

Simulation du refroidissement d'un sous-canal combustible de REP lors d'un APRP

Juan Esteban LUNA VALENCIA^{1,2*}, Arthur V.S OLIVEIRA¹ Alexandre LABERGUE¹, Tony GLANTZ², Michel GRADECK¹

¹Université de Lorraine, CNRS, LEMTA

2 avenue de la Forêt de Haye, BP 90161, 54505 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex

² Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

BP 3 - 13115 Saint Paul-lez-Durance

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

Résumé - Lors d'un accident hypothétique de perte de réfrigérant primaire (APRP) dans un réacteur à eau pressurisée (REP), un écoulement constitué de vapeur et de gouttes dispersées se forme et se propage dans les assemblages. Cet écoulement permet de refroidir les parties d'assemblages non encore immergées par l'eau. Dans cet article, l'objectif est de comparer le flux de chaleur extrait de la paroi par l'écoulement vapeur/gouttes trouvé expérimentalement avec la boucle COLIBRI [1] et le flux trouvé numériquement avec le code NECTAR [2] pour un sous-canal intact et une fraction volumique de gouttes $\alpha_g \sim 10^{-3}$. La dissipation thermique interne totale et la contribution des différents mécanismes de transfert de chaleur sont analysées.

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	ϕ	Flux thermique, W
f	Coefficient de frottement	φ	Densité de flux thermique, W/m ²
$F_{r,ij}$	Facteur de forme entre les phases i et j	ρ	Densité massique, kg/m ³
g	Accélération de la pesanteur, m/s ²	α	Fraction volumique
h	Enthalpie, kJ/kg	ϵ	Emissivité
h_{fg}	Enthalpie latente de vaporisation, kJ/kg	σ_{SB}	Constante de Stefan-Boltzmann, W/m ² K ⁴
h_i	Coefficient de convection par impact, W/m ² K	σ	Écart type
L	Longueur du tube, m	μ	Espérance
m	Masse, kg	τ_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
S	Surface, m ²	i	Impact
S_T	Aire de la section transversale d'un sous-canal, m ²	int	Interne
T	Température, K	p	Paroi
u	Vitesse, m/s	r	Rayonnement
		sat	Saturation
		v	Vapeur

1. Introduction

Lors d'un APRP, de l'eau est injectée par les systèmes de sécurité afin de refroidir les assemblages dans le cœur du réacteur. Du fait de l'élévation de la température des assemblages au cours du transitoire accidentel, de la vapeur est formée au contact de l'eau sous-refroidie avec

les assemblages chauds. Dans ce phénomène d'ébullition intense, des gouttes sont ainsi entraînées par la vapeur et un écoulement de vapeur avec des gouttes dispersées se forme en aval du front de trempe. Cet écoulement permet de refroidir les parties d'assemblages non encore immergées. De plus, dépendant de la sévérité de l'accident, la chute de pression dans le cœur peut éventuellement conduire à des déformations importantes voire à la rupture des gaines des crayons de combustible. Par conséquent, la section de passage entre les sous-canaux bouchés peut diminuer considérablement. De ce fait, la caractérisation des transferts thermiques dans ces zones est indispensable pour s'assurer que les assemblages puissent être refroidis même s'ils sont déformés. Mais elle est compliquée due aux phénomènes comme la fragmentation et coalescence des gouttes, les impacts des gouttes, la turbulence, le non-équilibre thermodynamique entre phases et le rayonnement.

