

Titre: Étude de l'injection d'air à travers des fentes dans un écoulement
Title: d'eau transverse

Auteur: Leila Dhar
Author:

Date: 2020

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Dhar, L. (2020). Étude de l'injection d'air à travers des fentes dans un écoulement
Citation: d'eau transverse [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/5330/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/5330/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Stéphane Étienne, & Cédric Béguin
Advisors:

Programme: Génie mécanique
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Étude de l'injection d'air à travers des fentes dans un écoulement d'eau
transverse**

LEILA DHAR

Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
Génie mécanique

Juin 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Étude de l'injection d'air à travers des fentes dans un écoulement d'eau
transverse**

présenté par **Leila DHAR**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Dominique PELLETTIER, président

Stéphane ETIENNE, membre et directeur de recherche

Cédric BÉGUIN, membre et codirecteur de recherche

David SCOTT, membre

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier mon directeur de maîtrise Stéphane Etienne pour m'avoir accueilli dans son équipe et permis de travailler sur ce projet très intéressant. Son accessibilité et son optimisme ont permis de surmonter beaucoup de défis expérimentaux.

Je voudrais également remercier mon co-directeur, Cédric Béguin, qui grâce à toutes ses idées et ses connaissances a permis de faire avancer le projet plus rapidement.

J'aimerais également remercier mes collègues, Grégoire Recchia, Florentin Anne et Stefane Sved pour m'avoir tant aidé tout au long de ma maîtrise.

Je remercie ma famille pour leur soutien, leurs encouragements et leur curiosité.

Merci aux techniciens, Bénédicte Besner, Guy Gironne et Nour Aimene, pour m'avoir guidé et appris à utiliser le matériel disponible.

Merci également aux stagiaires, Louis Dutheil, Thierry Pelletier et Simon Tanguay, qui ont contribué à faire avancer les expériences.

RÉSUMÉ

Ce mémoire étudie l'injection d'air à travers des fentes de formes différentes dans un écoulement d'eau transverse. Peu d'informations sont disponibles à ce sujet quand bien même l'injection d'air a déjà été largement étudiée pour des eaux stagnantes et pour de faibles débits d'injection d'air pour des injecteurs circulaires.

L'objectif de ce projet est de déterminer les conditions optimales d'injection d'oxygène dans les conduites des centrales hydroélectriques. L'intention est d'éviter d'affecter négativement la vie aquatique en aval des centrales causée par l'appauvrissement en oxygène de l'eau rejetée. Pour mener à bien la recherche sur ce sujet, il est nécessaire d'injecter un grand débit d'air dans un écoulement d'eau. L'étude présentée ici vient compléter des travaux précédents. Elle consiste à prendre des mesures dans les installations expérimentales qui permettent d'injecter de l'air à débit réglable à travers des fentes interchangeables dans un écoulement d'eau dont on peut également contrôler le débit. Les mesures sont effectuées grâce à l'insertion d'une sonde optique dans l'écoulement.

Les résultats obtenus à l'aide de la sonde optique permettent d'étudier la vitesse et la taille des bulles ainsi que le taux de vide. L'analyse des données met en avant l'augmentation de la vitesse des bulles le long de l'écoulement. Les distributions des tailles et vitesses des bulles suivent des loi log-normales. De plus, le nuage de bulles est stratifié ; les grosses bulles s'élèvent vers le haut du nuage tandis que les plus petites restent proches de la paroi inférieure. Des bulles plus grosses et plus rapides sont obtenues en augmentant le débit d'air à débit d'eau constant et faible. Ensuite, les graphes montrent une diminution du taux de vide local en s'éloignant de l'injection. Ces résultats sont complétés par le Krigeage qui est une méthode d'interpolation qui permet de tracer les cartes de taux de vide dans toute la veine à partir de quelques plans de mesures. Les différentes conclusions de cette étude permettent de faire un pas de plus vers la compréhension du comportement de l'écoulement diphasique dans la veine d'essai, compréhension encore largement incomplète.

Pour limiter le côté chrono-phage de la prise de mesure, une nouvelle version motorisée de la sonde optique a été conçue, fabriquée et testée. Elle permet, ainsi que tous les travaux effectués, de donner les outils pour les prochaines expériences à effectuer dans le laboratoire expérimental de grande hauteur. Celui-ci permettra d'aller à des vitesses d'écoulement beaucoup plus grandes que celles testées dans cette maîtrise.

ABSTRACT

This thesis presents work related to the injection of air through different slot geometries in a cross-flow. The project aims to optimize the injection of air in hydraulic turbines to meet the national and international standards with regards to water aeration. These standards aim at ensuring that released water from hydroelectric plants to be depleted in oxygen and affect aquatic life.

To study this topic, an existing experimental set-up was used for various water and air flow rates. Two different slot geometries were tested for one flow speed. Measurements of the pressure in the injection chamber and the test section were possible. An optical probe was used to determine void fraction but also bubble sizes and velocities on three different planes transverse to the flow downstream of the injection site.

Different results were analyzed and many conclusions drawn. First of all, the air passing through the slot experiences a pressure change that scales to the cube of the air flow rate whether there is water or not on the other side. The multiplying factor changes with the geometry of the injection. Moreover, bubble speed and size follow log-normal distributions. The size of bubbles increases with an increase in the air flow rate. Bigger bubbles travel faster than small ones ; they also tend to rise to the top of bubble plume while small bubbles stay in the lower section. The maps of void fraction show that its local values decrease for a smaller air flow rate. Those values also drop while moving away from the injection slot.

Due to the time-consuming aspect of the measurements, a new motorized version of the optical probe was designed, manufactured and tested. It is also adapted to the test sections of the new laboratory where high-speed flows can be tested.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	4
1.3 Objectifs de recherche	5
1.4 Plan du mémoire	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	6
2.1 En eau stagnante	6
2.2 En écoulement	7
2.2.1 Écoulement parallèle à l'injection	7
2.2.2 Écoulement perpendiculaire à l'injection	8
CHAPITRE 3 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX	12
3.1 Boucle d'essais à pression atmosphérique	12
3.1.1 Montage expérimental	12
3.1.2 Mesures de pression	13
3.1.3 Caractérisation du nuage de bulle	14
3.2 Stockage et traitement des données	19
3.2.1 Définition des paramètres	19
3.2.2 Nomenclature et Arborescence	20

3.2.3	Traitement des données de pression	21
3.2.4	Traitement des données de la sonde	21
3.2.5	Traitement des images	24
3.3	Boucle d'essai à pression contrôlée - Laboratoire Expérimental Grande Hauteur (LEGH)	25
3.3.1	Montage expérimental	26
3.3.2	Caractérisation de l'écoulement	27
CHAPITRE 4 CONCEPTION DE LA SONDE V2		31
4.1	Le cahier des charges	31
4.2	Les idées préliminaires	32
4.3	Le choix de concept	33
4.3.1	Rotation du bras B	33
4.3.2	Translation de la sonde	34
4.4	Design de la sonde V2	35
4.4.1	Le bras rotatif B	35
4.4.2	La partie inondée	38
4.4.3	Protection des fibres	39
4.4.4	Les supports des moteurs	39
4.4.5	Disposition de la sonde sur les veines	40
4.5	Prototype et fabrication de la sonde V2	41
4.5.1	Le prototype de la sonde	41
4.5.2	Sonde V2 finale	41
4.5.3	Emplacement de la sonde sur les veines.	42
4.6	Automatisation de la sonde	42
CHAPITRE 5 RÉSULTATS		46
5.1	Boucle d'essais à pression atmosphérique	46
5.1.1	Pression	46
5.1.2	Mesures de la sonde optique V1	47
5.1.3	Visualisation et Krigeage	55
5.1.4	Erreurs de mesures	60
5.2	Préparation à la prise de mesure dans le LEGH	64
CHAPITRE 6 CONCLUSION		65
6.1	Synthèse des travaux	65
6.2	Limitations de la solution proposée	66

6.3 Améliorations futures	67
RÉFÉRENCES	69
ANNEXES	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.1	Les valeurs des paramètres de fonctionnement de la boucle hydraulique	47
Tableau 5.2	Les valeurs de Z correspondant au maximum de taux de vide par plan	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Production mondiale brute d'électricité par source en 2017 [1]	1
Figure 1.2	Coupe transversale d'un lac stratifié thermiquement [2]	2
Figure 1.3	(À gauche) Vue en coupe d'une turbine Francis montrant les types d'injection d'air au niveau de la turbine [3]. (À droite) Quelques avantages et inconvénients des injections d'air au niveau des turbines [4]	3
Figure 1.4	Influence de l'aération sur la performance hydraulique en fonction de la méthode utilisée, voir Figure 1.3 [3]	4
Figure 3.1	a/ Boucle d'essais. b/ Veine d'essais avec le convergent initiale. c/ Veine d'essais avec le nouveau convergent non symétrique	12
Figure 3.2	(À gauche) Les fentes testées dans la boucle d'essais. Le point rouge correspond à l'origine dans la veine. (À droite) Le système d'injection avec des plaques interchangeable [5]	13
Figure 3.3	Position des capteurs de pression statique (bleu) et des tubes de Pitot (rouge) dans la veine et la chambre d'injection	14
Figure 3.4	(À gauche) La partie immergée de la sonde. (Au milieu) Étapes de l'arrivée d'une bulle sur les fibres. (À droite) Le signal enregistré correspondant à l'arrivée de la bulle sur les fibres	15
Figure 3.5	(À gauche) Ancienne méthode de liaison des fibres de la sonde au laser. (À droite) Nouvelle technique de liaison de la sonde au laser en utilisant des pinces BTF1 de Thorlabs	16
Figure 3.6	Assemblage du système de déplacement sur le dessus de la veine après les modifications	17
Figure 3.7	Vue latérale de la veine d'essais avec les positions selon x des trois plans mesurés par la sonde optique	17
Figure 3.8	(À gauche) Vue de dessus de la veine d'essais avec le dispositif de prise d'image. (À droite) Image prise par la caméra rapide avec les réglages cités ci-dessus. La flèche bleue correspond au sens de l'écoulement	19
Figure 3.9	Arborescence des fichiers pour une campagne de mesure A1PEi	22
Figure 3.10	(À gauche) Le signal généré par l'arrivée d'une bulle sur les fibres i et j . Les différents temps nécessaires au traitement sont définis. (À droite) Les bulles admissibles à un appareillage	23

Figure 3.11	(a) Les images après suppression de l'arrière plan. (b) Trace du nuage de bulle issu du moyennage du taux de gris de chaque pixel pour une série d'images	25
Figure 3.12	Résultat de la simulation CFX de l'écoulement dans la chambre à air. Les vecteurs orange représentent la vitesse de sortie de l'air de la fente pour un débit d'air en entrée de 56 L.s^{-1} et une sortie libre à une pression absolue de 0.1 bar	28
Figure 3.13	(a) La première veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$. La partie bleue correspond à la fente d'injection (b) L'arrivée d'air et la sortie ne sont pas en face l'une de l'autre (c) l'injection d'air vue de l'intérieur de la veine. L'étanchéité est assurée par un joint torique compressé par la plaque de fente (d) La chambre d'injection vue de dessous	28
Figure 3.14	Les fentes à tester dans la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$. Le point rouge correspond à l'origine qui sera une référence pour les plans de mesure	29
Figure 3.15	(a) Le double coude à ailettes (b) La veine d'essais $15 \times 15 \text{ cm}^2$ de section (c) Le divergent (d) Le débulleur	30
Figure 4.1	(a) La surface mesurée par la sonde V1 après symétrie des données. (b,c) Idées de mécanismes pour la sonde V2. (d) Surface de passage de la pointe du bras B , ce qui correspond à la surface de mesure qui sera ensuite symétrisée	32
Figure 4.2	La ligne de transmission initiale. M réfère au moteur, qui est relié à la cloche magnétique puis à la croix de malte, ensuite à un réducteur qui, à travers un arbre, transmet la rotation au double joint de Cardan	35
Figure 4.3	(À gauche) Schéma du mécanisme de fonctionnement de la sonde V2. (À droite) Dessin sur SolidWorks de la sonde V2. Image finale de la sonde à ajouter ici	36
Figure 4.4	La partie inférieure de la sonde V2. Cette version est celle de la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$. Elle est composée de 4 pièces différentes (l'embout conique, l'attache au pivot arrière, la chambre du cardan et le corps principal) en plus du joint de cardan	37
Figure 4.5	(a) Le couvercle de la partie inondée qui permet également de relier la sonde à l'actuateur linéaire. (b) La partie inondée de la sonde	39
Figure 4.6	Schéma de la méthode de prise de mesure de la sonde V2. La surface encadrée en vert correspond aux données qui seront gardées puis symétrisées. La surface bleue est la surface de données après symétrie par rapport à Y	40

Figure 4.7	Dessin 3D de la sonde V2 et ses dispositions possibles sur les veines 25×25 cm ²	41
Figure 4.8	Conception du bras rotatif simplifiée	42
Figure 4.9	Photo de la sonde sans le système de translation	42
Figure 4.10	Schéma 3D de la veine 25 × 25 cm ² montrant les différents plans de mesures possibles avec les trois plaques bouchons disponibles	43
Figure 4.11	(a)Schéma de la position zéro de la sonde dans la veine. L'écoulement est dans le sens des x croissants. (b) Schéma de la position limite où il faut changer de θ_{max} pour ne pas taper la paroi latérale	44
Figure 5.1	Le débit d'air injecté en fonction de la perte de pression h . (À gauche) Injection air dans eau. (À droite) Injection air dans air	46
Figure 5.2	Le débit d'air injecté en fonction de la perte de pression entre la chambre d'air et l'injection dans de l'eau à travers la triple fente	48
Figure 5.3	Les tailles des bulles en fonction de la hauteur Z dans la veine. La ligne rouge correspond à la moyenne des valeurs. Les lignes noires verticales correspondent aux limites de prise de mesure	49
Figure 5.4	L'évolution de la pente de la moyenne des tailles de bulles en fonction de la hauteur Z dans la veine pour les deux types de fentes et les différentes conditions	50
Figure 5.5	Distribution de la vitesse des bulles et tailles des bulles en mètre en fonction de leur vitesse en m/s pour la fente simple et triple à $\beta=0.09$ dans le plan X=206mm	50
Figure 5.6	La vitesse des bulles en fonction de leurs tailles. La ligne verte correspond à la moyenne glissante des vitesses et les lignes rouges à l'écart-type par rapport à la moyenne	51
Figure 5.7	L'évolution de la moyenne glissante des vitesses des bulles en fonction de leurs tailles pour les deux fentes testées et pour différentes conditions	52
Figure 5.8	La carte du taux de vide local dans la veine 10×17 cm	53
Figure 5.9	Distribution du taux de vide par rapport au maximum. Les étapes pour extraire ces données sont expliqués en Annexe D	54
Figure 5.10	Vue du plan Y=0 du taux de vide après application du code de Krigeage pour les données de la sonde	56
Figure 5.11	La hauteur Z dans la veine en pixel en fonction de la valeur du taux de gris et taux de vide en pourcentage	57
Figure 5.12	La valeur du taux de vide et du taux de gris divisé par le coefficient en fonction de la hauteur Z dans la veine	58

Figure 5.13	Le taux de vide obtenu par Krigeage dans le plan $Y = 0$ suite à l'ajout des données extraites d'images moyennées	59
Figure 5.14	Résultats pour le cas de la fente simple : (Colonne de gauche) Erreurs absolues de taux de vide capté par les deux fibres pour $\beta=0.09$. (Colonne droite) Taux de vide captés par les deux fibres pour $\beta=0.09$. .	62
Figure 5.15	Erreurs absolues entre les expériences A1PE7 et A1PE9 de taux de vide mesuré en chaque plan pour $\beta=0.03$ (colonne gauche) et $\beta=0.09$ (colonne droite) pour la fente de référence	63
Figure A.1	Les dimensions du bras rotatif. e correspond à la différence entre le centre du bras rotatif et la paroi intérieure de la veine quand la sonde est positionnée en retrait maximal	73
Figure A.2	Schéma de la surface de prise de mesure dans le cas où la sonde est installée sur le côté de la veine	74
Figure B.1	Les différents emplacements de passage de la sonde V2 dans la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$	76
Figure C.1	La taille moyenne des bulles en fonction de la hauteur dans la veine $10 \times 17 \text{ cm}$ pour la fente de référence	78
Figure C.2	La taille moyenne des bulles en fonction de la hauteur dans la veine $10 \times 17 \text{ cm}$ pour la fente triple	79
Figure C.3	La vitesse horizontale des bulles en fonction de leurs tailles pour un écoulement dans la veine $10 \times 17 \text{ cm}$ pour la fente de référence	80
Figure C.4	La vitesse horizontale des bulles en fonction de leurs tailles pour un écoulement dans la veine $10 \times 17 \text{ cm}$ pour la fente triple	81
Figure C.5	La carte du taux de vide local dans la veine $10 \times 17 \text{ cm}$ pour la fente de référence	82
Figure C.6	La carte du taux de vide local dans la veine $10 \times 17 \text{ cm}$ pour la fente triple	83
Figure D.1	Explication de la procédure pour tracer les ellipses de distribution du taux de vide	85
Figure E.1	Erreurs relatives des taux de vide captés par les deux fibres pour une fente simple à $\beta=0.03$ (à gauche) et $\beta=0.09$ (à droite)	86
Figure F.1	Erreurs relatives entre les expériences A1PE7 et A1PE9 de taux de vide mesuré en chaque plan pour $\beta=0.03$ (colonne gauche) et $\beta=0.09$ (colonne droite) pour la fente de référence	87

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

LEGH Laboratoire Expérimentale Grande Hauteur
GES Gaz à effet de serre

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Dimensionnement du bras de la sonde et surface de prise de mesure . . .	73
Annexe B	Emplacement de la sonde V2 dans la veine	76
Annexe C	Résultats des expériences sur la boucle à pression atmosphérique . . .	77
Annexe D	Étapes pour l'obtention des graphes de la figure 5.8	84
Annexe E	Erreurs relatives pour les taux de vide captés par les deux fibres . . .	86
Annexe F	Erreurs relatives pour les taux de vide entre de expériences	87

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable qui présente un faible coût d'exploitation et un faible taux d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES). Elle figure parmi les énergies les mieux maîtrisées, car les études des écoulements dans les conduites et au niveau des aubes de turbines sont très complètes. Elle est actuellement l'énergie renouvelable la plus importante au niveau de la production. Elle représente 16% de l'énergie électrique produite dans le monde (Figure 1.1) et 98% de la production d'énergie électrique du Québec [6].

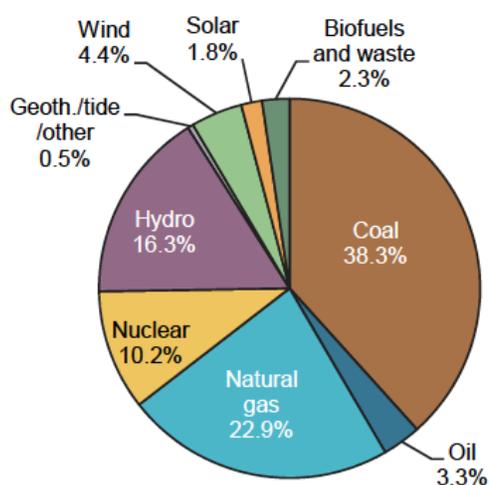


Figure 1.1 Production mondiale brute d'électricité par source en 2017 [1]

1.1 Contexte

La question posée dans le cadre de ce projet est la suivante : Quels sont les impacts environnementaux des barrages hydroélectriques sur l'oxygénation de l'eau, et comment les minimiser ? En effet, une eau désoxygénée a été rapportée à la sortie de plusieurs centrales hydroélectriques [4]. Au-dessous d'un certain seuil, le manque d'oxygène a de fortes répercussions sur la faune et la flore aquatique. Les écosystèmes vivants en aval des centrales se retrouvent très fragilisés. Les poissons peuvent être en situation de stress, développer des maladies respiratoires, ou augmenter le temps de réaction face au danger [4]. Ce problème est causé par le faible taux d'oxygène présent dans l'eau déversée à partir de la section inférieure du bassin. Cette zone du réservoir s'appelle l'hypolimnion (Figure 1.2). Il s'agit de la tranche d'eau la plus profonde et par conséquent la moins oxygénée.

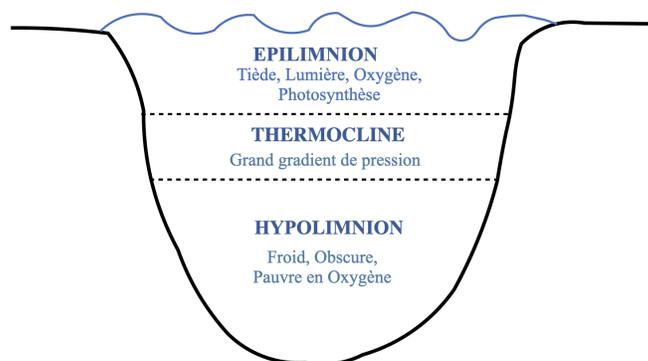


Figure 1.2 Coupe transversale d'un lac stratifié thermiquement [2]

En été, l'activité biologique augmente avec l'augmentation de la température, l'oxygène dissous est alors consommé plus rapidement, surtout si il y a des sédiments où se produit la décomposition organique [2, 4]. Contrairement à l'hypolimnion, au niveau de l'épilimnion, la réoxygénation se fait plus facilement à l'aide des échanges à l'interface eau/air et des courants créés par le vent. A contrario, l'hypolimnion des réservoirs des barrages ayant un temps de rétention élevé s'appauvrit en oxygène, car la stratification thermique (la différence de température entre le fond et la surface) est très forte. Cet important gradient de température forme une barrière qui empêche l'échange de température, d'oxygène dissous et de nutriments entre le fond et la surface [7].

L'appauvrissement en oxygène peut être aggravé par un autre problème dans les pays nordiques. La formation d'une couche de glace en surface des réservoirs en hiver nuit à la photosynthèse, car les rayons de soleil sont partiellement masqués par la glace. L'oxygène nécessaire à la survie de la faune et la flore aquatique vient alors à manquer. Ultimement, il n'y a plus d'oxygène dans l'eau sous la glace.

La recommandation environnementale du Canada pour protéger les écosystèmes est de garantir un niveau d'oxygène minimal de 6 mg/L pour les eaux chaudes et entre 6 et 9 mg/L dans les eaux froides à la sortie des barrages [8]. Les industriels cherchent une solution pour réoxygéner l'eau. De nombreuses idées ont été testées dans les centrales : l'aération de l'hypolimnion, la construction d'un canal de fuite en forme de zigzag, l'injection d'air dans la conduite ou dans le réservoir d'eau ou la déstratification du réservoir d'eau [4]. Une autre solution est d'injecter de l'air dans les écoulements des centrales avant de rejeter l'eau. Ces injections peuvent être effectuées à différents niveaux de la centrale : sur l'axe de rotation de la turbine (DEF), au niveau de l'aspirateur (DR) et également au niveau des aubes des

turbines (DE)(Figure 1.3).

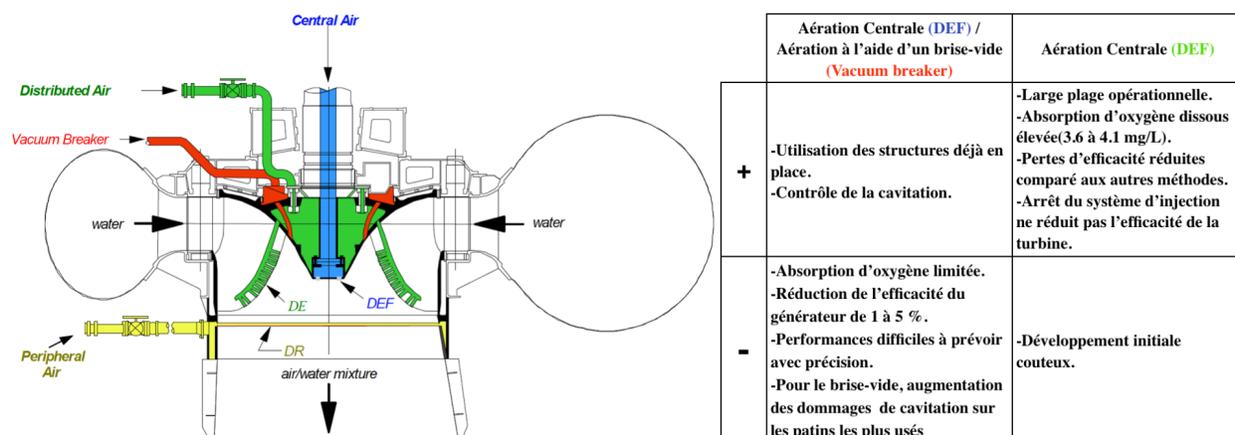


Figure 1.3 (À gauche) Vue en coupe d'une turbine Francis montrant les types d'injection d'air au niveau de la turbine [3]. (À droite) Quelques avantages et inconvénients des injections d'air au niveau des turbines [4]

Ces méthodes permettent d'augmenter la productivité de la centrale dans certains cas, car la phase gazeuse atténue les fluctuations de pressions surtout pour les turbines Francis [9]. Hoppings *et al.* [10] ont eux aussi établi que l'injection d'air dans les zones de basse pression des turbines Francis est un bon moyen d'augmenter le taux d'oxygène dissous dans l'eau passant par la turbine. Comme le montre le graphe d'efficacité en fonction de l'air injecté sur la figure 1.4, il existe une plage de valeurs de taux d'air pour augmenter l'efficacité des turbines. Cependant, ces débits d'air sont trop faibles pour permettre une bonne aération de l'eau. Donc, une bonne aération au niveau des turbines mène à une perte d'efficacité. Néanmoins, la technique d'aération distribuée est celle qui présente le moins de perte d'efficacité (courbe verte de la figure 1.4). Il s'agit de la solution privilégiée par General Electric. L'injection s'effectue au niveau des aubes des turbines, cela en fait une technologie nouvelle qui reste à maîtriser afin d'optimiser son utilisation. L'objectif est que l'injection se fasse sans recourir à des compresseurs qui demanderait un entretien supplémentaire et plus fréquent que les turbines elles-mêmes. La pression dans la turbine étant proche de la pression de vapeur saturante, bien plus faible que la pression atmosphérique, l'injection d'air est alors obtenue par aspiration. Minimiser les pertes sur la ligne d'amenée de l'air permet de maximiser le débit d'air que l'on peut injecter.

Dans ce contexte, ma maîtrise a porté sur l'étude des écoulements diphasiques eau/air en conduite forcée à l'aide de boucles d'essais dans des conditions similaires à celles des turbines

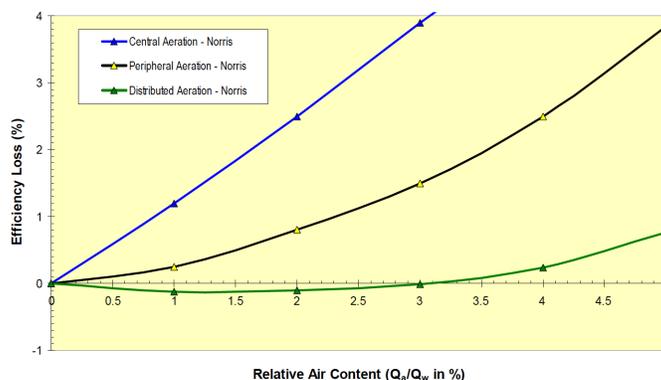


Figure 1.4 Influence de l'aération sur la performance hydraulique en fonction de la méthode utilisée, voir Figure 1.3 [3]

hydrauliques (basse pression et haute vitesse). Ce type d'écoulement est étudié depuis longtemps. Une revue de littérature détaille un peu plus loin les différentes approches qui ont été utilisées par le passé. Cependant, peu se sont intéressés à l'injection au niveau des aubes de turbines. Plus précisément alors, l'objectif de mon travail est d'identifier l'effet de différentes géométries et conditions d'injection sur l'écoulement diphasique résultant. Ces éléments sont importants, car ils influencent la taille des bulles et donc les échanges eau/air. En effet, la vitesse de dissolution de l'oxygène est reliée à la surface d'échange eau/air [11] : pour un même volume d'air, plus le diamètre des bulles diminue, plus la surface d'échange avec l'eau augmente. De plus, les petites bulles ont un temps de montée plus grand et donc un temps de résidence plus long. Cela implique un temps d'échange eau/air plus important, et par conséquent un plus grand transfert d'oxygène. Ce double lien entre la taille des bulles et le taux d'oxygénation explique la nécessité d'étudier le moyen de créer des bulles de petite taille. L'utilisation de diffuseurs poreux permet une bonne dissolution de l'oxygène car les bulles formées sont nombreuses et petites (diamètres entre 0.2 et 1.5 mm) [11]. Cependant, avec ces diffuseurs poreux, la perte de pression est très grande en raison de leur géométrie.

1.2 Problématique

L'injection au niveau des aubes de turbine est la plus efficace selon March [3]. L'optimisation de l'injection elle-même reste à établir. La géométrie, le nombre des fentes et leur localisation doivent être déterminées pour former les bulles les plus petites possibles. Pour cela, il faut pouvoir développer les lois de similitude en faisant varier les conditions d'injection et étudier les configurations d'écoulement. Ces lois de similitude pourront être utilisées par le partenaire industriel dans le but d'optimiser l'injection d'air au niveau des aubes aérantes. En somme,

il faut déterminer la(les) condition(s) d'écoulement, et la(les) géométrie(s) d'injection qui rendent optimaux les échanges diphasiques tout en minimisant les pertes de pression.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce projet est de déterminer les caractéristiques d'injections optimales pour des conditions d'écoulement données. Il faut donc générer des nuages de bulles dont les paramètres sont variables. Pour cela, deux boucles hydrauliques sont utilisées. Elles comportent chacune une veine d'essai où l'air peut être injecté à travers des fentes interchangeables. Les vitesses d'écoulement qui peuvent être testées dans ces boucles d'essai vont de 1 à 10 m/s. Les débits de gaz injecté sont de l'ordre de 1 Ls/s (litre standard à pression atmosphérique par seconde) . Les différentes missions du projet sont les suivantes :

- Effectuer des prises de mesures sur la boucle à pression atmosphérique en faisant varier les paramètres.
- Concevoir la deuxième version de la sonde qui permet de prendre les mesures afin de rendre les expériences plus rapides et efficaces.
- Préparer les prises de mesures sur la boucle à pression contrôlée LEGH pour différentes conditions et géométries d'injection à l'aide de la nouvelle sonde.
- Mettre en place une base de données expérimentales pour établir des corrélations et des lois de similitude et développer les cas de validation pour les simulations numériques des étudiants travaillant sur le même projet.

1.4 Plan du mémoire

La suite de ce mémoire présente d'abord un état de l'art des différents travaux menés sur les écoulements diphasiques en eau stagnante ou en écoulement parallèle ou perpendiculaire à l'injection. Ensuite, les dispositifs expérimentaux sont présentés ainsi que les techniques de mesures telles que la sonde optique et la prise d'image par caméra rapide. L'organisation des données enregistrées et les traitements appliqués sont également mentionnés. Le chapitre suivant détaille les étapes de conception de la deuxième version de la sonde optique qui est automatique. Enfin, les résultats des différentes campagnes de mesure sont analysés et une conclusion permet de résumer les principaux points abordés.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La majorité des études caractérisant l'injection d'air dans l'eau a été effectuée pour de l'eau stagnante.

2.1 En eau stagnante

L'injection d'air en eau stagnante est un phénomène assez bien compris étant donné les nombreuses études disponibles. Les premières recherches à ce sujet mesurent la distribution radiale de quelques bulles ou de jets pour de faibles débits d'injection d'air à travers des embouts circulaires. Pour toutes ces études, le paramètre le plus important est la taille des bulles, car il est directement relié à la surface de l'interface air/eau. La vitesse des bulles est couramment étudiée, car elle influence le temps de résidence des bulles dans l'eau.

Le processus de formation d'une bulle est examiné depuis longtemps. Kumar et Kuloor [12] font une revue de littérature détaillée jusqu'en 1970. Cet article contient plusieurs expériences et données et décrit des modèles théoriques basés sur l'équilibre des forces, ce qui permet d'avoir des équations différentielles ordinaires que l'on peut résoudre numériquement ou analytiquement. Dans la plupart de ces modèles, les bulles sont considérées comme sphériques et l'objectif est d'en calculer le volume. L'article se penche en particulier sur les différents facteurs qui influencent les tailles de bulles, c'est-à-dire le montage expérimental, les caractéristiques de l'orifice d'injection, le volume du réservoir, la tension de surface, la viscosité et la densité de l'eau, les propriétés et débits de l'air. Ils ont ainsi étudié la forme de l'injecteur et son influence sur les bulles : pour des orifices de même surface d'injection ayant un diamètre équivalent de 0.5945 cm, qu'ils soient circulaires ou pas, les bulles créées ont la même courbe volume des bulles en fonction du débit d'air injecté. Cependant, des orifices de géométries différentes, ayant le même périmètre, donnent des courbes de volumes des bulles en fonction du débit d'air différentes. Ils ont également testé plusieurs angles d'inclinaison de l'injecteur pour conclure que l'impact sur le volume des bulles n'est pas important. Toutes ces expériences ont été effectuées pour de faibles débits d'air (de 1 à 100 $cm^3.s^{-1}$).

