



# Analyse expérimentale des phénomènes d'engorgement dans des aérocondenseurs

Hasna Louahlia-Gualous

## ► To cite this version:

Hasna Louahlia-Gualous. Analyse expérimentale des phénomènes d'engorgement dans des aérocondenseurs. CFM 2013 - 21ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2013, Bordeaux, France. hal-03439772

**HAL Id: hal-03439772**

**<https://hal.science/hal-03439772>**

Submitted on 22 Nov 2021

**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.

# Etude expérimentale des vitesses limites d'engorgement pour un aérocondenseur

KH. LE VAN<sup>a</sup>, D. BERRICHON<sup>a</sup>, H. LOUAHLIA-GUALOUS<sup>a</sup>, PH. BANDELIER<sup>b</sup>, P. CLEMENT<sup>b</sup>, X. GUERIF<sup>c</sup>, A. DERUELLE<sup>c</sup>, I. VOICU<sup>a</sup>

a. Université de Caen Basse Normandie, LUSAC, 120 rue de l'exode, 50000 Saint Lô.

b. CEA/LITEN, 17 rue des Martyrs, 38054 Grenoble, France.

c. GEA-BTT, 25 rue du Ranzai, 44300 Nantes.

## Résumé:

*Les échangeurs de chaleur à changement de phases vapeur-liquide sont très utilisés dans plusieurs applications industrielles. Dans le cas des condenseurs, l'efficacité énergétique de ces échangeurs peut être limitée à cause du problème d'engorgement de la phase liquide par l'écoulement de la vapeur en contre-courant. Ce phénomène d'engorgement empêche l'évacuation du condensat et augmente la résistance thermique aux transferts de masse et de chaleur. Dans cet article, on présente une étude expérimentale sur les limites d'engorgement pour un écoulement adiabatique air-eau en contre-courant dans un tube. Les résultats d'essais sont présentés et analysés pour différents débits d'écoulement d'eau et pour deux positions du tube testé : verticale et inclinée.*

## Abstract:

*The heat exchangers with phase change (vapor-liquid) are used in numerous industrial applications. Their thermal efficiency could be limited because of the liquid phase flooding by counter current vapor phase. Flooding phenomenon occurs when the maximum vapor velocity above which the condensate film will be carried upward rather than draining to the bottom, reducing heat and mass transfers in the heat exchanger. In this paper, experimental study on the flooding phenomenon under adiabatic conditions is investigated. Experimental results are presented and analyzed for different water mass flow rate and for two positions: vertical tube and inclined tube.*

**Mots clefs:** engorgement, diphasique, tube, écoulement adiabatique, inclinaison

## 1 Contexte de l'étude et objectifs

Dans les centrales de production d'électricité fonctionnant suivant le cycle de Rankine, l'eau est majoritairement utilisée comme fluide de travail. L'énergie contenue dans l'eau vaporisée est récupérée par l'intermédiaire de turbines. Ensuite, le circuit étant fermé, la vapeur est condensée dans un échangeur sous vide partiel. Selon la source froide disponible, on peut utiliser soit un condenseur alimenté par de l'eau froide, soit un aérocondenseur qui utilise l'air comme source froide. Le changement de phase vapeur liquide se produit à très basse pression à l'intérieur des tubes de l'aérocondenseur afin de maximiser le rendement de Carnot du cycle permettant un gain d'efficacité énergétique de toute l'installation. Dans certaines conditions, lorsque la vapeur et le condensat s'écoulent à contre-courant, l'écoulement diphasique peut présenter des problèmes d'engorgement à l'intérieur des tubes pour des vitesses de vapeur correspondant à des débits de condensat bien définis. Ce problème fortement lié à la structure de l'écoulement et aux propriétés physiques des fluides, réduit considérablement l'efficacité énergétique des centrales. Dans le cadre du projet FUI/CAFEE (Condenseur à Air à Forte Efficacité Énergétique), une étude est menée conjointement entre trois partenaires : UCBN/GEA-BTT/CEA-LITEN pour mesurer les vitesses limites d'engorgement. Ce projet de recherche fédère les compétences scientifiques de plusieurs organismes industriels et universitaires dans le but de mettre au point des moyens d'optimisation et d'amélioration de l'efficacité énergétique des aérocondenseurs.

