Science Arts & Métiers (SAM)
is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/11325

To cite this version :

Jishen ZHANG, Céline GABILLET, Adrien CLEMENT, Jean-Yves BILLARD - Experimental investigation of bubble induced modifications of a turbulent boundary layer - In: Journées de l'Hydrodynamique (15; 2016; Brest), France, 2016-11-22 - 15èmes journées de l'Hydrodynamique : 22-24 novembre 2016 [Brest] - 2016

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Experimental investigation of bubble induced modifications of a turbulent boundary layer

Caractérisation expérimentale de l'effet de l'injection de bulles dans une couche limite turbulente

J. Zhang, C. Gabillet, A. Clement et J.Y. Billard
Institut de Recherche de l'Ecole Navale IRENav (EA 3634), CC600, 29240 Brest Naval, Cedex 9
celine.gabillet@ecole-navale.fr

Résumé

Cette étude a pour objectif de caractériser expérimentalement les effets de l'injection de bulles de tailles intermédiaire (millimétriques), soumises à un fort effet de gravité, sur un écoulement de couche limite turbulente. La configuration expérimentale est celle d'une couche limite horizontale en développement pour un nombre de Reynolds caractéristique, basé sur l'épaisseur de quantité de mouvement et la vitesse externe, $\mathrm{Re}_{\delta 2} = 3976$. Le système d'injection d'air localisé sur la paroi supérieure du tunnel a permis de faire varier la taille des bulles dans une large gamme (de 40 à 300 longueurs visqueuses), et de faire varier le taux de vide moyen entre 0.01% et 0.11%. Nous avons mesuré la vitesse du liquide dans la zone interne de la couche par Vélocimétrie par Images de Particules en 2D, pour les composantes de vitesse dans le plan vertical et Vélocimétrie par effet Doppler en 1D pour la composante longitudinale. Les résultats montrent l'existence de deux régimes d'écoulement. Avec l'augmentation du débit global d'air injecté, un déficit de vitesse longitudinale se manifeste dans la zone logarithmique, associé à un excès de vitesse longitudinale dans la sous couche visqueuse et une diminution des tensions de Reynolds. Ceci est en accord avec un phénomène d'aspiration dû à la flottabilité induite par les bulles. Au-delà d'une certaine taille de bulles, des bulles de sillage sont présentes dans l'écoulement, contribuant ainsi à une diminution tant du frottement visqueux que du frottement turbulent en très proche paroi, associé à un effet de soufflage.

Abstract

To investigate the effect of intermediate sized bubble injection into a turbulent boundary layer under a strong gravity effect, we measure the velocity field of two-phase flow in a horizontal cavitation tunnel with 2D Particle Tracking Velocimetry in vertical plane perpendicular to the upper wall and 1D Laser Doppler Velocimetry technique for longitudinal velocity component. In this study, we focus on an horizontal boundary layer where the Reynolds number, based on the thickness of momentum and external velocity is $\mathrm{Re}_{\delta 2} = 3976$. The air injection panel is located at the upper wall of the tunnel's test section and it allows to cover the injection of a large range of bubble sizes (from 40 to 300 viscous lengths) as well as varying the void fraction between 0.01% and 0.11%. The results reveal that two flow regimes exist: with the increase of the global air injection, a longitudinal speed deficit is observed in the log zone altogether with a longitudinal speed increase in the sub-viscous layer and a Reynolds stress drop. This is in agreement with a phenomena of aspiration caused by the bubble buoyancy. Beyond a critical bubble size, wake bubbles are found in the flow and contribute to a drop in viscous friction and in turbulent shear stress in the near wall region, this phenomenon could be associated to a blowing effect.

1 Introduction

Le développement des navires tout électrique nécessite l'optimisation du système propulsif mais aussi la réduction de la résistance de la carène. Or la résistance de frottement constitue la part la plus importante de la résistance à l'avancement pour les navires à faible nombre de Froude. Dans ce contexte, l'injection d'air sous la carène est un procédé intéressant qui permet de réduire la résistance de frottement. Cette technique a été étudiée et envisagée initialement par McCormick et al. (1973) pour des applications navales. Parmi les différentes configurations possibles (couche de bulles, couche d'air, cavité d'air), la couche de bulles semble être un bon compromis entre efficacité énergétique et tenue à la mer Butterworth et al. (2015), mais la prédiction des performances reste encore difficile Ceccio (2010) et l'extrapolation des résultats de la petite échelle à la grande échelle est discutable Foeth (2008). En effet, les mécanismes physiques mis en jeu sont complexes (réduction de densité effective, effet de compressibilité, effet de glissement entre phases, interactions entre les bulles et la turbulence) et leur compréhension requiert de mener des études académiques pour caractériser les interactions locales entre l'écoulement turbulent de proche paroi et les bulles, en configuration horizontale.