Jamialahmadi *et al.* [13] montrent que le diamètre de détachement de la bulle augmente quand le diamètre de l'orifice passe de 0.5 à 3 mm pour des débits d'air allant jusqu'à 0.15 $\times 10^{-4} m^3.s^{-1}$. De leur étude, ils concluent que la tension de surface est un paramètre important qui contribue au volume des bulles et qu'il doit être pris en compte même pour les hauts débits d'air. La taille des bulles est également dépendante du diamètre de l'orifice et indépendante de la profondeur de l'eau.

Plusieurs corrélations permettent de prédire la taille des bulles. La plus couramment utilisée est celle d’Akita et Yoshida [14]. Cependant, elle ne permet pas de prédire la relation entre la taille de la bulle et celle de l’orifice. Davidson [15] a montré que la taille des bulles est approximativement proportionnelle à la racine carrée du diamètre de l’orifice. La corrélation de Bhavaraju *et al.* [16] concerne le calcul du diamètre de bulle moyen en utilisant le nombre de Reynolds basé sur le diamètre de l’orifice et la vitesse superficielle de l’eau à la sortie de l’embout. Lima et Neto [17] utilisent le même critère pour caractériser le fractionnement des grosses bulles dans l’eau stagnante. Le nombre de Reynolds de l’embout doit être supérieur à 8000 pour permettre de réduire la taille des bulles à 2 mm ou moins.

La plupart des études ont été effectuées pour un faible nombre de bulles injectées. Pour augmenter le taux d’oxygène, il faut injecter plusieurs bulles en augmentant le débit d’air ou en changeant le type d’injecteurs comme McGinnis et Little [11] qui ont utilisé un diffuseur poreux. Cette méthode est efficace pour former des petites bulles, mais ne permet pas d’étudier l’influence de la géométrie sur la formation des bulles.

Ces études permettent d’approfondir la compréhension que nous avons des nuages de bulles mais ne sont pas suffisantes pour prédire leur comportement dans une eau non stagnante.

2.2 En écoulement

L’injection d’air dans un écoulement permet de modifier les caractéristiques des bulles. La littérature est moins fournie au niveau d’articles sur l’injection d’air en écoulement qu’en eau stagnante. Les deux configurations les plus souvent étudiées sont l’écoulement parallèle et transverse à l’injection.

2.2.1 Écoulement parallèle à l’injection

Tout d’abord, Chuang et Goldschmidt [18] furent les premiers à proposer un modèle pour la formation de bulles dans un écoulement parallèle à partir d’un injecteur circulaire. Ce modèle est obtenu à partir de l’équilibre des forces au moment du détachement de la bulle. Il a permis de prédire une diminution du diamètre des bulles avec l’augmentation de la vitesse de l’écoulement. Ces prédictions sont en accord avec les expériences menées. Kumar et Kuloor [12] suggèrent que la force de traînée ajoutée à la poussée d’Archimède est à l’origine de cette diminution du volume des bulles.

Sada *et al.* [19] ont observé expérimentalement l’effet de la vitesse de la phase liquide (allant

jusqu'à 1.5 m/s) sur les tailles des bulles dans un écoulement parallèle pour des débits de gaz allant de 0.33 à 36.2 cm³/s. Ces débits sont très inférieurs à ceux utilisés dans cette étude (1000 cm³/s). Ils sont arrivés également à observer une diminution de la taille des bulles qu'ils attribuent aux forces de cisaillement au niveau de l'injecteur. Ils ont aussi mis en avant l'existence de différents régimes de formation de bulles : bulles uniques (single bubbling) pour $Q_G < 4$ cm³/s, coalescence de bulle (coalescence bubbling) pour $Q_G > 4$ cm³/s et jet de bulles (jetting) pour les hauts débits d'air.

Ghosh et Ulbrecht [20] ont démontré que les forces de traînée résultantes de l'écoulement permettent aux bulles de se détacher plus tôt de l'orifice. Les bulles sont donc plus petites et l'interface air/eau plus grande. Cela résulte en un coefficient de transfert de masse plus important. Ces bulles sont entraînées par l'écoulement, ce qui réduit la coalescence et permet un meilleur contrôle des bulles. Cependant, ce contrôle reste compliqué à atteindre. Oguz et Prosperetti [21] ont démontré le rôle critique de la résistance de l'écoulement d'air qui est égale à la perte de charge sur le débit d'air injecté dans l'embout d'injection. Un bon contrôle de la taille des bulles peut être atteint en jouant sur ce paramètre, surtout pour les petites bulles qui sont les plus difficiles à produire. Ils ont également démontré qu'un écoulement parallèle à l'injection d'air permettait d'obtenir des bulles plus petites que dans les écoulements stagnants.

Plus récemment, Bhunia *et al.* reprennent les calculs théoriques de l'équilibre des forces lors du détachement d'une bulle en prenant en compte la vitesse relative dans le terme inertiel de formation de la bulle. Le modèle théorique développé concorde assez bien avec les résultats expérimentaux que ce soit pour un milieu sous microgravité ou sous gravité terrestre [22].

2.2.2 Écoulement perpendiculaire à l'injection

Quelques études se sont intéressées aux écoulements orthogonaux aux injections. Maier [23] a démontré que pour avoir les plus petites bulles, il faut que l'écoulement soit perpendiculaire à l'injection. Tsuge et Hibino [24] ont utilisé une aiguille immergée pour un débit d'air entre 0.1 et 10 cm³/s et une vitesse d'écoulement perpendiculaire entre 0 et 13 cm/s dans une section d'essai de 70 mm de diamètre. Ils ont montré que de plus petites bulles étaient obtenues pour des vitesses de liquides assez élevés et des débits de gaz plus bas. Marshall [25] a mené une étude expérimentale où l'injecteur est installé dans un écoulement horizontal 2D turbulent pour des vitesses de liquide allant de 0.6 à 4.8 m/s et des débits de gaz allant de 0.5 à 8 cm³/s (très inférieur à 1000 cm³/s). Trois principales catégories d'injections ont été identifiées : bulles uniques (single bubbling), impulsion de bulles (pulse bubbling) et jets de bulles (jetting). Les principaux paramètres permettant d'identifier les catégories d'injection sont : la vitesse du liquide et la vitesse du gaz à travers l'injecteur. Rigby *et al.* [26] ont également

effectué ces expériences pour un orifice exposé à un écoulement turbulent 2D. Les travaux ont montré que malgré les différentes orientations de l’injecteur, la dispersion du gaz garde les mêmes caractéristiques que celles proposées par Marshall [25]. Ils présentent également une carte permettant de catégoriser les différents régimes observés à la caméra rapide selon les différentes combinaisons de vitesse de liquide et de gaz.

Forrester et Rielly [27] ont étudié la formation de bulles pour différents injecteurs pour différentes inclinaisons. Ils se sont intéressés à l’étude du développement des bulles et leurs détachements d’injecteurs situés sur des objets de géométries différentes : cylindrique, plat et concave. Ils étudient les effets de la vitesse du liquide (entre 0.5 et 4.8 m/s), la vitesse du gaz (entre 3 et 45 m/s, soit 2 et 35 cm³/s) ainsi que l’angle d’inclinaison de l’injecteur en utilisant une caméra rapide. En suivant une approche similaire à Rigby *et al.* [26], ils proposent une carte de dispersion du gaz pour les profils d’injection testés. Quatre catégories de régimes ressortent en fonction de U_L et U_G . La quatrième catégorie correspond à la formation de cavités (Cavity formation). Dans le projet détaillé dans ce mémoire, la vitesse du liquide est de 1.25 m/s et la vitesse du gaz à l’injection est de 50 m/s. Ces conditions expérimentales n’ayant pas été testées, on ne peut pas situer le régime étudié dans ce mémoire sur les cartes proposées par Forrester et Rielly.

Rigby *et al.* [26] et Forrester et Rielly [27] ont défini le régime de jet (jetting) de manière qualitative comme étant le mode où un jet continu de gaz sort de l’injection et se cassent en aval de celle-ci de manière chaotique. Ils estiment que ce mode apparaît lorsque U_G est d’un ordre de grandeur plus grand que U_L comme l’avait observé Wace *et al.* [28]. En utilisant les principes de l’instabilité de Rayleigh [29], sous différentes conditions, Wace *et al.* [28] obtiennent une corrélation qui permet de prédire une majoration du diamètre des bulles si :

- la vitesse de l’écoulement est assez grande pour négliger les effets de la gravité
- la vitesse des bulles atteint la vitesse de l’écoulement avant leur explosion
- le jet de gaz a une forme circulaire dans une section quelconque à cause de la tension de surface, quelle que soit la géométrie de l’injection.
- la masse volumique du gaz est négligeable

Le diamètre des bulles sphériques équivalentes qui se détachent est :

$$d = 2.408 \times \left(\frac{Q_G}{U_L} \right)^{0.5}$$

Où Q_G est le débit volumique de gaz à travers la fente (10⁻⁶ m³/s) et U_L la vitesse de l’écou-

lement (10^{-2} m/s).

Les expériences menées par Wace *et al.* permettent de valider cette corrélation pour le régime de jet de bulle (jetting) et pour des vitesses de liquide dépassant 0.5 m/s.

Oguz et Prosperetti [21] proposent une corrélation similaire valide pour un régime de formation de bulles uniques (Single Bubbling) et pour des vitesses de liquide U_L inférieures à 2 m/s :

$$D_{32} = 1.135 \times 10^{-3} \times \left(\frac{Q_G}{U_L} \right)^{0.5}$$

avec D_{32} le diamètre de Sauter qui représente le diamètre d'une sphère ayant le même ratio volume/surface que la particule qu'elle doit représenter, Q_G le débit volumique de gaz en mm^3/s et U_L en m/s.

Ces corrélations permettent de retrouver une approximation du diamètre de Sauter pour deux régimes différents. Elles ne dépendent que de Q_G et U_L donc Wace *et al.* [28] et Oguz et Prosperetti [21] estiment que le diamètre des bulles est indépendant du diamètre de l'injection et des propriétés du fluide.

Zhang et Zhu [30] ont, quant à eux, étudié l'injection d'un mélange eau-air par effet Venturi dans un écoulement d'eau à travers un injecteur circulaire. La vitesse du liquide est de 0.2 m/s et les débits de gaz testés vont de 16 à 83 cm^3/s . Ils mesurent les propriétés des bulles à différents emplacements en aval de l'injection à l'aide d'une sonde optique. Ils montrent que la distribution du taux de vide est gaussienne et que plus la distance par rapport à l'injection augmente, plus la distribution de la vitesse des bulles est large. Ils observent également que le débit d'eau et d'air ainsi que la distance de l'injection influencent la distribution de la taille des bulles.

Peu de modèles théoriques sur la formation des bulles dans les écoulements transversaux ont été développés. Ces modèles se basent sur une équation de l'équilibre des forces pour prédire la taille des bulles créées dans de telles conditions. Balzán *et al.* [31] effectuent un résumé des différentes corrélations et expériences qui existent et en font un point de départ pour tracer des cartes des différentes catégories de formation de bulles et des zones de transition entre ces dernières en fonction de nombres dimensionnels tels que Fr , EO le nombre de Eötvös pour le gaz et Re_L .

Dans toutes les études citées ci-dessus, les injecteurs utilisés sont circulaires de diamètres

différents. Peu d'expériences ont été menées avec des injections en fente. Le travail présenté dans ce mémoire étudie ce type d'injecteur, en prenant comme point de départ les travaux effectués par Julien Bouvard [5].

CHAPITRE 3 DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

3.1 Boucle d'essais à pression atmosphérique

3.1.1 Montage expérimental

Pour commencer, les expériences ont été menées sur une boucle à pression atmosphérique. Les travaux effectués sur cette dernière permettent de compléter ceux réalisés par un étudiant en maîtrise de recherche, Julien Bouvard [5] ainsi que ceux de Florentin Anne [32].

Pour étudier le nuage de bulle, une boucle hydraulique fermée de cinq mètres de longueur sur un mètre de hauteur est utilisée (Figure 3.1.a). Le débit d'eau dans la boucle peut aller jusqu'à 40 L/s et est contrôlé grâce à une pompe. Pour visualiser l'écoulement, la boucle d'essais dispose d'une veine de $45 \times 10 \times 17 \text{ cm}^3$. L'air est injecté au niveau de la veine à travers des fentes interchangeables (voir **3.2.1 Injection de l'air** de [5]). Les débits d'air et d'eau sont contrôlés afin de visualiser les effets des différentes conditions d'écoulement et géométries d'injection, de mesurer la pression en différents emplacements dans la veine et de caractériser les bulles générées à l'aide d'une sonde optique.

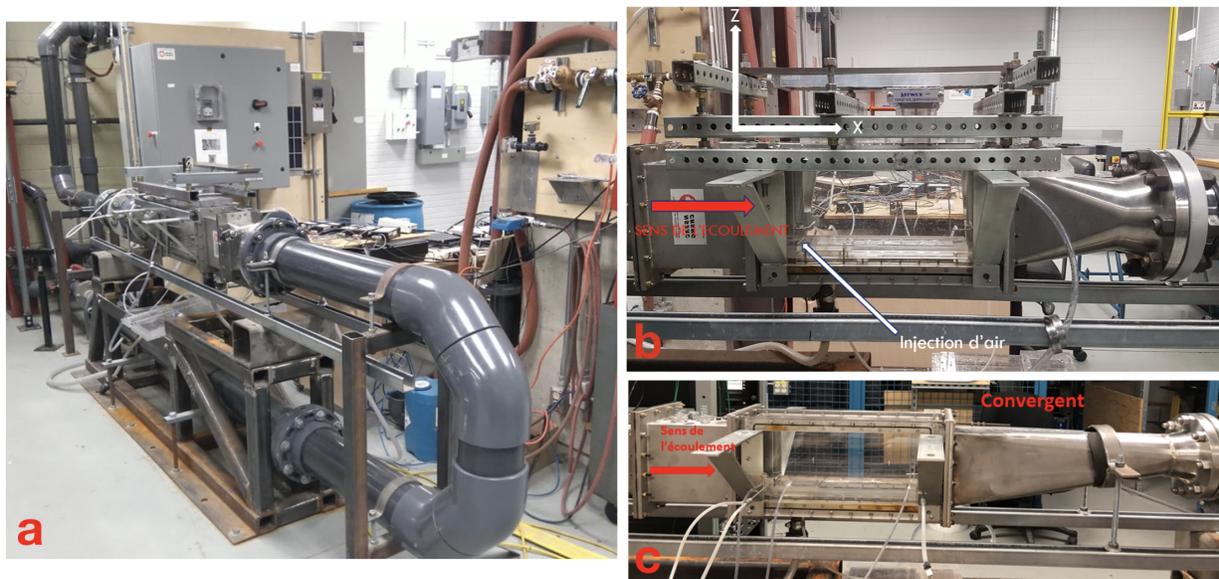


Figure 3.1 a/ Boucle d'essais. b/ Veine d'essais avec le convergent initiale. c/ Veine d'essais avec le nouveau convergent non symétrique

Une vague a été observée au niveau de la partie haute de la veine. Pour la supprimer, un nouveau convergent non symétrique a été conçu et installé (voir figure 3.1b et c). Cette forme

permet de déplacer la poche d'air du coin supérieur de la veine vers le goulot d'étranglement du convergent.

L'injection d'air est reliée à des rotamètres de 8 et 20 SCFM (standard cubic feet per minute/pieds cubes par minute à pression et température ambiante) installés en parallèle selon le débit d'air voulu. Ainsi, le débit d'air qui passe à travers les fentes d'injection est contrôlé. Pour cette étude, deux géométries ont pu être testées comme le montre la figure 3.2. La possibilité d'une injection à travers plusieurs petits trous circulaires a été écartée pour éviter des pertes de charge importantes. La grande fente simple est prise comme injection de référence.

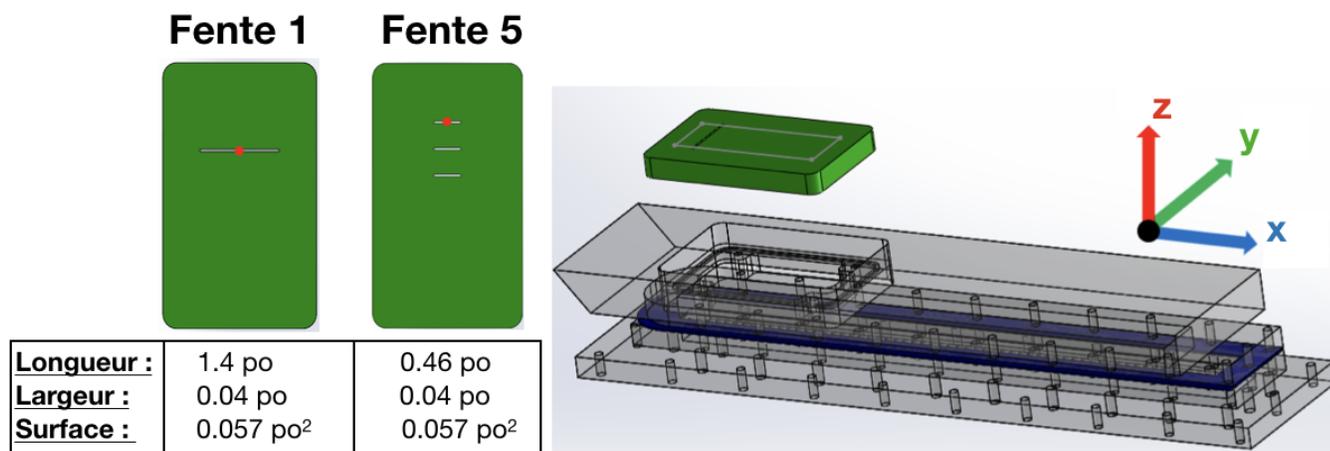


Figure 3.2 (À gauche) Les fentes testées dans la boucle d'essais. Le point rouge correspond à l'origine dans la veine. (À droite) Le système d'injection avec des plaques interchangeable [5]

3.1.2 Mesures de pression

Les mesures de pression permettent de classer les fentes. Pour cela, quatre capteurs PX26 de la marque Omega sont reliés à une carte d'acquisition. Ces capteurs sont installés sur la paroi latérale de la veine d'essais (Figure 3.3). Les mesures sont réalisées pour différentes conditions de débits d'air et d'eau afin de calculer les pertes de pression au niveau de la fente et le long de la veine d'essais. Cela permet de déterminer les fentes qui nécessitent le plus d'énergie pour injecter de l'air.

Les quatre capteurs mesurent la pression totale par rapport à la pression atmosphérique. P1 mesure la pression en amont de l'injection, P2 celle de la sortie de la fente, P3 la pression en aval de l'écoulement (i.e à la sortie de la veine) et enfin P4 permet d'acquérir la pression dans la chambre à air avant de passer à travers la fente.

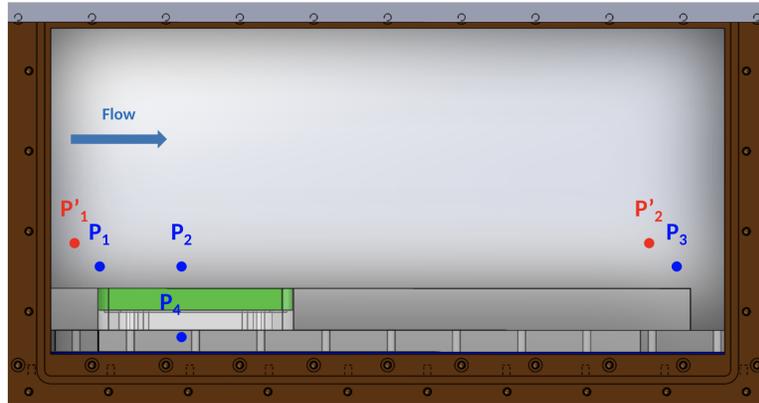


Figure 3.3 Position des capteurs de pression statique (bleu) et des tubes de Pitot (rouge) dans la veine et la chambre d'injection

Ainsi, $P_4 - P_2$ équivaut à la perte de charge à travers la fente d'injection. À partir de ces valeurs, une relation entre le débit d'air et la perte de charge peut-être obtenue.

En plus des capteurs de pression, deux tubes de Pitot sont utilisés pour mesurer la pression dynamique et donc la vitesse en un point à l'entrée et en un point à la sortie de la veine d'essais.

3.1.3 Caractérisation du nuage de bulle

Sonde optique V1

Pour caractériser les écoulements diphasiques, des méthodes intrusives et non intrusives sont utilisées. Les principaux paramètres qui doivent être étudiés sont le taux de vide, c'est-à-dire le rapport de surface de gaz sur la surface totale d'une section de la veine, la vitesse et la taille des bulles. Ces mesures permettent de caractériser la dispersion et la forme du nuage de bulle. Les études citées dans la revue bibliographique utilisent des méthodes différentes. La caméra rapide utilisée par exemple par Krishna et al. [33] et la méthode de laser Doppler anemometer/velocimetry utilisée par Sun et Faeth [34] peuvent seulement être utilisés dans le cas d'une faible injection d'air, soit un taux de vide assez bas. De plus, les méthodes non intrusives sont limitées à des zones proches des parois transparentes.

La sonde optique utilisée est une méthode intrusive. Elle est composée de deux fibres optiques de $125 \mu\text{m}$ de diamètre dont le bout est conique. Cette extrémité permet de percer les bulles. Le principe repose sur la différence d'indice de réflexion entre l'eau ($n_{eau} = 1.33$) et l'air ($n_{air} = 1$). Chaque fibre est reliée à un émetteur de lumière laser. La lumière émise à travers la fibre est transmise quand le cône est dans l'eau et réfléchi quand le cône est dans l'air. Le

signal lumineux récupéré est amplifié puis converti en signal analogique de sortie 10 V pour l'air -10 V pour l'eau. Le signal affiche donc deux phases correspondant à l'eau ou à l'air pour chaque pointe de fibre optique. Une carte d'acquisition et un oscilloscope sont utilisés pour enregistrer le signal et l'observer directement pendant les mesures pour pouvoir régler les paramètres de gain et de phase. L'acquisition est effectuée à une fréquence de 1 MHz pendant une durée de 20 s. Cette durée est relativement longue et permet de supprimer les effets d'oscillations périodiques des bulles (0.1-0.2 Hz) [35, 36].

La sonde optique utilise deux fibres dont les extrémités sont décalées d'une distance intercône connue mesurée au microscope électronique Δh qui est de l'ordre de $100 \mu\text{m}$. Ainsi, lorsqu'une bulle passe près des cônes, elle se fait transpercer par la première fibre, puis par la deuxième comme le montre la figure 3.4. Les temps de résidence de chaque fibre dans la bulle sont reliés à des dimensions temporelles (en secondes). De plus, le signal montre un décalage temporel entre les deux signaux des deux fibres. La distance interfibre étant connue, il est possible de calculer la vitesse de déplacement horizontale de la bulle. À partir de cette dernière donnée, la taille spatiale en mètres des bulles est obtenue en multipliant la vitesse des bulles par leurs dimensions temporelles.

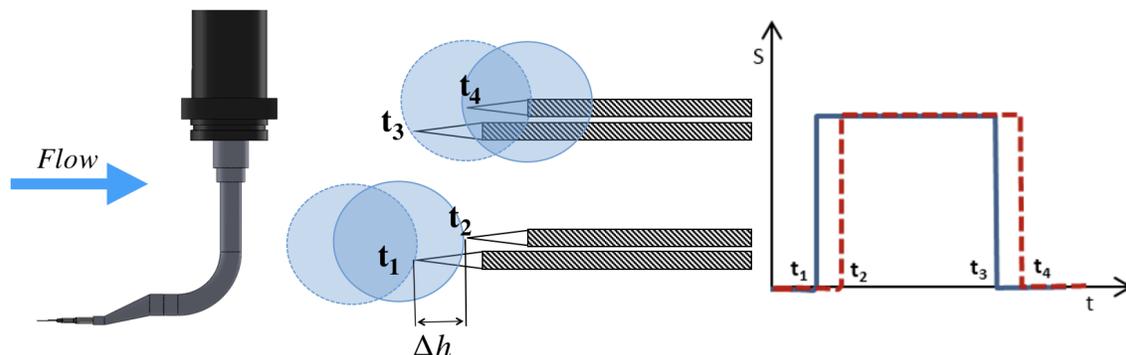


Figure 3.4 (À gauche) La partie immergée de la sonde. (Au milieu) Étapes de l'arrivée d'une bulle sur les fibres. (À droite) Le signal enregistré correspondant à l'arrivée de la bulle sur les fibres

L'obtention de l'extrémité conique des fibres ainsi que la conception et la fabrication de la sonde sont expliqués dans le mémoire de maîtrise de Julien Bouvard [5]. Étant donné la fragilité des fibres optiques, une vingtaine de fibres ont été attaquées à l'acide HF pour fabriquer les cônes et ont été mises de côté pour les éventuelles réparations de la sonde. Un protocole expliquant étape par étape la procédure de réparation de la sonde a été rédigé. Une autre notice documente toutes les étapes pour l'utilisation de la sonde et les réglages de celle-ci. Ces deux documents (**Notice de fabrication sonde** et **Notice d'instrument**) sont stockés

dans l'emplacement suivant : \\triton.meca.polymtl.ca\ed\usagers_exp-en-cours\Notices.

L'étape la plus compliquée et délicate du processus de remplacement des fibres est la fusion [5]. En effet, cette étape demande deux manipulateurs synchronisés et beaucoup de précautions étant donné la fragilité du point de fusion entre la fibre et le patch-cord (Figure 3.5). Ce dernier est l'élément qui permet de relier la fibre au laser qui envoie les signaux lumineux. Cet intermédiaire a pu être supprimé. En effet, une pince BTF1 de Thorlabs est reliée à un connecteur et la fibre passe à l'intérieur de ce dispositif. Il suffit de couper l'extrémité de la fibre de manière nette à l'aide d'une cliveuse et de connecter le tout au laser au niveau de la pièce noire sur la figure 3.5. En moyenne, la perte de signal obtenue à l'aide de cet outil est inférieure à celle d'une fusion de fibre standard.

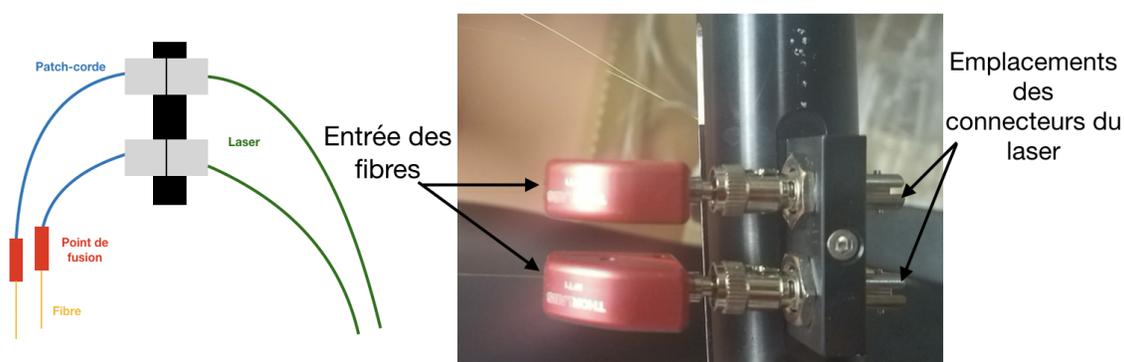


Figure 3.5 (À gauche) Ancienne méthode de liaison des fibres de la sonde au laser. (À droite) Nouvelle technique de liaison de la sonde au laser en utilisant des pinces BTF1 de Thorlabs

La sonde a un système de déplacement vertical intégré. Un système de déplacement latéral et dans le sens de l'écoulement a été mis en place par Julien Bouvard [5]. Dans son travail, la sonde n'atteint pas le bas de la veine. De plus, la structure a besoin d'être rigidifiée pour augmenter l'étanchéité. Des modifications ont donc été apportées. Une rallonge peut à présent être ajoutée au moment de prendre des mesures dans la partie basse de la veine d'essais. Concernant la rigidité, les poutres en U utilisées ont été remplacées par des barres à section carrée. Une photo du nouvel assemblage est illustrée dans la figure 3.6. On peut voir aussi que les barres latérales ont été remplacées par des poutres de section carrée pour diminuer leur flexion.

Le système de déplacement de la sonde permet de prendre des mesures à différents points de la veine. Ces mesures sont organisées sous forme de plans (Figure 3.7) distants de 100 mm, 153 mm et 206 mm par rapport à l'origine de la fente d'injection (les points rouges sur la figure 3.2).

Le but est d'obtenir un maximum de données dans la veine d'essais. Cependant, l'utilisation de la sonde prend beaucoup de temps : un plan contient 144 points et il faut 20 secondes de prise de mesure par point en plus du temps de déplacement et de positionnement de la sonde entre deux mesures.

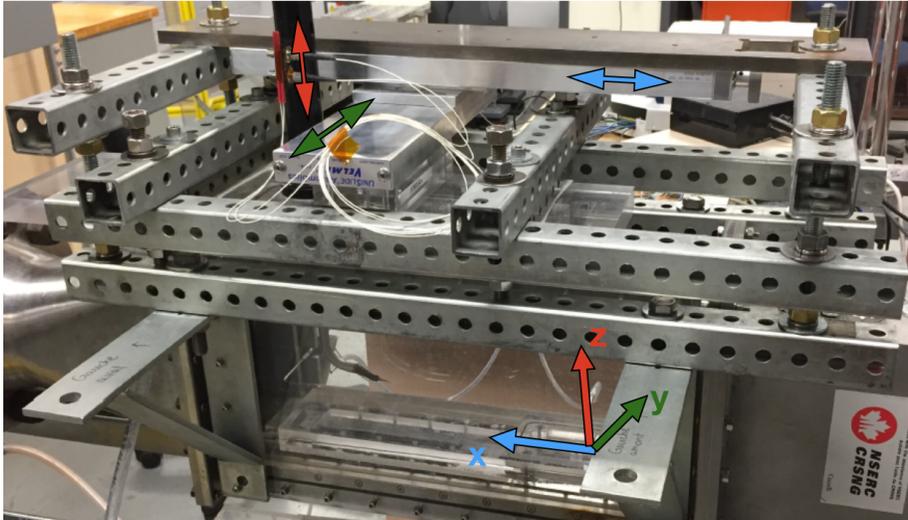


Figure 3.6 Assemblage du système de déplacement sur le dessus de la veine après les modifications

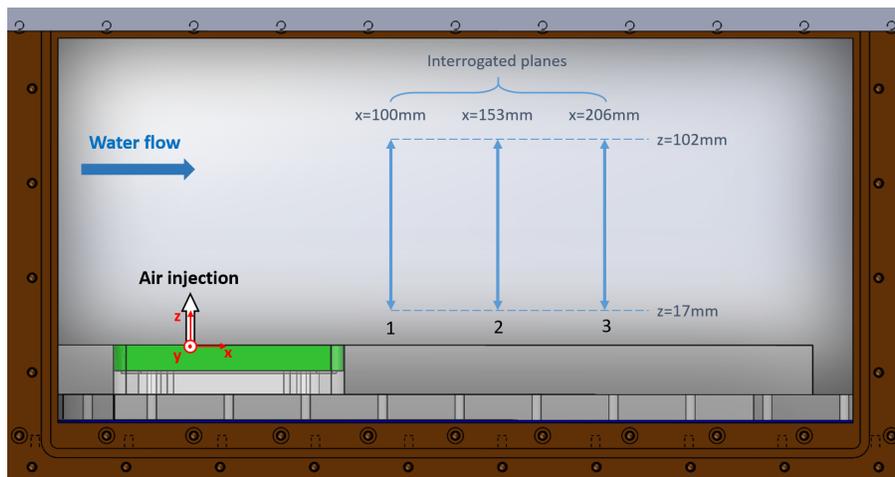


Figure 3.7 Vue latérale de la veine d'essais avec les positions selon x des trois plans mesurés par la sonde optique

Visualisation de l'écoulement et méthode de Krigeage

Afin d'obtenir des données tout le long de la veine sans avoir à prendre plus de plans de mesures, il est possible d'interpoler entre les plans disponibles. La méthode de Krigeage [37] a été testée pour effectuer cette interpolation. Un code Matlab a été développé en collaboration avec G. Recchia, un collègue en maîtrise recherche à Polytechnique Montréal. Son mémoire [38] explique en détail les calculs effectués dans le code ainsi que les résultats obtenus à partir des données de la sonde. La méthode de Krigeage a été appliquée sur les données de taux de vide local, car ce sont les données les plus faciles à interpréter visuellement. Néanmoins, le code peut également être appliqué aux données de tailles et vitesses de bulles.

Suite aux premiers résultats du Krigeage, le code ne reproduit pas très bien le comportement du nuage dans le sens de l'écoulement. Il faut donc lui fournir plus de données sur le nuage de bulle selon l'axe x . Ainsi, l'utilisation d'une caméra rapide *MotionBlitz Cube 4* a permis de prendre des images du nuage de bulle pour les différentes conditions d'écoulement testées. Les images sont ensuite traitées par un code Matlab qui permet d'en extraire les informations souhaitées et qui seront utiles au code de krigeage.