Les écoulements diphasiques sont très fréquents dans de nombreuses autres applications industrielles à différentes échelles, telles que : l'électronique, la climatisation, les piles à combustible, le transport, etc. Leur caractérisation est nécessaire pour la conception et le dimensionnement des systèmes afin de repousser leurs

limites d'utilisation et élargir leurs champs d'applications. Dans la littérature, on relève plusieurs études expérimentales et théoriques sur les limites d'engorgement pour des écoulements adiabatiques air-eau ou des écoulements en condensation [1-10]. Les auteurs ont défini l'engorgement comme étant la condition limite de disparition de l'écoulement annulaire en contre-courant. Cet écoulement est constitué d'un écoulement de film liquide réparti sur la surface interne du tube et d'un écoulement de gaz (ou de vapeur) s'écoulant en sens inverse à celui du liquide dans l'espace délimité par la surface du film liquide (figure 1a). Pour des grandes vitesses du gaz, l'écoulement tombant du liquide à l'intérieur du tube, peut être orienté en sens inverse sous l'effet des contraintes tangentielles du gaz à l'interface liquide-gaz. Ceci marque le début de l'engorgement qui est dû à un transport de vagues liquides qui apparaissent sur la surface du film comme le montre la figure 1b. Ces vagues, dont l'amplitude augmente avec la vitesse du gaz, engendrent une diminution de la section de passage du gaz et par conséquent une augmentation de la perte de charge. Dans le cas de tubes de petit diamètre, l'amplitude de ces vagues atteint le rayon du tube et bloque l'écoulement du gaz à cause de la formation d'une colonne liquide qui se forme dans la zone supérieure du tube [3]. En augmentant la vitesse du gaz, la colonne liquide peut être évacuée vers l'extérieur du tube. La vitesse critique d'engorgement, à partir de laquelle le débit du liquide en sortie du tube devient nulle, dépend de celle du gaz [1-3], du diamètre du tube [5-6], de son orientation [7-8], etc.

Cet article présente une description du banc et de la section d'essais développés pour effectuer des mesures des vitesses d'engorgement pour un écoulement adiabatique air-eau en contre-courant. Les essais sont effectués pour différents débits d'eau. Les structures d'écoulements diphasiques sont visualisées et les pertes de charge sont mesurées à l'engorgement.

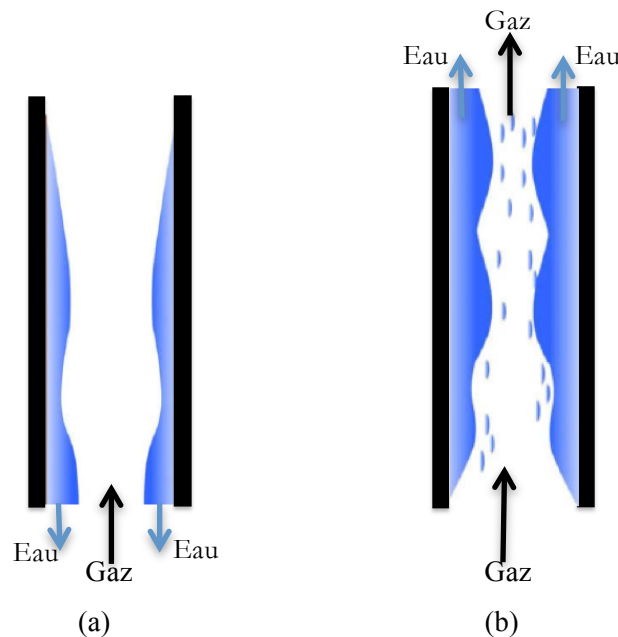


Figure 1. Schéma d'un écoulement en contre-courant : (a) écoulement avant engorgement, (b) écoulement après engorgement.

