

# SIMULATION D'UN ECOULEMENT DISPERSÉ VAPEUR/GOUTTES DANS UN TUBE VERTICAL, COMPARAISON DE DIFFERENTS MODELES DE TRANSFERT GOUTTE/PAROI

Juan Esteban LUNA VALENCIA<sup>1,2\*</sup>, Arthur V.S OLIVEIRA<sup>3</sup> Alexandre LABERGUE<sup>1</sup>, Tony GLANTZ<sup>2</sup>, Michel GRADECK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000, Nancy, France

<sup>2</sup> IRSN, BP 3, 13115 Saint Paul-lez-Durance

<sup>3</sup> Département de Génie Mécanique, École d'Ingénierie de São Carlos, Université de São Paulo, São Carlos (SP), Brésil

\*(auteur correspondant : lunavale1@univ-lorraine.fr)

**Résumé** - Lors d'un accident hypothétique de perte de réfrigérant dans le circuit primaire d'un réacteur nucléaire REP (APRP), un écoulement vapeur avec gouttes dispersées est formé en aval du front de trempe, contribuant au refroidissement des assemblages. A des fins de validation de modèles, une boucle appelée COLIBRI a été développée, afin de mesurer le flux thermique extrait par un écoulement de vapeur et de gouttes typique d'un APRP dans un tube sous-canal représentatif. Également, le code mécaniste NECTAR a été créé afin de calculer le flux de chaleur extrait par l'écoulement vapeur/gouttes pour une configuration identique à celle de COLIBRI. Cet article compare les résultats de NECTAR et de COLIBRI en faisant varier la corrélation utilisée pour l'estimation de l'énergie transférée par une goutte lors de son impact.

## Nomenclature

$C_p$	Capacité thermique J/kgK	$z$	Coordonnée axiale, m
$d$	Diamètre, m	<i>Symboles grecs</i>	
$E_g$	Énergie d'une goutte, J	$\phi$	Flux thermique, W
$f$	Coefficient de frottement	$\varphi$	Densité de flux thermique, W/m <sup>2</sup>
$Fr_{,ij}$	Facteur de corps gris entre les phases i et j	$\rho$	Densité massique, kg/m <sup>3</sup>
$g$	Accélération de la pesanteur, m/s <sup>2</sup>	$\alpha$	Fraction volumique
$h$	Enthalpie, kJ/kg	$\epsilon$	Emissivité
$h_{fg}$	Enthalpie latente de vaporisation, kJ/kg	$\sigma_{SB}$	Constante de Stefan-Boltzmann, W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup>
$h_i$	Coefficient de convection par impact, W/m <sup>2</sup> K	$\sigma$	Écart type
$L$	Longueur du tube, m	$\mu$	Espérance
$m$	Masse, kg	$\tau_b$	Taux de déformation du sous-canal
$\dot{m}$	Débit massique, kg/s	<i>Indices et exposants</i>	
$Nu$	Nombre de Nusselt	$ev$	Évaporation
$Pr$	Nombre de Prandtl	$ext$	Externe
$Re$	Nombre de Reynolds	$g$	Gouttes
$re$	Rayon d'étalonnage d'une goutte	$i$	Impact
$S$	Surface, m <sup>2</sup>	$int$	Interne
$S_T$	Aire de la section transversale d'un sous-canal, m <sup>2</sup>	$p$	Paroi
$T$	Température, K	$r$	Rayonnement
$u$	Vitesse, m/s	$sat$	Saturation
		$v$	Vapeur

# 1. Introduction

Lors d'un hypothétique accident de perte de réfrigérant primaire dans un réacteur à eau pressurisée, de l'eau froide est injectée dans le cœur par le bas afin de refroidir les assemblages combustibles et de limiter les conséquences, un processus connu sous le nom de renoyage. En bas des assemblages, le refroidissement des crayons s'effectue par contact direct de l'eau (en régime d'ébullition nucléée). En aval du front de trempe, la vapeur est formée en raison du contact de l'eau avec les crayons à haute température entraîne des gouttes formant un écoulement dispersé. Dans cette zone avale, le transfert de chaleur entre l'écoulement et la paroi se réalise en régime d'ébullition en film, avec des impacts de gouttes vers la paroi. Finalement, une fois les gouttes toutes évaporées, le transfert de chaleur se fait majoritairement par convection entre la vapeur et la paroi.

