

Etude thermo-hydraulique d'un écoulement vertical vapeur/gouttes dans une géométrie tubulaire

Juan-David PEÑA CARRILLO^{1,2,3*}, Michel GRADECK^{2,3}, Alexandre LABERGUE^{2,3}
Tony GLANTZ¹, Georges REPETTO¹

¹Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) Cadarache, 13115, BP3, Saint Paul lez Durance, France

²LEMETA, UMR 7563, Université de Lorraine, Vandœuvre-Lès-Nancy, 54518, France

³LEMETA, UMR 7563, CNRS, Vandœuvre-Lès-Nancy, 54518, France

*(auteur correspondant : penacarr1@univ-lorraine.fr)

Résumé - Une expérience représentative a été conçue afin d'évaluer à terme la capacité de refroidissement d'un sous-canal partiellement bouché par un écoulement de vapeur et gouttes dans le cadre d'un APRP. Trois techniques de métrologie optique et thermique (PDA, LIF-3c et thermographie infrarouge) seront utilisées afin d'estimer les échanges paroi/fluide. En parallèle, une modélisation thermo-hydraulique de l'expérience est développée afin d'obtenir une approche théorique du problème et évaluer les différentes contributions thermiques.

Nomenclature

A	Surface, m ²	u	Vitesse, m.s ⁻¹
B _T	Nombre de Spalding thermique (-)	V	volume, m ³
C _D	Coefficient de traînée (-)	<i>Symboles grecs</i>	
C _p	Chaleur spécifique J.kg ⁻¹ K ⁻¹	λ	Conductivité thermique, W.m ⁻¹ .K ⁻¹
d _g	Diamètre de goutte, m	ρ	Masse volumique, kg.m ⁻³
D _h	Diamètre hydraulique, m	μ	Viscosité dynamique, Pa.s
f _f	Facteur de frottement, (-)	α	Fraction volumique (-)
g	Accélération gravitationnelle m.s ⁻²	ν	Viscosité cinématique, m ² s ⁻¹
h	Coefficient thermique W.m ⁻² .K ⁻¹	<i>Indices et exposants</i>	
L _v	Chaleur latente de vaporisation, J.kg ⁻¹	p	Paroi
\dot{m}	Débit massique, kg.s ⁻¹	g	Goutte
\dot{m}_{dep}	Flux de migration de gouttes, kg.m ⁻² s ⁻¹	v	Vapeur
N _g	Nombre de gouttes (-)	sat	Saturation
Pr	Nombre de Prandtl, (-)	ev	Evaporation
P _c	Puissance de chauffage, W	r	radial
P	Pression, bar	b	bouchage
q	Flux de chaleur, W.m ⁻²	o	Initial, à l'entrée
Q	Chaleur, W		
Re	Nombre de Reynolds, (-)		
S	Ratio de vitesse (-)		
T	température, K		
t	Temps, s		

1. Introduction

L'un des accidents graves que peut subir un réacteur type REP (Réacteur à eau pressurisée) est l'APRP (Accident de perte de réfrigérant primaire) ; cet accident est l'objet d'un vaste projet de recherche au sein l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), dans le cadre du projet ANR-PERFROI. Un tel accident se produit lorsqu'il y a une fuite au circuit primaire en raison d'une rupture de la tuyauterie (APRP- grosse brèche) ou lors d'un problème d'étanchéité lié aux éléments secondaires du circuit primaire (APRP-petite brèche). Cela

entraîne une dépressurisation suivie d'une évaporation de l'eau du circuit primaire conduisant fatalement à un assèchement de l'assemblage combustible dans la cuve du réacteur. La puissance résiduelle n'étant plus évacuée, une augmentation considérable de la température des barres de combustible se produit à l'intérieur de la cuve. De ce fait, les gaines de combustible peuvent éventuellement se déformer et des zones dites ballonnées apparaissent le long des assemblages (Figure 1).

