

Etude par bi-sonde optique d'un écoulement à bulles d'une colonne air-lift sous dépression

A. Hassan Barkai^a, M. El Hajem^b, D. Bongo^c, J-Y. Champagne^d

a. laboratoire LMFA-INSA de Lyon, France. allatchi.hassan-barkai@insa-lyon.fr

b. laboratoire LMFA-INSA de Lyon, France. mahmoud.elhajem@insa-lyon.fr

c. laboratoire LMFA-INSA de Lyon, France. djimako.b5@gmail.com

d. laboratoire LMFA-INSA de Lyon, France. jean-yves.champagne@insa-lyon.fr

...

Résumé :

L'étude présentée dans ce manuscrit a pour objectif de déterminer les fonctions indicatrices de phase d'un écoulement diphasique au sein d'une colonne air-lift à dépression. Ces fonctions sont le taux de vide, la vitesse d'interface et la granulométrie des bulles, le débit et la vitesse de la phase liquide. La colonne air-lift à dépression qui fait l'objet de la présente étude est basée sur le principe de l'air-lift et de la flottation, le tout sous dépression. La technologie a été brevetée par l'IFREMER et l'INSA de Lyon. La colonne combine dans son fonctionnement des fonctions de pompage hydraulique, de transferts de solutés et de séparation de phases particulières et qui a la particularité de minimiser les coûts énergétiques. Le procédé de colonnes air-lift sous dépression est en cours de développement et l'étude expérimentale de son hydrodynamique est l'un des axes en cours d'exploration en vue d'optimiser sa conception et son fonctionnement. Les expériences ont été réalisées sur une colonne verticale composée de deux tubes concentriques en plexiglas connectées à un bassin de recirculation d'eau et à une pompe à vide. Pour l'ensemble des expériences une eau déminéralisée est utilisée dont le débit est mesuré par un débitmètre par ultrason. L'air comprimé du réseau est filtré, puis passe à travers un pressostat avant d'entrée dans un débitmètre massique permettant de consigner le débit d'air voulu pour l'air-lift. L'analyse expérimentale est effectuée à l'aide d'une instrumentation diphasique constituée par une bi-sonde à fibre optique. L'utilisation des techniques expérimentales a permis d'avoir une meilleure compréhension de l'hydrodynamique de l'écoulement diphasique. La bi-sonde à fibre optique posée entre brides de colonne a permis d'avoir une cartographie complète de l'écoulement de la phase dispersée. L'utilisation d'un débitmètre massique et d'un débitmètre par ultrason, dans différentes configurations de l'écoulement, a permis d'avoir des données sur le fonctionnement de la colonne. L'hydrodynamique de la phase liquide de la colonne illustre bien que le débit liquide dans la colonne air-lift est directement proportionnel au débit d'air injecté sur la plage des débits d'air de 2 à 30 l/mn. Par contre pour des débits d'air au-delà de 30 l/mn, un phénomène inverse sur le débit liquide, avec une diminution de ce dernier est observé. L'analyse hydrodynamique de la phase dispersée à l'aide de la bi-sonde optique, a permis de déterminer qu'une période d'échantillonnage de 10.000 bulles est représentative pour les essais. L'examen des résultats obtenus montre qu'à partir de 10.000 bulles, le diamètre de bulles reste relativement stable. Le taux de vide obtenu est directement proportionnel au débit d'air injecté dans la colonne.

Abstract:

The aim of the study presented in this manuscript is to determine the phase-indicating functions of a diphasic flow in a vacuum-air-lift column. These functions are the vacuum rate, the interface velocity and the particle size of the bubbles, the flow rate and the velocity of the liquid phase. The air-lift

