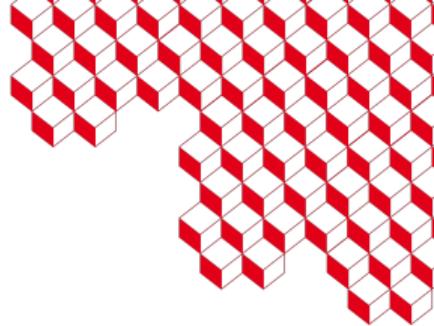




iresne



Accidents graves des réacteurs nucléaires

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

Cycles nucléaires - filière ENSE3/IEN, octobre 2024

Romain Le Tellier (romain.le-tellier@cea.fr) Jules Delacroix Pascal Piluso
CEA, DES, IRESNE, DTN, CADARACHE



Objectifs pédagogiques

- 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 !



Sommaire

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

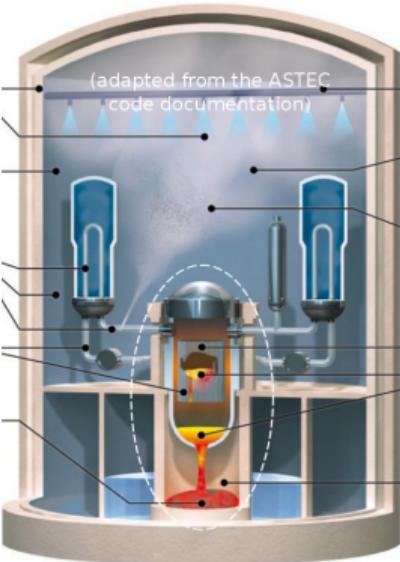
Cinétique de stratification : échange interfacial et instabilité de Rayleigh-Taylor

Illustration du risque de percement de la cuve en transitoire



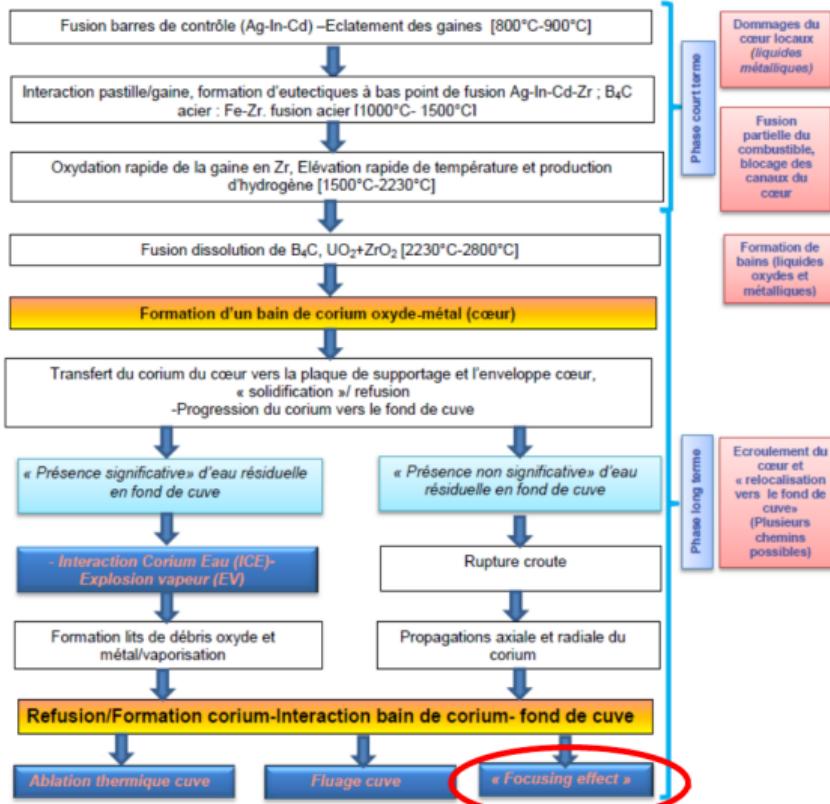
Rappel du contexte général (cf. cours de P. Piluso)

- 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)

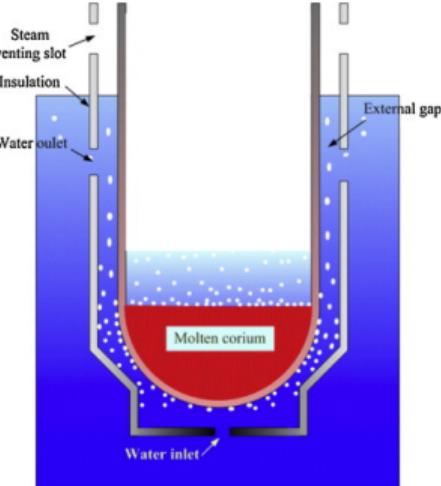




Ce cours: stratégie de rétention en cuve

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

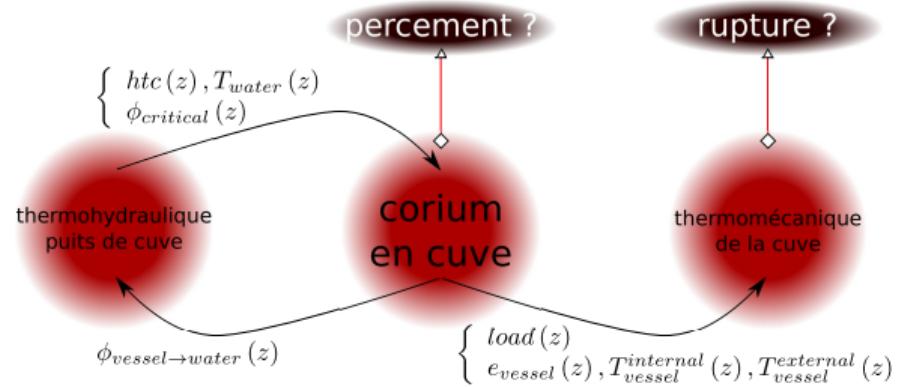
- Quoi ? Une *stratégie de gestion de l'accident de fusion du cœur* introduite dans les années 1990
[Henry and Fauske, 1993, Tuomisto and Theofanous, 1994]
- Pourquoi ? *Garder l'intégrité de la cuve* pour y contenir les matériaux fondus du cœur
- Comment ? *Dépressurisation précoce* de la cuve et *renoyage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

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

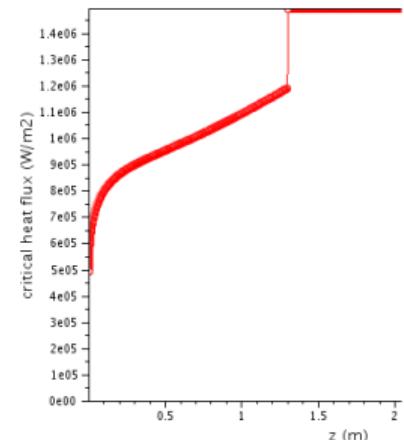
On se concentrera ici sur la question du *comportement du corium en cuve*

- 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

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

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



Corrélation ULPU appliquée à un fond de cuve en calotte sphérique

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

1.