Pendant la phase de renoyage, de l'eau froide est injectée afin de garantir l'état du cœur du réacteur. Trois zones, en fonction du type d'écoulement, apparaissent le long des barres combustibles : une *zone du front de trempe* correspondant à la zone majoritairement d'eau liquide où les premiers mécanismes d'ébullition sont observés ; une *zone de vapeur chargée en gouttes* caractérisée par la formation d'un écoulement diphasique de vapeur surchauffée et de gouttes proches de la saturation. Enfin, une *zone de vapeur dite monophasique surchauffée*.

Le refroidissement des assemblages en phase de renoyage est un phénomène thermo-hydraulique complexe qui dépend notamment du type d'écoulement et de la géométrie du bouchage produite par le ballonnement des gaines combustible (longueur et section de ballonnement).

Un dispositif expérimental a été conçu afin d'évaluer la capacité de refroidissement d'une zone partiellement ballonnée par un écoulement de vapeur chargé en gouttes dans un scénario accidentel . Pour caractériser les échanges thermiques paroi/fluide ainsi que la dynamique des gouttes, trois diagnostics optiques et thermique sont combinés: l'Anémométrie Phase Doppler (PDA) pour mesurer le diamètre et la vitesse des gouttes, la Fluorescence Induite par Laser (LIF) pour mesurer la température des gouttes et la Thermographie Infrarouge afin d'estimer le flux de chaleur extrait par l'écoulement diphasique.

L'objectif principal du présent travail est de développer un modèle numérique unidirectionnel et transitoire pour obtenir une première approche théorique du refroidissement du tube et d'analyser les phénomènes mis en jeu. Le système d'équations décrivant la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie permettra d'estimer l'impact respectif des différents mécanismes de transferts thermiques mis en jeu (convection forcée, rayonnement et impact de gouttes en régime de Leidenfrost) ainsi que l'évolution spatio-temporelle des paramètres thermo-hydrauliques dans le tube. A terme, il s'agira d'évaluer expérimentalement la contribution de chaque terme en effectuant des bilans de masse et de chaleur.

2. Dispositif expérimental

La veine expérimentale mise en place au LEMTA, a la forme d'un tube vertical en inconel-625 (matériau choisi en fonction de sa faible oxydabilité à hautes températures). Afin de reproduire la géométrie des zones ballonnées, une configuration type Venturi a été retenue : un diamètre interne du tube en amont et en aval de 11.78 mm, équivalent au diamètre hydraulique d'une zone représentative non déformée. La zone contractée du tube aura un diamètre et une longueur caractéristiques du bouchage des gaines déformées dans un APRP. Cinq configurations de bouchage seront étudiées (*Tableau 1*).

2.1. Procédure expérimentale

La partie contractée du tube et les zones amont et aval sont chauffées jusqu'à 800°C par effet Joule grâce à un générateur électrique (TDK Lambda Genesys2U séries GEN 10-330), la température est contrôlée en temps réel à l'aide d'une caméra infrarouge. Ensuite, l'écoulement vapeur/gouttes est injecté en amont du tube en utilisant un injecteur conique spécifiquement conçu. L'écoulement de vapeur est produit par un générateur de vapeur (AURA MA-6 kW®)

pouvant produire de la vapeur à une température maximale de 180°C et un débit massique maximal de 8 kg.h⁻¹. En sortie du générateur de vapeur, un surchauffeur est installé pour augmenter la température de la vapeur jusqu'à environ 300°C (AURA S2000 – 2 kW®). Les gouttes (phase dispersée) sont produites par un injecteur piézo-électrique (FMP Technology®) pouvant générer des gouttes mono-dispersées à une fréquence de 5-40kHz correspondant à des diamètres compris entre 50 µm et 400 µm.

	Config. n°1	Config. n°2	Config. n°3	Config. n°4	Config. n°5
Taux de bouchage	0%	61%	61%	90%	90%
Diamètre (D _h)	11,78 mm	7,35 mm	7,35 mm	3,72 mm	3,72 mm
Longueur bouchée (L _b)	-	100 mm	300 mm	100 mm	300 mm
Epaisseur du tube	0,57 mm	0,86 mm	0,86 mm	1,38 mm	1,38 mm

Tableau 1. Configurations géométriques retenues dans la présente étude

Une caméra infrarouge matricielle d'une résolution de 320x240 pixels (Cedip Jade III®) permet de mesurer le champ de température axial à l'extérieur du tube et d'en déduire le transfert thermique entre la paroi et l'écoulement interne.