vacuum column that is the subject of this study is based on the principle of air-lift and flotation, all under depression. The technology has been patented by IFREMER and INSA Lyon. The column combines hydraulic pumping, solute transfer and particulate phase separation functions in its operation and has the particularity of minimizing energy costs. The process of air-lift columns under depression is under development and the experimental study of its hydrodynamics is one of the axes under exploration in order to optimize its design and its operation. The experiments were carried out on a vertical column composed of two concentric plexiglass tubes connected to a water recirculation tank and a vacuum pump. For all experiments, demineralised water is used whose flow rate is measured by an ultrasonic flowmeter. The compressed air of the network is filtered and then passes through a pressure switch before entering a mass flow meter making it possible to record the desired air flow rate for the air-lift. The experimental analysis is carried out using a two-phase instrumentation constituted by a fiber-optic bi-probe. The use of experimental techniques has led to a better understanding of the hydrodynamics of the diphasic flow. The fiber-optic bi-probe placed between column flanges made it possible to have a complete mapping of the flow of the dispersed phase. The use of a mass flow meter and an ultrasonic flow meter, in different flow configurations, allowed data on the operation of the column. The hydrodynamics of the liquid phase of the column illustrate that the liquid flow rate in the air-lift column is directly proportional to the air flow rate injected over the range of air flows from 2 to 30 l/min. On the other hand, for air flows above 30 l/min, an inverse phenomenon on the liquid flow rate, with a decrease in the latter, is observed. The hydrodynamic analysis of the dispersed phase using the optical bi-probe determined that a sample period of 10,000 bubbles is representative for the tests. Examination of the results obtained shows that from 10,000 bubbles, the bubble diameter remains relatively stable. The vacuum rate obtained is directly proportional to the air flow injected into the column.

Mots clés : air-lift; colonne à dépression; sonde optique; taux de vide; taille de bulles; vitesse de bulles.

1 Introduction

Les colonnes à bulles sont des dispositifs de procédé industriel qui assurent un mélange entre une phase gazeuse en forme de bulle et une phase liquide. Depuis quelques décennies, les études réalisées sur ce dispositif, ont contribué à la compréhension de leur hydrodynamique [14]. La colonne air-lift est une colonne à bulles dans laquelle une cloison a été introduite pour canaliser l'écoulement des phases liquides et gazeuses entre plusieurs compartiments de la colonne. L'injection d'air fait dans un des compartiments permet de modifier la densité apparente et l'expansion du fluide diphasique, provoquant la circulation de la phase liquide initialement immobile [1]. Les colonnes air-lift ont été l'objet de plusieurs études, dans l'industrie minière et pétrolière [17] ; en aquaculture [2] ainsi que dans les procédés chimiques et biochimiques [7].

La colonne air-lift à dépression qui fait l'objet de la présente étude est basée sur le principe de l'air-lift et de la flottation, le tout sous dépression. La technologie a été brevetée par l'IFREMER et l'INSA de Lyon [15]. La colonne combine dans son fonctionnement des fonctions de pompage hydraulique, de transferts de solutés et de séparation de phases particulières. Son principal atout est qu'elle permet de minimiser les coûts énergétiques [2]. Les écoulements gaz-liquide dans ces colonnes sont intrinsèquement instables et la dynamique de tels écoulements influence les performances de mélange et de transfert de masse des colonnes à bulles. Il est donc important de caractériser la dynamique du flux gaz-liquide [4]. Aussi, la connaissance complète de la dynamique globale des fluides de la

colonne à bulles repose sur celle de la bulle [6]. La connaissance de la taille des bulles et du taux de vide est cruciale pour déterminer l'air interfaciale gaz-liquide et donc le transfert de masse [3].

Cependant, l'analyse de la granulométrie des bulles dans les colonnes est réalisée par des techniques intrusives, perturbant l'écoulement et par des techniques non intrusives. Les techniques non intrusives utilisent soit des sondes tomographiques (tomographie par résistance électrique, tomographie par impédance électrique, etc. [12, 13]) ; soit l'analyse des images par PIV [7, 16] ; la photographie [10, 18]. Les techniques intrusives, font recours aux sondes, comme les sondes à fibre optique, etc. [7]. En termes de résultats, les techniques intrusives fournissent des mesures locales tandis que les techniques non intrusives fournissent une répartition sur une section transversale avec différentes résolutions spatiales et temporelles [6]. Les avantages et les inconvénients des différentes techniques intrusives et non intrusives et leurs applications aux écoulements multiphasiques ont été présentés par plusieurs travaux antérieurs [9].

L'étude que nous présentons dans cet article consiste en la détermination des fonctions indicatrices de phase des écoulements diphasiques au sein d'une colonne air-lift à dépression. Ces fonctions sont le taux de vide, la vitesse d'interface et la granulométrie des bulles, le débit et la vitesse de la phase liquide. L'analyse expérimentale sera effectuée à l'aide d'une instrumentation diphasique constituée par une bi-sonde en fibre optique, un débitmètre massique et un débitmètre par ultrason.

