

Carte d'écoulement pour la condensation convective à faibles vitesses massiques dans un micro-tube horizontal de section carrée

Georges EL ACHKAR^{1*}, Pascal LAVIEILLE², Marc MISCEVIC²

¹Aix-Marseille Université – IUSTI, UMR CNRS 7343 – Marseille Cedex 13.

²Université Paul Sabatier – LAPLACE, UMR CNRS 5213 – Toulouse Cedex 9.

(*auteur correspondant : georges.elachkar@laplace.univ-tlse.fr)

Résumé - L'objectif de cette communication est de développer une carte d'écoulement pour la condensation convective. Pour cela, une étude expérimentale sur la condensation dans un micro-tube horizontal de section carrée, d'arêtes interne et externe respectivement égales à 553 et 675 μm , a été réalisée avec une densité surfacique du flux thermique prélevé imposée. Le fluide frigorigène utilisé a été le n-pentane avec des faibles vitesses massiques inférieures à $16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Les zones d'écoulement principales ont d'abord été identifiées. Les transitions entre ces zones ont ensuite été déterminées et une carte d'écoulement a finalement été proposée.

Nomenclature

a	arête du micro-tube, m
F	fréquence, Hz
G	vitesse massique, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
L	longueur, m
\dot{m}	débit massique, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
N	nombre total de bulles
R	rayon, m
t	temps, s
U	vitesse, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
V	volume, m^3
x	titre massique en vapeur, $\frac{\dot{m}_v}{\dot{m}}$
z	position axiale, m

Symboles grecs

ρ	masse volumique, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
τ	durée de l'expérience, s

Indices et exposants

b	bulle
e	entrée
fpl	formation pont liquide
i	variable
int	intérieur
v	vapeur
zbs	zone à bulles sphériques

1. Introduction

Pour les écoulements diphasiques en condensation convective à l'intérieur des tubes, les lois de transferts thermiques sont directement liées à la distribution locale des phases vapeur et liquide dans ces écoulements [1]. La prédiction des structures d'écoulement est donc un des aspects les plus importants dans la conception et le dimensionnement des condenseurs des boucles de refroidissement diphasiques.

De nombreuses cartes d'écoulement sont disponibles dans la littérature pour des écoulements avec changement de phase. Cependant, celles-ci sont beaucoup moins nombreuses pour les tubes millimétriques et micrométriques que pour les tubes centimétriques. Barnea et al. [2], Damianides et Westwater [3] et Fukano et al. [4] ont montré que les cartes d'écoulement de Taitel et Dukler [5] et Weisman et al. [6] ne pouvaient plus prédire de façon exacte les transitions entre les régimes à partir d'un diamètre interne de tube inférieur ou égal à 5 mm. Cet aspect est dû au changement de l'importance relative des mécanismes contrôlant la distribution des phases (i.e. gravité, cisaillements pariétal et interfacial, tension de surface) liée au diamètre hydraulique du

tube. Par conséquent, de nouvelles cartes d'écoulement doivent être proposées pour les tubes de faibles diamètres hydrauliques afin de combler ce manque dans la littérature.

D'autre part, la totalité des cartes d'écoulement correspondant aux tubes millimétriques et micrométriques ont été développées pour des vitesses massiques supérieures à $100 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. En effet, pour les très faibles vitesses massiques, quelques équipes ont montré les régimes d'écoulement (e.g. Louahlia-Gualous et Mecheri [7], Médéric et al. [8]), mais aucune carte d'écoulement claire n'a été établie. Des développements de cartes d'écoulement pour des faibles vitesses massiques sont particulièrement demandés.

2. Expériences

2.1. Dispositif expérimental

Le montage expérimental est constitué essentiellement d'un réservoir d'entrée, une étuve, une vanne micrométrique, une section d'essais, un réservoir de sortie, une balance de précision, un ventilateur, une caméra rapide et une chaîne d'acquisitions (Fig. 1).