Dans cette problématique, la plupart des études locales (numériques et expérimentales Ferrante et al. (2004), Jacob et al. (2010)) se sont intéressées à l'influence sur la couche limite turbulente de l'injection de microbulles (taille équivalente à la sous couche visqueuse). Mais, peu d'études sont consacrées à l'influence des bulles de taille intermédiaire (entre la microbulle et la couche d'air) Murai et al. (2007), Park et al. (2014). Dans le cas des bulles déformables de taille équivalente à l'épaisseur de la couche limite, Murai et al. (2007) ont montré que le frottement pariétal local augmente au passage du bord d'attaque de la bulle, et diminue au passage du bord de fuite de la bulle. Dans ces conditions, il est difficile de prédire si l'injection de bulles conduit à une diminution ou une augmentation du frottement de paroi et une analyse locale des modifications de l'écoulement du liquide induites par les bulles est nécessaire.

Le travail présenté ici s'inscrit dans cette démarche. L'objectif de l'étude est de procéder à une caractérisation expérimentale fine des modifications d'une couche limite turbulente horizontale, induites par des bulles de taille intermédiaire, soumises à un fort effet de gravité, pour une large gamme de tailles (tailles allant de l'épaisseur de la couche tampon à l'épaisseur de la région interne de la couche limite). Pour ce faire, nous avons réalisé des mesures dans le tunnel hydrodynamique de l'Ecole Navale (THEN) pour une vitesse d'écoulement externe imposée de 2m/s. Le contrôle de la pression d'injection et la modularité du réseau d'injection d'air ont permis de faire varier à la fois le débit d'injection d'air global et la taille des bulles. Le champ de vitesse du liquide a été caractérisé dans la région interne par PIV (Particle Image Velocimetry) et par LDV (laser Doppler velocimetry). Nous décrivons dans la partie suivante les caractéristiques expérimentales de l'écoulement et les techniques de mesure mises en œuvre. La quatrième partie est dédiée à la présentation des résultats et à la discussion.

2 Conditions expérimentales

2.1 Dispositif expérimental

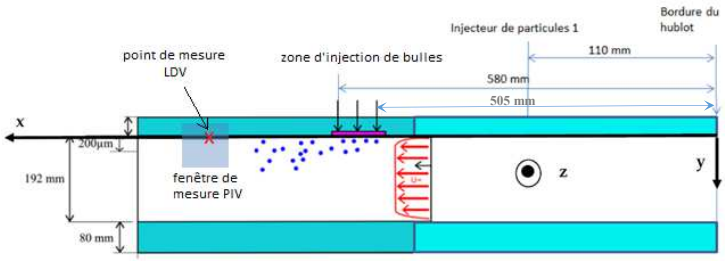

Figure 2.1 vue schématisée de la veine d'essais du tunnel hydrodynamique de l'Ecole Navale

Les mesures ont été réalisées dans le THEN. Le liquide utilisé est de l'eau douce de viscosité cinématique $\upsilon = 1.005e^{-6}\ m^2/s$. Une vue schématisée de la veine d'essais est présentée **figure 2.1**.

La veine d'essais fait 192 mm de haut, par 192 mm de large et 1m de long. Nous noterons x, la distance longitudinale par rapport à l'entrée de veine, y la distance verticale par rapport à la paroi orientée vers le bas, et z la position transversale dans la veine, centrée en milieu de veine.

Sur le dessus de la veine, à x=110 mm de l'entrée de veine et sur l'axe de symétrie (z=0), nous disposons d'un injecteur de 600 µm de diamètre, relié à une micro-pompe qui permet d'ensemencer la couche limite en traceurs (particules diluées dans de l'eau). Pour les essais, le débit de la micro-pompe a été régulé à 0.071ml/s.

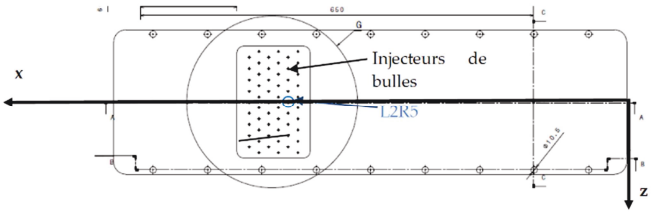

Figure 2.2 vue de dessus du hublot supérieur de la veine d'essais

Des bulles d'air ont été injectées à la paroi supérieure du tunnel à travers un réseau d'injecteurs constitué de 57 capillaires de 180 µm de diamètre. Une vue de dessus du hublot est présentée sur la **figure 2.2.** Le réseau est constitué de 6 lignes transversales, situées entre 505 et 580 mm de l'entrée de veine. Chaque capillaire est relié par une vanne tout ou rien, ce qui permet de choisir les capillaires activés. Les essais ont été réalisés pour 1 à 6 lignes transversales activées. -Nous ajustons la pression d'injection $P \pm 0.03b$, et nous mesurons le débit global injecté dans la veine Q_G. Le nombre d'injecteurs activés n_{inj} permet d'ajuster le débit local (débit par injecteur Q_G/n_{inj}) qui contrôle la taille des bulles.