La caméra rapide est installée sur un trépied avec des niveaux afin de s'assurer que la caméra soit bien à l'horizontale, c'est-à-dire bien alignée avec la fente. Afin d'obtenir un maximum d'informations sur les bulles, il faut éclairer l'écoulement avec une lumière forte afin que les contours des bulles apparaissent sombres et soient ainsi plus faciles à détecter. Les deux parois latérales de la veine sont en acrylique. La caméra et l'éclairage sont disposés d'un côté et de l'autre de la veine (Figure 3.8). L'éclairage doit être uniformément réparti sur toute la surface de la fenêtre d'observation. En effet, un éclairage non uniforme implique des taux de gris différents pour deux bulles identiques. La première méthode testée est l'utilisation de puissants projecteurs. La lumière est diffusée à l'aide de papier calque collé sur les parois de la veine d'essais. La deuxième alternative est l'éclairage à l'aide d'un panneau de LED qui rend le taux de gris plus homogène. Cette dernière méthode est plus exploitable à condition d'ajouter une étape supplémentaire au traitement par ordinateur pour supprimer la pulsation à 120 Hz des LED.

Les réglages optimaux de la caméra pour la prise d'images sont compliqués à déterminer. Un premier choix a été fait pour pouvoir étudier, à partir des images, quels réglages sont optimaux. Un code d'étude de convergence a été rédigé et testé par Louis Dutheil [39]. Cela a permis de fixer les réglages cités ci-dessous. Les réglages retenus pour l'utilisation de la caméra sont les suivants :

- La mise au point de la caméra est fixée sur le plan central de la veine en utilisant le

- centre de la fente
- La saturation élevée de l'image permet de lisser les défauts de l'éclairage, mais empêche la visualisation des petites bulles. Pour éviter les pertes d'information, la saturation est réglée de manière à ce que les valeurs de taux de gris des images appartiennent au domaine. [15, 244]
 - Pour avoir des images nettes malgré le mouvement des contours des bulles, un temps d'exposition assez court est choisi ($206 \mu\text{s}$).
 - La fréquence d'acquisition maximale (1476 Hz) pour une durée de 3.5 secondes a été choisie au début. Suite à l'étude de convergence, une fréquence de 500 Hz pendant 10.5 s a été utilisée pour la prise d'image exploitée afin d'assurer l'acquisition et le moyennage du maximum de phénomènes possibles.

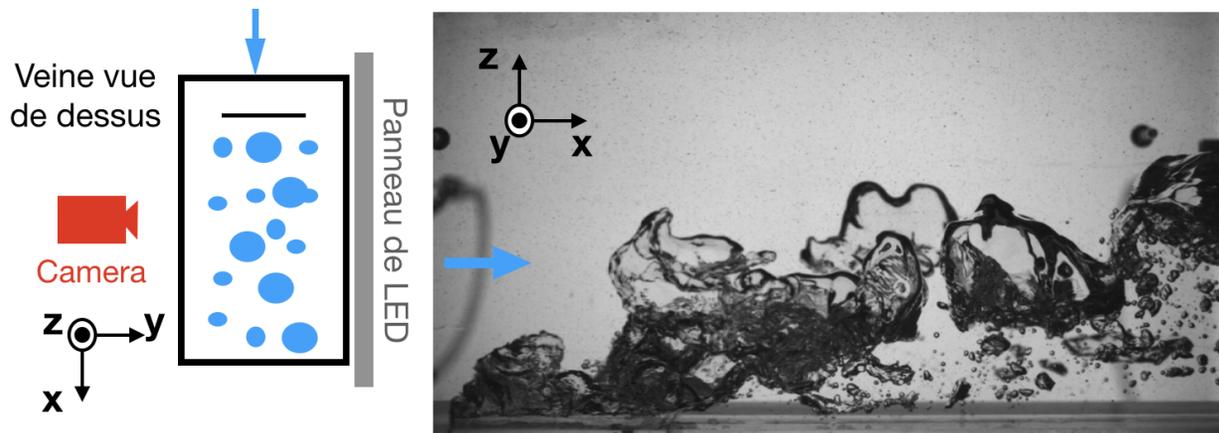


Figure 3.8 (À gauche) Vue de dessus de la veine d'essai avec le dispositif de prise d'image. (À droite) Image prise par la caméra rapide avec les réglages cités ci-dessus. La flèche bleue correspond au sens de l'écoulement

3.2 Stockage et traitement des données

Chaque point de mesure de la sonde optique correspond à un fichier de données. Les expériences nécessitent la prise d'au moins trois plans pour chaque fente testée et pour différents paramètres d'écoulement. Il est donc primordial d'organiser les données et les résultats.

3.2.1 Définition des paramètres

La boucle hydraulique permet de contrôler le débit d'air Q_G et le débit d'eau Q_L . Les paramètres utilisés pour les expériences sont les suivants :

- Le titre volumique : $\beta = \frac{Q_G}{Q_G+Q_L}$
- La vitesse de l'écoulement : U_L

Les mesures de pression sont effectuées pour différents Q_L et Q_G . Cependant, les mesures de sonde sont prises pour des conditions précises d'écoulement $\beta = 3\%$ et 9% qui sont les plus intéressantes pour le partenaire de la Chaire. La vitesse de l'écoulement est fixée à 1.25 m/s. Les valeurs de débit à régler pour la boucle sont calculées ainsi : $Q_L = U_L \cdot (1 - \beta) \cdot S$ en (l/s) où $S=170 \text{ cm}^2$.

À partir de β et Q_L , on peut retrouver les valeurs de Q_G à injecter.

3.2.2 Nomenclature et Arborescence

Une première arborescence des fichiers a été créée par Florentin Anne [32] et ensuite optimisée. Tout d'abord, un dossier **__exp_en_cours** regroupe les dossiers :

- **Fentes d'injection** contenant les dessins et caractéristiques de chaque fente
- **Fibres** où sont stockées les images du microscope électronique pour déterminer avec précision la distance inter cône Δh
- **Notices** contenant les notices de fabrication de la sonde, de son utilisation ainsi que la notice de mise en marche de la boucle hydraulique et de la prise de pression dans la veine.
- **Arborescence prise de mesure** où chaque expérience A1PEi correspond à la caractérisation d'une fente. Ce dossier contient également les fichiers Matlab nécessaires au traitement et à l'extraction des données.

Chaque fichier sonde ou pression est enregistré dans le dossier A1PEi correspondant. La nomenclature suivante a été adoptée :

- sonde-A1PEi-**XY-xyz-VvCff-aaaammjj** où **i** correspond au numéro de la campagne d'expérience, **XY** à la vitesse et au titre volumique, **xyz** aux positions des points de mesure dans la veine, **v** à la version de la sonde utilisée et **ff** aux fibres utilisées donc à une distance inter cône précise. Ce dernier paramètre a été ajouté pour prendre en compte la possibilité de changement de fibre entre deux points de mesure d'une même campagne d'expérience et donc le changement de Δh .
- pression-A1PEi-**XY-MV-aaaammjj** avec **MV** la hauteur amont et aval en millimètres de la vague qui apparaît dans la veine.
- pression-A1PEi-00-**W-aaaammjj** pour les mesures de pression pour une injection d'air seulement avec **W** le débit d'air injecté.

Chaque variable expliquée ci-dessus correspond à un caractère alphanumérique de 1 à Z. Une clé est nécessaire pour décoder le titre de chaque fichier et comprendre quelles sont les conditions d'écoulement, la fente, la position et les fibres utilisées. Cette clé est un tableau Excel

généralisé pour chaque campagne d'expérience **A1PEi** qui contient toutes les informations dont le code de traitement a besoin pour calculer et extraire les données voulues. Un autre document Excel nommé **Plan d'expérience A1PEi** permet de documenter les différentes étapes de la prise de mesure, c'est-à-dire la fente, le changement de fibre, les dernières positions prises en mesure ainsi qu'une section commentaire pour les problèmes rencontrés pendant la prise de mesure. Ce document permet de s'assurer que tous les points de mesures sont effectués correctement et sont stockés sous la bonne nomenclature pour que le traitement automatique ne génère pas d'erreurs.

En effet, tous les fichiers de mesures brutes sont stockés dans le dossier **A1PEi** correspondant. Avant de lancer le traitement, l'arborescence relative au dossier d'expérience doit être générée. Elle a été déterminée comme étant la plus complète et la plus utile. Elle permet de stocker les données extraites en fonction du titre volumique, du débit d'eau puis en fonction du type de mesure (Pression ou Sonde). La figure 3.9 montre la nouvelle arborescence.

3.2.3 Traitement des données de pression

Une fois que l'arborescence est générée, l'utilisateur choisit de traiter les données de pressions. Le sous-programme d'extraction de données est lancé. Il sauvegarde dans une figure les valeurs temporelles de tous les capteurs de pression. Finalement, les valeurs de pression moyennes des capteurs vont être sauvegardées ainsi que toutes les conditions d'écoulement. À partir de ces données, des sous-programmes permettent de tracer plusieurs graphes :

- les pressions selon chaque vitesse mesurée avec ou sans eau dans la veine
- la perte de pression dans le passage à travers la fente selon le débit d'air injecté dans la veine
- les différents débits en fonction des vitesses calculées par les tubes Pitot
- les courbes de pression en fonction du débit d'air lorsqu'il n'y a pas d'eau dans la boucle hydraulique

3.2.4 Traitement des données de la sonde

La première partie du programme va lire les mesures temporelles en format texte. Les bulles sont ensuite détectées par dépassement de seuil. Les informations de début et de durée pour chaque bulle détectée sont stockées. Certaines de ces bulles doivent être supprimées. Pour cela, plusieurs filtres sont appliqués. Le mémoire de Julien Bouvard [5] explique en détail les filtres utilisés à la section **4.3.2 Filtrage des bulles**. Cependant, avec l'automatisation des traitements de données, des filtres supplémentaires ont dû être ajoutés. Ces étapes sont réexpliquées ci-dessous pour plus de clarté :



Figure 3.9 Arborescence des fichiers pour une campagne de mesure A1PEi

- Les bulles ayant un temps de résidence inférieur à $20 \mu\text{s}$ sont supprimées, soit 20 micromètres à 1m/s et 200 micromètres à 10 m/s.
- Les bulles détectées par les deux fibres sont appareillées en suivant le principe suivant : les signaux des fibres i et j s'entrecoupent. Comme le montre la figure 3.10, seules les quatre possibilités en vert sont admissibles par rapport au signal de référence bleu car ils s'entrecoupent avec ce dernier. Les signaux en rouge de la fibre j n'ont pas de plage commune avec le signal de référence de la fibre i (bleu). Dans ces cas-là, les bulles détectées par la fibre j ne peuvent pas être appareillées à la bulle de la fibre de référence i . Le signal suivant est alors étudié et les bulles détectées par une seule fibre sont supprimées.
- Pour s'assurer que les bulles sont correctement appareillées, un filtre sur la durée des bulles est utilisé [5]. Un seuil de tolérance exponentiel permet d'accepter une tolérance relative plus grande pour les petites bulles que pour les grosses bulles. Sa formule est la suivante : $|t_{duree,i} - t_{duree,j}| \leq e_{max} \left(1 - e^{-\frac{t_{duree,moy}}{\tau}} \right)$ avec $t_{duree,i}$ la durée de la bulle du signal i , $e_{max} = 9 \times 10^{-4}$ s l'écart maximum autorisé et $\tau = 9 \times 10^{-3}$ s la constante de temps. Ces deux valeurs sont adaptées à notre besoin ;

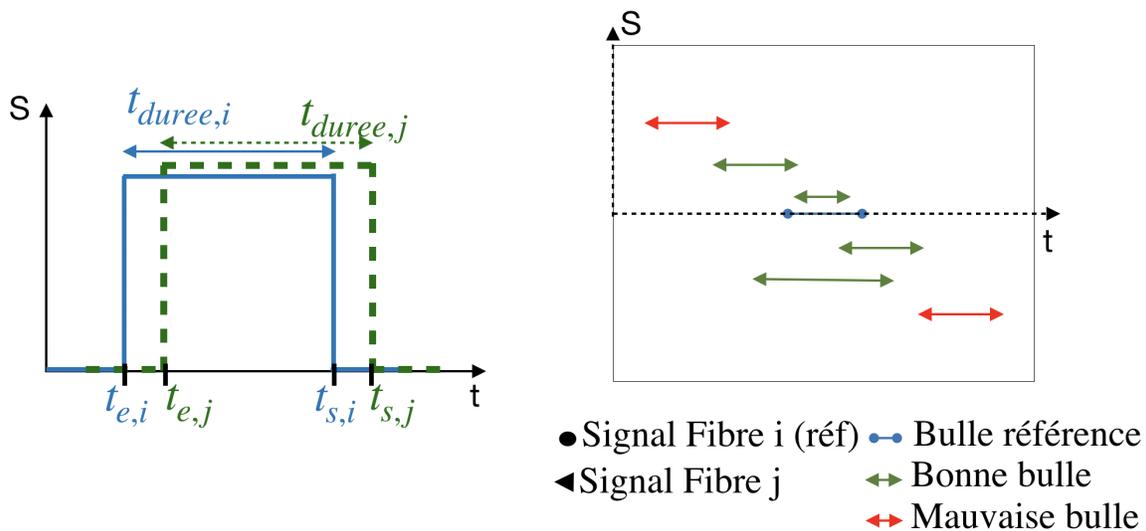


Figure 3.10 (À gauche) Le signal généré par l'arrivée d'une bulle sur les fibres i et j . Les différents temps nécessaires au traitement sont définis. (À droite) Les bulles admissibles à un appareillement

La vitesse des bulles est ensuite calculée comme étant la distance inter cône Δh sur la durée de migration de la bulle $t_{migration}$. Ce dernier correspond à la différence des moments de sortie t_s des fibres de la bulle. Si la fibre i est la plus en amont des deux fibres (c'est-à-dire

la première fibre rencontrée par les bulles), V s'écrit :

$$V = \frac{\Delta h}{t_{s,j} - t_{s,i}}$$

Le filtre suivant a été ajouté suite à l'automatisation des traitements des données. En effet, en automatisant, il est difficile de savoir quelle fibre est la plus en amont dans l'écoulement :

- La distribution des bulles en fonction de la vitesse permet de calculer la médiane. Il est prévu que cette dernière soit positive. Si elle a une valeur négative, alors la disposition des fibres est inversée et gardée pour la suite des traitements. En effet, la vitesse s'écrit alors $V = \frac{\Delta h}{t_{s,i} - t_{s,j}}$
- Une fois que les bonnes vitesses sont recalculées, les vitesses négatives, infinies et celles supérieures à la vitesse maximale sont supprimées. La vitesse maximale est calculée comme étant cinq fois la médiane des vitesses en excluant les vitesses infinies et négatives.

Le taux de vide local est ensuite calculé. Il s'agit de la moyenne de la somme des temps de résidence des fibres dans chaque bulle $t_{durée}$ sur la durée totale de la prise de mesure t_{tot} :

$$\varepsilon_{local} = \frac{moyenne(\sum t_{durée,i}, \sum t_{durée,j})}{t_{tot}}$$

La taille des bulles en mètre peut être calculée comme étant le temps de résidence moyen des deux fibres dans la bulle multiplié par la vitesse :

$$d = moyenne(t_{durée,i}, t_{durée,j}) \times V$$

Finalement, le programme va tracer des graphiques sous différents formats .eps, .png, .fig et .mat. Ainsi, il est possible de manipuler les données des graphes et de les analyser dans des codes de post-traitement.

3.2.5 Traitement des images

La séquence d'images prises par la caméra rapide est effectuée à une fréquence de 500 Hz et un temps d'exposition de 206 μ s. Pour être exploitées adéquatement, les images sont post-traitées premièrement pour retirer l'influence du courant alternatif à 60 Hz qui fait fluctuer l'éclairage. À cet effet, une série d'images sans bulles est traitée. Chaque pixel est analysé pour trouver l'amplitude de la sinusoïde formée par la fréquence de l'éclairage du panneau LED. Deux types de données sont alors enregistrées pour chaque pixel : la moyenne sur toutes les images du taux de gris et l'amplitude de la sinusoïde de l'éclairage. Cette dernière donnée permet

de supprimer l'influence de l'éclairage sur les images avec bulles. Les images sont ensuite transformées en vidéo qui permet d'observer une baisse de l'influence de l'éclairage, sans pour autant disparaître totalement. Ensuite, les images sont traitées de manière à ne garder que les bulles. C'est-à-dire que l'arrière-plan est supprimé en enlevant la moyenne du taux de gris de l'arrière-plan des images sans bulles. Cette étape est nécessaire, car l'arrière-plan contient des zones d'ombres dues à l'imperfection de l'éclairage et aux capteurs de pression visibles dans la figure 3.8. L'intérêt de ces images est qu'elles contiennent toujours des informations sur les bulles, car leurs niveaux de gris sont simplement corrigés de l'amplitude de la sinusoïde et de l'arrière-plan qui ne bouge pas. Une fois que les images obtenues ne montrent que les bulles seulement, un moyennage du taux de gris de toutes les images pour chaque pixel est effectué. Il en résulte l'image visible sur la figure 3.11. Une haute valeur de taux de gris indique qu'en moyenne, beaucoup de surfaces d'interface de bulles sont présentes à cet endroit. Ces images moyennées sont utilisées par la suite avec les résultats du code de krigeage pour extraire plus de données concernant l'écoulement diphasique dans la veine d'essais.

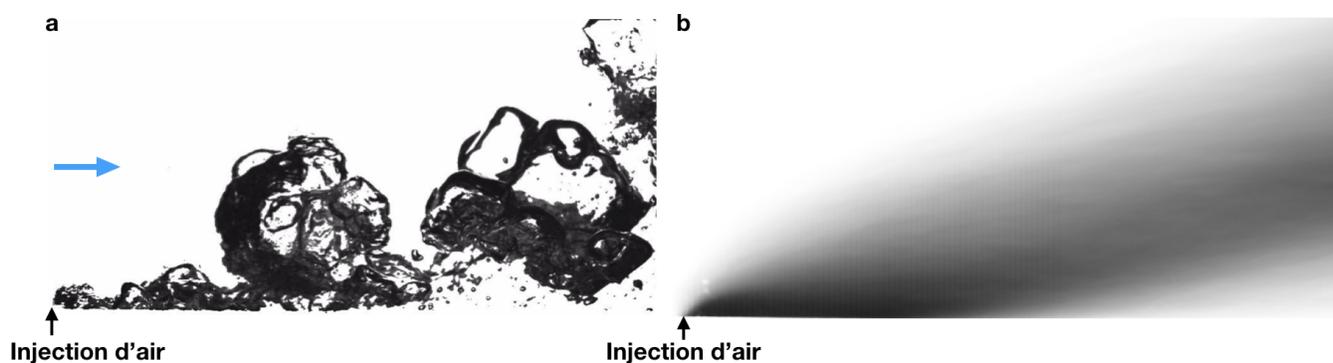


Figure 3.11 (a) Les images après suppression de l'arrière plan. (b) Trace du nuage de bulle issu du moyennage du taux de gris de chaque pixel pour une série d'images

3.3 Boucle d'essai à pression contrôlée - LEGH

La boucle à pression atmosphérique fournit de grands débits d'eau. Cependant, elle ne permet pas d'atteindre les hautes vitesses qui existent dans les conduites forcées des centrales hydroélectriques. De plus, la veine d'essais est petite, et elle ne permet pas de suivre l'évolution du nuage sur une grande distance dans le sens de l'écoulement. Pour ces raisons, une nouvelle boucle hydraulique a été conçue par l'équipe de la chaire CRSNG-GE. Elle a des performances plus grandes et plus contrôlées que la boucle présentée dans le chapitre précédent. Elle permet d'aller à des pressions sub-atmosphériques et des débits importants tout

en supprimant les bulles en aval des veines d'essais.

3.3.1 Montage expérimental

Une brève explication de la nouvelle boucle hydraulique est présentée dans cette section. En effet, un article [40] rédigé par les membres de la Chaire explique en détail les étapes de conception et de contrôle de la boucle.

Le montage expérimental est visible sur la figure 3.15. Il s'agit d'une boucle fermée permettant d'étudier des écoulements diaphasiques sous des conditions de pression contrôlées et pour des vitesses de 1 m/s à 25 m/s. Cette dernière vitesse est typique de celle présente autour des aubes de turbines hydroélectrique de type Francis.

La boucle s'élève sur trois étages posés sur des dalles autoportantes pour éviter que les vibrations ne soient transmises aux laboratoires avoisinants. Tous les composants sont en acier inoxydable ou en matériau résistant à la corrosion pour éviter la contamination de l'eau.

Le troisième étage contient les veines d'essais et le débulleur qui sépare l'eau de l'air injecté en amont. Les veines sont placées au troisième étage pour la pression au niveau de la veine d'essais permettant d'atteindre les basses pressions en aval de la turbine tout en conservant des conditions de fonctionnement adéquates pour la pompe. Deux types de veine d'essais peuvent être installées dans la boucle :

- Une veine de $15 \times 15 \text{ cm}^2$ de section et de 1.8 m de long (Figure 3.15) composée de 2 parties fixées ensemble au niveau des brides.
- Une veine de $25 \times 25 \text{ cm}^2$ de section et de 2.4 m de long (Figure 4.7) composée de 3 parties fixées ensemble au niveau des brides.

Ces veines d'essais ont été conçues pour résister à une pression interne allant jusqu'à 6 bar en pression absolue en cas de problèmes. Une valve de sécurité s'active dès que la pression atteint 5 bar dans le débulleur.

L'écoulement arrive à la veine par un double coude à ailettes permettant de diriger l'écoulement à 180 degrés tout en évitant de créer des zones de recirculation. Pour cela, une étude a été effectuée par Stefane Sved [40] en incluant des ailettes le long de la coupe transverse du coude. Ce dispositif permet d'avoir un écoulement uniforme avant d'arriver au niveau des nids d'abeilles situés en entrée de la veine d'essais. Ces derniers permettent également de redresser l'écoulement, de casser les tourbillons plus grands qu'une cellule du nid d'abeille. Une grille post nid d'abeille va permettre d'homogénéiser la turbulence et d'améliorer l'uniformisation du champ de vitesse moyen.

En sortie des veines, l'écoulement est diphasique et est ralenti par des divergents avant d'arriver au débulleur. Ce dernier permet de séparer l'eau de l'air avant d'être renvoyé dans la boucle. Ce procédé empêche l'apparition de petites bulles en amont de l'injection d'air.

3.3.2 Caractérisation de l'écoulement

Pour caractériser le nuage de bulles, il faut pouvoir injecter de l'air dans les veines d'essais de manière à avoir une injection homogène. En effet, pour la boucle à pression atmosphérique, une simulation numérique a été effectuée. Le résultat montre un profil de vitesse non uniforme, c'est-à-dire que le vecteur de vitesse à la sortie de la fente est plus grand sur les extrémités et diminue jusqu'à arriver au centre.

Concernant la chambre d'injection du LEGH, elle est creusée dans une des plaques bouchons de la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$ (figure 3.13) et dans la $15 \times 15 \text{ cm}^2$. L'injection doit être à une distance d'au moins 20 cm du bord de la veine, car l'écoulement doit avoir le temps de s'homogénéiser en sortant du nid d'abeille.

Afin d'éviter un profil non homogène comme celui de la chambre d'injection précédente, l'entrée d'air est décalée par rapport à la sortie. Une distance entre l'entrée et la fente est fixée afin de permettre à l'écoulement d'air de s'homogénéiser avant de sortir dans l'écoulement d'eau. Une simulation numérique à l'aide de CFX est réalisée pour valider le design de la chambre d'injection. Pour un débit maximal d'eau de $2050 \text{ m}^3/\text{h}$, et un titre volumique de 9%, le débit d'air qui doit être injecté est de 56 L/s (donc un débit massique à l'entrée de 0.067 kg/s). La condition imposée en sortie est une pression de 0.1 bar. Le résultat de la simulation en compressible sont affichés sur la figure 3.12. La vitesse en sortie de la fente a un profil homogène et une valeur autour de 538 m/s. La vitesse en sortie est supersonique. La géométrie de la chambre d'injection testée par simulation est validée.

Les fentes doivent être interchangeables, donc la chambre d'air doit être conçue de manière à recevoir des plaques de fentes différentes. La figure 3.13 montre les dessins pour la conception de la chambre d'injection et la figure 3.14 les différentes fentes qui pourront être testées dans le LEGH.

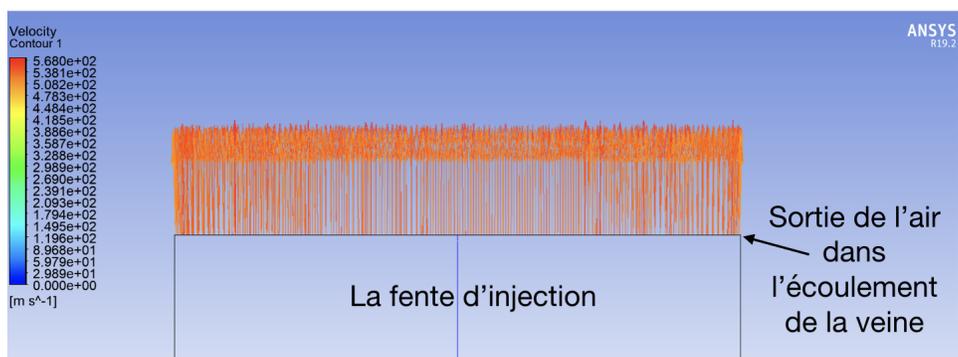


Figure 3.12 Résultat de la simulation CFX de l'écoulement dans la chambre à air. Les vecteurs orange représentent la vitesse de sortie de l'air de la fente pour un débit d'air en entrée de $56 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ et une sortie libre à une pression absolue de 0.1 bar

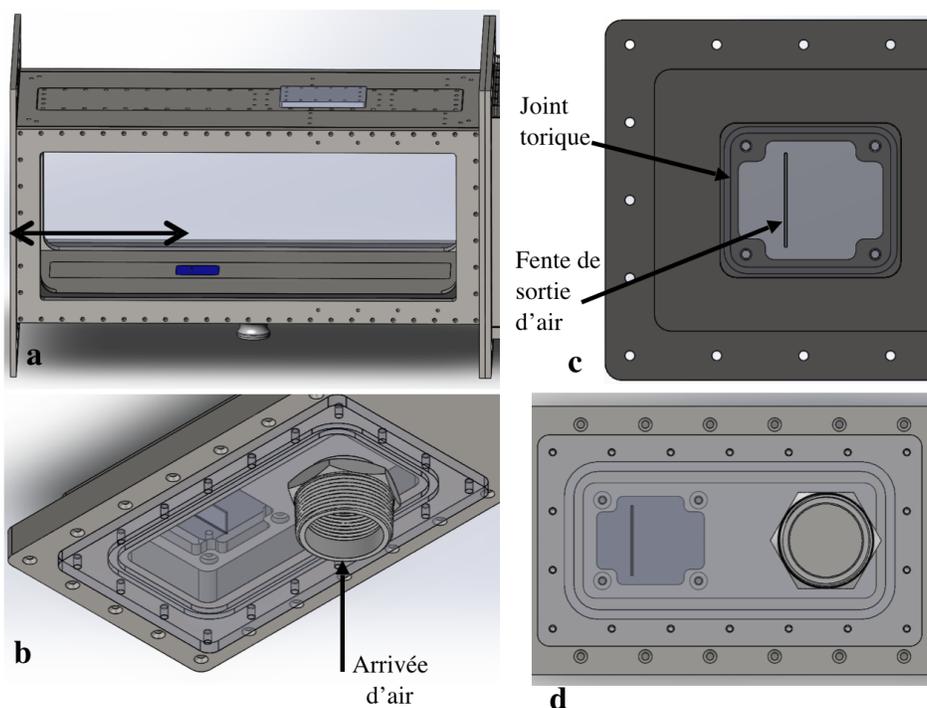


Figure 3.13 (a) La première veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$. La partie bleue correspond à la fente d'injection (b) L'arrivée d'air et la sortie ne sont pas en face l'une de l'autre (c) l'injection d'air vue de l'intérieur de la veine. L'étanchéité est assurée par un joint torique compressé par la plaque de fente (d) La chambre d'injection vue de dessous

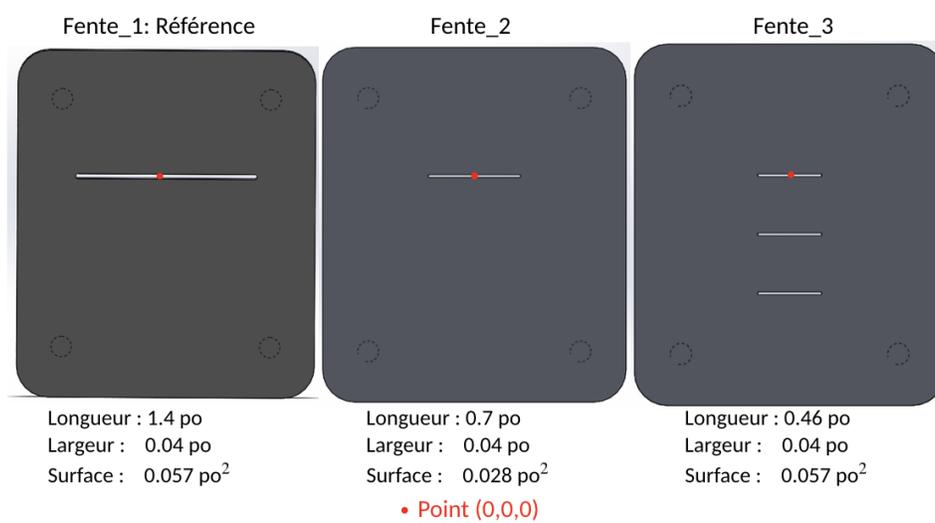


Figure 3.14 Les fentes à tester dans la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$. Le point rouge correspond à l'origine qui sera une référence pour les plans de mesure

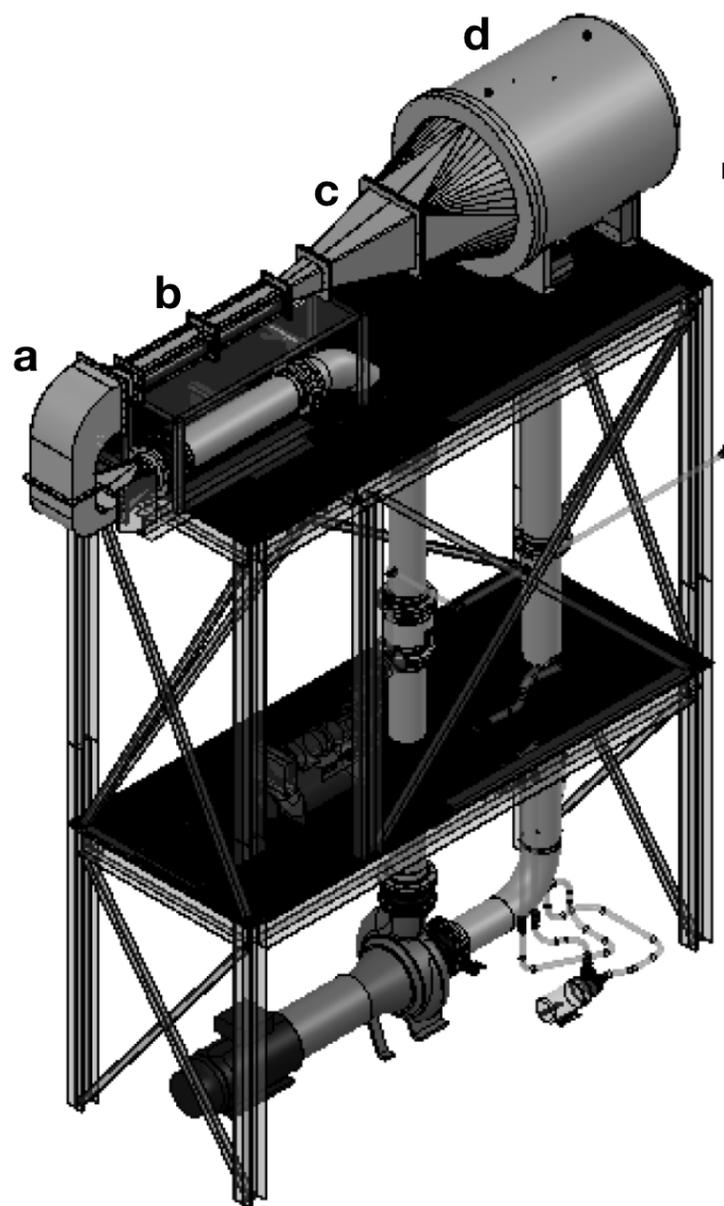


Figure 3.15 (a) Le double coude à ailettes (b) La veine d'essais $15 \times 15 \text{ cm}^2$ de section (c) Le divergent (d) Le débulleur

CHAPITRE 4 CONCEPTION DE LA SONDE V2

La sonde V1 nous permet d'avoir de bons résultats, mais présente quelques limitations :

- Les déplacements en trois dimensions de la sonde se font par glissement. Les joints toriques permettant d'assurer l'étanchéité sont vite usés ce qui rend difficile d'effectuer des mesures sans avoir de fuite. Ces dernières sont également causées par une surface d'appui très grande ce qui rend le déplacement encore plus compliqué.
- La sonde et son système de déplacement sont installés au-dessus de la veine de mesure pour permettre la visualisation de l'écoulement sur les parois latérales. De plus, la prise de mesure est effectuée seulement sur la moitié de la veine puis les résultats sont symétrisés par rapport au milieu de la veine. En effet, les premiers résultats présentés dans le paragraphe **4.3.1 Taux de vide - Vérification de la symétrie** de [5] montrent que l'écoulement est symétrique selon l'axe Y. Malgré cette optimisation de la prise de mesure, le système de déplacement ne permet pas d'atteindre une large plage de mesure (Figure 4.1). Un nouveau système de déplacement doit être conçu.
- La prise de mesure est assez chronophage ; il faut 8×18 points de mesure par plan et le système de déplacement prend du temps à être manipulé à cause des frottements sur les joints toriques. Pour une condition d'écoulement, c'est-à-dire un titre d'écoulement et une vitesse d'écoulement, il faut 3 jours de mesure pour enregistrer 3 plans. De plus, le processus est assez répétitif et demande l'attention du manipulateur.

