

ETUDE EXPERIMENTALE DES STRUCTURES D'ÉCOULEMENTS DIPHASIQUES AIR-EAU EN CO-COURANT DANS UN TUBE CIRCULAIRE SOUS DIVERSES CONDITIONS D'ENTREE

S. Zeguai^{a,c}, S. Chikh^b, L. Tadrist^c, O. Rahli^c

^a Université Yahia Farès de Médéa (UYFM), Faculté des Sciences et de Technologie, Laboratoire LMP2M, Ain d'heb, Médéa 26000, Algérie

^b Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène (USTHB), Faculté de Génie Mécanique & Génie des Procédés, Laboratoire LTPMP, Bab Ezzouar, Alger 16111, Algérie

^c Aix-Marseille Université (U1, U2), Polytech'Marseille, Laboratoire IUSTI, CNRS UMR 6595, Technopôle de Château Gombert, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille, France

Résumé :

L'étude expérimentale menée a pour objectif d'analyser et de visualiser les structures d'écoulements diphasiques air-eau en co-courant en fonction des conditions d'entrée rigoureusement contrôlées. Un dispositif expérimental a été réalisé pour produire un écoulement diphasique air-eau dans un tube en verre de 3mm de diamètre intérieur, orientable par rapport à la gravité et instrumenté. Des mesures des débits eau et air, et des pressions à l'entrée et à la sortie associées à des visualisations par caméra rapide 1000 i/s sont mises en œuvre. Les premiers résultats obtenus permettent de mettre en évidence les différentes structures et d'établir des cartographies des différentes structures observées. Les mesures de pression à l'entrée et à la sortie de la conduite permettent d'évaluer la perte de charge pour chaque structure d'écoulement.

Mots clés: Miniconduite, Ecoulement diphasique gaz-liquide, Structures d'écoulements, Visualisation.

1. Introduction

La distribution des phases joue un rôle important dans l'hydrodynamique et les transferts dans les écoulements diphasiques. La chute de pression, le transfert de chaleur et de masse et la stabilité de l'écoulement sont sensibles à la structure morphologique des phases gaz/liquide. Généralement, une cartographie des régimes d'écoulements diphasiques basée sur des données expérimentales est employée pour prévoir une structure d'écoulement diphasique. Néanmoins, les limites de chaque structure ne sont pas exactement établies et il n'y a pas de consensus parmi les résultats édités quand il est question de mini ou microcanaux. Plusieurs paramètres liés aux conditions d'entrée peuvent affecter la structure d'écoulement. Le contrôle exact du débit de chaque phase et la manière dont elles sont introduites dans le tube permettent d'obtenir la structure d'écoulement désirée.

Une revue bibliographique révèle un nombre important de travaux réalisés sur les écoulements diphasiques dans les mini et microcanaux. Triplett et al. (1999) ont entrepris des expériences sur un écoulement air-eau dans des miniconduites horizontales avec une section circulaire ou triangulaire. Ils ont fondamentalement identifié cinq structures d'écoulements : à bulles, à bouchons, agités, bouchons/annulaires et annulaires et qui sont semblables à celles observées dans les conduites conventionnelles. Ces résultats sont en accord avec les précédents résultats de Damianides et Westwater (1988) et Fukano et Kariyasaki (1993) bien qu'un certain désaccord ait été obtenu pour la transition par rapport à la corrélation de Suo et de Griffith (1964). Coleman et Garimella (1999) ont analysé l'effet du diamètre hydraulique sur les frontières de transition pour des tubes ronds et les canaux avec une section rectangulaire en position horizontale. Une caméra rapide a été employée pour visualiser l'écoulement dans des canaux dont le diamètre hydraulique est compris entre 1.3 et 5.5 mm. Une gamme de vitesses apparentes a été explorée, $J_G = 0.1$ à 100 m/s pour la phase gazeuse et $J_L = 0.01$ à 10