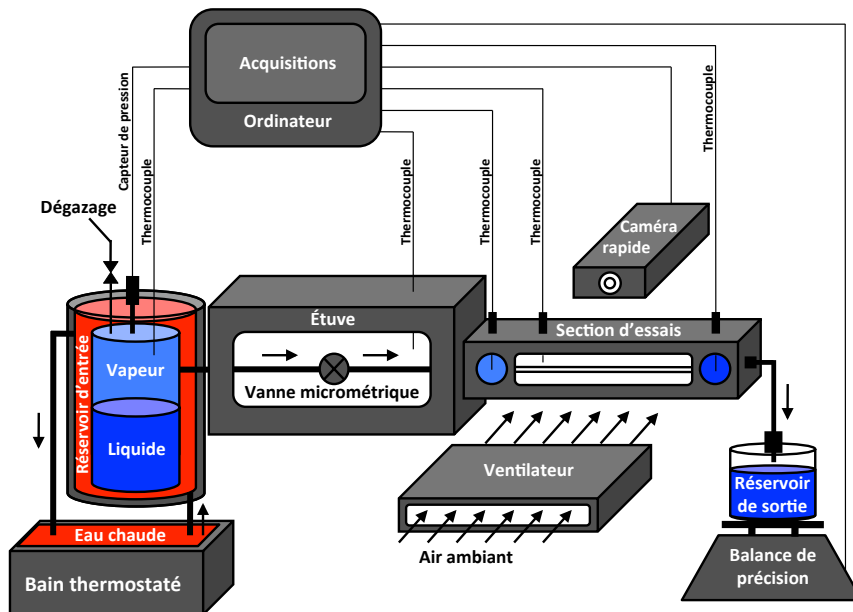


Figure 1 : Schéma de principe du dispositif expérimental

Le rôle du réservoir d'entrée est de fournir de la vapeur saturée à température et pression constantes. Ce réservoir contient un mélange liquide-vapeur du fluide frigorigène (n-pentane ayant une température de saturation de $36,06 \text{ }^\circ\text{C}$ à pression atmosphérique) dont la température est contrôlée par une circulation d'eau thermostatée. Pour assurer un débit constant dans la section d'essais, un blocage sonique est assuré dans la vanne micrométrique placée dans une étuve maintenue à $40 \text{ }^\circ\text{C}$ au dessus de la température de saturation du fluide. Les détails de l'installation du banc d'essais sont disponibles dans la référence [9]. En aval de la vanne, la vapeur s'écoule dans la section d'essais. Celle-ci est constituée d'un micro-tube horizontal de section carrée en borosilicate, d'arêtes interne et externe respectivement égales à 553 et $675 \text{ }\mu\text{m}$, et de longueur effective exposée au fluide froid (i.e. l'air) de 196 mm . Un ventilateur est placé perpendiculairement à la section d'essais. L'air circule à travers la section d'essais avec une vitesse quasiment uniforme et à la température ambiante moyenne de la pièce de $22,6 \text{ }^\circ\text{C}$ durant toutes les expérimentations. Le débit massique est déterminé en mesurant la masse de condensats dans le réservoir de sortie au cours du temps. Des thermocouples permettent de déterminer

la température du fluide dans différents points du circuit du n-pentane, notamment à l'entrée et à la sortie du micro-tube. Toutes les mesures sont collectées et affichées sur Labview.

2.2. Procédures expérimentales

Préalablement à la campagne d'essais, le coefficient d'échange thermique entre l'air et les parois externes du micro-tube est déterminé. Pour cela, une circulation d'eau chaude ensemencée par de la Rhodamine B est imposée dans le canal, lequel est refroidi par la circulation d'air. Le profil de température d'eau à l'intérieur du tube est alors mesuré par une technique de fluorescence induite par laser développée dans le cadre d'une étude précédente [9]. Le transfert thermique du côté extérieur étant limitant, le coefficient d'échange thermique externe peut être déterminé à partir du profil de température d'eau. Une valeur de $294 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ est obtenue avec une incertitude de $\pm 15 \%$.