4.1 Le cahier des charges

Avec la construction d'une nouvelle boucle hydraulique à grande hauteur, plus de conditions d'écoulement seront disponibles à tester. Il est donc nécessaire de concevoir une nouvelle sonde qui peut surmonter les limitations de la sonde V1 et résister aux forces hydrodynamiques exercées sur la structure par l'écoulement dans la nouvelle boucle. La sonde V2 doit donc respecter le cahier des charges suivant :

- Assurer une meilleure étanchéité, car les vitesses qui seront appliquées sont plus grandes et donc les fuites plus importantes si la pression dans la veine devient trop grande.
- Augmenter la surface de mesure dans le plan perpendiculaire à l'écoulement pour avoir plus de données.
- Automatiser la prise de mesure pour pouvoir effectuer d'autres tâches tout en supervisant le processus de mesure. L'automatisation permet également d'éviter les erreurs

humaines comme le positionnement dans la veine ou la consignation des données.

- Les pièces constamment inondées ou en contact avec l'eau doivent être en acier inoxydable afin d'éviter l'oxydation des pièces de la nouvelle boucle hydraulique LEGH.
- S'adapter à différentes dimensions de veine d'essais. En effet, pour le LEGH, deux types de veines à section carrée de dimensions $15 \times 15 \text{ cm}^2$ et $25 \times 25 \text{ cm}^2$ peuvent être installées.
- Obstruer un minimum l'écoulement pour ne pas perturber les résultats des prises de mesures.
- S'assurer que le chemin de la fibre comporte le moins de courbure possible afin d'éviter les pertes de signaux.
- Supporter une pression maximale de 5 bar.

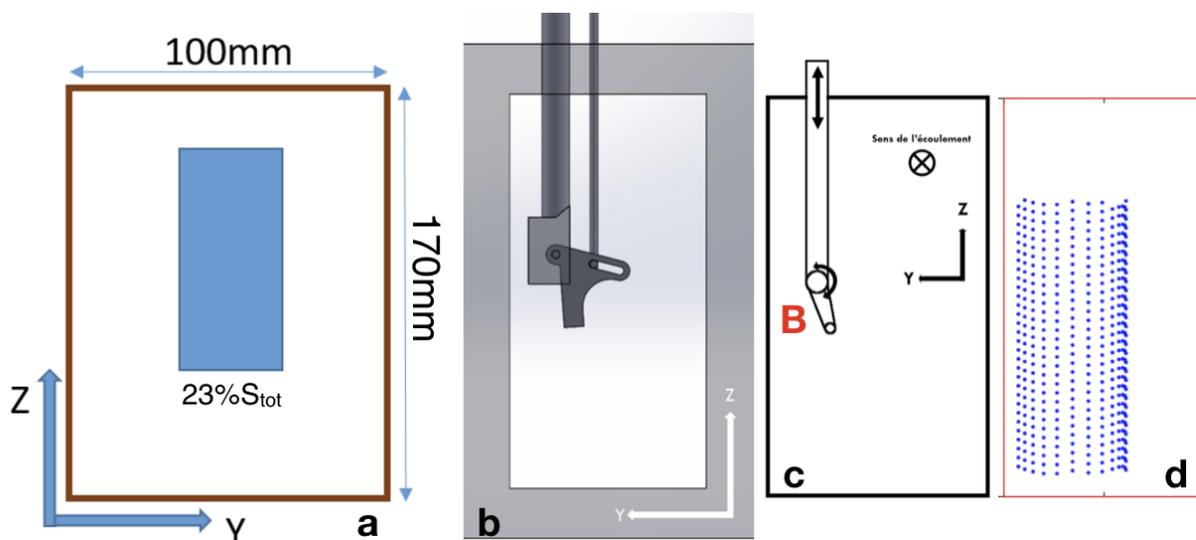


Figure 4.1 (a) La surface mesurée par la sonde V1 après symétrie des données. (b,c) Idées de mécanismes pour la sonde V2. (d) Surface de passage de la pointe du bras **B**, ce qui correspond à la surface de mesure qui sera ensuite symétrisée

4.2 Les idées préliminaires

Plusieurs idées ont été étudiées avant d'arriver à un concept convaincant :

- Le déplacement en altitude ne génère pas de fuite donc il est possible de déplacer la sonde à l'aide de deux mécanismes qui contrôlent l'altitude. La différence d'altitude correspond à une position latérale de l'écoulement. La figure 4.1(b,c) montre les deux mécanismes qui pourraient fonctionner.

- Le déplacement selon l'axe X (c'est-à-dire dans le sens de l'écoulement) est celui qui génère le plus de fuites. Ce déplacement par glissement peut être remplacé par un déplacement manuel de la sonde dans les différents orifices de la veine. La position de ces orifices est étudiée pour pouvoir accéder aux plans de mesure voulus.
- L'utilisation de moteurs permettrait une automatisation des prises de mesures. Dans les deux schémas de la figure 4.1(b,c), il est possible d'utiliser soit deux moteurs linéaires soit un moteur linéaire et un moteur rotatif immergé.

4.3 Le choix de concept

Le concept choisi est celui de la figure 4.1.c. En effet, le premier concept implique de faire deux trous dans les veines ce qui rend plus difficile d'assurer l'étanchéité de la sonde. Il faut deux moteurs pour gérer la translation et la rotation du bras B.

4.3.1 Rotation du bras B

L'utilisation d'un moteur rotatif immergé connecté directement au bras B est écartée. Effectivement, après plusieurs recherches, il est impossible de trouver un moteur IP68 qui soit assez petit pour respecter les contraintes géométriques. Il faut donc mettre en place un système de transmission qui respecte les conditions suivantes :

- Le mouvement du bras est géré par un moteur rotatif. L'axe de rotation du bras est parallèle au sens de l'écoulement. Si le moteur n'est pas IP68, il doit être dans la partie non immergée qui est perpendiculaire à l'écoulement. Donc, le mouvement rotatif du moteur doit être transmis à 90 degrés pour diriger l'axe du bras.
- Le bras rotatif **B** qui tient les fibres doit être bloqué pour s'assurer qu'il reste fixe dans l'écoulement pendant la prise de mesure.
- Le mouvement de rotation du moteur doit être transmis au bras de manière étanche.
- Le déplacement du bras rotatif bouge par pas. Il faut donc un moteur rotatif pas-à-pas.
- La ligne de transmission doit comporter le moins de jeux possible afin que le positionnement du bras et donc des fibres soit le plus précis possible.

Pour respecter chacune des conditions citées ci-dessus, voici les solutions proposées :

- L'utilisation d'engrenages coniques ou de vis sans fin est une bonne solution, car elles permettent la transmission d'efforts importants. Cependant, la partie immergée qui est essentiellement le bras doit être petite pour ne pas encombrer l'écoulement. Il est compliqué de trouver ces mécanismes avec des petites dimensions. La nouvelle solution proposée est celle du double joint de cardan (Figure 4.2). Il s'agit d'un dispositif mécanique qui permet la transmission d'une rotation angulaire entre deux arbres dont

- les axes se coupent en un point.
- Pour bloquer le bras rotatif, le mécanisme de la croix de Malte (Geneva Drive) a été proposé. En effet, elle permet de transformer un mouvement rotatif continu en mouvement rotatif saccadé. Pour pouvoir régler l'angle de rotation du bras rotatif **B**, il faut coupler la croix de Malte à un réducteur.
 - La transmission de manière étanche de la rotation du moteur vers le mécanisme de rotation du bras **B** est assurée par des aimants à l'intérieur d'une cloche (Figure 4.2). En effet, des aimants sont fixés du côté du moteur, une séparation en acier inoxydable assure l'étanchéité à l'aide d'un joint torique, puis d'autres aimants sont placés dans la partie qui peut être inondée et qui est reliée au mécanisme de transmission croix de malte-réducteur-cardan-bras rotatif.
 - Pour éviter les jeux dans la ligne de transmission de mouvement, des paliers en PTFE ont été fixés sur les axes rotatifs en acier inoxydable. Ils empêchent le mouvement latéral de l'axe tout en entravant un minimum sa rotation, donc la perte du couple transmis par le moteur. Les paliers choisis sont des tubes en PTFE coupés aux bonnes dimensions.

Le concept final est montré dans la figure 4.3. Le double joint de cardan doit respecter des contraintes géométriques précises, car la partie immergée doit obstruer le minimum possible l'écoulement dans la veine. Le joint de cardan (DIN808 Stainless steel de DG Gelenke) est le plus petit joint en acier inoxydable qui permette de transmettre les efforts pour faire bouger le bras rotatif **B**. La cloche magnétique (SA46/6 de MINEX-S) a été choisie de manière à fournir un couple suffisant pour faire déplacer le bras dans l'écoulement. De plus, trouver un réducteur entièrement en acier inoxydable qui fournisse le rapport de réduction souhaité et qui soit de petite dimension était difficile. Pour toutes ces raisons, il a été décidé que la croix de Malte et le réducteur seront supprimés de cette version de la sonde.

4.3.2 Translation de la sonde

La translation de la sonde est gérée par un actuateur linéaire à vis sans fin qui fournit un bon rapport de réduction donc une augmentation du couple transmis par le deuxième moteur rotatif. La partie translaturée est un tube de 25 cm de longueur qui abrite l'axe reliant l'aimant immergé au joint de cardan ainsi que le passage de la fibre optique. L'étanchéité est assurée par un joint torique au niveau du guide de translation (en vert dans le premier schéma de la figure 4.3). Le plateau amovible de l'actuateur linéaire est fixé sur la partie supérieure de la sonde.

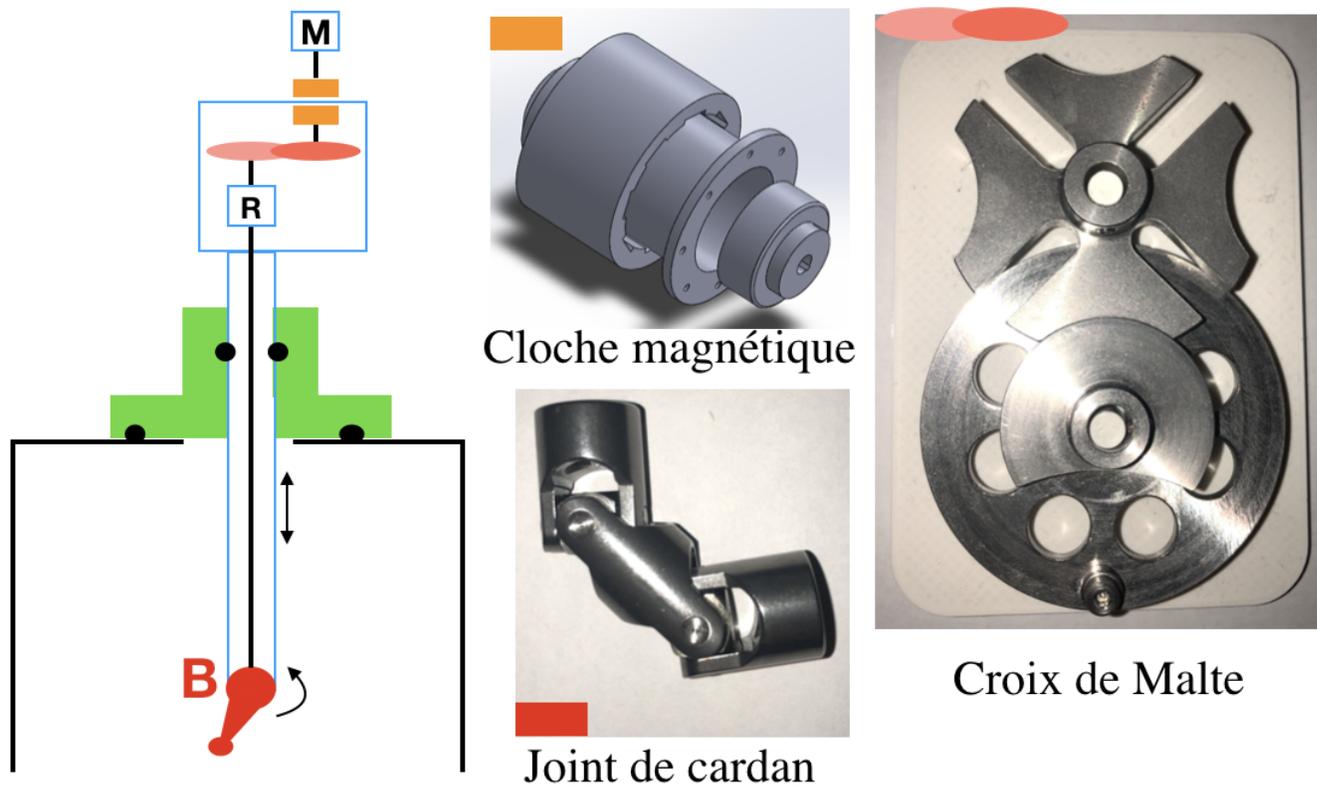


Figure 4.2 La ligne de transmission initiale. M réfère au moteur, qui est relié à la cloche magnétique puis à la croix de malte, ensuite à un réducteur qui, à travers un arbre, transmet la rotation au double joint de Cardan

4.4 Design de la sonde V2

Une fois la ligne de transmission et les mécanismes de mouvement choisis, la sonde doit être conçue en respectant les différentes contraintes géométriques et physiques citées dans le cahier des charges ci-dessus. La conception est effectuée sur SolidWorks afin de s'assurer des bonnes dimensions des pièces et du passage des fibres à l'intérieur de la sonde sans avoir un rayon de courbure trop grand surtout au niveau du pivot du bras.

4.4.1 Le bras rotatif B

La zone inférieure de la sonde se compose de deux parties : une partie fixe (en vert sur la figure 4.4) qui contient le double joint de cardan et l'arbre qui en sort, et une partie mobile qui est le bras rotatif (en gris dans la figure 4.4).

La partie fixe contient une rainure qui permet aux fibres de bouger sans être entravée dans

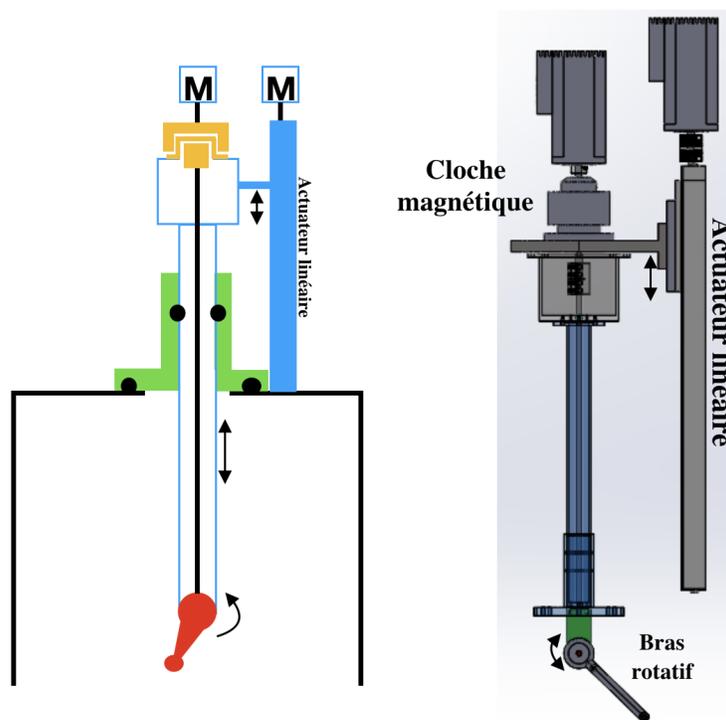


Figure 4.3 (À gauche) Schéma du mécanisme de fonctionnement de la sonde V2. (À droite) Dessin sur SolidWorks de la sonde V2. Image finale de la sonde à ajouter ici

leurs mouvements afin de ne pas affaiblir le signal de retour et de maintenir la courbure la plus petite possible pour les fibres, gage d'un bon signal. Le bras peut alors tourner de 180 degrés par rapport à la partie fixe sans que cela casse les fibres qui sont protégées par un thermorétractable. Le joint de cardan transmet le mouvement rotatif de la cloche magnétique. Il est relié au bras rotatif à travers un arbre en acier inoxydable. Une clavette empêche le mouvement de l'arbre par rapport au bras rotatif.

Pour permettre une meilleure stabilité du bras et une bonne répartition des efforts, deux pivots permettent de soutenir le bras rotatif sur la partie fixe. Pour faciliter le montage, le bras est coupé en deux parties : la plus grande des deux permet de passer les fibres et de s'accrocher à l'arbre du cardan. La plus petite permet de s'attacher au deuxième pivot à l'arrière de la partie fixe (voir Figure 4.4). Deux paliers lisses en PTFE permettent de réduire les pertes par frottement.

Afin d'éviter que le thermorétractable qui retient les fibres ne glisse vers l'avant, la grande partie du bras rotatif est à nouveau coupée en deux. Le cône du bras rotatif permet de fixer le thermorétractable et les fibres et assure qu'elles ne bougent pas par rapport à la sonde. Il permet également un montage plus facile de la sonde. Les cônes qui percent les bulles sont

logés dans l'extrémité de l'embout conique du bras rotatif.

La partie fixe de la sonde a été dimensionnée pour qu'elle puisse loger le joint de cardan et les fibres. Cependant, l'écoulement est perturbé à l'approche de cette partie de la sonde. C'est pour cette raison que l'embout conique a été conçu de la manière la plus allongée possible afin que les cônes des fibres soient très en amont de la sonde et les mesures ne soient pas erronées. La longueur de l'embout conique par rapport à la partie fixe est de 6 cm.

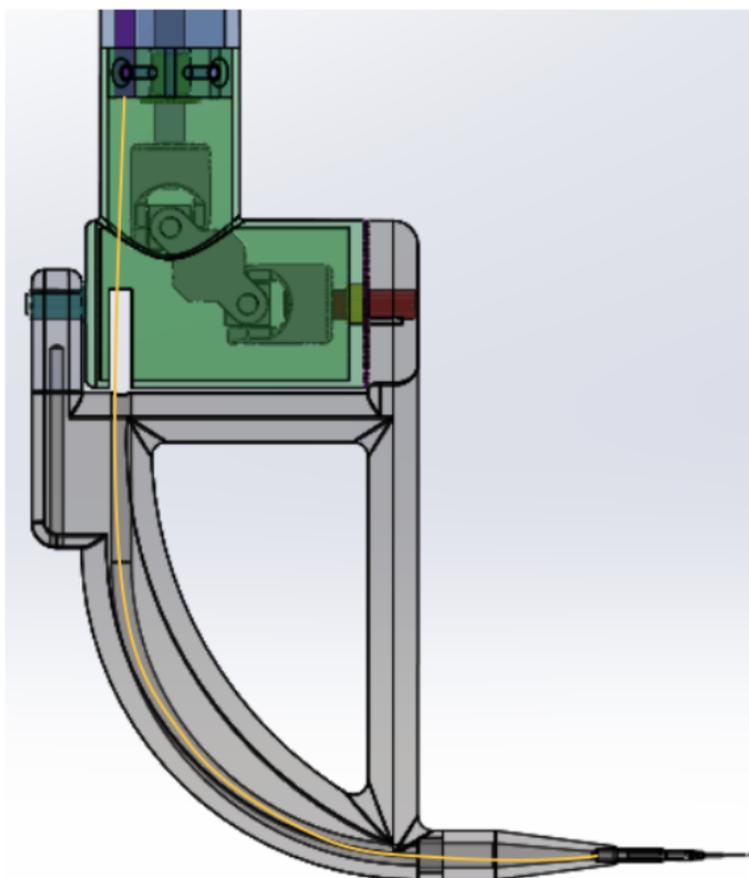


Figure 4.4 La partie inférieure de la sonde V2. Cette version est celle de la veine $25 \times 25 \text{cm}^2$. Elle est composée de 4 pièces différentes (l'embout conique, l'attache au pivot arrière, la chambre du cardan et le corps principal) en plus du joint de cardan

La plus grande partie du bras est celle qui est reliée à l'arbre du cardan. Elle contient un passage courbé pour les fibres afin de s'assurer qu'elles n'aient pas un rayon de courbure trop important. La partie où les fibres ne passent pas est évidée pour éviter d'avoir un coefficient de portance trop important qui rendrait le déplacement du bras plus compliqué dans l'écoulement.

La sonde V2 doit s'adapter à des veines de dimension variables. Pour minimiser les coûts,

seule la partie centrale du bras rotatif doit être changée quand la veine est différente. La longueur du bras rotatif doit être calculée pour chaque veine. En effet, le bras rotatif ne doit pas toucher les parois de la veine. De plus, la surface de mesure doit être optimisée. L'étude sur la longueur du bras de la sonde est présentée à l'annexe A. Étant donné que les veines ont des sections de dimension $15 \times 15 \text{ cm}^2$ et $25 \times 25 \text{ cm}^2$, les deux bras de la sonde V2 ont une longueur de 62 mm et 102 mm respectivement.

4.4.2 La partie inondée

La partie inondée est composée de deux parties comme le montre la figure 4.5 :

- Le tube de translation (bleu) qui abrite l'arbre rotatif reliant la cloche magnétique au double joint de cardan. Le thermorétractable protégeant les fibres passe également par ce tube. Afin de s'assurer que le thermorétractable ne s'emmêle avec l'arbre rotatif, un tube en acier inoxydable (dont les contours sont surlignés en bleu clair) permet de mener les fibres vers la deuxième partie inondée. De plus, l'arbre rotatif doit être guidé afin d'empêcher les jeux et le désaxement du joint de cardan. L'extrémité du tube est donc fermée et cinq trous y sont perforés (Figure 4.5). Celui du milieu correspond au passage de l'arbre rotatif. Un palier lisse en PTFE (en vert) est utilisé à ce niveau pour diminuer les frottements. Les trois petits trous servent à éviter une grande différence de pression entre le bas de la sonde et la partie inondée. Le dernier trou sert à fixer le tube de passage des fibres (en rose sur la figure 4.5.b).
- La chambre inondée supérieure (gris sombre) abrite un accouplement en acier inoxydable qui relie l'arbre du joint de cardan à celui de la cloche magnétique. Le bas de la chambre contient les mêmes trous que ceux du tube afin de permettre une meilleure fixation de l'arbre et du tube métallique. Le thermorétractable sort à ce niveau du tube et il doit avoir de la liberté de mouvement afin de permettre sa rotation au niveau de la partie verte de la figure 4.4.

Dans le premier design, ces deux parties (bleue et grise sur la figure 4.5) sont une seule pièce. Cependant, pour faciliter le montage, les deux parties ont été séparées. Le tube est fixé sur la chambre à l'aide de vis et l'étanchéité est assurée par un joint torique. La chambre inondée est fermée par un couvercle comportant deux trous (Figure 4.5.a) : le grand orifice permet de laisser passer la partie de la cloche magnétique qui sera immergée (figure 4.2). Autour de ce trou, une rainure permet de mettre un joint torique pour assurer l'étanchéité de la cloche magnétique. Le deuxième trou permet de sortir les fibres optiques qui seront ensuite reliées aux pinces (figure 3.5) puis au laser. Les fibres qui sont dans le thermorétractable passent dans un tube en acier inoxydable de 0.03 po de diamètre. Ce dernier est fixé dans le petit trou du couvercle. C'est donc ce tube métallique qui assure le passage des fibres de l'intérieur

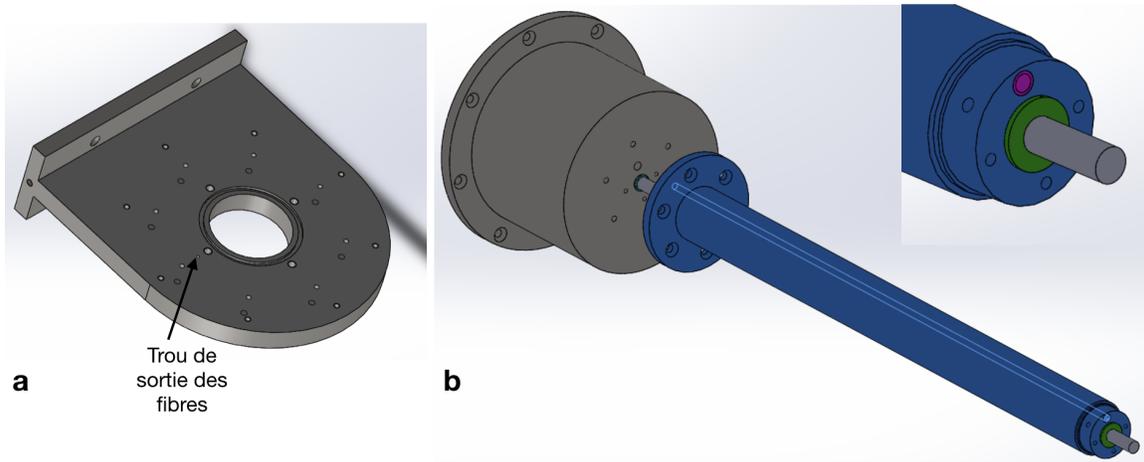


Figure 4.5 (a) Le couvercle de la partie inondée qui permet également de relier la sonde à l'actuateur linéaire. (b) La partie inondée de la sonde

de la sonde vers l'extérieur. L'étanchéité entre le tube métallique et le petit trou est réalisée à l'aide d'un point de colle Epoxy. Le couvercle contient également une partie qui permet d'accrocher la sonde au plateau mobile de l'actuateur linéaire.

4.4.3 Protection des fibres

Les fibres doivent être guidées de l'extrémité du bras (voir Figure 4.4) vers le haut de la sonde afin d'être reliées au Laser. Pour les protéger, elles sont glissées dans un tube thermorétractable (ZDS-L-065 de chez Zeus). De plus, pour faciliter le changement de fibres et les protéger des mouvements de la ligne de transmission mécanique, le thermorétractable est glissé dans un tube en acier inoxydable ayant un rayon interne de 3 mm et externe de 4 mm (contours bleu clair de la figure 4.5.b). Au niveau du bras, les fibres sont fixées en utilisant le même principe que celui de la sonde V1 (figure 3.12 [5]). Trois tubes en acier inoxydable sont encastrés les uns dans les autres et fixés à l'aide de la Loctite. Puis les trois tubes sont fixés dans le thermorétractable. Ensuite, les fibres, une fois passées dans la sonde, sont collées avec de la colle Epoxy au niveau du plus petit tube en métal afin d'éviter qu'elles ne bougent avec l'écoulement.

4.4.4 Les supports des moteurs

La dernière pièce à concevoir est le support des moteurs. Afin d'éviter des coûts supplémentaires, le support du moteur qui dirige la rotation est imprimé en plastique. Plusieurs essais ont été effectués avant de trouver les bons réglages des imprimantes 3D afin d'avoir des parois

solides résistantes au cisaillement. Le moteur assurant la translation est fixé sur l'actuateur linéaire.

4.4.5 Disposition de la sonde sur les veines

Pour la sonde V1, les mesures sont effectuées de manière désaxée puis la symétrie par rapport à l'axe Y permet de doubler la surface de mesure. Pour la sonde V2, étant donné les différentes contraintes, la décision a été de fixer la sonde sur l'axe central de la veine et de dimensionner le bras de manière à ce qu'il atteigne la plus grande surface possible.

Afin d'optimiser cette surface de mesure, la sonde V2 sera fixée sur le côté des veines. Il suffit de tourner les veines à 90 degrés vu qu'elles ont des sections carrées. (Figure 4.6)

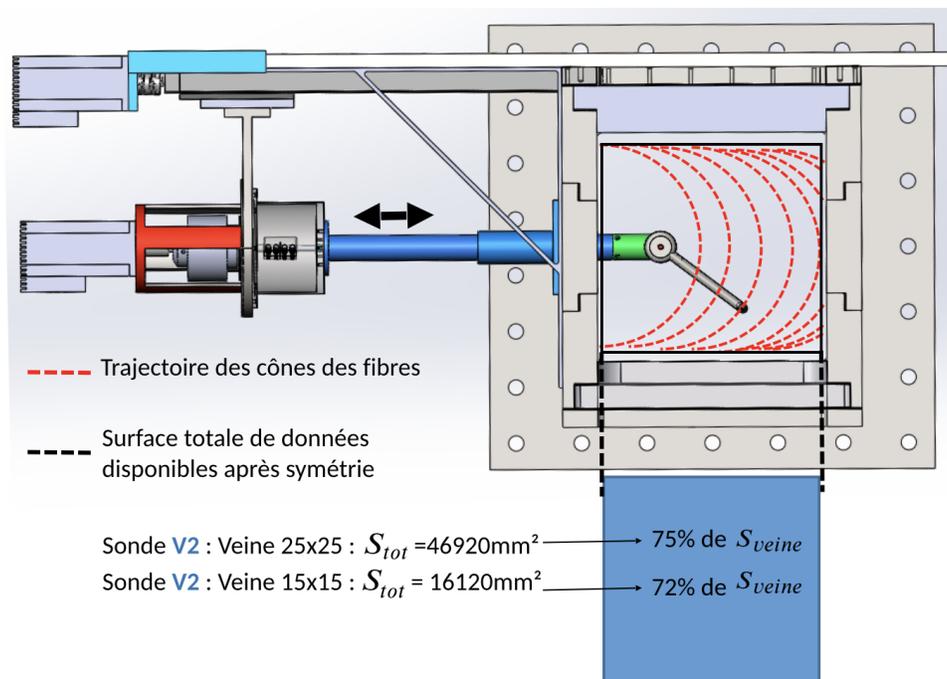


Figure 4.6 Schéma de la méthode de prise de mesure de la sonde V2. La surface encadrée en vert correspond aux données qui seront gardées puis symétrisées. La surface bleue est la surface de données après symétrie par rapport à Y

Cette disposition de la sonde sur la paroi latérale n'est pas possible pour la première veine où se fera l'injection. En effet, l'injection de l'air et l'orifice d'installation de la sonde sont sur des parois parallèles et l'injection doit forcément être sur le bas. De plus, il n'est pas possible de fixer la sonde sur les parois en Acrylique. Cependant, en supposant que le nuage sera aplati dans la première fenêtre de visualisation, cela ne pose pas de problème, car il n'y a que la partie inférieure de la veine qui est intéressante. Cette partie est la plus accessible

pour la sonde fixée sur le haut de la veine. La disposition des veines et de la sonde V2 est montrée sur la figure 4.7. Le calcul de la surface mesurée est expliqué dans l'annexe A.

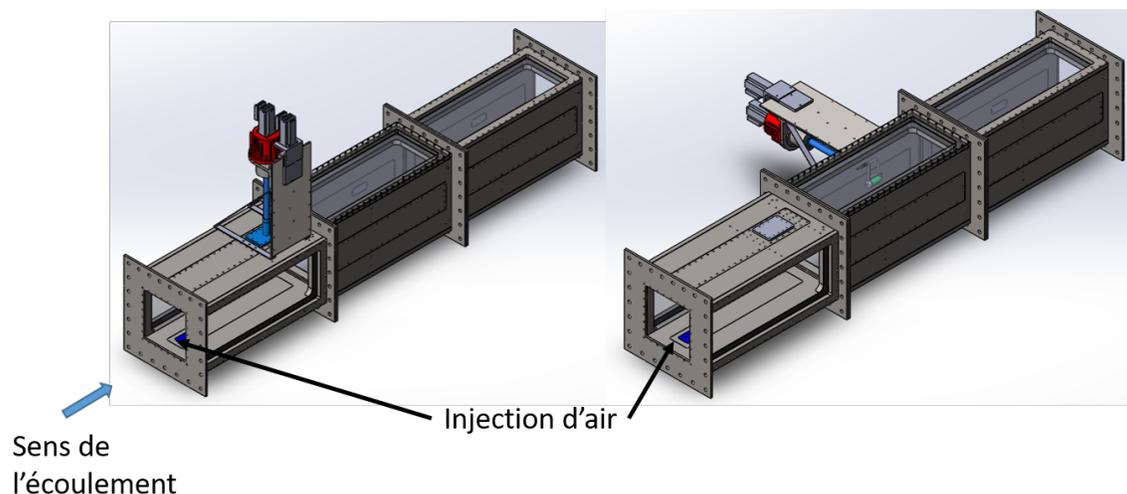


Figure 4.7 Dessin 3D de la sonde V2 et ses dispositions possibles sur les veines $25 \times 25 \text{ cm}^2$

4.5 Prototype et fabrication de la sonde V2

4.5.1 Le prototype de la sonde

Un prototype en plastique est construit afin de s'assurer que les contraintes géométriques sont respectées. Le prototype a été adapté pour être installé sur la veine $10 \times 17 \text{ cm}^2$ de la boucle à pression atmosphérique. Une visualisation du test en écoulement a permis de voir que le bras rotatif ne bouge pas dans l'écoulement.