## 2 Description du banc d'essais expérimentale

Un banc d'essais expérimental est mis en place au laboratoire pour mesurer les vitesses d'air limites d'engorgement pour des tubes transparents verticaux ou inclinés. Il permet également de visualiser les différentes structures d'écoulement diphasique en faisant varier les vitesses de l'air et de l'eau. La figure 2 présente un schéma de principe de ce dispositif qui est composé en plus de la section d'essais, de 2 circuits indépendants : un circuit d'alimentation du tube en air et un circuit d'alimentation en eau. Le premier circuit est constitué d'un surpresseur (1) dont la vitesse de rotation est commandée par un variateur électronique (2). Un filtre (3) est placé à l'entrée du surpresseur pour éliminer les impuretés dans l'air aspiré. Une gaine flexible (4) est utilisée pour raccorder la sortie du surpresseur à l'entrée de la section d'essais. Un anémomètre à hélice (5) d'une précision de 0,5% permet de mesurer la vitesse débitante de l'air. Le circuit d'alimentation en eau est constitué d'un bac d'eau (6) dont le niveau d'eau est contrôlé. Une pompe (7) aspire l'eau de la cuve et la renvoie vers l'entrée de la section d'essais après une filtration de cette eau à l'aide d'un filtre (8) qui permet d'éliminer les impuretés de tailles supérieures à 60  $\mu\text{m}$ . Le débit d'eau à l'entrée de la section d'essais est réglé

par une vanne pointeau (9) placée après la sortie de la pompe. Un débitmètre électromagnétique (10) est utilisé pour mesurer le débit volumique d'eau. Il a été étalonné en comparant les débits d'eau mesurés à ceux obtenus par pesée en utilisant une balance de précision. Les débits d'eau sont mesurés avec une précision de 0,5%.

Une centrale d'acquisition de type National Instruments (14) raccordée à un ordinateur (15) assure l'enregistrement des mesures de l'ensemble des capteurs de pressions, de températures, de vitesse d'air et de débit d'eau dans le dispositif expérimental.