Le corium en fond de cuve

version simple

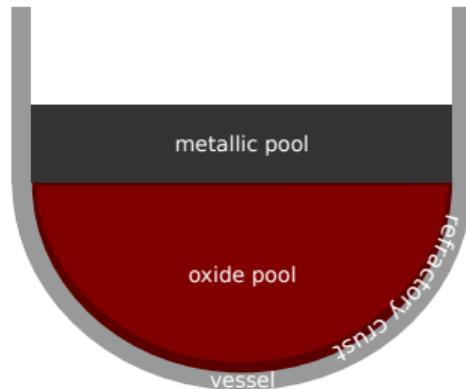


Le corium en fond de cuve: version simple

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

- approche “historique” utilisée en particulier dans la *démonstration de sûreté* des réacteurs AP600 puis *AP1000* [Esmaili and Khatib-Rahbar, 2004]

- dans sa version initiale, *configuration “à deux couches”* :



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

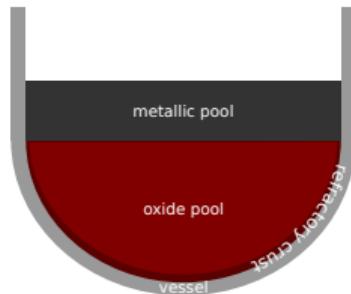
Configuration à deux couches

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



Corium en cuve et écoulements en convection naturelle

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

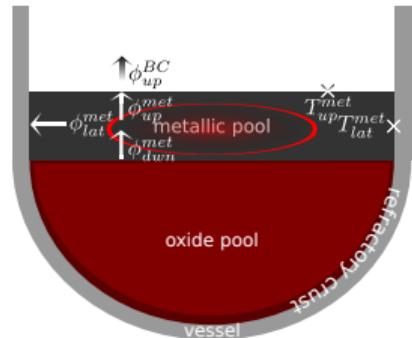
Propriétés des liquides mis en jeu et comparaison à l'eau liquide

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

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



Thermohydraulique de la couche métallique supérieure



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

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

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

Bilan thermique intégral :

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

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

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

- Les "*paramètres de contrôle*" sont :

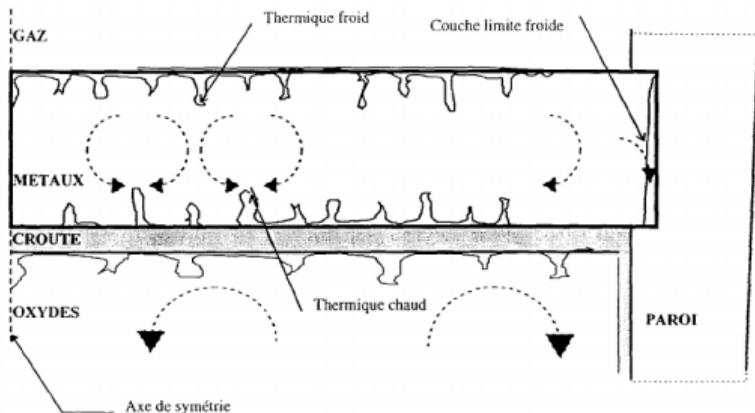
- $Pr, Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2} = \frac{\text{forces de gravité}}{\text{forces visqueuses}}$ (ou $Ra = Gr \cdot Pr$)

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

- éventuellement d'autres selon les conditions en limite supérieure

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

- De première importance car possibilité de *concentration de flux ("focusing effect")*
i.e. $\frac{\phi_{lat}^{met}}{\phi_{dwn}^{met}} > 1 \rightarrow$ *risque principal de percement "thermique" de la cuve*
- Configuration étudiée expérimentalement e.g. dans la *campagne BALI-Metal* (CEA Grenoble) : avec de l'eau ($\triangle Pr$), 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 bas
 \rightarrow panaches ("thermiques") chauds intermittents
- couche de fluide plus froid en haut
 \rightarrow panaches froids intermittents
- couche limite froide latérale
 \rightarrow accélération locale

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



Couche métallique supérieure - instabilité de Rayleigh-Bénard

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

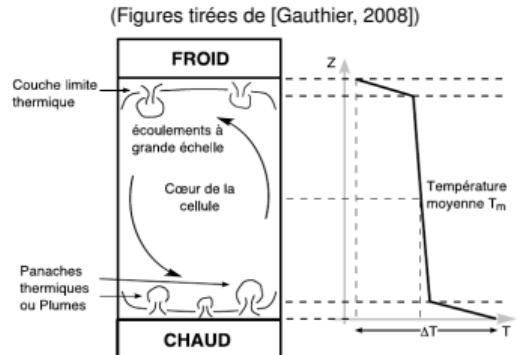


FIGURE 1.1 – Schématisation de l’écoulement à l’intérieur d’une cellule de Rayleigh-Bénard (à gauche). Profil moyen de température suivant la hauteur de la cellule (à droite).

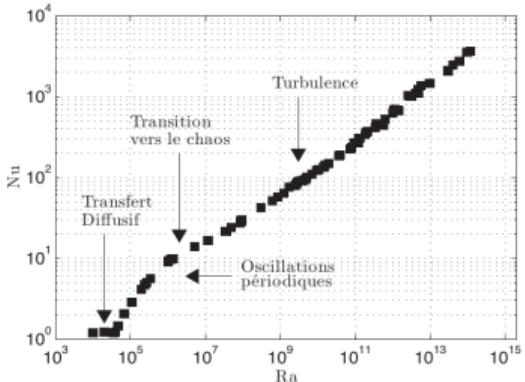


FIGURE 1.3 – Nombre de Nusselt Nu en fonction du nombre de Rayleigh Ra [Chavanne, 2001].

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

H. Bénard (1900) “Je n’ai pas la prétention d’avoir 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)



Couche métallique supérieure - refroidissement latéral

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

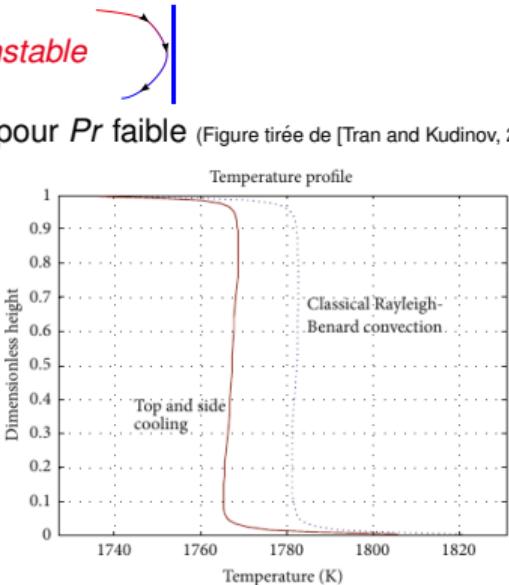
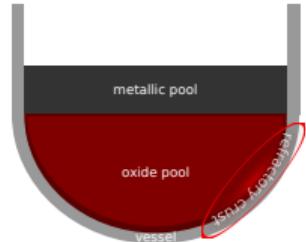


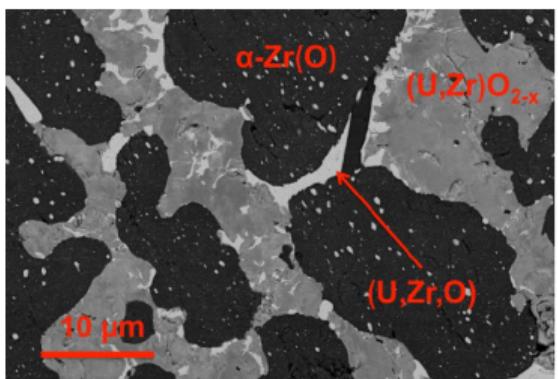
FIGURE 3: Temperature profiles across the fluid layer in two configurations of cooling (with/without side cooling).