4.5.2 Sonde V2 finale

Une fois que le prototype a permis de valider le concept, la sonde a été usinée en acier inoxydable. Tous les tubes utilisés sont des pièces standards de cédule 10 qui permettent de supporter une pression de plus de 5 bar. Le bras rotatif a également été modifié. En effet, l'impression 3D en acier inoxydable étant chère, le design de la figure 4.4 a été modifié pour être usinable. Le résultat est visible dans la figure 4.8.

Suite aux tests du mécanisme de rotation de la sonde, les frottements ont pu être localisés au niveau de la cloche magnétique. Pour résoudre ce problème et éviter toute perte de couple, une fine plaque de Téflon est ajoutée entre la cloche supérieur et le séparateur d'étanchéité. Tous les dessins 3D de la sonde V2 peuvent être retrouvés dans :

\\triton.meca.polymtl.ca\ed\usagers_projets-en-cours\ED006-Sonde v2\Sondes 25x25 et 15x15_inch_version finale.

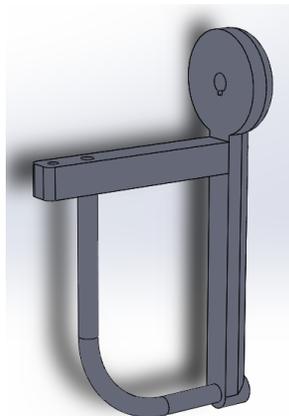


Figure 4.8 Conception du bras rotatif simplifiée



Figure 4.9 Photo de la sonde sans le système de translation

4.5.3 Emplacement de la sonde sur les veines.

Une fois la sonde V2 envoyée en fabrication, il faut déterminer les emplacements de fixation de la sonde sur la veine. Des trous de passage de la sonde doivent être réalisés dans trois des six plaques bouchons de la veine. Ces dernières sont interchangeables entre les 3 compartiments de la veine. C'est pour cela que chaque plaque a un trou de sonde à un endroit différent. Cela permet d'avoir plusieurs plans de mesures (figure 4.10) en fonction de la combinaison emplacement de la plaque dans la veine et sens de fixation de la plaque (voir Annexe B).

4.6 Automatisation de la sonde

Pour l'automatisation de la sonde, des moteurs pas-à-pas de National Instrument ont été choisis. La cloche magnétique a un couple maximal de 3 N.m. Afin d'éviter le glissement de

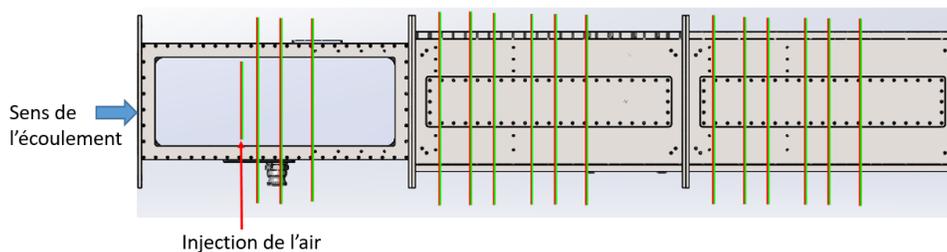


Figure 4.10 Schéma 3D de la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$ montrant les différents plans de mesures possibles avec les trois plaques bouchons disponibles

la cloche pendant la rotation du moteur, le modèle ISM-7413 est choisi. Il s'agit d'un moteur pas-à-pas à encodeur intégré avec un couple de 340 oz.in (2.4 N.m).

Les moteurs sont contrôlés à l'aide du logiciel LabView. Le code permettant le mouvement des moteurs et l'acquisition des données est rédigé par le technicien du laboratoire, Benedict Besner.

La sonde est fixée sur une paroi latérale de la sonde. Pour déterminer la position de la sonde dans la veine, le système de coordonnées suivant est adopté :

- la position Y selon l'axe horizontal correspond à la distance entre la paroi latérale de fixation de la sonde et le centre de rotation du bras rotatif (point vert sur la figure 4.11.a)
- la position θ correspond à l'angle entre la moitié inférieure de la paroi latérale sur laquelle la sonde est fixée et le bras rotatif (voir figure 4.11.a)

Tout d'abord, la sonde est fixée dans la position désirée, ensuite un bouton sur Labview permet de définir cette position de la sonde comme étant la position zéro.

Pour expliquer les étapes d'utilisation de la sonde dans les veines $15 \times 15 \text{ cm}^2$ et $25 \times 25 \text{ cm}^2$, la position zéro considérée est montrée sur la figure 4.11.a.

Deux modes de fonctionnements sont possibles :

- Un mode manuel : les moteurs permettent d'accéder à une position Y et θ voulue à partir de la position actuelle de la sonde. La position réelle (Y , θ) de la sonde est enregistrée et constamment affichée. Il est également possible de contrôler la vitesse des moteurs. La calibration permet de donner le nombre de pas du moteur par mm ou par degré.
- Un mode automatique : combinant le déplacement de la sonde et la prise de mesure. Il faut fixer le pas de déplacement horizontal ΔY et le pas de déplacement angulaire du bras $\Delta \theta$. Le programme a également besoin des positions maximales de déplacement

Y_{max} et θ_{max} . Pour les mesures, il faut donner la fréquence et le temps d'acquisition. Pour le nom du fichier, il faut remplir des cases sur le Labview. Il s'écrit alors sous la forme `Sonde-A1PEi-V=**-B=**-X=**-Y=**-teta=**-V*C**-aaaa-mm-jj`.

L'acquisition est lancée et le nom du fichier se met à jour au fur et à mesure que la sonde change de position. Le processus est le suivant : à partir de la position de départ, le bras bouge de 0 à θ_{max} en avançant de $\Delta\theta$. À chaque position, le signal est enregistré. Une fois que les informations à θ_{max} sont enregistrées, le bras retourne à la position $\theta=0$ puis la sonde avance horizontalement d'un pas de ΔY . La sonde continue à se déplacer et acquérir les données jusqu'à atteindre Y_{max} et θ_{max} .

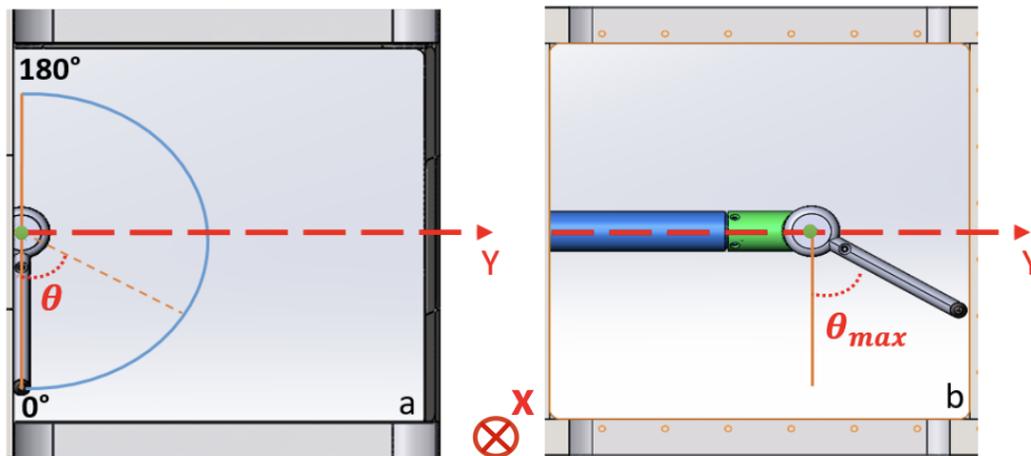


Figure 4.11 (a) Schéma de la position zéro de la sonde dans la veine. L'écoulement est dans le sens des x croissants. (b) Schéma de la position limite où il faut changer de θ_{max} pour ne pas taper la paroi latérale

À partir d'une certaine valeur de Y , le bras de la sonde ne peut plus avoir le même $\theta_{max}=180^\circ$, car il va taper contre la paroi latérale opposée (voir figure 4.11.b). Cette valeur de Y est calculée ainsi :

$$Y_{lim} = L - r - r_{c\acute{o}ne} - \epsilon - d_{s\acute{e}curit\acute{e}}$$

avec

- L la largeur de la veine, $L = 150$ ou 250 mm
- r la longueur du bras rotatif, $r = 62$ mm pour la veine 15×15 cm² et 102 mm pour la veine 25×25 cm²
- $r_{c\acute{o}ne} = 5$ mm
- $\epsilon = 6$ mm correspond à la distance entre la paroi de départ et le le bras rotatif quand il est en position zéro.
- $d_{s\acute{e}curit\acute{e}} = 2$ mm

Pour la veine $15 \times 15 \text{ cm}^2$, $Y_{lim} = 75 \text{ mm}$ et pour la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$, $Y_{lim} = 135 \text{ mm}$. Donc, pour $\mathbf{Y} \in [0, Y_{lim}]$, l'angle du bras rotatif peut aller de 0 à 180. Au-delà de Y_{lim} , il faut imposer un θ_{max} différent afin que le bras ne touche pas la paroi latérale. Un tableau Excel permet de calculer pour chaque \mathbf{Y} , le θ_{max} qu'il faut donner au programme en mode automatique.

La formule est la suivante :

$$\theta_{max} = \arcsin \left(\frac{L - \epsilon - \mathbf{Y} - r_{c\acute{o}ne} - d_{s\acute{e}curit\acute{e}}}{r} \right)$$

Une fois les mesures terminées, les fichiers sont transformés en format *.txt*. Ensuite, un code Matlab permet de transformer le titre des fichiers en utilisant une clé. Le titre obtenu est le suivant : Sonde-A1PEi-VB-XYT-V*C**-aaaammjj, où T correspond à θ .

Les valeurs de \mathbf{Y} et θ sont ensuite transformées en valeurs de positions réelles dans la veine en considérant que l'origine est le centre de la fente d'injection (Voir 3.14). X étant déjà une position réelle, les coordonnées réelles (y, z) des pointes des fibres sont calculés ainsi :

$$y = -\frac{L}{2} + \epsilon + \mathbf{Y} + r \sin \theta \quad z = \frac{L}{2} - r \cos \theta$$

CHAPITRE 5 RÉSULTATS

5.1 Boucle d'essais à pression atmosphérique

5.1.1 Pression

L'étude des pressions a été réalisée par Julien Bouvard [5] pour deux fentes en formes de chevrons. Pour la fente de référence, les résultats des mesures de pression sont présentées ci-dessous.

Pour chaque mesure, 120 secondes sont enregistrées à une fréquence d'acquisition de 2 kHz. La figure 3.3 montre les différents endroits où les pressions ont été mesurées. On peut ainsi obtenir les pertes de pression suivantes :

- $h = P_4 - P_2$, la perte de pression à l'injection, c'est-à-dire entre la chambre d'air et l'injection.
- $h_1 = P_1 - P_2$, la perte de pression entre l'amont de la veine et l'injection.
- $h_2 = P_1 - P_3$, la perte de pression entre l'amont et l'aval de la veine.

La figure 5.1 montre les résultats pour la fente de référence avec et sans eau.

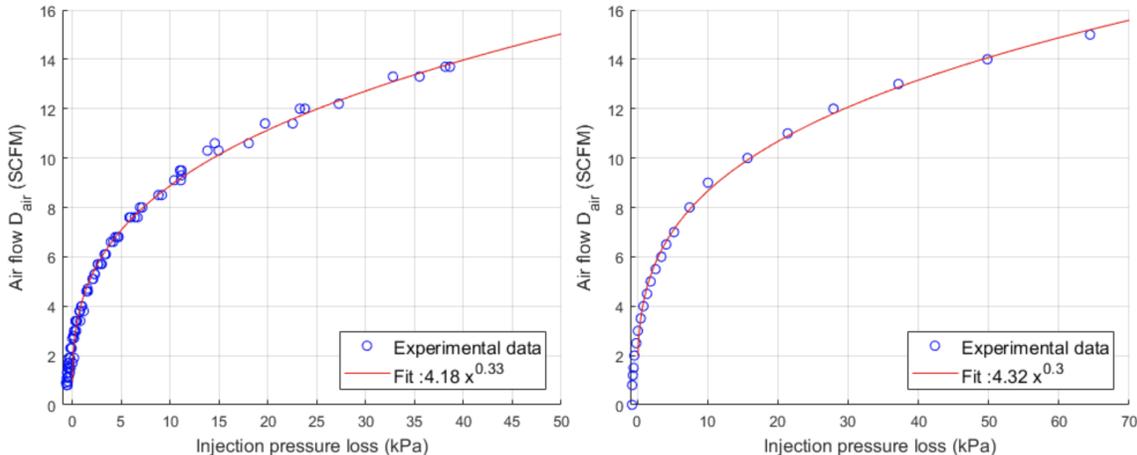


Figure 5.1 Le débit d'air injecté en fonction de la perte de pression h . (À gauche) Injection air dans eau. (À droite) Injection air dans air

Les principales conclusions sont les suivantes :

- L'augmentation du débit d'air injecté entraîne l'augmentation de la perte de pression h qui atteint 40 kPa pour les débits d'air les plus élevés.
- En traçant les débits d'air en fonction de la perte de pression h ou h_1 , il est possible de tracer une courbe en $\alpha x^{\frac{1}{3}}$ avec α un coefficient qui dépendrait de la géométrie de

la fente d'injection. Cette relation ne dépend pas de l'écoulement diphasique, car elle est également présente dans le cas d'injection air dans air, c'est-à-dire sans mettre d'eau dans la veine. Cette relation est difficile à expliquer, car, pour les fluides en contraction puis en expansion soudaine, la perte de pression est proportionnelle au carré de la vitesse [41]. L'air dans la fente est compressible, c'est donc un problème à résoudre numériquement, car les équations sont non-linéaires.

- La perte de pression h_2 est de l'ordre de 1 kPa pour les grands débits d'air et présente une relation linéaire avec le débit d'air injecté.
- Les deux fentes double chevrons présentent un coefficient de perte de pression α légèrement plus élevé que celui de la fente de référence [5].
- Les tubes de Pitot permettent de mesurer la vitesse de l'écoulement. Suite à l'ajout du convergent en aval de la veine (voir figure 3.1), le seuil d'apparition de la poche d'air a baissé. La vitesse de l'écoulement en aval est plus grande que celle en amont. L'écoulement est considéré comme incompressible dans la veine. La conservation de la masse implique la conservation du débit volumique. Donc l'augmentation du débit d'air signifie une diminution de la surface de l'eau dans la section ; et donc une augmentation de la vitesse de l'écoulement.

Les mesures de pression dans la veine sont également effectuées pour la triple fente. Le débit d'air injecté en fonction de la perte de pression est montré sur la figure 5.2.

La courbe de perte de pression semble respecter une loi en racine cubique également. De plus, pour un même débit d'air, la perte de pression est plus petite pour la triple fente comparée à la fente de référence.

5.1.2 Mesures de la sonde optique V1

Pour la boucle hydraulique à pression atmosphérique, les fentes simple et triple (figure 3.2) sont testées pour les conditions présentées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 Les valeurs des paramètres de fonctionnement de la boucle hydraulique

U_L (m/s)	β	Q_L (L/s)	Q_G (SCFM)
1.25	3%	20.6	1.3
1.25	9%	19.3	4

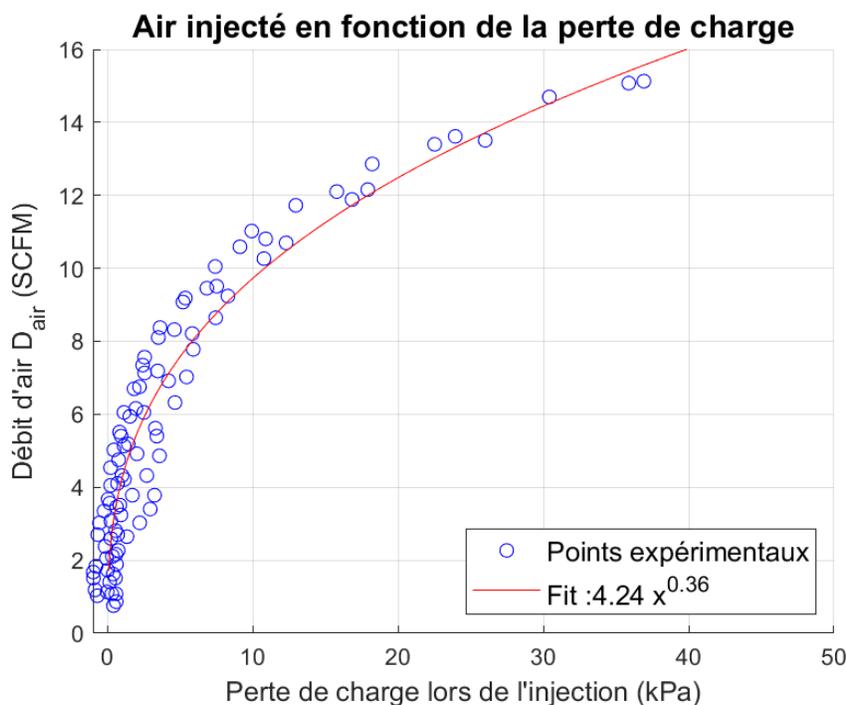


Figure 5.2 Le débit d'air injecté en fonction de la perte de pression entre la chambre d'air et l'injection dans de l'eau à travers la triple fente

Tailles des bulles

La distribution des tailles de bulles suit une loi log-normale comme le montre J.Bouvard [5]. Cela a bien été vérifié avec de nouvelles expériences. La figure 5.3 montre la taille moyenne selon la hauteur Z dans la veine pour la fente de référence et la fente triple dans le plan $X = 206$ mm à un titre volumique de 0.09. Pour les autres conditions d'écoulement et plans de mesures, les résultats sont affichés sur les figures C.1 et C.2 de l'annexe C. En moyenne, les bulles ont des tailles entre 5 et 45 mm.

La ligne rouge correspond à la moyenne des tailles de bulles. Dans chaque cas, la courbe des tailles moyennes est extraite. La pente de celle-ci est calculée et la fonction correspondante est tracée dans deux graphes selon la fente utilisée. Le résultat apparaît sur la figure 5.4. La première remarque est que les courbes de tailles moyennes sont stratifiées. En effet, pour un type de fente et pour un titre volumique β , les pentes des courbes sont semblables.

Pour une même position Z , la taille moyenne des bulles est plus grande pour $\beta=0.09$ que pour $\beta=0.03$. Cela s'explique par le fait qu'il y a plus d'air injecté pour un plus grand β . Plus Z augmente, plus la taille moyenne des bulles augmente. Les bulles les plus grosses se trouvent dans la partie supérieure du nuage. Elles s'élèvent plus rapidement, car le ratio traînée/force

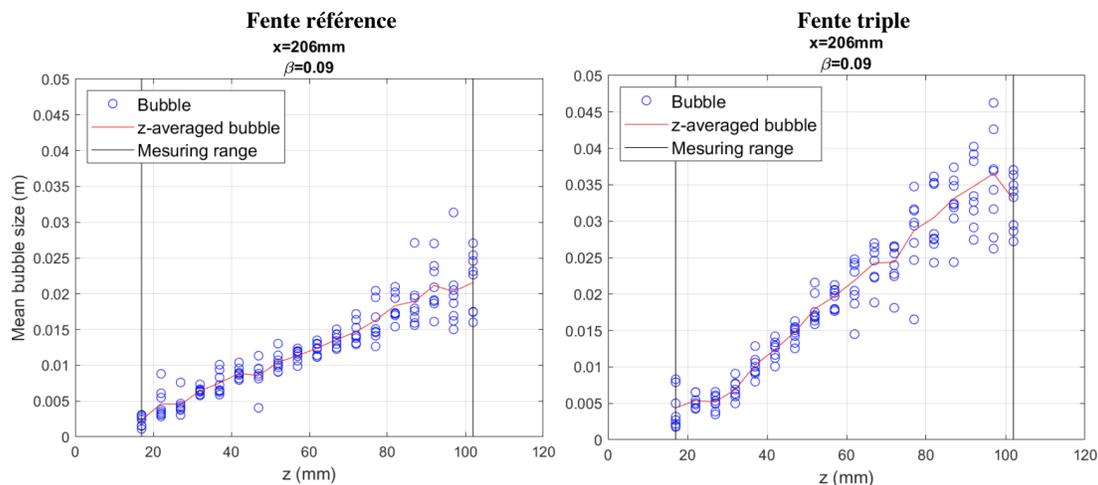


Figure 5.3 Les tailles des bulles en fonction de la hauteur Z dans la veine. La ligne rouge correspond à la moyenne des valeurs. Les lignes noires verticales correspondent aux limites de prise de mesure

d'Archimède est plus faible que pour les petites bulles. En effet, la traînée est proportionnelle au rayon au carré et la force d'Archimède au rayon au cube.

En s'éloignant de la fente, la taille moyenne mesurée dans le bas du nuage diminue. Plus la distance à la fente augmente, plus les bulles sont petites. Elles se cassent peut-être sous l'effet du jet d'eau ou s'aplatissent à cause de la pression hydrostatique ambiante sur la surface des bulles.

De plus, en se déplaçant dans le sens de l'écoulement, la position du haut du nuage augmente selon Z. Cependant, l'ascension du bas du nuage est plus faible que celle du haut du nuage avec le temps. C'est une des raisons qui explique que l'épaisseur du nuage augmente dans le sens de l'écoulement. Dans le cas $\beta=0.09$, les valeurs de la taille moyenne près de $Z = 102$ mm augmentent du plan $X=100$ mm au plan suivant puis diminuent du plan intermédiaire au plan $X= 206$ mm. Cette diminution est due au fait que les bulles au-dessus de $Z = 102$ mm ne sont pas prises en mesure à cause des limites de déplacement de la sonde V1. Dans le dernier plan $X = 206$ mm, une partie du nuage, et surtout des grosses bulles, est au-delà de $Z=102$ mm. C'est donc pour cela que la moyenne des bulles à $Z = 102$ mm est plus petite dans le dernier plan par rapport au deuxième plan.

Les bulles sont plus grosses en moyenne pour les expériences de la fente triple. En effet, la taille moyenne, que ce soit pour les petites ou les grosses bulles, est plus grande que dans l'expérience de la fente de référence.

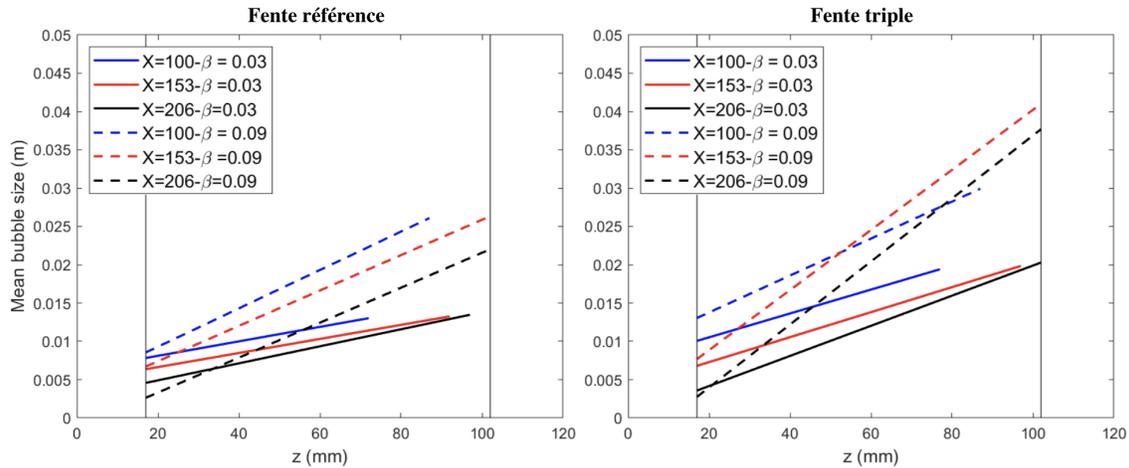


Figure 5.4 L'évolution de la pente de la moyenne des tailles de bulles en fonction de la hauteur Z dans la veine pour les deux types de fentes et les différentes conditions

Vitesse horizontale des bulles

La figure 5.5 représente la distribution de la vitesse ainsi que la taille des bulles en fonction de la vitesse de celles-ci. La vitesse des bulles a une distribution log-normale. Pour la fente triple, la distribution de vitesse est plus étalée.

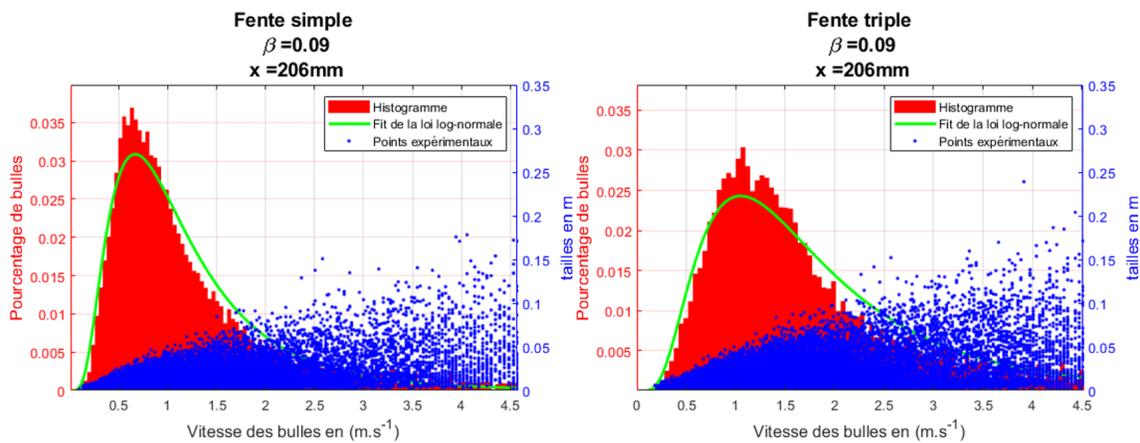


Figure 5.5 Distribution de la vitesse des bulles et tailles des bulles en mètre en fonction de leur vitesse en m/s pour la fente simple et triple à $\beta=0.09$ dans le plan $X=206\text{mm}$

La figure 5.6 montre la vitesse moyenne des bulles en fonction de leurs tailles pour la fente de référence et la fente triple dans le plan $X = 206\text{ mm}$ à un titre volumique de 0.09. Pour les autres plans de mesure et conditions d'écoulement, les résultats sont montrés sur les figures C.3 et C.4 de l'annexe C. La ligne verte correspond à la moyenne glissante par rapport aux tailles des bulles et les lignes rouges représentent l'écart-type par rapport à la valeur moyenne

de la vitesse. Elles s'arrêtent à une taille de 4 cm pour $\beta=0.09$ et 2 cm pour $\beta=0.03$ car le nombre de bulles au-delà de ces tailles est faible et statistiquement non fiable. Le calcul de

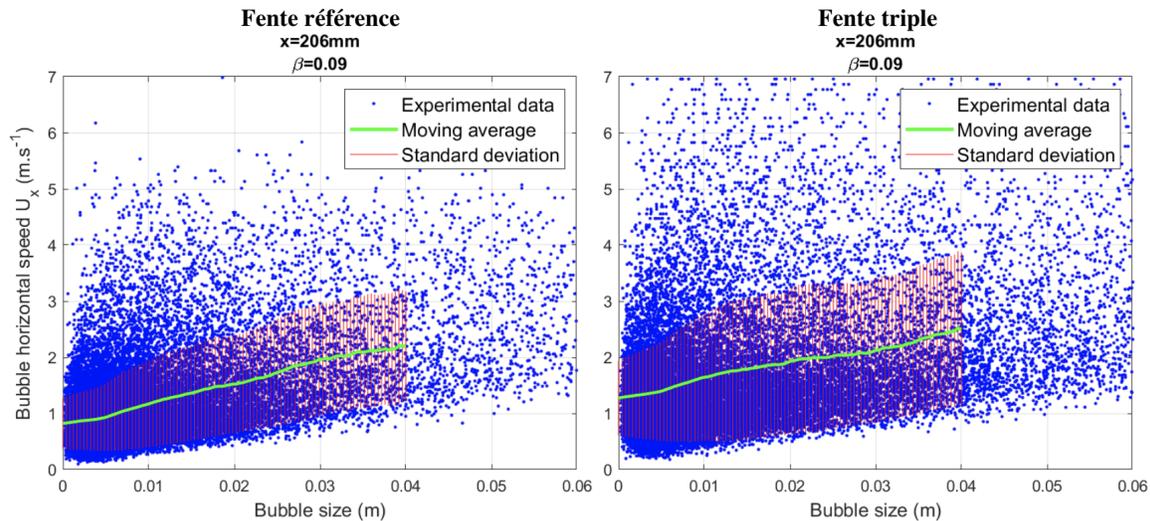


Figure 5.6 La vitesse des bulles en fonction de leurs tailles. La ligne verte correspond à la moyenne glissante des vitesses et les lignes rouges à l'écart-type par rapport à la moyenne

la vitesse moyenne des bulles pour chaque plan donne les valeurs suivantes pour la fente de référence : pour $\beta=0.03$, $U_{moy} = 1.38, 1.50, 1.52$ m/s pour les plans $X=100, 153, 206$ mm respectivement ; et pour $\beta=0.09$, $U_{moy} = 1.47, 1.48, 1.54$ m/s pour les plans $X=100, 153, 206$ mm respectivement. La vitesse de l'écoulement est de 1.25 m/s. Les rapports de vitesse des bulles par rapport à la vitesse de l'écoulement sont les suivants :

U_{moy}/U_L	X=100 mm	X=153 mm	X=206 mm
$\beta = 0.03$	1.10	1.20	1.21
$\beta = 0.09$	1.17	1.18	1.23

Les bulles accélèrent d'un plan à l'autre dans le sens de l'écoulement à cause de la différence de pression entre l'amont et l'aval de la veine. Cette différence de pression est due à la combinaison de deux effets : l'injection d'air provoque une constriction de l'aire de passage pour l'eau. Ce dernier accélère et par Bernoulli, la pression en aval chute. De plus, il y a une perte de pression le long du nuage qui crée un autre gradient de pression entre l'avant et l'arrière de la bulle (dans le sens de l'écoulement). Cela exerce une force supplémentaire qui l'accélère.

Plus de bulles sont détectées dans le cas $\beta=0.09$ (plus de 22000 bulles) que pour $\beta=0.03$ (plus de 8000 bulles), ce qui semble logique à première vue étant donné qu'il y a plus d'air

injecté. Il y a également plus de bulles détectées pour l'expérience de la fente triple.

Les différentes courbes de moyenne glissante des vitesses en fonction de la taille sont extraites et tracées sur différents graphes en fonction du type de fente. Le résultat est visible sur la figure 5.7. En moyenne, les bulles ont une vitesse entre 0.7 et 2.5 m/s pour des tailles entre 625 μm et 40 mm.

De manière générale, la vitesse horizontale des bulles augmente lorsque la taille des bulles augmente. Donc, les grosses bulles vont plus vite que les petites. Cela s'explique par la trainée et la poussée subies par les bulles. En effet, la poussée est proportionnelle au volume (r^3) et la trainée est proportionnelle à la surface (r^2). La résultante est plus grande dans la direction de la poussée quand le rayon croit.

Pour la fente simple, les bulles de taille inférieure à 0.0025 m vont à une vitesse horizontale entre 0.7 et 0.85 m/s. À partir de $d = 2.5$ mm, la vitesse des bulles augmente de façon quasi linéaire avec la taille des bulles. Les pentes p sont définies ainsi : $p = \frac{\Delta U_x}{\Delta D_{bulle}}$.

Les pentes pour un même β sont semblables. En effet, pour la fente de référence, pour $\beta=0.03$, $p = 99.66 \pm 16 \%$ et pour $\beta = 0.09$, $p = 39.57 \pm 19 \%$. Pour la fente triple, pour $\beta=0.03$, $p = 70.06 \pm 14 \%$ et pour $\beta = 0.09$, $p = 30.26 \pm 18 \%$.

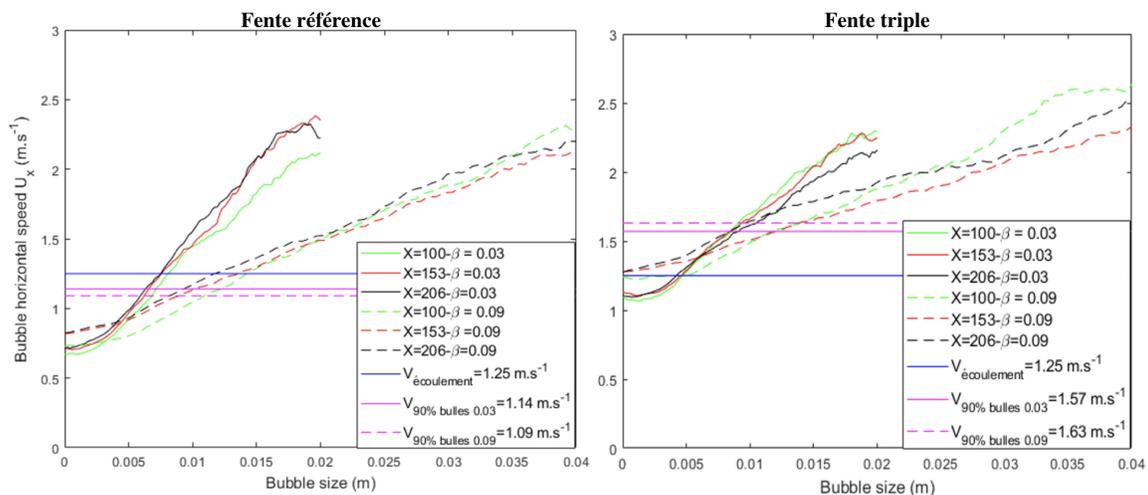


Figure 5.7 L'évolution de la moyenne glissante des vitesses des bulles en fonction de leurs tailles pour les deux fentes testées et pour différentes conditions

Pour les bulles de taille inférieure à 5 mm, la vitesse moyenne des bulles est plus petite dans le cas $\beta = 0.03$ comparé au cas $\beta=0.09$. En effet, lorsque le titre de l'écoulement augmente, le débit d'air augmente et donc le nuage crée une plus grande obstruction près de la fente. Le gradient de pression résultant est plus grand que pour un faible titre volumique. Il crée une poussée qui entraîne les petites bulles plus vite que dans le cas $\beta=0.03$.