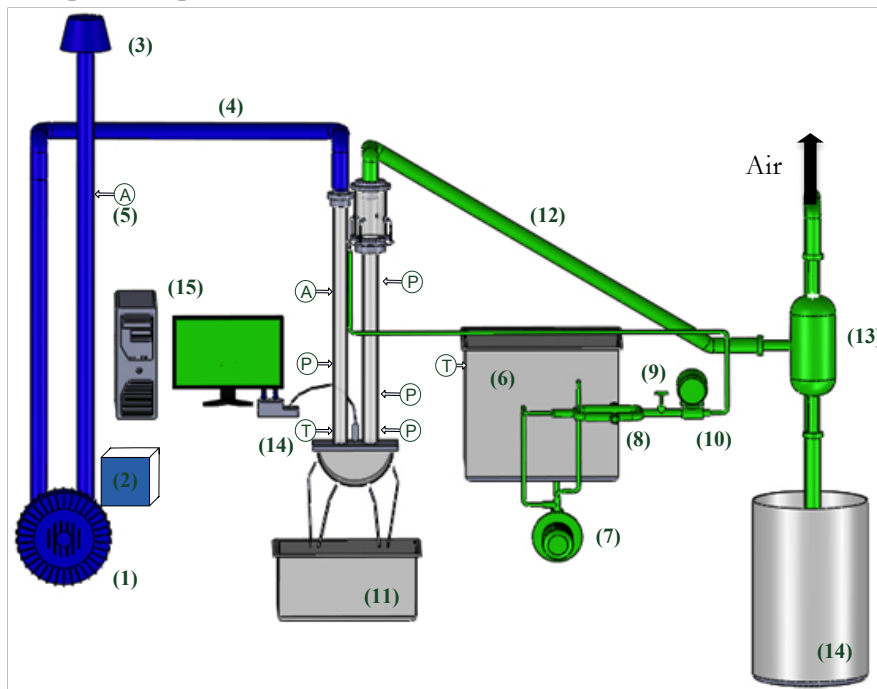


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental

## 2.1 Description de la section d'essais

La section d'essais constitue l'élément principal de l'ensemble du dispositif expérimental (figure 2). Elle est constituée de deux tubes dont un tube transparent, de diamètre intérieur 54mm, permettant l'arrivée d'air. Un capteur de pression et un thermocouple sont placés le long de ce tube. A la sortie de ce tube, l'air passe dans une boîte de retournement dont la forme est comparable à celle utilisée dans les aérocondenseurs fabriqués par GEA-BTT. Par la suite, l'air est envoyé à l'entrée du tube d'essais de diamètre 54mm et y circule du bas vers le haut. Dans le tube d'essais, la circulation de l'eau s'effectue du haut vers le bas et en contre-courant par rapport à celui de l'air. La température de cette eau est contrôlée au cours des essais. Un thermocouple chromel-alumel est placé dans la cuve (6) assurant une mesure en continue de la température de l'eau. Un distributeur d'eau alimenté en continu par l'eau provenant de la cuve (6), est placé en haut du tube d'essais. Il est constitué d'un réservoir de forme cylindrique en polycarbonate contenant un tube poreux dont la porosité est de  $70\ \mu\text{m}$ . L'eau dans ce réservoir traverse radialement le poreux et s'écoule sur la paroi intérieure du tube d'essais. Le rôle du poreux est d'assurer la formation d'un film liquide homogène sur toute la surface interne du tube d'essais. Avant le point d'engorgement, l'eau quittant le tube d'essais s'écoule dans la boîte de retournement avant d'être récupérée par un deuxième réservoir (11) comme le montre la figure 1. L'eau contenue dans ce réservoir est ensuite évacuée vers le réservoir (6). L'air sortant de la section d'essais est évacué de l'extrémité supérieure du tube d'essais à l'aide d'une gaine flexible (12). Cet écoulement d'air peut éventuellement être chargé d'une quantité d'eau entraînée par l'air au début et lors de l'engorgement. C'est pourquoi un séparateur (13) est placé sur le circuit afin de séparer et récupérer l'eau dans le réservoir (14) ; l'air est alors évacué vers l'extérieur. Le tube d'essais est équipé d'un capteur de pression différentielle permettant de mesurer la perte de charge entre l'entrée et la sortie. Des capteurs de pression absolue sont installés à l'entrée et à la sortie du tube d'essais et également à 10 cm de l'entrée du tube. Cette distance est repérée comme étant la zone de début de formation de l'engorgement. Enfin, un capteur de pression et un thermocouple sont installés dans la boîte de retournement pour mesurer la pression et la température du mélange air-eau.

