



**HAL**  
open science

## Analyse des transferts thermiques d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire

Juan David Peña Carrillo, Arthur V S Oliveira, Alexandre Labergue, Tony Glantz, Georges Repetto, Michel Gradeck

► **To cite this version:**

Juan David Peña Carrillo, Arthur V S Oliveira, Alexandre Labergue, Tony Glantz, Georges Repetto, et al.. Analyse des transferts thermiques d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire. 27e Congrès français de thermique, Jun 2019, Nantes, France. hal-03529839

**HAL Id: hal-03529839**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03529839>**

Submitted on 17 Jan 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Analyse des transferts thermiques d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire

Juan David PEÑA CARRILLO<sup>1,2,3</sup>, Arthur V.S OLIVEIRA<sup>1,2,3\*</sup>, Alexandre LABERGUE<sup>1,2</sup>, Tony GLANTZ<sup>3</sup>, Georges REPETTO<sup>3</sup>, Michel GRADECK<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>LEMETA, Université de Lorraine, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54500, France

<sup>2</sup>LEMETA, CNRS, UMR 7563, Vandœuvre-lès-Nancy, F-54500, France

<sup>3</sup> IRSN PSN/SEMIA/LIMAR, B.P. 3, 13 115 St-Paul-Lez-Durance Cedex, France

\*(auteur correspondant : vieradas1@univ-lorraine.fr)

**Résumé** - Lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) sur un réacteur à eau pressurisée (REP), le renoyage du cœur dépressurisé par les injections d'eau de secours conduit à la formation d'un écoulement diphasique dispersé de vapeur et de gouttes. L'étude porte sur la capacité de cet écoulement à refroidir les crayons combustibles éventuellement déformés. Le banc expérimental COLIBRI, représentatif à l'échelle 1 d'un sous-canal fluide, permet d'évaluer l'influence du taux de déformation des crayons combustibles sur les transferts thermiques. Des mesures couplées, thermographie infrarouge, PDA et LIF3c, ont permis d'évaluer la densité de flux thermique extrait par l'écoulement diphasique ainsi que les propriétés des gouttes en amont et aval de la zone d'essais. Afin de compléter les expériences et aider à une analyse plus fine, une modélisation mécaniste a été développée, code dit NECTAR.

## Nomenclature

$C_p$	chaleur massique $J.kg^{-1}K^{-1}$	$\Phi$	puissance, W
$d, D$	diamètre, m	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$e$	épaisseur, m	$\rho_o$	résistivité, $\Omega.m$
$I$	intensité, A	<i>Indices et exposants</i>	
$R$	rayon interne	$r$	rayonnement
$S_s$	section droite du tube, $m^2$	$p$	paroi
$T$	température, K	$g$	goutte
$t$	temps, s	$v$	vapeur
$u$	vitesse, $m.s^{-1}$	Int	interne
<i>Symboles grecs</i>		Ext	externe
$\varphi$	flux de chaleur, $W.m^{-2}$	EV	évaporation

## 1. Introduction

L'un des accidents que peut subir un réacteur REP est l'APRP. Un tel accident se produit en cas de brèche sur le circuit primaire (rupture d'une tuyauterie ou problème d'étanchéité lié aux éléments du circuit). L'assèchement de l'assemblage combustible qui s'ensuit conduit à une augmentation importante et rapide de la température du combustible et des gaines qui peuvent éventuellement se déformer et faire apparaître des zones dites ballonnées dans l'assemblage. Afin de refroidir le cœur, de l'eau borée est injectée dans la cuve, du bas des crayons combustibles vers le haut. C'est l'opération dite de « renoyage ». Un écoulement dispersé de vapeur et de gouttes se forme donc au-delà du front de remouillage ; ainsi, une part importante des crayons n'est, dans un premier temps, refroidie que par cet écoulement diphasique. La figure 1 montre schématiquement les étapes d'un tel accident à une position axiale donnée d'un crayon combustible montrant l'importance du refroidissement dû à l'écoulement vapeur/gouttes.