- 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^{ème} partie de cours

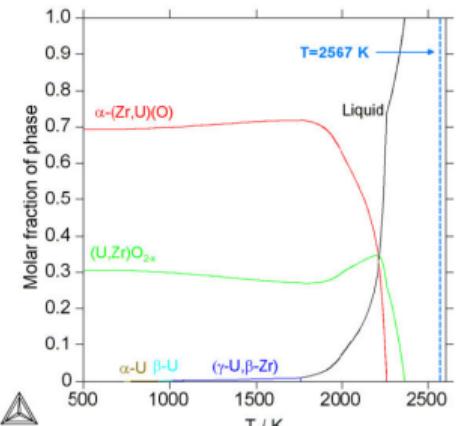
Bain oxyde - solidification à l'interface



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 :

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

(vitesse locale)

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

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

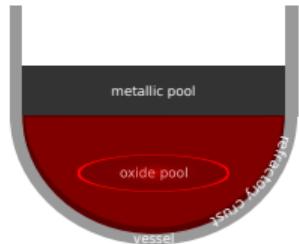
(débit massique intégral)

■ Δh_{ls} : chaleur latente spécifique de solidification

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

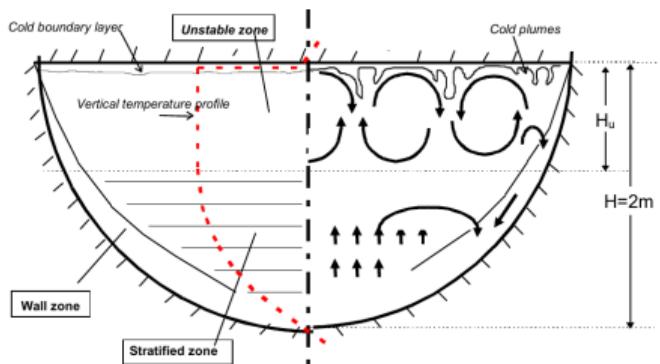


Bain oxyde - convection naturelle par chauffage volumique



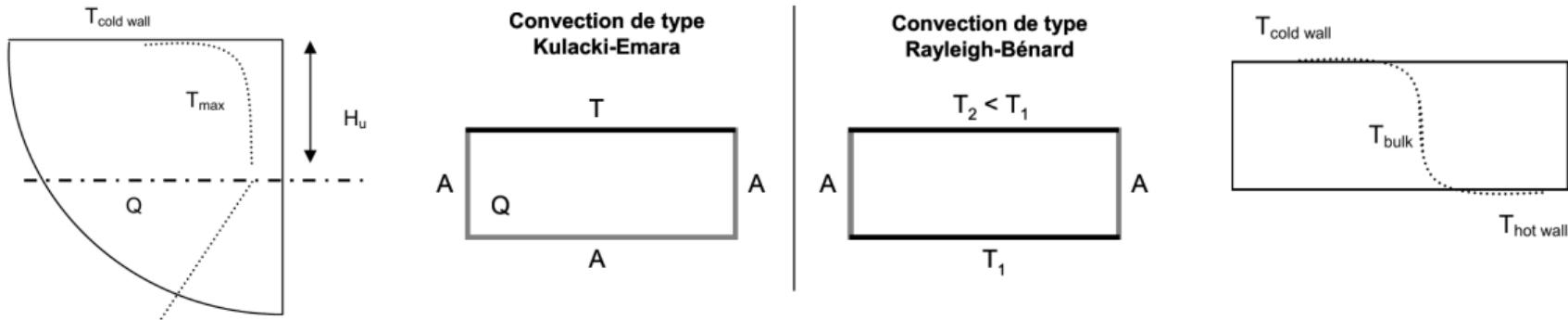
- *chauffage "en volume"* (puissance résiduelle associée à la décroissance des produits de fission) : puissance volumique q^{ox} (W/m³)
- refroidissement en surfaces latérale et haute
- en *régime turbulent* : $Ra_i^{ox} = \frac{g(H^{ox})^5 q^{ox} \beta^{ox}}{\lambda^{ox} \nu^{ox} \alpha^{ox}} \in [10^{14}, 10^{18}]$

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



- panaches froids et boucles de convection en haut
- couche limite froide latérale
- zone stratifiée thermiquement en bas

- 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



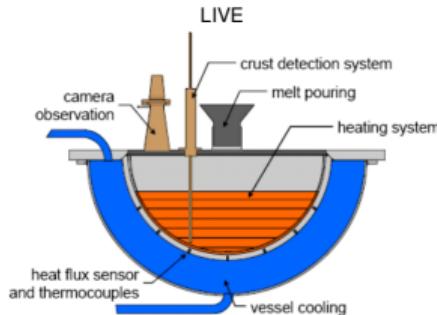
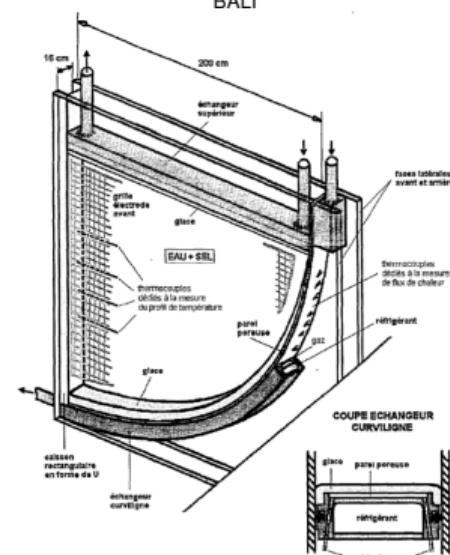
- avec un nombre de Rayleigh exprimé en fonction de $\Delta T = (T_{max} - T_{cold\ wall})$ et H_u
- à l'état stationnaire : $S_{up} \times \left(\frac{\lambda Nu_{up}}{H_u} \right) \Delta T = V \times q$
- ainsi, on peut travailler en nombre de *Rayleigh interne* $Ra_i = \frac{g(H_u)^5 q \beta}{\lambda \nu \alpha}$:
$$Nu_{up}^{RB} = a \times Ra^b Pr^c \iff Nu_{up}^{KE} = 2a^{\frac{1}{b+1}} \times Ra_i^{\frac{b}{b+1}} Pr^{\frac{c}{b+1}}$$
- 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	Ra^*	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
LIVE	Hemisphere Radius: 0.5 m	1:5 (German PWR)	Cable-type coil heaters	NaNO ₃ -KNO ₃	Water	2×10^{13} - 8×10^{13}	8.1-10.4	Insulated top wall and isothermal bottom wall	- Natural convection heat transfer in homogeneously heated pools - Crust growth characteristics - Effect of initial relocation conditions