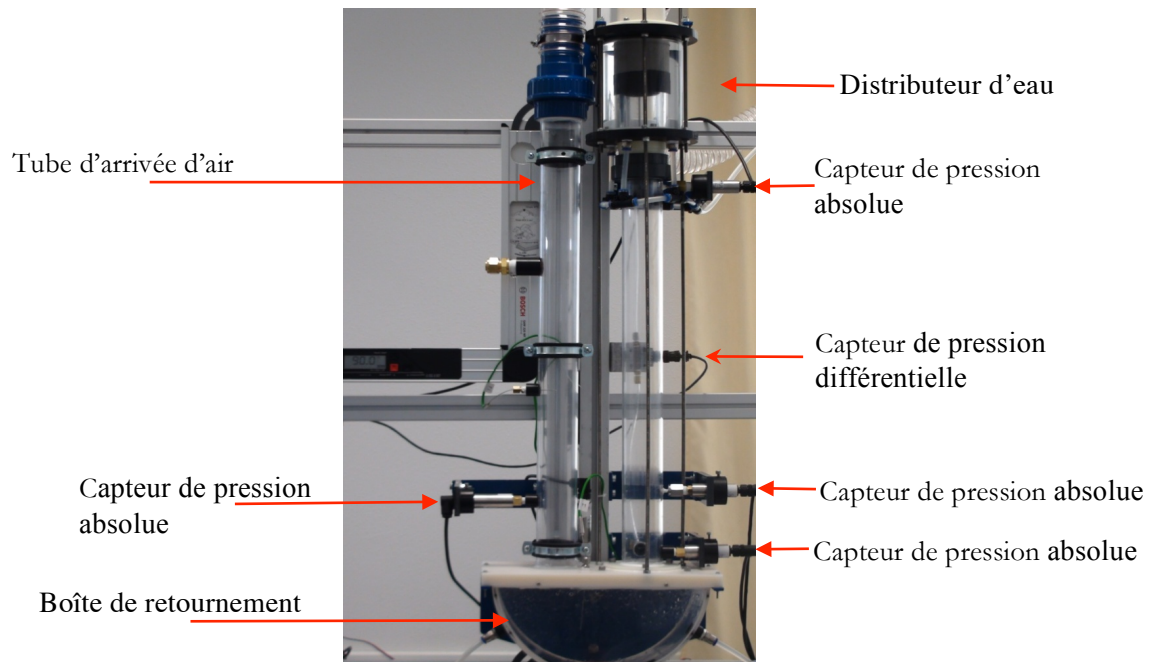


Figure 3: Photo de la section d'essais.

## 2.2 Procédure expérimentale

Les essais sont effectués pour plusieurs débits d'eau car la vitesse limite d'engorgement en dépend. Au début de chaque essai, le débit d'eau est fixé à une valeur donnée. L'eau s'écoule le long du tube d'essais et se répartie uniformément en formant un film liquide en contact avec la surface interne de ce tube. Dès que l'écoulement d'eau devient stable à l'intérieur du tube, l'air est envoyé dans la section d'essais. En effet, on fait varier la vitesse de l'air en partant de 0 m/s jusqu'à la valeur à laquelle apparaît l'engorgement. Pour chaque vitesse d'air imposée, les réponses de tous les capteurs de pressions et des thermocouples sont enregistrées.

## 3 Résultats expérimentaux

### 3.1 Différentes structures de l'écoulement observées

En fixant le débit d'eau à une valeur donnée et en faisant varier la vitesse d'air à l'entrée de la section d'essais, différentes structures d'écoulements diphasiques sont observées. Pour chaque vitesse d'air imposée, la perte de charge dans le tube est mesurée par le capteur de pression différentielle. Avant la phase d'engorgement, les écoulements d'eau et d'air sont en contre-courant. La figure 4 présente des photos des principales structures d'écoulements identifiées depuis le début d'injection de l'air dans le tube jusqu'à l'engorgement. Ces photos sont prises pour un écoulement d'eau de 135 kg/h. La figure 4a présente la répartition du film liquide obtenue à l'intérieur du tube d'essais sans écoulement d'air. En imposant un faible débit d'air, le phénomène d'arrachement de gouttelettes est observé à l'extrémité inférieure du tube correspondante à la zone d'entrée de l'air (Figure 4b). Ces gouttelettes sont décrochées du film d'eau sous l'effet de la contrainte tangentielle de l'air à la surface du film. Elle sont emportées par l'écoulement d'air vers la sortie du tube. En augmentant la vitesse de l'air, la figure 4c montre la formation de vagues interfaciales sur la surface du film. Ces vagues deviennent de plus en plus visibles en bas de la section d'essais où le film liquide s'épaissit et la vitesse d'attaque de l'air est maximale. L'amplitude de ces vagues augmente avec la vitesse de l'air sous l'effet de la contrainte interfaciale qui dépasse largement l'effet de la pesanteur sur le film. La figure 4d montre que l'augmentation de la vitesse d'air finit par engendrer un transport de masse d'eau vers le haut du tube d'essais. La majeure partie du débit d'eau (plus de 95%) est évacuée par l'écoulement d'air : c'est le point d'engorgement, uniquement quelques gouttelettes d'eau arrivent à s'échapper et retombent dans la boîte de retournement (figure 4e). La part d'eau évacuée par l'air finit par atteindre 100% en augmentant d'avantage la vitesse de l'air de telle sorte que les forces de frottement à l'interface eau-air inversent totalement l'écoulement d'eau.

