



**HAL**  
open science

# Mesures locales couplées du coefficient d'échange interne et de l'épaisseur de film de liquide en condensation convective

Pascal Lavieille, Lan Phuong Le Nguyen, Jennifer Roy, Marc Miscevic, Benoît Schlegel, Jacques Lluc

► **To cite this version:**

Pascal Lavieille, Lan Phuong Le Nguyen, Jennifer Roy, Marc Miscevic, Benoît Schlegel, et al.. Mesures locales couplées du coefficient d'échange interne et de l'épaisseur de film de liquide en condensation convective. 27ème congrès annuel de la Société Française de Thermique, Jun 2019, Nantes, France. hal-02911002

**HAL Id: hal-02911002**

**<https://hal.science/hal-02911002>**

Submitted on 3 Aug 2020

**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.

# Mesures locales couplées du coefficient d'échange interne et de l'épaisseur de film de liquide en condensation convective.

Pascal Lavieille<sup>1</sup>, Lan Phuong Le Nguyen<sup>1</sup>, Jennifer Roy<sup>1</sup>, Marc Miscovic<sup>1</sup>, Benoit Schlegel<sup>1</sup>, Jacques Lluc<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Plasma et conversion d'énergie

Univ. Paul Sabatier, 118 Route de Narbonne, 31062 Toulouse cedex 9

\*(auteur correspondant : pascal.lavieille@laplace.univ-tlse.fr)

**Résumé** - La condensation convective du HFE7000 est étudiée dans un tube en saphir possédant un diamètre interne de 3,4 mm pour des vitesses massiques comprises entre 8 et 50 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>. Un dispositif expérimental spécifique permet de mesurer simultanément le coefficient d'échange interne et l'évolution temporelle de l'épaisseur du film liquide avec une résolution submicrométrique. Le dispositif et les premiers résultats sont présentés et permettent de déduire des premiers effets dominant, la répartition des phases et leurs impacts sur les transferts.

## Nomenclature

$x$	titre massique		<i>Indices et exposants</i>
$h$	coefficient d'échange, W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	$p$	paroi
$G$	vitesse massique, kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup>	sat	saturation
$T$	température, K	int	interne
$P$	pression, Pa		

## 1. Introduction

De nombreuses études sont effectuées sur la condensation convective depuis des décennies afin de disposer d'outils prédictifs pour le dimensionnement des échangeurs diphasiques. Les domaines d'applications sont majoritairement les climatiseurs et les pompes à chaleur et plus récemment les systèmes de refroidissement spatiaux. Si des corrélations semi empiriques validées sur une large gamme de fluide permettent aujourd'hui de couvrir un grand nombre d'applications, le cadre théorique sur lequel sont construites ces corrélations n'est pas assez large pour être affirmatif sur leur capacité à prédire les performances pour tout type de nouveau fluide. Le renouvellement régulier de ces fluides pour des raisons environnementales oblige ainsi à régulièrement questionner la validité des coefficients d'échanges de ces corrélations par la confrontation à l'expérience. Par ailleurs, la multiplication des systèmes électroniques et micro-électroniques conduit également au développement de systèmes de refroidissement diphasiques peu énergivores ou même totalement autonomes grâce au pompage capillaire. Ces systèmes fonctionnant à basses vitesses massiques, initialement développés pour les applications spatiales, nécessitent également de nouvelles études théoriques et expérimentales car elles quittent la gamme de validité pour laquelle les corrélations précédemment citées ont été construites [1]. Afin d'accroître la fiabilité et le cadre théorique de ces corrélations, différents outils de modélisation sont développés. S'assurer de la validité de ces modèles nécessite des mesures précises sur la distribution des phases et les transferts de chaleur. Malheureusement les mesures de taux de vide et d'épaisseur de film liquide jusqu'alors réalisées se heurtent le plus souvent à des problèmes de précisions spatiales et/ou temporelles ; les films liquides variant dans le temps et dans l'espace très rapidement de quelques microns à quelques centaines de microns. Le banc ici

présenté offre la possibilité de mesurer simultanément les transferts de chaleur et l'épaisseur des films de liquide avec une résolution submicronique à une fréquence de 1000 Hz. Les premiers résultats obtenus permettent de montrer la sensibilité du dispositif et d'ouvrir ainsi vers les nouvelles possibilités qu'offrent ces mesures en termes de compréhension et de validation des mécanismes physiques qui régissent les écoulements et les transferts.

