



**HAL**  
open science

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

Juan David Peña Carrillo, Alexandre Labergue, Tony Glantz, Georges Repetto, Michel Gradeck

### ► To cite this version:

Juan David Peña Carrillo, Alexandre Labergue, Tony Glantz, Georges Repetto, Michel Gradeck. Identification des transferts thermiques d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire. Congrès français de thermique, May 2018, Pau, France. hal-03529820

**HAL Id: hal-03529820**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-03529820>**

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.

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

Juan David PENA CARRILLO<sup>1,2,3\*</sup>, Alexandre LABERGUE<sup>1,3</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 : [penacarr1@univ-lorraine.fr](mailto:penacarr1@univ-lorraine.fr))

**Résumé** - Ce papier concerne l'étude de la capacité de refroidissement des crayons combustibles d'un réacteur à eau pressurisée (REP) par un écoulement diphasique dispersé de vapeur et de gouttes lors d'un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP). Un banc expérimental représentatif a été conçu à l'échelle 1 d'un sous-canal fluide d'un REP, afin d'évaluer l'influence de la déformation des crayons combustibles sur le refroidissement dû à un écoulement vapeur/gouttes. Grâce aux mesures thermographie infrarouge, PDA et LIF3c, il est possible 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. Les résultats présentés dans ce document montrent l'influence du débit d'injection de gouttes pour une configuration représentative d'un sous-canal non déformé.

## Nomenclature

$A_c$	Section de passage, $m^2$	$\rho$	Masse volumique, $kg.m^{-3}$
$C_p$	Chaleur massique $J.kg^{-1}K^{-1}$	$\rho_o$	Résistivité, $\Omega.m$
$d, D$	Diamètre, $m$	<i>Indices et exposants</i>	
$I$	Intensité, $A$	$p$	Paroi
$q$	Flux de chaleur, $W.m^{-2}$	$g$	Goutte
$T$	température, $K$	$v$	Vapeur
$t$	Temps, $s$	Int	Interne
<i>Symboles grecs</i>		Ext	Externe

## 1. Introduction

L'un des accidents graves que peut subir un réacteur REP est l'APRP<sup>1</sup>. Un tel accident se produit lorsqu'il y a une rupture de la tuyauterie ou bien un problème d'étanchéité lié aux éléments du circuit primaire. Cela conduit à un assèchement de l'assemblage combustible dans la cuve du réacteur initialement à 155bars. De ce fait, une augmentation considérable de la température du combustible et des gaines se produit à l'intérieur de la cuve ; les gaines de combustible peuvent éventuellement se déformer et des zones dites ballonnées apparaître le long des assemblages. Afin de refroidir le cœur du réacteur, de l'eau borée est injectée dans la cuve, du bas des crayons combustibles vers le haut. C'est la phase dite de « renoyage ». Un écoulement de vapeur et de gouttes se forme donc au-delà du front de remouillage de l'eau qui monte à travers les assemblages ; ainsi, une partie importante des crayons est dans un premier temps refroidie par cet écoulement diphasique. La figure 1 montre 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.

---

<sup>1</sup> accident de perte de réfrigérant primaire

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), un banc expérimental a été développé. L'utilisation des techniques de métrologie thermique et fluide telles la Fluorescence Induite par Laser (LIF), l'Anémométrie Phase Doppler (PDA), et la thermographie infrarouge permettra d'avoir accès à des grandeurs thermo-hydrauliques caractéristiques (vitesse, température, en plus du diamètre pour les gouttes) et ainsi de mieux comprendre le refroidissement.

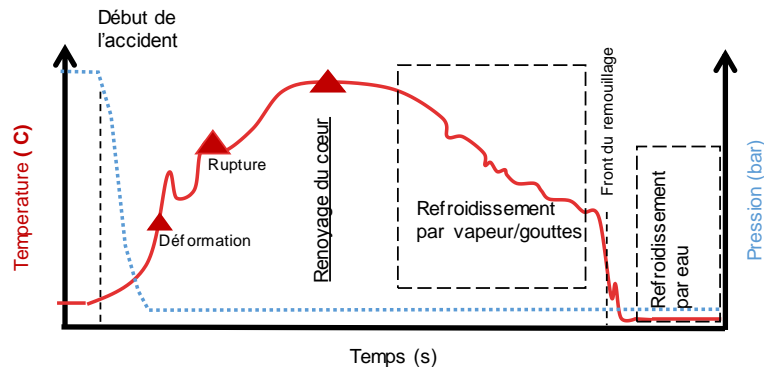


Figure 1. Schématisation des étapes d'un APRP à une position axiale donnée d'un crayon combustible

## 2. Installation expérimentale

La Figure 2 présente le schéma du banc expérimental COLIBRI<sup>2</sup>. 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.