La capacité de refroidissement des crayons combustibles lors d'un APRP dépend principalement des paramètres thermo-hydrauliques de l'écoulement diphasique mais aussi de

la géométrie du bouchage produite par le ballonnement des crayons combustibles (taux de bouchage et longueur axiale de déformation) [1][2]. Afin d'étudier un tel accident à l'échelle 1 d'un sous-canal fluide (canal fluide entre 4 crayons de combustible adjacents) et dans des conditions proches du cas réel, le banc expérimental COLIBRI a été développé [3]. Dans cette expérience, trois techniques optiques ont été utilisées de façon couplée afin d'avoir accès à des grandeurs d'intérêt telles la distribution en taille des gouttes, leur vitesse (PDA<sup>1</sup>), leur température (LIF3c<sup>2</sup>) ; la température de la paroi du tube de la veine d'expérience étant elle mesurée par thermographie infra-rouge. Les détails complets concernant l'expérience COLIBRI<sup>3</sup> sont décrits dans [4] et succinctement dans la section 2.

L'objectif de ce papier n'est pas d'analyser toutes les expériences ; on se focalisera sur une série d'expériences effectuées pour une longueur de bouchage unique (100mm) et trois différents taux de bouchage  $\tau$  (0%, 61%, 90%). Le code NECTAR<sup>4</sup>, développé dans le cadre de ce travail, permettra une analyse plus fine de l'écoulement et des transferts.

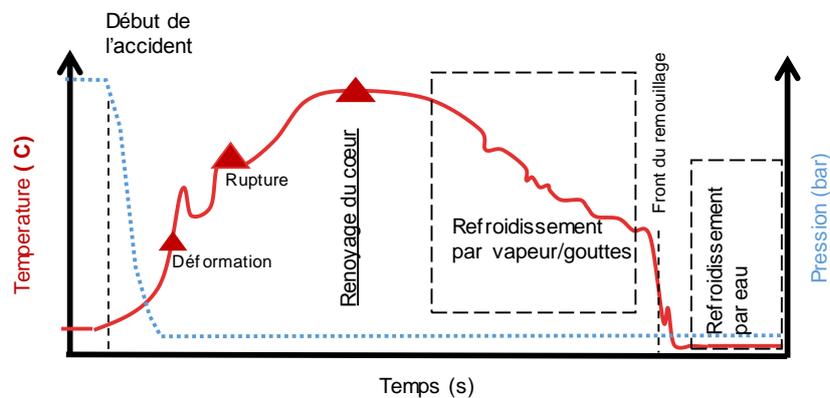


Figure 1. Schématisation des étapes d'un APRP à une position axiale donnée

## 2. Installation expérimentale COLIBRI

La Figure 2 présente le schéma du banc expérimental COLIBRI. Il se compose d'un système d'injection de gouttes d'eau, d'un système d'injection de vapeur surchauffée et d'une région tubulaire d'expérimentation et de métrologie.

La région tubulaire du banc expérimentale est composée de trois parties. Les parties I et III sont fixes et ont un diamètre interne de 11.78 mm (elles sont inconel 325), correspondant au diamètre hydraulique équivalent d'un sous-canal représentatif non déformé d'un REP. La partie II représente un sous-canal partiellement déformé. Elle est chauffée par Effet Joule en utilisant un générateur électrique. Le tableau 1 présente les différentes configurations de la partie II du banc expérimental.

	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>C3</i>	<i>C4</i>	<i>C5</i>
Taux de bouchage	0%	61%	61%	90%	90%
Diamètre équivalent ( $D_h$ )	11.78 mm	7.35 mm	7.35 mm	3.72 mm	3.72 mm
Hauteur (L)	180 mm	100 mm	300 mm	100 mm	300 mm
Epaisseur	0.57 mm	0.86 mm	0.86 mm	1.38 mm	1.38 mm

Tableau 1. Configurations géométriques de la partie II du banc expérimental

<sup>1</sup> Analyse Phase Doppler

<sup>2</sup> Fluorescence Induite par Laser – 3 couleurs

<sup>3</sup> COoLIing of Blockage Region Inside a PWR Reactor

<sup>4</sup> New Experimental Code for heat Transfer Analysis inside Rod bundle

Des fenêtres optiques en borosilicate sont placées en amont et en aval de cette partie afin d'autoriser les mesures optiques (Vitesse, diamètre et température des gouttes).

