



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**

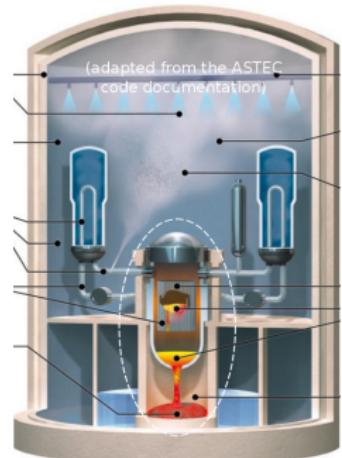
- Contexte général des accidents graves des RELs
- Ce μ -projet : stratégie de rétention en cuve

► **Le corium en fond de cuve : version simple**

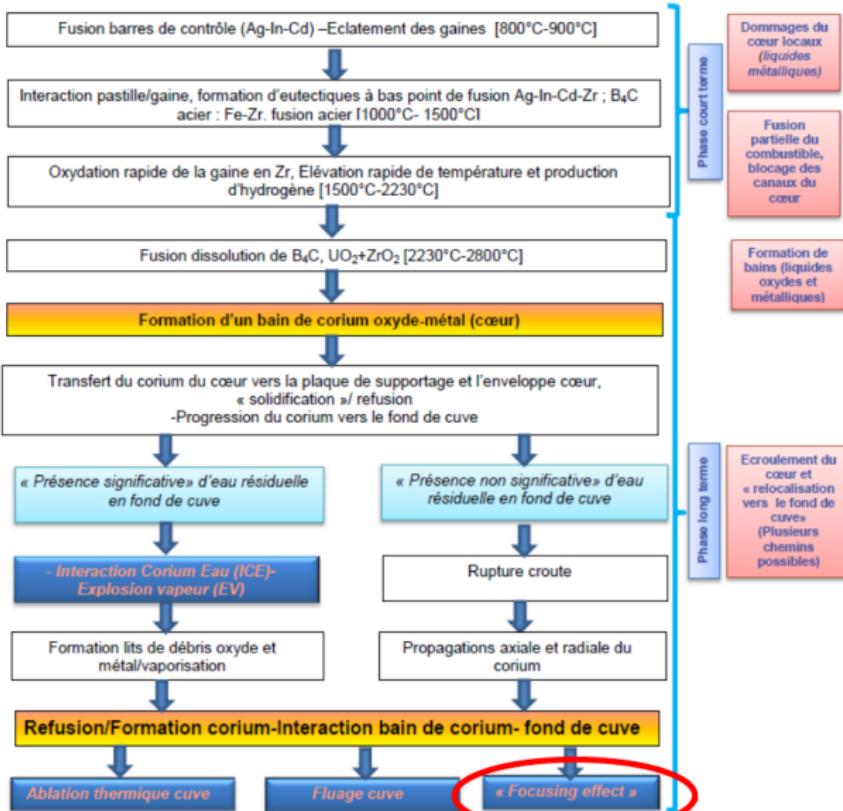
- Thermohydraulique de la couche métallique supérieure
 - Conditions thermiques en limites axiales : instabilité de Rayleigh-Bénard
 - Conditions thermiques en limite latérale : refroidissement
- Thermohydraulique du bain oxyde
 - Solidification à l'interface
 - Convection naturelle par chauffage volumique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