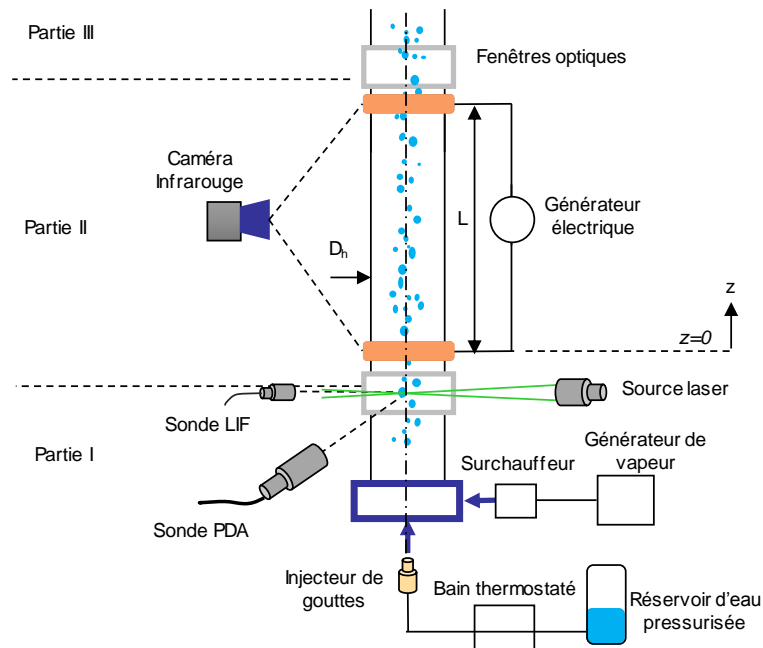


Figure 2. Schéma du banc expérimental COLIBRI

<sup>2</sup> COoLIing of Blockage Region Inside a PWR Reactor

La région tubulaire du banc expérimentale est composée de trois parties. Les parties I et III sont fixes et ont un diamètre de 11.78 mm, correspondant au diamètre hydraulique équivalent d'un sous-canal représentatif non déformé d'un REP. La partie II, étant amovible, permet de représenter un sous-canal partiellement déformé. Afin d'étudier différents taux de bouchage, la notion du diamètre hydraulique équivalent est adoptée dans la présente étude. Le tableau 1 présente les différentes configurations de la partie II du banc expérimental.

	<i>Config. 1</i>	<i>Config. 2</i>	<i>Config. 3</i>	<i>Config. 4</i>	<i>Config. 5</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

La partie II est chauffée par Effet Joule en utilisant un générateur électrique (TDK Lambda GEN 10-300). Cette partie est maintenue en position en utilisant deux brides en cuivre qui servent aussi à alimenter en courant le tube. Des fenêtres optiques en borosilicate sont placées en amont et en aval de cette partie afin d'effectuer de mesures optiques des caractéristiques des gouttes dans le tube (Vitesse, diamètre et température des gouttes).

L'écoulement diphasique est injecté en amont de la partie I. L'écoulement de vapeur est produit en utilisant un générateur de vapeur (AURA MA-6kW) permettant de produire de la vapeur à un débit massique maximale de 10 kg/h. En sortie du générateur, un surchauffeur (AURA s2000) permet d'augmenter la température de la vapeur jusqu'à 200°C. Le débit massique, la température, et la pression de la vapeur sont mesurés en utilisant respectivement un débitmètre à orifices Rosemount®, un thermocouple type-K, et un transmetteur de pression Keller®. Enfin, tout le réseau de vapeur est isolé afin de réduire les pertes thermiques.

L'écoulement de gouttes est produit à l'aide d'un injecteur de gouttes piézoélectrique (FMP technology) capable de produire un train de gouttes jusqu'à 500  $\mu\text{m}$  et un débit massique de 2 kg/h. Un bain thermostaté (LAUDA®) permet d'augmenter la température de l'eau avant l'injecteur jusqu'à 80°C. La taille de l'orifice de l'injecteur ainsi que la pression du réservoir peuvent être changées afin d'ajuster le débit massique de gouttes.