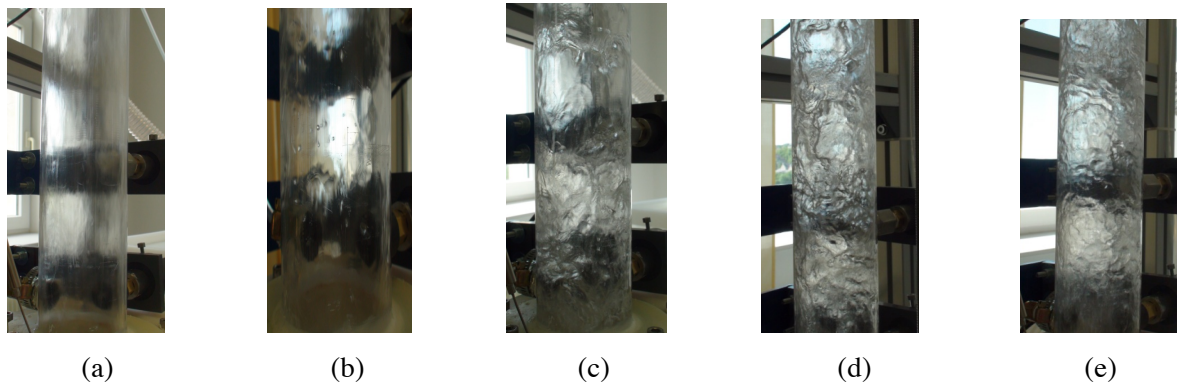


Figure 4 : Photos des structures d'écoulement air-eau : (a) Sans écoulement d'air, (b) décrochage de gouttelettes, (c) formation de vagues interfaciales, (d) transport d'eau en contre sens, (e) engorgement total.

Ces structures d'écoulement sont identifiées pour toute la plage des débits d'eau testés. La figure 5 présente l'évolution de la perte de charge mesurée entre l'entrée et la sortie du tube d'essais pour un débit d'eau de 135 kg/h et des vitesses superficielles de l'air variables entre 0 et 18 m/s. Ces vitesses sont calculées en supposant que le débit d'air occupe toute la section du tube d'essais. La figure montre que la perte de charge de l'écoulement est fortement influencée par la structure de l'écoulement diphasique et que la vitesse limite d'engorgement est obtenue pour une perte de charge maximale. Ceci a été confirmé dans la littérature par d'autres auteurs. A partir de cette figure, on peut conclure que la vitesse limite de l'air à laquelle apparaît l'engorgement total est de 11 m/s pour un débit d'eau de 135 kg/h.