m/s pour la phase liquide. Les structures d'écoulements observées sont : à bulles et à bulles dispersées, à bouchons, stratifiées, ondulées-annulaires et annulaires. Leurs résultats ont montré un accord global avec les résultats de Damianides et Westwater (1988), mais avec une légère différence dans la frontière de transition de l'écoulement dispersé. Kawahara et al. (2002) ont utilisé un tube capillaire de diamètre 100 μm dans lequel l'eau distillée et l'azote ont été injectés avec des vitesses apparentes de la phase du gaz et du liquide $J_G = 0.1$ à 60 m/s et $J_L = 0.02$ à 4m/s, respectivement. Les écoulements intermittents et semi-annulaires avec un film liquide lisse ont été obtenus, alors que les écoulements à bulles et agités n'ont pas été observés. L'évaluation du coefficient de frottement a montré une bonne concordance avec les corrélations utilisées dans la littérature. Serizawa et al. (2002) ont effectué des expériences sur des écoulements air-eau dans des tubes de 20, 25 et 100 μm de diamètres intérieurs et des écoulements vapeur-eau dans un tube de 50 μm de diamètre intérieur couvrant une large gamme de vitesses de 0.003 à 17.52 m/s pour la phase liquide et de 0.0012 à 295.3 m/s pour la phase gazeuse. Plusieurs structures d'écoulements air-eau ont été visualisées et identifiées, à savoir, l'écoulement à bulles dispersées, à bouchons de gaz, à anneaux liquides, annulaire, annulaire mousseux, à ruissellement, à gouttelettes liquides. Il a été confirmé que les structures d'écoulements diphasiques sont sensiblement influencées par les propriétés de la paroi sans compter d'autres paramètres. Il est devenu évident que la stabilité de l'écoulement annulaire et la formation de bouchons à gaz avec une couche du film liquide partiellement stable formée entre la paroi du tube et les bouchons à gaz apparaît à des vitesses élevées sous des conditions de traitement de surface soigneusement établies (Serizawa et al. (2002)). Chinnov et Kabov (2006) ont considéré des canaux capillaires avec différentes sections pour étudier l'effet de la capillarité et le comparer à d'autres effets. Ils ont classifié les canaux en se basant sur le degré de manifestation de la capillarité. Ils ont montré que les effets thermo-capillaires peuvent, dans certaines conditions, être significatifs pour des écoulements diphasiques anisothermes. L'influence des propriétés des liquides sur les structures d'écoulements ont été également étudiés par Yang et Shieh (2001) en utilisant le réfrigérant R134a. Ils ont rapporté dans leurs travaux que la transition de l'écoulement bulles/bouchons a été décalée par rapport au cas air-eau. En plus de l'effet de gravité, la tension superficielle joue un rôle important.

Dans le présent travail, nous étudions l'écoulement diphasique gaz-liquide en co-courant dans un tube de 3 mm de diamètre intérieur et de 1.5 m de longueur, en réalisant des investigations dans des conditions opératoires parfaitement contrôlées. Le dispositif expérimental permet de réaliser des expériences sur une veine orientable par rapport à la gravité. La phase gazeuse est amenée par une seringue à l'entrée de la conduite dans la section centrale et la phase liquide s'écoule dans la zone annulaire. Les gammes de vitesses apparentes considérées diffèrent notablement de celles considérées jusque là par les différents auteurs. Dans une première partie, nous présentons le dispositif expérimental mis en œuvre et l'instrumentation pour étudier les structures d'écoulement. Nous présenterons les résultats expérimentaux obtenus et les analyses préliminaires en les comparant aux résultats de la littérature.

2. Dispositif expérimental

Nous avons conçu un dispositif expérimental pour réaliser un écoulement diphasique avec des conditions d'entrée et de débits parfaitement contrôlées. Pour atteindre ces objectifs le dispositif est constitué de plusieurs composants. Il s'agit pour l'essentiel de la veine de mesure orientable allant de 0 à 180°, environnée de plusieurs éléments pour assurer les écoulements de liquide et de gaz. Un système d'injection d'air composé d'un tube capillaire permet l'amenée de l'air à l'entrée de la conduite où les deux phases sont mises en contact. La figure 1 représente une vue synoptique du dispositif expérimental.

