Système d'acquisition des mesures : présentation et réglages

Les différentes techniques de mesure que nous avons utilisées au cours de cette étude sont l'anémométrie laser doppler (LDA) et la vélocimétrie par images de particules (PIV). Mais nous n'exposerons ici que la technique LDA. A cause de la lourdeur du matériel mis en œuvre pour la PIV et l'opération de traitement du signal lié à cette méthode, il nous a fallu suivre une formation à cette technique et nous n'avons pas eu le temps nécessaire pour exploiter les résultats obtenus par cette technique.

3.2.1 Système de mesure par Anémométrie Laser Doppler

L'anémométrie laser à effet Doppler est une technique optique permettant de déterminer les composantes de vitesse d'un écoulement, basée sur la mesure du décalage de la fréquence de la lumière émise par une particule, en mouvement avec le fluide. Cette technique de mesure non intrusive utilise le principe de l'effet Doppler appliqué à de fines particules présentes dans l'écoulement. Lorsqu'une de ces particules traverse un système de franges d'interférences de lumière créé par l'intersection de deux faisceaux, elle crée un signal de diffusion à une fréquence caractéristique f_d directement proportionnelle à la vitesse de la particule u et inversement proportionnelle à l'interfrange. Si θ est le demi-angle entre les deux faisceaux lasers, f_d est donnée par la relation:

$$f_d = \frac{2u\sin(\theta/2)}{\lambda} \tag{3.2}$$

où θ est le demi angle entre les faisceaux incidents et λ la longueur d'onde du faisceau laser. La connaissance de λ , θ et la mesure de f_d donnent accès à une composante du vecteur vitesse.

L'utilisation des faisceaux de deux longueurs d'onde différentes (bleu - 488 nm et vert -514 nm) du laser permet de créer deux systèmes de franges orthogonales et de mesurer ainsi la vitesse selon deux directions.

Le système LDA utilisé durant ces mesures est du type Flow lite 2D commercialisé par la société « Dantec Dynamics ». La chaîne de mesure est composée des éléments suivants :

- 4 Un laser de type Argon ionisé
- 4 Un séparateur de couleur
- 4 Une cellule de Bragg
- **4** Une sonde d'émission/réception



Figure 36: Schéma de principe de l'anémométrie laser (Ref. Image Dantec)

Le faisceau laser issu du laser Argon est converti en deux paires de faisceaux parallèles d'égales intensités. Deux faisceaux de couleur verte, de longueur d'onde 514,5 nm sont utilisés pour la mesure d'une composante de la vitesse, notée V. Deux faisceaux de couleur bleu, de longueur d'onde 488 nm sont utilisés pour la mesure d'une composante ici axiale U de la vitesse.

Pour déterminer le sens du déplacement des particules, un décalage de fréquence de 40 Mhz de l'une des deux paires de faisceaux est réalisé à travers son passage dans une cellule de Bragg. Les deux paires de faisceaux, l'un " braggé " et l'autre " non braggé " sont focalisées à l'aide d'une lentille frontale pour former des franges d'interférences qui définissent le volume de contrôle (ou volume de mesure). Lorsqu'une particule traverse ce système de franges d'interférences, celle ci réémet de la lumière dans toutes les directions, mais avec une intensité différente. Cette lumière émise par la particule est diffusée vers l'arrière de la lentille frontale (c'est la rétrodiffusion), et enregistrée dans le photo-récepteur, dispositif qui permet de transformer les faisceaux lumineux en signal électrique.

Les particules passant en dehors du volume de contrôle émettent également de la lumière, mais le photo-récepteur est focalisé sur le volume de contrôle, et la lumière émise est hors focale et augmente légèrement le bruit de fond.