1. Montage expérimental

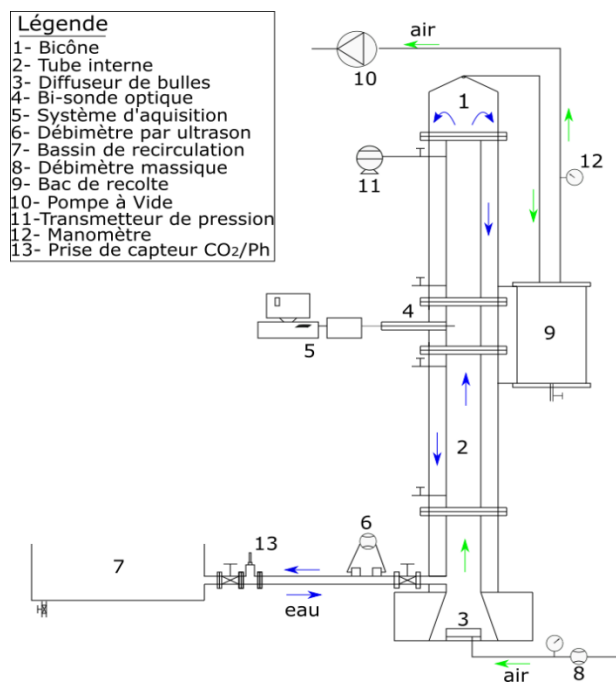


Figure 1 : banc d'essai expérimental

Les expériences sont réalisées sur un banc d'essai schématisé par la figure 1. Le système est composé d'une colonne verticale (deux tubes concentriques en plexiglas de 80mm et 150mm de diamètre) d'un bassin de stockage et d'une pompe à vide. La colonne verticale est constituée d'un bi-cône posé en tête et relié à une pompe à vide; de deux tronçons de 1m de tubes concentriques ; d'un tronçon de 25mm équipé d'une prise pour la bi-sonde optique ; d'une base équipée d'un diffuseur de bulles en céramique et connecté à un bassin de stockage. Ce bassin de stockage de liquide est branché à la colonne par deux tuyaux parallèles en PVC (50 mm de diamètre). Un tuyau d'aspiration connecté au tube interne et un tuyau de refoulement, au tube externe. Un bac de récolte qui joue le rôle de chambre d'aspiration de la pompe à vide et de réservoir de récolte des particules piégées par les bulles est

annexé à la colonne air-lift. L'injection de l'air se fait dans le tube central en pied de colonne à travers le diffuseur de bulles en céramique. L'air provient du réseau d'air comprimé du laboratoire. L'air comprimé du réseau est filtré, puis passe à travers un pressostat avant d'entrée dans un débitmètre massique permettant de consigner le débit d'air voulu pour l'air-lift. L'eau utilisée est celle du réseau public du laboratoire. Le débit liquide de l'air-lift est mesuré par un débitmètre par ultrason. Une bi-sonde optique équipée d'un système d'acquisition est insérée dans le tube interne de la colonne afin de caractériser la phase gazeuse. L'injection d'air provoque un effet d'air lift qui aspire l'eau du bac de stockage et l'entraîne dans un mouvement ascendant dans le tube central. Arrivée en haut du tube central, l'eau se déverse dans la couronne périphérique et redescend vers le bac de stockage. La pompe à vide permet de mettre la colonne sous dépression. La dépression peut monter le niveau d'eau dans la colonne et la maintenir au-dessus du tube interne afin de permettre la circulation hydraulique.

3. Résultats et discussion

3.1. Hydrodynamique de la colonne

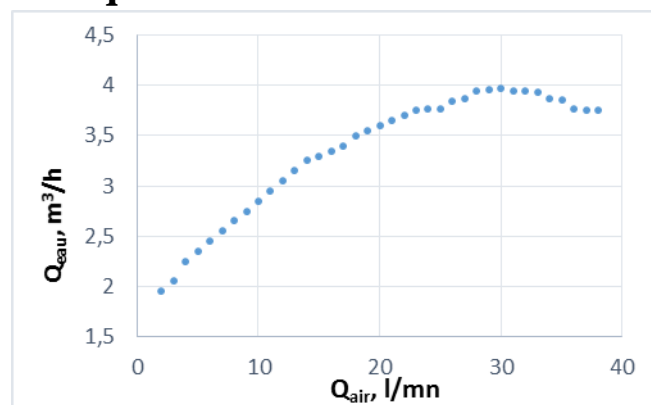


Figure 2 : Evolution du débit liquide en fonction du débit d'air injecté.