2.1 Veine de mesure

La veine de mesure (voir Fig. 1) réalisée en laboratoire est constituée d'une chambre de détente pour le liquide de forme convergente de 21 cm de longueur solidaire à une conduite circulaire de 150 cm de longueur. La structure de la veine de mesure est en verre transparent. Le volume intérieur de la chambre de détente est complètement rempli de liquide (eau distillée). Cette veine de mesure est conçue pour être étanche dans la gamme de pressions relatives allant de 1 à 8 bars. L'air est injecté axialement sous pression dans la section de test par une buse de section circulaire de 0.26 mm de diamètre intérieur.

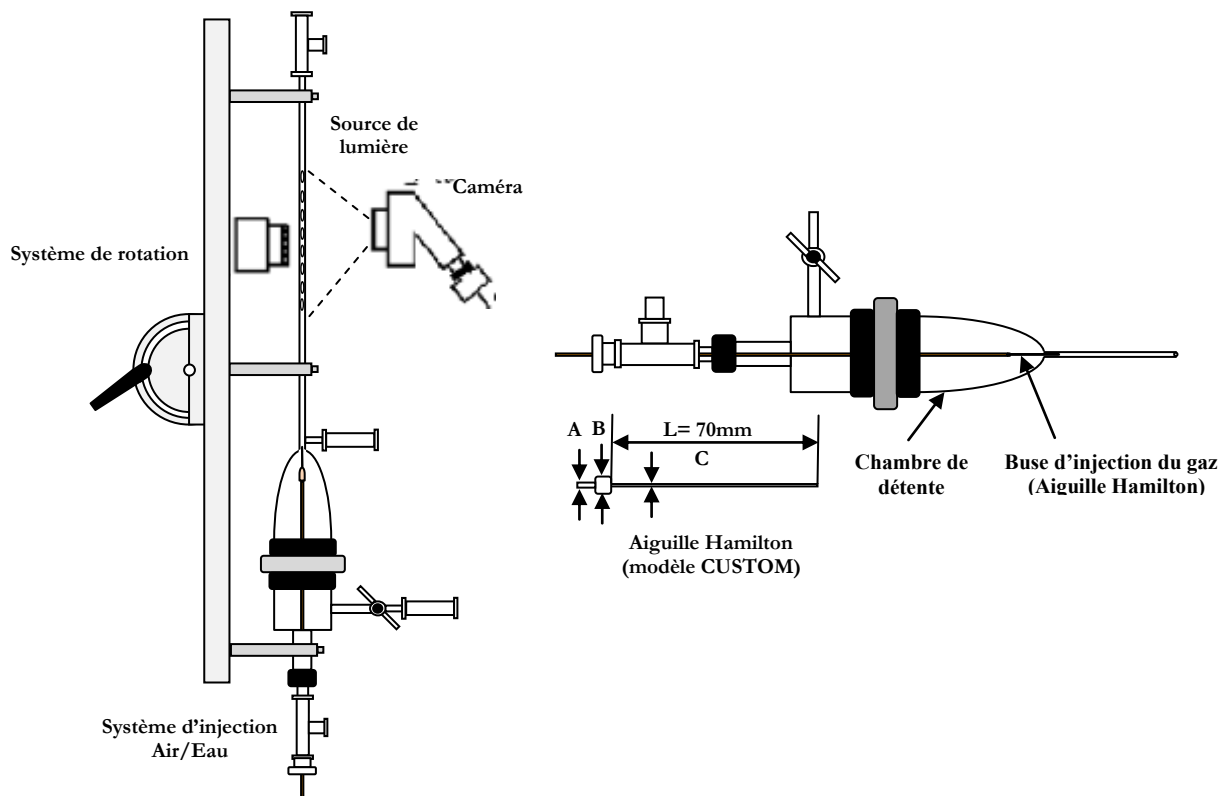


FIG.1 Dispositif expérimental

2.2 Protocole expérimental

Avant de procéder aux expériences, on commence par remplir complètement la veine de mesure en eau distillée et faire évacuer l'air piégé à l'intérieur de la chambre de tranquillisation par le système de purge. L'air est fourni à partir du réseau d'air comprimé du laboratoire entre 1 et 8 bars à une température de la pièce comprise entre 25° et 30°C. Il est filtré avant de traverser le débitmètre à air (sc Bronkhorst High-Tech B.V) qui permet un contrôle précis du débit d'air indépendamment des fluctuations de la température et de la pression. Cet instrument est équipé d'une valve et une électronique de commande gérée par un logiciel FLOW-BUS pour mesurer et réguler des débits s'étendant de 0.014 ml/min jusqu'à 1500 ml/min avec une précision de 1%. L'air est injecté axialement sous pression par une seringue de section circulaire de 0,26 mm de diamètre intérieur. Les pressions à l'entrée et à la sortie de la conduite sont mesurées avec deux capteurs de pression différentiels Sensym SCX100DN fonctionnant dans une gamme de 0-100 kPa avec une sensibilité de 