## 2. Dispositif expérimental

La condensation du HFE7000 est étudiée dans un tube en saphir d'un mètre de long possédant un diamètre interne de 3,4 mm orienté verticalement. L'écoulement est dirigé du haut vers le bas. Afin de réaliser un écoulement à débit constant, deux réservoirs thermostatés contenant du HFE7000 en équilibre liquide-vapeur permettent de travailler avec des conditions de pression imposées aux bornes de la section d'essai. Le réservoir amont est réglé à une température d'environ 60 °C et celui de sortie à environ 40 °C ce qui conduit à des pressions respectives d'environ 2,2 bar et de 1,2 bar dans ces réservoirs. Le débit est contrôlé par le réglage d'une micro-vanne placée en amont du tube en saphir (figure 1). Cette micro-vanne concentre ainsi la grande majorité des pertes de charge (environ 1 bar). Le débit dépendant de la différence de pression entre les deux réservoirs, cela permet de conserver un débit constant indépendamment des faibles fluctuations de pression (de l'ordre la centaine de Pa) induites par les instabilités de condensation. Pour éviter la condensation, la conduite transportant la vapeur, du réservoir d'entrée, à l'entrée du tube en saphir est maintenue légèrement surchauffée en amont et en aval de la micro-vanne par deux fils chauffés à température contrôlée enroulés autour de la conduite.

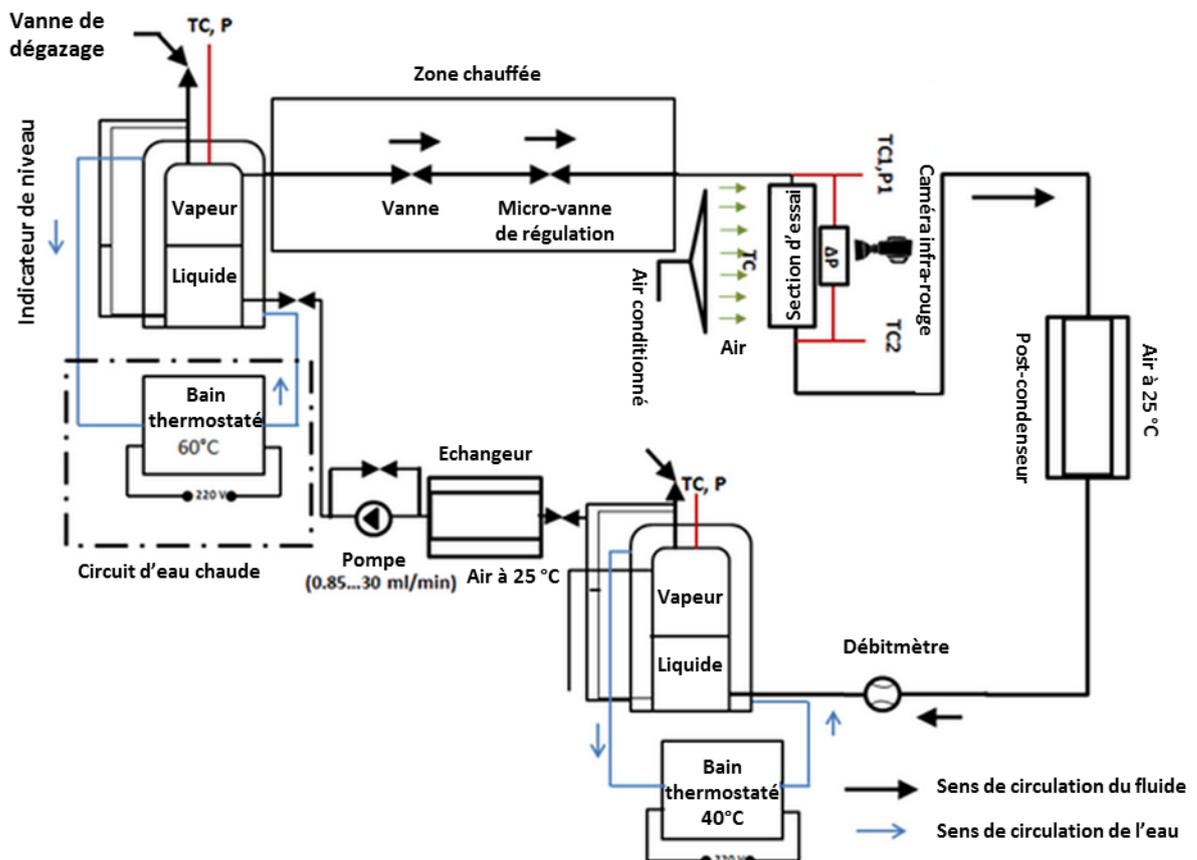


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental (thèse L.Phuong Le Nguyen [2])