Avant de commencer les expériences de condensation, le n-pentane est bien dégazé et les canalisations sont saturées par ce fluide. La vanne micrométrique est alors plus ou moins ouverte selon la vitesse massique désirée. L'étude est limitée à des vitesses massiques inférieures à $16 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Bien que cette plage soit restreinte, elle est représentative des vitesses massiques obtenues dans les systèmes de refroidissement à pompage capillaire. Une série de vidéos est alors réalisée pour toute la longueur de condensation grâce à une caméra rapide (Photron FASTCAM) placée sur deux platines de déplacement horizontal contrôlées par des vis micrométriques. La résolution optique de l'ensemble du dispositif conduit à des facteurs de conversion égaux à $24,87 \text{ pxl.mm}^{-1}$ ou $112,9 \text{ pxl.mm}^{-1}$ (en changeant l'objectif et/ou la lentille de la caméra rapide) selon la longueur de la zone étudiée. Les fenêtres d'acquisition sont constituées de 1024 rangées de pixels, correspondant donc à des longueurs de 41,17 mm ou 9,06 mm, respectivement. L'incertitude d'acquisition, compte tenu de la discrétisation de l'espace par les pixels de la caméra, est estimée à $\pm 2 \text{ pxl}$ (incertitude relative qui dépend de l'objet étudié). La fréquence d'acquisition de la caméra rapide est fixée à 2000 images par seconde, permettant de suivre de façon continue l'évolution de la distribution des phases au cours du temps. Finalement, les images de ces vidéos sont traitées sous Matlab afin de déterminer la distribution des phases dans la zone de condensation du tube.

3. Résultats et discussion

3.1. Zones d'écoulement

La figure 2 montre un exemple des différentes structures d'écoulement observées lors de la condensation du n-pentane avec une vitesse massique de $5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Des images correspondant à trois instants différents ont été reportées sur cette figure afin de montrer les transitions entre ces différentes structures. Trois structures d'écoulement principales ont été identifiées : la structure annulaire, la structure à bulles allongées (ou à bulles de Taylor) et la structure à bulles sphériques. Ces structures d'écoulement sont qualitativement identiques pour toutes les vitesses massiques du n-pentane imposées.

Pour la structure annulaire, un film mince de liquide est présent le long de la circonférence interne du tube. La vapeur s'écoule au centre et occupe la quasi totalité de la section du tube. Cette structure se termine souvent par une formation d'un pont liquide due au contact entre deux vagues situées dans les parties supérieure et inférieure du tube (cf. instabilité de Rayleigh-Plateau). Au moment de la cassure de l'interface dans la structure annulaire, une bulle allongée se détache possédant une longueur (selon l'axe du tube) de quelques dizaines de fois le diamètre hydraulique du tube. En se référant à Garimella et al. [10], la bulle allongée possède quasi-

ment une forme carrée durant son passage dans un tube de section carrée, avec une arête égale à 90 % de l'arête interne du tube. La bulle allongée se termine avec deux ménisques quasiment hémisphériques. Finalement, la bulle allongée se condense très rapidement pour devenir sphérique quand sa longueur atteint 90 % de l'arête interne du tube.