7Pa/ μ V. L'incertitude du dispositif électrique est de 40 μ V qui est équivalente approximativement à 300 Pa. Les capteurs de pression sont calibrés entre 1 et 8 bars avec une centrale d'étalonnage DPI605 Druck 20 bars. Une carte PCI HP 34970A est employée pour l'acquisition de données. L'eau distillée est pompée d'un réservoir à 20-25 °C avec une pompe à engrenages (Tuthill pump). Le débit est commandé et contrôlé par un débitmètre (Sc Bronkhorst B.V) dans une gamme de 2 g/h jusqu'à 2000 g/h avec une incertitude de 0.2%. La visualisation du régime d'écoulement est réalisée à 128 cm à partir de l'entrée de la conduite en utilisant une caméra rapide à grande résolution (Ultima-FASTCAM 1024) et un agrandissement de 150 fois, une vitesse de 1000 i/s, d'une résolution de 1024x512 et d'une ouverture du diaphragme de 1/10000s. L'éclairage utilisé pour la visualisation est fourni par une source lumineuse froide réglable sous la section d'essai.

3. Résultats

3.1 Visualisation des structures d'écoulements

Nous présentons les résultats et les visualisations obtenus pour une conduite en position horizontale. Nous

avons mis en évidence huit structures d'écoulements: écoulement à bulles, écoulement de transition bulles/bouchons, écoulement à bouchons, écoulement de transition bouchons/annulaire, écoulement annulaire, écoulement annulaire ondulé, écoulement annulaire avec apparition de zones sèches et écoulement stratifié. La Figure 2 montre les structures d'écoulements avec les vitesses apparentes correspondantes. Nous avons identifié les frontières entre différentes structures d'écoulements à la différence des études antérieures excepté celles de Yang et Shieh (2001). Ces auteurs ont indiqué avec précision les frontières pour un écoulement diphasique du réfrigérant R134a et de l'air.