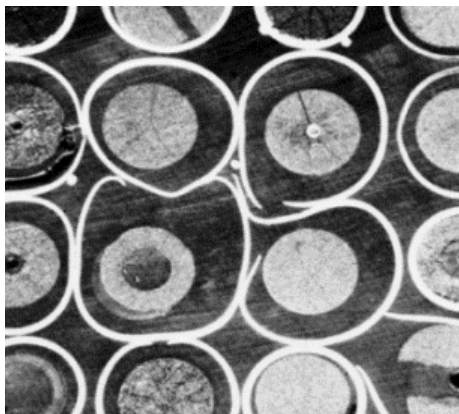


Figure 1. Déformation des gaines lors d'un APRP (coupe radiale [1])

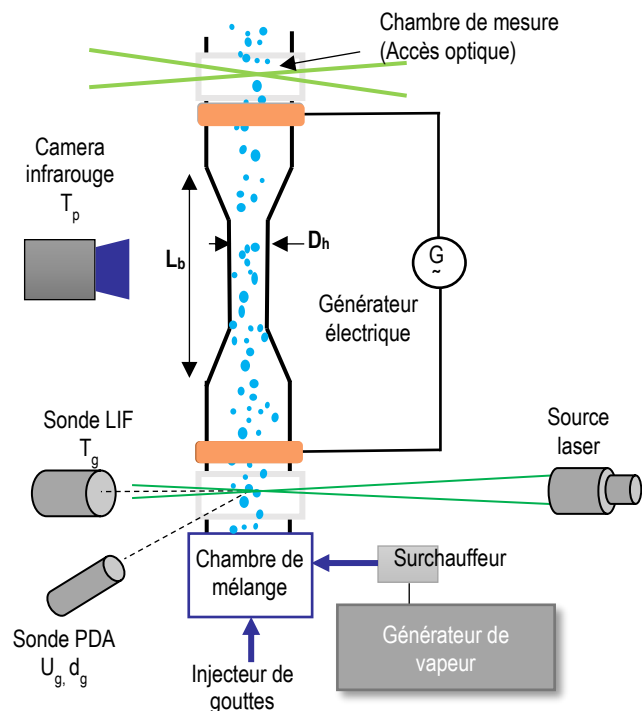


Figure 2. Schéma du montage du tube avec les techniques de métrologie thermique et fluide

En amont du tube, des mesures des caractéristiques des gouttes sont effectuées : Un système PDA (Dantec Dynamic®) est utilisé pour avoir accès à la taille des gouttes ainsi qu'à leur vitesse axiale (axe Z). Le principe repose sur la mesure de la fréquence de la lumière réfractée par les gouttes qui traversent le volume éclairé (formé par l'intersection de deux faisceaux lasers issus d'une source laser à argon, $\lambda=514,5$ nm) ; cela est possible grâce aux accès optiques spécialement conçus. En utilisant la technique LIF, il est possible de déterminer la température des gouttes en fonction de l'intensité d'émission spontanée du traceur fluorescent dilué dans de l'eau (sulforhodamine-B). La fluorescence est activée en utilisant la même source laser que

celle utilisée par le PDA. La température de la vapeur est également mesurée en amont et en aval du tube via des thermocouples isolés.

Le phénomène transitoire du refroidissement du tube est analysé en effectuant des mesures couplées de LIF, PDA et thermographie infrarouge [2] (Figure 2).

3. Modélisation du problème

L'étude suivante permettra d'avoir une première approche théorique du comportement thermo-hydraulique et transitoire du refroidissement du tube en Inconel par l'écoulement diphasique. On considère un écoulement dispersé ; la vapeur surchauffée étant la phase continue et les gouttes sous-refroidies, la phase discrète.