Afin de maintenir un niveau de liquide relativement stable dans les deux réservoirs thermostatés, une pompe à engrenage fonctionnant à un débit proche du débit circulant dans la section d'essai permet de remonter le liquide du réservoir de sortie au réservoir d'entrée.

Le tube en saphir, qui reçoit en entrée la vapeur surchauffée de quelques degrés, est refroidi par un flux d'air dirigé perpendiculairement à son axe. Ce flux d'air se répartit uniformément sur toute la longueur du tube (un mètre) et est soufflé à une vitesse d'environ 3,2 m/s. Six thermocouples répartis sur la hauteur du tube sont placés dans le flux d'air en amont du tube à environ un centimètre de sa surface externe afin de mesurer la température de cet air soufflé. Un capteur de pression absolue et un thermocouple déterminent les conditions d'entrée. Un thermocouple, principalement utilisé pour les phases de calibration décrites ci-après, est également placé à la sortie du tube. Afin de déterminer le profil de température de la paroi externe du tube, une caméra infrarouge (FLIR SC6000HS) fonctionnant dans la bande 3 – 5  $\mu\text{m}$  et possédant une sensibilité de 0,018 °C (NETD) mesure le rayonnement d'une ligne de peinture noire d'un millimètre de largeur déposée le long de la paroi externe du tube. Un débitmètre Coriolis placé en sortie du post-condenseur permet de mesurer précisément le débit massique de HFE7000.

### **3. Calibrations préalables et traitement des données thermiques**

Avant de pouvoir déterminer le coefficient d'échange interne de condensation en utilisant la température de la paroi interne du tube, la température de l'interface liquide-vapeur et le flux de chaleur, différents étalonnages doivent être faits.

#### **3.1. Détermination de la température de la paroi externe du tube**

Afin d'établir le lien entre le niveau de rayonnement de la peinture mesuré par la caméra IR et la température de cette dernière, différentes précautions ont été prises. Tout d'abord pour s'assurer de limiter le rôle des flux radiatifs parasites, des plaques de plexiglas ont été disposées face au champ de vision de la caméra en arrière-plan du tube et également autour de la caméra pour protéger d'éventuelles réflexions sur le tube. Ces plaques, noires dans l'infrarouge, émettent ainsi un rayonnement homogène à la température ambiante de la pièce et protègent des rayonnements parasites variables qui peuvent être émis ou réfléchis par différents objets ou personnes dans la pièce. Le flux radiatif arrivant sur les capteurs de la caméra provenant de la focalisation sur la peinture noire du tube ne dépend ainsi que de la température de la paroi et de la température ambiante. Pour réaliser l'étalonnage, à température ambiante contrôlée, de l'eau est injectée à grande vitesse dans le tube. Cette procédure permet d'imposer et donc de connaître la température de la paroi du tube. Pour ces expériences la circulation d'air forcée n'est pas activée, ainsi seuls les échanges radiatifs et la convection naturelle entre la paroi extérieure du tube et le milieu ambiant imposent un écart de température entre la paroi externe du tube et la température de l'eau circulant à l'intérieur du tube. Avec un coefficient d'échange interne entre l'eau et la paroi autour de  $1 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , un coefficient d'échange externe de l'ordre de  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , une épaisseur de tube de 1,3 mm pour une conductivité du saphir de  $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , cet écart se limite au maximum à 0,2 °C. Le lien est ainsi fait entre le rayonnement détecté par la caméra et la température de la peinture [2-3] pour une température ambiante donnée. Ces expériences ont été répétées à différentes positions sur l'axe du tube et à différentes températures ambiantes. Les résultats confirment, l'indépendance de la courbe de calibration à la position axiale et la sensibilité de la mesure à la température ambiante qui décale d'une constante ces courbes [2]. Afin de s'affranchir de ce paramètre un point de référence est donc nécessaire. Ainsi avant la mise en route de chaque expérience, lorsque le HFE7000 liquide à l'intérieur du tube est à l'équilibre avec la

température ambiante, le rayonnement de la peinture et la température ambiante sont mesurés pour s'affranchir des modifications du rayonnement ambiant d'une journée à l'autre.