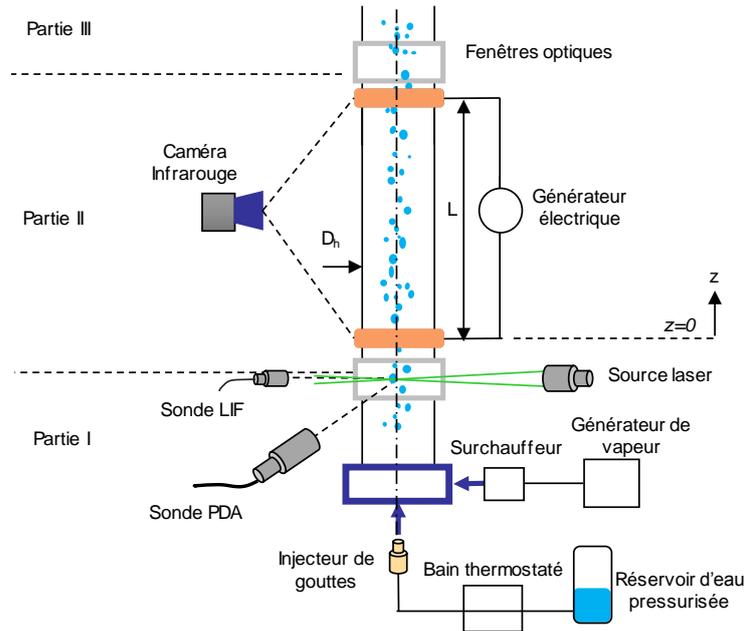


Figure 2. Schéma du banc expérimental COLIBRI

L'écoulement diphasique est injecté en amont de la partie I. Un générateur de vapeur permet d'obtenir de la vapeur à un débit massique maximale de 10 kg/h. A sa sortie, un surchauffeur permet d'augmenter sa température jusqu'à 200°C. Débit massique, température, et pression de vapeur sont également mesurés. Un injecteur de gouttes piézoélectrique produit un train de gouttes ( $d_g \sim 500 \mu\text{m}$   $\dot{m}_g = 2 \text{ kg/h}$ ); le train de gouttes obtenu est ensuite naturellement fragmenté par l'écoulement co-courant de vapeur et un écoulement dispersé est obtenu à l'entrée de la veine d'essais.

Les expériences sont séquencées de la façon suivante : Les conditions d'injection de l'écoulement diphasique sont ajustées et la phase d'injection démarre. Ensuite, le générateur électrique permet de chauffer la partie II jusqu'à une température représentative d'un APRP ( $>700^\circ\text{C}$ ). Une fois le régime quasi-stationnaire atteint, le générateur est coupé et les mesures simultanées de thermographie infrarouge, PDA et LIF démarrent. Les évolutions temporelles de la température externe du tube, des propriétés thermo-hydrauliques de l'écoulement des gouttes lors du refroidissement du tube sont donc connues.

L'évolution temporelle de la température externe du tube permet d'estimer le flux de refroidissement dû à l'écoulement interne :

$$\varphi_{int}(z, t) = - \left( \frac{S_s}{2\pi R} \rho_p C_p (T_p) \frac{dT_p(z, t)}{dt} \right) - \left( \left( \frac{R+e}{R} \right) (\varphi_{pertes}(z, t)) \right) + \left( \frac{\rho_o I^2}{2\pi R S_s} \right)$$

Les pertes thermiques ( $\varphi_{pertes}$ ) sont dues à la conduction dans les brides de connexion, à la convection avec l'air ambiant et au rayonnement. Elles sont estimées par étalonnage.