L'analyse de la figure 1 permet d'observer que le débit liquide dans la colonne air-lift est directement proportionnel au débit d'air injecté sur la plage des débits d'air de 2 à 30 l/mn. Par contre pour des débits d'air au-delà de 30 l/mn, nous constatons un phénomène inverse sur le débit liquide, avec une diminution de ce dernier.

Il est donc à noter que pour cette colonne maquette, le débit liquide maximum est atteint à un débit d'air injecté de 30 l/mn. Ce phénomène s'explique aussi par l'apparition d'un effet de contre air-lift dans le tube externe de la colonne. Le contre air-lift est créé par la présence de bulle d'air dans le tube externe et qui diminue la vitesse de circulation hydraulique et donc le débit liquide.

3.2. Hydrodynamique de la phase dispersée

3.2.1. Taille de l'échantillonnage

Pour analyser l'hydrodynamique de la phase dispersée à l'aide de la bi-sonde optique, il est important de déterminer la période d'échantillonnage représentative pour les essais. Elle doit correspondre à une stabilité relative des résultats des essais. Cette taille pourrait s'exprimer en durée d'acquisition ou en nombre de bulles. Dans la littérature, plusieurs auteurs avaient estimé que la période d'échantillonnage optimale est de 1 à 5 minutes [5, 8, 11]. Cette taille correspondrait à une durée d'acquisition. L'examen des résultats obtenu sur la figure N°1 ci-dessous, montre qu'à partir de 10.000 bulles, le diamètre de bulles reste relativement stable. Ainsi pour toutes les expériences suivantes, la taille d'échantillon pour les essais retenue est de 20000 bulles.

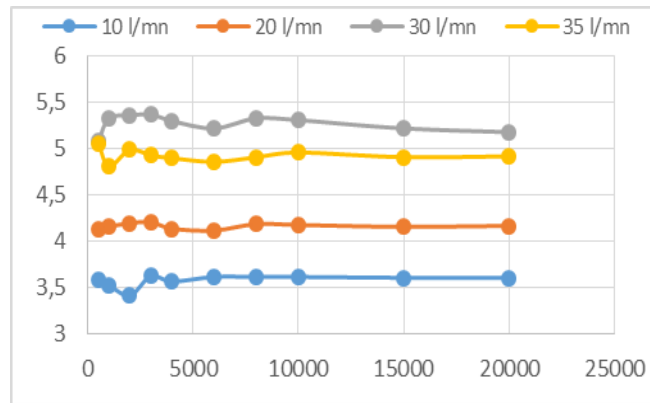


Figure 2 : Répartition de la taille des bulles en fonction du nombre d'acquisition des bulles.

3.2.2. Taux de vide

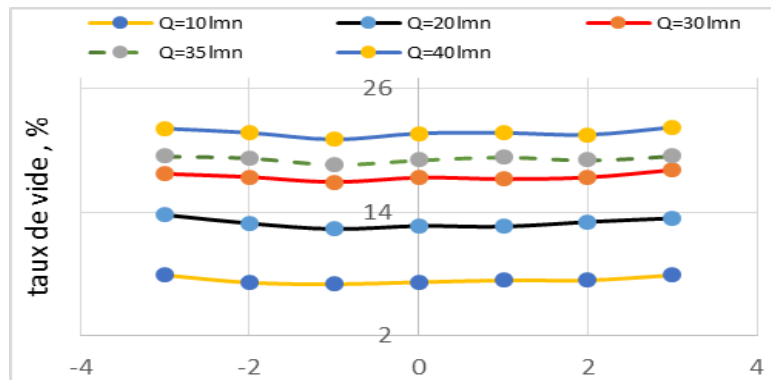


Figure 3 : Evolution du taux de vide radial en fonction du débit d'air injecté.

L'analyse de la figure 3, montre que le taux de vide est directement proportionnel avec le débit d'air injecté dans la colonne. Pour chaque débit d'air, le taux de vide est relativement le plan radialement.