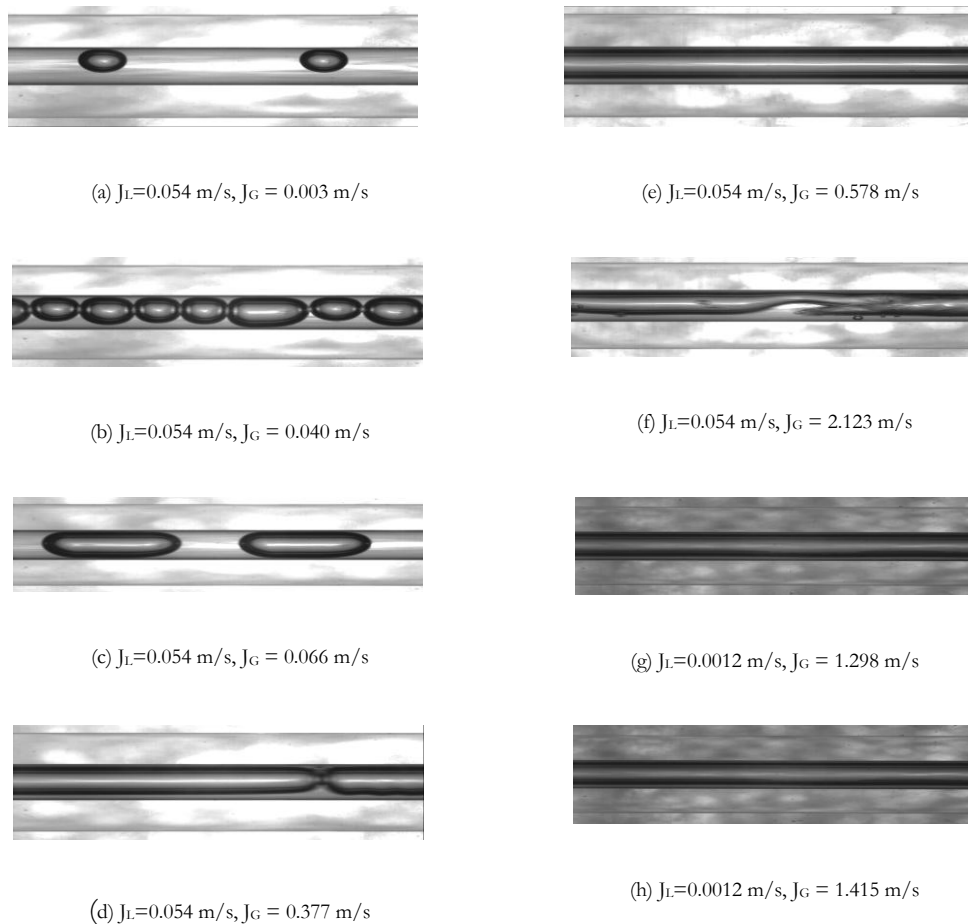


FIG.2 Visualisation des structures d'écoulements dans un tube horizontal de 3 mm de diamètre intérieur
 (a) Bulles, (b) Bulles/Bouchons (c) Bouchons, (d) Bouchons/Annulaire, (e) Annulaire,
 (f) Annulaire ondulé, (g) Annulaire partiellement asséché, (h) Stratifié.

3.2 Cartographie des structures d'écoulements

La figure 3 présente la cartographie des structures d'écoulements pour un écoulement air-eau dans un tube horizontal avec un diamètre intérieur de 3 mm dans le repère des vitesses apparentes (J_L , J_G). La vitesse apparente de l'eau varie de 0.0012 à 0.0786 m/s et la vitesse apparente d'air est comprise entre 0.003 à 3.538 m/s. A petites vitesses apparentes de l'eau et de l'air ($J_L = 0.0012$ m/s, $J_G = 0.002$ m/s) nous observons un écoulement à bouchons. L'augmentation progressive du débit de l'air engendre successivement une transition de structure bouchons/annulaire vers annulaire. Cette structure annulaire évolue en augmentant le débit d'air. Il y a assèchement partiel et stratification des phases à faibles vitesses d'eau. Pour des vitesses d'eau plus élevées, l'interface liquide-gaz tend à se plisser et former des ondulations. Il faut également noter que le régime d'écoulement à bulles n'apparaît pas pour de très faibles vitesses du liquide.

Ces observations sont en bon accord avec les résultats de la littérature en termes de structures d'écoulement (Damianides, C.A, Westwater, J.W., 1988, Yang et Shieh (2001)). Cependant, il est à préciser que toutes les structures d'écoulements obtenues dans nos expériences sont dans une gamme de vitesses très différente des études antérieures ($J_L = 0.01-10$ m/s, $J_G = 0.01-100$ m/s).