### 3. Modélisation des transferts - Code NECTAR

#### 3.1. Description générale du modèle et des hypothèses

Le modèle développé tient compte des principaux paramètres de la thermo-hydraulique de l'écoulement et permet, par une approche simplifiée du comportement de l'écoulement de

vapeur et de gouttes dans la section d'essais lors de son refroidissement, d'estimer les transferts thermiques et massiques internes mis en jeu. En particulier, il est important pour nous d'estimer la part du refroidissement du tube ( $\Phi_{int}$ ) due à l'impact des gouttes sur la paroi ( $\Phi_{i,pg}$ ). Sur le schéma de la figure 3, nous avons représenté les principaux phénomènes mis en jeux lors du refroidissement de la section d'essais ; il est important de noter les différents couplages existants entre la paroi, la vapeur et les gouttes. Rappelons que les expériences issues de COLIBRI ne nous permettent pas directement d'estimer le flux due à l'impact des gouttes sur la paroi ( $\Phi_{i,pg}$ ).

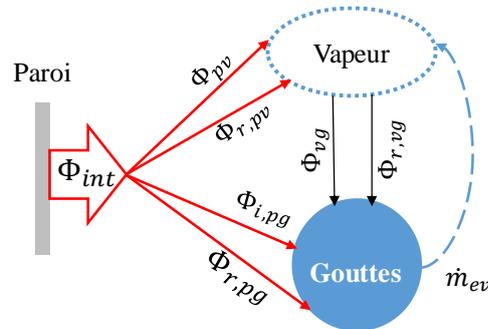


Figure 3. Mécanismes de transfert thermique pris en compte pour la modélisation mécaniste ( $r$  : rayonnement,  $pv$  : paroi/vapeur ;  $pg$  : paroi /goutte ;  $vg$  : vapeur/goutte)

La démarche de modélisation est décomposée en figure 4: le modèle utilise les résultats expérimentaux de l'expérience COLIBRI (température de paroi, diamètres des gouttes, débits massiques et températures de la vapeur et des gouttes) comme conditions initiales de simulation. Les résultats de simulation sont comparés aux résultats obtenus expérimentalement, notamment le flux thermique total ( $\Phi_{int}$ ) et la dynamique des gouttes en aval de la section d'essais lors du refroidissement.

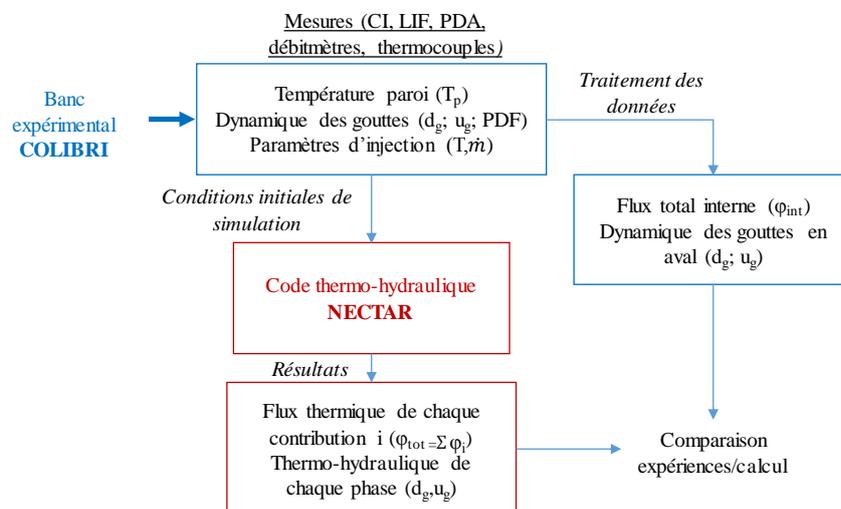


Figure 4. Démarche de modélisation : Couplage des données expérimentales avec NECTAR.

Les hypothèses suivantes sont utilisées :

- Modèle 1D axial à 2 fluides (vapeur et gouttes) en non-équilibre thermique et dynamique.
- Les gouttes sont sphériques et à température de saturation.
- La coalescence et la fragmentation de gouttes ne sont pas considérées même si on pourra en rencontrer expérimentalement dans certains cas.
- La paroi est considérée comme thermiquement « mince »

Le modèle s'appuie donc sur la résolution des équations de conservation pour chacune des phases : conservation de la masse, conservation de l'énergie, conservation de la quantité de

mouvement ; ces équations sont détaillées ci-dessous. De même, un système d'équations de transport de moments [5] est utilisé afin d'établir l'évolution longitudinale des propriétés volumiques de la phase dispersée (ie les gouttes) telles que la fraction volumique, la densité d'aire interfaciale et la densité de gouttes.