Dans ce contexte, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) a porté un projet, ANR PERFROI, afin de compléter les connaissances sur le comportement thermo-hydraulique et thermomécanique du cœur endommagé pendant un APRP. Dans l'axe thermo-hydraulique de ce projet, la boucle expérimentale COLIBRI¹ [1] a été développée dans le but de caractériser le phénomène de refroidissement d'un sous-canal par un écoulement de vapeur et gouttes typique d'un APRP. COLIBRI permet de déterminer le flux de chaleur extrait par cet écoulement pour différentes conditions thermo-hydrauliques et pour trois géométries représentant différents degrés de gonflement de la gaine. Par ailleurs, COLIBRI a permis la validation d'un code, NECTAR² [2], développé dans le but de calculer les transferts de chaleur et de masse ainsi que la dynamique des gouttes pour un écoulement polydispersé et ce, dans les mêmes conditions géométriques et thermo-hydrauliques que COLIBRI. Ce code utilise un modèle mécaniste pour calculer le flux de chaleur et permet de simuler une large gamme de conditions d'écoulement, en tenant en compte aussi des déséquilibres présents entre les phases.

L'analyse des premiers résultats expérimentaux avec NECTAR a montré que la convection entre la vapeur et la paroi est le mécanisme de transfert le plus important dans le calcul du flux extrait mais que le transfert de chaleur par impacts de gouttes à la paroi est également non négligeable [2]. Ces résultats, obtenus avec une température d'entrée de vapeur et une fraction volumique des gouttes faibles ($T_v = 160^\circ\text{C}$ et $\alpha_g \sim 10^{-4}$), ne permettent pas de valider l'ensemble des corrélations sur toute la gamme des conditions attendus en APRP ($T_v < 800^\circ\text{C}$ et $10^{-4} < \alpha_g < 10^{-2}$). Afin d'analyser l'influence des différents mécanismes de chaleur dans ces configurations thermo-hydrauliques étendues, la boucle expérimentale COLIBRI a été modifiée permettant d'augmenter la fraction volumique des gouttes ($\alpha_g \sim 10^{-3}$) et la température d'entrée de la vapeur ($T_v = 215^\circ\text{C}$). Finalement, le but de cet article est de comparer les résultats du code NECTAR avec les données expérimentales obtenues avec la nouvelle configuration de la boucle COLIBRI pour un sous-canal intact de 100 mm de longueur.

2. COLIBRI

La boucle COLIBRI est composée d'une section d'essai où l'écoulement vapeur/gouttes est formé à partir d'un système de génération de gouttes et d'un système de génération de vapeur surchauffée et d'un réseau de condensation de la vapeur (Fig. 1a). Les gouttes sont générées avec un injecteur ayant un orifice de $500\mu\text{m}$ de diamètre. Aussi, la vapeur est produite à partir d'un générateur de vapeur (AURA M6) avant d'être surchauffée en passant dans un tube chauffé par effet joule.

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

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

La section d'essai est divisée en trois parties : 1) l'injecteur de vapeur surchauffée et de gouttes suivi d'une section en acier inoxydable (jusqu'à la première fenêtre optique) avec un bypass de vapeur, 2) une pièce amovible en Inconel 625 qui permet de tester trois taux de déformation ($\tau_b = 0, 61\%$ et 90%), représentés dans Fig.1b. Dans ce travail, le tube intact a été utilisé, c'est-à-dire, un tube droit sans déformation et avec un diamètre interne constant de 11.78 mm. Cette pièce est aussi chauffée par effet joule et sa température de paroi externe est mesurée par caméra infrarouge. Finalement, une section en acier inoxydable connecte l'écoulement avec le condenseur. Le Tableau 1 présente les paramètres de l'étude.