Le transfert de chaleur dans le régime d'ébullition nucléée est beaucoup plus élevé que dans le régime d'ébullition en film, de sorte que la température maximale des crayons est atteinte dans la zone de ce deuxième régime. Par conséquent, la caractérisation des transferts de chaleur et du refroidissement est d'une grande importance pour la sûreté nucléaire afin de prédire correctement la température maximal atteint par les assemblages. Cependant, cet écoulement est complexe, car il existe des interactions physiques multiples entre les phases et entre les phases et la paroi. Des modèles ont été développés et doivent être évalués, surtout le modèle d'impact de gouttes.

Différentes expériences ont été réalisées afin d'évaluer le refroidissement des assemblages combustibles pendant un APRP [1]. Cependant, ces expériences se sont concentrées sur la caractérisation de l'évolution de la température de la paroi sans caractériser précisément les paramètres thermo-hydrauliques de l'écoulement de la vapeur et des gouttes. Cela a limité l'extrapolation des résultats à d'autres configurations. C'est pourquoi le banc expérimental COLIBRI<sup>1</sup> a été développé pour caractériser le transfert thermique d'un flux de vapeur et de gouttes à l'échelle d'un sous-canal dans des conditions thermo-hydrauliques typiques d'un APRP [2]. Une des caractéristiques de COLIBRI est qu'elle utilise des techniques laser pour déterminer la distribution en taille et en vitesse des gouttes. Les autres principaux paramètres thermo-hydrauliques de la vapeur et des gouttes (débit massique, pression et température) sont également mesurés.

De plus, un code appelé NECTAR<sup>2</sup>, basé sur une approche mécaniste, a été développé afin de simuler l'ensemble des phénomènes thermo-hydrauliques se produisant dans la section d'essais. Ce code a été validé sur la base d'une première campagne expérimentale réalisée sur la boucle COLIBRI; un bon accord entre les résultats calcul/expérience ayant été obtenu [3]. Par ailleurs, le code NECTAR a clairement mis en évidence l'importance des gouttes dans le refroidissement des crayons car le flux de chaleur extrait par impact de gouttes pouvait représenter jusqu'à 10 % du flux de chaleur total extrait par l'écoulement diphasique. Pour ce calcul, le modèle proposé par Gradeck et al. [4] a été utilisé pour estimer le transfert de chaleur d'une goutte lors de l'impact et la corrélation de Hewitt et Govan [5] pour estimer le flux de gouttes impactant la paroi. Lors de cette première campagne, la fraction volumique des gouttelettes et le flux massique des gouttelettes étaient dans la plage basse des valeurs attendues lors d'un APRP ( $\alpha_g = 10^{-4}$ ,  $\dot{m}_g = 0,75$  kg/h). La boucle COLIBRI a donc été modifiée afin d'augmenter la fraction volumique des gouttes et le débit massique des gouttes ( $\alpha_g = 2.10^{-3}$ ,  $\dot{m}_g = 7,7$  kg/h). Le but de cet article est de comparer les résultats numériques obtenus avec NECTAR avec les

---

1. COLIBRI : COoLling of Blockage Region Inside a PWR Reactor.

2. NECTAR : New Experimental Code for Thermal-hydraulic Analysis in a Representative geometry.

résultats expérimentaux en ce qui concerne le flux thermique total extrait à la paroi pour ces nouvelles conditions d'écoulement. D'autre part, différents modèles pour déterminer l'énergie extraite par l'impact d'une goutte sur une paroi (modèles de Breitenbach et al. [6], Gradeck et al. [4] et Lelong et al. [7] ) ont été évalués avec le code NECTAR.

## 2. COLIBRI

COLIBRI est composé de trois parties principales (Fig. 1) :

- I. Élément en acier inoxydable où l'écoulement diphasique est formé. Cela se fait en injectant des gouttes à saturation dans un flux de vapeur surchauffée par deux systèmes indépendants. Cette partie se termine par une fenêtre en borosilicate où les mesures de vitesse et de distribution de gouttes sont effectuées par PDA<sup>3</sup>.
- II. Tube en forme de venturi en Inconel 625 (tube d'essai). Dans cette étude, un tube droit de 25.5 cm de longueur, 11.78 mm de diamètre interne et 0.57 mm d'épaisseur a été utilisé. Cet élément possède également deux brides en cuivre à ses extrémités, afin d'être chauffé par effet Joule.
- III. Élément en acier inoxydable qui connecte la section d'essai au réseau de condensation de la vapeur. Cet élément comporte aussi une fenêtre optique pour l'obtention des caractéristiques physiques de l'écoulement en aval de la section d'essais.