L'ensemble des mesures PIV et LDV ont été réalisés sur l'axe de symétrie de la veine en aval de la zone d'injection d'air, avec un recouvrement des mesures PIV et LDV : la fenêtre de visualisation PIV se situe à x_{PIV} entre 694-757mm de l'entrée de veine, le point de mesure LDV se situe à $x_{LDV} = 705$mm.

2.2 Caractéristiques de l'écoulement monophasique

La **figure 2.3** récapitule les caractéristiques de la couche limite monophasique à $U_e = 2m/s$, U_e étant la vitesse externe imposée dans la veine. Les caractéristiques sont données à la position longitudinale de l'injecteur de bulles (x=505 mm) et à la position longitudinale des mesures LDV (x=705mm). Pour les conditions d'écoulement considérées, le nombre de Reynolds $Re_{\delta 2}$, basé sur l'épaisseur de quantité de mouvement et la vitesse externe, est au-delà de la valeur critique de transition laminaire/turbulent donné par la courbe de stabilité neutre Cousteix (1989) et le paramètre de forme H est proche de la valeur attendue en couche limite turbulente en développement sur plaque plane (H=1,28).

x(m)/ entrée de veine	δ (m)	U_e (m/s)	$H=\delta_1/\delta_2$	$Re_\delta = \frac{U^* \times \delta}{\nu}$	$Re_{\delta 2} = \frac{U^* \times \delta_2}{\nu}$	u*(m/s)	lv (µm)
0,505	0,0152	2	1,29	30382	2947	0,083	12
0,705	0.0157	2	1,37	31400	3976	0,082	12

Figure 2.3 Tableau récapitulatif des caractéristiques de la couche limite monophasique (δ est l'épaisseur de couche limite, δ_1 est l'épaisseur de déplacement δ_2 est l'épaisseur de quantité de mouvement, u est la vitesse de frottement et l_v l'échelle de longueur visqueuse= ν/u^*, ν : la viscosité cinématique de l'eau)*

Afin de confirmer l'état turbulent de la couche limite monophasique dans la zone des mesures, nous avons tracé sur la **figure 2.4** le profil de vitesse moyenne longitudinale U, obtenu par LDV, normalisé en coordonnées de paroi ($y_+ = \frac{y \times u^*}{\nu}$ et $U_+ = \frac{U}{u^*}$). La vitesse de frottement u^* est calée de sorte à satisfaire la loi linéaire de vitesse dans la sous couche visqueuse et la loi logarithmique de

vitesse dans la zone logarithmique**.** Les profils de vitesse linéaire et logarithmique sont également reportés sur la **figure 2.4**. On observe un bon accord avec ces deux lois. La loi linéaire est satisfaite jusqu'à $y_+ = 7$. La loi logarithmique est valable de $y_+ = 35$ à $y_+ = 300$, pour un ajustement de la constante additive à 5.14, en bon accord avec une couche limite turbulente en développement spatial sur plaque plane.

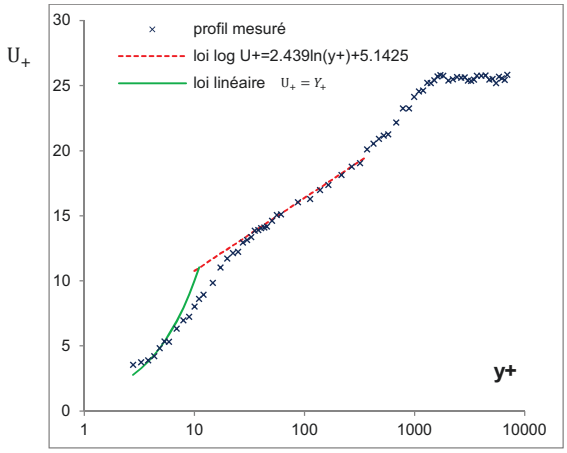

Figure 2.4 Profil de vitesse longitudinale moyenne mesurée en monophasique par LDV (x=0.705 m) et comparaison aux lois théoriques