Les pentes des courbes moyennes dans le cas $\beta=0.03$ sont plus grandes que dans le cas $\beta = 0.09$. Cela est dû au fait que le spectre des tailles de bulles pour un grand titre volumique est plus étendu. De plus, les bulles de tailles moyennes maximales (0.02 m et 0.04 m respectivement) pour $\beta= 0.03$ et 0.09 arrivent à des valeurs de vitesse horizontale d'à peu près 2.5 m/s. Ce qui pousse à se demander si les bulles atteignent une vitesse terminale à partir d'un certain emplacement dans l'écoulement. La longueur de la veine ne permet pas de prendre des mesures dans des plans plus éloignés.

Les bulles générées par la triple fente sont plus rapides en moyenne que celles de la fente de référence. En effet, les courbes roses indiquent la valeur de la vitesse moyenne de 90% des bulles détectées. Pour la fente de référence, cette vitesse est en dessous de la vitesse de l'écoulement en amont de l'injection $U_L= 1.25$ m/s, alors que celle de la fente triple dépasse cette valeur. Cela peut s'expliquer par le fait que les bulles de la triple fente sont plus grosses et plus rapides.

Taux de vide

La figure 5.8 présente deux cartographies du taux de vide local dans le plan $X = 206$ mm pour un titre volumique de $\beta = 0.09$ pour deux fentes étudiées. Les figures pour les autres plans et conditions sont visibles sur les figures C.5 et C.6. Les mesures de taux de vide à la sonde optique sont prises pour Y entre -20 mm et 5mm. Ensuite, les résultats sont symétrisés par rapport à la ligne centrale de la veine $Y = 0$ mm. La symétrie par rapport à l'axe Z n'est pas possible à cause des effets de la gravité et de la force d'Archimède.

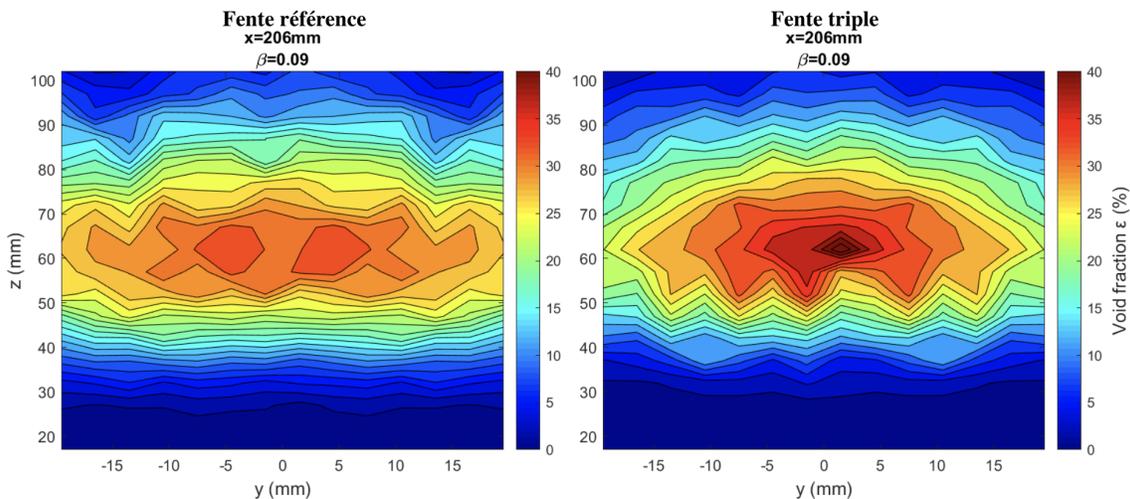


Figure 5.8 La carte du taux de vide local dans la veine 10×17 cm

Le nuage s'élargit en s'éloignant de la fente d'injection. Le maximum de taux de vide se déplace vers des valeurs de Z plus élevées (Tableau 5.2) à cause de la poussée d'Archimède et l'orientation de la vitesse d'injection qui est verticale. De plus, en s'éloignant de l'injection, les grosses bulles vont vers le haut de l'écoulement. Le taux de vide local diminue au fur et à mesure que les bulles s'éloignent de la fente d'injection. Cela est dû à la conservation du débit d'air. En effet, le débit d'air dans deux sections 1 et 2 différentes de la veine s'écrit : $Q_1 = S \times \varepsilon_1 \times V_1$ et $Q_2 = S \times \varepsilon_2 \times V_2$. La conservation du débit d'air entraîne que $\varepsilon_1 \times V_1 = \varepsilon_2 \times V_2$. La vitesse des bulles augmente en s'éloignant de l'injection. Cela est dû à la perte de pression entre l'amont et l'aval de la veine. En effet, en aval de l'injection, la pression est moins élevée donc les bulles accélèrent. On a alors, $V_2 > V_1$, ce qui donne $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$.

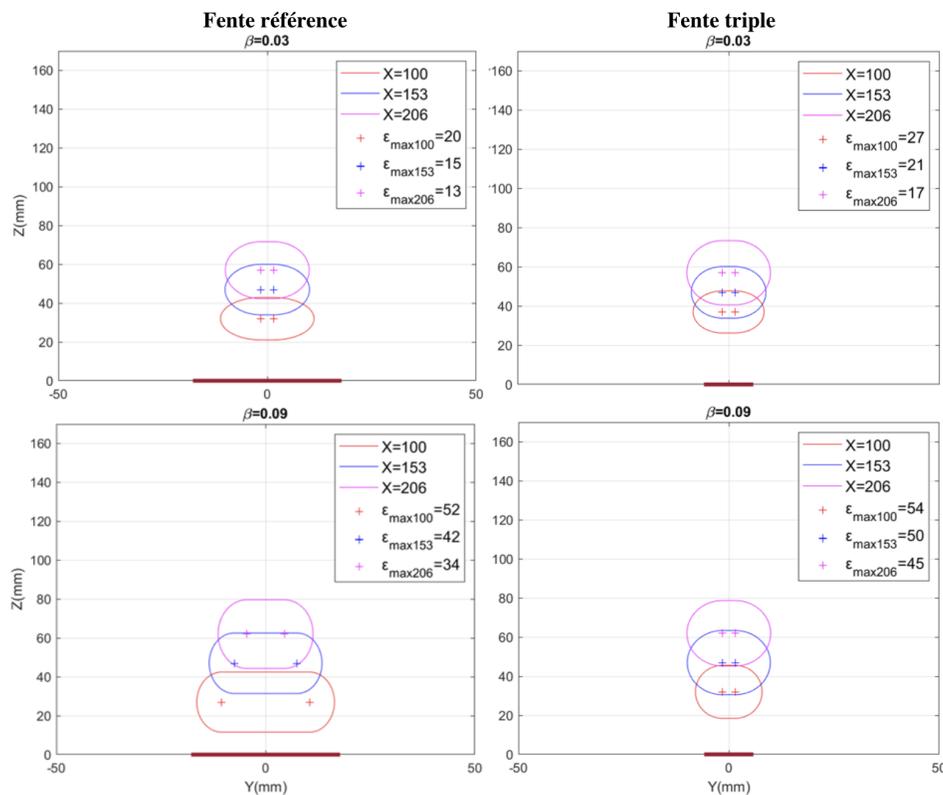


Figure 5.9 Distribution du taux de vide par rapport au maximum. Les étapes pour extraire ces données sont expliqués en Annexe D

Afin de pouvoir comparer les nuages de bulles et caractériser le taux de vide, les graphes de la figure 5.9 sont tracés. Ils représentent la distribution du taux de vide par rapport à la valeur maximale pour chaque cas en fonction des positions Z et Y . Le processus pour réaliser ces graphes est expliqué en annexe D. Les valeurs du taux de vide local pour un $\beta=0.03$ sont plus faibles que pour $\beta=0.09$ car le débit d'air injecté est plus faible. De plus, le nuage a un

taux de vide plus étalé en largeur pour un grand titre volumique.

Concernant la hauteur de l'étalement du taux de vide, les positions du maximum de ε sont plus grandes pour $\beta=0.09$ pour les deux derniers plans (Tableau 5.2). Pour le plan $X = 100$ mm, la position du taux de vide est $z = 32$ mm pour $\beta = 0.03$ et $z = 27$ mm pour $\beta = 0.09$. Le nuage est moins haut pour $\beta=0.09$ à cause de la séparation plus tardive entre le nuage et la paroi inférieure dans ce cas. Cela correspond bien aux observations visuelles lors des expériences.

Tableau 5.2 Les valeurs de Z correspondant au maximum de taux de vide par plan

$Z_{\varepsilon_{max}}$ (mm)	Fente de référence			Fente triple		
Plan X	100	153	206	100	153	206
$\beta = 0.03$	32	47	57	37	47	57
$\beta = 0.09$	27	47	62	32	47	62

Pour la fente triple, les valeurs du taux de vide local sont plus grandes que celles de la fente de référence, car les bulles générées sont plus grosses. Le nuage de bulle paraît plus étroit pour l'expérience de la fente triple, car elle est moins large que la fente simple.

Les points en forme de + au centre des ellipses de la figure 5.9 correspondent aux positions de maximum du taux de vide local. En hauteur, la distance ΔZ entre le premier et le deuxième plan des points + est plus grande que celle entre le deuxième et le troisième plan. C'est-à-dire que pour une même distance inter-plan, les bulles parcourent moins de distance en hauteur entre les deux derniers plans. Donc la vitesse verticale du nuage diminue en avançant dans l'écoulement.

Les ellipses de distribution dans le plan $X = 100$ mm dans le cas de la fente de référence sont moins hautes que celles dans le cas de la fente triple. Cela est dû aux tailles de bulles plus grandes pour la triple fente ce qui implique qu'elles montent plus vite en altitude. Cependant, l'ellipse de distribution dans le plan $X=206$ mm est très semblable dans les quatre cas même si la géométrie et les conditions d'écoulement sont différentes. En effet, le nuage semble avoir une même position du maximum de taux de vide ainsi qu'une même distribution. Le taux de vide ne peut se diffuser infiniment. Cette observation permet de poser la question suivante : existe-t-il une distribution finale pour le taux de vide, et si oui, à partir de quelle distance par rapport à l'injection est-elle atteinte ?

5.1.3 Visualisation et Krigeage

Le Krigeage est une méthode d'interpolation applicable en 1D, 2D et 3D. Elle permet, à partir de N points de mesure, de construire une fonction interpolée qui reconstruit le comportement

général du phénomène étudié. La théorie du Krigage est expliquée plus en détail dans le cours MEC6310 de F.Trochu [37].

Dans cette étude, l'objectif du Krigage est d'obtenir une cartographie 3D du taux de vide local dans toute la veine d'essais à partir de N points de mesure. La méthode peut être appliquée aux données de vitesses et tailles des bulles, cependant le taux de vide est plus facile à exploiter visuellement. L'étude est effectuée pour la fente de référence à $\beta=0.09$. Le code développé en collaboration avec Grégoire Recchia ainsi que les différents paramètres sont expliqués en détail dans son mémoire [38]. Les points de mesure utilisés pour le Krigage géométrique sont ceux de la figure C.5 pour $\beta=0.09$. Des conditions limites aux parois latérales de la veine sont fixées à un taux de vide nul, et le plan de la fente est considéré comme une donnée avec un taux de vide de $\varepsilon=1$ au niveau de la fente d'injection et $\varepsilon=0$ ailleurs. Les résultats des trois plans dans toute la section d'essais reconstitués après le krigage sont visibles sur les figures 5.2 [38]. Le plan $Y=0$, parallèle à la direction de l'écoulement, est tracé pour représenter l'évolution du taux de vide dans le sens de l'écoulement. Le résultat est visible dans la figure 5.10.

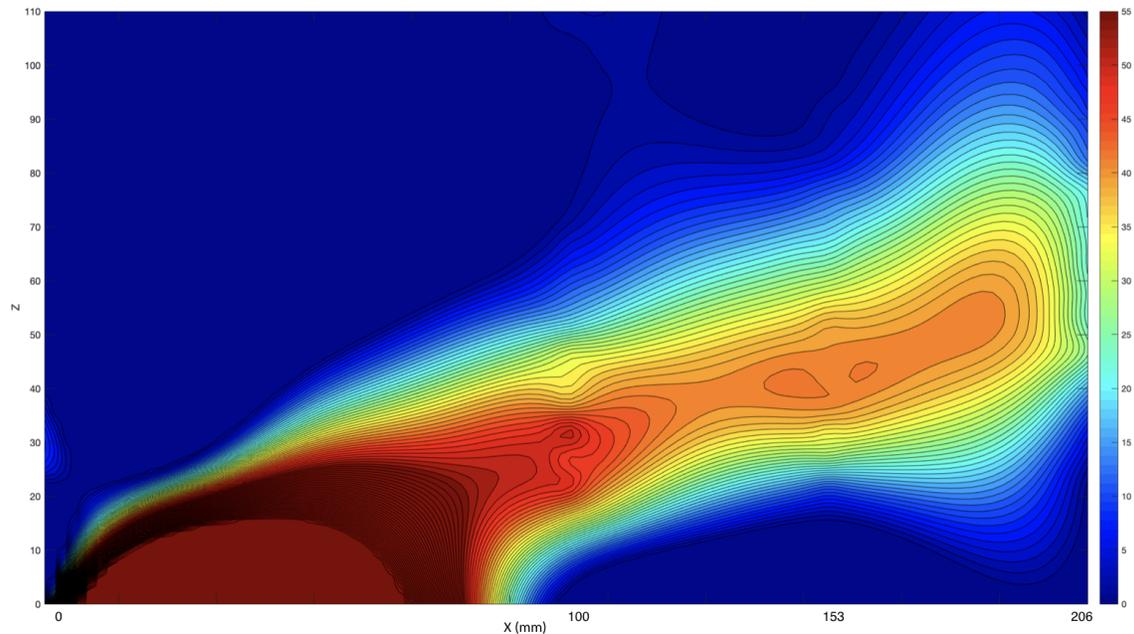


Figure 5.10 Vue du plan $Y=0$ du taux de vide après application du code de Krigage pour les données de la sonde

Dans le plan milieu de la veine d'essai, le Krigage respecte la physique de l'écoulement. C'est-à-dire que le taux de vide est continu, il diminue au fur et à mesure qu'il s'éloigne de la fente et le nuage se diffuse et devient plus épais. Cependant, le manque de points de mesures

entre le plan de la fente et le premier plan de mesure affecte les résultats du krigeage entre ces deux plans.

L'idée proposée est de compléter les mesures de la sonde par des images du nuage de bulle. Pour cela, il faut relier les données de taux de vide des images au taux de vide capté par la sonde. Les réglages pour les prises de vidéos sont expliqués dans la section 3.1.1 Visualisation de l'écoulement et méthode du Krigeage. L'image qui résulte de la prise de vidéo correspond à la moyenne des taux de gris pour chaque pixel pour une série d'images. (Voir figure 3.11). Par la suite, il faut retrouver les pixels dans l'image moyennée qui correspondent aux plans de prise de mesure de la sonde, c'est-à-dire $X= 100, 153$ et 206 mm. Il est très difficile de relier ces trois plans à leurs valeurs en pixel, ce qui représente une grande source d'incertitude.

Pour les résultats de la sonde, pour chaque valeur de Z , la hauteur dans la veine, la valeur maximale du taux de vide est extraite. Dans l'image moyennée, les taux de gris pour chaque colonne de pixel correspondant à un plan X sont extraits. La figure 5.11 représente la hauteur Z dans la veine en fonction des valeurs du maximum de taux de vide et des valeurs de taux de gris de l'image pour chaque plan X . Les croix rouges correspondent aux valeurs de taux de gris pour chaque valeur de Z . Les carrés bleus correspondent aux valeurs des maximums de taux de vide obtenus à l'aide de la sonde. La ligne noire représente les valeurs de taux de vide obtenus à l'aide du Krigeage. La courbe de Krigeage et les points de mesures sont nécessairement confondus puisque ces derniers sont des points de contrôle du Krigeage.

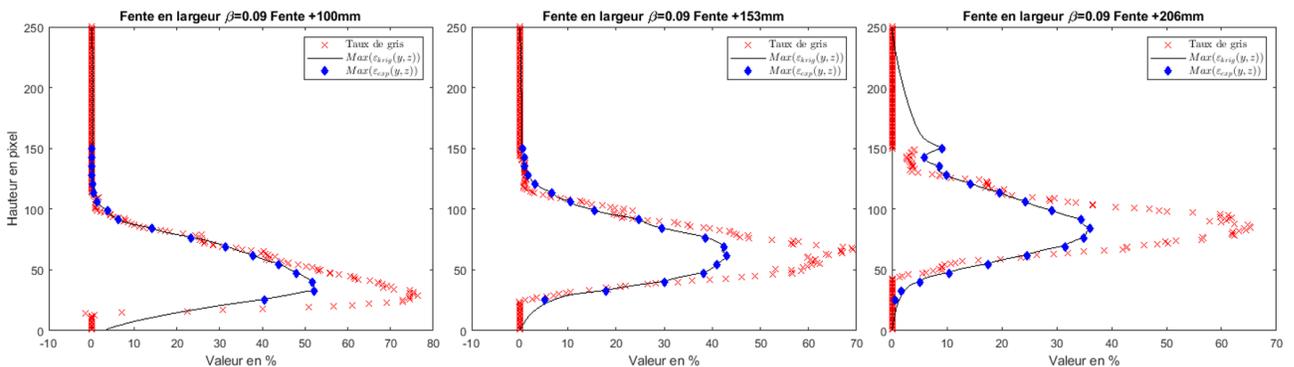


Figure 5.11 La hauteur Z dans la veine en pixel en fonction de la valeur du taux de gris et taux de vide en pourcentage

Le taux de gris de l'image moyennée et le taux de vide ont la même courbe à un coefficient multiplicatif près. Cela veut dire qu'il est possible de relier le taux de gris des images au taux de vide et donc d'avoir plus de données à injecter dans le code de Krigeage sans prendre de mesure à l'aide de la sonde optique.

Les résultats de la figure 5.11 sont obtenus à partir d'une série d'images avec des réglages non optimisés. Suite aux nouveaux réglages proposés par L.Dutheil [39] à partir de l'étude de convergence, une nouvelle série d'images est traitée pour obtenir des résultats avec moins d'erreurs. Les mêmes étapes sont respectées et le coefficient multiplicatif est appliqué par la suite. Le résultat est visible sur la figure 5.12.

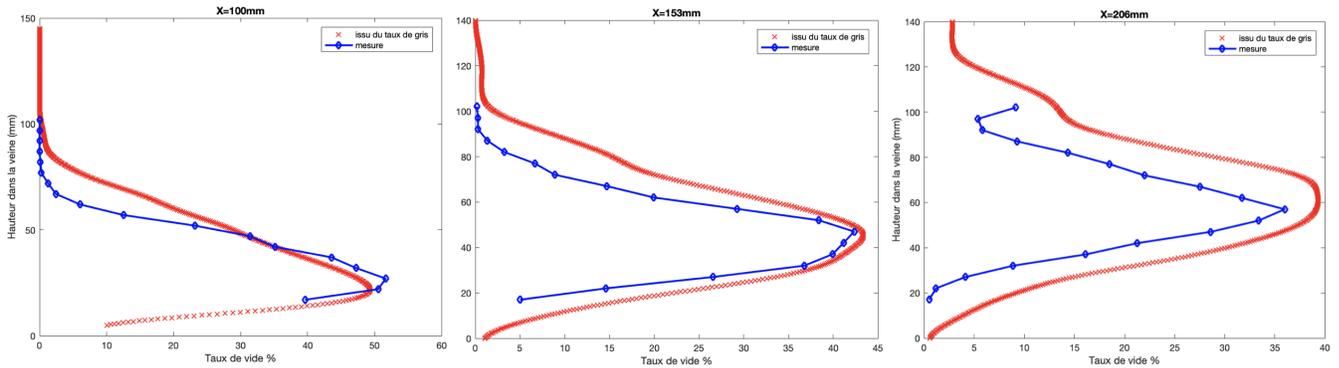


Figure 5.12 La valeur du taux de vide et du taux de gris divisé par le coefficient en fonction de la hauteur Z dans la veine

Les résultats de taux de gris corrigés à l'aide du coefficient multiplicatif sont en bon accord par rapport aux résultats de taux de vide mesurés sauf au niveau des faibles valeurs de taux de vide. Cela est dû aux erreurs de positionnement et à la non uniformité des distances vue par la caméra. Par exemple, si un plan est situé à la limite du champ de vision de la caméra, l'effet d'angle augmente l'erreur. C'est également relié aux erreurs de correspondance entre la position réelle dans l'image et la position du plan krigé. Une fois validée, l'utilisation du taux de gris comme données pour le krigeage est possible. Les valeurs de taux de gris de l'image moyennée sont extraites et corrigées à l'aide du coefficient multiplicatif puis ajoutées aux vecteurs de donnée du Krigeage. Les limites de l'intervalle où les données sont ajoutées sont : $y = 0$; $0 \leq z \leq 170$; $-2 \leq x \leq 208$.

Le taux de vide interpolé obtenu pour $y = 0$ est montré sur la figure 5.13.

Les données issues des images ont permis d'augmenter la quantité de points expérimentaux. Cependant, il y a également des problèmes de correspondance entre les mesures. Le taux de vide obtenu par Krigeage n'est pas monotone selon X l'axe de l'écoulement ; en effet, une décroissance des valeurs est visible suivi de maxima locaux aux abscisses correspondant aux données de la sonde optique. La figure 5.13 montre que pour de faibles valeurs de taux de vide, les lignes d'iso taux de vide ont une forme particulière entre le plan de la fente et les plans de donnée de la sonde. Ce phénomène est relié au fait que la correspondance entre le

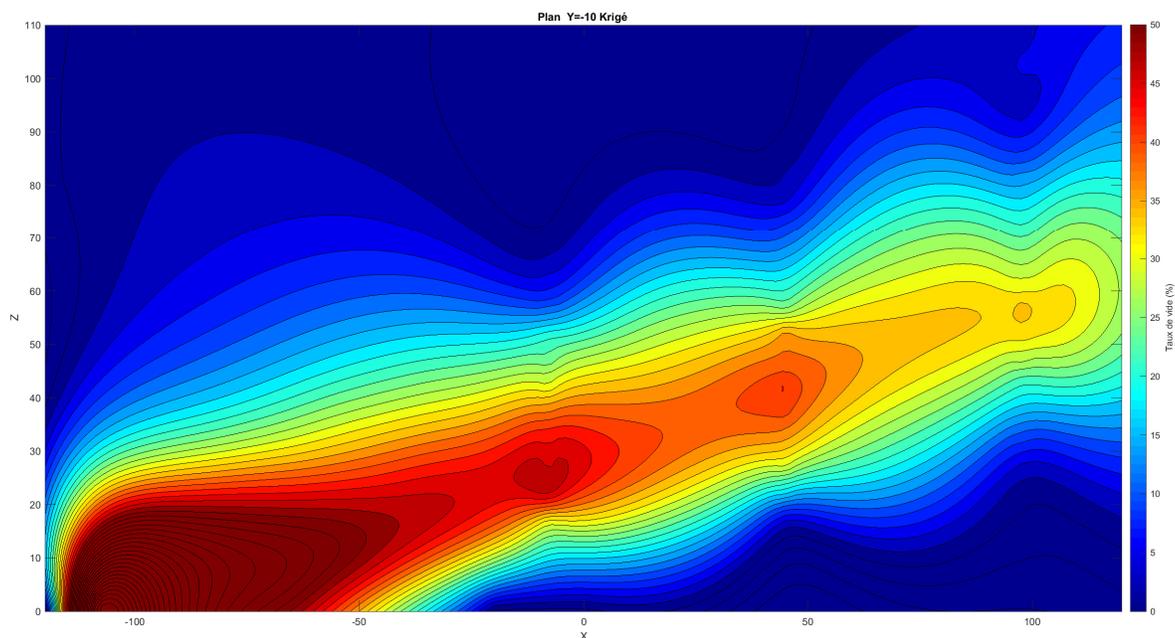


Figure 5.13 Le taux de vide obtenu par Krigeage dans le plan $Y = 0$ suite à l'ajout des données extraites d'images moyennées

taux de gris et les petites valeurs de taux de vide est faible comparé aux grandes valeurs comme le montre la figure 5.12. Les données des images sont plus étalées selon l'axe Z que les données de taux de vide de la sonde c'est ce qui donne cet effet d'ondulation sur la figure 5.13 entre les plans de la fente et $X = 100, 153, 206$ mm.

Le Krigeage avec les données combinées de la sonde optique et des images de la caméra permettent de retrouver la tendance générale du taux de vide dans la veine d'essais. Cependant, les résultats peuvent être améliorés en trouvant de meilleurs réglages pour la prise d'images à l'aide de la caméra. En effet, le mauvais positionnement de la caméra, un éclairage arrière non uniforme, et une saturation des images entraînent une non correspondance entre les valeurs de taux de vide et les valeurs de taux de gris partout dans l'image. De meilleurs réglages permettront d'augmenter la qualité de l'image moyenne et donc d'améliorer la corrélation entre les taux de vide de la sonde et les taux de gris moyennés des images. Une meilleure corrélation permettrait de limiter le problème des ondulations pour les faibles valeurs de taux de vide pour les résultats du Krigeage dans le plan $Y=0$.

5.1.4 Erreurs de mesures

Les erreurs de mesure de pression sont expliquées dans la section **4.4.1 Capteurs de pression** du mémoire de J.Bouvard [5].

Concernant la sonde optique, plusieurs phénomènes induisent des erreurs de mesure :

- Quelques bulles sont aplaties et déformées par la sonde. Cela entraîne une sous-estimation de la taille des bulles. Cependant, la décélération de la bulle près de la fibre induit une surestimation.
- D'autres sont déviées par le premier impact et n'atteignent pas la deuxième fibre. Cela implique que plusieurs bulles sont supprimées, car elles ne sont pas détectées par les deux fibres.
- L'impact peut provoquer un changement soudain de direction et peut également modifier la vitesse des bulles.
- La présence de la sonde optique constitue un obstacle et modifie l'écoulement amont, bien que son impact soit faible. En effet, le taux d'obstruction de la sonde sortie à son maximum est de 3.2%. De plus, la partie où sont logés les cônes des fibres se trouve à 7 cm en amont de la sonde, ce qui permet de limiter l'influence de la structure sur la mesure.

Concernant le taux de vide, il est possible de calculer les erreurs de mesures en comparant les valeurs enregistrées par chacune des deux fibres simultanément au même point. La figure 5.14 montre l'erreur absolue, c'est-à-dire la valeur absolue de la différence entre les valeurs de la fibre 1 et 2. Les erreurs absolues sont en moyenne entre 0.05% et 0.17% et sont plus élevées pour les zones où il y a beaucoup de bulles et où le taux de vide est plus élevé, c'est-à-dire au milieu du nuage. Pour les zones où il y a moins de bulles, donc le haut ou le bas du nuage en fonction du plan X étudié, les erreurs absolues ont de faibles valeurs (autour de 0.02%), car le taux de vide n'est pas très grand.

L'erreur relative est calculée en divisant l'erreur absolue par la moyenne des valeurs des deux fibres. Les cartes des erreurs relatives pour une fente simple et $\beta=0.03$ et 0.09 sont présentées dans la figure E.1. Les erreurs relatives du taux de vide peuvent varier en moyenne entre 2% et 9%. Pour le plan X=100 mm, pour les grandes valeurs de Z, l'erreur relative tend vers l'infini : il y a peu de bulles dans le haut du nuage donc la moyenne de taux de vide est nulle. L'erreur relative pour de grands Z a un dénominateur qui tend vers zéro donc sa valeur tend vers l'infini. Dans le plan suivant, les bulles montent un peu plus en altitude et dans le troisième plan, il y a plus de bulles dans le haut du nuage que dans le bas. Cette évolution des bulles dans la veine coïncide bien avec les erreurs relatives, car moins il y a de bulles dans

une région de la veine, plus les erreurs relatives sont élevées.

Pour s'assurer de la répétabilité des mesures, deux expériences ont été menées pour la fente simple de référence pour des titres volumiques de 0.03 et 0.09. Par la suite, les résultats de taux de vide sont comparés à chaque emplacement de prise de mesure. La figure 5.15 montre les cartes des erreurs absolues des taux de vide entre les deux expériences A1PE7 et A1PE9 pour $\beta=0.03$ à gauche et $\beta=0.09$ à droite. En moyenne, l'erreur absolue pour le taux de vide est seulement de 2%. Les erreurs relatives visibles sur la figure F.1 sont en moyenne entre 0.2% et 0.7% pour le taux de vide. Concernant la taille des bulles et leurs vitesses, l'erreur relative est de 0.3%, ce qui suggère une bonne répétabilité des expériences dans cette étude.

Les pics visibles dans la figure 5.15 représentent les points dans la veine où les mesures sont très différentes. Cela peut être dû à une impureté qui se fixe sur le bout des cônes, ou un mauvais positionnement de la sonde ou encore une perte du signal pendant la mesure. Une fois ces points localisés, il est possible de reprendre les mesures à l'aide de la sonde à ces positions et relancer le traitement afin de s'assurer que les résultats soient cohérents entre eux.