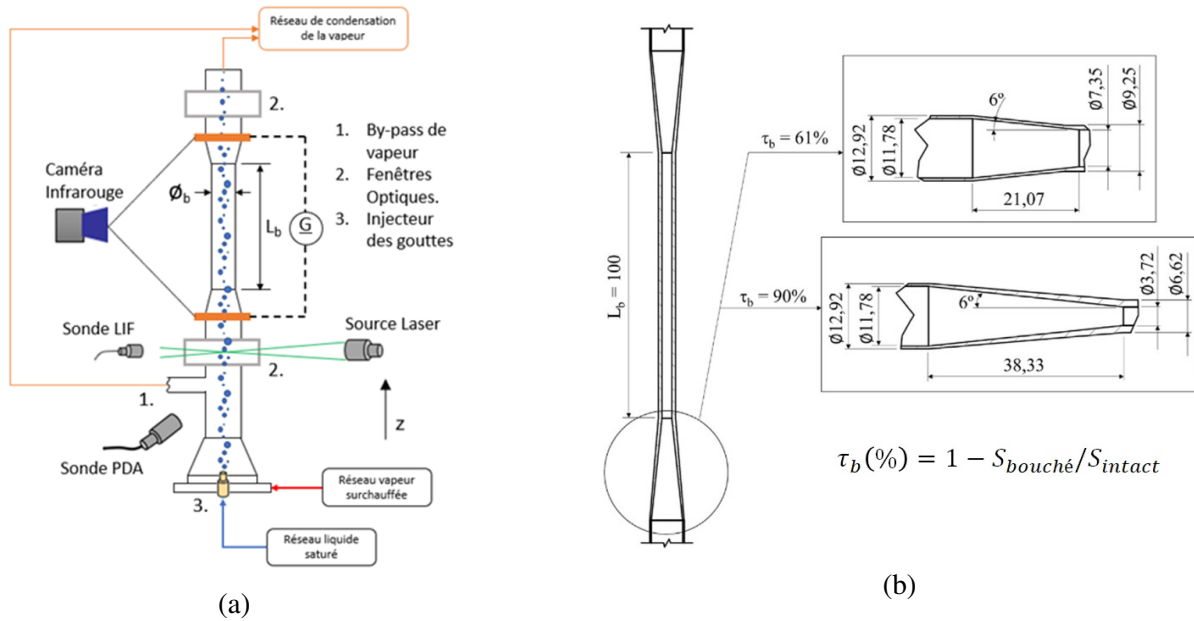


Figure 1 : a) Section d'essai de la boucle COLIBRI et b) géométrie des pièces amovibles qui simulent les sous-canaux bouchés.

Paramètres	Gamme
Pression de la vapeur (absolu)	0.9 – 1.4 bar
Débit massique des gouttes	3 – 12 kg/h
Température des gouttes injectées	> 80 °C
Diamètres des gouttes injectées	5 – 500 μm
Débit massique de vapeur	2 – 8 kg/h
Température de la vapeur	100 °C – 500 °C
Fraction volumique des gouttes	10^{-4} – $5 \cdot 10^{-3}$
Température initiale de la paroi	< 750 °C

Tableau 1 : Paramètres thermo-hydrauliques de la boucle COLIBRI

Des accès optiques en verre borosilicaté en amont et en aval de la section d'essai permettent de mesurer le diamètre et la vitesse des gouttes par Analyse Phase Doppler (PDA). Les détails sur la technique de PDA, les incertitudes et la géométrie sont disponibles dans la référence de Peña Carrillo et al. [1]. Finalement, le flux de chaleur extrait de la paroi par l'écoulement interne (Φ_{int}) est calculé à partir de la diminution spatio-temporelle de la température du tube, mesuré

avec la caméra infrarouge et à partir de l'estimation des pertes ($\Phi_{pertes}(z, t)$) avec l'environnement (rayonnement et convection naturelle), selon l'équation suivante :

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

3. Code NECTAR

Le code est basé sur le bilan thermique entre la paroi chaude à refroidir (avec une géométrie identique à COLIBRI) et l'écoulement interne de vapeur surchauffée et de gouttes dispersées. La Figure 2 montre les différents transferts : convection forcée paroi/vapeur (Φ_{pv}), rayonnement paroi/vapeur ($\Phi_{r,pv}$), convection vapeur/gouttes (Φ_{vg}), rayonnement vapeur/gouttes ($\Phi_{r,vg}$), rayonnement paroi/gouttes ($\Phi_{r,pg}$), impacts paroi/gouttes ($\Phi_{i,pg}$) et flux d'évaporation des gouttes (\dot{m}_{ev}). Le flux de chaleur dissipé à la paroi dû à l'écoulement interne (Φ_{int}) est donc la somme de quatre contributions différentes :