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 est mis en route afin de chauffer la partie II jusqu'à une température représentative d'un APRP. Une fois le régime quasi-stationnaire atteint, le générateur est coupé et les mesures simultanées de thermographie infrarouge, PDA et LIF démarrent afin d'obtenir l'évolution de la température externe du tube et les propriétés thermo-hydrauliques de l'écoulement des gouttes lors du refroidissement du tube. De plus, la température d'injection de vapeur, des gouttes, ainsi que le débit massique d'injection de la vapeur sont enregistrés.

### 3. Techniques de métrologie

#### 3.1. Thermographie infrarouge

La température externe du tube est mesurée en utilisant une caméra infrarouge (Cedip ® Jade III) avec une résolution spatiale de 320×240 pixels et équipée d'un filtre spectral [3.97-4.01]  $\mu\text{m}$ . Afin d'augmenter l'émissivité de la paroi et de garantir un état homogène de la surface, une couche de peinture noire résistant aux hautes températures est utilisée (Emissivité totale  $\epsilon=0.75$ , mesuré en utilisant une sphère Ulbricht). Pour corrélérer le signal de la caméra à

une valeur de température, une expérience de calibration est effectuée en utilisant un thermocouple soudé sur la surface du tube.

### 3.1.1. Mesure du flux thermique

En connaissant l'évolution temporelle de la température externe du tube, un modèle est utilisé afin d'estimer le flux thermique extrait par l'écoulement diphasique. Dans la présente étude le nombre de Biot radial du tube est suffisamment petit, ainsi il est possible de négliger la variation de la température dans l'épaisseur et considérer la température externe égale à celle de la face interne. Le modèle est réduit à deux variables en négligeant la variation de la température en fonction de l'angle  $T_p(\phi_1, z, t) = T_p(\phi_2, z, t) = T_p(z, t)$ . Le flux thermique est estimé de la façon suivante:

$$q_{\text{int}}(z, t) = \frac{1}{\pi D_{\text{int}}} \left[ \frac{\rho_{o,p} I^2}{A_{c,p}} - \rho_p A_{c,p} c_{p,p} \frac{dT_p(z, t)}{dt} \right] - \left( \frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{int}}} \right) [q_r(z, t) + q_c(z, t) + q_{\text{cond}}(z, t)] \quad (1)$$

Les deux premiers termes de l'équation 1 représentent respectivement l'énergie générée dans le tube par Effet Joule et l'énergie stockée dans le tube. Lors du refroidissement, le terme par Effet joule est nul puisque le générateur est éteint. Les trois derniers termes représentent respectivement les pertes thermiques par rayonnement, convection naturelle et conduction vers les brides. Les pertes radiatives sont estimées d'après la loi d'Stephan-Boltzmann, les pertes convectives sont estimées en utilisant des corrélations de convection naturelle autour d'un cylindre vertical. Les pertes par conduction sont estimées expérimentalement en effectuant une expérience de relaxation (i.e. refroidissement du tube sans écoulement interne).

### 3.2. Anémométrie par phase Doppler (PDA)

Un système PDA (Dantec-Dynamics ®) est utilisé pour la mesure de la distribution en vitesse et en diamètre des gouttes en amont et en aval la partie II du tube. Ce système est composé d'une sonde de réception optique avec une distance focale de 500 mm et un processeur BSA P80. Le volume de mesure est formé par l'intersection de deux faisceaux laser à une longueur d'onde de 514 nm. La distance focale de la sonde laser est de 1200 mm ; L'angle d'emplacement de la sonde de réception par rapport à l'axe de la sonde laser est de 60°.

