

# Convection solutale lors de l'interaction corium-béton.

Christophe JOURNEAU\*, Laure CARENINI, Jean-François HAQUET

Laboratoire d'essai pour la Maîtrise des Accidents graves (DEN/DTN/STRI/LMA)  
CEA Cadarache – Bâtiment 708 – 13108 St Paul lez Durance

\* (auteur correspondant : [christophe.journeau@cea.fr](mailto:christophe.journeau@cea.fr))

**Résumé** - Dans le cas de scénarios hypothétiques d'accidents graves de réacteurs nucléaires, le cœur pourrait fondre et se répandre hors de la cuve. Dans ce cas, le bain, appelé *corium*, issu de la fusion du cœur, interagirait avec le béton du puits de cuve.

Dans ce cas, on peut avoir à l'interface simultanément fusion partielle du béton et formation d'une croûte de corium. Dans le cas où la croûte ne serait pas stable, le béton fondu, moins dense et plus visqueux que le corium, sera soumis, sur des parois horizontales ou inclinées, à des instabilités de Rayleigh-Taylor, générant une convection solutale dont un modèle semi-analytique sera proposé.

## Nomenclature

$c_p$  chaleur massique,  $J.kg^{-1}.K^{-1}$

$F$  Flux,  $W.m^{-2}$

$g$  accélération de la pesanteur,  $m.s^{-2}$

$h$  épaisseur,  $m$

$H$  chaleur latente de fusion,  $J.kg^{-1}$

$k$  conductivité thermique,  $W.K^{-1}.m^{-1}$

$T$  température,  $K$

$D$  diffusivité massique,  $m^2.s^{-1}$

$V$  vitesse,  $m.s^{-1}$

$z$  profondeur,  $m$

*Symboles grecs*

$\kappa$  diffusivité thermique,  $m^2/s$

$\mu$  viscosité dynamique,  $Pa.s$

$\rho$  masse volumique,  $kg.m^{-3}$

$\tau$  temps de déstabilisation,  $s$

*Indices et exposants*

$0$  bain de corium

$1$  après la 1<sup>o</sup> déstabilisation

*perm* régime permanent

$f$  corium (liquide)

$m$  béton fondu

$s$  béton solide

$p$  paroi

## 1. Introduction

Dans le cas hypothétique d'un accident grave de réacteur nucléaire, le cœur du réacteur pourrait fondre et former un bain fondu à hautes températures dénommé *corium*. En l'absence de mesures de sauvegarde, ce corium pourrait percer la cuve du réacteur. Dans ce cas on aurait une interaction entre le corium et le béton du puits de cuve [1-3]. Lors de l'accident de Tchernobyl, un corium s'est étalé dans les pièces situées sous le réacteur, a interagi avec des parois en béton et s'est stabilisé sans intervention extérieure.

Le béton fondu par le corium est moins dense que le corium. Il va donc y avoir la possibilité d'une convection solutale entre ce bain de béton fondu et le corium. L'objectif de cet article est de présenter une modélisation des transferts de chaleur à l'interface entre un bain de corium et une paroi de béton faisant intervenir la convection solutale. Cette modélisation s'inspire de celle qui avait été proposée par Kerr [4] dans le cas d'une intrusion de magma dans une roche.

## 2. Modèle sans croûte de corium

Nous allons considérer que la croûte de corium se formant au contact du béton lors du choc thermique n'est pas stable mécaniquement. On va donc avoir successivement du béton solide, une couche de béton fondu et le bain de corium, dont une couche limite thermique au contact avec le béton fondu (Figure 1). Le flux convectif dans le bain est supposé s'appliquer à la frontière de la couche limite thermique d'épaisseur  $h_t$ .

### 2.1 Déstabilisation de la couche de béton fondu

La couche de béton fondu a une masse volumique inférieure à celle du corium (typiquement autour de  $2000 \text{ kg/m}^3$  comparé à  $5000\text{-}8000 \text{ kg/m}^3$  pour les mélanges corium-béton) et une viscosité beaucoup plus importante que ce dernier (On estime la viscosité [6] du béton fondu, à sa température de perte de géométrie à des valeurs comprises entre  $10^4$  et  $10^6$  Pa.s alors que la viscosité du corium est de l'ordre de  $25 \text{ mPa.s}$ ).