Les deux paires de faisceaux " braggé " et " non braggé " de même que la lumière rétrodiffusée par les particules sont transmises par des fibres optiques. Ceci permet de réduire la taille et le poids de la sonde, rendant l'équipement flexible et plus facile à utiliser dans les mesures pratiques. Le laser, le séparateur de couleur, la cellule de Bragg et le photo-récepteur peuvent être fixes à l'écart de la boucle d'essai, tandis que la sonde peut être manipulée pour changer de zone de mesure.

La figure 37 ci-dessous montre une vue du dispositif expérimental.



Figure 37: dispositif expérimental, avec et sans la tête d'optique laser

	Vitesse longitudinale U	Vitesse transversale V
Couleur des faisceaux	Bleu	vert
Écartement des faisceaux	38 mm	
Longueur d'onde	488 nm	514,5 nm
Demi-angle θ	8,776°	
Interfrange	1,6 µm	1,7 μm
Largeur du volume de mesure d_x	0,03517 mm	0,03708 mm
diamètre du volume de mesure d_y	0,03476 mm	0,03665 mm
La longueur du volume de mesure d_z	0,2278 mm	0,2402 mm
Nombre de franges N_f	21	21

Tableau 2: Principaux paramètres utilisés en LDA

Le tableau ci-dessus donne les principaux paramètres correspondant aux configurations utilisées lors de notre étude.

3.2.2 Procédure d'acquisition

Le principe des mesures est le suivant :

- Ensemencement de l'écoulement avec des particules de verre creuses de diamètre 100 μm et de masse volumique 1,1 g/cm³;
- Mesure de la vitesse de l'eau par la technique Anémométrie Laser Doppler;
- Injection des bulles d'air calibrées à 200 µm à l'aide du système prévue à cet effet et décrit au paragraphe 3.1.1;
- Mesure de leurs vitesses et détermination de leurs trajectoires.

Notons que les bulles sont injectées avec une vitesse initiale la plus faible possible de manière à éviter un effet de glissement avec la phase continue. La série de tests est réalisée en faisant varier un certain nombre de paramètres :

- ✓ Mesure en faisant varier la concentration des bulles d'air à l'amont de la grille à l'aide du rotamètre et du détendeur décrit au paragraphe 3.1.1 ;
- ✓ Mesure en faisant varier la vitesse de l'écoulement amont.

a) Préparation de l'unité et ensemencement

Avant tout essai, il faut remplir le bassin de l'unité avec de l'eau tirée du réseau d'alimentation du centre. Le volume total d'eau rempli est estimé à $1m^3$. On a pris soin de bien respecter le niveau maximal d'eau (indiqué sur l'unité) pour éviter tout risque de débordement pendant le fonctionnement de l'unité. On met en route la pompe au débit minimum (15 Hz) et on procède à l'ensemencement de l'écoulement. On ensemence l'écoulement avec des billes de verre de type 110P8 de masse volumique $1,1g/cm^3$ et de diamètre moyen de $11\mu m$. Nous avons introduit environ 50g de ces billes de verre dans l'écoulement.

b) Repérage et détermination de l'origine spatiale

Le laser est utilisé à une puissance de 400 mW. Nous avons placé le volume de mesure sur la première paroi à l'intérieur au niveau du bord d'attaque d'un aubage comme indiqué sur la figure 38 ci-dessous (position que nous avons prise comme origine spatiale).



Figure 38: Repérage de l'origine spatiale

c) Vérification de la perpendicularité du laser

Pour vérifier la perpendicularité du laser par rapport à la paroi interne de la veine, nous avons dans un premier temps déplacé le volume de mesure selon l'axe x sur la face interne de la paroi, de x = 0 à x = 65 mm. L'absence de signal permet de s'assurer que le volume de mesure est sur la paroi interne et que l'on obtient ainsi une bonne perpendicularité par rapport à cet axe. Dans un second temps, on revient à l'origine que l'on s'est fixée et on procède de la même manière selon l'axe y.

d) Vérification de la profondeur

Pour vérifier la profondeur de la veine, on place le volume de mesure à l'origine, et on le déplace dans le sens de la profondeur c'est-à-dire selon l'axe z jusqu'à arriver à la seconde paroi interne. En déplaçant le volume de mesure dans le sens de la profondeur, on mesure un signal représentatif des particules traversant la veine d'essais. L'absence de signal indique que le volume atteint l'autre paroi.