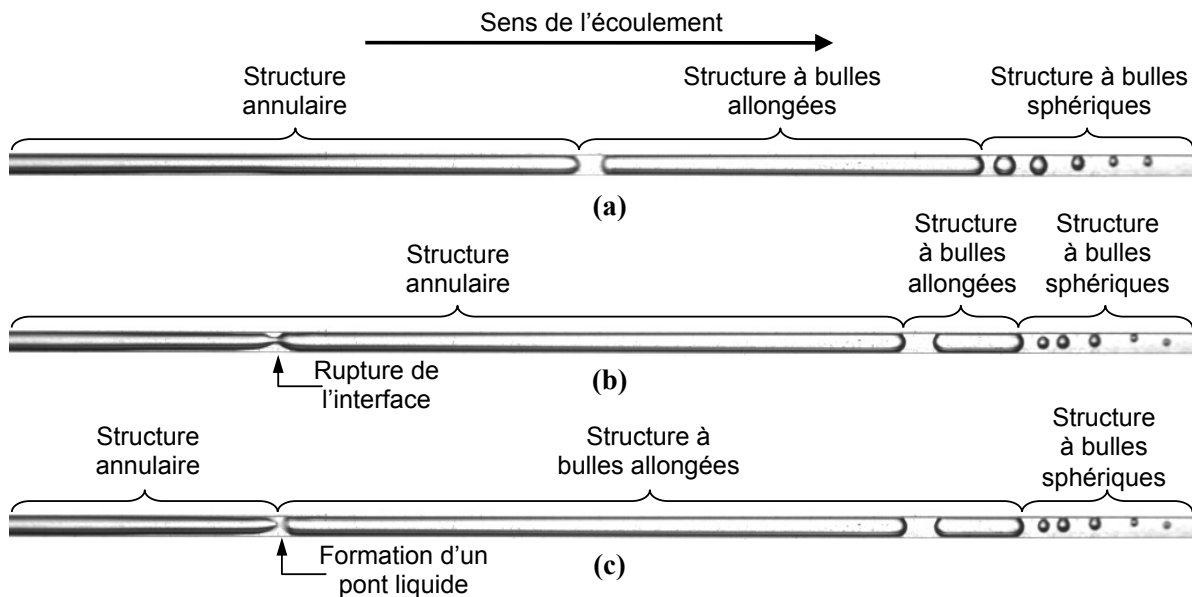


Figure 2 : Structures d'écoulement observées lors de la condensation du *n*-pentane avec une vitesse massique de $5 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ à trois instants différents : (a) $t = 0 \text{ ms}$; (b) $t = 50 \text{ ms}$; (c) $t = 51 \text{ ms}$.

Nous définissons dans la suite la zone annulaire comme étant la zone du tube où la structure annulaire est seule présente au cours du temps. Ainsi, cette zone est définie par la partie diphasique comprise entre l'entrée du tube et la position moyenne de formation des ponts liquides (l'écart type de cette position moyenne étant très faible, la position minimale de formation des ponts liquides peut être confondue avec la position moyenne). La même définition est considérée pour la zone à bulles sphériques. Ainsi, cette zone est définie par la partie diphasique comprise entre la position axiale au delà de laquelle aucun passage d'une bulle allongée n'est détecté et la fin de la zone de condensation. Finalement, la zone intermittente (i.e. zone à bulles allongées) est la partie restante de la zone diphasique. Ainsi, la zone intermittente est la partie diphasique où toutes les bulles allongées sont présentes au cours du temps, avec la présence possible à un instant donné des structures annulaire et à bulles sphériques dans cette zone.

3.2. Carte d'écoulement

Afin de développer une carte d'écoulement pour le *n*-pentane, les transitions entre les trois zones d'écoulement définies précédemment doivent être déterminées.

3.2.1. Transition entre les zones annulaire et intermittente

Pour déterminer la position et la fréquence moyennes de formation des ponts liquides pour une vitesse massique du *n*-pentane donnée, la position de formation de chaque pont liquide a d'abord été repérée. Ce pont liquide a ensuite été numéroté et suivi pendant son déplacement dans le sens de l'écoulement jusqu'à la détection d'un nouveau pont liquide, et ainsi de suite. Les incertitudes de détermination de la position et du temps de formation d'un pont liquide sont de $\pm 80,4 \mu\text{m}$ et $0,5 \text{ ms}$, respectivement, correspondant à des incertitudes de $\pm 2 \text{ pxl}$ liées à la détermination des positions des deux extrémités du pont liquide et à une période d'acqui-