Le corium et le béton fondus sont deux fluides miscibles comme le montre d'une part les analyses post test [8] et les calculs thermodynamiques avec la base de données NUCLEA [9]. Les instabilités de Rayleigh Taylor vont se développer à l'interface entre les deux fluides. En résolvant par une méthode de perturbation l'équation de Stokes, Lister et Kerr [5] ont déterminé le temps caractéristique  $\tau$  de déstabilisation d'une couche d'épaisseur  $h_m$  placée en dessous d'un fluide plus dense et significativement moins visqueux :

$$\tau = 6.22 \frac{\mu_m}{(\rho_0 - \rho_m)gh_m} \quad (1)$$

Ils ont aussi montré que dans le cas d'une couche d'épaisseur croissante  $h_m(t)$ , l'ordre de grandeur du temps de déstabilisation est obtenu en résolvant l'équation (1).

Cette formule a été établie pour une surface horizontale. Sur des parois inclinées entre  $-45^\circ$  et  $45^\circ$ , les essais de Kerr [4] ont permis de vérifier que la formule (1) s'appliquait en remplaçant  $g$  par  $g \cdot \cos\alpha$ . Dans le cas de l'interaction corium-béton, les expériences montrent que la cavité a une forme arrondie après ablation et donc que ses parois ne restent pas verticales.

La couche de béton liquide étant créée par la fusion du béton, on aura déstabilisation lorsque l'épaisseur fondue au temps  $\tau$  vérifiera l'équation (1), l'épaisseur de la couche de béton fondu étant déterminée par la thermique du système.

### 2.2 Couches limites thermiques du bain de corium

Avant déstabilisation de la couche de béton fondu moins dense que le corium (pour les temps compris entre 0 et  $\tau$ ), on a un système thermique à 3 couches (Figure 1) qui peut être modélisé en faisant l'hypothèse d'une succession d'équilibres quasi-statiques.

Le flux de chaleur nécessaire pour chauffer et fondre la couche de béton vaut :

$$F = V_m \rho_s [H_s + c_{p,s} (T_m - T_s)] \quad (2)$$

où  $V_m = h_m / \tau$  est la vitesse de fusion du béton.

Le flux traversant l'épaisseur de béton fondu est donné, en négligeant la convection induite par le bullage des gaz dans le béton fondu par :

$$F = k_m \frac{T_i - T_m}{h_m} \quad (3)$$

La couche limite thermique  $h_t$  est due d'une part au flux convectif en provenance du bain de corium chauffé par une puissance volumique qui crée un flux  $F_{perm}$  supposé constant et d'autre part au refroidissement par conduction du corium au contact du béton. La sous-couche  $h_{t1}$  correspond à la couche limite de la convection, tandis que  $h_{t2}$  est une sous-couche purement conductive (dans une zone pâteuse où la viscosité est telle que l'on peut négliger les effets de convection par rapport à la conduction).

En prenant les notations définies sur la Figure 2, on peut écrire les deux composantes de ce flux :

$$F = k_f \frac{T_{conv} - T_i}{h_{t2}} = F_{perm} + k_f \frac{T_0 - T_{conv}}{h_{t1}} = h_{conv} (T_0 - T_{conv}) + k_f \frac{T_0 - T_{conv}}{h_{t1}} \quad (4)$$

L'épaisseur totale de la couche limite vérifie :

$$h_t = h_{t1} + h_{t2} = \sqrt{\pi \kappa_f \tau} \quad (5)$$

La résolution du système (4)-(5) donne :

$$h_{t1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{\pi \kappa_f \tau} - \frac{k_f (T_0 - T_i)}{F_r} + \sqrt{\left( \frac{k_f (T_0 - T_i)}{F_r} - \sqrt{\pi \kappa_f \tau} \right)^2 + 4 \frac{k_f}{h_{conv}} \sqrt{\pi \kappa_f \tau}} \right) \quad (6)$$

Le flux est alors égal à :

$$F = F_{perm} \left( 1 + \frac{k_f}{h_{conv} h_{t1}} \right) \quad (7)$$

Cette expression tend bien vers la composante continue  $F_{perm}$  quand le temps tend vers l'infini.