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

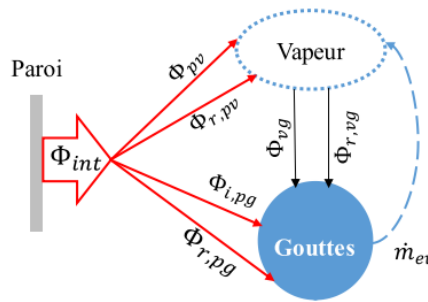


Figure 2 : Transferts thermiques et massique considérés dans NECTAR

Le modèle est 1D axial à 2 fluides (vapeur et gouttes) en non-équilibre thermique et dynamique. Les gouttes sont considérées sphériques et à saturation. Selon la vitesse et donc leur nombre de Weber, les gouttes peuvent se fragmenter. Pour cela, le modèle de Chou et Faeth [13] est utilisé pour calculer la nouvelle distribution après fragmentation (la coalescence n'est pas pris en compte). La paroi est considérée comme thermiquement « mince » ($Bi \ll 1$). Enfin les calculs sont valides seulement durant le régime de Leidenfrost (i.e. sans mouillage de la paroi). Le Tableau 2 résume les équations de conservation utilisées dans NECTAR. Également, pour le calcul des différents mécanismes de transfert de chaleur, le code NECTAR utilise les corrélations empiriques résumées dans le Tableau 3.

Par ailleurs, le flux de chaleur extrait par les impacts des gouttes $q_{i,pg}$ peut être estimé comme suit :

$$q_{i,pg} = \frac{6\dot{m}}{\pi\rho_g d^3} E_g \quad (3)$$

Où le flux de gouttes impactant la paroi (\dot{m}) est déterminé selon la corrélation de Owen et Hewitt [7]. Aussi, le facteur de forme ($F_{r,ij}$) entre la vapeur, la paroi et les gouttes est calculé selon le modèle des résistances thermiques proposé par Guo et Mishima [8]. Une description détaillée du code NECTAR est décrite par Oliveira et al [2].

	Équations
Conservation de la masse (vapeur)	$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m}_{ev}$
Bilan de quantité de mouvement (goutte)	$\rho_g u_g \frac{du_g}{dz} = -\frac{3}{4d_g} \frac{v C_D}{1+B} \rho_v (u_g - u_v) u_g - u_v + (\rho_v - \rho_g) g$ $C_D = \frac{24}{Re(1+B)}, B = \frac{C_{pv}(T_v - T_{sat})}{h_{fg} + (Q_L/\dot{m})}, v = \frac{1}{1-6.55\alpha_g}$
Bilan d'énergie	$C_{pv} \left\{ T_v(z+dz) \left[\dot{m}_v(z) + \frac{d\dot{m}_v(z)}{dz} \right] - \dot{m}_v(z) T_v(z) \right\} = \Phi_{ev}$ $\Phi_{ev} = \Phi_{i,pg} + \Phi_{r,pg} + \Phi_{vg} + \Phi_{r,vp}$

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

	Équations
Convection forcée paroi/vapeur (Φ_{pv}) [3]	$Nu_v = \frac{f/8(Re_v - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$
Convection entre la vapeur et les gouttes (Φ_{vg}) [4, 5]	$Nu_{vg} (1 + (h_v - h_g)/h_{fg}) = 2 + 0.6 Re_M^{1/2} Pr_f^{1/3}$
Impact d'une goutte avec la paroi ($\Phi_{i,pg}$) [6]	$E_g = \int_0^{t_s} (h_i (T_p - T_v) + \epsilon_p \sigma_{SB} (T_p^4 - T_g^4)) \frac{\pi d(t)^2}{4} dt$
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 [2].