La distance parcourue est alors mesurée au moyen du système de déplacement micro métrique et comparée à la profondeur réelle de la veine. On note ainsi l'effet du changement d'indice de réfraction sur l'inclinaison des faisceaux.

On trouve ainsi une distance de 23 mm alors que la profondeur réelle de la veine est de 30 mm. Comme l'indice de réfraction de l'eau est de 1,3, la profondeur mesurée correspond bien à la valeur réelle p = 23*1, 3 = 29,9 mm.

e) Protocole opératoire

Signalons que durant tous nos essais, nous nous sommes focalisés sur le canal placé au centre de la veine d'essais comme montré sur la figure 39 ci-dessous. Les mesures sont réalisées au milieu de la veine dans le plan médian noté P_m , donc en partant de l'origine (0,0,0) nous avons déplacé le volume de mesure à mi-distance dans la direction de la profondeur, soit une ordonnée z = 15 mm.

Chaque acquisition à une coordonnée fixée, est réalisée à partir de 2000 points de mesure. Cette valeur est un minimum pour réaliser un traitement statistique acceptable. Nous avons donc accès aux grandeurs telles que la vitesse moyenne et l'écart-type...

En chaque position, la vitesse moyenne, l'écart-type et l'incertitude des mesures sont calculés par [7]:

$$\overline{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} u_i$$
(3.3)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(u_i - \overline{u}\right)^2}$$
(3.4)

$$\Delta u = 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \tag{3.5}$$

Où N est le nombre de valeurs validées au point de mesure. Dans ces conditions, l'incertitude maximale de nos mesures est évaluée à 1,1%. Signalons aussi que le Data Rate de tous nos points de mesure est au minimum de 90%. Les taux de turbulence sont de l'ordre de 13% pour le débit Q1 (c'est-à-dire quand la pompe fonctionne à la fréquence de rotation de 15 Hz), de l'ordre de 18% pour le débit Q2 (fréquence de 20 Hz) et de l'ordre de 25% pour le débit Q3 (fréquence de 25 Hz).



Figure 39: Zone d'analyse

f) Définition des plans de mesure LDA en écoulement monophasique

Les mesures ont été réalisées sur une fenêtre couvrant le canal central afin de s'affranchir des effets de bord en parties supérieure et inférieure.

Les mesures ont été réalisées avec une fréquence de rotation de la pompe de 15 Hz, 20 Hz et 25 Hz. La valeur du débit associé à la vitesse de rotation de la pompe n'est pas une donnée pertinente puisque des débits de fuites internes existent en amont de la veine d'essais dus à un problème d'étanchéité. En revanche, il est important de bien déterminer le profil de vitesse à la sortie du nid d'abeille placé en amont de la grille d'aubes.

Dans un premier temps, le profil de vitesse en amont de la grille d'aubes a été déterminé comme indiqué ci dessous, avec une fréquence de la pompe réglée à 15 Hz.

On place le volume de mesure à mi-profondeur et à une abscisse x = -20 mm puis on mesure les composantes horizontale et verticale de vitesse v_x et v_y le long d'un axe parallèle à l'axe vertical y sur toute la hauteur de la veine d'essais avec un pas de 10 mm. Nous avons procédé d'une façon identique en fixant la fréquence de rotation de la pompe à 20 Hz puis à 25 Hz.

Par la suite, des mesures des composantes de la vitesse ont été menées dans la grille d'aubes.