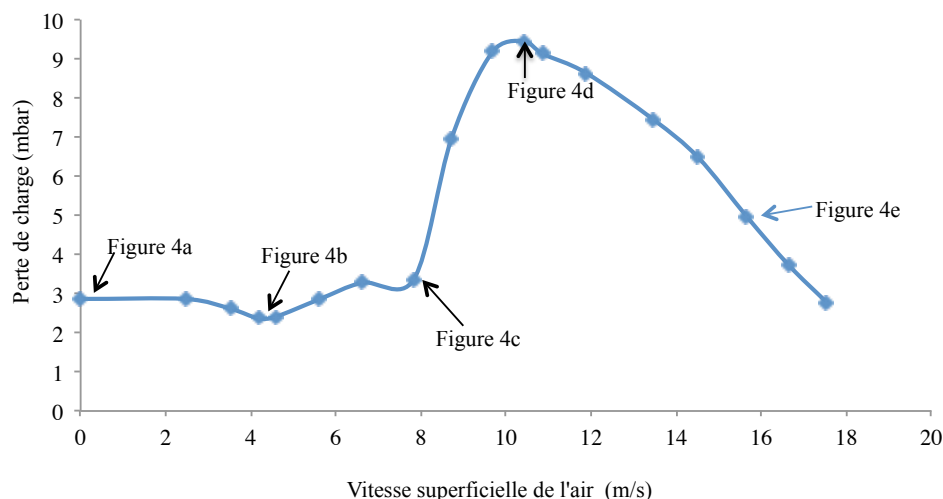


Figure 5 : Perte de charge mesurée en fonction de la vitesse superficielle de l'air.

### 3.2 Vitesses limites d'engorgement

Pour différents débits d'écoulement d'eau, la figure 6a présente les vitesses limites de l'air auxquelles l'engorgement de l'écoulement est identifié. Ces vitesses superficielles de l'écoulement d'air sont mesurées pour un tube en positions verticale et inclinée de 75° par rapport à l'horizontale. Les résultats d'essais sont validés par comparaison avec des corrélations établies par Alekseev et al. [9], Mc Quillan & Whaley [10] et Wallis & Hewitt [4]. Elles sont en accord avec les prédictions de ces auteurs définies pour des grands débits d'eau. L'inclinaison du tube a un effet significatif sur l'augmentation de la vitesse limite d'engorgement. En effet, l'inclinaison du tube favorise le drainage du film liquide qui est repoussé et s'accumule sur le côté du tube. Ceci implique que la contrainte interfaciale de l'air permettant de repousser l'écoulement d'eau tombant du tube doit être augmentée. Ceci explique que pour le même débit d'eau, la vitesse d'air d'engorgement de l'écoulement est plus importante pour un tube incliné de 75° que pour un tube vertical. La figure 6b confirme ce raisonnement puisque pour le même débit d'eau, la perte de charge est diminuée en inclinant le tube d'essais.