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

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



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

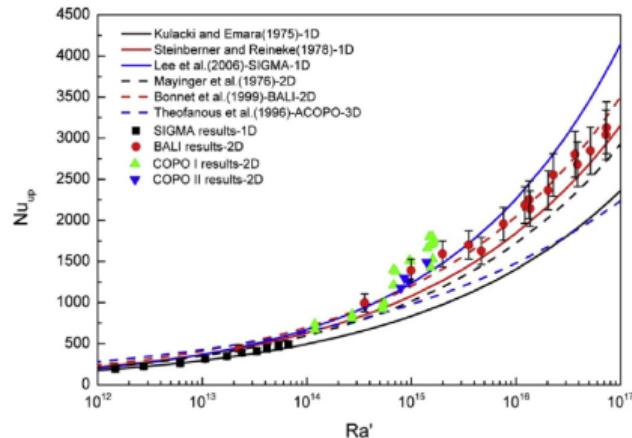


Fig. 3. Comparison of upward heat transfer in the high Rayleigh region.

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

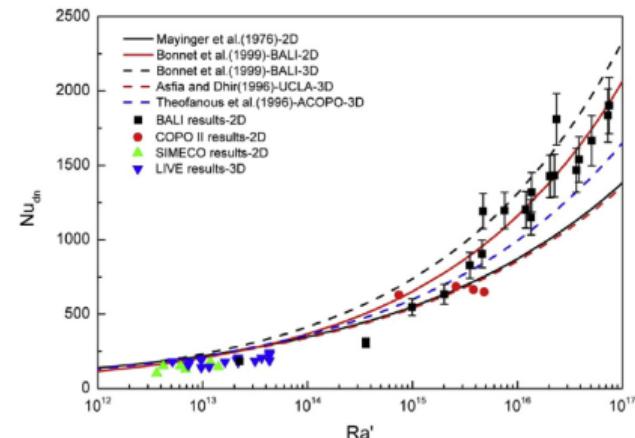
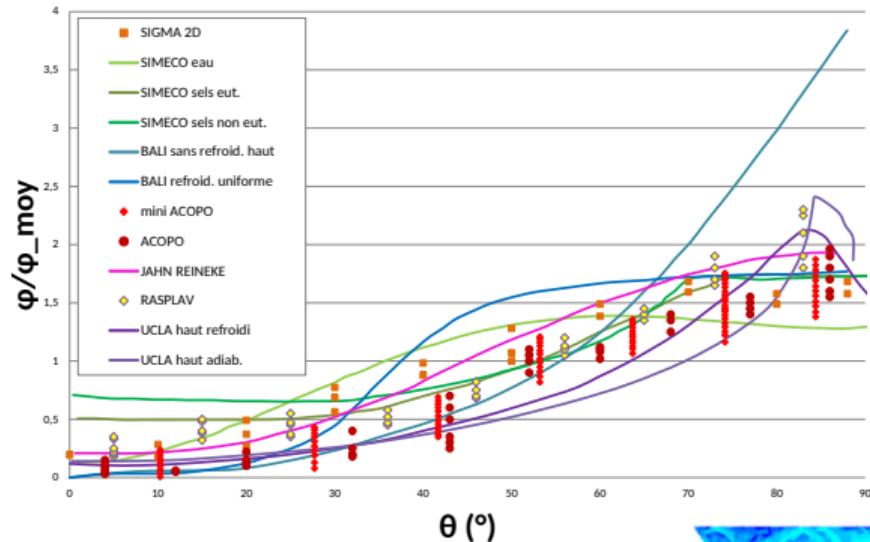


Fig. 4. Comparison of downward heat transfer in the high Rayleigh region.

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

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

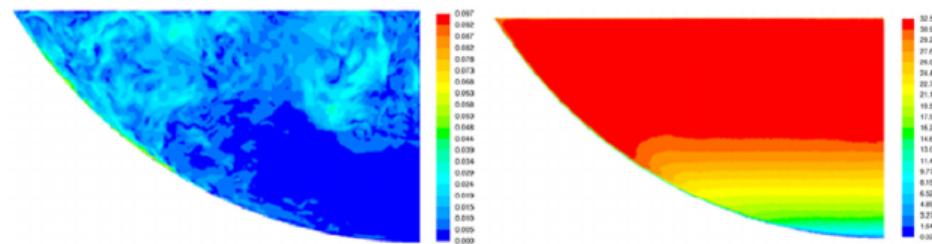
Résultats expérimentaux pour le flux local $\varphi(\theta)$ ($H/R = 1$)



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

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

- 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

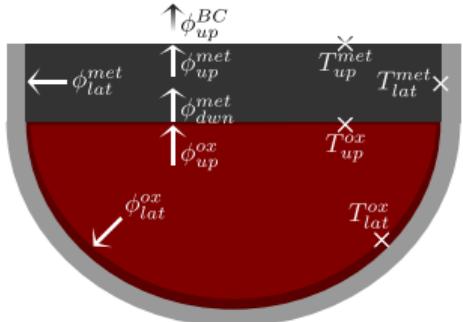


vitesse et température - calcul CFD-LES - essai BALI 1-15

2 TD

évaluation du bilan thermique intégral

TD : évaluation du bilan thermique intégral



Configuration à deux couches et notations des flux et températures

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

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

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



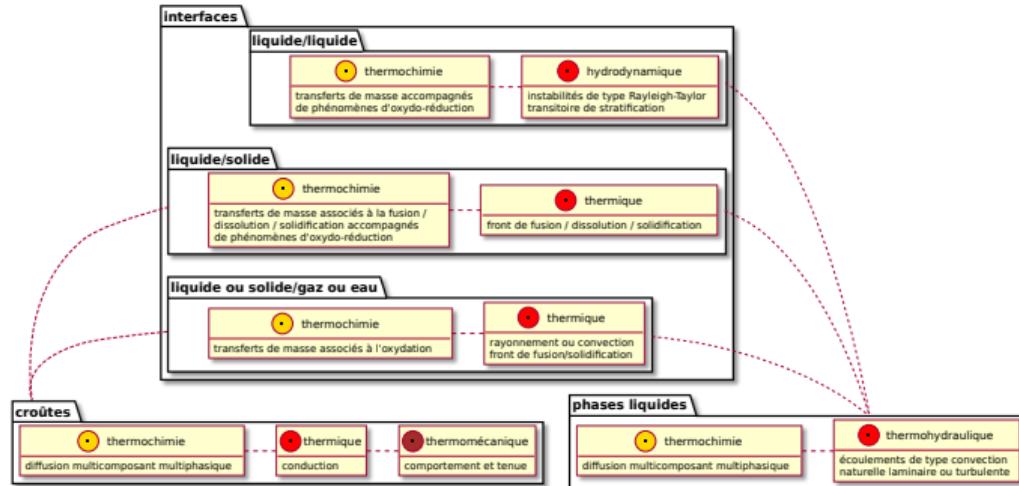
3. Le corium en fond de cuve est-ce si simple?