### 3.2. Equations de conservation

L'incrément en masse de vapeur est égal à la masse évaporée des gouttes:

$$\frac{dm_v}{dt} = \frac{dm_{EV}}{dt} \quad (1)$$

Les gouttes sont accélérées dans la conduite, principalement par l'effet combiné des forces de traînée et de pesanteur. Les forces de portance, de masse ajoutée et d'évaporation en proche paroi sont ici négligées. Ainsi, le bilan de quantité de mouvement pour une goutte isolée s'écrit de la façon suivante :

$$\rho_g u_g \frac{du_g}{dz} = -\frac{3}{4d_g} \frac{\nu C_d}{(1+B_T)} \rho_v (u_g - u_v) |u_g - u_v| + (\rho_v - \rho_g) g \quad (2)$$

Avec  $C_d$ , le coefficient de traînée pour une goutte isolée. La corrélation de Morsi [81] est utilisée pour estimer ce coefficient. Le coefficient de traînée est réduit par l'effet de l'évaporation des gouttes par le facteur  $1/(1+B_T)$  ( $B_T$  étant le « Blowing factor ») ; de même, le coefficient  $\vartheta$  prend en compte l'effet de l'influence de la concentration volumique dans le calcul de  $C_d$  :

$$\nu = \frac{1}{1 - 6.55\alpha_g} \quad (3)$$

Afin d'estimer l'évolution de la température de la vapeur, un bilan d'énergie est réalisé sur un élément différentiel de hauteur  $dz$  en prenant en compte les mécanismes de transfert thermique décrit en figure 3. Ainsi, la température de la vapeur à la sortie de l'élément analysé est donnée par :

$$T_v(z+dz) = \frac{[\phi_{pv} + \phi_{r,pv} - \phi_{vg} - \phi_{r,vg}] + \dot{m}_v(z) C_{p_v} T_v(z)}{\left( \dot{m}_v(z) + \frac{dm_v}{dt}(z) \right) C_{p_v}} \quad (4)$$

Les échanges vapeur/gouttes et paroi/gouttes contribuent à l'évaporation d'une partie de la masse des gouttes. Le flux d'évaporation des gouttes s'écrit donc :

$$\frac{dm_{EV}}{dt} = \frac{\phi_{vg} + \phi_{r,vg} + \phi_{r,pg} + \phi_{i,pg}}{h_{LV}} \quad (5)$$

### 3.3. Code NECTAR

Le domaine de modélisation comprend la partie de l'installation COLIBRI comprise entre les deux accès optiques en borosilicate. Les différentes veines d'essais (cf tableau 1) de COLIBRI peuvent être modélisées avec NECTAR. Le domaine correspondant est discrétisé axialement en  $N$  mailles fluides de hauteur  $dz$  ; les parties convergentes et divergentes sont discrétisées également par une méthode de disques. Une discrétisation de la paroi du tube est également faite, permettant d'associer une valeur de température de paroi à chaque volume fluide. Par ailleurs, les corrélations utilisées dans le modèle NECTAR sont présentées dans le tableau 2.

#### Conditions initiales de simulation :

- Température de paroi : La température de paroi, connue axialement à chaque pas de temps, est une condition limite dans la simulation.

- Débit massique de vapeur et de gouttes : La vitesse moyenne de la vapeur est estimée en connaissant le débit massique en entrée du domaine modélisé ; de même la vitesse des gouttes est déterminée grâce aux mesures de PDA.
- Fonction de distribution en taille des gouttes : Les mesures de PDA sont utilisées pour déduire la distribution polydisperse des gouttes imposées en entrée du modèle.
- La température de vapeur est mesurée et les gouttes sont considérées à saturation