2.3 Caractéristiques de l'écoulement diphasique

Dans la zone de mesure en écoulement diphasique, la fraction volumique moyenne du gaz dans la couche limite <α> évolue linéairement avec le débit global d'injection d'air Q_G comme $\langle\alpha\rangle = Q_G/[U_e(\delta - \delta_1)e]$, e étant ici la largeur de la veine d'essais. Pour cette étude, le débit global varie entre 2l/h et 200l/h, ce qui correspond à un taux de vide moyen<α> compris entre 0.01% et 1.11%. Sur la **figure 2.5,** l'évolution du rayon de bulle normalisé par l'échelle de longueur visqueuse $R_{b+} = R_b u^*/\nu$ est tracée en fonction du débit d'air local (débit par injecteur $\frac{Q_G}{n_{inj}}$). Nous remarquons qu'au-delà de $\frac{Q_G}{n_{inj}} = 3l/h$, la courbe d'évolution du rayon de bulles s'aplatit, cela correspond à un changement du régime de bullage. Au-delà de $\frac{Q_G}{n_{inj}} = 9l/h$, des petites bulles sont arrachées dans le sillage des grosses bulles et la répartition moyenne des tailles de bulles diminue. On peut définir le nombre de Froude qui caractérise le rapport entre la force d'inertie et la force d'Archimède agissant sur les bulles $F_{rb} = {u^*}/{\sqrt{2gR_b}}$. Pour la gamme de tailles de bulles étudiée, Fr_b varie entre 0.48 et 1.11. On s'attend donc à une influence forte de la gravité sur l'écoulement diphasique.

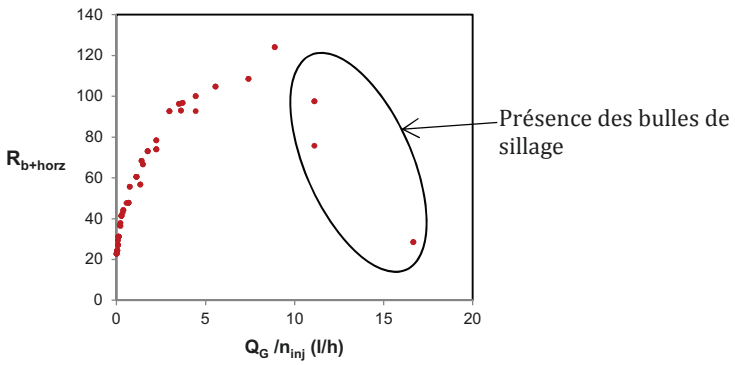

Figure 2.5 Influence du débit local sur la taille des bulles

3 Techniques expérimentales et traitements spécifiques

3.1 Traitement PIV

Une nappe laser est générée dans le plan vertical $x - y$ sur l'axe de symétrie de la veine par un système laser YAG « New wave Solo » d'énergie 30mJ, double cavité qui émet dans le vert. Les traceurs utilisés sont des particules fluorescentes (particules de rhodamine de diamètre entre 1 et 20µm) qui diffusent dans l'orange. Une caméra double-trame Flowsense EO4M de 12 bits de profondeur, associée à un objectif SIGMA 105mm et un filtre orange, sont positionnés face à la nappe laser. La fenêtre de visualisation en x et y est de 63 mm × 63 mm pour une résolution de 2048*2048 pixels. L'intervalle de temps entre les pulses d'un doublet d'images a été ajusté à 100 μs.

Afin de calculer le champ de vitesse PIV des particules en écoulement diphasique, il a été nécessaire d'identifier les régions occupées par les bulles sur les images et de les discriminer avec une série de filtres numériques Bröder et al. (2000). La **figure 3.1** est un schéma synoptique de la procédure mise en place. IPL (Image Processing Library) est une toolbox de traitement d'image proposée par DynamicStudio qui permet d'appliquer sur les images une combinaison de filtres La **figure 3.2** illustre les différentes étapes du filtrage.

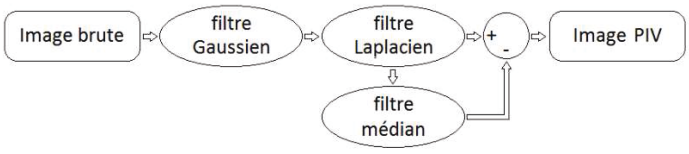

Figure 3.1 Processus de prétraitement pour la discrimination de bulles

Dans un premier temps, un filtre « Top-hat » est appliqué sur l'ensemble des doublets d'images afin d'éliminer le bruit de fond sur chaque image. Dans le cadre de notre étude, les bulles sont principalement concentrées en proche paroi et apparaissent sur l'image comme des nuages gris floutés (**figure3.2a**). La réfraction de la nappe laser génère parfois des bordures lumineuses sous forme d'anneau à la frontière des bulles avec le fluide, la réflexion de particules voisines sur ces bordures (aussi appelée particules fantômes) est parfois aussi présente et cela peut fausser les mesures PIV. Un filtre de Gauss 3 × 3 et de Laplace 3 × 3 sont donc appliqués pour augmenter le contraste des bordures afin de les éliminer.
Ensuite, un filtre médian 3 × 3 est appliqué pour ne conserver que la partie grise ainsi que la partie des bordures au sein des bulles dans l'image (**figure3.2b**). Une fois cette étape terminée, l'image filtrée est soustraite de l'image initiale pour obtenir des images qui ne contiennent que des particules (**figure3.2c**).