### 3.3. Fluorescence Induite Laser (LIF3c)

La technique LIF repose sur la mesure de l'intensité de fluorescence d'un traceur fluorescent dilué dans le liquide. Dans la présente étude, le traceur utilisé est la sulforhodamine-B à une concentration de  $5 \times 10^{-6}$  mol/L. l'intensité de fluorescence collectée sur une bande spectrale  $i$ , s'exprime de la façon suivante :

$$I_{fi}(T) \approx K_{opt,i} K_{spec,i} V_c I C e^{\beta T} \quad (2)$$

Avec  $I$ , l'intensité d'excitation laser,  $C$  la concentration du traceur,  $V_c$  le volume de collection de la fluorescence et  $T$  la température du fluide.  $K_{opt}$  et  $K_{spec}$  sont des constantes dépendant de la chaîne optique et spectroscopique. Le paramètre  $\beta$  correspond à la sensibilité en température du traceur sur la bande spectrale  $i$ . Les paramètres  $I$ ,  $C$  et  $V_c$  sont difficiles à mesurer, de ce fait le signal de fluorescence est collecté sur deux bandes spectrales afin d'obtenir un rapport de fluorescence  $R_{12}$ . Enfin, une mesure du rapport de fluorescence à une température de référence,  $T_0$ , permet de normaliser les rapports de fluorescence et ainsi obtenir une expression dépendant seulement de la température du fluide. Dans le cas d'un écoulement poly-disperse (gouttes), l'effet de la taille de gouttes influence la valeur du rapport de fluorescence normalisé et doit être prise en compte [3]. Ainsi, la fonction  $g_{12}(d)$  est ajoutée :

$$\frac{R_{12}(T)}{R_{120}(T_0)} = e^{(\beta_1 - \beta_2)(T - T_0)} g_{12}(d) \quad (3)$$

L'intensité de fluorescence est collectée sur une troisième bande spectrale afin de calculer un deuxième rapport normalisé :

$$\frac{R_{32}(T)}{R_{320}(T_0)} = e^{(\beta_3 - \beta_2)(T - T_0)} g_{32}(d) \quad (4)$$

Les valeurs de sensibilité pour les bandes choisies, estimées suivant la procédure décrite par [4], sont  $\beta_1 - \beta_2 = 0.009$  et  $\beta_3 - \beta_2 = 0.0004$ . Afin d'obtenir une corrélation entre  $g_{12}$  et  $g_{32}$ , une mesure des rapports de fluorescence pour différentes tailles de goutte est effectuée en conditions isothermes [3] :

$$g_{12}(d) = \alpha(g_{32}(d))^2 + \eta g_{32}(d) + \gamma \quad (5)$$

$\alpha$ ,  $\eta$ , et  $\gamma$  sont estimées par ajustement des points expérimentaux suivant un polynôme d'ordre 2. Enfin, en utilisant les équations 3, 4 et 5, il est possible d'obtenir une expression dépendant uniquement de la température des gouttes :

$$\frac{I_{12}(T)}{I_{120}(T_0)} e^{(\beta_1 - \beta_2)(T_0 - T)} = \alpha \left( \frac{I_{32}(T)}{I_{320}(T_0)} e^{(\beta_3 - \beta_2)(T_0 - T)} \right)^2 + \eta \left( \frac{I_{32}(T)}{I_{320}(T_0)} e^{(\beta_3 - \beta_2)(T_0 - T)} \right) + \gamma \quad (6)$$

La fluorescence est induite par les faisceaux laser utilisés pour les mesures de PDA. Le signal collecté est filtré afin d'enlever la lumière diffuse par les gouttes à la longueur d'onde des faisceaux, puis acquis par trois photomultiplicateurs chacun correspondant à une bande spectrale donnée. Le rapport de fluorescence est ensuite calculé de la façon suivante :

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n I_{i,k} - N_i}{\sum_{k=1}^n I_{j,k} - N_k} \quad (7)$$

Avec  $I_{i,k}$  et  $I_{j,k}$  l'intégrale de l'intensité de fluorescence de la  $k$ ème goutte traversant le volume de mesure,  $n$  le nombre de gouttes pendant l'acquisition.  $N$  est le bruit lié à chaque canal de détection.

## 4. Résultats

Des mesures ont été menées pour 2 débits d'injection de gouttes pour une géométrie représentative non déformée (Configuration 1, tableau 1). Ainsi, un cas de référence sans gouttes a été mené. Le tableau 2 présente les conditions thermo-hydrauliques :

Débit d'injection de gouttes (kg/h)	Débit massique vapeur (kg/h)	Température de l'eau avant injecteur (°C)	Température de vapeur (°C)	Pression du système (bar)
1.35	5.8	80	180	1
0.75		70		

Tableau 2. Paramètres thermo-hydrauliques pour la présente étude

### 4.1. Flux thermique

La température du tube a été enregistrée lors du refroidissement. La figure 3 présente l'évolution temporelle pour deux positions axiales,  $z=10$  cm et  $z=15$  cm. Il est constaté que le refroidissement est plus rapide pour le débit d'injection le plus important. Quand le remouillage est atteint, la température de la paroi décroît plus rapidement avec le débit d'injection. En

utilisant l'évolution temporelle de la température à chaque position axiale, le flux thermique extrait par l'écoulement interne peut être estimé en utilisant l'équation (1).