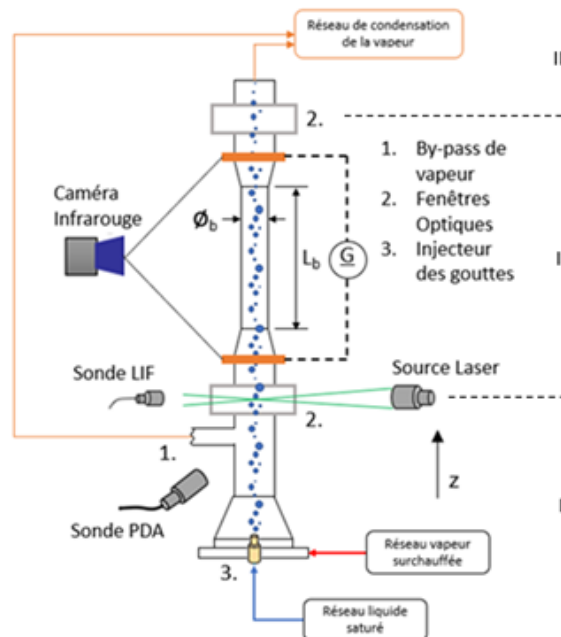


Figure 1 : Schéma de la section d'essai de la boucle COLIBRI.

Le Tableau 1 présente les paramètres thermo-hydrauliques de COLIBRI. La boucle COLIBRI est également équipée d'une caméra infrarouge afin de mesurer les variations spatio-temporelles de la température de la paroi externe du tube d'essai. Le flux de chaleur est estimé avec un bilan d'énergie sur la paroi du tube, selon le bilan suivant :

$$\Phi_{int}(z, t) = - \left( \frac{S \rho_p C_{p_p}}{\pi d_{int}} \right) \frac{dT_p(z, t)}{dt} - \left( \frac{d_{ext}}{d_{int}} \right) \Phi_{pertes}(z, t) \quad (1)$$

3. PDA : Anémométrie par phase Doppler.

Paramètres	Gamme
Pression de la vapeur (absolu)	0.9 – 2 bar
Débit massique des gouttes	3 – 12 kg/h
Température des gouttes injectées	> 80 °C
Diamètres des gouttes injectées	5 – 700 μm
Débit massique de vapeur	2 – 8 kg/h
Température de la vapeur	100 °C – 500 °C
Fraction volumique des gouttes	10 <sup>-4</sup> – 7.10 <sup>-3</sup>
Température initiale de la paroi	< 750 °C

Tableau 1 : Paramètres thermo-hydrauliques de la boucle COLIBRI

Où  $\Phi_{pertes}$  correspond aux pertes par convection et rayonnement avec l'air environnant. Ce flux est estimé à partir d'une expérience sans écoulement interne (de relaxation). Les détails sur la technique de PDA, les incertitudes et la géométrie sont disponibles dans Peña Carrillo et al. [2].

### 3. Code NECTAR

NECTAR est un code 1D axial pour l'estimation du flux de chaleur extrait de la paroi par l'écoulement de vapeur avec des gouttes dispersées en régime d'ébullition en film. NECTAR est basé sur une approche mécaniste, de ce fait, le code estime de façon individuelle les différents mécanismes de transfert de chaleur et de masse entre la paroi, la vapeur et les gouttes représentés dans la Fig. 2.