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*

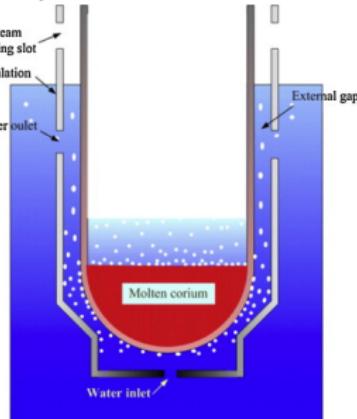


Dégradation en cœur et progression de l'accident vers le fond de cuve



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

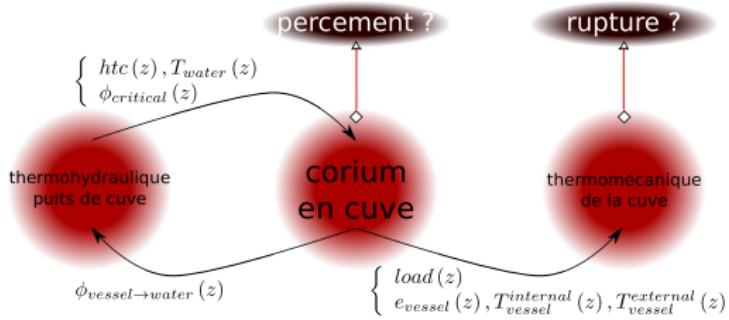
- ▶ Quoi ? Une *stratégie de gestion de l'accident de fusion du cœur* introduite dans les années 1990 [Henry and Fauske, 1993, Tuomisto and Theofanous, 1994]
- ▶ Pourquoi ? *Garder l'intégrité de la cuve* pour y contenir les matériaux fondu们 du cœur
- ▶ Comment ? *Dépressurisation précoce* de la cuve 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* ↔ éviter la crise d'ébullition (assèchement) ↔ garantir que le *flux de chaleur* en paroi externe de la cuve reste *inférieur au flux critique*
 - la cuve, partiellement ablatée, *résiste mécaniquement* à la charge imposée (poids du bain et éventuels pics de pression) en transitoire et sur le long terme



Ce 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*

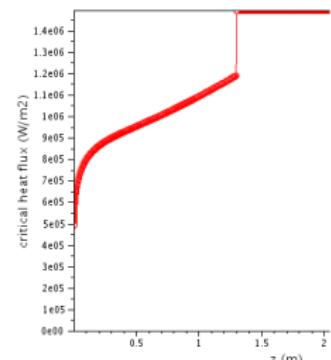
- ▶ thermohydraulique multiphasique → chargement thermique sur la cuve
- ▶ système ouvert ← apport d'acier fondu par ablation de structures internes et de la paroi de la cuve

Ce μ -projet : stratégie de rétention en cuve

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

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

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



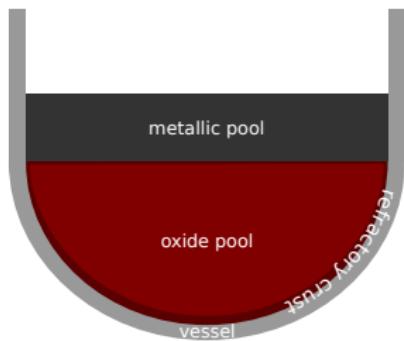
Corrélation ULPU appliquée à un fond de cuve en calotte sphérique

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

Le corium en fond de cuve : version simple

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

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

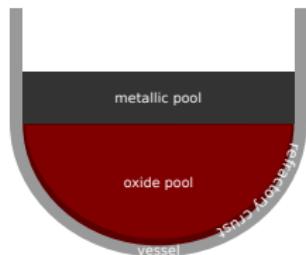


- en bas : une *phase oxyde* entourée d'une croûte réfractaire
- en haut : une *phase métallique* en contact direct avec la paroi de la cuve en fusion
- masses et compositions de ces deux couches obtenus à partir de simulations de la dégradation en cœur et d'hypothèses simplistes sur la fusion des structures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

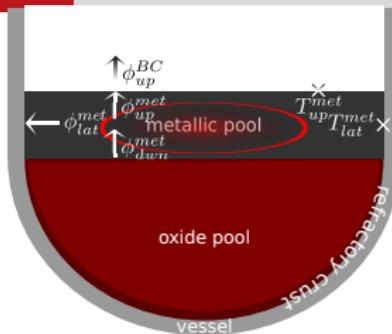


- ▶ couche métallique supérieure chauffée par le dessous, refroidie latéralement, par le dessus
- ▶ bain oxyde chauffé "en volume" et refroidie à sa frontière

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 :

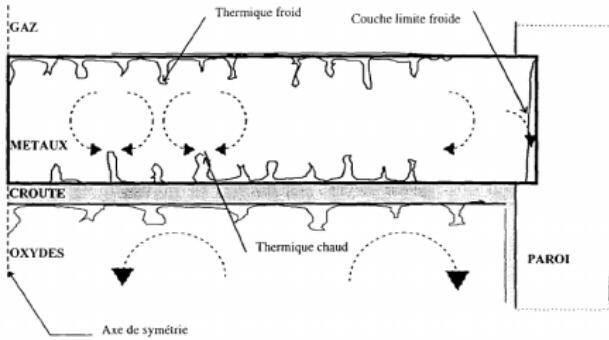
- $Pr, Gr = \frac{g\beta\Delta TH^3}{\nu^2} = \frac{\text{forces de gravité}}{\text{forces visqueuses}}$ (ou $Ra = Gr \cdot Pr$)