### 2.3 Echauffement du béton

L'échauffement du béton peut être estimé [7] dans un référentiel mobile se déplaçant à la vitesse de fusion  $V_m = h_m / \tau$ , supposée constante. Avant la première déstabilisation, le profil de température dans le béton suit la loi :

$$T(z, t) = T_s + (T_m - T_s) \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{\kappa_s (t - z/V_m)}} \right) \quad (8)$$

et l'épaisseur de béton échauffé à l'instant  $\tau$  vérifie :

$$h_s = -\frac{\pi \kappa_s}{2V_m} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{\pi \kappa_s}{V_m} \right)^2 + 4\pi \kappa_s \tau} \quad (9)$$

### 2.4 Résolution numérique

Les équations (2) et (3) permettent d'écrire :

$$T_i = T_m + \frac{h_m^2}{\tau} \frac{\rho_s [H_s + c_{p,s} (T_m - T_s)]}{k_m} \quad (10)$$

La viscosité du béton est évaluée à la température moyenne  $(T_m+T_i)/2$ . On peut alors estimer  $\tau$  à partir de l'équation (1) et résoudre numériquement l'équation (3) où la valeur du flux est tirée de (7).

Après chaque déstabilisation, on peut considérer que le béton fondu s'est mélangé avec le corium. La nouvelle température du bain de corium est estimée en considérant une conservation de l'enthalpie entre les deux couches initiales (béton et corium) et le mélange final. L'ajout de béton va aussi modifier la température de liquidus du mélange corium-béton qui est estimée à partir d'un diagramme pseudo-binaire.

## 2.5 Itérations successives

Le profil de température à l'interface est discontinu à l'instant qui suit la déstabilisation (Figure 3). Comme le bain de corium continue à fournir de la chaleur, la fusion du béton va se poursuivre et une nouvelle couche de béton fondu va se créer.

Les mêmes équations seront vérifiées que pour la 1<sup>o</sup> période de déstabilisation, si ce n'est que le béton était préalablement échauffé avec le profil linéaire suivant entre  $z=0$  et  $z=h_s$  :

$$T(z,0) = T_m - \frac{T_m - T_s}{h_s} z \quad (10)$$

On peut alors montrer que, pour une vitesse de fusion  $V_1$ , la température suit :

$$T(z,t) = T_m - \frac{T_m - T_s}{h_s} z - (T_m - T_s) \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{\kappa_s(t - z/V_1)}} \right) \quad (11)$$

Le béton étant préalablement échauffé, le flux de chaleur nécessaire pour fondre le béton n'est plus égal qu'à :

$$F_1 = V_1 \rho_s \left[ H_s + c_{p,s} (T_m - T_s) \frac{h_{m1}}{2h_s} \right] \quad (12)$$

Sinon, le jeu d'équations se résout numériquement comme pour la première déstabilisation.

## 3. Applications à des essais VULCANO

Le CEA a réalisé les essais VULCANO-ICB afin d'étudier expérimentalement l'interaction corium béton à l'aide de matériaux prototypiques ayant la même composition chimique que lors d'un scénario d'accident grave [3][7][8]. Lors des essais VB-U5 et VB-U6, on a versé respectivement 28 et 31 kg d'un mélange de composition suivante : 67 %<sub>masse</sub>  $UO_2$ , 17 %  $ZrO_2$ , 6 %  $SiO_2$ , 15%  $Fe_2O_3$ . Pour VB-U5, le béton [3] était riche en silice alors que pour VB-U6, il était riche en calcaire. Le tableau 1 synthétise les principales propriétés physiques pour ces deux essais. Les flux transmis vers la paroi inférieure sont respectivement de 45 et 53 kW/m<sup>2</sup>.

A titre d'illustration, le temps de la première déstabilisation est estimé à 6 et 7 minutes respectivement pour ces deux essais. Au bout de ce temps, l'épaisseur de béton fondu est comprise entre 2 et 6 mm. Cette épaisseur varie peu à partir de la deuxième déstabilisation.