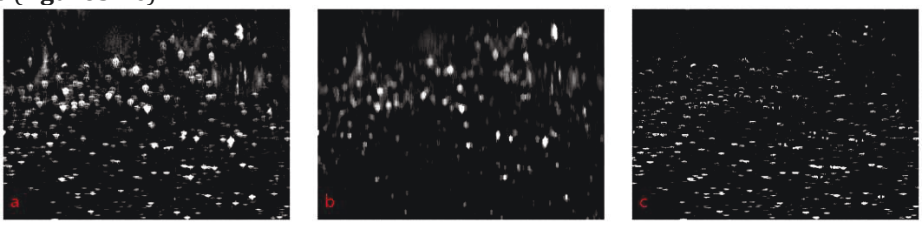

Figure 3.2 Etapes successives du protocole de prétraitement

Le traitement PIV des images après filtrage a été réalisé par une procédure Adaptative PIV sous DynamicStudio avec un recouvrement des fenêtres PIV de 50%. La fenêtre de traitement PIV est de 16*8pixels en proche paroi dans le plan x-y (pour une résolution spatiale Δx_+=38 et Δy_+=19 échelles de longueur visqueuse).
Un post-traitement des champs de vecteurs vitesse issus de la procédure PIV a ensuite été réalisé dans le but d'éliminer les vecteurs aberrants. Pour cela, nous avons implémenté un critère de validation de vecteur cohérant Westerweel et al. (2005) dans un programme Matlab. Cette méthode consiste à déterminer la fluctuation de vitesse normalisée en calculant la différence entre le vecteur étudié et le vecteur moyen des vecteurs voisins (matrice 3 × 3). Le vecteur est éliminé si cette fluctuation dépasse un seuil de validation. Cependant, à cause de la dimension du filtre, plusieurs vecteurs aberrants résiduels sont observés à la suite du premier passage. Il est donc nécessaire de

répéter l'application du filtre deux fois, avec un seuil plus restrictif lors de la première application. Il est ensuite nécessaire de substituer les vecteurs aberrants avec les nouveaux vecteurs « fictifs » afin de ne pas enlever les vecteurs cohérents. Un exemple de résultat de suppression des vecteurs aberrants est montré sur la **figure3.3**.
A l'issue de cette étape, les vecteurs aberrants localisés dans la zone d'écoulement potentiel en dehors de la couche limite, non ensemencée en particules, ont été supprimés. De même, les vecteurs aberrants localisés dans les zones de proche paroi, non ensemencées car occupées par les bulles, ont été supprimés. Pour la convergence statistique du champ de vitesse PIV, 500 doublets d'images avec une période de 10Hz ont été collectés, seuls les vecteurs validés sont utilisés dans le calcul des moyennes et des variances.

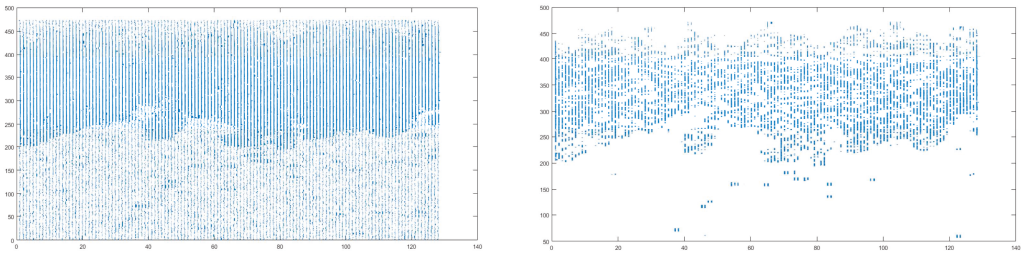

Figure 3.3 Champ de vitesse PIV avant et après l'élimination de vecteurs aberrants

3.2 Traitement LDV

Afin de quantifier l'influence de la présence des bulles sur la vitesse longitudinale du liquide dans la sous couche visqueuse, une mesure LDV a été réalisée en un point. Nous avons utilisé une source laser à Argon ionisé mono-composante (λ=488nm). La résolution spatiale dans les directions verticale et longitudinale du volume de mesure est de 50µm (soit $\Delta x_+ = \Delta y_+ = 4$) et de 70µm dans la direction transversale. Le volume de mesure est situé dans le plan de symétrie de la veine à une faible distance y_{LDV} de la paroi ($y_{+LDV} : 3 - 8$), ce qui permet d'assurer un positionnement du volume de mesure dans la sous couche visqueuse.