- 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])

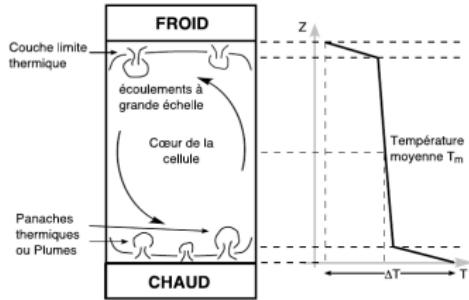


FIGURE 1.1 – Schématisation de l'écoulement à l'intérieur d'une cellule de Rayleigh-Bénard (à gauche). Profil moyen de température suivant la hauteur de la cellule (à droite).

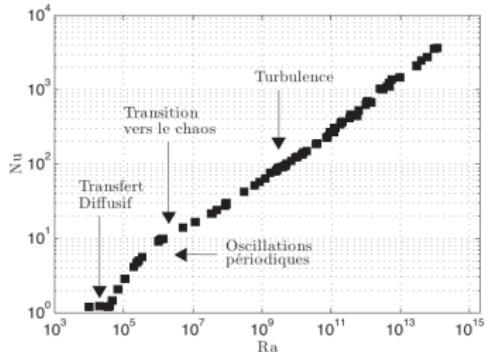


FIGURE 1.3 – Nombre de Nusselt Nu en fonction du nombre de Rayleigh Ra [Chavanne 2001].

- 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])

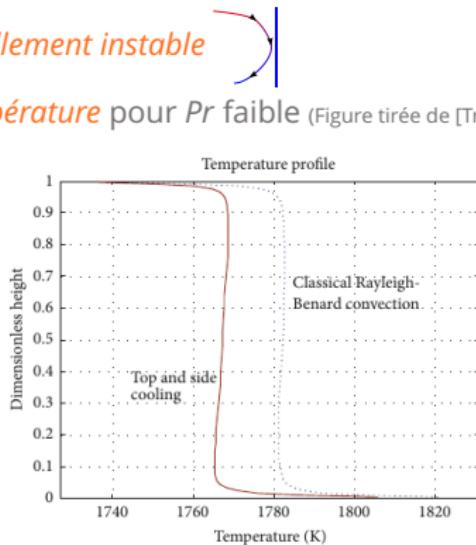
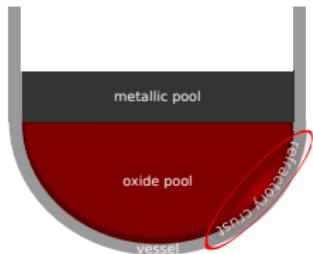


FIGURE 3: Temperature profiles across the fluid layer in two configurations of cooling (with/without side cooling).

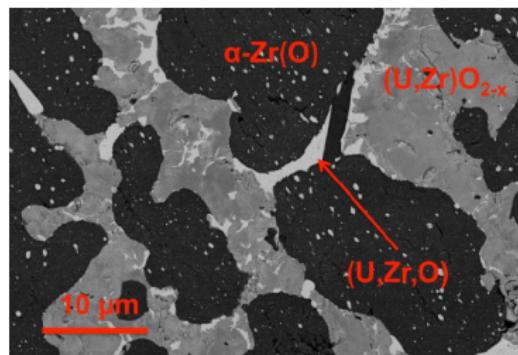
- ▶ Malgré (à cause ?) de la complexité pour cette couche métallique, les *modèles intégraux* ou "grossièrement maillés" ont recours à des *corrélations* établies séparément pour des *configurations "unidimensionnelles"* → cf. TD
- ▶ Avec des limites (et des perspectives) que nous aborderons en 2^{ème}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

Bain oxyde - solidification à l'interface

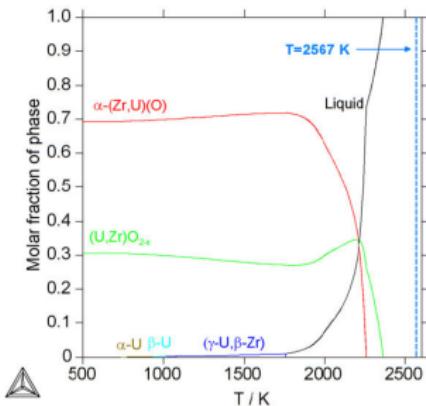


- ▶ Corium oxyde : *système ternaire* $(U_y, Zr_{1-y}) O_{2-x}$ "en manque d'oxygène" ($x \geq 0$)
- ▶ Température de liquidus $T_{liq}^{oxyde} \in [2300, 2950]K$ suivant y et x , toujours supérieur à $T_{liq}^{acier} \sim 1600K \rightarrow$ *solidification à l'interface bain oxyde/cuve*