Le pas noté "g" de la grille (d'un bord d'attaque d'un aubage à un autre) est décomposé en 9 parties égales, soit un pas de 4,65 mm. On place le volume de mesure à une abscisse x = -4mm et on mesure les composantes de la vitesse v_x et v_y selon les coordonnées suivantes :

X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
-4	-9,3	15
-4	-4,65	15
-4	0	15
-4	4,65	15
-4	9,3	15
-4	13,95	15
-4	18,6	15
-4	23,25	15
-4	27,9	15
-4	32,55	15
-4	37,2	15
-4	41,85	15
-4	46,5	15
-4	51,15	15

Tableau 3 : Matrice d'essai

On procède de la même manière à différentes valeurs de l'abscisse x depuis le bord d'attaque d'un aubage, (c'est-à-dire $x_{BA} = 0 mm$) jusqu'au bord de fuite ($x_{BF} = 56,95 mm$) avec un pas x = 6,27 mm. On itère avec deux mesures supplémentaires au voisinage du bord de fuite à $x = x_{BF} - 3 mm$ et $x = x_{BF} + 3 mm$.

3.3 Présentation des résultats

3.3.1 Essais en monophasique

Cette partie consiste en la mesure des profils de vitesse de la phase continue dans les directions axiale et verticale de la veine. Signalons que les vitesses que nous mesurons par la LDA sont ceux des particules d'ensemencement injectées dans l'écoulement et supposées suivre parfaitement son mouvement. Afin de s'assurer que les erreurs liées aux mesures sont minimisées, nous avons vérifié la répétabilité de nos essais puis vérifié la conservation du débit comme l'indique la figure 46.

Profils de vitesse en amont de l'ensemble de la grille

Les figures 40 et 41 ci-dessous représentent les profils de la vitesse axiale notée "u" et de la vitesse verticale notée "v" rapportés à la vitesse débitante Va, sur une ligne située dans un plan à mi profondeur (z=15 mm), et en amont de la grille d'aubes à une abscisse x = -20 mm, l'origine correspondant aux bords d'attaque des aubages. L'abscisse y* est la hauteur de la veine noté "y" rapportée au pas de la grille d'aubes noté "g".

$$y^* = \frac{y}{g} * 100$$



Figure 40: Profils de vitesse axiale



Figure 41: Profils de vitesse verticale

Les résultats sont donnés pour trois points de fonctionnement différents de la pompe de circulation (fréquence de 15 Hz, 20 Hz, et 25 Hz). Comme on peut le constater les vitesses u et v ne sont pas uniformes sur toute la hauteur de la veine d'entrée. Cela est certainement dû à la disposition des tubes d'arrivée d'eau en amont du nid d'abeilles. Il est aussi probable que le nid d'abeille ne soit pas assez efficace pour homogénéiser l'écoulement en amont de la grille.

On note cependant une homothétie entre les profils de vitesses et les fréquences de rotation de la pompe (par conséquent aux débits). C'est la preuve que les conditions d'alimentations ne dépendent pas du débit. Les valeurs moyennées arithmétiquement de la vitesse débitante Va sur la hauteur explorée de la veine sont les suivantes pour chaque valeur de la fréquence de rotation de la pompe:

- Fréquence 15 Hz : 0,9 m/s
- Fréquence 20 Hz : 1,09 m/s
- Fréquence 25 Hz : 1,20 m/s

Profils de vitesses à l'entrée du canal central

Les figures 42 et 43 ci-dessous représentent les profils de la vitesse axiale u et de la vitesse verticale v à l'entrée du canal central de la grille d'aubes c'est-à-dire à une abscisse x = 0 mm.

où y est l'abscisse verticale, g, le pas de la grille d'aubes. Ainsi, y* vaut 0 sur le bord d'attaque inférieur du canal central, et 100 sur le bord d'attaque supérieur. On observe bien sur les figures 42 et 43 le sillage des aubages.

Comme cela a déjà été mis en évidence, la vitesse axiale n'est pas uniforme à l'entrée de grille.