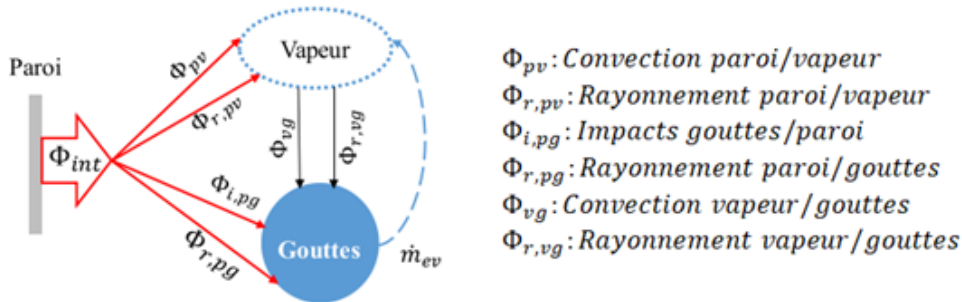


Figure 2 : Transferts thermiques et massiques considérés dans NECTAR

Le flux de chaleur dissipé à la paroi ( $\Phi_{int}$ ) est la somme de différentes contributions de transferts entre la paroi et les gouttes et entre la paroi et la vapeur.

$$\Phi_{int} = \Phi_{pv} + \Phi_{r,pv} + \Phi_{i,pv} + \Phi_{r,pv} \quad (2)$$

Pour déterminer les variables thermo-hydrauliques, le code résout les équations de conservation pour chacune des phases (cf. Tableau 2).

Le modèle est 1D axial à 2 fluides (vapeur et gouttes) en non-équilibre thermique et dynamique. Le code NECTAR tient compte de la polydispersion des gouttes (selon une distribution de type log-normale). En outre, NECTAR prend également en compte la fragmentation éventuelle des gouttes selon le modèle de Chou et Faeth [9]. Les gouttes sont supposées à saturation et sphériques. Dans le domaine de simulation, les pertes de charges sont négligées. Une

	Équations
Conservation de la masse (vapeur)	$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m}_{ev}$
Bilan de quantité de mouvement (goutte)	$\rho_g u_g \frac{du_g}{dz} = -\frac{3}{4d_g} \frac{C_D}{1+B} \rho_v (u_g - u_v)  u_g - u_v  + (\rho_v - \rho_g) g$ ( $C_D$ est calculé selon la corrélation de Morsi et Alexander [8])
Bilan d'énergie	$C_{p_v} \left\{ T_v(z+dz) \left[ \dot{m}_v(z) + \frac{d\dot{m}_v(z)}{dz} dz \right] - \dot{m}_v(z) T_v(z) \right\} = \Phi_{ev}$ $\Phi_{ev} = \Phi_{i,pg} + \Phi_{r,pg} + \Phi_{vg} + \Phi_{r,vp}$

Tableau 2 : Équations de conservation du code NECTAR [3].

description détaillée du code NECTAR est disponible dans Oliveira et al.[3]. Pour le calcul des différents transferts de chaleur, le code NECTAR utilise les corrélations empiriques résumées dans le Tableau 3.

	Équations
Convection forcée paroi/vapeur ( $\Phi_{pv}$ ) [10]	$Nu_v = \frac{f/8(Re_v - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$
Convection entre la vapeur et les gouttes ( $\Phi_{vg}$ ) [11, 12]	$Nu_{vg} (1 + (h_v - h_g)/h_{fg}) = 2 + 0.6Re_M^{1/2} Pr_f^{1/3}$
Impact d'une goutte avec la paroi ( $\Phi_{i,pg}$ )	$q_{i,pg} = \frac{6\dot{m}}{\pi\rho_g d^3} E_g$
Rayonnement entre la vapeur, les gouttes et la paroi ( $\Phi_{r,pg}, \Phi_{r,pv}, \Phi_{r,vg}$ )	$q_{r,ij} = F_{r,ij} \sigma_{SB} (T_i^4 - T_j^4)$

Tableau 3 : Équations de conservation du code NECTAR [3].

Le facteur de corps gris  $F_{r,ij}$  entre la vapeur, la paroi et les gouttes est calculé selon le modèle des résistances thermiques proposé par Sun et al. [13]. D'autre part, le flux de gouttes impactant la paroi ( $\dot{m}$ ) est calculé selon la corrélation d'Hewitt et Govan [5]. Dans cette étude, l'énergie transférée par l'impact d'une goutte ( $E_g$ ) est calculé selon les modèles de Gradeck et al. [4], Breitenbach et al. [6] ou Lelong et al. [7]. Ces corrélations sont décrites dans le Tableau 4.