3.1. Transferts thermiques

L'ensemble des phénomènes est schématisé sur la *Figure 3*.

Convection forcée interne paroi/vapeur (q_1) : Le flux thermique extrait à la paroi par la vapeur peut être exprimé de la façon suivante :

$$q_1 = h_1(T_p - T_v) \quad (1)$$

Pour la présente étude, la corrélation de Gnielinski modifiée [3] est utilisée afin d'estimer le coefficient d'échange h_1 ($Re_v = D_h u_v / \nu_v$, propriétés calculées à T_v) :

$$h_1 = \frac{\lambda_v}{D_h} \left(\frac{\left(\frac{f_f}{8}\right)(Re_v - 1000)Pr}{1 + 12,7\left(\frac{f_f}{8}\right)^{0,5} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \left(\frac{T_v}{T_p}\right)^{0,45} \right) \quad (2)$$

Convection interfaciale vapeur/gouttes (q_2) : Le flux thermique entre la vapeur et les gouttes peut être exprimé de la façon suivante :

$$q_2 = h_2(T_v - T_p) \quad (3)$$

Le coefficient d'échange h_2 est déterminé en utilisant la corrélation de Yuen [4] ($Re_g = \rho_v d_g |u_v - u_{gl}| / \mu_v$, propriétés estimées à T_{film} sauf pour la masse volumique, calculée à T_v) :

$$h_2 = \frac{\lambda_v}{d_g} \left(\frac{2 + 0,6 Re_g^{0,5} Pr^{1/3}}{1 + B_T} \right) \quad (4)$$

Rayonnement paroi/fluide et fluide/fluide (q_3, q_4 et q_5) : Dans la présente étude, la méthode de Sun [5] est utilisée avec une émissivité du tube égale à 0.5

Impacts paroi/goutte (q_6) : Le model proposé par Guo [6] permet d'évaluer le flux thermique dû à l'impact d'une population de gouttes et une paroi chaude en régime de Leidenfrost :

$$q_6 = (T_p - T_{sat}) \left(\frac{18 \lambda_v^3 t_s^3 \rho_v L_v m_{dep}^5}{d_g^5 \rho_g^4 \mu_v \alpha_g (T_p - T_{sat})} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

Avec t_s , le temps de séjour d'une goutte sur la paroi, et \dot{m}_{dep} le flux massique de déposition de gouttes migrant vers la paroi:

$$t_r = \pi \sqrt{\frac{\rho_a d_d^3}{8\gamma}} \quad (6)$$

$$q_6 = \frac{\mu_g}{D_h} 0,022 \left(\frac{\dot{m}_g D_h}{\mu_g} \right)^{0,74} \left(\frac{\mu_g}{\mu_g} \right)^{0,26} \quad (7)$$

3.2. Equations de conservation

Conservation de la quantité de mouvement des gouttes : Les gouttes accélèrent axialement dû à l'effet de la force de traînée produite par la vitesse relative entre les deux phases

$$\rho_g u_g \frac{du_g}{dz} = -\frac{3}{4d_g} \frac{C_d}{(1+B_T)} \rho_v (u_g - u_v) |(u_g - u_v)| + (\rho_v - \rho_g)g \quad (7)$$

Avec C_d le coefficient de traînée, calculé en fonction du nombre de Reynolds de la goutte à partir de la corrélation de Morsi [7]

Conservation de la masse gouttes/vapeur : Les gouttes s'évaporent en raison des transferts thermiques avec la paroi et la vapeur:

$$\dot{m}_{ev} = \frac{(Q_2+Q_3+Q_5+Q_6)}{L_v^*} \quad \text{avec } L_v^* = L_v + C_{p,v}(T_v - T_g) \quad (8)$$

Cela contribue à la réduction du diamètre des gouttes à l'intérieur du tube :

$$\frac{d(d_g)}{dz} = -\left(\frac{2}{\rho_g \pi d_g^2 N_g}\right) \frac{1}{u_g} \frac{dm_{ev}}{dt} \quad (9)$$

