

Etude du refroidissement d'une zone représentative d'un assemblage de cœur de REP

Study of the cooling of a PWR's core assembly representative zone.

Arthur V.S OLIVEIRA^{1,2}, Juan Esteban LUNA VALENCIA^{1,2*}, Alexandre LABERGUE¹, Tony GLANTZ², Georges REPETTO³, Michel GRADECK¹

¹LEMETA, CNRS, UMR 7563, Nancy, F-54000, France

²IRSN PSN/SEMIA/LEMC, B.P. 3, 13 115 St-Paul-Lez-Durance Cedex, France

³IRSN PRSN/RES/SEREX, B.P. 3, 13 115 St-Paul-Lez-Durance Cedex, France

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

Résumé – Lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP), des injections de secours sont réalisées et un écoulement dispersé de vapeur et de gouttes se produit en aval du front de remouillage qui se propage dans les assemblages. Cet écoulement joue un rôle très important dans le refroidissement initial des cœurs en situation accidentelle ; c'est pourquoi la communauté nucléaire travaille depuis longtemps pour modéliser le plus correctement les échanges thermiques entre les crayons, la vapeur et les gouttes afin d'estimer le refroidissement des crayons combustibles. Dans un précédent travail, nous avons présenté le code NECTAR validé à l'aide de l'expérience COLIBRI. Dans ce code, la dissipation de chaleur et la dynamique de gouttes sont estimées avec une bonne précision pour un écoulement dispersé et pour différents taux de bouchage. Le code NECTAR, étant validé par des expériences, permet de réaliser des analyses paramétriques. Dans cet article, il s'agit d'analyser l'influence du débit massique des gouttes et de leurs distributions en taille sur les transferts thermiques. De plus, les conditions limites et initiales testées sont plus représentatives d'un APRP notamment celles concernant la température de vapeur et la fraction volumiques. La dissipation totale de chaleur interne est évaluée et on analyse les contributions des différents mécanismes en jeu.

Mots-clés : LOCA ; NECTAR ; Thermo-hydraulique ; Modèle mécaniste

Nomenclature

Symboles latins

B	« Blowing factor »
C_D	coefficient de trainée
C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
d	diamètre, m
f	coefficient de frottement
g	accélération gravitationnelle, $m.s^{-2}$
h	enthalpie, $J.kg^{-1}$
m	masse, kg
\dot{m}	débit massique, $kg.s^{-1}$
Nu	nombre de Nusselt
Pr	nombre de Prandtl
Re	nombre de Reynolds
t	temps
T	température, K
T_{sat}	température de saturation, K
u	vitesse axiale, $m.s^{-1}$
z	coordonnée axial

Symboles grecs

σ_{SB} constante de Stefan Boltzmann

σ	écart type
ω	résistance de rayonnement
ρ	densité, $kg.m^{-3}$
Φ	flux thermique, W
ε	émissivité
α	fraction volumique
γ	tension de surface, $N.m^{-1}$
μ	espérance mathématique
<i>Indices et exposants</i>	
$\overline{}$	diamètre de Sauter moyenne
ev	évaporation
g	gouttes
i	impacts des gouttes avec la paroi
int	interne
max	maximum
min	minimum
p	paroi
r	rayonnement
v	vapeur

1. Introduction

La compréhension des phénomènes physiques liés aux accidents dans des réacteurs nucléaires est un enjeu majeur. L'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP) est l'un des accidents des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) les plus étudiés car il peut conduire à la fusion du cœur suite à la perte du réfrigérant primaire conduisant à l'augmentation rapide de la température des gaines du combustible non refroidi. Afin d'éviter cette situation, un système de secours (ECCS) permet l'injection d'eau borée dans le cœur du réacteur pour évacuer la chaleur résiduelle et assurer l'intégrité des barrières de confinement (gaine du combustible et cuve du réacteur) avec le remplissage partiel de la cuve. Dans cette situation dite de renoyage, on identifie trois zones caractéristiques de l'écoulement : i) zone de liquide sous-saturé puis saturé avec ébullition intense, ii) zone diphasique vapeur/gouttes avec un écoulement dispersé de vapeur et gouttes, en aval du front de remouillage et iii) zone de vapeur surchauffée (figure 1).