sition des images par la caméra rapide. Devant les distances et les durées mesurées, ces incertitudes peuvent être considérées comme négligeables. À la fin de cette procédure, la position et la fréquence moyennes de formation de tous les ponts liquides pendant la durée d'acquisition totale de chaque vidéo sont déterminées. Les résultats obtenus pour les différentes vitesses massiques du n-pentane sont reportés sur la figure 3. Une augmentation de la vitesse massique du n-pentane provoque l'augmentation de ces deux paramètres. En effet, en augmentant la vitesse massique pour une même température d'air (i.e. une densité surfacique de flux thermique prélevé constante), la condensation complète de la vapeur nécessite une surface d'échange plus importante, ce qui entraîne une augmentation de la longueur de la zone de condensation. La position moyenne de formation des ponts liquides suit alors cette évolution. Des relations quasiment linéaires sont obtenues entre la position moyenne de formation des ponts liquides et la vitesse massique du n-pentane. L'augmentation de la fréquence moyenne de formation des ponts liquides avec la vitesse massique est par contre non linéaire. Ces propriétés résultent d'une compétition entre les effets stabilisants et déstabilisants entrant en jeu dans l'écoulement (i.e. effets capillaires, visqueux et inertiels). D'autre part, l'effet de la densité surfacique de flux thermique prélevé (i.e. de la température de l'air) sur la fréquence de formation des ponts liquides a également été étudié, mettant en évidence une indépendance entre ces deux paramètres quelle que soit la vitesse massique du n-pentane.

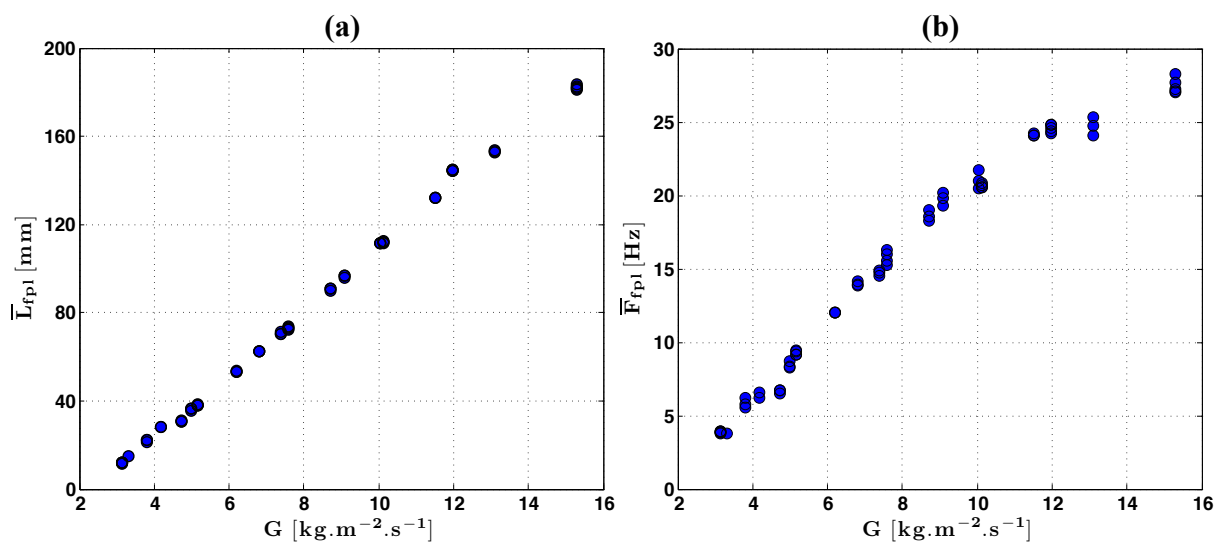


Figure 3 : Évolutions (a) de la position et (b) de la fréquence moyennes de formation des ponts liquides en fonction de la vitesse massique du n-pentane.

Pour déterminer la ligne de transition entre les zones annulaire et intermittente, le titre massique en vapeur au moment de la formation des ponts liquides a été déterminé. Une première tentative a été faite pour calculer le titre par simple application d'un bilan d'énergie sur la zone comprise entre le début du tube (exposé au fluide secondaire) et la position de formation de chaque pont liquide. Néanmoins, des incertitudes significatives ont été mises en évidence. Une autre méthode a ainsi été utilisée pour une détermination plus précise du titre. Pour cela, pour une vitesse massique du n-pentane donnée, la vitesse de déplacement du front fermant la structure annulaire a d'abord été calculée au niveau de sa formation. Cette vitesse a été déterminée en faisant le rapport entre la distance parcourue par ce front et le temps entre deux images suffisamment éloignées dans le temps (afin de réduire les incertitudes liées à la détection de la position du front causées à la fois par le CCD de la caméra rapide et par le programme de traitement d'images). En faisant les hypothèses que la compression de la vapeur située dans la zone