### 3.2. Détermination du coefficient d'échange externe

La température de la paroi étant maintenant déterminée par la caméra infrarouge, afin de déterminer le coefficient d'échange externe, la convection forcée autour du tube est activée et de l'eau est mise en circulation au sein du tube à des débits permettant un refroidissement significatif (i.e. plusieurs degrés) entre l'entrée et la sortie. Le coefficient d'échange est obtenu en couplant le bilan enthalpique sur l'eau et le flux radial issu des échanges convectifs internes et externes. La corrélation de Shah et London [4] est utilisée pour évaluer l'échange convectif interne. La mesure du profil de température de la paroi du tube par la caméra infrarouge permet ainsi de déterminer l'évolution du coefficient d'échange externe le long du tube [2-3]. Un coefficient d'une valeur moyenne, à 10% près, de  $96 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  est ici obtenu.

## 4. Résultats thermiques

Afin de travailler avec un fluide parfaitement pur, un dégazage du fluide est effectué et vérifié pour chaque expérience. Le fluide arrive ainsi totalement vapeur en entrée du tube et surchauffé d'environ  $8 \text{ }^\circ\text{C}$  par rapport aux conditions de saturation à la pression déterminée par le capteur de pression absolue ('omega' PXM459 0-2 bar, 0-10 V précision: 0,08 %), d'une précision de 1,6 mbar, situé en entrée du tube. Cette mesure de pression permet de déterminer la température de saturation du fluide avec une précision de  $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$ . La température de l'air soufflé est déterminée par les thermocouples étalonnés à  $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Le déplacement de la caméra par une platine micrométrique motorisée permet d'obtenir par balayage le profil de température sur toute la longueur du tube. La figure 2 présente l'évolution de la température de saturation, de la température de la paroi et de la température moyenne de l'air obtenue pour les différentes positions de mesure choisies.

Après s'être assuré que la conduction longitudinale le long du tube est négligeable, la conservation du flux dans une section droite permet alors de déduire le coefficient d'échange interne (entre  $T_{\text{sat}}$  et  $T_p$ ) à partir du coefficient d'échange externe (préalablement déterminé) et des températures de la paroi et de l'air.

Les résultats obtenus pour les différentes vitesses massiques testées sont présentés sur les figures 3 et 4. Conformément à la tendance attendue l'épaississement du film de liquide avec l'augmentation du débit de condensat accroît la résistance thermique entre l'interface et la paroi ce qui provoque une réduction du coefficient d'échange qui passe ainsi d'environ  $1400$  à  $670 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . On note également un faible effet de la vitesse massique sur cette évolution dans la gamme considérée. Ces résultats sont proches de ceux obtenus par Le Nguyen [2] lors de sa thèse sur le même dispositif, même si un accroissement du coefficient d'échange interne avec l'évolution de la vitesse massique plus net aux forts titres a été obtenu lors de ses expériences. Ces écarts sont explicables par la grande sensibilité à la précision de la détermination de l'écart entre la température de saturation et la température de la paroi pour les coefficients d'échange élevés. En effet comme le montre la figure 2, à l'entrée du tube cet écart de température est d'environ  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Une erreur de  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  modifie ainsi de 30 % l'évaluation du coefficient d'échange. Lors de ces mesures effectuées en juin des défauts de performances de la climatisation ont rendu difficile la stabilisation de la température de la pièce et donc du rayonnement ambiant, ce qui a augmenté l'incertitude sur les valeurs de coefficients d'échange élevés. Ainsi même si la tendance observée est bonne, l'absence d'effet apparent de la vitesse massique aux fort titres est à relativiser au regard de cette incertitude.