Cette approche, couplée à une analyse de la stabilité des différentes interfaces permet de recalculer les essais VULCANO. La Figure 4 présente l'évolution estimée de la température du bain lors de l'essai VB-U5. Ces calculs sont en accord avec la température mesurée par un thermocouple de type C (tungstène-5% rhénium/tungstène-26% rhénium), initialement noyé

dans le béton, lorsqu'il a été découvert et a pu mesurer la température du bain pendant quelques instants avant sa destruction. La Figure 5 présente l'évolution (par augmentations successives à chaque déstabilisation) de la masse de béton mélangée au corium.

	$\rho$ kg.m <sup>-3</sup>	k W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	$\mu$ Pa.s	$c_p$ J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup>	H kJ.kg <sup>-1</sup>
Corium	6500	2.8/2.45	0.025	800	360
Béton VB-U5	2140/2390	1.8/1.6	10 <sup>6</sup>	1430	450
Béton VB-U6	1800/2400	1.1/1.2	10 <sup>4</sup>	1410	970

Tableau 1 : Propriétés physiques du corium et des bétons (liquide/solide).

## 4. Conclusions

Nous avons présenté un modèle semi-analytique permettant d'étudier la fusion d'une cavité en béton contenant un bain soumis à une dissipation interne de chaleur. La déstabilisation de couches de béton fondu, moins denses que le bain permet les échanges de chaleur et de masse entre le bain et le béton.

Ce modèle a été appliqué à des essais d'interaction corium béton réalisés au CEA et a permis de retrouver les mesures expérimentales de température. Pour permettre d'améliorer ce modèle, il convient d'étudier plus en détails la problématique des parois proches de la verticale (autre mode d'instabilités ?) et de coupler cette modélisation avec la convection due au relâchement de gaz par le béton afin de déterminer la répartition des flux entre parois.

## Références

- [1] H. Alsmeyer, et al., *Molten corium/concrete interaction and corium coolability—a state of the art report*, Rapport EUR 16649, Commission Européenne(1995).
- [2] B. Spindler, B. Tourniaire, J.M. Seiler, “Simulation of MCCI with the TOLBIAC-ICB code based on the phase segregation model”, *Nucl. Eng. Des.*, 236 (2006), 2264-2270.
- [3] C. Journeau, S. Malaval, Comportement thermique du béton d'une centrale nucléaire lors d'un accident grave, *Actes SFT 2006* (Ile de Ré, 16-19 mai 2006), 571-576.
- [4] R.C. Kerr, “Melting driven by vigorous compositional convection”, *J. Fluid Mech.*, 280 (1994), 255-285.
- [5] J.R. Lister, R.C. Kerr, “The effect of geometry on the gravitational instability of a buoyant region of viscous fluid”, *J. Fluid Mech.*, 202 (1989), 577-594.
- [6] C. Journeau, G. Jeulain, L. Benyahia, J.F. Tassin, P. Abélard, Rheology of mixtures in the solidification range, *Rhéologie*, 9(2006), 28-39 .
- [7] L. Carenini, J.F. Haquet, C. Journeau, Crust Formation and Dissolution during Corium Concrete Interaction, *Proc. ICAPP'07 Int. Conf. Advances nucl. Power Plants* (Nice, 13-18 mai 2007), Communication 7312.
- [8] C. Journeau, P. Piluso, J.F. Haquet, L. Brissonneau, V. Aubert-Saldo, “Behaviour of nuclear reactor pit concretes under severe accident conditions”, *Proc. CONSEC '07, Concrete under Severe Conditions*, (Tours, 4-6 juin 2007).
- [9] A. De Bremaecker, M. Barrachin, F. Jacq, F. Defoort, M. Mignanelli, P.Y. Chevalier, B. Cheynet, S. Hellmann, F. Funke, C. Journeau, P. Piluso, S. Marguet, Z. Hozer, V. Vrtilkova, L. Belovsky, L. Sannen, M. Verwerft, P.H. Duvigneaud, K. Mwamba, H. Bouchama, C. Ronneau. European

Nuclear Thermodynamic Database validated and Applicable in Severe Accident Codes (ENTHALPY), Symposium FISA 2001, EU Research in Reactor Safety, Luxembourg, 12-14/11/2001.