4. Domaine de simulation et conditions limites

Le code NECTAR a été développé pour simuler les conditions géométriques et thermo-hydrauliques de COLIBRI. De cette façon, NECTAR utilise l'évolution spatio-temporelle de la température externe du tube chauffé de COLIBRI, mesurée lors de l'expérience. Ensuite, NECTAR calcule la valeur du transfert pour chaque mécanisme en chaque maille axiale et à chaque pas de temps. Finalement le flux de chaleur calculé par NECTAR est comparé au flux calculé à partir des données expérimentales de COLIBRI. Les conditions thermo-hydrauliques évaluées pour la présente expérience sur COLIBRI étaient :

- Débit de vapeur de 4.2 kg/h, avec une température de 215°C.
- Débit des gouttes de 5.2 kg/h, avec une vitesse moyenne des gouttes de 11.5 m/s.
- 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 est représenté dans la Fig.3. Le diamètre moyen (d_{10}) est de $187\mu m$ avec un diamètre minimum de $5\mu m$ et un diamètre maximum de $500\mu m$. La distribution des gouttes est de type log-normal, un type de distribution courant dans un APRP [9]. La Figure 3 montre aussi la distribution des gouttes utilisée pour le calcul NECTAR qui a été trouvée à partir de l'histogramme.

Finalement, le domaine de simulation est représenté dans la Fig. 4 . Comme mentionné pour le calcul du flux, NECTAR utilise la température mesurée par la caméra infrarouge de COLIBRI. 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

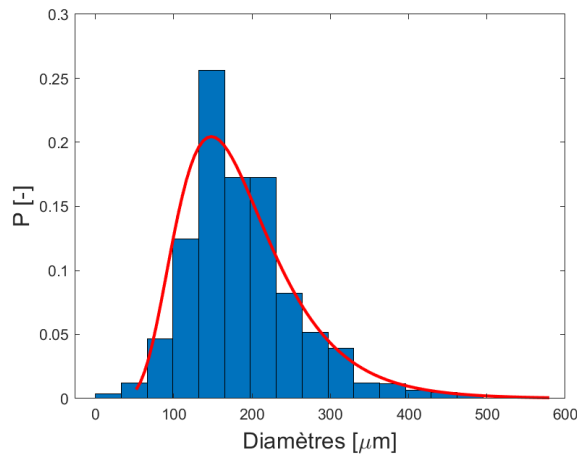


Figure 3 : Histogramme des gouttes trouvé dans COLIBRI (en bleu) avec la distribution de type lognormal utilisée pour NECTAR (en rouge) avec $\mu = \ln(d_{10})$ et $\sigma = 0.37$.

brides électriques utilisées pour le passage de courant dans le tube d'essai.

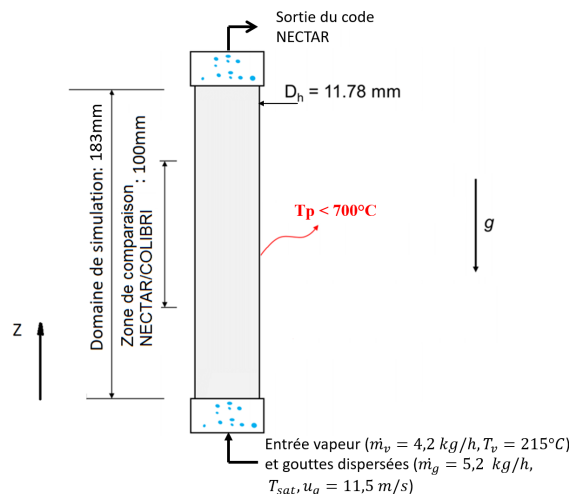


Figure 4 : Domaine de simulation du code NECTAR.