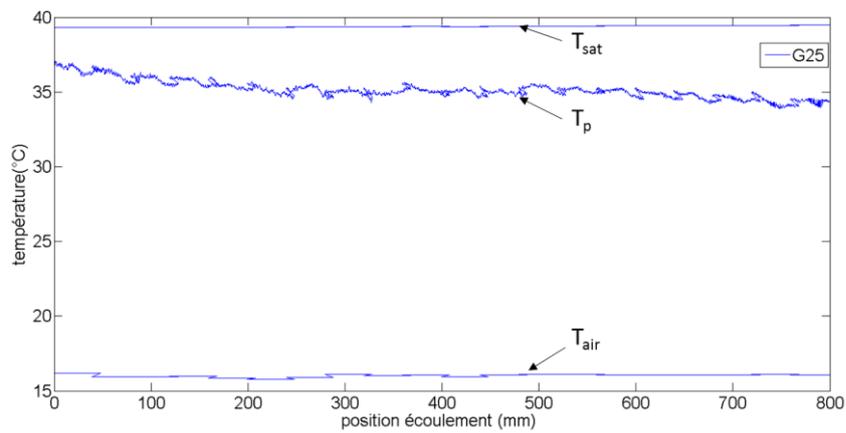


Figure 2 : Evolution de  $T_{sat}$ ,  $T_{paroi}$ ,  $T_{air}$  le long de l'axe du tube à  $G=25 \text{ kg.m}^{-2}.s^{-1}$

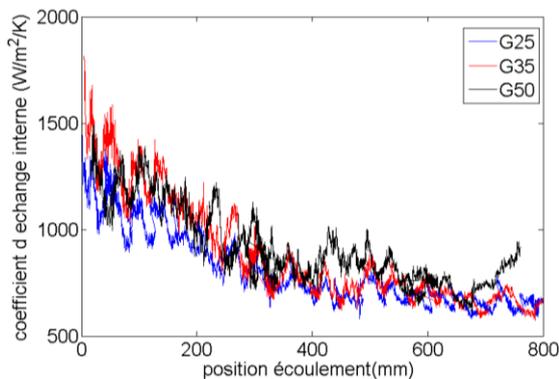


Figure 3 : Evolution du coefficient d'échange interne pour  $G$  égal 25, 35 et  $50 \text{ kg.m}^{-2}.s^{-1}$

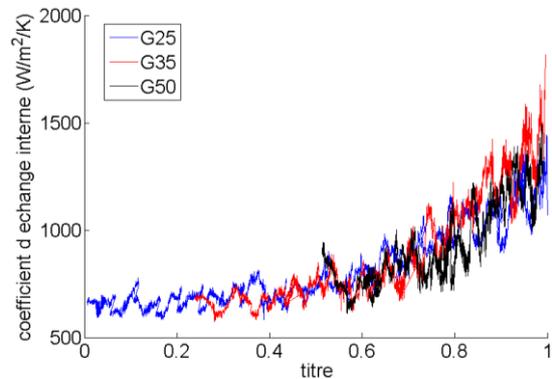


Figure 4 : Evolution du coefficient d'échange interne pour  $G$  égal 25, 35 et  $50 \text{ kg.m}^{-2}.s^{-1}$

## 5. Caractérisation des films liquides et premiers liens aux transferts thermiques

Afin de lever les limitations rencontrées par L. Nguyen [2] avec l'interféromètre optique en lumière blanche en termes de gamme d'épaisseur et de pente d'interface, un capteur confocal chromatique travaillant sur une gamme de mesure de 30 à 300  $\mu\text{m}$  (crayon CL2MG70 de STIL) a été ajouté. Ces instruments sont placés dans le même plan horizontal que la caméra mais à  $90^\circ$  par rapport à cette dernière (soit dans le sillage de l'écoulement d'air). Les deux systèmes fonctionnent à partir de l'analyse spectrale du signal réfléchi par les interfaces de la paroi du tube et de l'écoulement liquide-vapeur (en rétrodiffusion donc) dans la gamme 500 à 700 nm. L'électronique effectuant une partie du traitement du signal est fournie par le groupe STIL et porte le nom de STIL DUO. La lumière blanche incidence est focalisée sur une surface de 9  $\mu\text{m}$  de diamètre pour le confocal chromatique et sur 25  $\mu\text{m}$  pour l'interféromètre en lumière blanche. Afin de corriger la défocalisation de la lumière lors de la traversée de la paroi externe du tube un dépôt de colle possédant le même indice que le saphir a été réalisé sur la surface externe du tube afin de former une bande de surface plane de 3 mm de large sur toute la hauteur du tube. L'analyse spectrale du signal réfléchi par l'interféromètre permet d'obtenir la différence de marche dans le film liquide soit le produit de l'indice par l'épaisseur du film de liquide. La connaissance de l'indice optique permet ainsi de déduire l'épaisseur du