Conservation de l'énergie de la vapeur : Un bilan d'enthalpie permet de calculer l'évolution de la température de la vapeur le long du tube en fonctions des transferts thermiques internes:

$$T_v(z + dz) = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_v + \dot{m}_{ev}} T_v(z) + \frac{1}{(\dot{m}_v + \dot{m}_{ev}) \cdot C_{p,v}} [(Q_1 + Q_4) - (Q_2 - Q_5)] \quad (11)$$

Conservation d'énergie paroi : Un bilan d'énergie permet d'estimer l'évolution temporelle de la température de la paroi (Figure 4). En raison à la faible épaisseur du mur (Nombre de Biot < 1), la conduction radiale n'est pas prise en compte. De même, la conduction axiale le long du tube est négligée. En prenant en compte les échanges internes paroi/fluide ainsi que les pertes externes par rayonnement et convection naturelle, Q_{p1} et Q_{p2} respectivement, on obtient :

$$\frac{dT_p}{dt} = \frac{1}{m_p C_{p,p}} (P_c - (Q_1 + Q_3 + Q_4 + Q_6) - (Q_{p1} + Q_{p2})) \quad (12)$$

Fraction volumique (α_g): Rapport entre le volume occupé par les gouttes et le volume total:

$$\alpha_g = \frac{V_g}{V_v + V_g} = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{1-x}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_v}\right) \left(\frac{1}{S}\right)} \quad \text{avec } x = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_v + \dot{m}_g} \quad \text{et } S = \frac{u_v}{u_g} \quad (10)$$

4. Application du modèle

Le système d'équations précédent est résolu avec les considérations suivantes :

- Ecoulement de gouttes injectées à T_{sat}
- Diamètre des gouttes homogène (Ecoulement mono-disperse)
- Distribution homogène de vitesse et température des phases
- Pas de coalescence et de fragmentation de gouttes (Faible fraction volumique)
- Propriétés thermo-physiques de l'Inconel-625 constantes
- Propriétés de la vapeur d'eau thermo-dépendantes.
- Pas de détachement de la vapeur d'eau dans la partie divergente du tube.
- Les fluctuations turbulentes ne sont pas prises en compte

Afin d'analyser l'évolution axiale des propriétés de l'écoulement diphasique pour chaque taux de bouchage, une première simulation est faite pour les suivantes conditions thermo-hydrauliques (voir Tableau 2 et Figure 5):

u_{vo} (m/s)	u_{go} (m/s)	f (Hz)	D_{go} (μm)	T_{vo} ($^{\circ}\text{C}$)	L_b (m)	L_{totale} (m)	Θ ($^{\circ}$)	$T_{p,ini}$ ($^{\circ}\text{C}$)	P (bar_a)
12	10	10000	400	250	0.30	0.46	6	800	2