5. Résultats

La comparaison entre les résultats expérimentaux et la simulation numérique du flux interne extrait par l'écoulement de vapeur et gouttes est présentée dans la Fig. 5a. On constate que le flux thermique est prédit correctement dans la plage de température de l'étude. Néanmoins, à haute température de paroi, les écarts entre le flux expérimental et le flux simulé sont plus importants qu'à basse température ; mais il faut noter aussi que les erreurs expérimentales sont plus importantes à haute température. De plus, il peut être noté (Fig. 5b) que dans la gamme de température étudiée les points sont prédits avec une incertitude de $\pm 20\%$.

En outre, le code NECTAR permet de comparer la contribution de chaque mécanisme de transfert de chaleur (équation 1) dans le flux interne de chaleur total en fonction de la température de la paroi (Fig. 6). Le mécanisme le plus important reste la convection entre la paroi et la vapeur (Φ_{pv}), avec de 59% du flux total. Par ailleurs, on constate l'importance des gouttes dans le refroidissement de la paroi chaude : le flux de chaleur par impacts de gouttes sur la paroi ($\Phi_{i,pg}$)

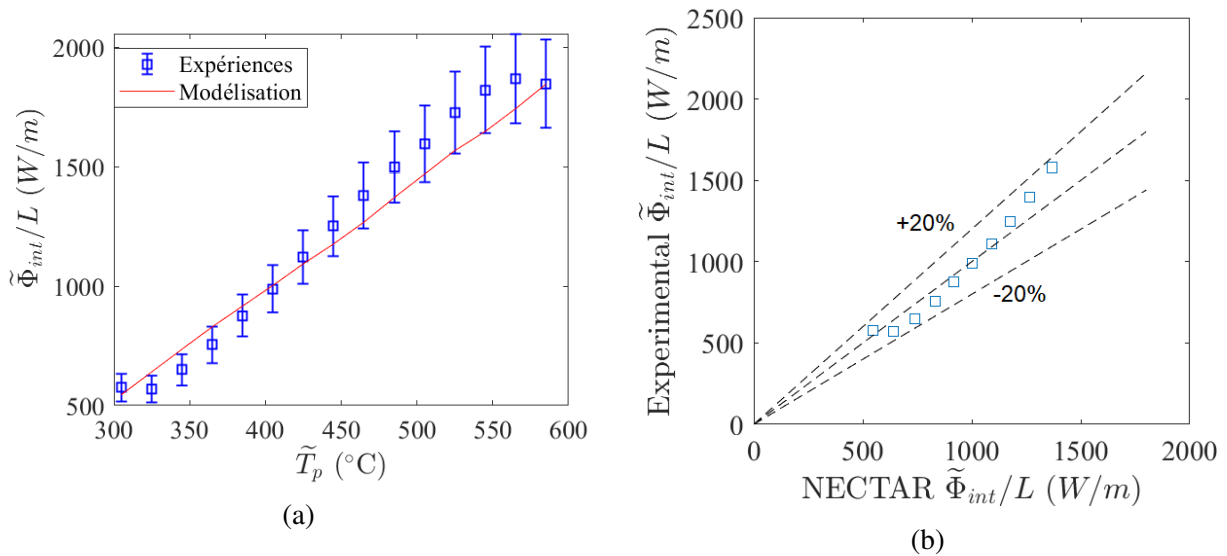


Figure 5 : a) Comparaison du flux interne dégagé par l'écoulement et b) différence entre le flux calculé et mesuré expérimentalement

représente plus de 36% du flux total. Dans un travail précédent, Peña Carrillo et al. [10] avaient trouvé que la participation de $\Phi_{i,pg}$ était d'environ 9% avec une fraction volumique d'environ 10^{-4} . On constate donc qu'une augmentation de la fraction volumique des gouttes entraîne une augmentation de $\Phi_{i,pg}$ dans le flux global Φ_{int} . Finalement, le rayonnement entre la paroi et les deux phases de l'eau ($\Phi_{r,pg}$ et $\Phi_{r,pv}$) reste faible avec une participation conjuguée de moins de 5% du flux total.