film liquide. Pour le confocal chromatique la distribution spatiale des foyers en fonction de la longueur d'onde subit deux distorsions, une première lors de la traversé du saphir dont l'indice dépend de la longueur d'onde et une seconde lors de la traversée du fluide. La connaissance des longueurs d'ondes réfléchies permet de corriger ces effets. La validité de cette correction est également confirmée par la comparaison des mesures données par les deux instruments. Les deux instruments ne peuvent pas fonctionner simultanément, le choix de l'un ou l'autre des instruments est déterminé par la gamme d'épaisseur à mesurer. L'interféromètre offre une gamme de mesure comprise entre 0,5  $\mu\text{m}$  et 90  $\mu\text{m}$  avec une précision de 10 nm, le confocal entre 30 et 300  $\mu\text{m}$  avec une précision absolue initiale de 0,1  $\mu\text{m}$  qui s'accroît à environ 1  $\mu\text{m}$  en raison de la distorsion optique et du bruit de mesure lié à l'affaiblissement du signal et l'élargissement du pic produit par la courbure interne du tube. L'acquisition des données est effectuée à 1000 Hz pour les deux appareils et le démarrage est synchronisé avec le démarrage des vidéos de la caméra IR afin de mesurer simultanément les transferts et l'épaisseur du film de liquide. Les moyennes sont réalisées sur 4,5 secondes.

Les mesures d'épaisseurs effectuées pour les vitesses massiques 25, 35, 50  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  sont présentées sur les figures 5 et 6. Les mesures obtenues pour les vitesses massiques 8 et 16  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  qui n'ont pas pu être présentées dans le paragraphe précédent en raison d'un problème d'enregistrement des conditions de référence (qui permet de gérer l'effet du rayonnement ambiant) sont ici ajoutées en raison de leur pertinence. En effet les coordonnées des figures 5 et 6 sont totalement indépendantes des conditions de référence sur le rayonnement ambiant. Sur la figure 7 le débit de condensat est proportionnel à l'écart de température entre la paroi et l'air ambiant (de l'ordre de 20 °C) qui est donc peu sensible à une incertitude même de 1 °C sur les conditions de référence. Ces courbes permettent d'observer que l'accroissement de la vitesse massique amincit le film de liquide. Sur la figure 5 on peut observer que les courbes à  $G = 8$  et 16  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  sont parallèles pour les positions axiales inférieures à 200 mm. Il est fort probable que ce décalage d'abscisse soit produit par un démarrage de la condensation à une abscisse inférieure à celle obtenue pour  $G = 16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , les pertes thermiques pour  $G = 8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  dans la connexion entre le raccord métallique et l'entrée du tube en saphir ayant plus d'impact aux faibles vitesses massique.

Sur la figure 7 l'épaisseur moyenne du film de liquide est représentée en fonction du débit de condensat. Ces données permettent de confirmer qu'à même débit de liquide lorsque la vitesse massique et donc la vitesse vapeur augmente, l'épaisseur du film se réduit. Il est à noter que cette épaisseur ne semble pas évoluer entre 8 et 16  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  et ne plus évoluer entre 35 et 50  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . La comparaison de ces données avec la théorie de Nusselt du film ruisselant possédant un cisaillement nul à l'interface liquide-vapeur (pour laquelle l'épaisseur du film de liquide ne dépend que des forces de gravité et de la viscosité du fluide) permet d'observer un très bon accord avec les mesures pour  $G = 8$  et 16  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . Il semble donc que le cisaillement interfacial ne se manifeste qu'à partir de  $G = 25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  pour ce fluide.

La figure 6 permet de quantifier les oscillations de ces films liquides. La plage d'oscillation est définie par l'épaisseur maximale moins l'épaisseur minimale, où les épaisseurs minimales et maximales sont définies en utilisant respectivement le premier décile et le neuvième décile de la statistique des épaisseurs. Ainsi à l'exception des 140 premiers millimètres pour  $G=8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  et des 175 premiers millimètres pour  $G = 16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  pour lesquels le film liquide garde une épaisseur constante (d'amplitude nulle), il apparaît que la plage d'oscillations du film de liquide est de l'ordre de l'épaisseur moyenne. Ce qui revient à dire que 80 % des épaisseurs mesurées au cours du temps se situent dans la gamme comprise entre 0,5 fois l'épaisseur moyenne et 1,5 fois l'épaisseur moyenne. Il est également intéressant de constater que cette amplitude dépend peu de la vitesse massique. Cette

invariance à la position est en fait une invariance au débit de liquide (le débit de liquide étant contrôlé par la convection forcée externe qui est le facteur limitant le flux de chaleur). Il est également intéressant de noter que l'apparition des instabilités hydrodynamiques à  $G=16 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  pour les abscisses supérieures à 175 mm ne conduit pas à une divergence entre l'épaisseur moyenne observée et l'épaisseur moyenne calculée sous l'hypothèse d'un film ruisselant d'épaisseur constante. La figure 8 reprend les résultats de la figure 7, la division par le débit total de liquide circulant dans le tube permet de voir qu'à même titre les épaisseurs sont plus minces pour les basses vitesses massiques.