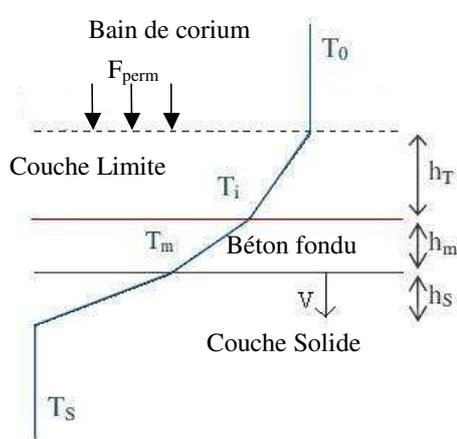


Figure 1 : Interface corium-béton hors destabilisation

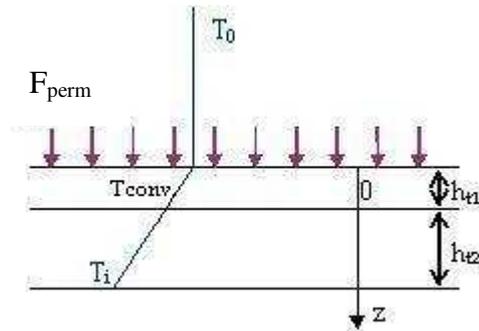


Figure 2: Zoom sur la couche limite du bain de corium

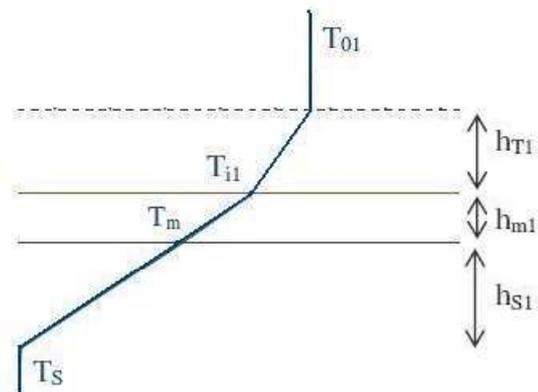
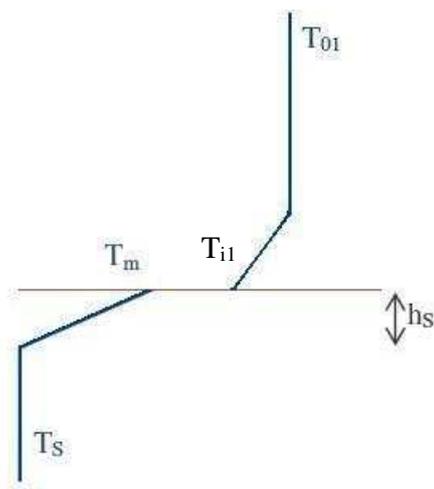


Figure 3 : Evolution de l'interface corium-béton après destabilisation du béton fondu gauche : instant après la destabilisation, droit : avant la destabilisation suivante

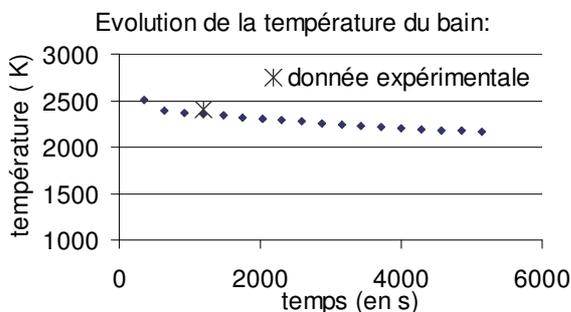


Figure 4 : Evolution de la température du bain lors de l'essai VB-U5

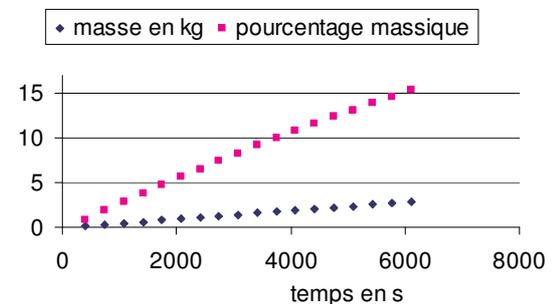


Figure 5 : Evolution de la masse et de la fraction de solide de béton mélangée au corium lors de l'essai VB-U5