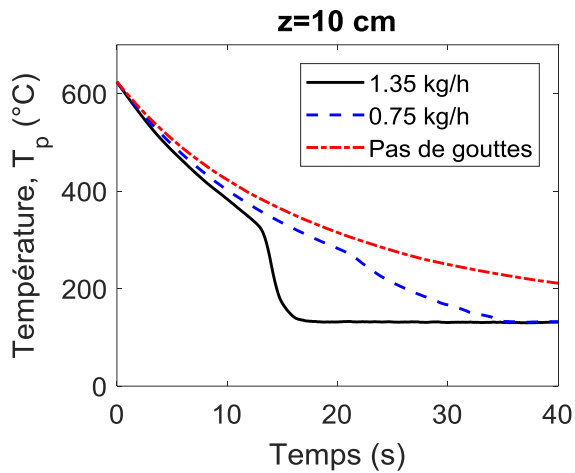


Figure 3. Evolution temporelle de la température du tube à  $z=10$  cm

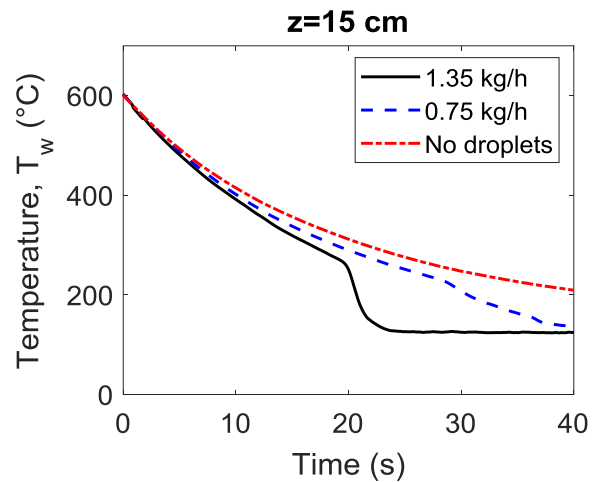


Figure 4. Evolution temporelle de la température du tube à  $z=15$  cm

Les figures 5 et 6 présentent le cartogramme spatio-temporelle du flux thermique extrait par l'écoulement diphasique en fonction de la position axiale et le temps. On remarque que le flux thermique est non uniforme. Au début du refroidissement, le front de remouillage est localisé à une distance de  $z=2$  cm et  $z=5$  cm. Le front se déplace vers le haut du tube et atteint la partie finale du tube à  $t=25$  s et  $t=30$  s respectivement. Le front limite les régimes d'ébullition dans la conduite. L'ébullition en film a lieu en aval du front. Quand le front atteint la paroi et jusqu'à la fin du refroidissement, le flux thermique est extrait principalement en régime d'ébullition nucléée. Les valeurs maximales du flux thermique sont de  $2.5 \times 10^5$  et  $3.5 \times 10^5$   $W/m^2$  pour un débit d'injection de 0.75 et 1.35 kg/h respectivement.

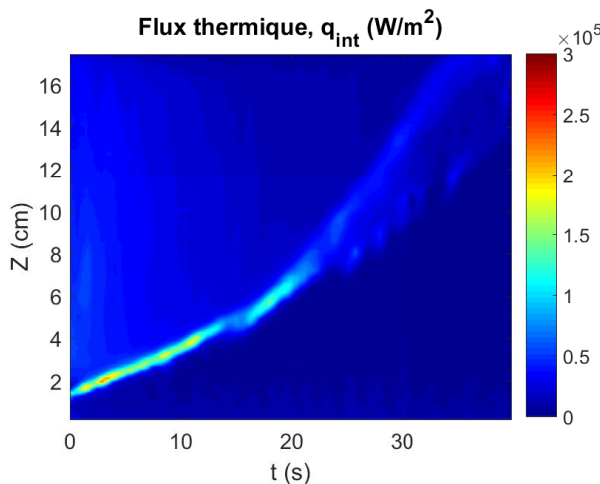


Figure 5. Cartogramme de flux thermique pour un débit d'injection de gouttes de 0.75 kg/h