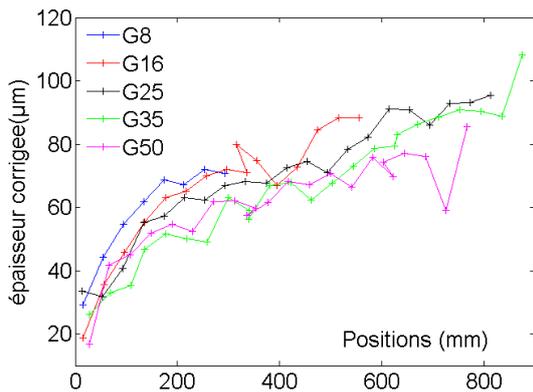


Figure 5 : Epaisseur en fonction de la position

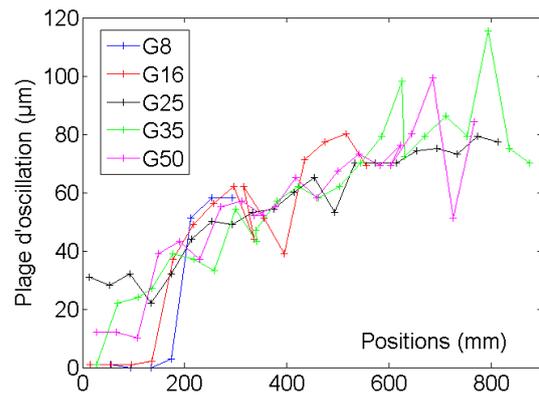


Figure 6 : Plage d'oscillation des vagues en fonction de la position axiale

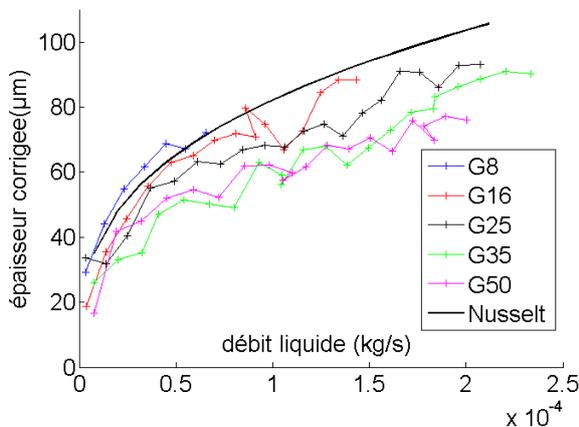


Figure 7 : Epaisseur moyenne en fonction du débit de liquide

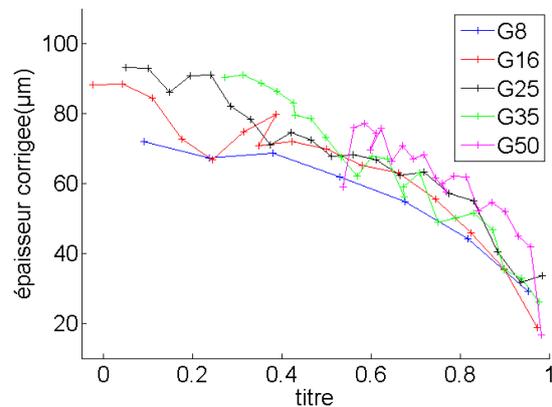


Figure 8 : Epaisseur moyenne en fonction du titre

En conclusion, les résultats thermiques ont montré une forte décroissance du coefficient d'échange en fonction de la position qui est finalement bien corrélée à la forte augmentation de l'épaisseur moyenne en fonction de la position axiale. Les mesures d'épaisseurs mettent également en évidence l'instabilité de ces films de liquide dont l'épaisseur évolue rapidement au cours du temps dans une plage dont la largeur est de l'ordre de l'épaisseur moyenne. Il apparaît alors difficile de prédire la conductivité équivalente de ce film oscillant. Afin d'évaluer les premières tendances sur cette conductivité équivalente la figure 9 compare le coefficient d'échange interne mesuré à celui que l'on obtiendrait avec un film liquide purement conducteur dont l'épaisseur serait constante et égale à la valeur moyenne mesurée pour cette expérience. Même s'il est encore trop tôt au regard de la sensibilité aux incertitudes du calcul du coefficient d'échange interne pour effectuer une évaluation quantitative précise