Tableau 2. Conditions géométriques et initiales de simulation

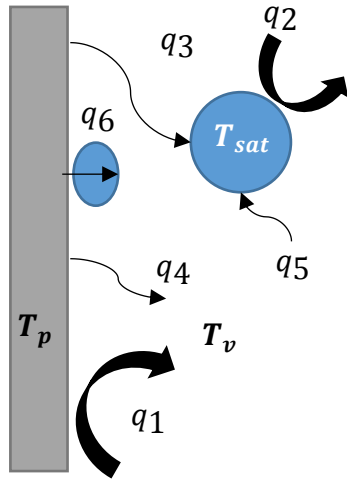


Figure 3. Synthèse des transferts thermiques internes

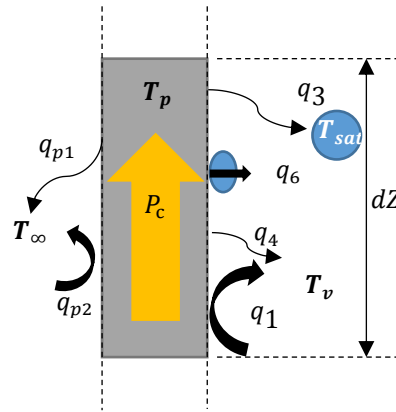


Figure 4. Synthèse des transferts thermiques de paroi

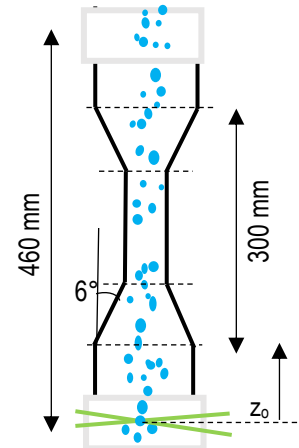


Figure 5. Géométrie

D'après la Figure 6, on constate une augmentation de la température de la vapeur à l'intérieur du tube (a). Cet effet est plus significatif pour des taux de bouchage élevés, dû à l'accélération de la vapeur qui produit une augmentation du coefficient d'échange convective paroi/vapeur h_1 . L'évolution de la fraction volumique (b) pour un tube sans bouchage décroît de quelques pourcents axialement, par contre il est mis en évidence une augmentation dans la partie bouchée pour les deux cas de bouchage analysés ; une forte diminution de la fraction volumique en sortie de la contraction est remarquée. Cela peut s'expliquer par l'évolution du ratio de vitesse, S : Pour les conditions d'injection de gouttes de la présente simulation, le nombre de Stokes est supérieur à 1 et, pour cette raison, les gouttes ne vont pas suivre instantanément l'écoulement de vapeur. En conséquence, à l'entrée de la partie bouchée la vitesse de la vapeur est beaucoup plus grande que celle des gouttes et un pic de la fraction volumique est atteint. Plus la vitesse de gouttes augmente (c), plus la fraction volumique décroît. Le phénomène inverse apparaît en sortie de la section bouchée, dans ce cas le ratio de vitesse S reste faible et ceci explique la chute de la fraction volumique. Bien entendu, l'effet combiné de l'évolution de la masse volumique de la vapeur et l'évaporation de gouttes d'eau joue un rôle sur la fraction volumique, cela explique la diminution dans un tube sans bouchage (cf. équation 10). En raison des échanges thermiques, les gouttes vont s'évaporer à l'intérieur du tube et par conséquence, une diminution du diamètre est mise en évidence (d)

La Figure 7 présente les différentes contributions thermiques à l'intérieur du tube pour les conditions initiales de simulation de paroi ($T_{p(t=0)}=800^{\circ}\text{C}$): la contribution thermique la plus importante le long du tube est due à la convection forcée entre la paroi et la vapeur (q_1) (75% et 85% du transfert total paroi/fluide pour un bouchage de 0% et 61% respectivement). Les transferts thermiques par rayonnement entre la paroi et la vapeur (q_4) restent importants, notamment pour les tronçons sans bouchage (De l'ordre du 20% du transfert total paroi/fluide). Ainsi, il est important de remarquer que les transferts thermiques interfaciaux par convection et par rayonnement entre la vapeur et les gouttes (q_2 et q_5), pilotent le phénomène d'évaporation à l'intérieur du tube et sont plus importants dans la zone bouchée en raison à une augmentation

de la fraction volumique de gouttes et de la vitesse relative entre les deux phases. Les transferts thermiques par rayonnement entre la paroi et les gouttes (q_3) ainsi que les transferts thermiques par impacts entre la paroi et les gouttes (q_6) contribuent très peu dans la présente étude mais peuvent jouer un rôle important pour des fractions volumiques plus élevées.