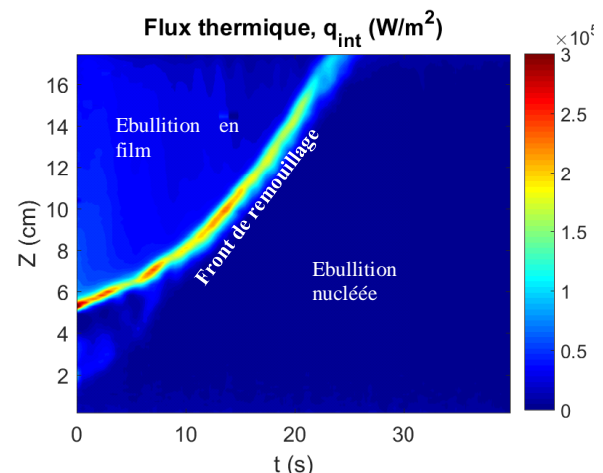


Figure 6. Cartogramme de flux thermique pour un débit d'injection de gouttes de 1.35 kg/h

Afin de comparer la capacité de refroidissement des trois expériences, les courbes d'ébullition moyennes sont tracées : Le flux thermique est calculé comme la moyenne de chaque série de points ayant la même température. Les résultats de la figure 7 indiquent que le flux thermique augmente avec le débit d'injection de gouttes. En comparaison au cas sans gouttes, les transferts thermiques sont plus performants pour le cas d'une injection vapeur/gouttes. De même, le flux thermique décroît avec la température de paroi en régime d'ébullition en film.

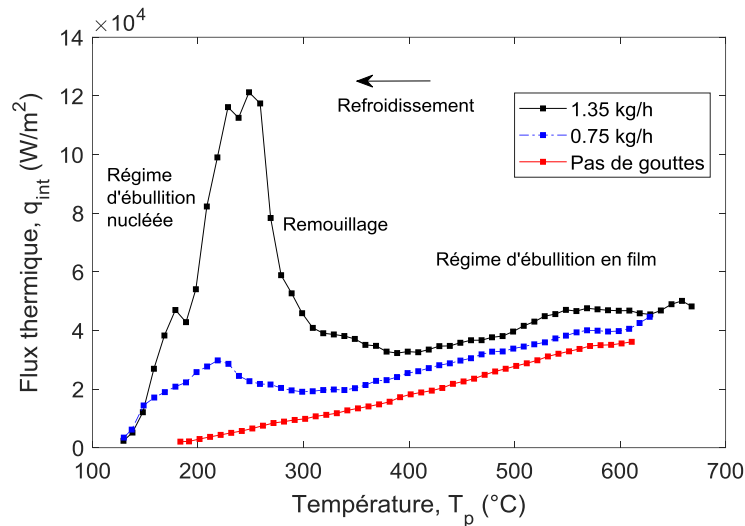


Figure 7. Courbes d'ébullition moyennes.

#### 4.2. Mesures PDA

Les mesures PDA ont été réalisées lors du refroidissement du tube en amont et en aval de la partie chauffée (volume de mesure situé sur l'axe central). La figure 8 présente la distribution en taille de gouttes pour un débit d'injection de 1.35 kg/h ainsi que les courbes ajustées aux expériences en utilisant une régression de type log-normale. La vapeur s'accélère et devient turbulente le long du tube. Dans ces conditions, des phénomènes de fragmentation peuvent avoir lieu dus aux instabilités hydrodynamiques et aux éventuelles collisions paroi/gouttes ; de même, au cas où les gouttes atteignent la température de saturation, elles commencent à s'évaporer et donc une diminution du diamètre aura lieu. Ces conditions conduisent à un déplacement de la courbe de distribution de gouttes vers la gauche en aval. La figure 9 présente les courbes de la vitesse en fonction du diamètre de gouttes. Il est possible de constater que les gouttes s'accélèrent le long du tube. Pour des deux cas, la vitesse décroît avec le diamètre de gouttes ; ainsi, les gouttes ayant un petit diamètre suivent plus facilement l'écoulement continu de vapeur.