A la fin de la première zone, les transferts thermiques sont liés à une ébullition intense localisée au front de remouillage. ; c'est cette ébullition qui va conditionner les caractéristiques de l'écoulement dispersé vapeur-gouttes dans la deuxième zone. Le flux de vapeur généré au front de remouillage entraîne une population de gouttes qui participe aussi au refroidissement des assemblages. Dans la troisième zone, les transferts thermiques se font par convection et rayonnement entre la paroi et la vapeur. Notre étude s'intéresse à la seconde zone où plusieurs mécanismes physiques jouent un rôle important dans la dissipation de la chaleur. Différents transferts de chaleur (paroi-vapeur-gouttes) et de masse (vapeur-gouttes) interfèrent et mettent en jeu des gouttes à une température proche de la saturation qui peuvent impacter la paroi (généralement, cette zone est à une température supérieure au point de Leidenfrost). Par ailleurs, la distribution des gouttes est polydispersée, due à la formation de l'écoulement au front de trempe et évolue au gré des phénomènes de coalescence et fragmentation [1].

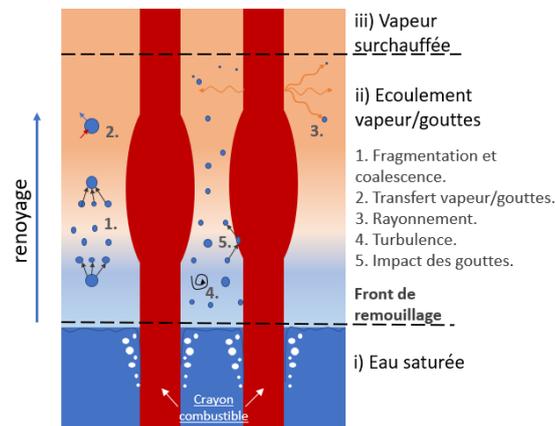


Figure 1 : Phénomènes de transfert de chaleur et de masse dans un APRP.

Pour simuler l'ensemble de ces phénomènes thermo-hydrauliques, nous avons conçu le code NECTAR (New Experimental Code for heat Transfer Analysis inside Rod bundle) en se basant sur des modèles mécanistes. Il permet d'estimer la dissipation de chaleur interne dans un tube représentatif d'un sous-canal de REP refroidi par un écoulement vapeur/gouttes lors d'un APRP, en prenant en compte la vitesse et le diamètre des gouttes pour une distribution polydispersée, les débits massiques (gouttes et vapeur), la température de la paroi et de la vapeur, la longueur du tube chauffé et différents diamètres hydrauliques (pour simuler le bouchage de

zones déformées ou ballonnées) ; ce code a aussi été validé par des données expérimentales obtenues avec la boucle COLIBRI (COoLIing of Blockage Region Inside a PWR reactor)[2].

L'objectif de ce papier est de réaliser une étude paramétrique, à l'aide du code NECTAR, de l'influence sur le refroidissement de la température de vapeur, des débits massiques de vapeur et de gouttes et de leurs distributions en taille dans des conditions représentatives d'un APRP. On analysera également les conséquences sur les contributions des différents mécanismes de transferts thermiques mis en jeu. Le tableau 1 indique les valeurs typiques d'un APRP [3]–[6] que nous devons considérer.

Paramètres	Valeurs typiques cas APRP
Diamètre des gouttes (d_g)	50 μm - 1300 μm
Vitesse axiale des gouttes (u_g)	4 m/s - 16 m/s
Fraction volumique des gouttes (α_g)	10^{-2} - 10^{-4}
Température de la vapeur (T_v)	Jusqu'à 800°C
Température de la paroi (T_p)	300 °C - 1200 °C

Tableau 1 : Valeurs typiques pendant un APRP.