	Équations
Lelong et al. [7]	$E_g = \pi \left[ \frac{8}{9} (Nuk_v(T_p - T_{sat})r_g) \right]^3 \frac{\rho_v \rho_g h_{fg} a_n}{\mu_v} \int_0^{t_R} r_s(t) dt$ $+ \epsilon_p \sigma_B (T_p^4 - T_{sat}^4) \pi \int_0^{t_R} r_s^2(t) dt$
Gradeck et al. [4]	$E_g = h_{pv,exp}(T_p - T_{sat}) \pi \int_0^{t_R} r_s^2(t) dt$
Breitenbach et al.[6]	$E_g = \frac{4.63d_g^{2.5} Ge_p(T_p - T_{sat})}{u_n^{0.5}(K+2G)}, G = \frac{\sqrt{\pi} \lambda_v \rho_v h_{fg}}{2(T_p - T_{sat}) \epsilon_w^2}, K = \sqrt{G^2 + \frac{4G}{\sqrt{\pi}}} - G$

Tableau 4 : Corrélations pour le calcul de l'énergie transférée par l'impact d'une goutte

Lelong et al.[7] et Gradeck et al.[4] utilisent le même modèle pour estimer le temps de résidence ( $t_R$ ) et la variation du diamètre de la goutte pendant l'impact ( $r_s(t)$ ); modèles qui diffèrent de ceux utilisés par Breitenbach et al.[6].

## 4. Domaine de simulation et conditions limites

Le code NECTAR a été conçu pour simuler les conditions géométriques et thermo-hydrauliques de COLIBRI. NECTAR utilise l'évolution spatio-temporelle de la température externe du tube chauffé de COLIBRI, mesurées lors de l'expérience. Ensuite, NECTAR calcule la valeur du transfert dû à chaque mécanisme en chaque maille axiale. Finalement le flux de chaleur calculé est comparé au flux estimé à partir des données expérimentales de COLIBRI. Les conditions thermo-hydrauliques évaluées pour la présente expérience sont :

- Débit de vapeur de 3.8 kg/h, avec une température de 271°C.
- Débit et vitesse moyenne des gouttes de 8 kg/h et 16.3 m/s respectivement, ce qui correspond à un taux de plein de  $\alpha_g = 1.6 \times 10^{-3}$ .
- Température initiale maximale de la paroi d'environ 700°C (au centre du tube).

Par ailleurs, l'histogramme des gouttes mesuré à la première fenêtre optique (en amont de la section d'essais) est représenté Fig.3a. Le diamètre moyen ( $d_{10}$ ) est de  $257 \mu\text{m}$  avec une distribution de type log-normal, un type de distribution courant pour une situation d'APRP [14]. La Figure 3a montre aussi la distribution des gouttes utilisée pour le calcul NECTAR qui a été ajustée à partir de l'histogramme expérimental.