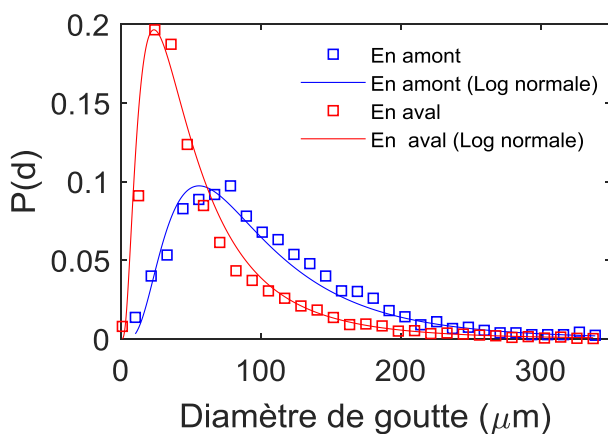


Figure 8. Distribution en taille de gouttes en amont et en aval de la partie chauffée. 1.35 kg/h

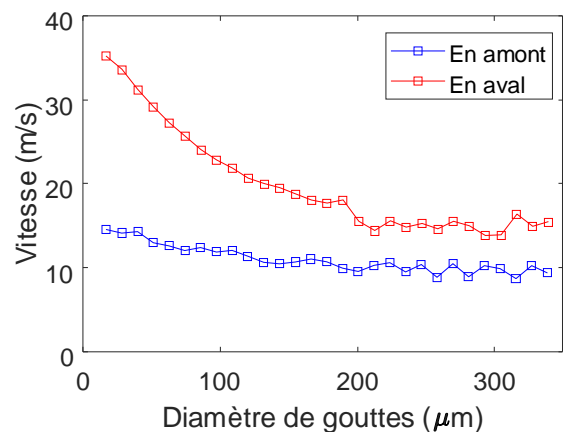


Figure 9. Corrélation vitesse/taille en amont et en aval de la partie chauffée. 1.35 kg/h



### 4.3. Mesures LIF

Dans la présente étude, la courte durée du refroidissement ne permet pas d'acquérir un nombre important de gouttes. C'est pour cela que la mesure a été divisée en deux phases en aval du tube : une première mesure est effectuée en maintenant le chauffage du tube ; une deuxième mesure est effectuée sans chauffage et à la fin du refroidissement du tube. En amont du tube, une seule mesure est faite maintenant le chauffage. Le nombre de gouttes acquises pour chaque expérience est d'environ 500, ce qui permet une convergence statistique. Le tableau 4 présente les valeurs de température de gouttes en utilisant l'équation 7. La température des gouttes est proche de la saturation pour tous les cas en aval du tube. Dans les deux cas, un échauffement des gouttes est mis en évidence. Il semble que l'échauffement des gouttes soit plus important pour des petits débits d'injection.

Débit d'injection de gouttes (kg/h)	Température (°C)			Echauffement (°C)	
	En amont	En aval			
		Avec chauffage	Sans chauffage		
1.35	92.1	97	94	4.9	1.9
0.75	88.7	100.5	96.9	11.8	8.2

Tableau 3. Température moyenne des gouttes en amont et en aval de la partie chauffée.

## 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 dues à un écoulement de vapeur et de gouttes lors d'un APRP (i.e expérience COLIBRI). L'utilisation des techniques optiques (TIR, PDA, LIF3c) a permis de caractériser la phase de refroidissement et donc avoir accès à des grandeurs thermo-hydrauliques d'intérêt pour un sous-canal représentatif non déformé. Le travail futur portera sur l'étude d'autres géométries (C2 à C5, tableau 1) afin d'évaluer l'influence du bouchage lors du refroidissement. Une comparaison du refroidissement expérimental avec le code NECTAR<sup>3</sup> développé au LEMTA (code mécaniste permettant la simulation du refroidissement d'un tube par un écoulement dispersé vapeur/gouttes) permettra aussi une analyse plus fine des transferts.

## 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, V. Deprédurand, A. Delconte, G. Castanet, and F. Lemoine, "New insight into two-color LIF thermometry applied to temperature measurements of droplets," *Exp. Fluids*, vol. 49, pp. 547–556, 2010.
- [4] V. Deprédurand, P. Miron, A. Labergue, M. Wolff, G. Castanet, and F. Lemoine, "A temperature-sensitive tracer suitable for two-colour laser-induced fluorescence thermometry applied to evaporating fuel droplets," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 10, 2008.

## 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

<sup>3</sup> New Experimental Code for heat Transfer Analysis inside Rod bundle