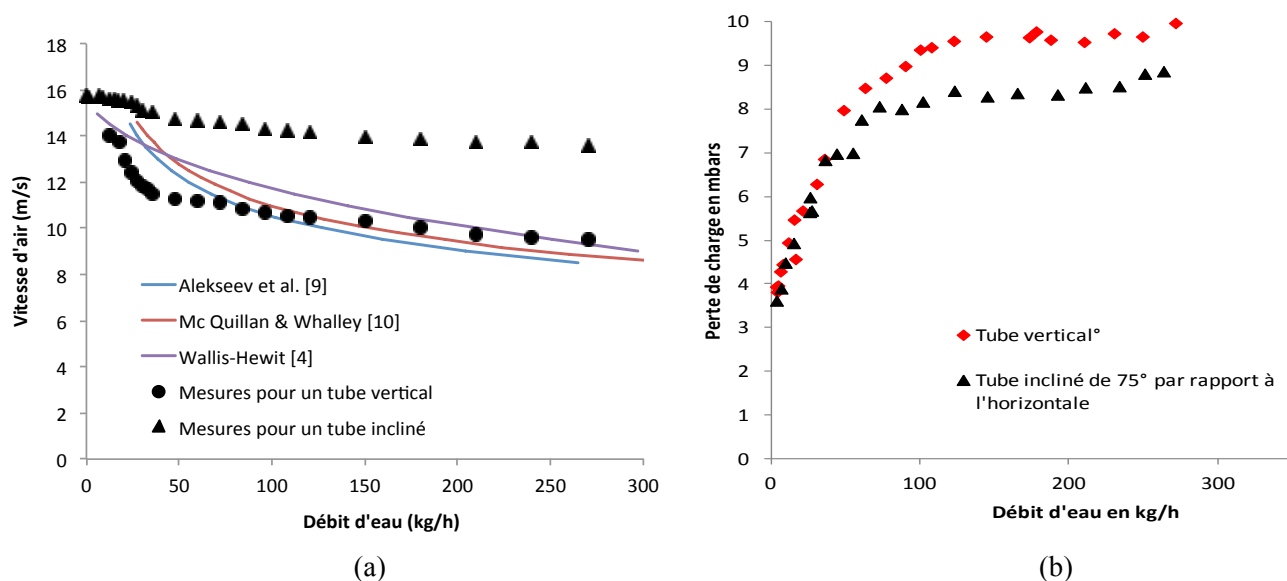


Figure 6 : Effet de l'inclinaison : (a) Vitesses limites d'engorgement, (b) Pertes de charge totales.

## 4 Conclusion

Cet article présente des résultats d'une étude expérimentale sur la mesure des vitesses limites d'engorgement. Les résultats obtenus pour un tube vertical sont en accord avec les prédictions issues de corrélations publiées dans la littérature. Cette comparaison a permis de valider notre procédure expérimentale. Différentes structures d'écoulement diphasique sont identifiées durant les essais. On montre que la vitesse limite d'engorgement diminue lorsque la vitesse superficielle de l'eau augmente, mais aussi qu'elle augmente avec l'inclinaison du tube par rapport à la verticale, pour une même vitesse superficielle de l'eau. La visualisation de l'écoulement a permis de confirmer que l'engorgement engendre une chute de pression maximale dans l'écoulement. Ceci montre que la perte de charge peut être utilisée comme critère pour détecter non seulement l'engorgement lors de la condensation dans un tube opaque, mais aussi les points remarquables qui précèdent l'engorgement total.

## Remerciements

Les auteurs de cet article remercient le Fond Unique Interministériel pour son support financier au projet CAFEE de R&D coordonné par l'entreprise GEA-BTT à Nantes.

## References

- [1] Sacramento, J.C. P.J. Heggs, The role of flooding in the design of vent and reflux condensers, *Applied Thermal Engineering* 29 1338–1345, 2009.
- [2] Choutapalli, I., Vierow, K., Wall pressure measurements of flooding in vertical countercurrent annular air-water flow, Department of Mechanical Engineering, University of Texas, USA, 2010.
- [3] Girard, R. and Chang, J.S., Reflux Condensation Phenomena in Single Vertical Tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 35 (9), 2203-2218, 1992.
- [4] Hewitt, G.F., Wallis, Flooding and associated Phenomena in Falling Film Flow in a Vertical Tube, Rapport numéro AERE-R4022, Harwell, UK, 1963.
- [5] Vijayan, M., Jayanti, S., Balakrishnan, A.R., Effect of tube diameter on flooding, *International Journal of Multiphase flow*, 797-816, 2001.
- [6] Jayanti, S., Tokarz, A., Hewitt, G.T., Theoretical investigation of diameter effect on flooding in countercurrent flow, Department of chemical Engineering, Londres, 307-324, 1996.
- [7] Mouza, A.A., S.V. Paras, and A.J. Karabelas. Incipient flooding in inclined tubes of small diameter. *Int. J. Multiphase Flow*, 29, 1395-1412, 2003.
- [8] Zapke, A. and Kröger, D.G., The influence of liquid Properties and inlet geometry on flooding in vertical and inclined tubes, *International Journal of Multiphase Flow*, 22 (3) 461-472 1996.
- [9] Alekseev, V.P., Poberezkin, A.E., Gerasimov P.V., 1972, Determination of flooding regular packings, *Heat Trans. Soviet Res.* 4, 159-163.
- [10] McQuillan, K.W. and Whalley, P.B., A Comparison between Flooding Correlations and Experimental Flooding Data for Gas-Liquid Flow in Vertical Circular Tubes, *Ch. Eng. Science*, 40 (8) 1425-1440, 1985.