annulaire et le changement de phase au niveau du front sont négligeables, la vitesse débitante de la vapeur à cette position est alors égale à celle du front. En suivant la même procédure, la vitesse moyenne de la vapeur lors de la formation de ces ponts liquides a été calculée pour toutes les vitesses massiques du n-pentane. La figure 4a montre l'évolution de cette vitesse moyenne en fonction de la vitesse massique. Nous remarquons que cette vitesse moyenne est quasiment insensible à la vitesse massique avec une valeur moyenne de $0,73 \text{ m.s}^{-1}$. Cet invariant qui caractérise le phénomène de fermeture du collier de liquide est particulièrement intéressant pour l'analyse de stabilité de ce type de structure. D'autre part, aucune influence de la densité surfacique du flux thermique prélevé sur cette vitesse moyenne n'a été mise en évidence.

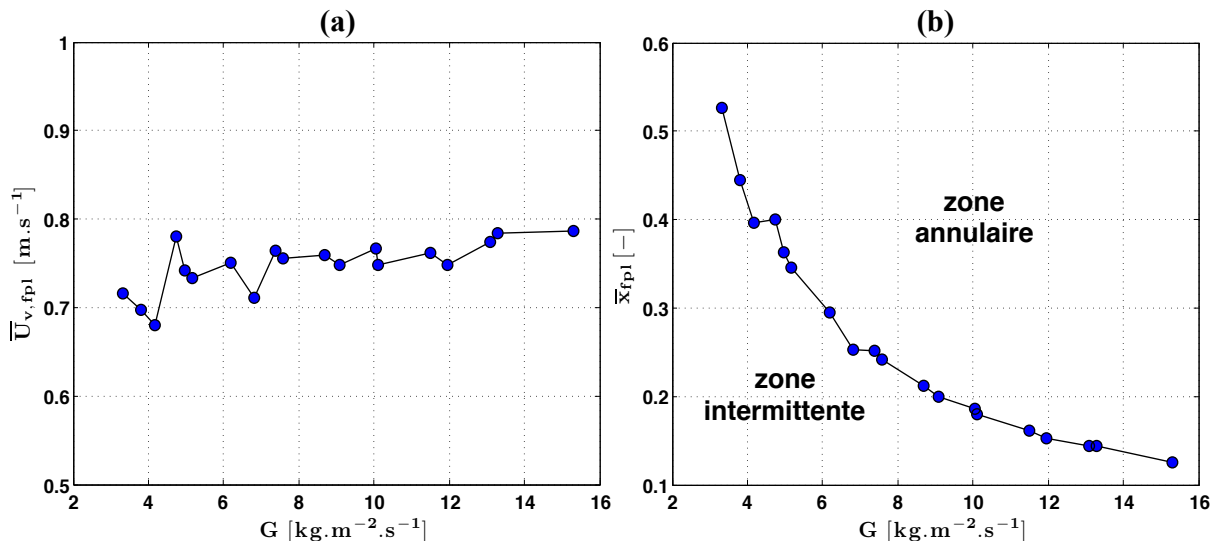


Figure 4 : Évolutions (a) de la vitesse et (b) du titre massique en vapeur moyens au niveau de la formation des ponts liquides en fonction de la vitesse massique du n-pentane.

Connaissant la vitesse moyenne de la vapeur au niveau de la formation des ponts liquides, et en supposant que le taux de vide à cet endroit est égal à 0,81 (correspondant à la valeur du taux de vide proposée par Garimella et al. [10] pour les bulles allongées dans un tube de section carrée), le débit massique de la vapeur peut être évalué. La figure 4b montre l'évolution du titre massique en vapeur moyen au niveau de la formation des ponts liquides en fonction de la vitesse massique du n-pentane. Nous constatons que le titre moyen diminue quand la vitesse massique augmente. En effet, en augmentant la vitesse massique du n-pentane, le débit massique total augmente, le débit moyen de la vapeur (représenté par la vitesse moyenne de la vapeur) au niveau de la formation des ponts liquides étant constant, le titre massique en vapeur moyen diminue. Il apparaît donc que l'augmentation du cisaillement (pariétal et/ou interfacial) tend à stabiliser les films liquides. Cela signifie a contrario qu'à faible vitesse massique l'effet déstabilisant est bien un effet capillaire. En conclusion, la courbe de la figure 4b représente la transition entre la zone annulaire (située au-dessus de cette courbe) et la zone intermittente (située au-dessous de cette courbe) pour le n-pentane.