Figure 42: Vitesse axiale à $m^*=0\%$



Figure 43: Vitesse verticale à $m^*=0\%$

Sur les figures 42 et 43, m* représente l'abscisse curviligne réduite de la section de mesure en pourcentage de la longueur curviligne totale de l'aubage.

A partir des résultats donnés en figures 42 et 43, on présente sur la figure 44 le profil de l'angle β_1 de l'écoulement repéré par rapport à la direction axiale. L'existence d'un profil de vitesse verticale à l'entrée du canal central est la preuve que l'écoulement n'est pas purement axial et qu'il y a bel et bien un léger angle d'incidence qui varie en fonction de la cordonnée verticale réduite y* comme le montre la figure ci-dessous.



Figure 44: Angle d'écoulement β_1 en entrée du canal central

L'angle de l'écoulement dans la veine est défini comme étant l'angle que fait l'écoulement projeté dans le plan P_m et la direction axiale. Ainsi on a :

$$\beta = \arctan\left(\frac{v}{u}\right) \tag{3.6}$$

Comme l'angle géométrique de l'aubage noté β_{g1} est nul en entrée, l'angle d'incidence est donc égal à l'angle β_1 de l'écoulement. On constate au vue de la figure 44 que cet angle d'incidence est plus élevé sur l'intrados (côté en surpression) que sur l'extrados (côté en dépression) des aubages.

Le gradient qui existe entre l'extrados et l'intrados du profil est tout à fait en accord avec les évolutions des angles en entrée de grille rencontrés dans ce type de géométrie.

Profils de vitesses en sortie du canal central

Sur la ligne des bords de fuite

La figure 45 représente l'évolution du profil de vitesse axiale rapporté à la vitesse débitante le long d'une ligne située aux bords de fuite ($x_{BF} = 56,95 mm$ - m* = 100 %) des aubages de la grille d'aubes. Tout comme le profil de vitesses en bord d'attaque, on voit ici que le profil de vitesse en bord de fuite ne dépend pas du débit.



*Figure 45: Vitesse axiale à m**=100%

Afin de vérifier la continuité du débit, nous avons comparé le profil de vitesse axiale en bord d'attaque (BA) à celui en bord de fuite (BF) (figure 46). Etant donnée l'homothétie qu'il y a entre les profils de vitesse et le débit, nous avons limité la comparaison au cas où la pompe fonctionne à la fréquence de rotation de 15Hz (débit Q1). On observe sur la figure 46, aux erreurs de mesures près que le débit est conservé.



Figure 46: Vérification de la conservation du débit

La figure 47 représente le profil de vitesse verticale à la sortie du canal central de la grille d'aubes en fonction du débit. Contrairement au profil vertical en entrée (Cf figure 43), on voit ici que la vitesse verticale est beaucoup plus importante qu'en entrée. C'est la preuve que l'écoulement subit bien une déflexion due à la courbure des aubages. De plus cette vitesse verticale est du même ordre de grandeur que la vitesse axiale, cela suppose donc que l'écoulement sort du canal avec un angle d'environ 45°.

La figure 48 représente l'évolution de l'angle d'écoulement β au bord de fuite du canal central. L'observation faite sur cette figure est la même que celle faite sur la ligne à +3 mm des bords de fuite. La description faite à cet effet est aussi valable ici.



Figure 47: Vitesse verticale à m*=100%



Figure 48: Evolution de β_2 au bord de fuite

Interprétation

Sur la ligne des bords de fuite des aubages, le profil de vitesse axiale (figure45) est nettement plus homogène que celui mesuré sur la ligne de bord d'attaque (figure 42). Sur une partie du canal, d'une abscisse y* allant de 70 % à 85 %, on observe une légère chute de la vitesse axiale (figure 45) qui s'associe à une augmentation de la composante verticale (figure 47). Cela traduit probablement un épaississement de la couche limite sur le côté en dépression au voisinage du bord de fuite, qui se traduit par un angle de l'écoulement plus important dans cette zone.