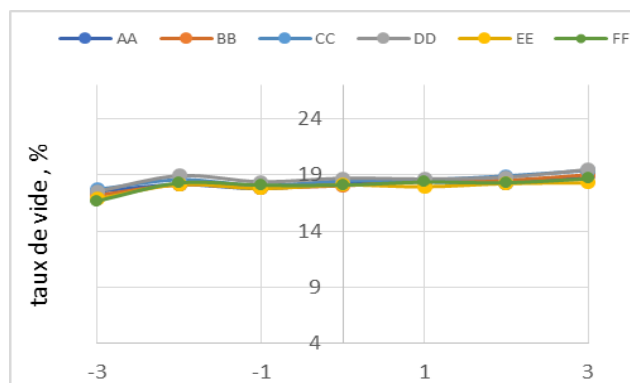


Figure 4 : Evolution des Taux de vide radiaux suivant 6 axes radiaux de la colonne.

Les taux de vides mesurés pour différents diamètre (espacés de 15° les uns des autres) et pour un même débit d'air injecté (30 l/mn) sont représentés sur la figure 4. Ce graphique illustre clairement que l'on a relativement les mêmes taux de vide sur tout le plan de mesure et aussi l'on a le même profil radial.

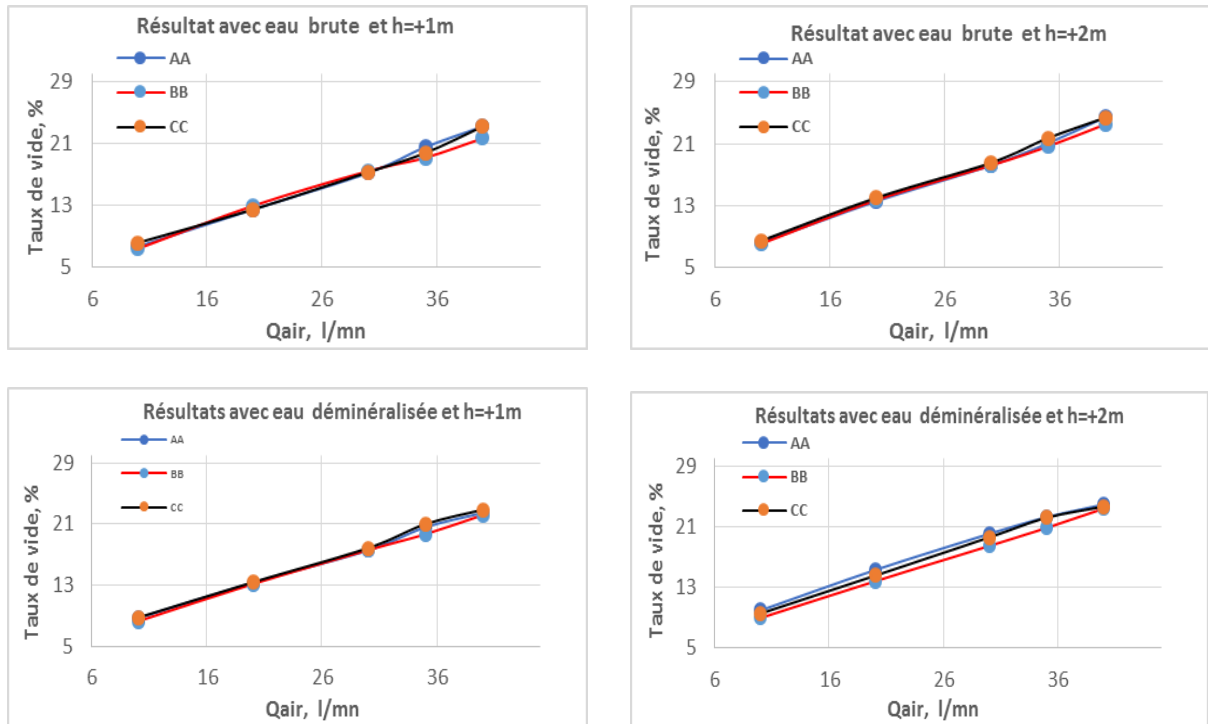


Figure 5 : analyse du profil des taux de vides suivants trois diamètres en fonction du débit d'air injecté et de la dureté de l'eau.