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

Pas tout à fait...

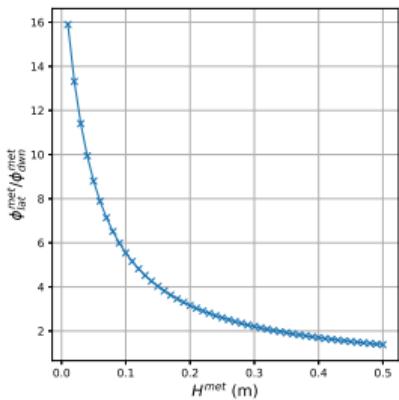
- En premier lieu car $(U_y, Zr_{1-y}) O_{2-x} + (Fe, \dots) \neq \text{système "inerte"}$
→ transfert de masse inter-couche et *changement de stratification* en particulier
- Ainsi, une *évaluation stationnaire* du comportement du corium en cuve *ne suffit pas ... ça se complique* △



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)

- 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 IVYIR (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 :

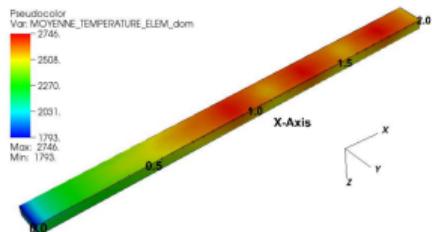
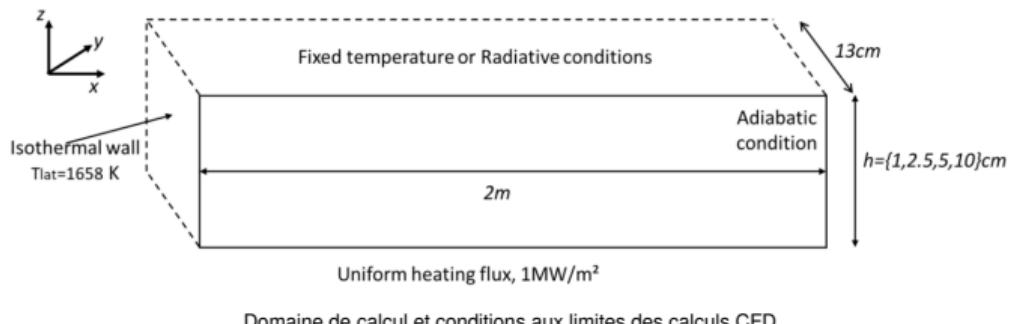
condition inhomogène de transfert radiatif \Leftrightarrow condition uniforme T_{up}^{met} imposée telle que

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

- 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)
- $H^{met} \in [1, 10] \text{ cm}$

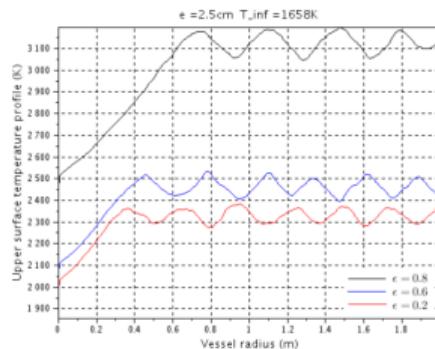


Température pour $H^{met} = 5 \text{ cm}$ (moyennée en temps en régime pseudo-stationnaire)

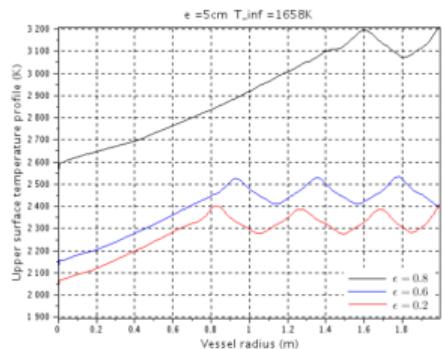
■ Rôle prédominant de la CL pour H^{met} faible

Boundary condition	Fixed $T_{up} = 1960K$	Fixed $T_{up} = 2200K$	Fixed $T_{up} = 2460K$	Radiative $T_{\infty} = 1658K$ and $\varepsilon = 0,2$	Radiative $T_{\infty} = 1658K$ and $\varepsilon = 0,8$	Radiative $T_{\infty} = 400K$ and $\varepsilon = 0,2$	Radiative $T_{\infty} = 400K$ and $\varepsilon = 0,8$
Thickness in cm	Heat flux concentration factor ϕ_{lat}/ϕ_{down} (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 ($T = 2178K$, $T_{up} = 2086K$)

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

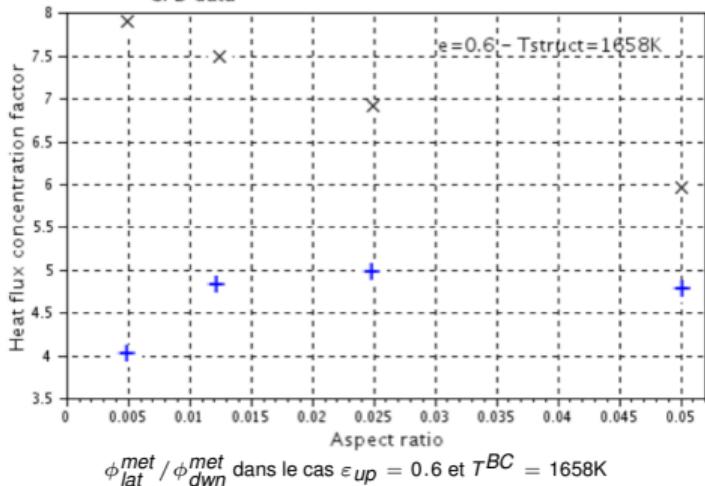


Profil radiaux de température pour $H^{met} = 2.5cm$ et $H^{met} = 5cm$



× × × Initial 0D model

+ + + CFD data



■ Deux nombres adimensionnels en plus avec condition radiative

e.g. nombres de Stefan ($= Pe/Th$)

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

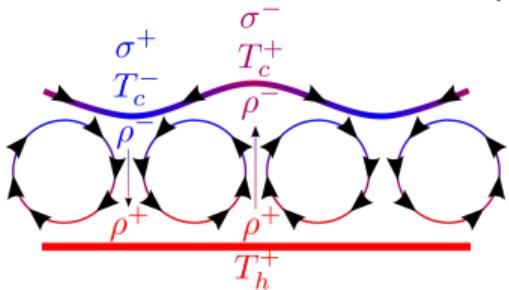
■ Nouvelle corrélation

$$Nu_{up} = a \times Ra^b Pr^c St_1^d \left(1 + e St_2^f \right)$$



Couche métallique supérieure - instabilité de Bénard-Marangoni

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



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

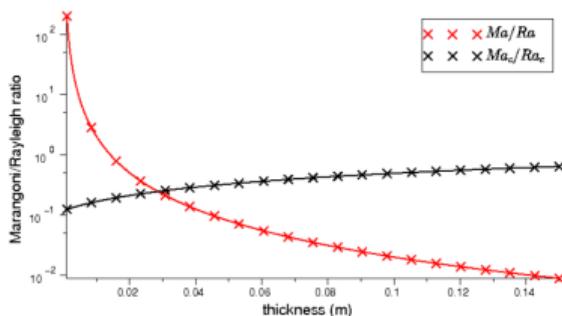
■ Instabilité de Bénard-Marangoni thermique