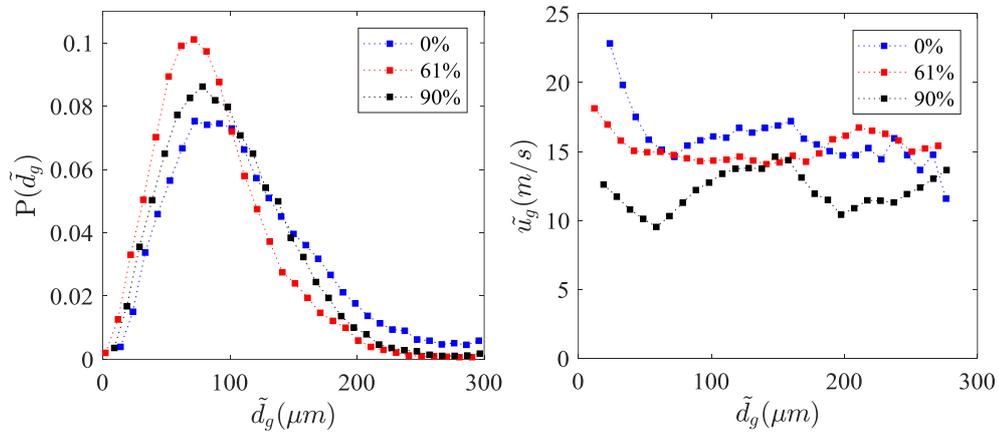


Figure 5. Distribution en diamètre et corrélation diamètre/vitesse de gouttes

## 4. Résultats

Des mesures ont été menées pour différentes configurations et conditions (cf tableau 1) mais dans cette partie, on s'intéressera uniquement aux configurations C1, C2 et C4 pour  $\dot{m}_v = 4,3 \text{ kg/h}$  ( $T_v = 170^\circ\text{C}$ ) et  $\dot{m}_g = 0,8 \text{ kg/h}$  ( $T_g = 100^\circ\text{C}$ ). La figure 5 montre les distributions en diamètres et la corrélation vitesse/diamètre des gouttes mesurées à l'entrée de la veine d'essais. Concernant ces distributions (pouvant être décrite par une loi log-normale), dans NECTAR, nous avons opté pour une approche qui consiste à les diviser en  $i$  classes de taille de dimension égale ; ensuite, pour chaque classe  $i$ , un diamètre de Sauter est calculé ( $d_{32i}$ ). Les différents mécanismes de transfert thermique, la fraction volumique ainsi que l'aire interfaciale sont ensuite calculées pour chaque classe de taille. De cette façon,  $N$  équations de quantité de mouvement sont résolues pour chaque diamètre associé à une classe de taille. Puis, pour une position axiale donnée, les transferts thermiques pour chaque mécanisme sont calculés comme la somme des transferts thermiques associés à chaque classe de taille.

### 4.1. Refroidissement par l'écoulement interne

Le flux de chaleur moyen dû à l'écoulement interne est moyenné arithmétiquement sur la longueur d'analyse et on calcule ensuite la puissance par unité de longueur qui permettra de comparer les expériences effectuées pour différentes longueurs de bouchage. La figure 6 montre que le refroidissement est plus intense dans la géométrie la plus bouchée mais il faut noter que, dans ces expériences, le débit de vapeur est conservé égal ; on doit garder à l'esprit que dans un assemblage réel, le débit de vapeur serait sans doute dévié vers des zones à moindre perte de charge. Cependant, le code NECTAR permet de décrire avec une bonne confiance les expériences COLIBRI (figure 6).

### 4.2. Analyse des transferts

Le code NECTAR permet de déterminer la part due à chaque contribution (figure 7). La convection avec la vapeur représente le mode de refroidissement majoritaire mais il est important de noter que le refroidissement par les impacts paroi/gouttes est du premier ordre.

Les autres modes de transferts sont eux beaucoup plus faiblement responsables du refroidissement.