3.2.3. Vitesse des bulles

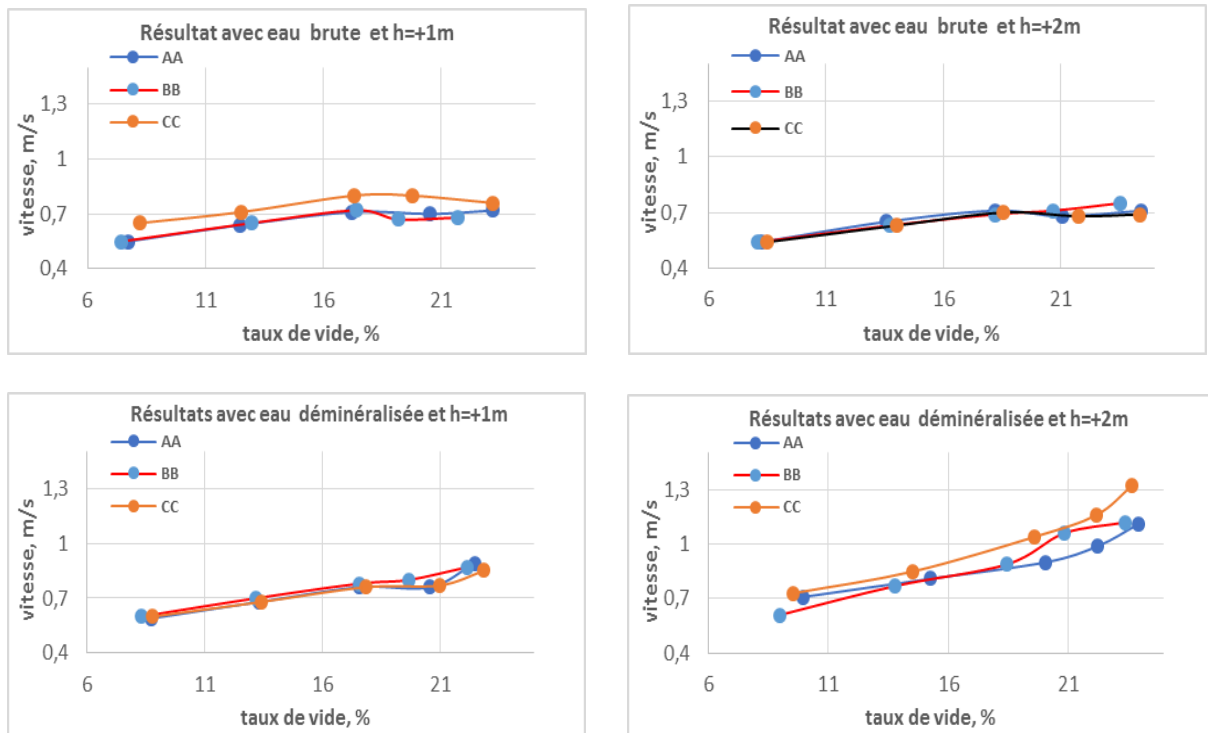


Figure 6 : analyse du profil des vitesses sur trois diamètres en fonction du débit d'air injecté et de la dureté de l'eau.

