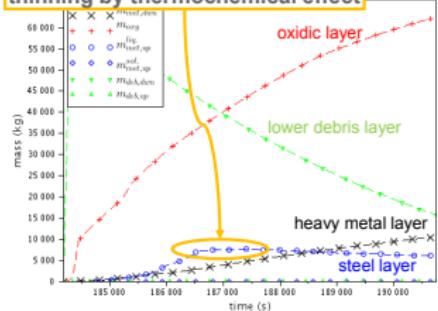
→ one step further than the stationary “bounding situations” approach in the comprehension and evaluation of the vessel failure risk

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

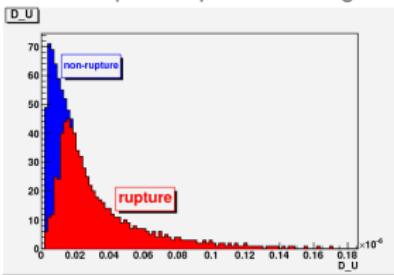
SENSITIVITY ANALYSES REGARDING THE VESSEL FAILURE

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 : $1.81\text{E}-8 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$)]
- 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

Introduction au code PROCOR

Introduction au calcul statistique avec PRO-COR/URANIE

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



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



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.



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.



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.



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.



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.