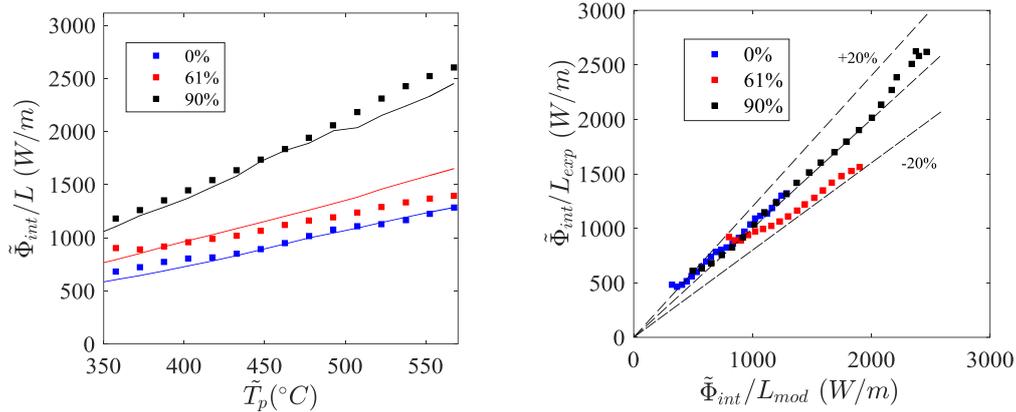


Figure 6. Comparaison expériences/calcul pour différents  $\tau$  (gauche) Courbe d'ébullition moyenne ( $\square$  : expériences ;  $\text{---}$  : modélisation), (droite) flux expérimental en fonction du flux prédit.

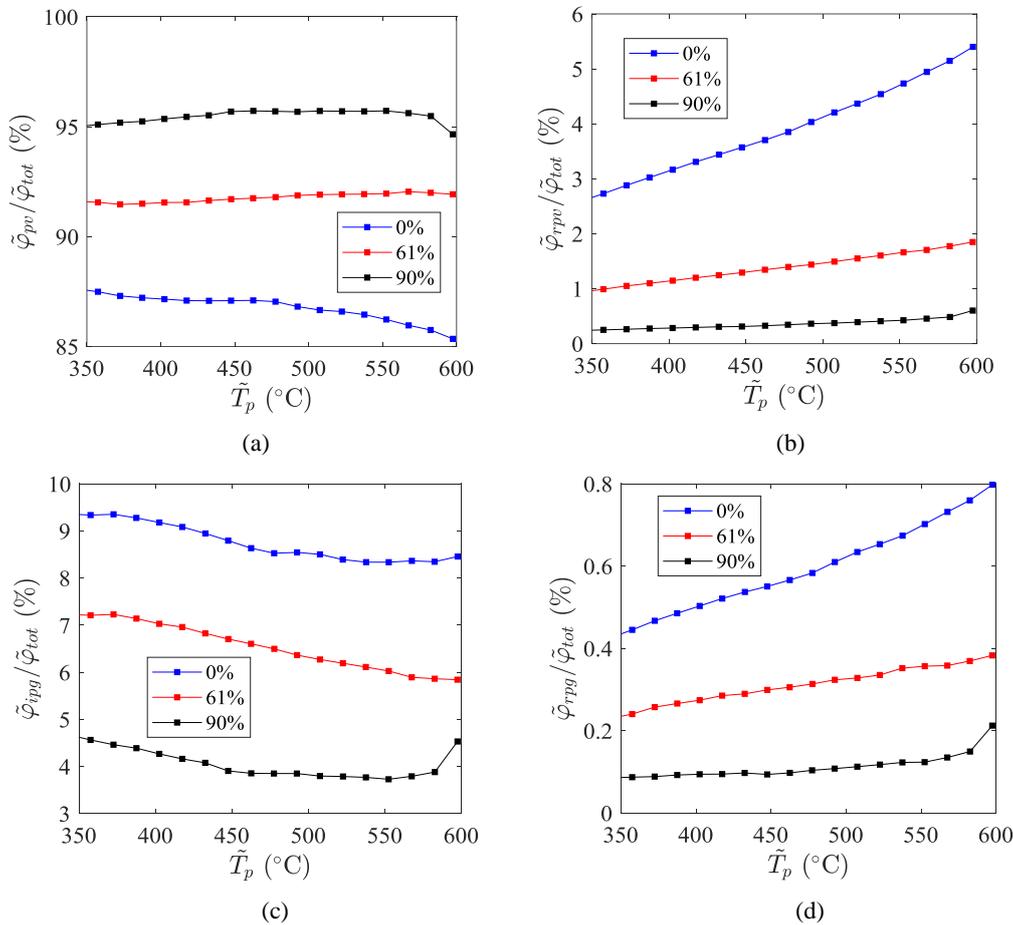


Figure 7. Contribution des mécanismes de transfert thermique lors du refroidissement pour les trois taux de bouchage: (a) Convection forcée paroi/vapeur, (b) Rayonnement paroi/vapeur, (c) Impacts paroi/gouttes, (d) rayonnement paroi/gouttes.