3.2.4. Diamètre des bulles

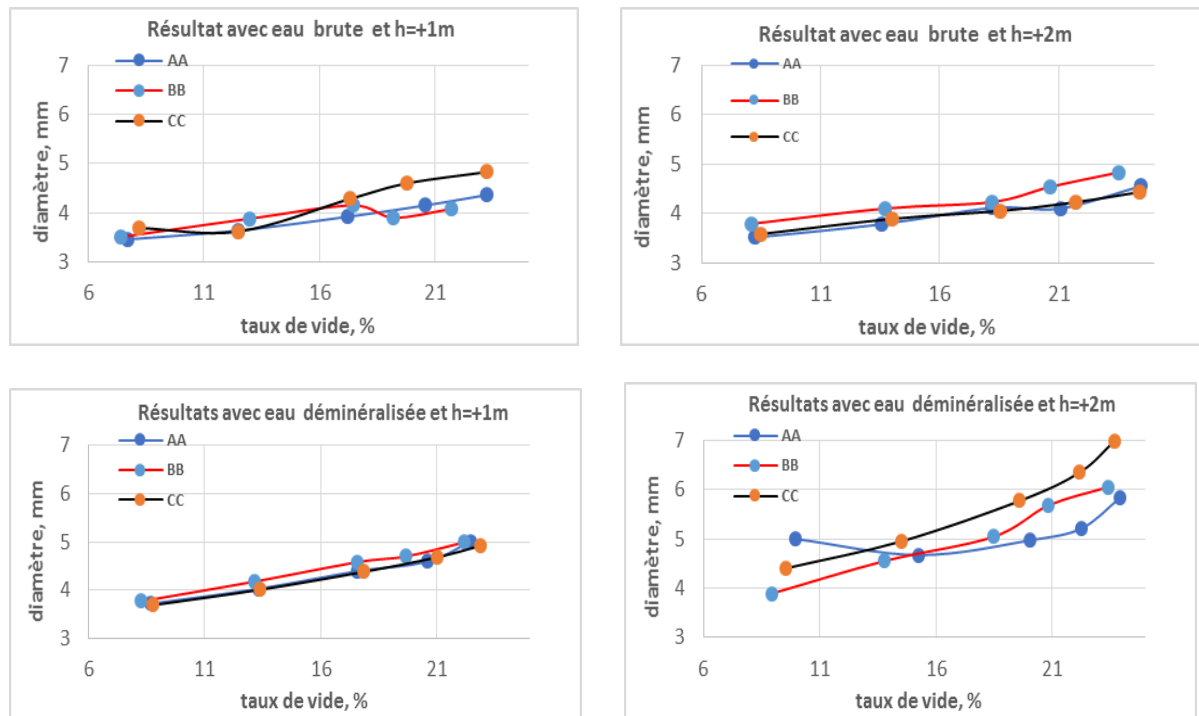


Figure 7 : analyse du profil des diamètres des bulles sur trois diamètres de colonne en fonction du débit d'air injecté et de la dureté de l'eau.

Références

- [1] B. Barru. Etude et optimisation du fonctionnement d'une colonne airlift à dépression - Application à l'aquaculture. (2011).
- [2] B. Barru, et al., Mass transfer efficiency of a vacuum airlift - Application to water recycling in aquaculture systems. *Aquacult. Eng* (2011).
- [3] B.J. Azzopardi, al., Bubble columns, in: *Hydrodynamics of Gas-Liquid Reactors: Normal Operation and Upset Conditions*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [4] B.K. Singh, et al., Dynamics of gas-liquid flow in a cylindrical bubble column: Comparison of electrical resistance tomography and voidage probe measurements. *Chem. Eng. Sci.* 158 (2017) 124–139.
- [5] Besagni, G., *Flow Measurement and Instrumentation* (2006), <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.10.008>
- [6] G. Besagni, et al., The dual effect of viscosity on bubble column hydrodynamics. *Chemical Engineering Science* 158 (2017) 509–538.
- [7] H. Chaumat, et al., On the reliability of an optical fibre probe in bubble column under industrial relevant operating conditions. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 31, 2007, 495–504.
- [8] H. Chaumat, et al., Application of the double optic probe technique to distorted tumbling bubbles in aqueous or organic liquid, *Chem. Eng. Sci.* 60 (22) (2005) 6134–6145.
- [9] J. Chaouki, et al., noninvasive tomographic and velocimetric monitoring of multiphase flows. *Ind. Eng. Chem. Res.* 36, (1997) 4476–503.

- [10] J.P. Giovannettone et al., Gas void ratio and bubble diameter inside a deep airlift reactor. *Chem. Eng. J.* 149 (2009) 301–310.
- [11] K.-A. Chang, al., Fiber optic reflectometer for velocity and fraction ratio measurements in multiphase flows, *Rev. Sci. Instrum.* 74 (7) (2003) 3559–3565.
- [12] M.A. Young, et al., airlift bioreactors: analysis of local twophase hydrodynamics. *AIChE J.* 37, (1991) 403–428.
- [13] O. Adetunji, R. Rawatlal, Estimaion of bubble column hydrodynamics : image-based measurement method, *Flow Measurement and Instrumentation* (2016).
- [14] P. Zehner, and M. Kraume, 2000. Bubble Columns. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*.
- [15] René, F., et al., Procédé et installation de traitement d'un effluent aqueux, en vue d'en extraire au moins un composé gazeux dissous; application à l'aquaculture en milieu aqueux recirculé. Brevet N°07 02308. 29 mars 2007.
- [16] S. Besbes, al., PIV measurements and Eulerian–Lagrangian simulations of the unsteady gas–liquid flow in a needle sparger rectangular bubble column. *Chem. Eng. Sci.* 126, (2015) 560–572.
- [17] S.Z. Kassab, al., air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30, 2009, 88–98.
- [18] Y.M. Lau, al., Experimental study of the bubble size distribution in a pseudo-2D bubble column. *Chem. Eng. Sci.* 98 (2013) 203-211.