2. Code NECTAR

2.1. Description générale du code

Le code est basé sur une description mécaniste des phénomènes physiques mis en jeu. Il détermine la contribution des transferts thermiques entre une paroi chaude (à refroidir) et un écoulement de vapeur surchauffée contenant une phase dispersée composée de gouttes à saturation [7]. On considère uniquement les transferts indiqués à la figure 2, à savoir : 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 évaporation des gouttes.

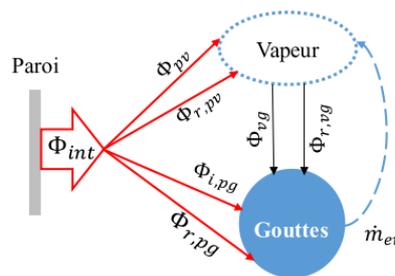


Figure 2 : transferts thermiques considérés dans NECTAR

Le flux de chaleur dissipé à la paroi et dû à l'écoulement interne (Φ_{int}) est donc la somme des différentes contributions (transferts entre la paroi et les gouttes et entre la paroi et la vapeur) en tenant compte également des pertes avec l'environnement (Φ_{pertes}).

$$\Phi_{int} = \Phi_{pv} + \Phi_{r,pv} + \Phi_{i,pg} + \Phi_{r,pg} \quad (1)$$

Le modèle est 1D axial à 2 fluides (vapeur et gouttes) en non-équilibre thermique et dynamique. Les gouttes sont sphériques et considérées à saturation. Il n'y a pas de coalescence mais la fragmentation des gouttes est possible. La paroi est considérée comme thermiquement « mince » ($Bi \ll 1$). Enfin les calculs sont valides uniquement en régime de Leidenfrost [8].

2.2. Equations du code NECTAR

2.2.1. Equations de conservation

Le Tableau 2 résume les équations de conservation utilisées dans NECTAR [2].

	<i>Equations</i>
Conservation de la masse de vapeur	$\frac{dm_v}{dt} = \dot{m}_{ev}$
Bilan de quantité de mouvement pour une goutte isolée	$\rho_g u_g \frac{du_g}{dz} = -\frac{3}{4d_g} \frac{\vartheta \cdot C_D}{(1+B)} \rho_v (u_g - u_v) u_g - u_v + (\rho_v - \rho_g)g$ $C_D = \frac{A_1}{Re_g} + \frac{A_2}{Re_g^2} + A_3, B = \frac{C_{pv}(T_v - T_{sat})}{h_{fg} + (Q_L/\dot{m})}, \vartheta = \frac{1}{1 - 6.55\alpha_g}$
Bilan d'énergie	$C_{pv} \left\{ T_v(z + dz) \left[\dot{m}_v(z) + \frac{d\dot{m}_v}{dt}(z) \right] - \dot{m}_v(z) T_v(z) \right\} = \Phi_{ev}$ $\Phi_{ev} = \Phi_{i,pg} + \Phi_{r,pg} + \Phi_{vg} + \Phi_{r,vg}$

Tableau 2 : *Corrélations de conservation du code NECTAR.*

A_1 , A_2 , et A_3 sont des constantes qui dépendent du nombre de Reynolds des gouttes, ils se trouvent avec la corrélation de Morsi pour le calcul du coefficient de trainée (C_d) [2]. Le coefficient ϑ prend en compte l'effet de l'influence de la concentration volumique dans le calcul de C_d .

2.2.2. Corrélations de transfert de chaleur

Les corrélations utilisées dans NECTAR pour le calcul des différents flux thermiques (cf équation 1) sont données dans le tableau 3. Pour le calcul des échanges thermiques par rayonnement, Oliveira et al. [2] ont choisi la méthode nodale de Sun et al. [9] pour déterminer les facteurs de forme correspondant à chaque situation.