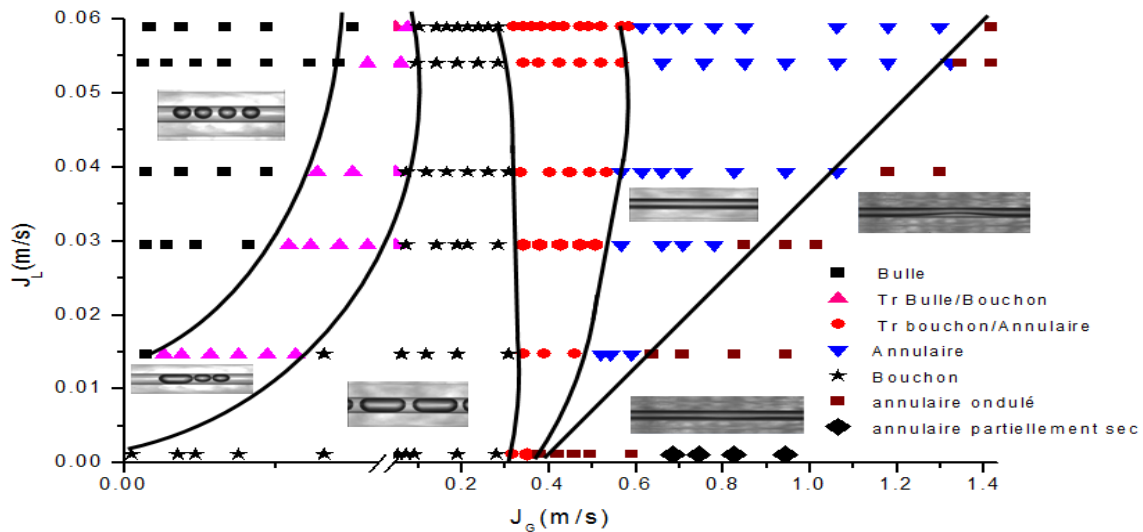


FIG.3 Cartographie des structures d'écoulements diphasiques air/eau dans un tube horizontal de 3mm de diamètre intérieur.

Il est à noter que, dans la gamme des débits étudiés, pour des faibles débits de la phase liquide correspondant à $J_L < 0.015$ m/s, l'écoulement à bouchons et annulaire ondulé sont les structures les plus observées. On passe de l'une à l'autre en augmentant le débit d'air avec des zones de transition plutôt courtes. A des débits d'eau plus élevés, $J_L > 0.04$ m/s, les structures à bulles et annulaire sont plus fréquentes avec des transitions modérées (bulles/bouchons, bouchons et bouchons/annulaire).

4. Perte de pression

La figure 4 présente les pertes de pression mesurées ΔP dans un tube de test de 3mm de diamètre intérieur, en fonction de la vitesse apparente du gaz J_G pour différentes vitesses apparentes du liquide J_L . La chute de pression mesurée $\Delta P_{\text{mesurée}}$ dans l'écoulement diphasique horizontal inclut la chute de pression $\Delta P_{\text{frottement}}$ due au frottement avec la paroi et $\Delta P_{\text{accélération}}$ due à l'accélération résultante de l'expansion volumétrique de l'air. Les chutes de pression d'accélération peut être estimée en utilisant le modèle de l'écoulement homogène (Collier, 1972 ; Hewitt et al 1993). Les résultats illustrés sur la Fig.4 montrent que le gradient de pression augmente avec l'augmentation de J_L et J_G . Ces résultats sont conformes à ceux trouvés par des études antérieures utilisant le modèle d'écoulement homogène, par exemple, pour l'écoulement ammoniac-vapeur dans des microcanaux circulaires avec un diamètre intérieur compris entre 1.46 – 3.15 mm par Ungar et Cornwell (1992), et pour l'écoulement air-eau dans les microcanaux circulaires et semi-triangulaires avec un diamètre hydraulique compris entre 1.09 et 1.49 mm par Triplett et al (1999b).