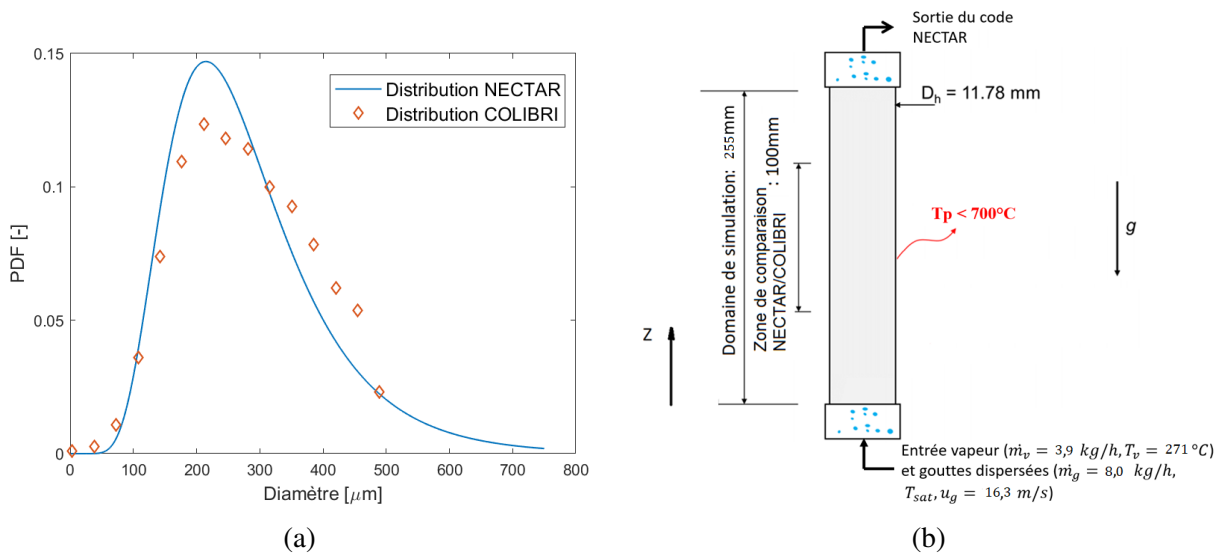


Figure 3 : a) Distribution en taille normalisée mesurée en COLIBRI (en bleu) et utilisée avec NECTAR (en rouge) avec  $\mu = \ln(d_{10})$  et  $\sigma = 0.4244$ . et b) Domaine de simulation du code NECTAR.

Finalement, le domaine de simulation est représenté Fig. 3b . Comme mentionné pour le calcul du flux, NECTAR utilise la température mesurée par la caméra infrarouge de COLIBRI comme donnée d'entrée (comme les paramètres thermo-hydrauliques de la vapeur et des gouttes). Néanmoins, cette comparaison est exclusivement faite pour la région centrale du tube (les 100 mm centraux du tube) afin de limiter l'influence des pertes par conduction aux brides électriques utilisées pour alimenter en courant le tube.

## 5. Résultats

La Fig. 4 montre le flux thermique moyen extrait par l'écoulement interne de vapeur et de gouttes obtenu expérimentalement avec COLIBRI et avec NECTAR. Également, la figure

représente le flux estimé avec NECTAR en utilisant trois corrélations différentes pour l'estimation de l'énergie transférée pendant l'impact d'une goutte. Comme mentionné avant, la simulation n'est valable que dans le régime d'ébullition du film (Dans ce cas précis, en dessous de  $T_p = 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

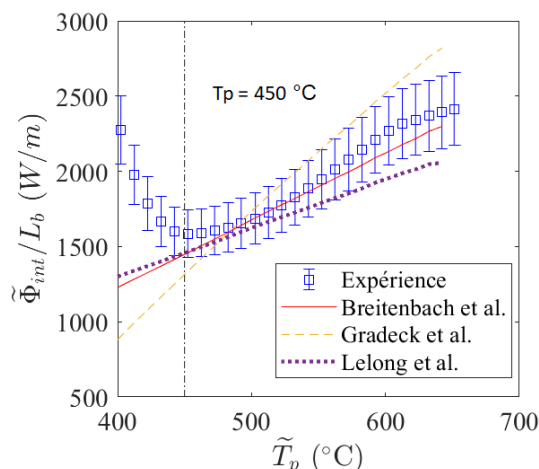


Figure 4 : Comparaison du flux interne dégagé par l'écoulement mesuré COLIBRI et simulé avec NECTAR

Il est possible d'observer que les résultats de la simulation NECTAR avec toutes les corrélations utilisées sont en bon accord avec l'expérience. D'autre part, la simulation avec la corrélation de Gradeck et al.[4] surestime le flux à haute température, probablement parce que le transfert de chaleur par impact est moins sensible à la température que ce qui avait été estimé par Gradeck et al.[4]. Également, à haute température, NECTAR sous-estime le flux lorsque la corrélation de Lelong et al.[7] est utilisée, car son modèle utilise un nombre de Nusselt constant. Finalement, la corrélation de Breitenbach et al.[6] présente l'erreur moyenne la plus faible par rapport aux résultats de COLIBRI, comme le montre le tableau 5.

	Plage			Erreur moyenne
	10 %	20 %		
Lelong et al.[7]	63.4 %	100 %		7.8%
Gradeck et al.[4]	27 %	100 %		10.7%
Breitenbach et al.[6]	100 %	100 %		3.7%

Tableau 5 : Pourcentage des points se trouvant dans différentes plages d'erreur et erreur moyen de la comparaison NECTAR/COLIBRI

## 6. Conclusion

Dans ce travail, une évaluation de trois modèles d'impact a été réalisée avec le code NECTAR utilisant des données expérimentales. La comparaison est basée sur les résultats des transferts thermiques qui ont lieu dans un tube représentatif d'un sous-canal de REP refroidi par un écoulement vapeur/gouttes. En plus, on a comparé trois différentes corrélations pour le calcul du flux de chaleur par impact de gouttes. Cette comparaison a permis d'obtenir les conclusions suivantes :

- La simulation réalisée avec le code NECTAR prédit correctement le flux thermique trouvé expérimentalement avec toutes les corrélations analysées, avec une erreur moyenne

de maximum 10.7 % (corrélation de Gradeck et al.[4]).