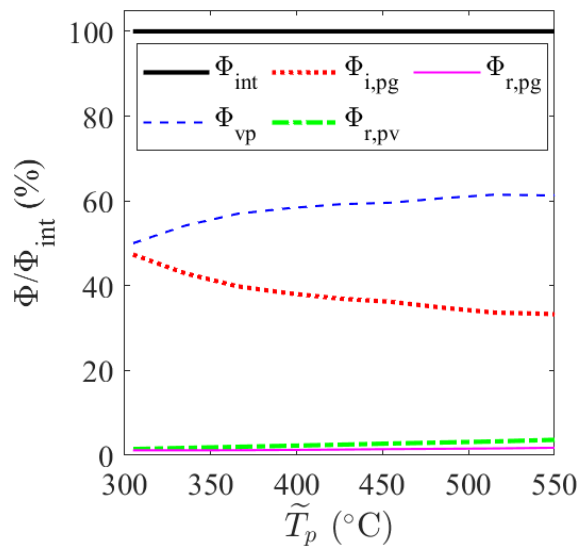


Figure 6 : Contribution de chaque mécanisme de chaleur dans le flux interne total.

6. Conclusion

Dans ce travail, une comparaison entre le résultat de la modélisation mécaniste par le code NECTAR et le résultat expérimental avec la boucle COLIBRI sur les transferts thermiques qui ont lieu dans un tube représentatif d'un sous-canal de REP refroidi par un écoulement vapeur/gouttes a été entreprise. Cette comparaison a permis d'obtenir les résultats suivants :

- La simulation réalisée avec le code NECTAR prédit correctement le flux thermique trouvé expérimentalement, où 100% des points de flux comparés entre NECTAR et COLIBRI se trouvent dans une plage de $\pm 20\%$.
- Le mécanisme le plus important dans les conditions évaluées reste la convection entre la paroi et la vapeur (Φ_{pv}). Néanmoins, avec l'augmentation de la fraction volumique des gouttes, il a été constaté une augmentation de la participation du flux de chaleur par impacts de gouttes ($\Phi_{i,pg}$), avec une contribution de plus de 36% dans le flux global (Φ_{int}).

Références

- [1] J. D. Peña Carrillo, A. V. 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, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 140 (2019) 648–659. doi :10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.012.
- [2] 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. doi :https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2019.110388.
- [3] 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.
- [4] W. R. Ranz, W. E. and Marshall, *Evaporation from drops* (1952).
- [5] M. C. Yuen, L. W. Chen, Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets, *Int. J. Heat Mass Transf.* 21 (5) (1978) 537–542. doi :10.1016/0017-9310(78)90049-2.
- [6] M. Gradeck, N. Seiler, P. Ruyer, D. Maillet, Heat transfer for leidenfrost drops bouncing onto a hot surface, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 47 (2013) 14 – 25. doi :https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.10.023.
- [7] G. Hewitt, A. Govan, Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change, *Int. J. Heat Mass Transf.* 33 (2) (1990) 229 – 242. doi :https://doi.org/10.1016/0017-9310(90)90094-B.
- [8] Y. Guo, K. Mishima, A non-equilibrium mechanistic heat transfer model for post-dryout dispersed flow regime, *Ep. Therm. Fluid Sci.* 26 (6-7) (2002) 861–869. doi :10.1016/S0894-1777(02)00195-4.
- [9] 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. doi :https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118544.
- [10] J. D. Peña Carrillo, A. V. S. Oliveira, T. Glantz, G. Repetto, M. Gradeck, Analyse des transferts thermiques d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire, in : *Congrès français de thermique, Société Française de Thermique, Nantes, 2019.*

Remerciements

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