La couche limite a été ensemencée en particules de polyamide de diamètre 5µm. Le taux de validation local varie entre 1400 et 3500 Hz en écoulement monophasique. Pour les forts débits d'injection d'air, on peut avoir jusqu'à 98% d'atténuation du taux de validation. La vitesse longitudinale moyenne est calculée en pondérant par le temps de résidence des particules. L'intervalle de confiance à 95% pour la convergence statistique de la vitesse moyenne est inférieur à 2% de la valeur mesurée pour un minimum de 2000 bursts validés.

Pour chaque condition d'écoulement diphasique, on détermine au même point de mesure la variation relative entre la vitesse moyenne longitudinale en diphasique U et la vitesse moyenne longitudinale en monophasique U_0 : $\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{U - U_0}{U_0}$.

La variation relative de la vitesse longitudinale dans la sous couche visqueuse est un indicateur important dans l'estimation de la variation du frottement visqueux en proche paroi induite par l'injection de bulles.

4 Résultats et discussion

4.1 Modification de l'écoulement par injection des bulles dans la zone logarithmique

Sur la figure 4.1, nous avons tracé les profils de vitesse du liquide obtenus par PIV dans la zone logarithmique pour différents débits globaux d'injection ($Q_G = \mathbf{75}\,\mathrm{l/h} - \mathbf{200}\,\mathrm{l/h}$) et différentes tailles de bulles correspondant à différents débits locaux ($\frac{Q_G}{n_{inj}} = \mathbf{1.4}\,\mathrm{l/h} - \mathbf{9.44}\,\mathrm{l/h}$). Les profils sont tracés en coordonnées de paroi, en normalisant les vitesses moyennes et écarts types par la vitesse de frottement monophasique. Les profils de vitesse normalisés mesurés en monophasique sont également reportés.

Nous avons regroupé les profils de vitesse longitudinale moyenne sur la **figure4.1a**, les profils de la vitesse verticale moyenne sur la **figure4.1b**, les profils de la tension de Reynolds longitudinale sur la **figure4.1c**, les profils de la tension de Reynolds verticale sur la **figure4.1d** et les profils du frottement turbulent sur la **figure4.1e**.

De manière générale, en présence de bulles, nous observons un déficit de vitesse moyenne longitudinale dans la zone logarithmique **figure4.1a**, le déficit s'accentue lorsque le débit global d'injection augmente ($Q_G = \mathbf{75}$ l/h, $\frac{Q_G}{n_{inj}} = \mathbf{3.95}$ l/h et $Q_G = \mathbf{200}$ l/h, $\frac{Q_G}{n_{inj}} = \mathbf{3.51}$ l/h). Par contre, le déficit de vitesse moyenne longitudinale dans la zone logarithmique diminue avec l'augmentation du débit local, c'est-à-dire de la taille des bulles ($Q_G = \mathbf{80}$l/h, $\frac{Q_G}{n_{inj}} = \mathbf{1.4}$ l/h et $Q_G = \mathbf{75}$ l/h, $\frac{Q_G}{n_{inj}} = \mathbf{3.95}$ l/h).

Avec injection, un excès de vitesse moyenne verticale<0 en proche paroi (vitesse rentrante) est également observé, qui peut être assimilé à un phénomène d'aspiration de la couche limite dû à la force de flottabilité induite par les bulles. Cet effet est renforcé par l'augmentation du débit global et atténué par l'augmentation de la taille des bulles.

En comparaison avec l'écoulement monophasique, nous observons un déficit de vitesse fluctuante longitudinale, un excès de vitesse fluctuante verticale et un déficit du frottement turbulent en proche paroi. Ces tendances sont accentuées par l'augmentation du débit global d'injection d'air. Cependant, nous notons peu d'influence de la taille des bulles sur l'amplitude des tensions de Reynolds, en l'absence de bulles de sillage.

A l'apparition des bulles de sillage ($Q_G = \mathbf{85}$ l/h, $\frac{Q_G}{n_{inj}} = \mathbf{9.44}$ l/h), le déficit de vitesse moyenne longitudinale se décale vers les y+ croissants et commence à s'accentuer pour $y_+ = 100$. Ceci est en accord avec un épaississement de la couche limite induite par les bulles de sillage. Par ailleurs, la vitesse verticale tend à s'annuler en proche paroi. Les valeurs de vitesse verticale rentrante sont décalées vers les valeurs de y_+ croissants avec présence d'un plateau de vitesse rentrante pour des valeurs de y_+ situées entre 50 et 100 . Le déficit de la contrainte de Reynolds longitudinale augmente à l'apparition des bulles de sillage et perdure à des distances de la paroi plus grandes qu'en absence de bulles de sillage et l'augmentation de la tension de Reynolds verticale est notable sur toute l'épaisseur de la région interne. Avec la génération de bulles de sillage, le frottement turbulent tend à augmenter au voisinage de la paroi, par contre nous avons un déficit de frottement turbulent qui s'étale ensuite sur toute la largeur de la région interne.