- $Ma = \frac{\gamma H \Delta T}{\rho_0 \nu \alpha} = \frac{\text{effets thermocapillaires}}{\text{effets dissipatifs (viscosité et diffusion thermique)}}$
- *instabilité conditionnelle* (combinée à Rayleigh-Bénard) : [Nield, 1964]

$$\frac{Ra}{Ra_c} + \frac{Ma}{Ma_c} = 1 + \epsilon(Cr, Ga) \text{ avec } \left\{ \begin{array}{lcl} Cr & = & \frac{\rho \nu \alpha}{\sigma_0 H} = \text{déformation de la surface} \\ Ga & = & \frac{g H^3}{\nu^2} = \frac{\text{effets de flottabilité}}{\text{effets visqueux}} \end{array} \right.$$

a priori, effet pouvant être important pour H faible

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



- pour $H = 0.1\text{m}$, en considérant $\Delta T = 100\text{K}$ et $\gamma > 0$ (fer pur : $4 \times 10^{-4}\text{N.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), $Ga \approx 2 \times 10^{10}$, $Ra \approx 2 \times 10^7$, $Ma \approx 5 \times 10^5$, $Cr \approx 10^{-7}$
- $\frac{Ma}{Ma_c} \geq \frac{Ra}{Ra_c}$ pour $H \leq 3\text{cm}$
- $Cr \ll 1$ et $Ga \gg 1$: *déformation faible*

- un effet à prendre en compte *a priori* pour $H \leq \sim 5\text{cm}$
- simulation simplifiée avec une surface plane et une condition limite modifiée :

$$\nu_x = 0 \longrightarrow \frac{\partial v_x^*}{\partial z^*} = Ma \frac{\partial T^*}{\partial x^*}$$
- 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 géométrie parallélépipédique des essais BALI-Metal (voir [Peybernes et al., 2019])

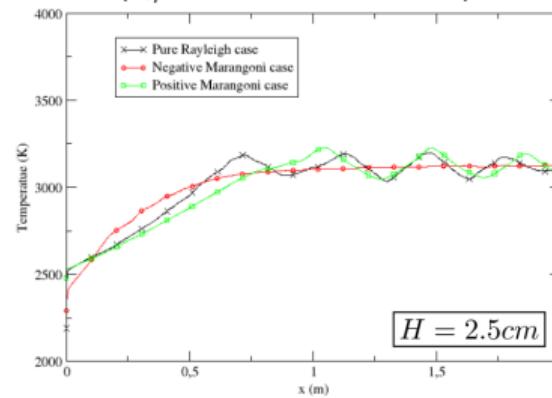
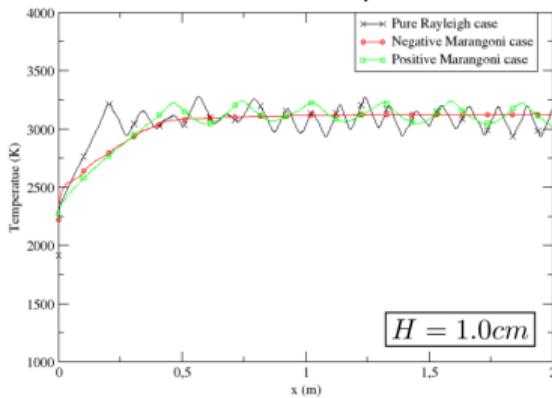
■ *Quelques résultats* extraits de cette étude [Peybernes et al., 2019]

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

	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 $T^{BC} = 1658\text{K}$)

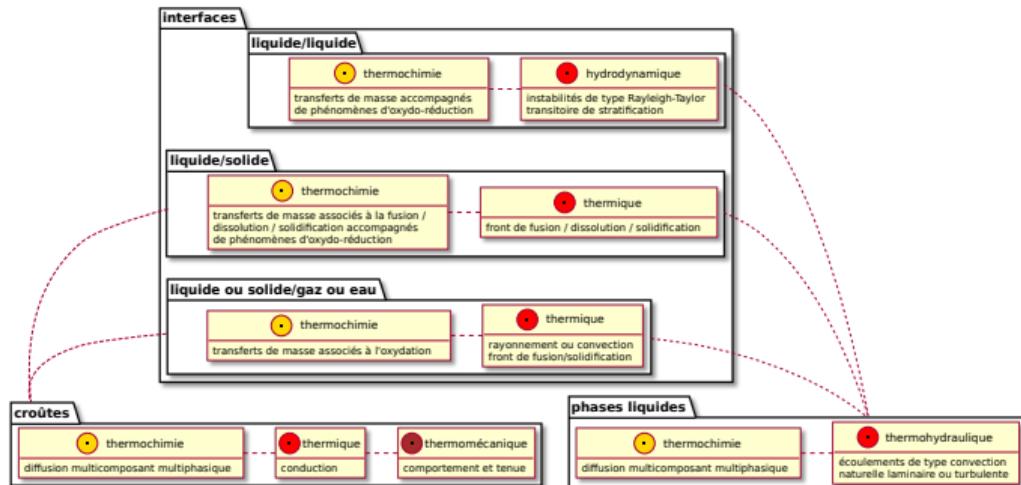


- Loin de la surface latérale, convection “stoppée” pour $Ma < 0$
- Près de la surface latérale, pour H faible, $Ma \leqslant 0 \rightarrow$ *élargissement de la zone latérale de gradient thermique* → refroidissement par transfert radiatif réduit dans cette zone
Aggravement du focusing effect mais large 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”



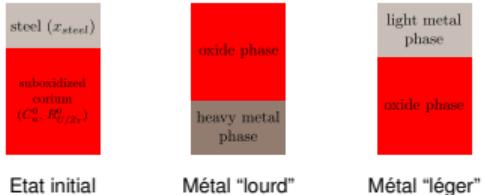
Représentation schématique et partielle de la modélisation du bain de corium en cuve

- 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 $\rho_{met} \leq \rho_{oxy}$ suivant :

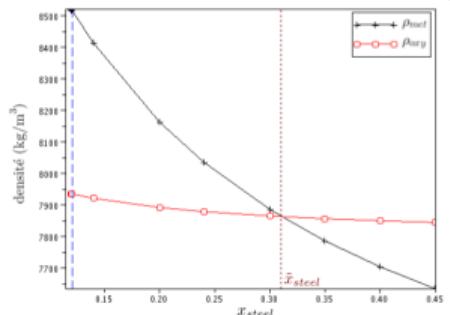


- Expériences à "petite échelle"
 - $\varnothing \leq 7\text{cm}$ et $m_{oxy} \sim 100\text{g} \text{ à } 2\text{kg}$
 - e.g. programme MASCA (OCDE) [Tsurikov et al., 2007]