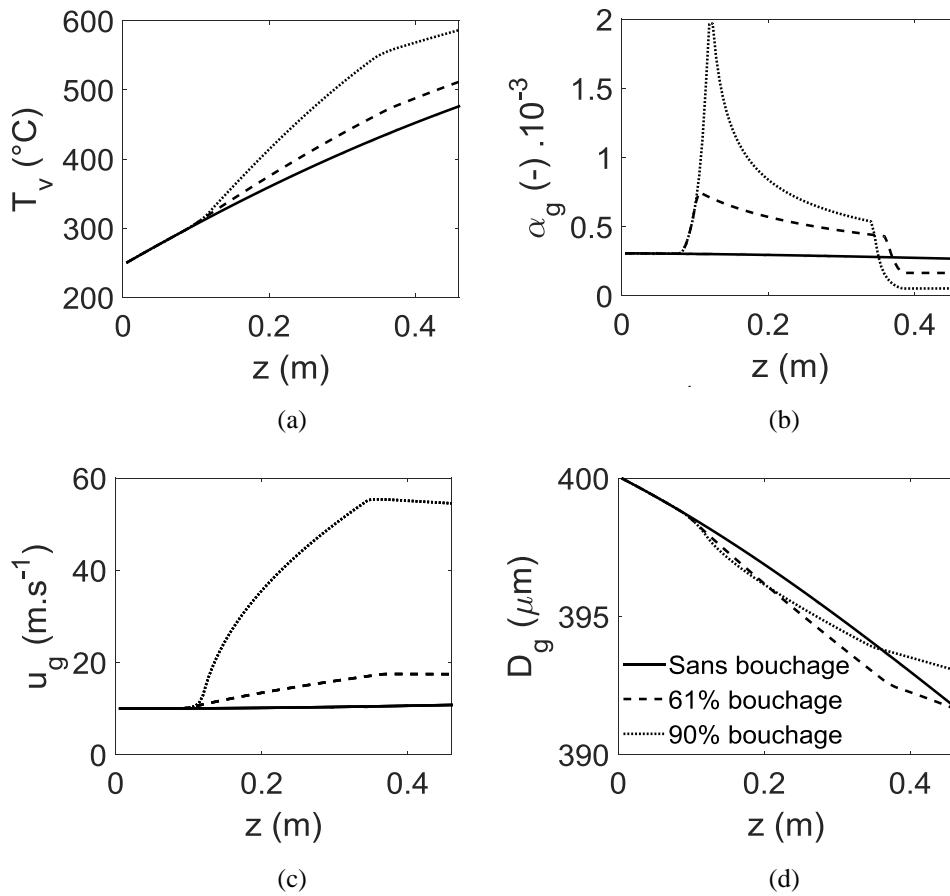


Figure 6. Evolution axiale des paramètres thermo-hydrauliques pour trois conditions de blocage. (a) Température de vapeur, (b) Fraction volumique, (c) Vitesse des gouttes, (d) Diamètre des gouttes

Une fois les différentes contributions thermo-hydrauliques paroi/fluide définies le long du tube (q_1 , q_3 , q_4 et q_6), il est possible de résoudre l'équation (12) pour estimer l'évolution temporelle de la température de la paroi T_p . La Figure 8 présente le profil axial de température de paroi pour 5 instants de temps différents ($T_{p, t=0}=800^{\circ}\text{C}$).

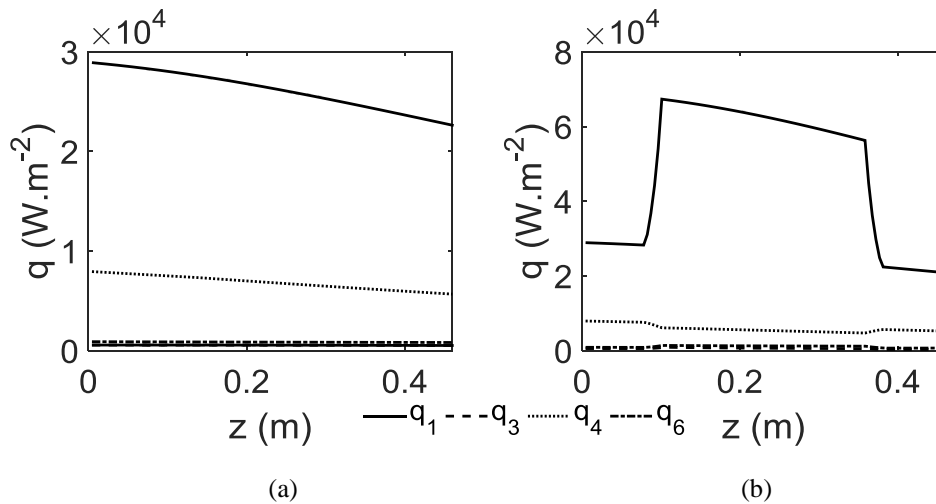


Figure 7. Contributions thermiques internes paroi/fluide (a), 0% bouchage, (b) 61% bouchage