De manière générale, la présence de bulles décorrèle le mouvement fluctuant du liquide u' et v' en proche paroi. D'autre part, la réduction du frottement turbulent en proche paroi avec les bulles peut également être la conséquence de l'effet d'aspiration induit par leur présence.

4.2 Etude en quadrants : Influence de l'injection de bulles, sur la couche tampon

Les quadrants des fluctuations de vitesse obtenus par PIV dans la couche tampon (cumulées pour $y_+ < 40$) en monophasique et en diphasique sont illustrés sur la **figure4.2**. Le quadrant est divisé en 4 parties selon le signe des fluctuations de vitesse u'et v':

En diphasique, si nous augmentons le débit d'air global, nous observons une diminution du nombre des évènements de production de turbulence (éjections et balayage : $u'v' < 0$) associée à une augmentation du nombre d'évènements de destruction de turbulence ($u'v' > 0$)

Figure 4.1 Profils de vitesse mesurés par PIV dans la région logarithmique (respectivement: vitesse longitudinale moyenne, vitesse verticale moyenne, tension de Reynolds longitudinale, tension de Reynolds verticale et frottement turbulent)

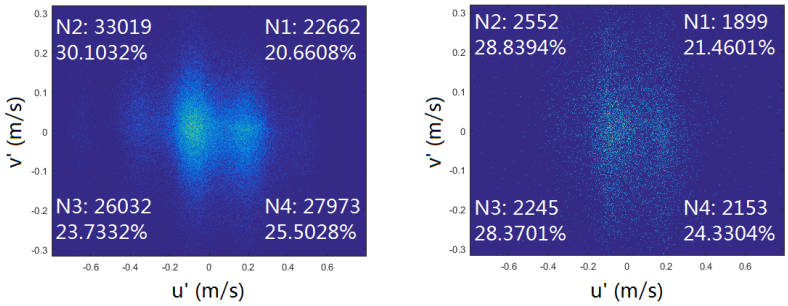

Figure 4.2 Quadrants des fluctuations de vitesse mesurée par PIV dans la couche tampon, en monophasique et en diphasique avec $Q_G = 200\frac{l}{h}, Q_G/n_{inj} = 3.51 l/h$

4.3 Modification de la vitesse longitudinale dans la sous couche visqueuse

Sur la **figure4.3**, nous avons tracé la variation relative de vitesse longitudinale induite par les bulles dans la sous couche visqueuse et mesurée par LDV $\frac{\Delta U}{U_0}$ est tracée en fonction du débit d'air local, paramètre de contrôle de la taille des bulles. Chaque couleur représente un débit d'air global différent.

En absence de bulles de sillage, on a un excès de vitesse longitudinale moyenne du liquide dans la sous couche visqueuse. Cet effet est plus marqué avec l'augmentation du débit global et diminue avec l'augmentation de la taille des bulles. Cela est en accord avec le déficit de vitesse observé dans la zone logarithmique (conservation du débit de liquide), et en accord avec l'effet d'aspiration induit par les bulles en proche paroi. A l'apparition des bulles de sillage, la vitesse longitudinale dans la sous couche visqueuse diminue en accord avec un effet de soufflage en proche paroi et un épaississement de la couche limite. A l'apparition des bulles de sillage, on s'attend donc à une réduction du frottement pariétal.

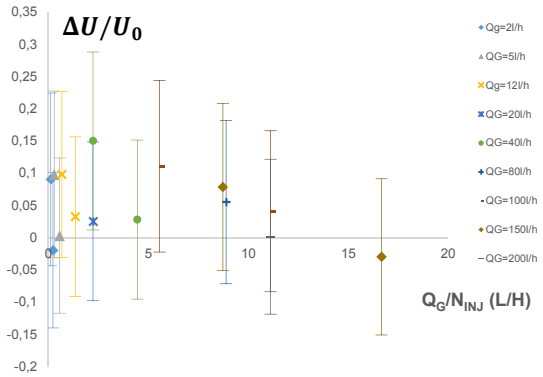

Figure 4.3 Evolution de la variation relative de vitesse longitudinale dans la sous couche visqueuse en fonction du débit d'injection local

5 Conclusion

Dans cette étude, nous avons caractérisé expérimentalement l'influence de l'injection de bulles sur une couche limite turbulente en développement sans gradient de pression. Les bulles testées sont de taille intermédiaire (entre la microbulle et l'épaisseur de couche limite) soumises à un fort effet de gravité. Plusieurs points de fonctionnement ont été étudiés, en faisant varier la taille des bulles et le débit d'air global.

Nous avons procédé à l'analyse eulérienne de la vitesse de la phase liquide par PIV en plan vertical dans la zone logarithmique et par LDV en un point dans la sous couche visqueuse.