2.2.3. Distribution et transport des gouttes

Pour déterminer l'évolution volumétrique de la phase dispersée (ie les gouttes), nous utilisons les équations de la densité du moment [5], [10], [11] décrites le long de l'axe vertical z ; la distribution en diamètre des gouttes étant considérée du type log-normale. Par ailleurs, et selon la différence de vitesse entre la vapeur et les gouttes, ces dernières peuvent se fragmenter. Le modèle de Chou et Faeth [12] est utilisé pour calculer la nouvelle distribution après fragmentation [2].

3. Résultats des simulations

Des simulations numériques ont été faites avec NECTAR pour comparer le refroidissement obtenu dans différents cas. Pour ce faire, nous avons fait varier les paramètres suivants :

- température de paroi comprises entre 550°C et 1000°C.
- débit de vapeur (5kg/h) et température de vapeur (500°C) fixés à l'entrée.
- 3 débits massiques de gouttes (1 kg/h, 10 kg/h et 50kg/h) correspondant aux titres volumiques à l'entrée de $7,3 \cdot 10^{-5}$, $7,3 \cdot 10^{-4}$ et $3,6 \cdot 10^{-3}$ respectivement, avec PDF1 comme la distribution des gouttes de référence (tableau 4).
- et enfin, deux distributions différentes (figure 3 et tableau 4).

Paramètre	Corrélation
Φ_{pv}	$Nu_v = \frac{(f/8)(Re_v - 1000)Pr}{1 + 17(f/8)^{0.5}(Pr^{2/3} - 1)} \left(\frac{T_v}{T_p}\right)$
Φ_{vg}	$Nu_g = \frac{2 + 0.74Re_{vg}^{0.5}Pr^{0.33}}{1 + B}$
$\Phi_{r,pv}$, $\Phi_{r,vg}$ et $\Phi_{r,vg}$	$\Phi_{r,pv} = \omega_{p \rightarrow v} \sigma_{SB} (T_p^4 - T_v^4), \quad \Phi_{r,vg} = \omega_{v \rightarrow g} \sigma_{SB} (T_v^4 - T_g^4)$ $\Phi_{r,pg} = \omega_{p \rightarrow g} \sigma_{SB} (T_p^4 - T_g^4)$
$\Phi_{i,pg}$	$\Phi_{i,pg} = \frac{\dot{m}_{i,g}}{\rho_g \pi d_g^3 / 6} E_{1,g}$ $E_{1,g} = \int_0^{t_s} \left(h_{ipg} (T_p - \bar{T}_v) + \varepsilon_p \sigma_{SB} (T_p^4 - T_g^4) \right) \frac{\pi d(t)^2}{4} dt$ $\dot{m}_{i,g} = \begin{cases} 0.18(\rho_v D_i / \gamma_g)^{-1/2} \alpha_g \rho_g & (\alpha_g \rho_g \rho_v^{-1} < 0.3) \\ 0.083(\rho_v D_i / \gamma_g)^{-1/2} (\alpha_g \rho_g)^{0.35} \rho_v^{0.65} & (\alpha_g \rho_g \rho_v^{-1} \geq 0.3) \end{cases}$

Tableau 3 : Corrélations des transferts thermiques du code NECTAR.

Avec h_{ipg} comme le coefficient de transfert thermique par impact d'une goutte sur la paroi.

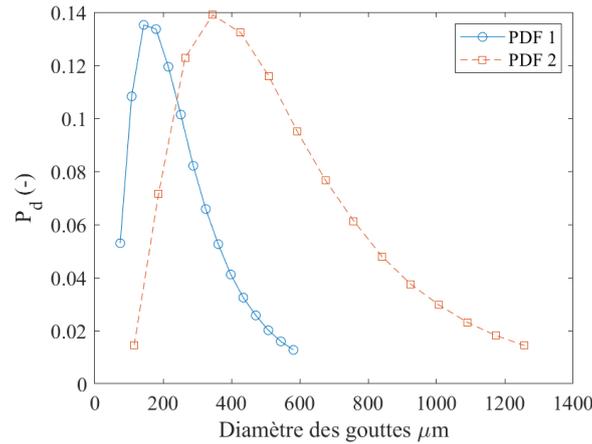


Figure 3 : Distributions des gouttes choisies.