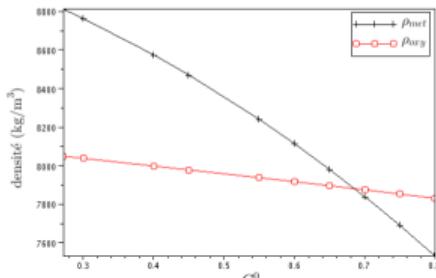


- le degré d'oxydation du Zr (C_n^0) et du rapport molaire U/Zr ($R_{U/Zr}^0$) du corium oxyde initial
- le rapport entre les masses d'acier et de corium oxyde initialement mises en présence (x_{steel})

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



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

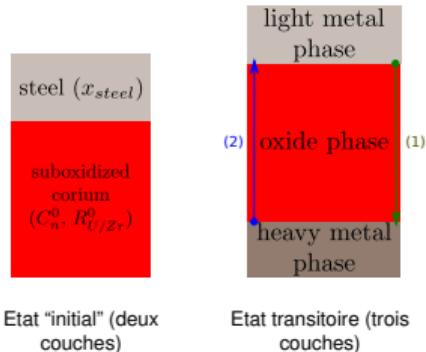


En fonction de C_n^0 pour ($\bar{T} = 2855\text{K}$, $x_{steel} = 0.1$
et $R_{U/Zr}^0 = 1.17$) → MASCA-MA-9

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

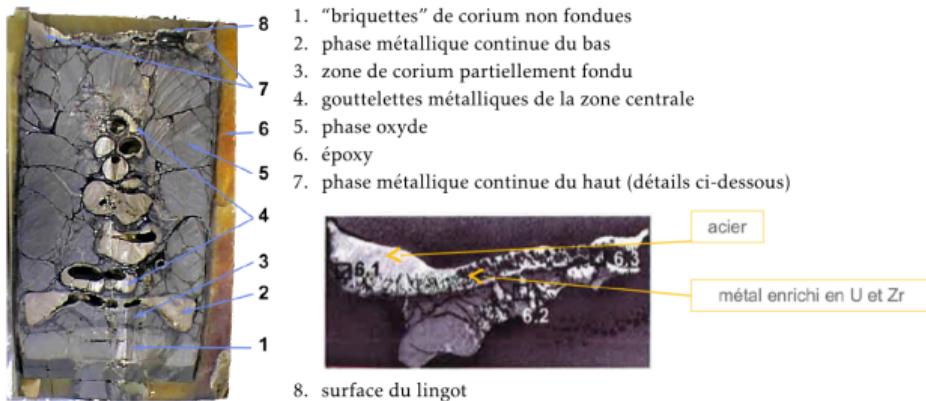
- transport de masse intra-phase
 - “inversion” de $\rho_{oxy} \leq \rho_{met}$ → *instabilité de Rayleigh-Taylor* puis inversion des phases
- Deux *cinétiques combinées* : ordres de grandeur pour (1) :

- 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 → $\sim 10\text{s.m}^{-1}$

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

Observations expérimentales indirectes :

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

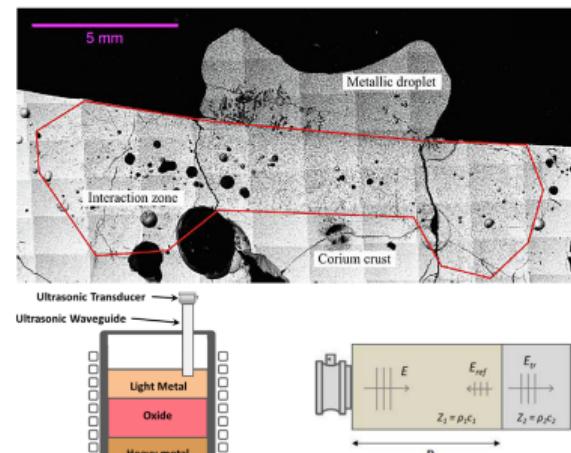
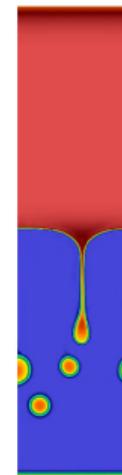


- état final ~ un instant du transitoire de formation de la phase métallique lourde
- Rayleigh-Taylor en gouttelettes
- gradient de concentration en U, Zr dans la couche métallique supérieure

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

- ... Une *incertitude forte* / des modèles (intégraux) en manque de calage/validation
 - MASCA-RCW ne donne qu'un information indirecte sur le transitoire
 - Aucune expérience caractérisant le transitoire (2) de retour à une stratification "normale"
 - Impact d'une croûte à l'interface oxyde/acier
- *Important ! → meilleure quantification du comportement transitoire du corium en cuve*
- En particulier, *R&D au CEA* :

- Modélisation et *simulation "mésoscopique"* (CFD)
[Zanella et al., 2020]
- Caractérisation expérimentale de la *dissolution d'une croûte de corium oxyde par de l'acier fondu*
[Pivano et al., 2019]
- Conception d'un *dispositif experimental*
~ *MASCA-RCW* mais avec *suivi en ligne des interfaces*
par mesure acoustique [Cavaro et al., 2019]



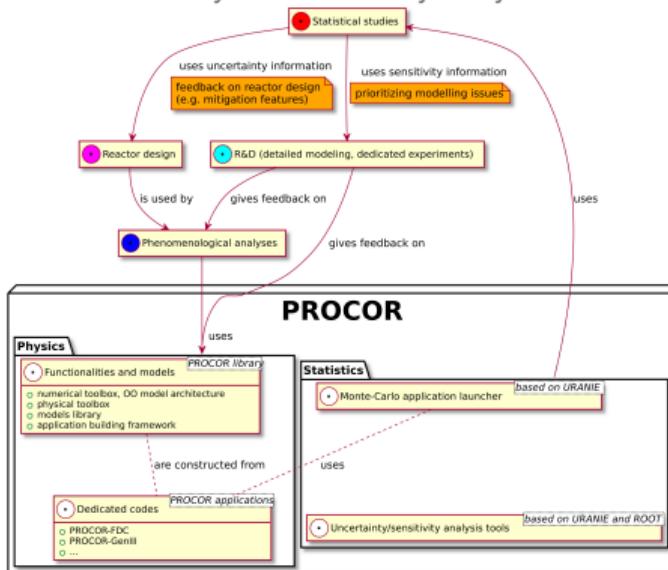
4.