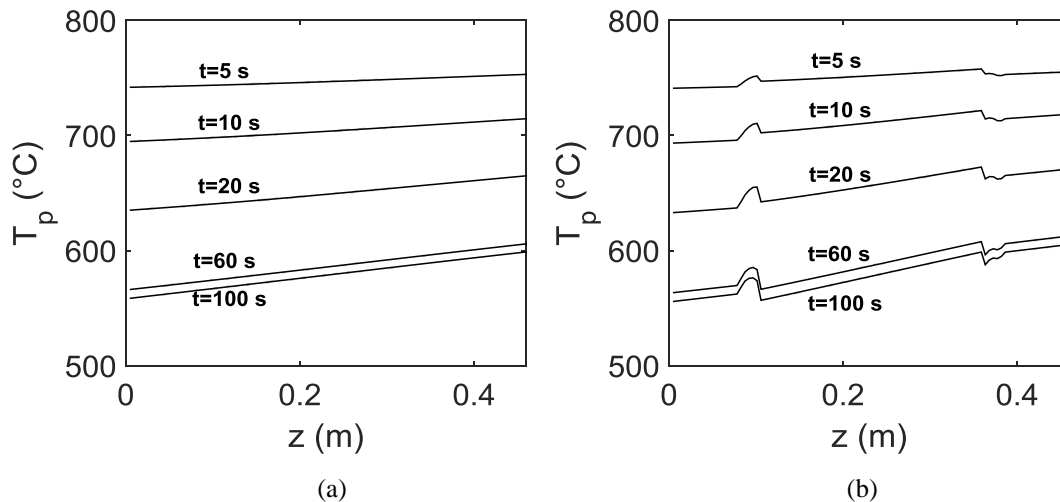


Figure 8. Profil axial de température de paroi à différents instants de temps donnés (a) sans bouchage, (b) 61% bouchage

5. Conclusion

Un banc expérimental a été conçu afin de reproduire une expérience de renoyage d'une zone bouchée dans le cadre d'un APRP. Pour étudier ce phénomène, quelques techniques de métrologie fluide et thermique ont été mise en place. A partir de la configuration du montage expérimental, un modèle thermo-hydraulique a été développé et présenté dans la présente étude afin d'estimer l'évolution axiales des propriétés thermo-hydrauliques qui jouent un rôle important dans la compréhension de ce phénomène en fonction de différents taux de bouchage ainsi comme l'évolution temporelle du profil de température du tube. A terme, il s'agira d'évaluer expérimentalement la contribution de chaque terme en effectuant des bilans de masse et de chaleur.

Références

- [1] G. Repetto, M. Ch, B. Bruyère, T. Glantz, and S. Paul, "Core Coolability in Loss of Coolant Accident : the Coal Experiments," *WRFPM-TopFuel14, Sendai, Japan*, pp. 24–37, 2015.
- [2] A. Labergue, J.-D. Pena-Carillo, M. Gradeck, and F. Lemoine, "Combined three-color LIF-PDA measurements and infrared thermography applied to the study of the spray impingement on a heated surface above the Leidenfrost regime," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 104, 2017.
- [3] A. Bejan and D. Kraus, *Heat Transfer Handbook*. Wiley, 2003.
- [4] M. C. Yuen and L. W. Chen, "Heat-transfer measurements of evaporating liquid droplets," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 21, no. 5, pp. 537–542, 1978.
- [5] 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.
- [6] Y. Guo and K. Mishima, "A non-equilibrium mechanistic heat transfer model for post-dryout dispersed flow regime," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 26, no. 6–7, pp. 861–869, 2002.
- [7] S. A. Morsi and A. J. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems," *J. Fluid Mech.*, vol. 55, no. 2, p. 193–208., 1972.

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