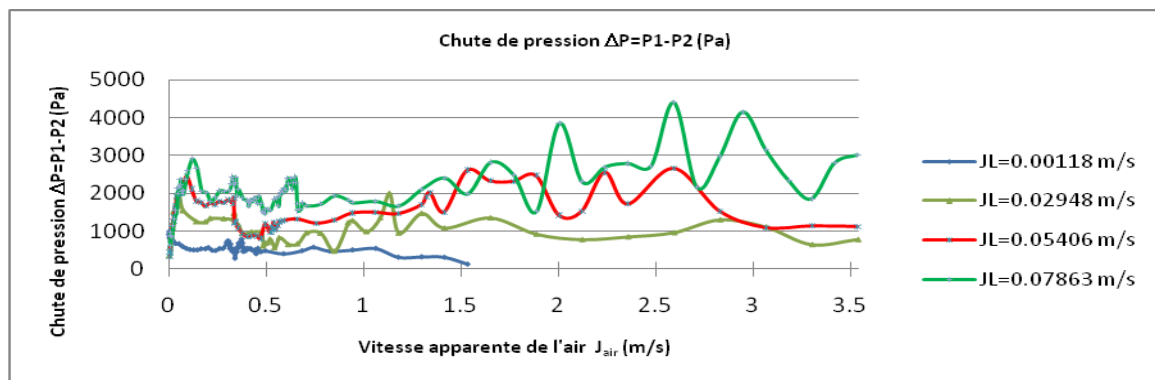


FIG.4 Perte de pression $\Delta P = P_1 - P_2$ (P_1 et P_2 : pressions à l'entrée et à la sortie de la conduite) en fonction de la vitesse apparente de l'air en position horizontale.

5. Conclusion

Un dispositif expérimental a été conçu et réalisé pour étudier les écoulements diphasiques gaz-liquide dans des conduites de diamètres de taille millimétrique (3mm-0.8mm). L'étude expérimentale est effectuée pour analyser les écoulements diphasiques avec des conditions d'entrée parfaitement contrôlées. Nous avons présenté les premiers résultats d'écoulements diphasiques air-eau dans un tube de diamètre intérieur de 3 mm avec une orientation horizontale.

Les structures d'écoulements observées sont analogues à celles déjà rapportées dans la littérature. A la différence des études précédentes, nous avons observés ces structures dans des gammes de vitesses différentes de celles considérées dans la littérature. Ces résultats nous amènent à conclure que les vitesses apparentes des deux phases ne sont pas suffisantes pour définir une structure d'écoulement dans un écoulement diphasique.

Par ailleurs les différentes structures que nous avons mises en évidence dérivent de trois structures principales : bulles, bouchons, annulaire. L'analyse détaillée de ces différents régimes fera également l'objet de travaux théoriques pour tenter de prédire l'apparition des différentes structures lorsque les conditions d'entrée sont bien maîtrisées.

References

- Triplett, K.A., Ghiaasiaan, S.M., Abdel-Khalik, S.I., Sadowski, D.L., 1999. Gas-liquid two-phase flow in microchannels part I: two-phase flow patterns. *Int. J. Multiphase Flow* 25, 377–394.
- Triplett, K.A., Ghiaasiaan, S.M., Abdel-Khalik, S.I., LeMouel, A., McCord, B. N., 1999. Gas-liquid two-phase flow in microchannels part II: void fraction and pressure drop. *Int. J. Multiphase Flow* 25, 395–410.
- Damianides, C.A, Westwater, J.W., 1988. Two-phase flow in a compact heat exchanger and in small tubes. In: *Proceedings of the Second UK National Conference on Heat Transfer*, vol. II, pp. 1257-1268.
- Fukano, T, Kariyasaki, A., 1993. Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary. *Nucl. Engineering. Des* 141, 59-68.
- Suo, M, Griffith.P., 1964. Two-phase flow in capillary tubes. *J. Basic Engineering* 86, 576-582.
- Coleman, J.W., Garimella, S., 1999. Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. *Int. J. Heat Mass Transfer* 42, 2869 –2881.
- Kawahara, A., Chung, P.M.-Y., Kawaji, M., 2002. Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. *Int. J. Multiphase Flow* 28, 1411–1435.
- Serizawa, A., Feng, Z., Kawara, Z., 2002. Two-phase flow in microchannels. *Exp. Thermal Fluid Sci.* 26, 703–714.
- Chinnov. E. A, Kabov. O. A., 2006. Two-Phase Flows in Pipes and Capillary Channels. *High Temperature*. Vol. 44, No. 5, 2006, pp. 773–791.
- Yang, C.-Y., Shieh, C.-C., 2001. Flow pattern of air–water and two-phase R-134a in small circular tubes. *Int. J. Multiphase Flow* 27, 1163–1177.
- Ungar, E.K., Cornwell, J.D., 1992. Two-phase pressure drop of ammonia in small diameter horizontal tubes. *AIAA 17th Aerospace Ground Testing Conf.*, Nashville, TN, July 6–8.