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)

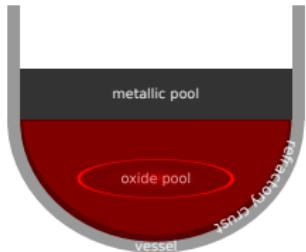
- \vec{n}^{ls} : normal orientée du liquide vers le solide

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

(débit massique intégral)

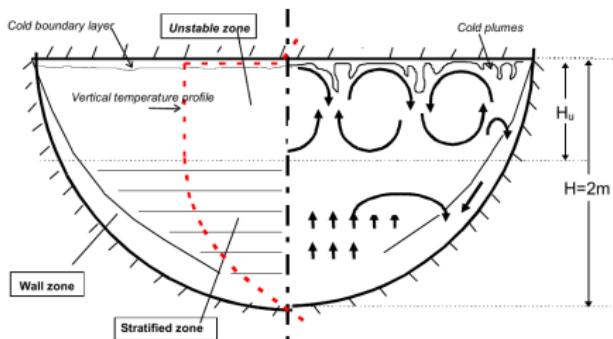
- Δh_{ls} : chaleur latente spécifique de solidification

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



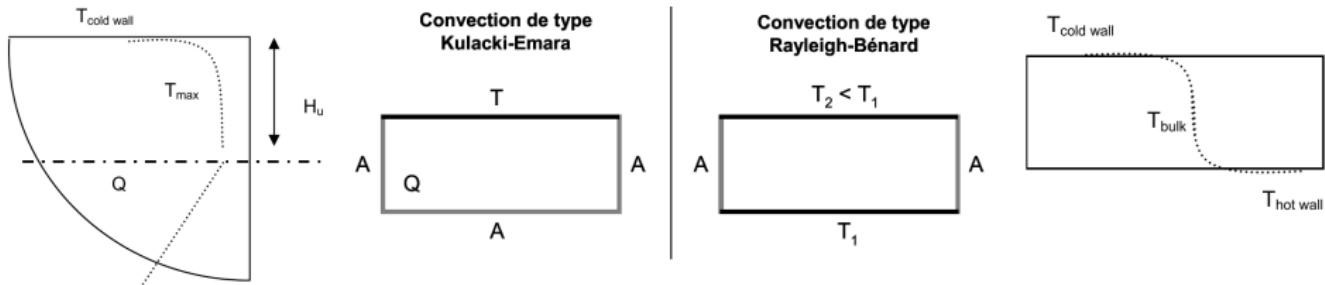
- ▶ **chauffage "en volume"** (puissance résiduelle associée à la décroissance des produits de fission) : puissance volumique q^{ox} (W/m^3)
- ▶ refroidissement en surfaces latérale et haute
- ▶ en **régime turbulent** : $Ra_i^{\text{ox}} = \frac{g(H^{\text{ox}})^5 q^{\text{ox}} \beta^{\text{ox}}}{\lambda^{\text{ox}}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

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



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

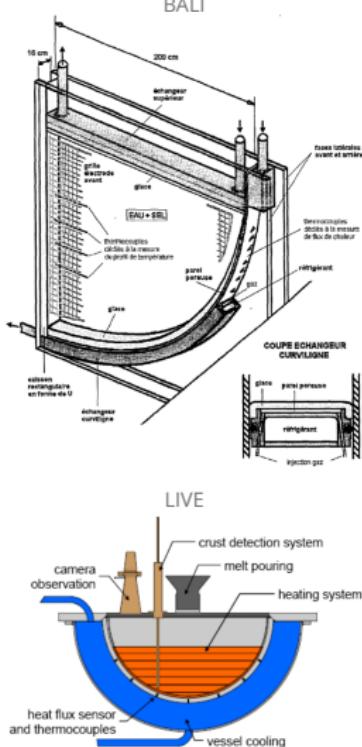
- Pour l'*échange latéral* (surface sphéroïde), la *transposition est moins évidente ...*"

► ... 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	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_2^- ; 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* !