Paramètres	PDF 1	PDF2
$d_{g_{min}} - d_{g_{max}}$	50 μm - 600 μm	50 μm - 1300 μm
Nombre de discrétisation	15	15
σ	0.6	0.6
$\ln(\mu)$	-8.4	-7.6
d_{32}	360 μm	790 μm

Tableau 4 : Principaux paramètres des distributions des gouttes choisies.

3.1. Variation du débit massique des gouttes

La figure 4 montre que, même si le flux (Φ_{int}) est bien proportionnel au débit massique des gouttes, les variations entre les cas ne suivent pas un comportement linéaire ; ceci est principalement dû à la non-linéarité des transferts thermiques où, après une augmentation du débit de gouttes par cinquante, Φ_{int} n'est que doublé. La figure 5 illustre aussi la complexité des

phénomènes où les contributions moyennes des transferts thermiques évoluent différemment avec le débit de gouttes : les flux dus aux impacts de gouttes et au rayonnement paroi-gouttes augmentent tandis que les flux dus à la convection avec la vapeur et au rayonnement paroi-vapeur diminuent.

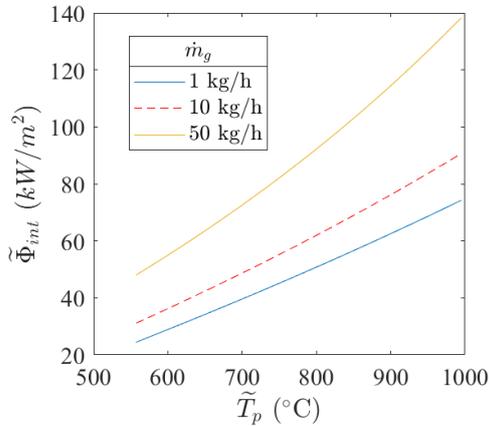


Figure 4 : Flux de chaleur dissipé de la paroi en fonction de la température de la paroi pour différents titres de débit massique des gouttes.

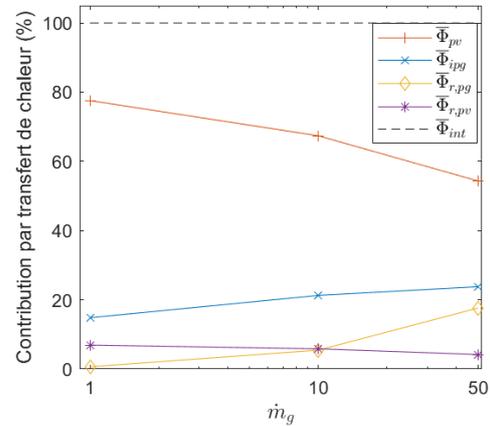


Figure 5 : Contribution des différents types de transferts thermiques moyennes en fonction des différents titres de débit massique des gouttes.

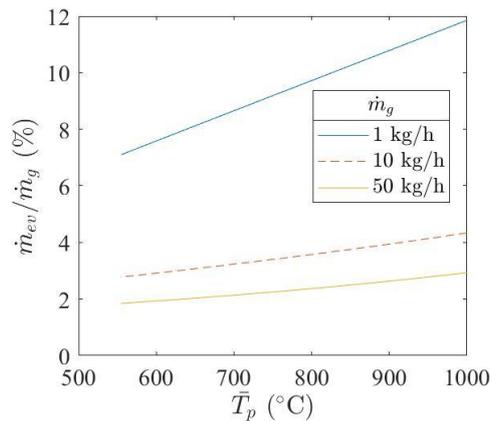


Figure 6 : Pourcentage de masse de gouttes évaporées à la sortie de la zone de calcul en fonction de la température de la paroi pour différents débits massiques de gouttes.