- La simulation réalisée avec le code NECTAR et la corrélation de Breitenbach et al.[6] estime le flux de chaleur trouvé expérimentalement avec COLIBRI dans l'expérience évaluée de manière très satisfaisante, avec une erreur moyenne inférieure à 3.7 %.

Une analyse plus approfondie de ces corrélations doit être faite avec d'autres résultats expérimentaux de COLIBRI afin de valider le modèle d'impact de gouttes que sera utilisé dans NECTAR. D'autre part, il serait également important d'évaluer les autres modèles utilisés pour estimer le flux de gouttes impactant la paroi.

## Références

- [1] C. Grandjean, Coolability of blocked regions in a rod bundle after ballooning under LOCA conditions : Main findings from a review of past experimental programmes, *Nuclear Engineering and Design* 237 (15) (2007) 1872–1886.
- [2] J. D. Peña Carrillo, A. V. S. Oliveira, A. Labergue, T. Glantz, M. Gradeck, Experimental thermal hydraulics study of the blockage ratio effect during the cooling of a vertical tube with an internal steam-droplets flow, *Int. J. Heat Mass Transf.* 140 (2019) 648 – 659.
- [3] A. V. S. Oliveira, J. D. Peña Carrillo, A. Labergue, T. Glantz, M. Gradeck, Mechanistic modeling of the thermal-hydraulics in polydispersed flow film boiling in LOCA conditions, *Nucl. Eng. Des.* 357 (2020) 110388.
- [4] M. Gradeck, N. Seiler, P. Ruyer, D. Maillet, Heat transfer for Leidenfrost drops bouncing onto a hot surface, *Experimental Thermal and Fluid Science* 47 (2013) 14–25.
- [5] G. F. Hewitt, A. H. Govan, Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change, *Int. J. Heat Mass Transf.* 33 (2) (1990) 229–242.
- [6] J. Breitenbach, I. V. Roisman, C. Tropea, Heat transfer in the film boiling regime : Single drop impact and spray cooling, *Int. J. Heat Mass Transf.* 110 (2017) 34–42.
- [7] F. Lelong, M. Gradeck, N. Seiler, P. Ruyer, G. Castanet, P. Dunand, Behaviour of liquid droplets bouncing onto a hot slab, *ILASS - Europe 2010, 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (September)* (2010) 1–11.
- [8] S. A. A. Morsi, A. J. J. Alexander, An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems, *Journal of Fluid Mechanics* 55 (2) (1972) 193–208.
- [9] W.-H. Chou, G. Faeth, Temporal properties of secondary drop breakup in the bag breakup regime, *Int. J. Multiph. Flow* 24 (6) (1998) 889 – 912. doi :[https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(98\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(98)00015-9).
- [10] V. Gnielinski, New equations for heat and mass transfer in the turbulent flow in pipes and channels, *Int. J. Chem. Eng.* 16 (2) (1976) 359 – 368.
- [11] W. R. Ranz, W. E. and Marshall, *Evaporation from drops* (1952).
- [12] M. C. Yuen, L. W. Chen, Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets, *Int. J. Heat Mass Transf.* 21 (5) (1978) 537–542.
- [13] K. H. Sun, J. M. Gonzales-Santalo, C. L. Tien, Calculation of Combined Radiation and Convection Heat Transfer in Rod Bundles Under Emergency Cooling Conditions, *Int. J. Heat Mass Transf.* 98 (3) (1976) 414–420. doi :[10.1115/1.3450569](https://doi.org/10.1115/1.3450569).
- [14] Y. Jin, F.-B. Cheung, K. Shirvan, S. M. Bajorek, K. Tien, C. L. Hoxie, Development of a droplet breakup model for dry spacer grid in the dispersed flow film boiling regime during reflood transients, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 143 (2019) 118544.

## Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre d'une thèse financée par l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) à Cadarache.