3.2.2. Transition entre les zones intermittente et à bulles sphériques

Pour compléter la carte d'écoulement du n-pentane présentée dans la figure 4b, la transition entre les zones intermittente et à bulles sphériques doit être déterminée. Pour cela, l'évolution du titre massique en vapeur moyen à l'entrée de la zone à bulles sphériques a été déterminée en fonction de la vitesse massique du n-pentane. Une méthode spécifique basée sur le suivi Lagrangien des bulles sur la base des images des vidéos acquises, développée dans le cadre d'une

étude précédente et détaillée dans la référence [11], a été de nouveau utilisée pour déterminer le comportement spatiale et temporel de la longueur de chaque bulle $L_b(z, t)$ pendant le temps total de l'expérience τ . Le titre massique en vapeur moyenné sur le temps dans n'importe quelle section du tube dans la zone à bulles (allongées et sphériques) peut alors être déterminé :

$$\bar{x}(z) = \frac{\rho_v}{\tau \dot{m}} \sum_{i=1}^N (V_{b,i}(z)) \quad (1)$$

où ρ_v est la densité de la vapeur, \dot{m} est le débit massique du n-pentane imposé dans le tube, N est le nombre total des bulles et $V_{b,i}(z)$ est le volume de la bulle numéro i au moment de son passage par la section z défini par :

$$V_{b,i}(z) = \frac{\pi}{6} L_{b,i}^3(z) \quad \text{avec} \quad L_{b,i}(z) = 2R_{b,i}(z) \quad \text{si} \quad L_{b,i}(z) \leq 0,9a_{int} \quad (2)$$

$$V_{b,i}(z) = \frac{\pi(0,9a_{int})^3}{6} + (0,9a_{int})^2(L_{b,i}(z) - 0,9a_{int}) \quad \text{si} \quad L_{b,i}(z) > 0,9a_{int} \quad (3)$$

où $L_{b,i}(z)$ et $R_{b,i}(z)$ sont la longueur et le rayon de la bulle numéro i au moment de son passage par la section z , respectivement. La figure 5 montre l'évolution du titre massique en vapeur moyen à l'entrée de la zone à bulles sphériques en fonction de la vitesse massique du n-pentane. Nous constatons que la valeur de ce paramètre est très faible et reste de même ordre de grandeur quelle que soit la vitesse massique. À noter que pour les vitesses massiques du n-pentane comprises entre 12 et 16 $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, la zone à bulles sphériques dépasse la fin du tube exposée au fluide secondaire et le titre massique en vapeur ne peut pas être déterminé. Néanmoins, la condensation est complète dans la partie du tube cachée dans le bâti fixant ce tube. Ainsi, le débit massique du n-pentane est mesuré avec précision.

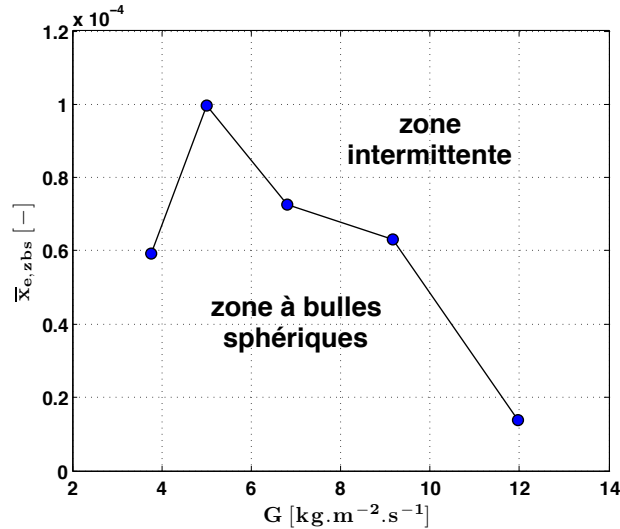


Figure 5 : Évolution du titre massique en vapeur moyen à l'entrée de la zone à bulles sphériques en fonction de la vitesse massique du n-pentane.