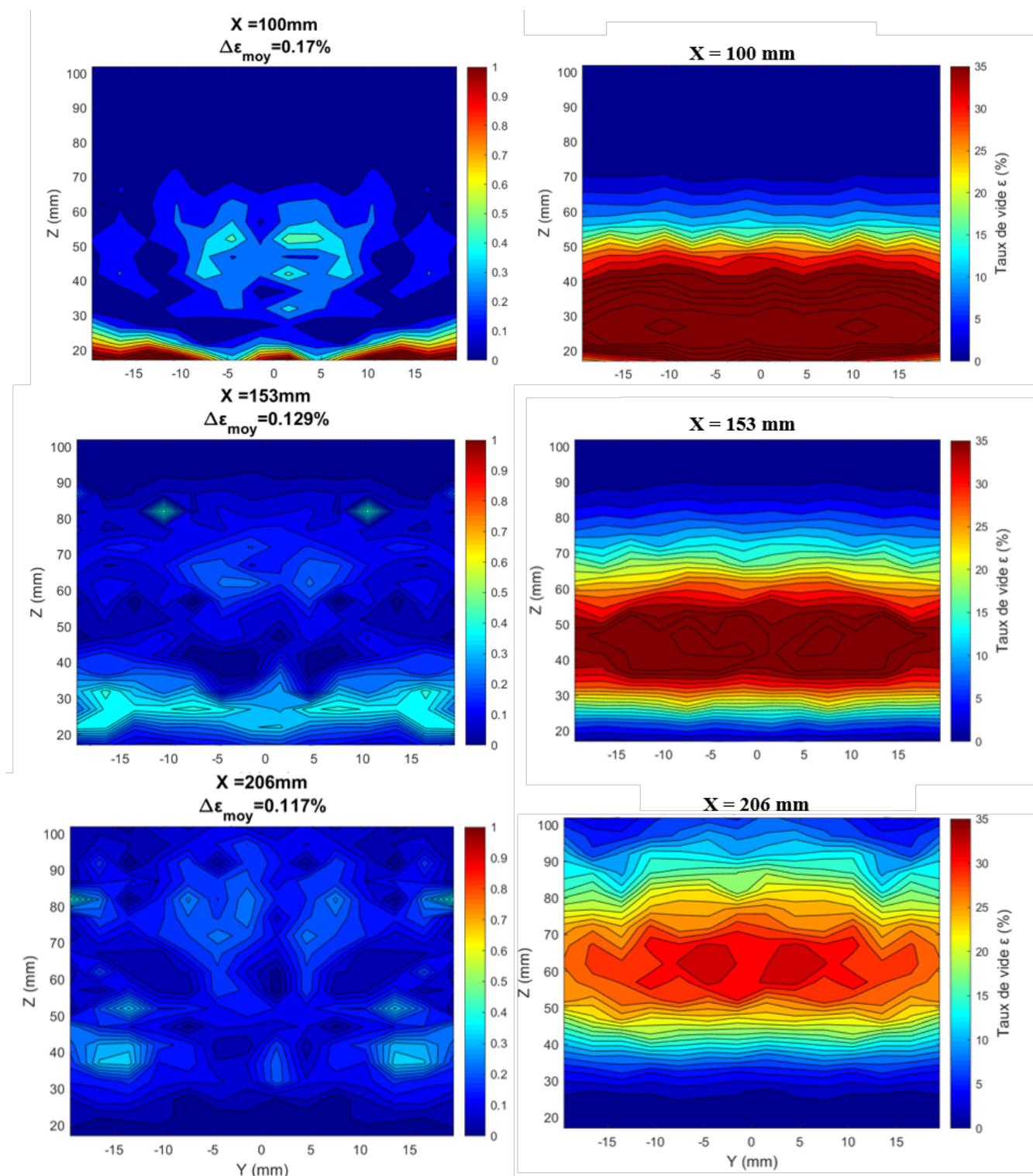


Figure 5.14 Résultats pour le cas de la fente simple : (Colonne de gauche) Erreurs absolues de taux de vide capté par les deux fibres pour $\beta=0.09$. (Colonne droite) Taux de vide captés par les deux fibres pour $\beta=0.09$

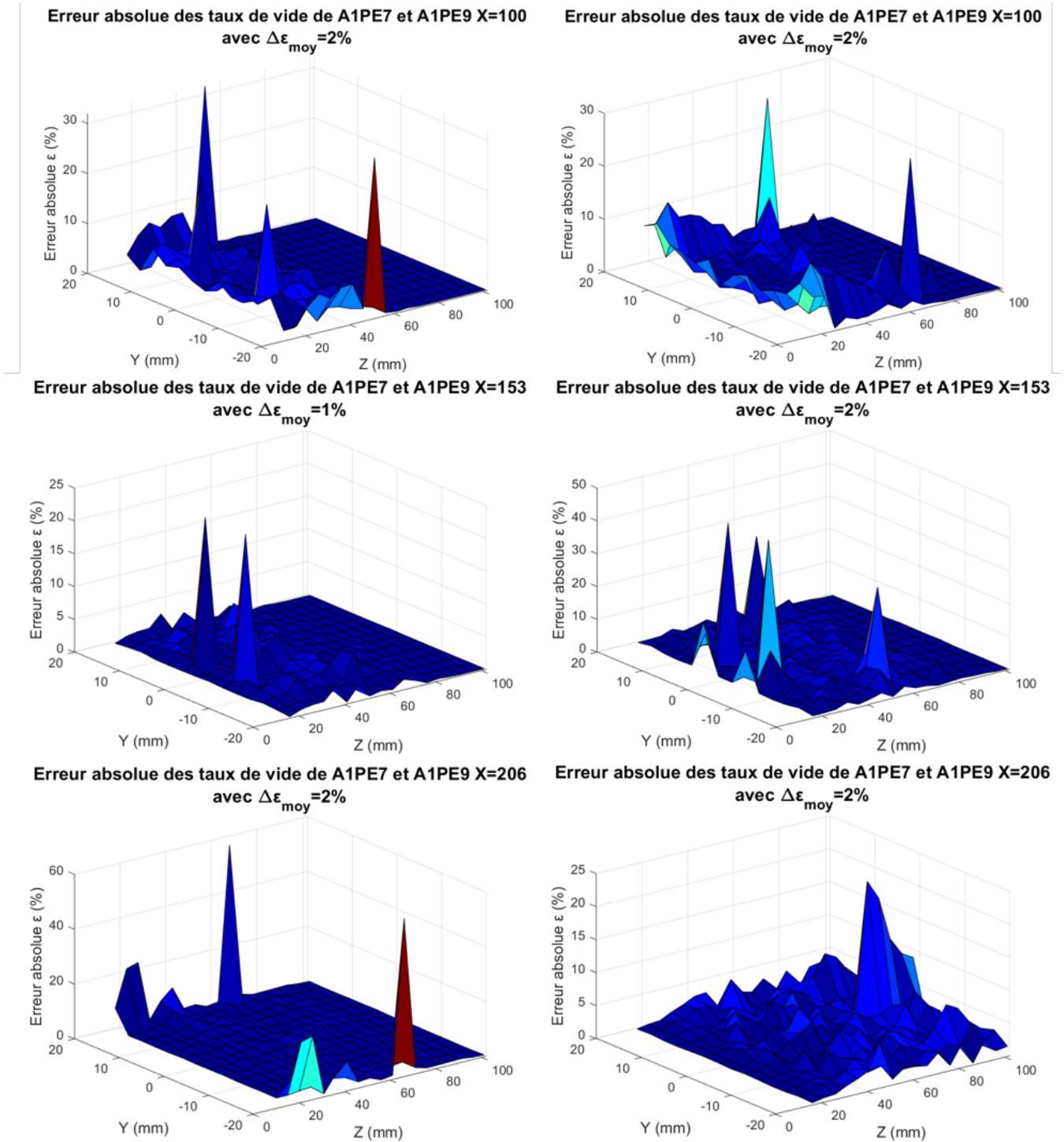


Figure 5.15 Erreurs absolues entre les expériences A1PE7 et A1PE9 de taux de vide mesuré en chaque plan pour $\beta=0.03$ (colonne gauche) et $\beta=0.09$ (colonne droite) pour la fente de référence

5.2 Préparation à la prise de mesure dans le LEGH

Pour caractériser les écoulements, un nouveau paramètre qui tient compte de la vitesse des phases est introduit. La taille de la veine et la géométrie de la fente ne sont plus importantes. Le but est de relier le nouveau paramètre R à un type de nuage pour une géométrie de fente donnée, quelque soit l'environnement dans lequel l'air est injecté, i.e différentes tailles de veines.

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \text{ donc } Q_G = \frac{Q_L \beta}{1 - \beta} \implies \frac{U_G}{U_L} = \frac{S_{veine}}{S_{fente}} \frac{\beta}{1 - \beta}$$

La littérature en numérique fait référence au ratio d'énergie cinétique $R = \frac{\rho_G U_G^2}{\rho_L U_L^2}$.

La relation s'écrit alors :

$$R = \frac{\rho_G}{\rho_L} \left(\frac{S_{veine}}{S_{fente}} \frac{\beta}{1 - \beta} \right)^2$$

Pour deux fentes ayant la même géométrie, mais des surfaces différentes, les conditions d'écoulement sont fixées de manière à avoir le même paramètre R .

Par exemple, les fentes simples de la figure 3.14 ont la même géométrie mais deux surfaces d'injection différentes, sachant que la première a une surface de $S = 0.057 \text{ po}^2$ et l'autre une surface $\frac{S}{2} = 0.028 \text{ po}^2$.

Pour les veines 25×25 , pour la fente de référence, un titre volumique de 0.03 et 0.09 respectivement donne un paramètre R de 3.08 et 31.41. Afin de garder ces mêmes valeurs de R pour la petite fente simple, il faut avoir des titres volumiques de 0.016 et 0.048 respectivement.

Pour les veines 15×15 , pour la fente de référence, un titre volumique de 0.03 et 0.09 respectivement donne un paramètre R de 0.4 et 4.07. Afin de garder ces mêmes valeurs de R pour la petite fente simple, il faut avoir des titres volumiques de 0.016 et 0.048 respectivement.

CHAPITRE 6 CONCLUSION

Dans ce dernier chapitre, un récapitulatif des différents travaux effectués et résultats obtenus est présenté. Les limitations du projet sont discutées afin de proposer des améliorations pour le futur.

6.1 Synthèse des travaux

Ce projet s'inscrit dans la continuité des travaux effectués par J.Bouvard [5] et F.Anne [32]. Le montage expérimental déjà existant est amélioré et différentes mesures sont prises et traitées pour la fente de référence et la fente triple.

Tout d'abord, les mesures de pression ont consolidé les résultats mis en avant par J.Bouvard [5]. En effet, les tubes de Pitot ont mis en avant l'accélération de la phase liquide de l'écoulement entre l'amont et l'aval de la veine qui est dû à la présence du gaz en aval. De plus, la relation entre la perte de charge et le débit volumique d'air injecté est cubique, que ce soit une injection dans l'eau ou dans l'air, pour les deux fentes testées. La différence de relation entre les deux fentes de géométries différentes se traduit seulement par une différence sur le facteur multiplicatif, l'exposant étant identique. On se serait attendu à une relation quadratique typique des relations de pertes de charge.

Ensuite, plusieurs prises de mesures à l'aide de la sonde V1 ont été effectuées pour la fente de référence et la fente triple pour une vitesse d'écoulement de 1.25 m/s et un titre volumique de $\beta = 0.03$ et 0.09. Des protocoles expérimentaux concernant la prise de mesure, la fabrication des fibres et la réparation de la sonde V1 ont été rédigées avec un grand souci de clarté pour une utilisation qui s'annonce fréquente. Le stockage des données et l'arborescence des résultats ont été optimisés et participent à la volonté de rendre la procédure la plus facilement exploitable pour l'utilisateur. Le traitement des données et l'analyse des résultats a donné lieu à plusieurs conclusions :

- La distribution de la taille et de la vitesse des bulles suit une loi log-normale.
- La taille moyenne des bulles détectées va de 200 μm à 45 mm.
- Les bulles générées sont plus grandes pour un grand β , donc un grand R , donc pour un plus grand débit d'air injecté.
- Les grosses bulles se trouvent en haut du nuage. Elles s'élèvent plus dans la veine car la force d'Archimède est plus élevée pour les grosses bulles.
- En moyenne, les bulles sont plus grosses et plus rapides pour la fente triple compara-

tivement à la fente de référence.

- Les bulles accélèrent en s'éloignant de la fente. Leur vitesse va de 0.7 à 2.5 m/s.
- Le taux de vide local moyenné dans le plan diminue quand on s'éloigne de la fente d'injection. Il est plus petit pour $\beta=0.03$ car le débit d'air est moins important. De plus, le taux de vide local est plus grand pour la fente triple car les bulles générées par celle-ci sont plus grosses.
- La vitesse verticale du centre du nuage de bulles diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la fente.

Ces résultats sont obtenus à l'aide des trois plans de mesure. Afin d'obtenir plus d'informations dans l'ensemble de la veine, le Krigeage permet de reconstruire le comportement du taux de vide à partir des données mesurées et des conditions aux limites. Cette méthode d'interpolation donne des résultats limités étant donné le manque de données entre les plans de mesure. Pour résoudre ce problème, des images du nuages de bulles sont prises et moyennées. Le taux de gris est ensuite relié au taux de vide puis ces nouvelles données sont injectées dans le Krigeage. On obtient la carte de taux de vide dans le sens de l'écoulement. Celle-ci peut être améliorée en obtenant une meilleure correspondance entre le taux de vide et le taux de gris des images.

Enfin, la sonde V2 a été conçue, fabriquée et testée. Elle permet d'augmenter la surface de mesure et de libérer l'expérimentateur de l'aspect répétitif de la prise de mesure. En effet, la sonde V2 est motorisée et automatisée grâce à un logiciel Labview. La sonde s'adapte aux deux types de veines qui seront montées dans le LEGH. Ce dernier permet de tester des vitesses d'écoulement plus grandes et de suivre l'évolution des bulles pour une plus longue distance. Pour préparer les travaux futurs, deux chambres à air qui accueillent différentes fentes sont conçues et installées sur les veines. Les trous d'installation de la sonde ont également été creusés dans les plaques bouchons des veines. Leurs emplacements ont été étudiés de manière à optimiser le nombre et la position des plans mesurés.

6.2 Limitations de la solution proposée

Le sujet abordé dans ce mémoire est très complexe. Une partie seulement a pu être étudiée. Cependant les données mesurées ne suffisent pas pour émettre des conclusions sur le nuage. En effet, il manque les informations du haut du nuage dans le dernier plan. Il faut augmenter la surface de prise de mesure, ce qui est à présent possible à l'aide de la sonde V2. Cette dernière est motorisée, mais doit être supervisée pendant la prise de mesure. En effet, le logiciel qui contrôle la sonde est encore sujet à amélioration pour assurer une bonne répétabilité des mesures.

Ensuite, la position de départ de la sonde V2 est fixée à la main par l'expérimentateur. Ce qui peut être source d'erreur concernant les positions de la sonde dans la veine. De plus, le double joint de cardan qui permet de transmettre le mouvement de rotation du moteur au bras rotatif est difficile à fixer avec un angle de 90° . En effet, la rotation est plus compliquée en certaines positions car le joint de cardan se désaxe légèrement afin de minimiser les frottements. Il faut donc un meilleur protocole pour bien fixer/positionner le joint de cardan.

La boucle à pression atmosphérique ne permet pas de tester l'effet de vitesses d'écoulement plus grandes sur le nuage de bulles. Il est également impossible de suivre l'évolution des bulles sur une plus longue distance dans le sens de l'écoulement car la veine d'essai a une longueur de 40 cm seulement.

6.3 Améliorations futures

Pour les prochains travaux menés dans ce sujet, il faut reprendre les mêmes expériences présentées ici, mais cette fois-ci dans le LEGH. En effet, il faut étudier l'effet de différentes vitesses sur les tailles et vitesses des bulles ainsi que sur les distributions de ces paramètres. Une fente simple ayant une surface égale à la moitié de celle de la fente de référence peut être testée afin d'étudier les effets d'échelle sur les bulles générées.

De plus, il faut prendre des mesures en des positions éloignées de la fente afin de savoir si le taux de vide présente une distribution terminale et à partir de quelle distance par rapport à la fente. Cela permettra également d'étudier si les bulles atteignent une vitesse / taille terminale. En effet, les distributions de la taille et la vitesse suivent une loi log-normale que l'on peut caractériser à l'aide des paramètres μ et σ . Si, à partir d'un certain plan, ces paramètres ne varient plus, peut-on considérer que l'on a atteint la vitesse terminale ou les tailles terminales, i.e. qu'il n'y a plus de fractionnement ou de coalescence de bulles ? Ce serait donc une autre manière de considérer que le nuage a atteint sa phase terminale.

Une deuxième sonde V2 doit être fabriquée afin de prendre des mesures en parallèle dans le LEGH et dans la nouvelle boucle à pression atmosphérique construite par G.Recchia [38]. Quelques modifications peuvent être apportées à la sonde V2 notamment le rajout d'un support pour le joint de cardan afin de s'assurer qu'il forme un angle de 90° et qu'il ne se désaxe pas pendant la rotation. Il faut également marquer sur la zone inférieure de la sonde 4.4 les positions 0° , 90° et 180° de manière à ce que les marques soient visibles à travers les vitres de la veine. Cela facilite de positionnement en zéro pour le départ de la prise de mesure. Il serait également très intéressant de mettre un capteur d'angle au niveau du bras rotatif. Celui-ci donnerait la position exacte du bras rotatif au logiciel Labview et permettrait ainsi

de minimiser les erreurs des positions affichées. Cependant, il faut utiliser un capteur d'angle qui aille sous l'eau et qui n'encombre pas l'écoulement.

Concernant l'étude des variations de pression dans la veine, il serait intéressant d'installer des capteurs de pression à la position de chaque plan de mesure afin de relier la pression au taux de vide moyen dans le plan. Enfin, comme expliqué dans la section 5.1.1, la perte de charge entre la chambre à air et l'injection, i.e. à travers la fente, en fonction du débit injecté, suit une loi cubique au lieu d'une loi quadratique, comme nous pourrions le penser [41]. Cela n'est pas dû à un effet diphasique car l'injection de l'air dans la veine remplie d'air donne le même résultat. Il faut approfondir l'étude de ce phénomène en se penchant par exemple sur le rôle de la géométrie de l'injection sur la relation entre la perte de charge et le débit d'air injecté ou sur les effets de compressibilité de l'air dans la gamme de vitesses testées.

Toutes ces données permettront de comprendre l'effet des différents paramètres sur l'injection de l'air à travers des fentes dans un écoulement perpendiculaire à l'injection.

RÉFÉRENCES

- [1] IEA. (2019) Electricity information : overview. All rights reserved. [En ligne]. Disponible : <https://webstore.iea.org/electricity-information-2019-overview>
- [2] B. Florentina *et al.*, *Water Quality in Hydroelectric Sites*, 05 2012, vol. 1, Chapter 20, p. 391–408.
- [3] P. March, “Hydraulic and environmental performance of aerating turbine technologies,” communication présentée à EPRI Conference on Environmentally Enhanced Hydropower Turbines, Washington, D.C., 19-21 mai 2011.
- [4] “Maintaining and monitoring dissolved oxygen at hydroelectric projects,” Electric Power Research Institute, Rapport technique, 2002. [En ligne]. Disponible : <https://www.epri.com/#/pages/product/1005194/>
- [5] J. Bouvard, “Étude de l’injection de bulles d’air dans un écoulement d’eau,” mémoire de maîtrise, Dép. de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, 2018. [En ligne]. Disponible : <https://publications.polymtl.ca/3271/>
- [6] M. Sabourin. (2019) Hydraulique pour les turbines - capsules théoriques. [En ligne]. Disponible : https://michelsabourin.scenari-community.org/SimTurbTech/co/SimTurbTech_web_4.html
- [7] G. B. Sahoo et D. Luketina, “Modeling of bubble plume design and oxygen transfer for reservoir restoration,” *Water Research*, vol. 37, n°. 2, p. 393 – 401, 2003. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313540200283X>
- [8] C. canadien des ministres de l’environnement, “Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique — oxygène dissous (eau douce),” *Conseil canadien des ministres de l’environnement, Winipeg, Le Conseil*, 1999.
- [9] B. Papillon *et al.*, “Methods for air admission in hydroturbines,” communication présentée à Proceedings of the XXIst IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, 9-12 septembre 2002.
- [10] P. Hopping, P. March et T. Brice, “Update on development of auto-venting turbine technology, waterpower 1997,” communication présentée à Proceedings of the International Conference on Hydropower, ASCE, Atlanta, Georgia, Août 1997.
- [11] D. F. McGinnis et J. C. Little, “Predicting diffused-bubble oxygen transfer rate using the discrete-bubble model,” *Water Research*, vol. 36, n°. 18, p. 4627 – 4635, 2002. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135402001756>

- [12] R. Kumar et N. Kuloor, “The formation of bubbles and drops,” ser. Advances in Chemical Engineering, T. B. Drew *et al.*, édit. Academic Press, 1970, vol. 8, p. 255 – 368. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065237708601866>
- [13] M. Jamialahmadi *et al.*, “Study of bubble formation under constant flow conditions,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 79, n^o. 5, p. 523 – 532, 2001, fluid Flow. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876201720783>
- [14] K. Akita et F. Yoshida, “Gas holdup and volumetric mass transfer coefficient in bubble columns. effects of liquid properties,” *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, vol. 12, n^o. 1, p. 76–80, 1973. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1021/i260045a015>
- [15] L. Davidson, “Formation of gas bubble at horizontal orifices,” thèse de doctorat, Columbia University, New York, 1951.
- [16] S. M. Bhavaraju, T. W. F. Russell et H. W. Blanch, “The design of gas sparged devices for viscous liquid systems,” *AIChE Journal*, vol. 24, n^o. 3, p. 454–466, 1978. [En ligne]. Disponible : <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.690240310>
- [17] I. E. L. Neto, D. Z. Zhu et N. Rajaratnam, “Bubbly jets in stagnant water,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 34, n^o. 12, p. 1130 – 1141, 2008. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301932208001031>
- [18] S. C. Chuang et V. W. Goldschmidt, “Bubble Formation Due to a Submerged Capillary Tube in Quiescent and Coflowing Streams,” *Journal of Basic Engineering*, vol. 92, n^o. 4, p. 705–711, 12 1970. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1115/1.3425114>
- [19] E. Sada *et al.*, “Bubble formation in flowing liquid,” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 56, n^o. 6, p. 669–672, 1978. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.5450560603>
- [20] A. K. Ghosh et J. Ulbrecht, “Bubble formation from a sparger in polymer solutions—ii. moving liquid,” *Chemical Engineering Science*, vol. 44, n^o. 4, p. 969 – 977, 1989. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250989852698>
- [21] H. N. Oguz et A. Prosperetti, “Dynamics of bubble growth and detachment from a needle,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 257, p. 111–145, 1993.
- [22] A. Bhunia *et al.*, “Bubble formation in a coflow configuration in normal and reduced gravity,” *AIChE Journal*, vol. 44, n^o. 7, p. 1499–1509, 1998. [En ligne]. Disponible : <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.690440704>

- [23] C. Maier, “Producing small bubbles of gas in liquids by submerged orifices,” *Bulletin of the U.S. Bureau of Mines*, vol. 260, n°. 62, 1927.
- [24] H. Tsuge et S.-I. Hibino, “Bubble formation from an orifice submerged in liquids,” *Chemical Engineering Communications*, vol. 22, n°. 1-2, p. 63–79, 1983. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/00986448308940046>
- [25] S. Marshall, “Air bubble formation from an orifice with liquid cross-flow,” thèse de doctorat, University of Sydney, Australia, 1990. [En ligne]. Disponible : <http://hdl.handle.net/2123/5343>
- [26] G. Rigby, G. Evans et G. Jameson, “Modelling of gaz flow from a submerged orifice in a liquid cross-flow,” *Trans.Instn Chem. Engrs*, vol. 73A, p. 234–240, 1995.
- [27] S. Forrester, C. Rielly et K. Carpenter, “Gas-inducing impeller design and performance characteristics,” *Chemical Engineering Science*, vol. 53, n°. 4, p. 603 – 615, 1998. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250997003527>
- [28] P. Wace, M. Morrell et the late J. Woodrow, “Bubble formation in a transverse horizontal liquid flow,” *Chemical Engineering Communications*, vol. 62, n°. 1-6, p. 93–106, 1987. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/00986448708912053>
- [29] L. Rayleigh, “Xix. on the instability of cylindrical fluid surfaces,” *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 34, n°. 207, p. 177–180, 1892. [En ligne]. Disponible : <https://doi.org/10.1080/14786449208620304>
- [30] W. W. Zhang et D. Zhu, “Bubble characteristics of air-water bubbly jets in crossflow,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 55, p. 156–171, 10 2013.
- [31] M. A. Balzán, R. S. Sanders et B. A. Fleck, “Bubble formation regimes during gas injection into a liquid cross flow in a conduit,” *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 95, n°. 2, p. 372–385, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cjce.22680>
- [32] F. Anne, “Conception de section d’essai et de méthodes d’analyse de mesures d’écoulement diphasique,” Rapport de stage, Polytechnique Montréal, Montréal, QC, 2018.
- [33] R. Krishna *et al.*, “Rise velocity of a swarm of large gas bubbles in liquids,” *Chemical Engineering Science*, vol. 54, n°. 2, p. 171 – 183, 1999. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250998002450>
- [34] T.-Y. Sun et G. Faeth, “Structure of turbulent bubbly jets—i. methods and centerline properties,” *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 12, n°. 1, p. 99 – 114, 1986. [En ligne]. Disponible : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0301932286900066>

- [35] J. H. Milgram, “Mean flow in round bubble plumes,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 133, p. 345–376, 1983.
- [36] T. K. Fanneløp, S. Hirschberg et J. Küffer, “Surface current and recirculating cells generated by bubble curtains and jets,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 229, p. 629–657, 1991.
- [37] F. Trochu, *Krigeage dual et applications en modélisation géométrique*. Polytechnique Montréal : MEC6310, 2018.
- [38] G. Recchia, “Injection sur un profil aérant,” mémoire de maîtrise, Dép. de génie mécanique, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, 2020.
- [39] L. Dutheil, “Mesure et interpolation de données de taux de vide d’un nuage de bulle d’air dans un écoulement d’eau,” Rapport de stage, Polytechnique Montréal, Montréal, QC, 2019.
- [40] S. Sved, “A new laboratory to study high-velocity two-phase flows,” communication présentée à 38th IAHR world congress on Water Connecting the World, Panama, 1-6 septembre 2019.
- [41] F. White, *Fluid mechanics, wcb*. Boston : McGraw-Hill, 1999.

ANNEXE A DIMENSIONNEMENT DU BRAS DE LA SONDE ET SURFACE DE PRISE DE MESURE

A.1. Dimensions du bras rotatif de la sonde

Mise en situation : La sonde est fixée sur le côté ou sur le haut de la veine à section carrée. On cherche le rayon du bras rotatif comme défini dans la figure A.1

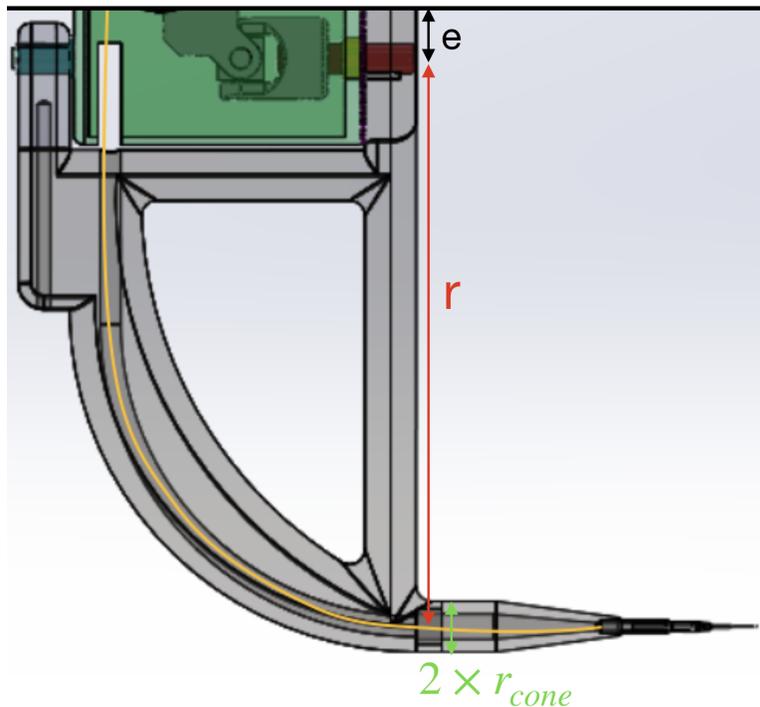


Figure A.1 Les dimensions du bras rotatif. e correspond à la différence entre le centre du bras rotatif et la paroi intérieure de la veine quand la sonde est positionnée en retrait maximal

Deux possibilités s'offrent à nous :

1 - Le rayon correspond à peu près à la moitié de la largeur de la veine :

$$r = \frac{L}{2} - r_{cone} - d_{secu}$$

avec $d_{secu} = 5\text{mm}$, $r_{cone} = 5\text{ mm}$ et L la largeur de la veine (15 ou 25 cm).

Pour la veine $15 \times 15\text{ cm}^2$, $r = 65\text{ mm}$ et pour la veine $25 \times 25\text{ cm}^2$, $r = 115\text{ mm}$.

2 - Le bras rotatif en position de retrait maximal doit atteindre la moitié de la veine moins une certaine distance s afin de vérifier la symétrie :

$$r = \frac{L}{2} - e - s$$

avec $e=6$ mm et $s=7$ mm pour la veine 15×15 cm² et $s=17$ mm pour la veine 25×25 cm². En effet, la distance de vérification de symétrie est plus grande pour la grande veine. Pour la veine 15×15 cm², $r = 62$ mm et pour la veine 25×25 cm², $r=102$ mm.

A.2. Surface de prise de mesure

Le schéma ci-dessous montre les différentes variables.

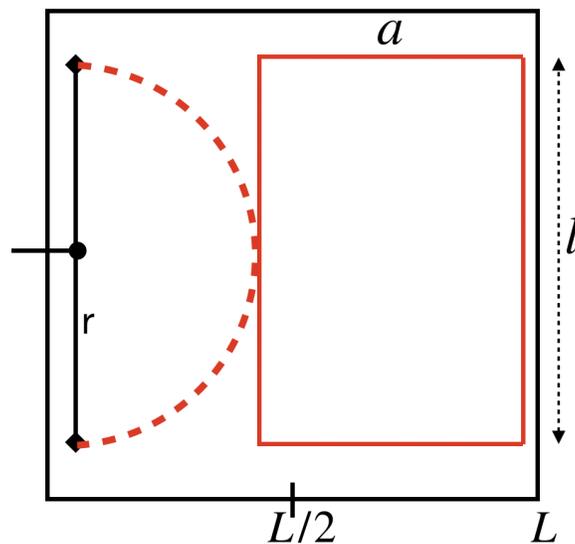


Figure A.2 Schéma de la surface de prise de mesure dans le cas où la sonde est installée sur le côté de la veine

$l = 2r$ et $a = \frac{L}{2} - (r_{cone} + d_{secu}) + s$ avec $d_{secu} = 5$ mm et $s = 7$ ou 17 mm pour les veines 15×15 cm² et 25×25 cm².

On a donc :

$$S_{mesurée} = 2r \times \left(\frac{L}{2} + s - r_{cone} - d_{secu} \right)$$

La surface totale de données après avoir effectué la symétrie se calcule ainsi :

$$S_{tot} = 2 \times 2r \times \left(\frac{L}{2} - r_{cone} - d_{secu} \right)$$

Pour la veine $15 \times 15 \text{ cm}^2$: $S_{tot} = 16120 \text{ mm}^2$ soit 72% de S_{veine} qui équivaut à $150 \times 150 \text{ mm}$ donc 22500 mm^2 .

Pour la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$: $S_{tot} = 46920 \text{ mm}^2$ soit 75% de S_{veine} qui équivaut à $250 \times 250 \text{ mm}$ donc 62500 mm^2 .

ANNEXE B EMBLACEMENT DE LA SONDE V2 DANS LA VEINE

Plusieurs plans de mesures sont possibles pour la sonde V2 dans la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$. Le tableau ci-dessous donne la distance entre la fente de référence et le plan où la sonde prend les mesures. Chaque colonne du tableau correspond à une plaque bouchon trouée disposée dans un sens ou dans l'autre. La première ligne du tableau correspond à la plaque d'injection. Les autres lignes correspondent au compartiment de la veine dans lequel la plaque est fixée.

	Plaque 1		Plaque 2		Plaque 3
					
	Veine 1		Veine 1		Veine 1
45 mm		111 mm		200 mm	
Négatif		Négatif		Négatif	
	Veine 2		Veine 2		Veine 2
820 mm		887 mm		975 mm	
714 mm		647 mm		560 mm	
	Veine 3		Veine 3		Veine 3
1594 mm		1660 mm		1749 mm	
1488 mm		1422 mm		1334 mm	

Figure B.1 Les différents emplacements de passage de la sonde V2 dans la veine $25 \times 25 \text{ cm}^2$

ANNEXE C RÉSULTATS DES EXPÉRIENCES SUR LA BOUCLE À PRESSION ATMOSPHERIQUE

Les résultats des expériences menées dans le cadre de cette étude sont montrés ci-dessous. Chaque tableau correspond aux résultats pour une des deux fentes testées : fente de référence ou fente triple (Figure 3.2). La colonne de gauche correspond aux résultats pour un titre de l'écoulement $\beta=3\%$ et la colonne de droite aux résultats pour $\beta=9\%$. Chaque ligne correspond à un plan dans la veine. Ici, les plans étudiés sont $X = 100$ mm, 153 mm et 206 mm par rapport au point de référence de la fente. De haut en bas, la distance entre la fente et le plan augmente.