Sur la ligne $\dot{a} + 3 mm du$ bord de fuite

Les figures 49 et 50 ci-dessous représentent respectivement l'évolution de la vitesse axiale u et la vitesse verticale v rapportées à la vitesse débitante Va sur un axe placé à 3 mm en aval de la ligne des bords de fuite. Cette distance correspond au jeu situé normalement entre le bord de fuite du rotor de la pompe et le bord d'attaque du stator. Il parait donc intéressant de connaître l'évolution de ces grandeurs sur cet axe.



Figure 49: Vitesse axiale à x_{BF} + 3mm



Figure 50: Vitesse verticale à $x_{BF} + 3mm$



Figure 51: Evolution de β_2 au bord de fuite+3mm

Signalons d'abord que pour nous l'écoulement dit "principal" est l'écoulement en sortie d'un canal, compris entre les deux sillages des aubages. En dehors de l'écoulement principal, les mesures doivent mettre en évidence les sillages des aubages. Ainsi l'axe d'exploration de la vitesse est compris entre les points $y^*=-25\%$ et $y^*=125\%$.

En premier lieu, il convient de constater que les profils des composantes de vitesse mesurés à 3 mm en aval de la ligne des bords de fuite (figures 49 et 50) sont plus homogènes que ceux mesurés sur la ligne des bords de fuite (figure 45 et 47). Et tout comme pour le cas en bords de fuite, ici aussi la vitesse verticale v est du même ordre de grandeur que la vitesse axiale u. Ceci suppose que l'angle d'écoulement en sortie β_2 est plus uniforme sur une majeur partie de la section transversale en sortie dans l'écoulement principale, à l'exception des sillages. Par conséquent le profil de l'angle de l'écoulement en sortie à 3mm en aval de la ligne des bords de fuite a des valeurs proches de 45° sur une plage de y* allant de 10 % à 70% comme on peut le voir sur la figure 51.

Angle moyen de sortie

Pour la condition d'une vitesse axiale en entrée ($V_{\theta_1} = 0$), l'équation d'Euler (voir en annexe) montre que la prédiction de la quantité d'énergie échangée entre le fluide et les aubages dépend de l'angle d'écoulement en sortie β_2 . Il est donc nécessaire d'évaluer la valeur moyenne de cet angle sur toute la hauteur de la ligne des bords de fuite pour chaque débit. Nous avons pris la moyenne arithmétique pondérée par la vitesse axiale en sortie sur la ligne des bords de fuite. Ce choix se justifie par le constat que l'angle β_2 est très important dans le sillage des aubages (figure 51) alors que la vitesse axiale y est faible (figure 49). Mais ce constat sera bien mis en évidence dans le paragraphe consacré aux simulations numériques. Il était donc normal d'attribuer un poids plus important aux angles obtenus dans l'écoulement principal par rapport aux angles obtenus dans les zones de sillage. Ainsi pour chaque débit, nous avons défini l'angle beta2-moyen ($\overline{\beta_2}$) comme suit:

$$\tan\overline{\beta} = \frac{\sum_{i} u_i \tan\beta_i}{\sum_{i} u_i}$$
(3.7)

Ainsi, aux erreurs de mesures prés, on retrouve un angle d'écoulement de sortie invariant par rapport au débit et égal à $\overline{\beta_2} = 47, 7^\circ$.

3.3.2 Essais en diphasique

Mesures avec la camera à images rapides

Les essais en écoulement diphasique ont consisté à injecter des bulles d'air dans l'écoulement monophasique. Rappelons que compte tenu des caractéristiques du volume de mesure de la LDA (cf tableau 2 - §3.2.1), la technique de mesure utilisée ne permet pas de déterminer la vitesse des bulles. En effet le diamètre des bulles de 200 µm est environ 200 fois plus important que l'interfrange dans le volume de mesure.