4. Conclusions et perspectives

Le travail présenté vise à développer une carte d'écoulement pour la condensation convective dans un micro-tube horizontal de section carrée, d'arêtes interne et externe respectivement

égales à 553 et 675 μm , avec une densité surfacique du flux thermique prélevé imposée. Le fluide frigorigène utilisé a été le n-pentane avec des faibles vitesses massiques inférieures à $16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. Trois zones d'écoulement principales ont été identifiées : zone annulaire, zone intermittente (i.e. zone à bulles allongées) et zone à bulles sphériques. Une méthode basée sur le suivi du front fermant la structure annulaire au niveau de la formation des ponts liquides a d'abord été développée, permettant de déterminer la transition entre les zones annulaire et intermittente. Une vitesse moyenne de vapeur quasiment constante et une diminution du titre massique en vapeur moyen ont été obtenues avec l'augmentation de la vitesse massique du n-pentane. Une autre méthode basée sur le suivi Lagrangien des bulles a ensuite été développée, permettant de déterminer la transition entre les zones intermittente et à bulles sphériques. Des valeurs très faibles et de même ordre de grandeur du titre massique en vapeur moyen ont été obtenues indépendamment de la vitesse massique du n-pentane. Une carte d'écoulement pour le n-pentane a finalement été proposée. Les effets des propriétés thermophysiques de différents fluides sur les lignes de transition dans la carte d'écoulement restent à étudier pour la même gamme de vitesse massique considérée dans ce papier.

Références

- [1] B. Médéric, P. Lavieille, M. Miscevic, Heat transfer analysis according to condensation flow structures in a minichannel, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 30 Issue 8 (2006) 785-793.
- [2] D. Barnea, Y. Luninski, Y. Taitel, Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes, *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 61 (1983) 617-620.
- [3] C. Damianides, J.W. Westwater, Two-phase flow patterns in a compact heat exchanger and in small tubes, *2nd UK National Conference on Heat Transfer*, 2 (1988) 1257-1268.
- [4] T. Fukano, A. Kariyasaki, M. Kagawa, Flow patterns and pressure drop in isothermal gas-liquid concurrent flow in a horizontal capillary tube, *ANS National Heat Transfer Conference*, 4 (1989) 153-161.
- [5] Y. Taitel, A.E. Dukler, A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow, *AIChE Journal*, 22 Issue 1 (1976) 47-55.
- [6] J. Wiseman, D. Duncan, J. Gibson, T. Crawford, Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines, *International Journal of Multiphase Flow*, 5 (1979) 437-462.
- [7] H. Louahlia-Gualous, B. Mecheri, Unsteady steam condensation flow patterns inside a miniature tube, *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007) 1225-1235.
- [8] B. Mederic, M. Miscevic, V. Platel, P. Lavieille, J-L. Joly, Experimental study of flow characteristics during condensation in narrow channels : the influence of the diameter channel on structure patterns, *Superlattices and Microstructures*, 35 (2004) 573-586.
- [9] G. El Achkar, P. Lavieille, J. Lluc, M. Miscevic, Heat transfer and flow distribution in a multichannel microcondenser working at low mass fluxes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (2011) 2319-2325.
- [10] S. Garimella, J.D. Killon, J.W. Coleman, An experimental validated model for two-phase pressure drop in the intermittent flow regime for noncircular microchannels, *Journal of Fluids Engineering*, 125 (2003) 887-894.
- [11] G. El Achkar, M. Miscevic, P. Lavieille, J. Lluc, J. Hugon, Flow patterns and heat transfer in a square cross-section micro condenser working at low mass flux, *Applied Thermal Engineering*, 59 (2013) 704-716.