Illustration du risque de percement de la cuve en tran- sitoire

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

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

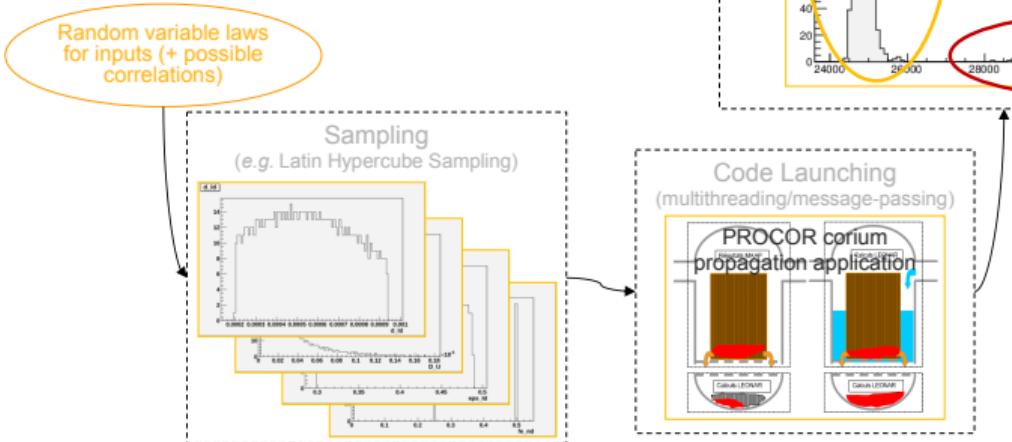


- **Main motivations:**
 - supplement integral source-term codes for detailed statistical studies
 - statistical studies carried out with stationary model of corium pool configurations ("bounding cases") may be insufficient (e.g. transient focusing effect)
- **Input data:** core degradation calculations from an integral code

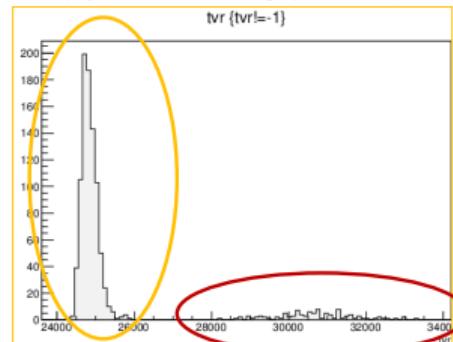
SOFTWARE PLATFORM PROCOR FOR CORIUM PROPAGATION

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



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

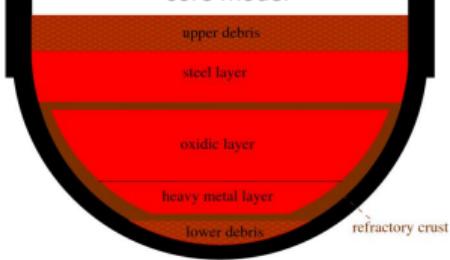


SENSITIVITY ANALYSES REGARDING THE VESSEL FAILURE

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

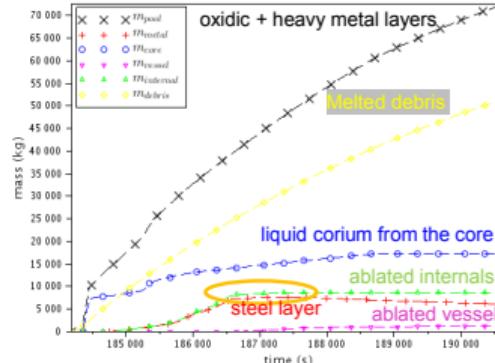
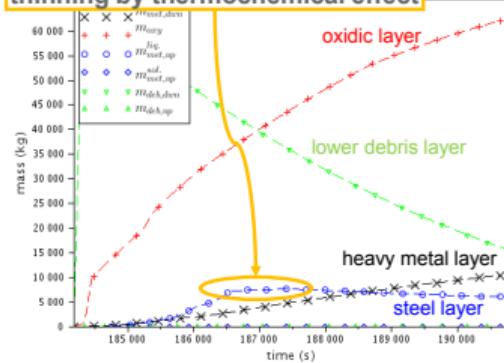
- Two different “modes” of vessel failure by focusing effect have been observed:
 - an early mode that occurs during the formation of the steel layer
 - ▲ ablated steel only from the vessel ablation (no internal structure)
 - a second mode that appears later during the thinning of the steel layer because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

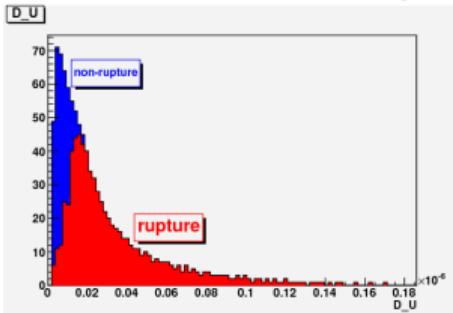
SENSITIVITY ANALYSES REGARDING THE VESSEL FAILURE

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/metallic phases



En guise de conclusion sur l'IVR

- 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

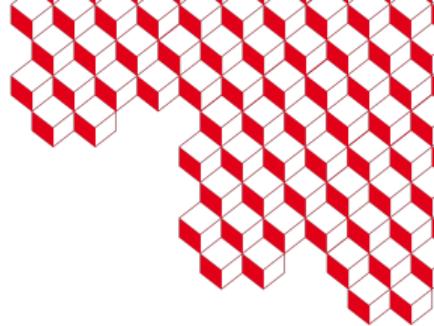
Au prochain cours (avec J. Delacroix)

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

- *Etalement du corium* (avec ou sans eau)
- *Interaction Corium-Béton* (avec ou sans eau)



iresne



Merci pour votre attention

Intéressés ?

Stages, thèses proposés ...

Ecrivez-moi !



Références I

-  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.
-  Cavaro, 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 16mn5 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.



Références II

-  Nield, D. A. (1964).
Surface tension and buoyancy effects in cellular convection.
Journal of Fluid Mechanics, 19(3):341–352.
-  Peybernes, M., Bigot, B., and Le Tellier, R. (2020).
Use of CFD results to model heat transfer in a thin metal layer.
In *Proc. of International Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics ATH'2020*, Palaiseau, France.
-  Peybernes, M., Saas, L., Le Tellier, R., and Dang, C. (2019).
Thermalhydraulic DNS of a thin metallic layer: application to the evaluation of nuclear reactor severe accident mitigation strategy.
In *Proc. of the 9th European Review Meeting on Severe Accident Research ERMSAR2019*, Prague, Czech Republic.
-  Pivano, A., Piluso, P., Chikhi, N., Fouquart, P., Delacroix, J., and Le Tellier, R. (2019).
Experimental studies of molten steel - suboxidized corium crust interaction for IVR application.
In *Proc. of the 9th European Review Meeting on Severe Accident Research ERMSAR2019*, Prague, Czech Republic.
-  Quaini, A. (2015).
Etude thermodynamique du corium en cuve - Application à l'interaction corium/béton.
PhD thesis, Université Grenoble-Alpes.
-  Saas, L., Le Tellier, R., and Skrzypek, E. (2017).
Rayleigh-Bénard and Bénard-Marangoni convection in a thin metallic layer on top of corium pool.
In *Proc. of the 8th European Review Meeting on Severe Accident Research ERMSAR-2017*, Warsaw, Poland.
-  Shams, A., Dovizio, D., Zwijsen, K., Guennic, C. L., Saas, L., Le Tellier, R., Peybernes, M., Bigot, B., Skrzypek, E., Skrzypek, M., Vyskocil, L., Carenini, L., and Fichot, F. (2020).
Status of computational fluid dynamics for in-vessel retention: Challenges and achievements.
Annals of Nuclear Energy, 135:107004.



Références III

-  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.