des résultats, il peut toutefois être noté que la décroissance prédite sur l'hypothèse d'un film conducteur possédant l'épaisseur moyenne mesurée suit une tendance similaire en évoluant également d'un facteur 2 sur la gamme considérée.

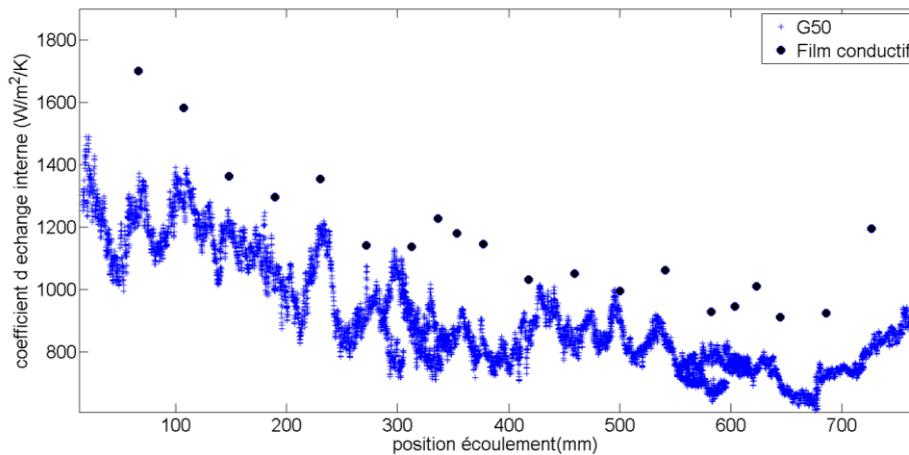


Figure 9 : Comparaison de  $h_{int}$  mesuré à l'hypothèse d'un film conducteur à  $G = 50 \text{ kg.m}^{-2}.s^{-1}$

Ainsi si la précision sur la mesure des films répond largement aux précisions nécessaires pour caractériser les films de liquide, une attention particulièrement importante doit être portée sur l'évaluation de la température de saturation et la mesure de la température de paroi en raison du besoin d'estimer avec précision une différence d'environ  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  pour déterminer les coefficients d'échange interne aux forts titres.

## 6. Conclusion

La technique développée sur la mesure des épaisseurs de film permet de caractériser avec une grande précision ces écoulements et offre ainsi la possibilité de valider les modèles hydrodynamiques et thermiques. Les épaisseurs moyennes des films de liquide ont pu être mesurées pour différents titres et différentes vitesses massiques. La limite de validité du film ruisselant a pu être quantifiée et une première quantification de l'instabilité de ces films a été obtenue. L'analyse couplée des transferts permet d'effectuer les premières comparaisons même si un effort doit être mené pour réduire l'incertitude sur les transferts notamment aux forts titres et accroître ainsi la précision des mesures.

## Références

- [1] Del Col, D., Bortolin, S., Cavallini, A. Matkovic, M., Effect of Cross Sectional Shape during Condensation in a Single Square Minichannel. *Int. J. Heat Mass Transf.* 54, 3909-3920, 2011
- [2] Thèse Lan Phuong Le Nguyen, Effect of gravity on convective condensation at low mass velocity, soutenue le 6 juillet 2017, Université de Toulouse 3.
- [3] Lan Phuong Le Nguyen, Pascal Lavieille, Marc Miscovic, Sébastien Dutour, Etude de la condensation convective dans un tube miniature vertical. *Congrès Français de Thermique (Toulouse) SFT 2016*, 31 mai-3 juin 2016, 77.
- [4] R. K. Shah, A. L. London, Thomas F. Irvine, and James P. Hartnett. *Laminar, Flow Forced convection in Ducts*. Academic Press New York (1978).

## Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'agence spatiale européenne pour le financement de ces recherches dans le cadre du MAP ENCOM3.