Nous avons donc procédé à la prise de films à images rapides à l'aide d'une caméra FASTCAM-APX RS pour visualiser la trajectoire des bulles à la traversée de la grille d'aubes. Ceci nous permettra de déterminer les lieux éventuels de concentration des bulles.

Les bulles d'air sont injectées à l'aide d'un système prévu à cet effet et composé de sept aiguilles en forme de peigne de diamètre intérieur de $200\mu m$ et relié au réseau d'air du centre. Ces bulles sont injectées avec une vitesse initiale la plus faible possible de manière à éviter un effet de glissement avec la phase continue. Le débit d'air injecté est mesuré à l'aide d'un débitmètre BROOKS SHO-RATE série GT 1355 comme l'indique la figure 52.



Figure 52: Débitmètre BROOKS SHO-RATE

Nous avons ainsi travaillé avec trois débits d'air différents à savoir $Q_{g1} = 8,28 l/h$, $Q_{g2} = 5 l/h$

et $Q_{g3} = 3 l/h$. Mais seuls les résultats avec le débit $Q_{g3} = 3 l/h$ seront exposés ici car par manque de temps nous n'avons pu dépouiller et exploiter que les résultats obtenus avec ce débit d'air.

Tous les films ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- Objectif macro 105 mm,
- Vitesse d'acquisition : 3000 images / seconde,
- Format image : 1024 * 1024 pixels,
- Diaphragme caméra : 8,
- Zone filmée : aubage central,
- Fluide : eau brute puis eau+air

La figure ci-dessous donne un exemple d'une image prise lors des essais.



Figure 53: Photo des bulles d'air dans l'écoulement

Pour une analyse plus aisée des images, nous avons décidé de traiter une image sur dix sur les 300 photos que comporte un fichier sauvegardé. Pour ce faire, nous avons écrit un programme sous le format Matlab pour repérer les positions successives d'une bulle afin de reconstituer sa trajectoire.

Compte tenu du nombre élevé de bulles et pour une meilleure clarté, nous avons décidé de ne suivre que deux bulles partant de deux positions différentes (notées 1 et 2 sur la figure 54) au niveau de la ligne des bords d'attaque. La figure ci-dessous donne le résultat pour le cas où la fréquence de rotation de la pompe est 15 Hz (débit Q1) et le débit gaz est $Q_{r3} = 3 l/h$.



Figure 54: Trajectoire de bulles d'air quantifié par camera à images rapides

Sur la figure 54, les traits discontinus bleus représentent les lignes de courant de la phase liquide et les points rouges représentent les positions successives de deux bulles toutes les 0,0033 s.

Les lignes de courant de la phase liquide sont obtenues de la même façon que les trajectoires des bulles, c'est-à-dire en repérant les positions successives des petites billes de verre de densité $1,1 g/cm^3$ et de diamètre moyen de $11 \mu m$.

Plusieurs observations peuvent être faites au vu de cette figure. Premièrement, on observe bien une accélération des bulles à la traversée de la grille et plus particulièrement à partir de la seconde moitié du canal. En effet, on voit bien au voisinage des bords d'attaque, les positions successives des bulles sont très rapprochées alors que à partir d'une abscisse de 40 mm, les positions de celles-ci deviennent de plus en plus espacées le même intervalle de temps.

Deuxièmement, la figure 54 permet de démontrer qu'en comparant la trajectoire de la bulle partant de la position 1 et la ligne de courant de la phase liquide passant par cette même position, une déviation de la trajectoire de la bulle d'air s'opère à partir de l'abscisse 35 mm. La conséquence de cette déviation est que la bulle d'air sort du canal au voisinage du côté en dépression, avec un angle noté $\beta_{2_{par}}$ plus important que l'angle de l'écoulement de la phase continue $\beta_{2_{lin}}$.

Enfin, on constate que quelle que soit leur position de départ, les bulles ont tendance à sortir du canal au niveau de l'aubage supérieur près du côté en dépression.