Comme les gouttes sont considérées à saturation dans les calculs (la température des gouttes est proche de la saturation dans les conditions réelles du LOCA [7]), les transferts thermiques vers les gouttes vont directement générer l'évaporation de celles-ci. La valeur de 100% n'a jamais été constatée dans nos simulations, elle est importante pour déterminer l'instant où l'écoulement devient monophasique (ie vapeur surchauffée). La figure 5 montre l'évolution de la masse évaporée pour différents débits et on constate qu'une augmentation de 1 kg/h à 10kg/h ne génère qu'une augmentation de 1,5 fois de masse évaporée (3,9 fois de 1 à 50kg/h).

3.2. Variation de la distribution des gouttes

Telle que décrite dans le Tableau 1, il est possible de rencontrer une grande dispersion en diamètre de gouttes (entre 50 et 1300 μm). Nous avons donc opté pour deux distributions log-normales avec différents diamètres moyens (cf figure 3) pour analyser l'évolution des transferts

thermiques et le pourcentage de masse évaporée. Le Tableau 4 montre les paramètres de chaque distribution.

La figure 7 montre une augmentation d'environ 6.9% du flux de chaleur dissipé à la paroi pour la distribution des gouttes ayant un diamètre plus important (PDF2) ; ceci est dû à l'augmentation des transferts thermiques par impacts des gouttes (figure 8). On constate également une meilleure évaporation des gouttes pour la PDF2 pour laquelle la surface d'échange (surface de gouttes) augmente.

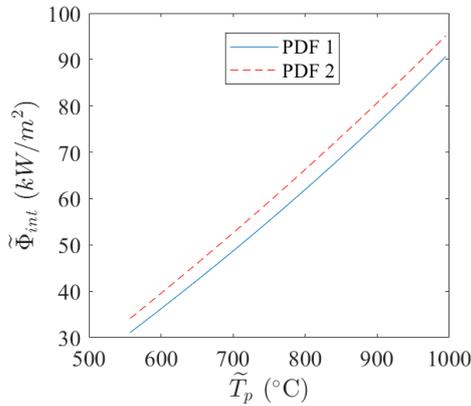


Figure 7 : Flux de chaleur dissipé de la paroi en fonction de la température de la paroi pour différentes distributions des gouttes.

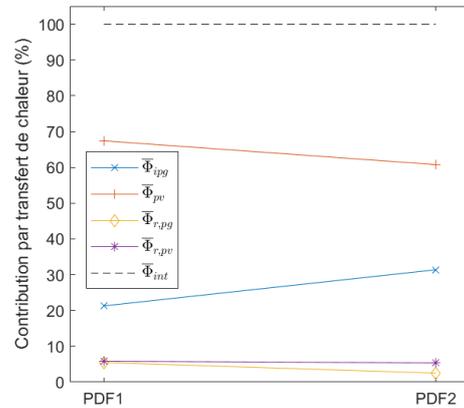


Figure 8 : Contribution des différents types des transferts thermiques moyennes en fonction des différentes distributions des gouttes.

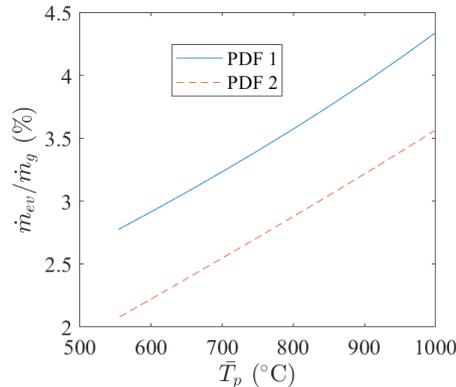


Figure 9 : Pourcentage de masse de gouttes évaporées en fonction de la température de la paroi pour différentes distributions des gouttes.