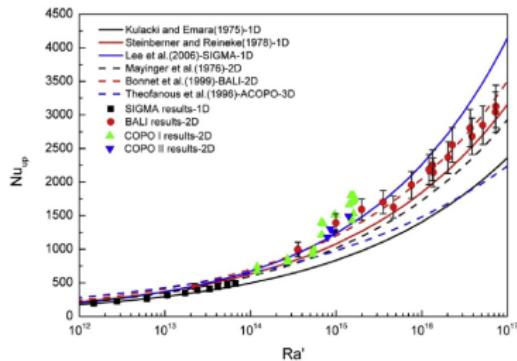


Fig. 3. Comparison of upward heat transfer in the high Rayleigh region.

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

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

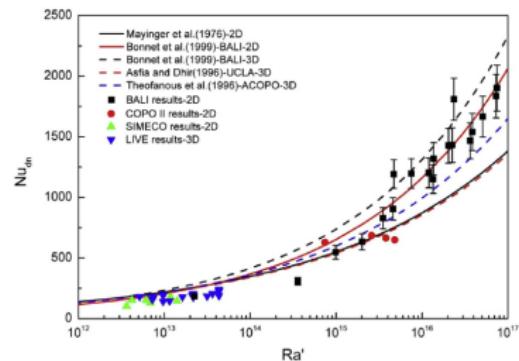
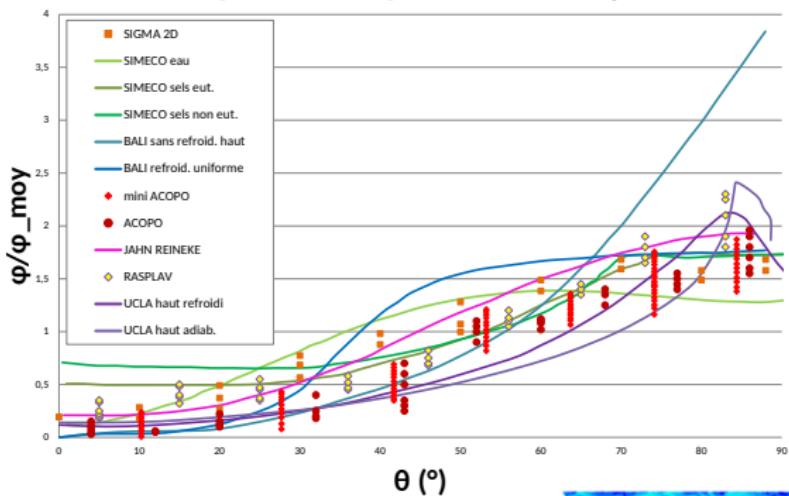


Fig. 4. Comparison of downward heat transfer in the high Rayleigh region.

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

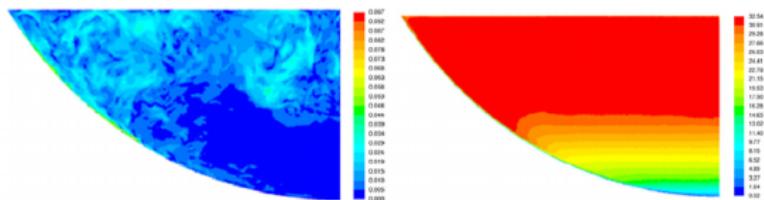
Résultats expérimentaux pour le flux local $\varphi(\theta)$ ($H/R = 1$)



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

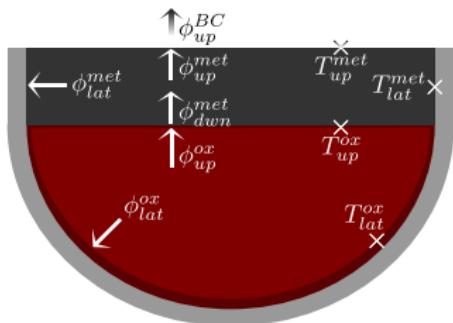
- Intérêt grandissant pour des simulations “Computational Fluid Dynamics” CFD

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



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

TD : évaluation du bilan thermique intégral



Configuration à deux couches et notations des flux et températures

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

cf. description TD et notebooks Jupyter

en local dans `~/projet_GA/seance1/TD`

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





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.



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.



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.



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.



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.