## 5. Conclusion

Un banc expérimental, à l'échelle d'un sous-canal représentatif d'un REP, a été conçu afin de caractériser les échanges thermiques dus à un écoulement de vapeur et de gouttes lors d'un APRP (i.e expérience COLIBRI). Les résultats des simulations ont été comparés à ceux obtenus expérimentalement. Les résultats du code NECTAR sont en adéquation avec les résultats

expérimentaux. Le code permet donc de prédire avec bonne confiance les flux thermiques extraits à la paroi (incertitude de  $\pm 20\%$  par rapport aux expériences). Le transfert thermique prédominant en régime de Leidenfrost est la convection forcée paroi/vapeur avec une contribution supérieure ou égale à 80% du flux total extrait. Le transfert thermique par impact paroi/gouttes est le deuxième mécanisme le plus important (En utilisant la corrélation de Gradeck et al. [6]), avec une contribution qui peut atteindre les 15% dans certains cas [4], ce qui n'est pas négligeable. L'étude se poursuit en intégrant un bypass à COLIBRI pour dériver une partie de l'écoulement de vapeur et se rapprocher ainsi un peu mieux du cas réel où les sous-canaux sont connectés.

Convection forcée paroi/vapeur	Gnielinski [6]
Convection forcée vapeur/gouttes	Lee et Ryley [7]
Rayonnement paroi/vapeur/gouttes	Sun [8]
Impacts paroi/gouttes	Gradeck[9] ; Hewitt [10] (dépôt de gouttes)

Tableau 2. *Corrélations des mécanismes de transfert thermique utilisées dans NECTAR.*

## Références

- [1] G. Repetto *et al.*, “the R & D Perfroi Project on Thermal Mechanical and Thermal Hydraulics Behaviors of a Fuel Rod Assembly During a Loss of Coolant Accident,” pp. 1–14.
- [2] C. Grandjean, “Coolability of blocked regions in a rod bundle after ballooning under LOCA conditions. Main findings from a review of past experimental programmes,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 237, no. 15–17 SPEC. ISS., pp. 1872–1886, 2007.
- [3] A. Labergue, T. Glantz, G. Repeto, M. Gradeck, Identification des transferts thermiques d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire, Congrès annuel de la SFT, Pau, 2018
- [4] J. Pena Carrillo, Etude expérimentale du transfert paroi-fluide dans le cas d'un écoulement vertical vapeur-gouttes dans une géométrie tubulaire, thèse Université de Lorraine, 2018
- [5] P. Ruyer, “Modélisation de la polydispersion en taille : Méthode des moments appliquée aux écoulements adiabatiques à bulles,” *Note Tech. IRSN*, 2008.
- [6] V. Gnielinski, “New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow,” *Int. Chem. Eng.*, vol. 16, pp. 359–368, 1976.
- [7] K. Lee and D. J. Ryley, “The Evaporation of Water Droplets in Superheated Steam,” *J. Heat Transfer*, vol. 90, no. 4, p. 445, Nov. 1968.
- [8] K. H. Sun, J. M. Gonzales-Santalo, and C. L. Tien, “Calculation of Combined Radiation and Convection Heat Transfer in Rod Bundles Under Emergency Cooling Conditions,” *J. Heat Transfer*, vol. 98, no. 3, pp. 414–420, 1976.
- [9] M. Gradeck, N. Seiler, P. Ruyer, and D. Maillet, “Heat transfer for Leidenfrost drops bouncing onto a hot surface,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 47, no. October 2016, pp. 14–25, 2013.
- [10] G. F. Hewitt and A. H. Govan, “Phenomenological modelling of non-equilibrium flows with phase change,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 33, no. 2, pp. 229–242, Feb. 1990.

## 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