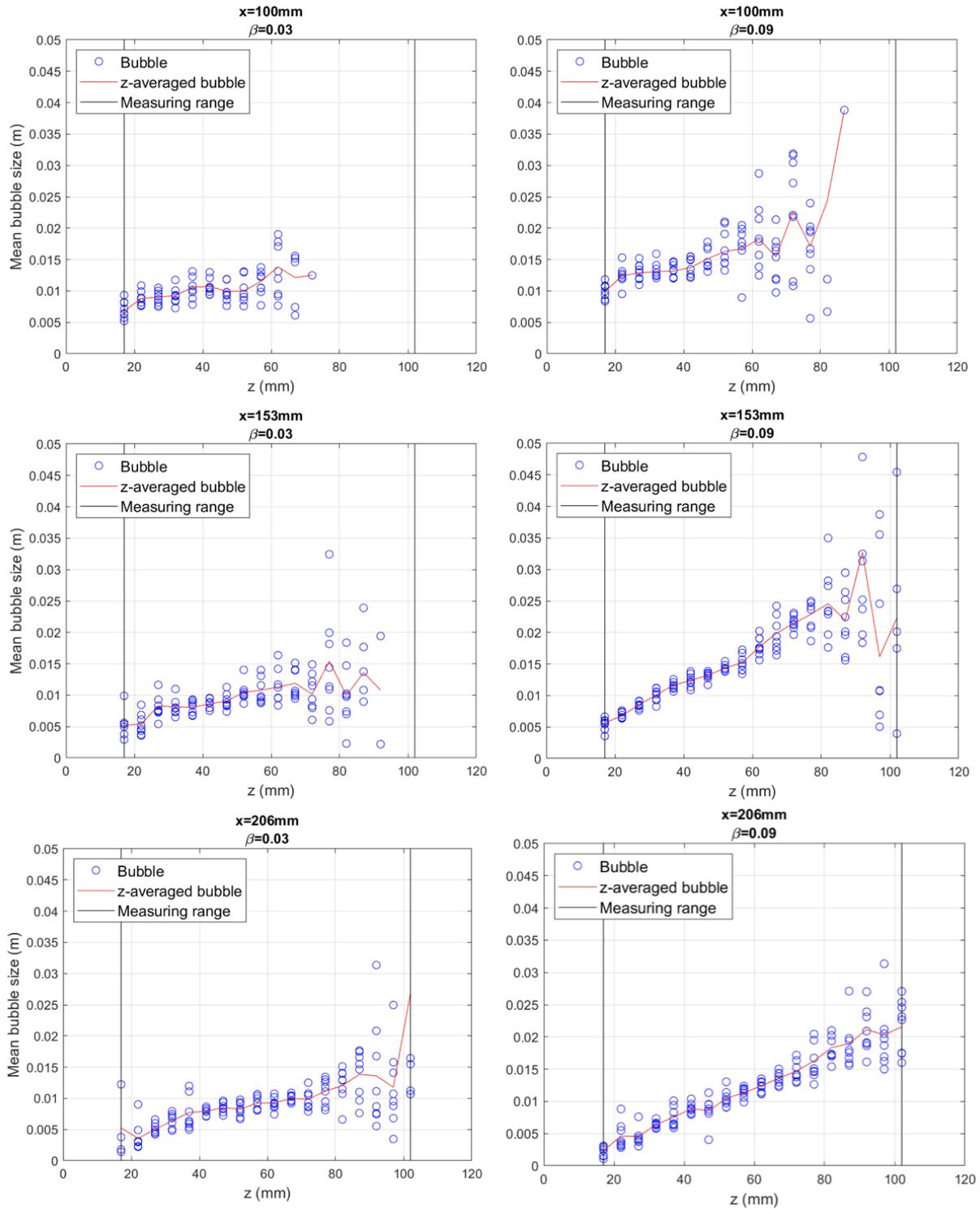


Figure C.1 La taille moyenne des bulles en fonction de la hauteur dans la veine 10×17 cm pour la fente de référence

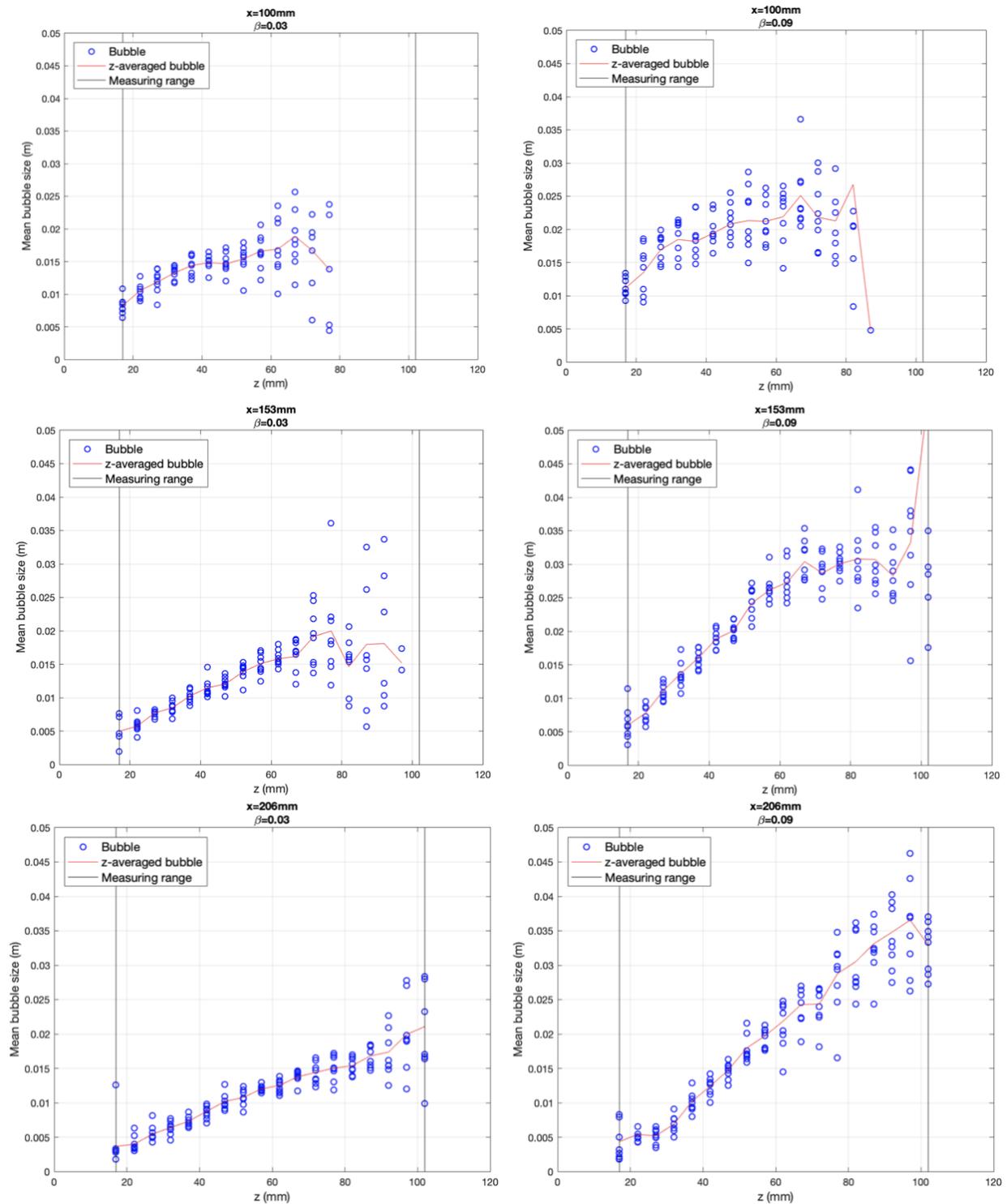


Figure C.2 La taille moyenne des bulles en fonction de la hauteur dans la veine 10×17 cm pour la fente triple

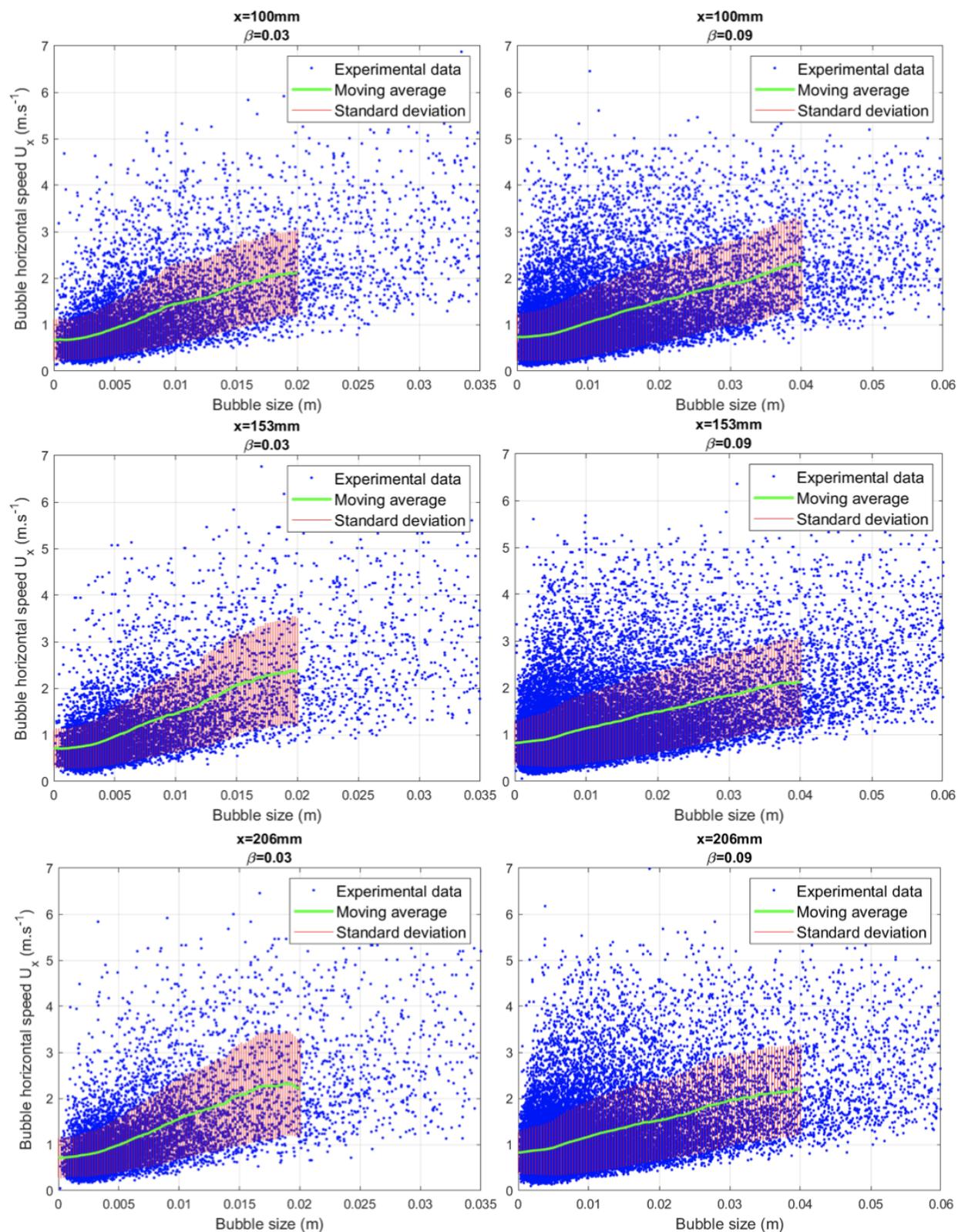


Figure C.3 La vitesse horizontale des bulles en fonction de leurs tailles pour un écoulement dans la veine 10×17 cm pour la fente de référence

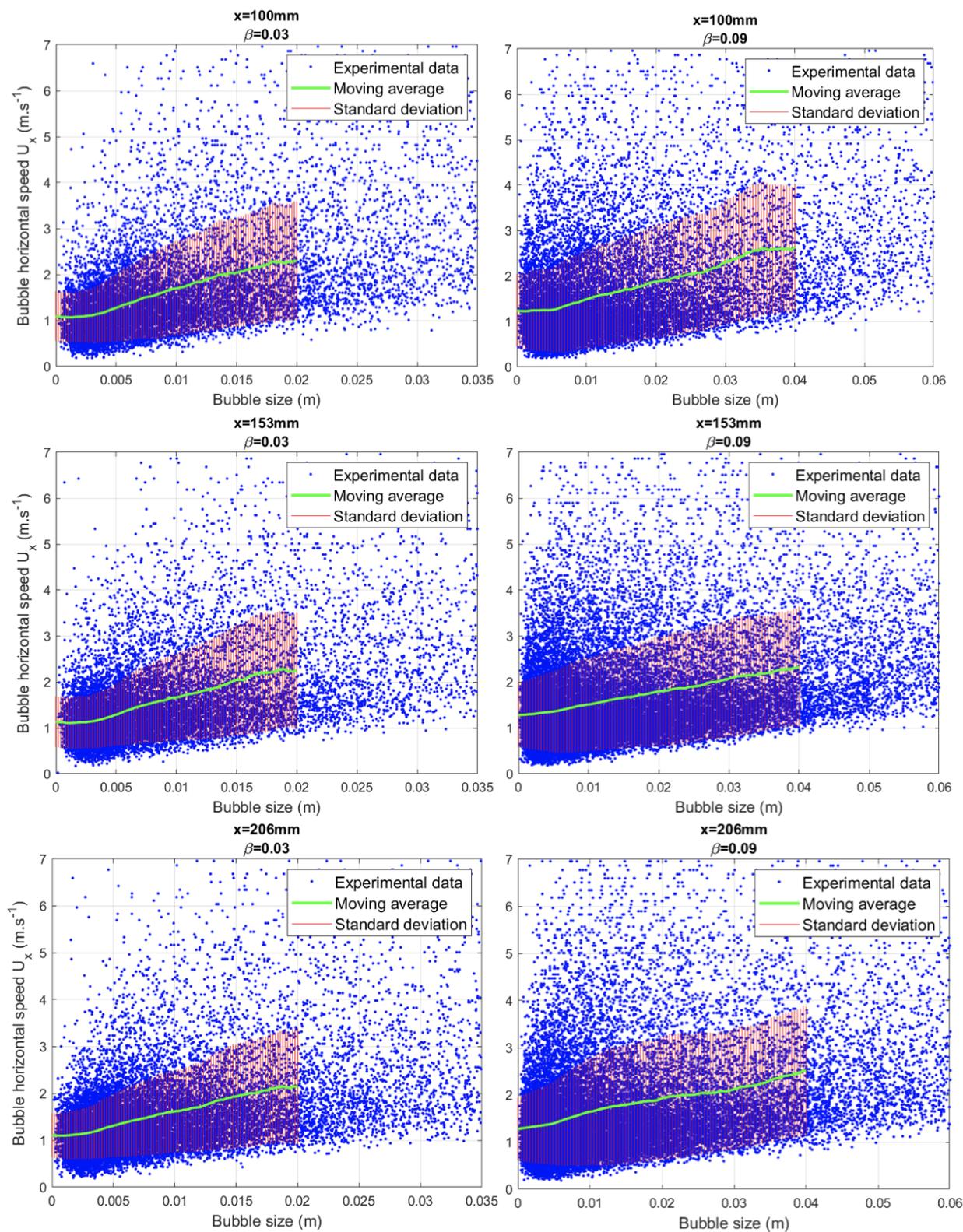


Figure C.4 La vitesse horizontale des bulles en fonction de leurs tailles pour un écoulement dans la veine 10×17 cm pour la fente triple

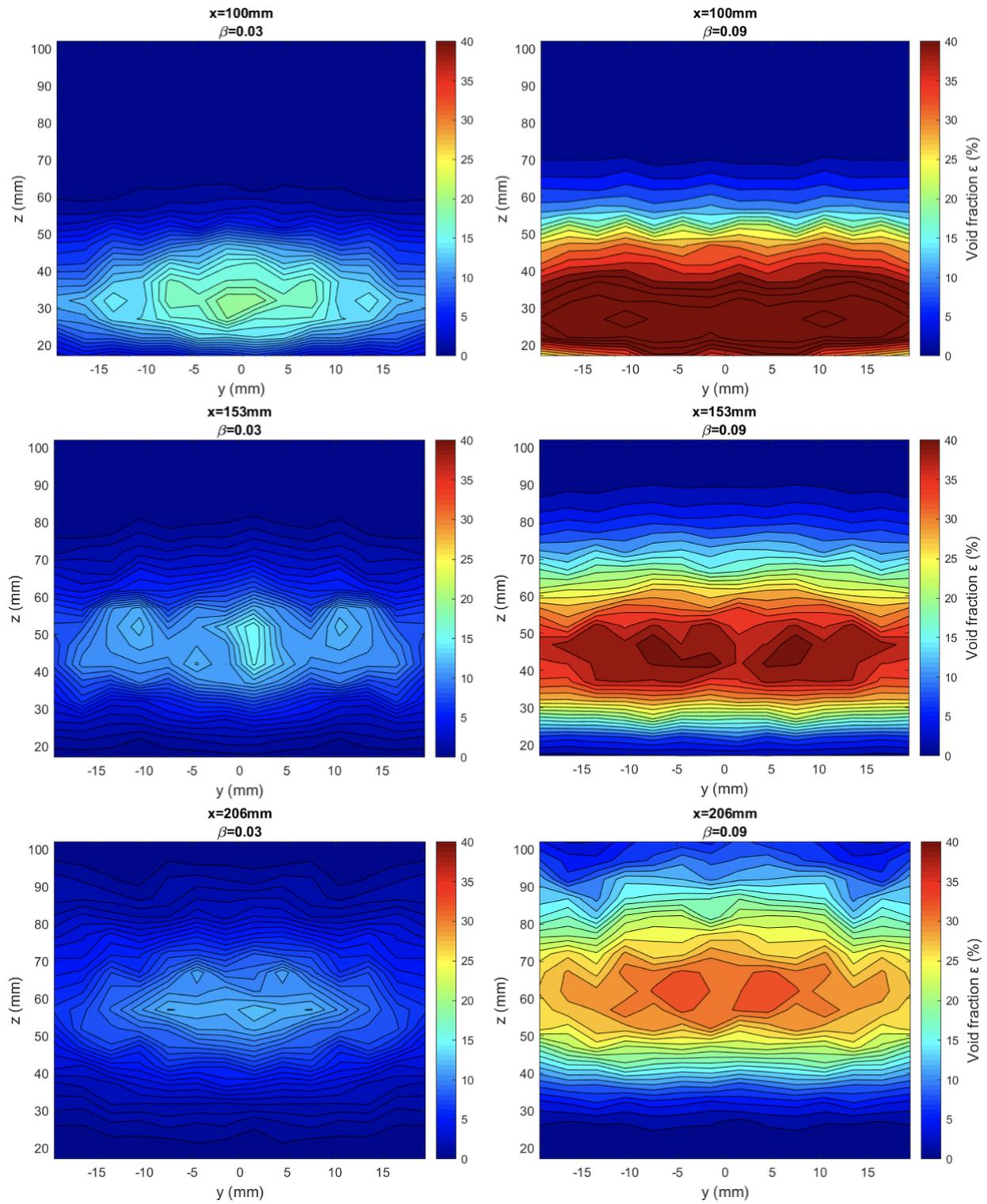


Figure C.5 La carte du taux de vide local dans la veine 10×17 cm pour la fente de référence

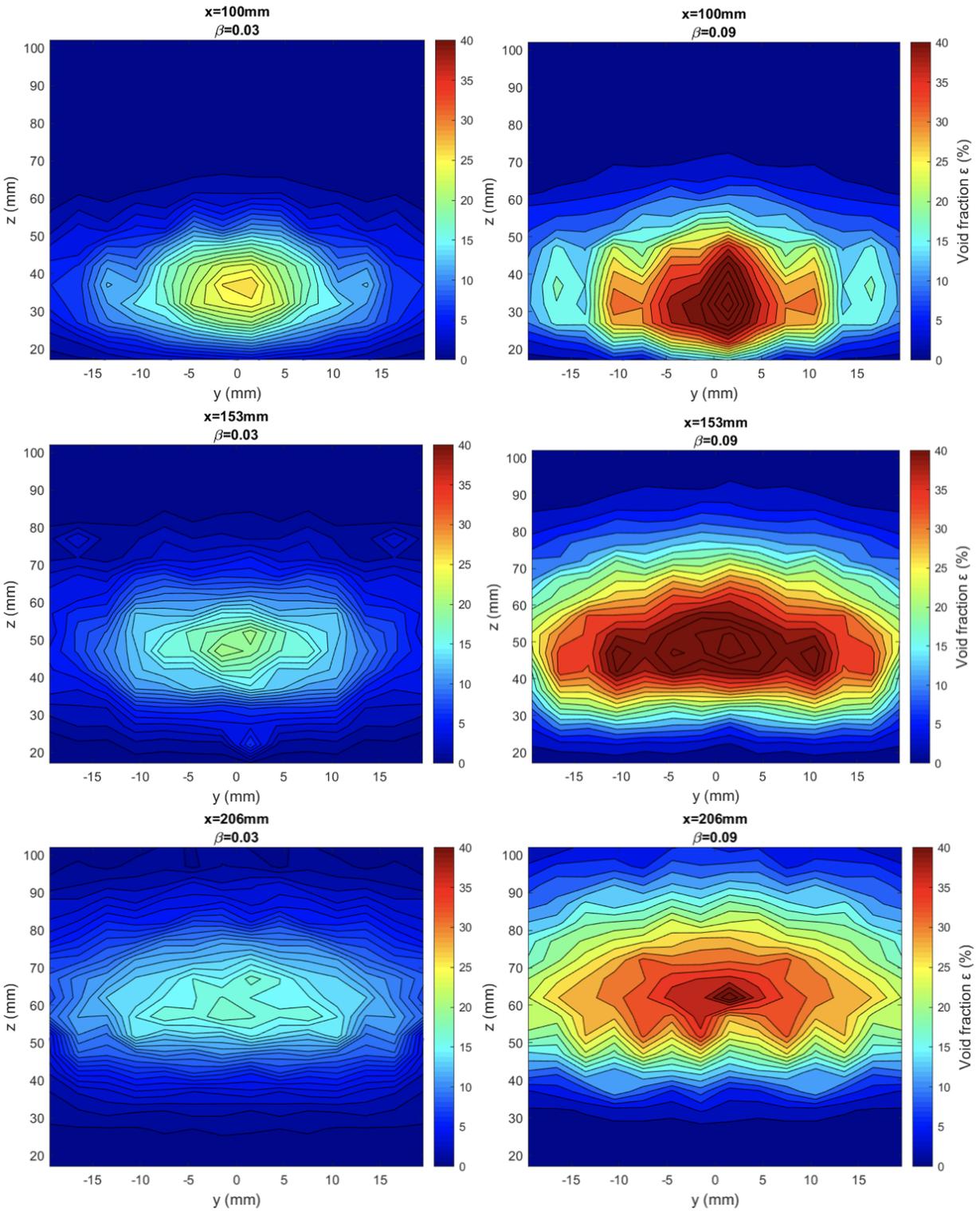
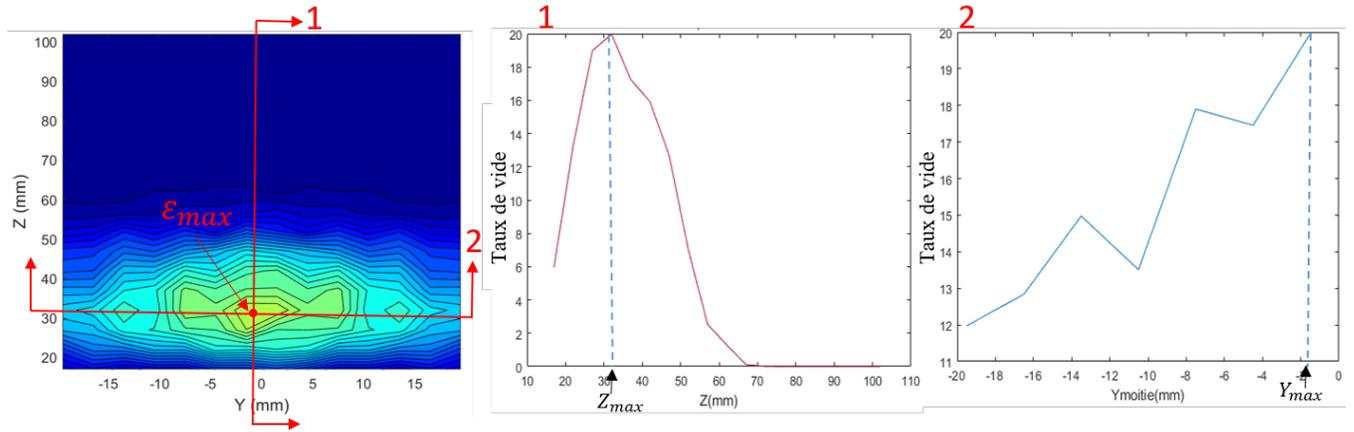


Figure C.6 La carte du taux de vide local dans la veine 10×17 cm pour la fente triple

ANNEXE D ÉTAPES POUR L'OBTENTION DES GRAPHES DE LA FIGURE 5.8

Pour chaque figure C.5 et C.6, la valeur maximale du taux de vide est déterminée ainsi que ses positions Y_{max} et Z_{max} . Deux coupes sont réalisées à ces positions-là, ce qui permet de tracer le taux de vide en fonction de Z pour $Y=Y_{max}$ et le taux de vide en fonction de Y pour $Z = Z_{max}$. Étant donné que le nuage est symétrique par rapport à Y , une fois le Y_{max} déterminé, les étapes suivantes se font sur la moitié des valeurs de Y où se trouve le Y_{max} . Un exemple des courbes obtenues est montré dans la figure ci-dessous.



Pour chaque figure de taux de vide en fonction de Y ou Z , l'écart à la valeur maximale est calculé ainsi :

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_k^N \varepsilon_k (Y_{max} - Y_k)^2}{\sum_k^N \varepsilon_k}} \quad \text{et} \quad \sigma_Z = \sqrt{\frac{\sum_k^N \varepsilon_k (Z_{max} - Z_k)^2}{\sum_k^N \varepsilon_k}}$$

À partir des valeurs de σ_Y et σ_Z , il est possible d'avoir une représentation de la dispersion autour de la valeur maximale du taux de vide. En observant les contours des cartes de taux de vide, la figure qui s'en rapproche le plus est l'ellipse. L'étude est effectuée sur la moitié des valeurs Y donc pour représenter la distribution, une demi-ellipse est tracée. On considère que le centre de la demi-ellipse correspond à (Y_{max}, Z_{max}) . Le demi-grand axe (selon Y) correspond au σ_Y et le demi-petit axe correspond à σ_Z (figure D.1). Ensuite, on symétrise le résultat par rapport à $Y = 0$. Il ne reste qu'à relier les deux demi-ellipses à l'aide de droite entre Y_{max} et $-Y_{max}$. Une étude plus approfondie de ce qui se passe à ce niveau est nécessaire.

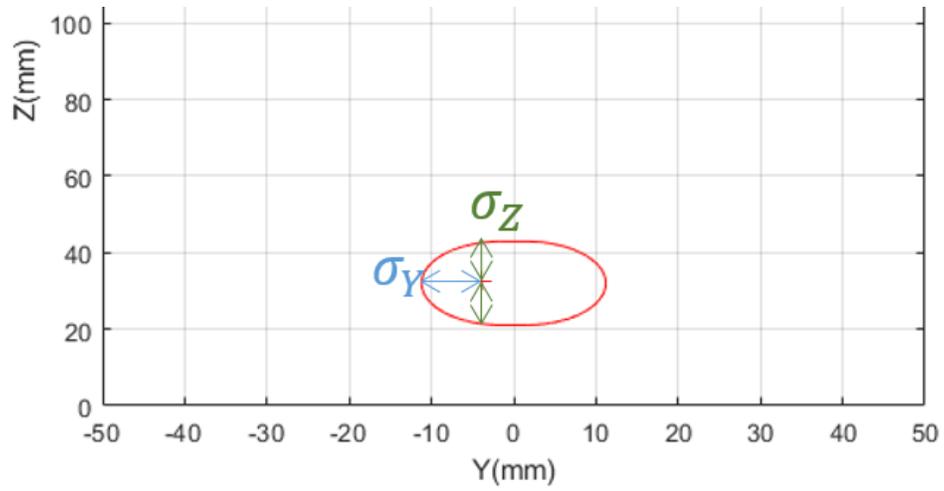


Figure D.1 Explication de la procédure pour tracer les ellipses de distribution du taux de vide

ANNEXE E ERREURS RELATIVES POUR LES TAUX DE VIDE CAPTÉS PAR LES DEUX FIBRES

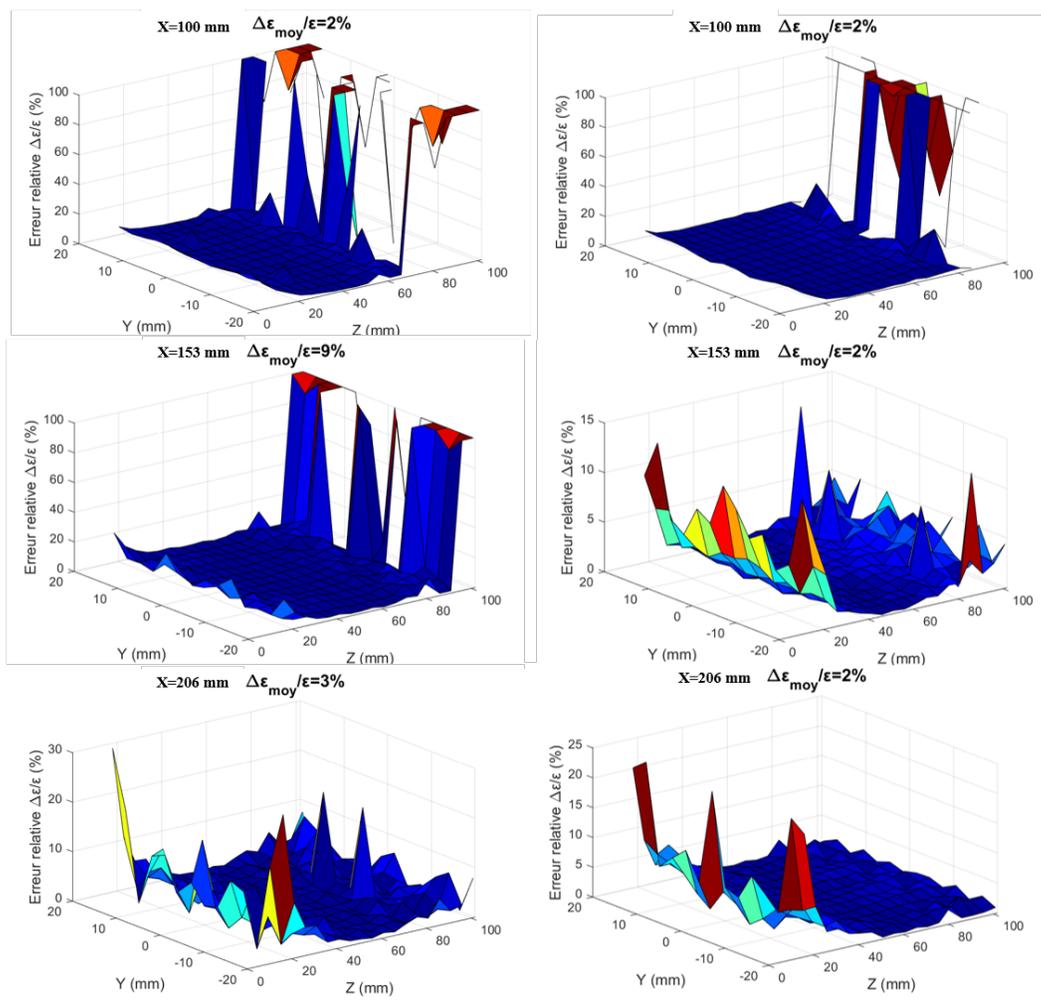


Figure E.1 Erreurs relatives des taux de vide captés par les deux fibres pour une fente simple à $\beta=0.03$ (à gauche) et $\beta=0.09$ (à droite)

ANNEXE F ERREURS RELATIVES POUR LES TAUX DE VIDE ENTRE DE EXPERIENCES

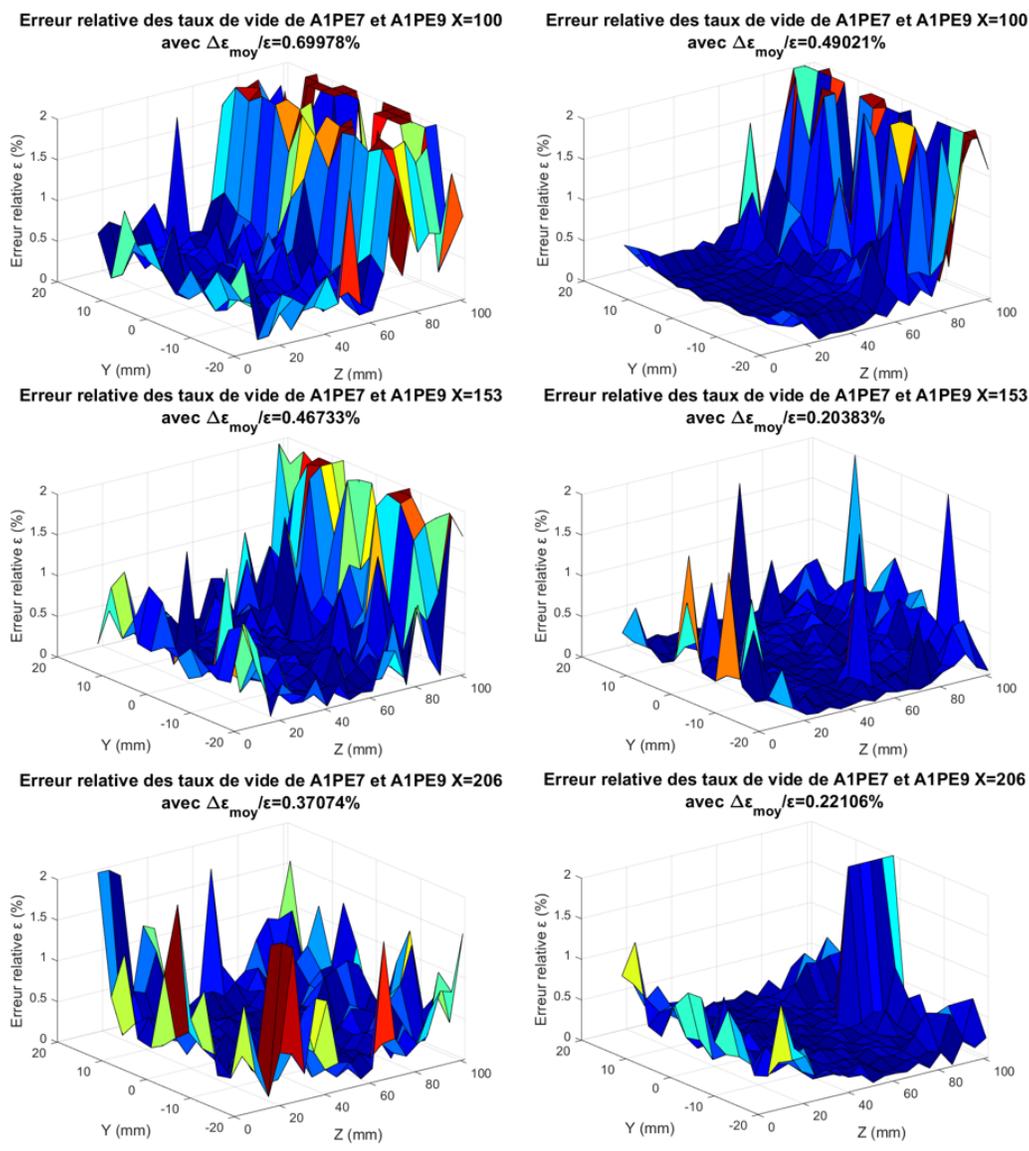


Figure F.1 Erreurs relatives entre les expériences A1PE7 et A1PE9 de taux de vide mesuré en chaque plan pour $\beta=0.03$ (colonne gauche) et $\beta=0.09$ (colonne droite) pour la fente de référence