De manière générale, l'analyse des quadrants des fluctuations de vitesse du liquide dans la couche tampon a mis en évidence une diminution globale des évènements de production de la turbulence ($u'v' < 0$), en présence de bulles. En effet, l'injection de bulles de taille intermédiaire décorrèle les mouvements fluctuants du liquide dans les directions longitudinale et verticale, ce qui conduit à une diminution du frottement turbulent dans la zone logarithmique.

Nous avons mis en évidence deux régimes d'écoulement : un régime d'aspiration et un régime de soufflage en fonction de la taille des bulles.

En absence de bulles de sillage, la flottabilité des bulles induit un effet d'aspiration. Par comparaison à l'écoulement monophasique, on observe un déficit de vitesse longitudinale et un excès de vitesse rentrante dans la zone logarithmique, associé à un excès de vitesse longitudinale dans la sous couche visqueuse. Ces tendances sont accentuées avec l'augmentation du débit global d'injection, elles sont moins marquées avec l'augmentation de la taille des bulles. Cet effet d'aspiration peut être du aux tourbillons jumeaux de bord d'attaque et de bord de fuite des bulles qui existent pour des bulles, soumises à un fort effet de gravité, glissant le long de la paroi (Oishi, 2014). En particulier le tourbillon de bord de fuite génère un mouvement de balayage qui pourrait expliquer l'effet d'aspiration que nous avons observé sur le mouvement moyen du liquide.

Au-delà d'une taille critique de bulles, à l'apparition des bulles de sillage, on observe un épaississement de la couche limite associé à un effet de soufflage qui entraîne un déficit de vitesse longitudinale du liquide dans la sous couche visqueuse. Cet effet est similaire aux observations rapportées en injection de microbulles dans la couche limite turbulente, avec réduction de frottement de paroi. Ce régime d'écoulement n'a jusqu'ici pas été mis en évidence dans la littérature. Il constitue un régime intéressant en termes de rendement hydrodynamique car on s'attend à une réduction de frottement pariétal conséquente pour un faible taux de vide global dans la couche limite et des tailles de bulles millimétriques, faciles à générer.

En termes de perspective, pour ces deux régimes, il est nécessaire de procéder à une mesure locale du frottement de paroi qui prennent en compte à la fois la variation relative de la vitesse longitudinale du liquide dans la sous couche visqueuse, mais aussi le temps de résidence local du liquide, via la fraction volumique locale. D'autre part, pour le régime de bulles de sillage, nous n'avons pas pu tester l'influence du débit global, sans faire varier le débit local qui conditionne la génération des bulles de sillage. D'autres points de fonctionnement sont à investiguer pour ce deuxième régime.

Remerciements

Cette étude fait partie d'un projet soutenu financièrement par l'ANR Astrid : F-DRAIHN ANR-12 ASTR-0017. Nous remercions également le service technique de l'IRENav qui a contribué à l'adaptation de la veine et de l'instrumentation, ainsi que l'Ecole Navale pour la mise à disposition du tunnel hydrodynamique.

Références

Bröder, D., Sommerfeld, M., A PIV/PTV system for analyzing turbulent bubbly flows, *Proceedings of the 10th International Symposium Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal.,* 2000

Butterworth, J., Atlar M., Shi W., *Experimental analysis of an air cavity concept applied on a ship hull to improve the hull resistance, Ocean Engineering*., 110, pp. 2-10, 2015

Ceccio, S., Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection, *Annu. Rev. Fluid. Mech.,* 42, pp. 183-203, 2010.

Cousteix J., Aerodynamique : Turbulence et couche limite, *Cepadues-Editions.,* 1989

Foeth E. J., Decreasing frictional resistance by air lubrification, *20th International Hiswa Symposium on Yacht Design and Yacht Construction*, 2008.

Ferrante A. and Elghobashi S., On the physical mechanisms of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer laden with microbubbles, *J. Fluid. Mech.,* 503, pp. 345-355, 2004.

Jacob B., Olivieri A., Miozzi M., Campana E.F. and Piva R., Drag reduction by microbubbles in a turbulent boundary layer, *Phys. Fluid.,* 22, 115104 pp. 1-11, 2010.

McCormick, M.E., Bhattacharyya, R., Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. Naval Eng. J. 85, 11-16, 1973

Murai Y., Fukuda H., Oishi Y., Kodama Y. and Yamamoto F., Skin friction reduction by large air bubbles in a horizontal channel flow, *Int. J. of Multiphase Flow.,* 33, pp. 147-163, 2007.

Oishi Y., Murai Y., Horizontal turbulent channel flow interacted by a single large bubble, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 55, pp 128–139, 2014.

Park H.J., Tasaka Y., Murai Y. and Oishi Y., Vortical structures swept by a bubble swarm in turbulent boundary layers, *Chem. Eng. Sc.,* 116, pp. 486-496, 2014.

Westerweel J., Scarano F., Universal outlier detection for PIV data, *Exp. In Fluids.,* 39, pp. 1096-1100, 2005