Remarque :

Il est légitime de se poser la question si la migration des bulles vers ce côté en dépression de l'aubage supérieur du canal n'est pas due à la poussée d'Archimède qui s'applique sur les bulles. Nous avons donc estimé le poids de la bulle et la force due au gradient de pression environnant la bulle et avons comparé ces deux forces.

Nous avons calculé le poids de la bulle corrigé de la poussée d'Archimède par la formule ci-dessous :

$$F_{y} = (\rho_{eau} - \rho_{air})V g = \Delta \rho V g$$
(3.8)

où $V = \frac{\pi}{6}d^3$ est le volume de la bulle et aussi le volume de liquide déplacé par la bulle.

Compte tenu des données numériques on obtient pour cette force

$$F_{y} = 6.4 * 10^{-7} N \tag{3.9}$$

Puis nous avons estimé la pression environnant la bulle par l'expression:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{2\sigma}{R} \tag{3.10}$$

où

 p_1 , p_2 , σ , R sont respectivement la pression environnant la bulle, la pression à l'intérieur de la bulle, la tension superficielle à la limite de séparation et le rayon de la bulle.

La force centrifuge due à la courbure des lignes de courant s'exprime par :

$$F_{c-c} = \rho \frac{\pi d^3 V_b^2}{6R_c}$$
(3.11)

où R_c est le rayon de courbure des aubages, V_b la vitesse de la bulle et d son diamètre.

La force due au gradient de pression corrigée de la force centrifuge liée à la courbure des lignes de courant a pour expression :

$$F_p = V \nabla p - F_{c-c} \tag{3.12}$$

On approxime alors cette force par la relation :

$$F_{p} = V \frac{\Delta p}{R} = \frac{8\pi}{3} R \sigma - \rho \frac{\pi d^{3} V_{b}^{2}}{6R_{c}}$$
(3.13)

L'application numérique de cette formule avec une vitesse $V_b = 1ms^{-1}$ donne :

$$F_p = 1525.10 * 10^{-7} N \tag{3.14}$$

Finalement, en comparant les relations (3.9) et (3.14) on se rend compte que la poussée d'Archimède est très négligeable devant la force due au gradient de pression environnant la bulle.

Nous pouvons donc affirmer que la migration constatée des bulles d'air vers le côté en dépression des aubages n'est pas due à la poussée d'Archimède mais plutôt au gradient de pression environnant la bulle.

3.4 Synthèse

Ce chapitre expérimental nous a permis de valider de façon qualitative l'étude théorique menée dans le chapitre 2. Elle n'a pas pu être quantitative compte tenu des contraintes d'encombrements liés à notre dispositif expérimental qui ne nous permettaient pas un contrôle suffisant de l'écoulement incident. L'analyse à consisté à mesurer les profils de vitesses et les trajectoires de bulle de gaz dans une grille d'aubes.

Ce dispositif nous permet de s'affranchir des forces de Coriolis et de la force centrifuge tout en accentuant le phénomène physique à étudier par l'accélération de l'écoulement.

Les résultats confirment l'étude théorique et démontrent :

En écoulement monophasique

- que les profils de vitesses sont indépendants du débit ;
- que le gradient de l'angle d'écoulement d'entrée β₁ qui existe entre l'extrados et l'intrados du profil est tout à fait en accord avec les évolutions des angles en entrée de grille rencontrés dans ce type de géométrie ;
- que l'angle d'écoulement de sortie β_2 est relativement uniforme sur une majeur partie de la section transversale en sortie de grille dans l'écoulement principal, à l'exception des sillages ;

En écoulement diphasique

- que les bulles de gaz sont bien déviées vers le côté en dépression des aubages.

Par la suite, les moyens expérimentaux ne nous permettant pas de modifier les conditions opératoires sur une large plage, nous avons modélisé la grille d'aubes et procédé aux calculs avec le code ANSYS CFX comme décrit dans le chapitre suivant.