4. Conclusion

Les simulations faites avec le code NECTAR permettent d'analyser l'influence du débit massique des gouttes et de la distribution en taille des gouttes sur les transferts thermiques qui ont lieu dans un tube représentatif d'un sous-canal de REP refroidi par un écoulement vapeur/gouttes dans les conditions d'un APRP. Cette analyse a permis de relever les résultats suivants :

- Une augmentation du débit massique des gouttes conduit à une augmentation du flux thermique dissipé à la paroi et du pourcentage de masse évaporée.
- Les contributions des transferts thermiques entre la paroi et les gouttes ($\Phi_{r,pg}$ et $\Phi_{i,pg}$) deviennent beaucoup plus importantes avec un débit de gouttes plus grand (2.7 fois plus pour 50kg/h que pour 1 kg/h).

- Pour le même débit de gouttes, le flux dissipé à la paroi n'augmente que légèrement avec une augmentation du diamètre moyen des gouttes.
- La contribution des impacts des gouttes peut dépasser 30% du flux de chaleur total dissipé à la paroi avec un écoulement ayant une polydispersion en gouttes étalée vers des grands diamètres (jusqu'à 1300 μm).

Références

- [1] J. D. Peña Carrillo, A. V. S. Oliveira, A. Labergue, T. Glantz, and 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.*, vol. 140, pp. 648–659, 2019, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.06.012.
- [2] A. V. S. Oliveira, J. D. Peña Carrillo, A. Labergue, T. Glantz, and M. Gradeck, "Mechanistic modeling of the thermal-hydraulics in polydispersed flow film boiling in LOCA conditions," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 357, no. August 2019, 2020, doi: 10.1016/j.nucengdes.2019.110388.
- [3] Jin, Y., Beck, F.R., Lowery, B.R., Miller, D.J., Cheung, F.B., Bajorek, S.M., Tien, K., Hoxie, C.L., 2018. "Experimental study of droplet sizes across a spacer grid location under various reflood conditions". *Exp. Thermal Fluid Sci.* 94 (February 2017), 246–257.
- [4] K. Kim, B. J. Kim, H. S. Choi, S. K. Moon, and C. H. Song, "Effect of a blockage length on the coolability during reflood in a 2×2 rod bundle with a 90% partially blocked region," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 312, pp. 248–255, 2017, doi: 10.1016/j.nucengdes.2016.08.031.
- [5] Ruyer, P., Seiler, N., Biton, B., Lelong, F., Secondi, F., Baalbaki, D., Gradeck, M., 2013. "Two-phase flow across a partially damaged core during the reflood phase of a LOCA". *Nucl. Eng. Des.* 264, 187–194. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.026>. sI:NURETH-14.
- [6] R. Lee, J. N. Reyes, and K. Almenas, "Size and number density change of droplet populations above a quench front during reflood," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 27, no. 4, pp. 573–585, 1984, doi: 10.1016/0017-9310(84)90030-9.
- [7] J. D. Peña Carrillo, "Etude expérimentale du transfert paroi/fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire," Université de Lorraine, 2018.
- [8] J. D. Peña Carrillo, A. V. S. Oliveira, T. Glantz, G. Repetto, and M. Gradeck, "Analyse des transferts thermiques d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire," in *Congrès français de thermique*, 2019.
- [9] K. H. Sun, J. M. Gonzalez, and C. L. Tien, "Calculations of Combined Radiation and Convection Heat Transfer in Rod Bundles Under Emergency Cooling Conditions.," *Am. Soc. Mech. Eng.*, no. 75-HT-64, pp. 414–420, 1975.
- [10] C. Morel, *Mathematical Modeling of Disperse Two-Phase Flows*, vol. 114. Springer International Publishing.
- [11] C. Morel, P. Ruyer, N. Seiler, and J. M. Laviéville, "Comparison of several models for multi-size bubbly flows on an adiabatic experiment," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 36, no. 1, pp. 25–39, 2010, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2009.09.003.
- [12] W. H. Chou and G. M. Faeth, "Temporal properties of secondary drop breakup in the bag breakup regime," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 24, no. 6, pp. 889–912, 1998, doi: 10.1016/S0301-9322(98)00015-9.

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet ANR RSNR PERFROI financé par l'Etat français et géré par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme d'investissements d'avenir portant la référence n° ET-11-RSNR-0017.